

第2章

既製杭（SC杭，PRC杭，PHC杭）の曲げ破壊実験

2.1 はじめに

2.1.1 研究背景

杭基礎の地震被害は、兵庫県南部地震など大規模な地震発生の際に報告されているが、2011年3月の東北地方太平洋沖地震でも広範囲での損傷被害が見られた。調査結果^[2-1]によれば、被害のあった建物の建設年代、規模や地盤条件は様々であったが、杭種としてはすべて既製コンクリート杭であった。この中には比較的建設年代が新しく、耐震設計が行われた建物も含まれていたが、上部構造の被害が軽微であるにもかかわらず杭体の破損によって建物が傾斜し、継続使用できなくなった事例も見られた。

杭体の地震被害の歴史を遡れば、新潟地震（1964）や十勝沖地震（1968）において地盤の液状化や盛土斜面の崩壊によるRC杭の損傷が報告されている。さらに、宮城県沖地震（1978）では地盤の液状化や盛土斜面の崩壊などの比較的特殊な原因によるものではなく、地震力の作用のみによるPHC杭の破壊が報告された。これにより、杭体は水平力に抵抗する構造部材であると明確に認識されることとなった。

1981年の新耐震設計法（建築基準法施行令）以降、上部構造の設計では「中小地震に対しては建物を弾性範囲に保ち、極めて稀に発生する地震に対しては倒壊、崩壊しないことを保証する」という2段階設計が適用されている。一方で基礎構造の耐震設計に関しては、1984年に建設省住宅局建築指導課から「地震力に対する建築物の基礎の設計指針^[2-2]」の取り扱いに関する通達が出され、2001年の告示^[2-3]により1次設計が義務化された。しかし、現在でも統一的な2次設計の手法は確立に至っておらず、許容応力度設計・弾性設計が主体である。

基礎構造設計指針^[2-4]によれば、塑性変形を考慮した杭基礎の設計を行う場合、杭頭部については実験結果等に基づき曲げモーメント M と杭頭回転角 θ の関係を設定し、評価を行うことが可能であるとされる。一方で、杭体全長にわたって非線形性を考慮した設計を行う際は杭体を深さ方向に分割し、地盤反力ばねを取付けた解析等を行うが、この場合については杭体を曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係でモデル化する方法が例示されている。

既製コンクリート杭では、性能試験は無軸力下における設計耐力の確認を目的として行われることが多い。また、コンクリートの打設後に遠心力による成形、オートクレーブ養生を行う既製コンクリート杭ではPHC杭、PRC杭内部のPC鋼材、異形鉄筋のひずみを計測することは少なく、鋼材の降伏は直接確認されていない。さらに、既製コンクリート杭に関する既往研究の多くは、スタブに接合した片持ち梁形式の加力による曲げせん断性状に関するものである^{例えば[2-10][2-11]}。これはパイルキャップに接合された杭頭部を想定しており、実際の杭頭部に近い状況で耐震性能の評価を行うことが可能である。しかし、曲げ性状のみに着目すれば、この形式では材軸方向にモーメント勾配が存在しせん断力が作用するほか、杭頭部とパイルキャップ間のめり込み、抜け出しによる回転が発生し、杭体の曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係を正確に計測することは困難である。

以上のように、曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係に着目した杭体の曲げ性状については十分に把握されているとはいいがたく、特に地震による軸力変動を考慮した高圧縮軸力、引張軸力下における実験例はほとんど皆無である。また、杭体の曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係は平面保持を仮定した断面解析によって算出されるが、その精度は限られた範囲の実験結果によってしか確認されていない（文献^[2-5]によれば既往の杭体曲げ試験は杭径600mm以下が大半であり、軸力比0～0.3程度の範囲）。このことは、前述のように2次設計、特に変形性能を考慮した設計手法が一般化するに至っていないことの一因であるといえる。

軸力変動を考慮した広範な作用軸力下において、杭体の曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係に着目した終局曲げ性状に関するデータを蓄積することは、杭体が地震に対しどのような挙動を示すのかを把握するために重要であり、新耐震法の確立に不可欠であると思われる。

2.1.2 研究目的

本研究では、杭体の曲げ性能に焦点を当てる。既製コンクリート杭の終局までの曲げ性状と、それに対する作用軸力の影響を確認するため、既製コンクリート杭試験体計 24 体について一定軸力下における杭体曲げ実験を行った。また、平面保持を仮定した断面解析を行い、材料の応力－ひずみ関係をはじめとした解析条件の設定がモーメント－曲率関係の評価精度に与える影響を確認した。研究目的を簡潔にまとめると以下のようなようになる。

- ・ 杭体曲げ実験によって杭体の終局に至るまでの正確なモーメント－曲率関係を計測し、曲げ性状に関するデータを収集する。
- ・ 作用軸力が杭体の曲げ耐力，変形性能，破壊性状に与える影響を確認する。
- ・ 断面解析によって，実験で取得したモーメント－曲率関係の評価を行い，材料の応力－ひずみ関係の設定が評価精度に与える影響を確認する。

2.2 既往研究

2.1.1 項に示したように、杭体が構造部材として明確に位置づけられたのは1978年の宮城県沖地震以降である。現在使用されている主要な既製コンクリート杭としてPHC杭，PRC杭，SC杭があるが、このうち最も古くから使用されているPHC杭の耐震性に関する研究が本格的に開始されたのは1980年代のことである。

既製コンクリート杭に関する既往研究は、スタブに接合した片持ち梁形式の加力による曲げせん断性状に関するものが主である。PHC杭では単純梁形式による実験も見られるが、これらは試験体に軸力を作用させていない。また、杭体に作用させた軸力範囲としてはおおよそ軸力比0~0.3程度であるが、大地震時に想定される軸力変動を考慮すれば、杭体には引張軸力や、軸力比0.6という大きな圧縮軸力が作用する場合もあるといわれ、実験が行われている範囲は充分とはいえない。

PRC杭に関しては中詰めコンクリートを充填し、らせん筋による拘束効果を向上することで耐震性能を改善する目的のものが多く見られ、杭単体での実験は少ない。

ここでは「曲げ破壊する既製コンクリート杭」に焦点を絞り、以下に既往研究の概要を示す。

(1) PHC杭の曲げ強度に関する研究

杉村らは、1978年の宮城県沖地震などによる杭体の地震被害を受け、被害状況の再現実験を行った[文献[2-6]]。実験はPHC杭を対象としており、せん断スパンの異なる単純支持で2点載荷方式によるものと、フーチング付き杭により実際のモーメント分布を模擬して行ったものの2種類、計5体である。このうち単純支持方式の試験体1体は曲げ圧縮破壊し、曲げ終局強度が確認されているが、杭体に軸力は作用させていない。

(2) PHC杭の曲げ変形性能に対する軸方向筋量・プレストレス量の影響に関する研究

黒正らは、軸方向PC鋼棒両・プレストレス量・らせん筋量をパラメータとしたPHC杭の曲げせん断実験を行い、杭体の曲げ変形性能を確認した[文献[2-7]]。実験は単純支持で中央1点載荷方式によるもので、軸力は作用させていない。①杭体の曲げひび割れ強度がプレストレス力に直接依存すること、②曲げ終局強度はプレストレス力に依存せず、軸方向筋量によって決定すること、③曲げ変形能力はプレストレス力が高いほど低下することなど、無軸力下での杭体の曲げ性能に与える各種パラメータの影響が確認された。

(3) 高強度拘束筋と高一様伸び軸方向筋によるPHC杭の曲げ靱性改善に関する研究

六車らは、PHC杭に高強度の拘束筋（規格降伏強度1275MPa）を用いることによる曲げ靱性改善効果を実験により確認した[文献[2-8]]。実験は単純支持による2点載荷方式で行っている。この実験では高強度拘束筋を用いた杭体の破壊時の中央たわみが、無拘束の杭と比較して1.2~1.8倍程度まで増加した。ただし、これらの試験体はPC鋼棒の破断によって破壊に至っており、拘束コンクリートの能力が十分に発揮されなかったとしている。

西山・六車らは後に、最大応力度に達する伸びを大きくした高一様伸び鋼材を軸方向筋に用いることで更なる靱性改善が可能であることを実験により示した[文献[2-9]]。

これらの実験においては等モーメント区間において杭体の曲率が計測されているものの、杭体には軸

力を作用させていない。

(4) 中詰めコンクリートによる PHC 杭の靱性改善に関する研究

黒正らは、杭頭部を想定したスタブ付き PHC 杭の片持ち梁形式の実験を行い、軸方向筋量、らせん筋量、プレストレス量、作用軸力の違いが杭体の破壊性状、変形能力に与える影響を体系的に整理した [文献[2-10]]。この研究により、①らせん筋量を増加させることで杭体のせん断破壊を防止するとともに曲げ圧壊を遅らせること、②軸力の小さな範囲ではプレストレス量を増加させると杭体は軸方向筋の破断により破壊すること、③軸力が大きい場合には極めて脆性的な曲げ圧縮破壊となること、などが示された。また、杭体の厚肉化、中詰めコンクリートの打設が変形性能を向上させる可能性を断面解析によって示唆した。

黒正らは後に、同様の片持ち梁形式の実験を杭体に中詰めコンクリートを打設して行い、その効果を確認した [文献[2-11]]。中詰めコンクリートは杭体の変形性能を向上させ、さらに、らせん筋に PC 鋼棒を用いて拘束効果を向上することで比較的軸力の大きな範囲でもコンクリートの圧壊を遅らせる効果が得られることを示した。

これらの実験で杭体に作用させた軸力範囲は軸力比でおよそ 0~0.25 までの範囲である。

(5) PRC 杭の耐震性能に関する研究

長江らは、スタブに接合された PRC 杭について軸方向筋、横補強筋、杭径や軸力比をパラメータとして曲げせん断実験を行い、PRC 杭の耐震性能を確認した [文献[2-12], [2-13], [2-14]]。これらは全て試験体全長にわたって中詰めコンクリートを打設して行われている。作用軸力の範囲は軸力比 0~0.2 程度である。

これらの研究では平面保持を仮定した断面解析による杭体の曲げ耐力の評価のほか、実験の塑性変形をヒンジ領域における回転によるものと仮定し塑性回転曲率を算出することで、断面解析による変形性能評価の妥当性についても検討している。また、せん断ひび割れ幅や等価粘性減衰定数の推移などから耐震性能の評価を行った。

(6) 既製コンクリート杭の曲げ変形特性に関する研究

金子らは、大地震に対する杭体の耐震性能評価に向けて、既製コンクリート杭の曲げ実験データを収集し、変形性能に着目した分析を行った [文献[2-5]]。収集された実験データは全て杭単体で実施されたもので、中詰めコンクリートや継手はない。作用軸力の範囲はほとんどが軸力比 0.3 未満であり、その数も PRC 杭 8 体/82 体、PHC 杭 6 体/35 体など、杭単体での実験については軸力を作用させたものが少ないことが伺える。

平面保持を仮定した断面解析により、曲げ耐力の算定精度を確認したほか、塑性率による変形性能評価を試みた。内部鋼材の降伏がひずみゲージによって直接確認されていない杭について塑性率の算定を行うため、実験のモーメント-変形関係を面積等価のトリリニアモデルに置換することで降伏点を仮定している。また、PC 鋼材・異形鉄筋のひずみを計測した PHC 杭・PRC 杭、各 2 体の曲げ実験を行い、実際に計測された降伏変形を用いた塑性率とトリリニアモデルに置換して算出された塑性率の比較を行うことで、この手法の精度を確認した。実験の軸力範囲は軸力比 0.32 までである。トリリニア置換は杭体

の変形性能が大きな場合は精度がよく，変形性能が乏しい場合は塑性率を小さめに評価する結果となった。

2.3 実験概要

2.3.1 実験の目的

既製コンクリート杭の終局状態に至るまでの曲げ性能を把握することを目的に、一定軸力下での杭体曲げ載荷実験を行った。試験体は杭径400mmの実大杭で、作用軸力が杭体の曲げに対する耐力、変形性能、破壊性状に与える影響を検討した。曲げ性能の指標としてモーメントー曲率関係を正確に計測するため、単純支持、2点載荷方式とした。以下に実験の目的を簡潔に記す。

- ・ 等モーメント区間を持つ曲げ載荷実験を行うことで、杭体の終局に至るまでの正確なモーメントー曲率関係を計測し、曲げ性状を明らかにする。
- ・ 作用軸力を変化させることで軸力が杭体の耐力、変形性能、破壊性状に与える影響を確認する。

2.3.2 試験体の概要

本研究ではSC杭、PRC杭、PHC杭の3種の既製コンクリート杭を対象とし、試験体全42体について実験を行った。試験体諸元を表2.3.1～表2.3.5、杭体断面図を図2.3.1に示す。表中の諸数値の算出方法は表下部の注釈に示した。杭体直径は400mm、規格肉厚は65mmで、直径と杭肉厚の比T/Dが0.16の実大試験体である。コンクリート設計基準強度は105MPaである。SC杭の鋼管は肉厚6mmのSKK490材とした。また、PRC杭には軸方向鉄筋量の異なるI種～IV種、PHC杭にはプレストレス量の異なるA種～C種が存在するが、今回はPRC杭ではI種およびIII種、PHC杭ではA種およびC種を対象とした。PHC杭は製造会社の規格によってPC鋼材の径、本数が異なるが、合計断面積は概ね等しい。

作用軸力をパラメータとし、長期鉛直荷重として想定される範囲である0、1000、2000kN（設計軸力比0～0.3相当）、地震時の変動軸力を想定した高圧縮軸力（設計軸力比0.6相当）、引張軸力（SC杭は設計軸力比-0.5、PRCおよびPHC杭は設計軸力比-0.3相当）の5段階の軸力レベルを計画した。ただし、PRC杭I種およびPHC杭A種については長期鉛直荷重相当のみを対象とした。また、PRC杭については軸力1000kNの載荷を行わなかった。

長期鉛直荷重相当の軸力を作用させた試験体には正負交番載荷を行ったものと一方向繰り返し載荷を行ったものが存在する。また、一部試験体は実験の再現性を確認するために同条件下で実験を行った。

肉厚の比較的薄い既製コンクリート杭では、内部の鋼材にひずみゲージを貼付することで試験体の耐力に影響を与えることが考えられた。そこで、PRC杭I種、PHC杭A種では2.3.6項に示す鋼材ひずみゲージを貼付しない試験体についても計画し、ひずみゲージを貼付することによる耐力への影響を確認した。

同杭種間で仕様は全て共通しているが、表中の厚径比、断面積、鋼材比、有効プレストレスは杭肉厚の実測値、材料試験値を用いて算出しているため値が異なっている。規格値とそれを用いて算出した軸力比を表2.3.6に示す。ここでは表2.3.1～表2.3.5と同様に、軸力比はプレストレスを考慮せずに算出した。

表 2.3.1 試験体緒元（SC杭）

試験体名	杭径	杭肉厚	鋼管厚	厚径比	実断面積	コンクリート 換算断面積	コンクリート 圧縮強度	軸力	軸力比	試験体長さ	試験体 支持長さ	載荷方法	軸力導入方法
	D	T	ts	T/D	A	Ae	σ_B	N	N/N ₀	L	Ls		
	(mm)	(mm)	(mm)		($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	(MPa)	(kN)		(m)	(m)		
SC16	400	81	6.0	0.20	8.12	11.3	110	0	0	8.0	6.0	一方向載荷	ロッド
SC17	400	75	6.0	0.19	7.65	10.8	112	0	0	8.0	6.0	正負交番載荷	ロッド
SC10	400	77	6.0	0.19	7.82	11.0	114	1000	0.09	8.0	6.0	正負交番載荷	反力フレーム
SC11	400	75	6.0	0.19	7.69	10.8	110	1000	0.09	8.0	6.0	正負交番載荷	反力フレーム
SC12	400	77	6.0	0.19	7.79	11.0	111	2000	0.18	8.0	6.0	正負交番載荷	反力フレーム
SC13	400	78	6.0	0.19	7.87	11.0	110	2000	0.18	8.0	6.0	正負交番載荷	反力フレーム
SC14	400	70	6.0	0.17	7.23	10.4	112	5290	0.52	6.0	5.0	正負交番載荷	反力フレーム
SC15	400	73	6.0	0.18	7.46	10.6	110	-1200	-0.40	6.0	5.0	正負交番載荷	反力フレーム

T:杭肉厚（鋼管厚を含み，規格値は65mm） A:実断面積= $\pi(D^2-(D-2T)^2)/4$ Ae:コンクリート換算断面積=A+As $\cdot(E_s/E_c-1)$ As:鋼管断面積 Es:鋼管弾性係数
 Ec:コンクリート弾性係数 N:軸力（圧縮正） N/N₀:軸力比=N/($\sigma_B \cdot (A-As)+f_{sy} \cdot As$)（圧縮軸力時），N/($f_{sy} \cdot As$)（引張軸力時） f_{sy}:鋼管降伏強度

表 2.3.2 試験体諸元（PRC杭 I種）

試験体名	仕様	杭径	肉厚	厚径比	実断面積	コンクリート 換算断面積	コンクリート 圧縮強度	PC鋼材		異形鉄筋		有効 プレストレス σ_e	軸力 N	軸力比 N/N ₀	載荷方法	軸力導入方法
		D	T	T/D	A	Ae	σ_B	配筋	鋼材比 pg ₁	配筋	鋼材比 pg ₂					
		(mm)	(mm)		($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	(MPa)									
PRC22	I種	400	71	0.18	7.32	7.87	127	8- ϕ 10	0.86	8-D13	1.38	7.3	0	0	一方向載荷	ロッド
PRC23		400	73	0.18	7.50	8.02	131	8- ϕ 10	0.84	8-D13	1.35	7.2	0	0	一方向載荷	ロッド
PRC17		400	73	0.18	7.46	8.05	110	8- ϕ 10	0.84	8-D13	1.36	7.1	0	0	正負交番載荷	ロッド
PRC18		400	73	0.18	7.46	8.01	127	8- ϕ 10	0.84	8-D13	1.36	7.1	2000	0.19	一方向載荷	ロッド
PRC19		400	74	0.18	7.54	8.09	127	8- ϕ 10	0.83	8-D13	1.34	7.1	2000	0.19	一方向載荷	ロッド
PRC20		400	72	0.18	7.38	7.90	131	8- ϕ 10	0.85	8-D13	1.37	7.3	2000	0.19	一方向載荷	ロッド
PRC21		400	71	0.18	7.36	7.89	131	8- ϕ 10	0.85	8-D13	1.38	7.3	2000	0.19	一方向載荷	ロッド
PRC15		400	70	0.17	7.25	7.83	109	8- ϕ 10	0.87	8-D13	1.40	7.4	2000	0.22	正負交番載荷	ロッド
PRC16		400	65	0.16	6.87	7.45	111	8- ϕ 10	0.91	8-D13	1.48	7.7	2000	0.23	正負交番載荷	ロッド

T:杭肉厚（規格値は65mm） A:実断面積= $\pi(D^2-(D-2T)^2)/4$ Ae:コンクリート換算断面積=A+Ad $\cdot(E_d/E_c-1)$ +Ap $\cdot(E_p/E_c-1)$ Ad:異形鉄筋の全断面積
 Ed:異形鉄筋の弾性係数 Ap:PC鋼材の全断面積 Ep:PC鋼材の弾性係数 Ec:コンクリート弾性係数 pg₁:PC鋼材比=Ap/A pg₂:異形鉄筋主筋比=Ad/A
 σ_{e0} :有効プレストレス量= $\sigma_p \cdot Ap / (A - Ap + (E_d/E_c - 1) \cdot Ad)$ σ_p :PC鋼材に導入した緊張による応力度 (MPa) N:軸力（圧縮正）
 N/N₀:軸力比=N/($\sigma_B \cdot (A - Ap - Ad) + f_{py} \cdot Ap + f_{dy} \cdot Ad$) f_{py}:PC鋼材降伏強度 f_{dy}:異形鉄筋降伏強度

表 2.3.3 試験体諸元（PRC 杭 III種）

試験体名	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		異形鉄筋		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	荷重方法	軸力導入方法
								配筋	鋼材比 pg ₁ (%)	配筋	鋼材比 pg ₂ (%)					
PRC11	III種	400	72	0.18	7.42	8.34	136	8-φ10	0.85	8-D19	3.09	7.1	0	0	一方向荷重	ロッド
PRC14		400	72	0.18	7.45	8.25	117	8-φ10	0.84	8-D19	3.08	7.1	0	0	正負交番荷重	ロッド
PRC09		400	71	0.18	7.34	8.26	136	8-φ10	0.86	8-D19	3.12	7.2	2000	0.18	一方向荷重	ロッド
PRC10		400	72	0.18	7.42	8.38	136	8-φ10	0.85	8-D19	3.09	7.1	2000	0.17	一方向荷重	ロッド
PRC12		400	73	0.18	7.47	8.25	116	8-φ10	0.84	8-D19	3.07	7.1	2000	0.20	正負交番荷重	ロッド
PRC13		400	73	0.18	7.46	8.25	119	8-φ10	0.84	8-D19	3.07	7.1	2000	0.19	正負交番荷重	ロッド
PRC07		400	73	0.18	7.47	8.38	132	8-φ10	0.84	8-D19	3.07	7.0	4590	0.41	正負交番荷重	反力フレーム
PRC08		400	71	0.18	7.34	8.25	132	8-φ10	0.86	8-D19	3.12	7.1	-439	-0.25	正負交番荷重	反力フレーム

T:杭肉厚（規格値は 65mm） A:実断面積= $\pi(D^2-(D-2T)^2)/4$ Ae:コンクリート換算断面積= $A+Ad \cdot (E_d/E_c-1)+A_p \cdot (E_p/E_c-1)$ Ad:異形鉄筋の全断面積
 Ed:異形鉄筋の弾性係数 Ap:PC 鋼材の全断面積 Ep:PC 鋼材の弾性係数 Ec:コンクリート弾性係数 Pg₁:PC 鋼材比= A_p/A Pg₂:異形鉄筋主筋比= Ad/A
 σ_{ce} :有効プレストレス量= $\sigma_p \cdot A_p / (A - A_p + (E_d/E_c - 1) \cdot Ad)$ σ_p :PC 鋼材に導入した緊張による応力度 (MPa) N:軸力 (圧縮正)
 N/N_0 :軸力比= $N / (\sigma_B \cdot (A - A_p - Ad) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot Ad)$ (圧縮軸力時), $N / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot Ad)$ (引張軸力時) f_{py} :PC 鋼材降伏強度 f_{dy} :異形鉄筋降伏強度

表 2.3.4 試験体諸元（PHC 杭 A種）

試験体名	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	荷重方法	軸力導入方法
								配筋	鋼材比 pg ₁ (%)					
PHC14	A種	400	69	0.17	7.18	7.30	120	10-φ7.1	0.55	4.06	0	0	一方向荷重	ロッド
PHC07		400	72	0.18	7.45	7.58	124	10-φ7.1	0.53	4.34	0	0	正負交番荷重	ロッド
PHC08		400	66	0.16	6.88	7.02	120	10-φ7.1	0.58	4.71	0	0	正負交番荷重	ロッド
PHC12		400	71	0.18	7.36	7.49	126	10-φ7.1	0.54	3.96	2000	0.20	一方向荷重	ロッド
PHC13		400	72	0.18	7.45	7.58	113	10-φ7.1	0.53	3.92	2000	0.22	一方向荷重	ロッド
PHC03		400	68	0.17	7.13	7.27	119	10-φ7.1	0.56	4.58	2000	0.22	正負交番荷重	ロッド
PHC04		400	69	0.17	7.17	7.31	119	10-φ7.1	0.55	4.54	2000	0.22	正負交番荷重	ロッド
PHC05		400	71	0.18	7.32	7.47	121	10-φ7.1	0.54	4.46	2000	0.21	正負交番荷重	ロッド
PHC06		400	70	0.18	7.27	7.41	121	10-φ7.1	0.54	4.47	2000	0.22	正負交番荷重	ロッド

T:杭肉厚（規格値は 65mm） A:実断面積= $\pi(D^2-(D-2T)^2)/4$ Ae:コンクリート換算断面積= $A+A_p \cdot (E_p/E_c-1)$ Ap:PC 鋼材の全断面積 Ep:PC 鋼材の弾性係数
 Ec:コンクリート弾性係数 Pg₁:PC 鋼材比= A_p/A σ_{ce} :有効プレストレス量= $\sigma_p \cdot A_p / (A - A_p + (E_d/E_c - 1) \cdot Ad)$ σ_p :PC 鋼材に導入した緊張による応力度 (MPa)
 N:軸力 (圧縮正) N/N_0 :軸力比= $N / (\sigma_B \cdot (A - A_p - Ad) + f_{py} \cdot A_p)$ f_{py} :PC 鋼材降伏強度

表 2.3.5 試験体諸元（PHC杭 C種）

試験体名	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	荷重方法	軸力導入方法
								配筋	鋼材比 pg ₁ (%)					
PHC17	C種	400	75	0.19	7.68	8.03	109	10-φ11.2	1.28	9.9	0	0.00	一方向荷重	ロード
PHC11		400	72	0.18	7.41	7.70	122	16-φ9.0	1.37	10.6	0	0.00	正負交替荷重	ロード
PHC16		400	68	0.17	7.06	7.40	111	10-φ11.2	1.40	10.8	1000	0.11	一方向荷重	ロード
PHC10		400	73	0.18	7.48	7.78	115	16-φ9.0	1.36	10.5	1000	0.10	正負交替荷重	ロード
PHC15		400	72	0.18	7.45	7.78	122	10-φ11.2	1.32	10.3	2000	0.19	一方向荷重	ロード
PHC09		400	74	0.19	7.61	7.91	118	16-φ9.0	1.34	10.3	2000	0.20	正負交替荷重	ロード
PHC01		400	73	0.18	7.46	7.80	110	10-φ11.2	1.32	10.3	4100	0.43	正負交替荷重	反力フレーム
PHC02		400	74	0.18	7.55	7.88	123	10-φ11.2	1.31	10.1	-344	-0.26	正負交替荷重	反力フレーム

T:杭肉厚（規格値は65mm） A:実断面積= $\pi(D^2-(D-2T)^2)/4$ Ae:コンクリート換算断面積= $A+Ap \cdot (E_p/E_c-1)$ Ap:PC鋼材の全断面積 Ep:PC鋼材の弾性係数
 Ec:コンクリート弾性係数 pg₁:PC鋼材比= Ap/A σ_{ce} :有効プレストレス量= $\sigma_p \cdot Ap/(A-Ap+(E_d/E_c-1) \cdot Ad)$ σ_p :PC鋼材に導入した緊張による応力度 (MPa)
 N:軸力 (圧縮正) N/N₀:軸力比= $N/(\sigma_B \cdot (A-Ap-Ad)+f_{py} \cdot Ap)$ (圧縮軸力時), $N/(f_{py} \cdot Ap)$ (引張軸力時) f_{py}:PC鋼材降伏強度

表 2.3.6 杭体の標準規格と設計軸力比（次項に続く）

杭種	杭径 D (mm)	杭肉厚 T (mm)	鋼管厚 ts (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 設計基準強度 F _c (MPa)	軸力	軸力比	対応する試験体
								N (kN)	N/N ₀	
SC杭	400	65	6.0	0.16	6.84	9.90	105	0	0	SC16, SC17
								1000	0.11	SC10, SC11
								2000	0.23	SC12, SC13
								5290	0.60	SC14
								-1200	-0.50	SC15

杭種	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		異形鉄筋		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	対応する試験体
								配筋	鋼材比 pg ₁ (%)	配筋	鋼材比 pg ₂ (%)				
PRC杭	I種	400	65	0.16	6.84	7.50	105	8-φ10	0.92	8-D13	1.48	6.1	0	0	PRC22, PRC23, PRC17
													2000	0.23	PRC18, PRC19, PRC20, PRC21, PRC15, PRC16

杭種	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		異形鉄筋		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	対応する試験体
								配筋	鋼材比 pg ₁ (%)	配筋	鋼材比 pg ₂ (%)				
PRC杭	Ⅲ種	400	65	0.16	6.84	8.01	105	8-φ10	0.92	8-D19	3.35	5.7	0	0	PRC11, PRC14
													2000	0.24	PRC9, PRC10, PRC12, PRC13
													4590	0.54	PRC07
													-439	-0.28	PRC08

第2章 既製杭（SC杭，PRC杭，PHC杭）の曲げ破壊実験

表 2.3.6 杭体の標準規格と設計軸力比

杭種	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	対応する試験体
								配筋	鋼材比				
									p _{g1} (%)				
PHC杭	A種	400	65	0.16	6.84	7.00	105	10-φ7.1	0.58	4.0	0	0	PHC14, PHC07, PHC08
											2000	0.24	PHC12, PHC13, PHC03, PHC04, PHC05, PHC06

杭種	仕様	杭径 D (mm)	肉厚 T (mm)	厚径比 T/D	実断面積 A ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 換算断面積 Ae ($\times 10^4 \text{ mm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	PC鋼材		有効 プレストレス σ_e (MPa)	軸力 N (kN)	軸力比 N/N ₀	対応する試験体
								配筋	鋼材比				
									p _{g1} (%)				
PHC杭	C種	400	65	0.16	6.84	7.23	105	10-φ11.2	1.44	10	0	0	PHC17
						1000					0.12	PHC16	
						2000		0.24	PHC15				
						4100		0.49	PHC01				
						-344		-0.27	PHC02				
						0		0	PHC11				
						1000		0.12	PHC10				
						2000		0.24	PHC09				
			7.25			16-φ9.0	1.49						

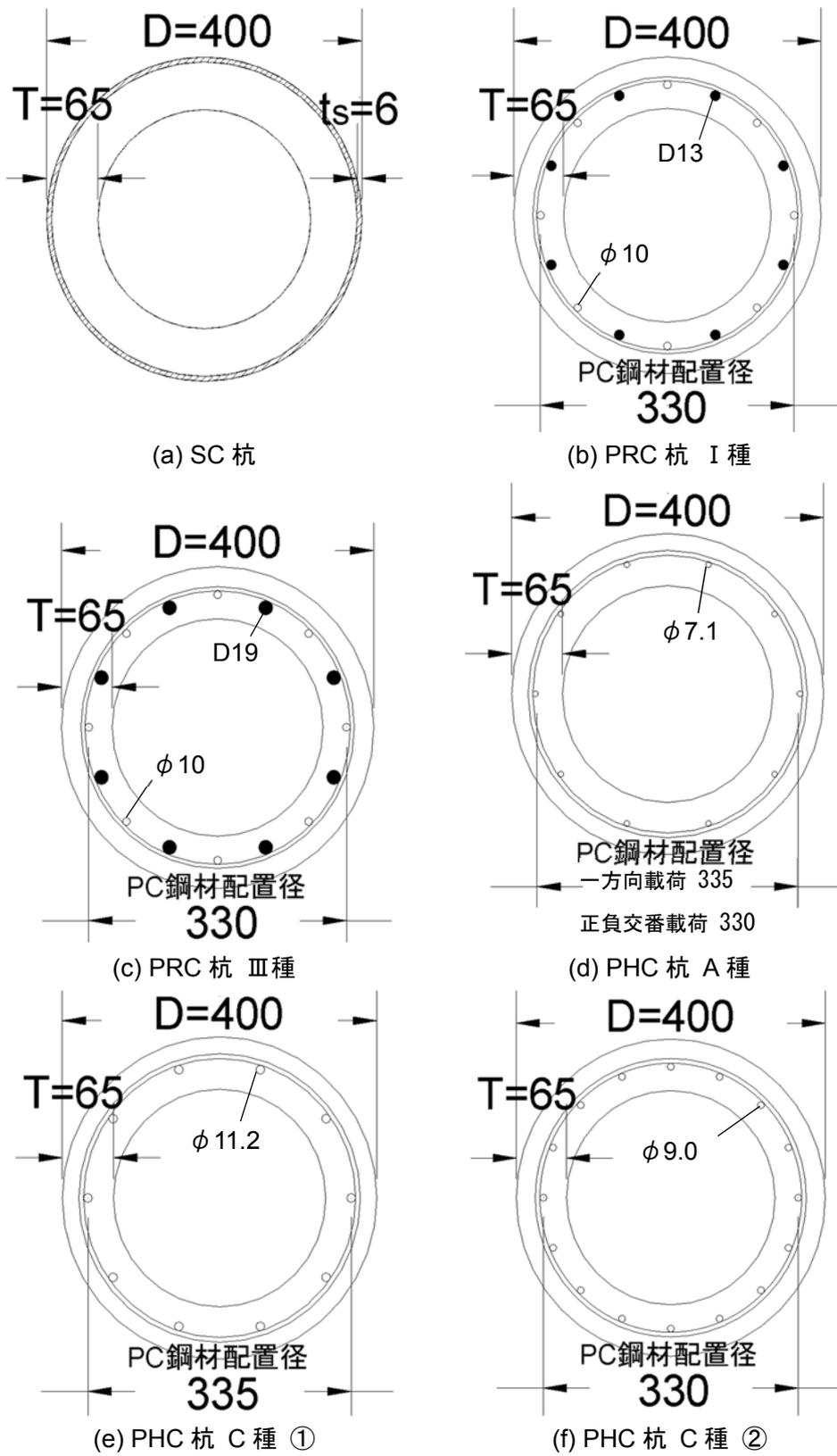


図 2.3.1 試験体断面図 (杭肉厚 T は規格値)

図 2.3.2 に示したのは設計耐力の M-N 図上に本実験の試験体をプロットしたものである。設計耐力は平面保持を仮定して算出したもので、算出方法の詳細は次項に記す。

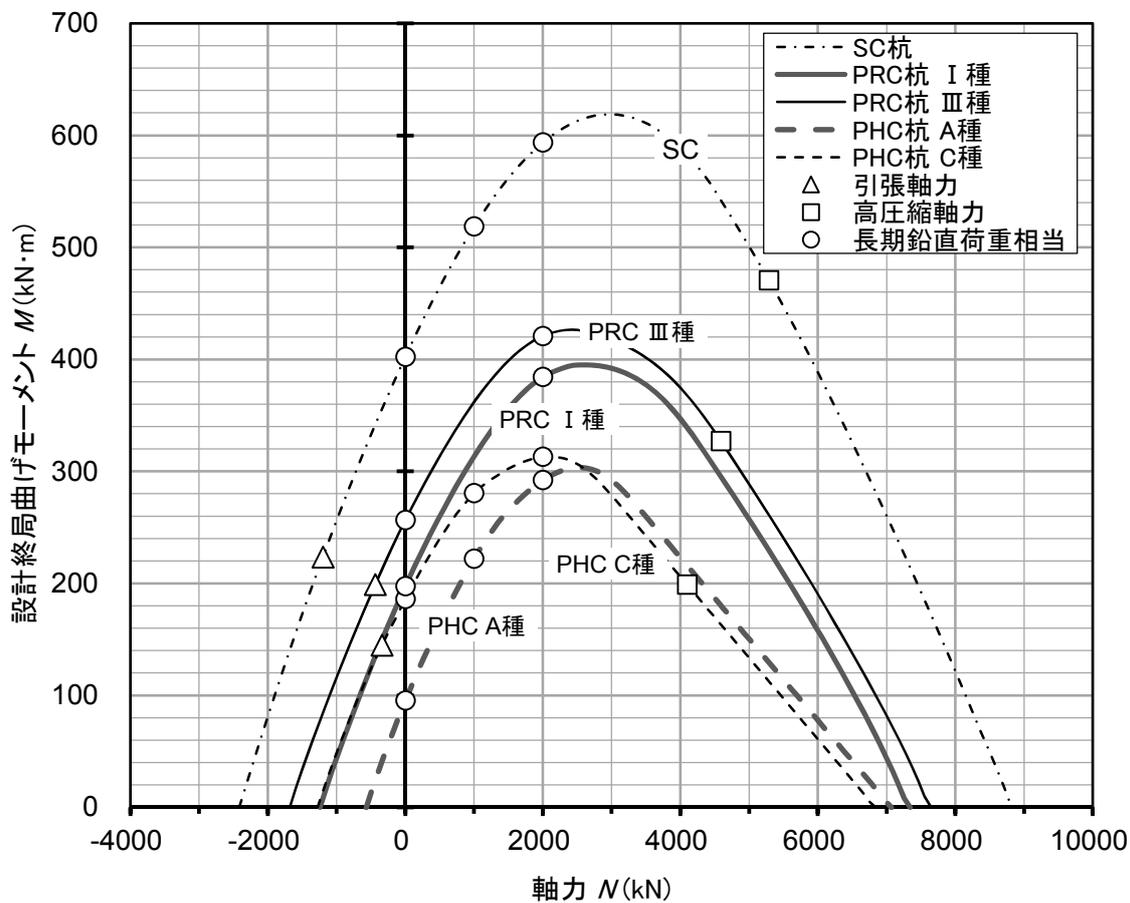


図 2.3.2 設計耐力の M-N 図

2.3.3 設計耐力の算出

設計耐力（終局曲げモーメント）は平面保持を仮定した計算によって算出した。材料の応力-ひずみ関係等，計算の仮定は既製コンクリート杭に対して一般に用いられるもので，文献[2-15]に従った。計算の詳細を以下に示す。

(1) 計算の仮定

終局曲げモーメントは以下の仮定に基づいて算定する。

- ①断面は，終局に至るまで平面を保持するものとする。
- ②同一円周上に均等に配置された PC 鋼棒は，等断面積の薄肉鋼管とみなす。
- ③コンクリートの応力 - ひずみ関係は図 2.3.3 に示すバイリニア型とする。
- ④PC 鋼棒の応力 - ひずみ関係は図 2.3.4 に示すトリリニア型とする。
- ⑤異形鉄筋・鋼管の応力 - ひずみ関係は図 2.3.5 に示すバイリニア型とする。
- ⑥プレストレスは応力 - ひずみ関係の原点を移動することで考慮する。

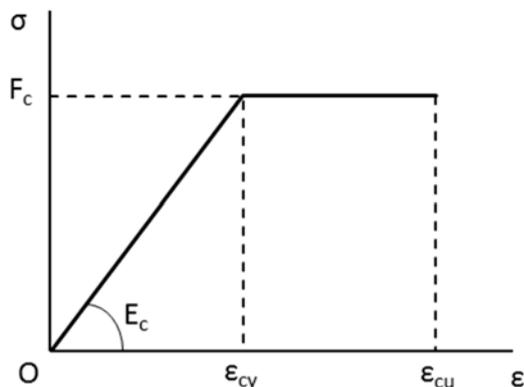


図 2.3.3 コンクリートの応力-ひずみ関係

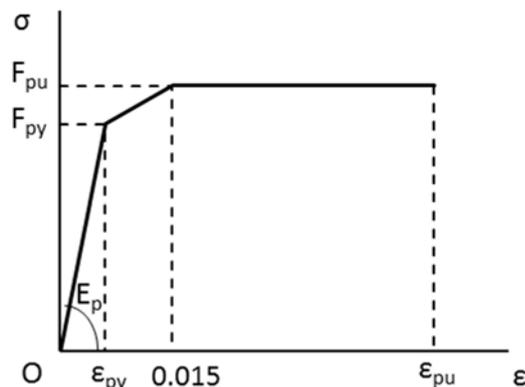


図 2.3.4 PC 鋼材の応力-ひずみ関係

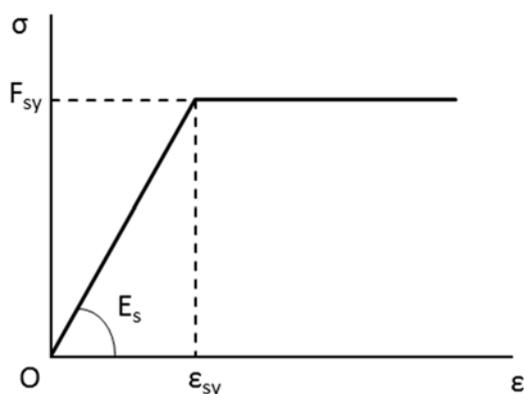


図 2.3.5 異形鉄筋の応力-ひずみ関係

- F_c : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)
- E_c : コンクリートのヤング係数(N/mm²)
- ϵ_{cy} : コンクリートの圧縮強度時ひずみ
- ϵ_{cu} : コンクリートの終局ひずみ
- F_{py} : PC 鋼材の降伏強度(N/mm²)
- F_{pu} : PC 鋼材の引張強度(N/mm²)
- E_p : PC 鋼材のヤング係数(N/mm²)
- ϵ_{py} : PC 鋼材の降伏ひずみ
- ϵ_{pu} : PC 鋼材の終局ひずみ
- F_{sy} : 異形鉄筋の降伏強度(N/mm²)
- E_s : 異形鉄筋のヤング係数(N/mm²)
- ϵ_{sy} : 異形鉄筋の降伏ひずみ

(2) 設計用数値

コンクリート，鋼材の設計用数値を表 2.3.7，表 2.3.8 にそれぞれ示す。

表 2.3.7 コンクリートの設計用数値

杭の種類		PHC 杭		PRC 杭		SC 杭
項目	単位	A 種	C 種	I 種	III 種	
有効プレストレスト量	N/mm ²	4	10	6.1	5.7	—
設計基準強度	N/mm ²	105		105		105
曲げ引張強度	N/mm ²	7.5 [*]		6.5 [*]		7.5 [*]
終局圧縮ひずみ	—	0.00265		0.0035		0.005
ヤング係数	N/mm ²	4.0×10 ⁴		4.0×10 ⁴		4.0×10 ⁴

※終局曲げモーメントの計算では，コンクリートは引張応力を負担しないとするため，曲げ引張強度は使用しない。

表 2.3.8 鋼材の設計用数値

杭の種類		PC 鋼棒 (JIS G 3137 SBPDL1275/1420)	PC 鋼線 (JIS G 3536 SWPD1L)	鋼管 (JIS A 5525 SKK490)	異形鉄筋 (JIS G3112 SD345)
項目	単位				
降伏強度	N/mm ²	1275	1226	325	345
引張強度	N/mm ²	1420	1418	(490) [*]	(490) [*]
終局ひずみ	—	0.05	0.05	—	—
ヤング係数	N/mm ²	2.0×10 ⁵	2.0×10 ⁵	2.05×10 ⁵	2.0×10 ⁵
線径	mm	7.1, 10, 11.2	9	—	—
板厚	mm	—	—	6	—
呼び径	—	—	—	—	D13, D19

※今回の計算仮定では使用しない。

(3) 終局曲げモーメントの定義

終局曲げモーメントは以下のように定義される。

i) SC 杭

終局時とは圧縮側最外縁のコンクリートのひずみが終局ひずみ^{*}に達した時とする。

ii) PRC 杭および PHC 杭

終局時とは圧縮側最外縁のコンクリートのひずみが終局ひずみ^{*}に達した時，または，PC 鋼材の引張ひずみが終局ひずみに達した時とする。

※終局ひずみは表 2.3.7 および表 2.3.8 の値。

2.3.4 材料特性

(1) コンクリート

試験体に使用したコンクリートは設計基準強度 105MPa の高強度コンクリートで、打設後に遠心力によって円筒形に成形したものである。材料試験は圧縮強度試験と割裂引張試験を行った（ただし、一部試験体は割裂引張試験を行わなかった）。試験に用いた供試体は、圧縮試験では試験体と同様に遠心成形によって作成したもので、JIS A 1136¹²⁻¹⁶に基づいた寸法（外形 200mm，高さ 300mm，肉厚 40mm）である。割裂引張試験では、100φ×200mm シリンダー供試体を用いた。材料試験はアムスラー試験機によって行い、各試験体の加力期間中に実施した。各試験体に対応する材料試験結果を表 2.3.9 に示す。表中には各試験の平均値のみを記し、試験結果の詳細は附録に示した。なお、コンクリートのヤング係数は最大圧縮強度の 1/3 時点の位置と原点を結んだ傾きとした。また、割裂引張試験を実施していない場合は、強度の欄を一とした。

表 2.3.9 コンクリート材料試験結果一覧

	圧縮強度 σ_B (MPa)	弾性係数 E (GPa)	割裂強度 σ_t (MPa)	圧縮強度時ひずみ ϵ_m (μ)
SC16	111	40.7	6.33	2970
SC17	112	40.9	—	3146
SC10	113	40.5	5.90	3059
SC11	110	41.2	6.23	3091
SC12	111	40.6	6.00	3132
SC13	110	40.9	6.13	3002
SC14	112	41.2	5.82	3121
SC15	110	41.2	5.93	3258
PRC22	129	54.3	—	2611
PRC23	131	49.2	—	2793
PRC17	110	43.8	6.02	3162
PRC18	129	50.9	—	2739
PRC19	129	50.9	—	2739
PRC20	131	47.4	—	2864
PRC21	131	47.4	—	2864
PRC15	109	44.4	6.09	3016
PRC16	111	44.4	5.76	3185
PRC11	136	48.7	—	2979
PRC14	117	49.2	3.90	2714
PRC09	136	48.7	6.47	2979
PRC10	136	48.7	—	2979
PRC12	116	49.8	7.50	2505
PRC13	119	49.5	7.50	2688
PRC07	132	49.2	—	2798
PRC08	132	49.2	—	2798
PHC14	120	50.0	5.98	2816
PHC07	124	47.9	—	2934
PHC08	120	45.5	6.47	2891
PHC03	122	44.1	—	3113
PHC04	122	44.1	—	3113
PHC12	126	49.5	—	2928
PHC13	113	48.3	—	2649
PHC05	121	43.7	—	3014
PHC06	120	45.5	—	2891
PHC17	109	47.4	—	2720
PHC11	122	50.7	3.90	2687
PHC16	111	48.7	—	2794
PHC10	115	49.1	5.90	2623
PHC15	122	49.7	—	2907
PHC09	118	49.7	6.50	2617
PHC01	113	48.3	5.80	2781
PHC02	123	49.3	—	3029

表 2.3.12 異形鉄筋材料試験結果

			降伏耐力 $d\sigma_y$ (MPa)	引張耐力 $d\sigma_u$ (MPa)	弾性係数 dE (GPa)	降伏ひずみ $d\varepsilon_y$ (μ)
D13	①	PRC17	383	542	191	2186
		PRC15				
		PRC16				
	②	PRC22	379	545	194	1991
		PRC23				
		PRC18				
		PRC19				
D19	①	PRC20	384	572	202	1906
		PRC21				
		PRC11				
		PRC09				
		PRC10				
	②	PRC07	365	556	180	2041
		PRC08				
		PRC14				
		PRC12				
		PRC13				

2.3.5 載荷方法

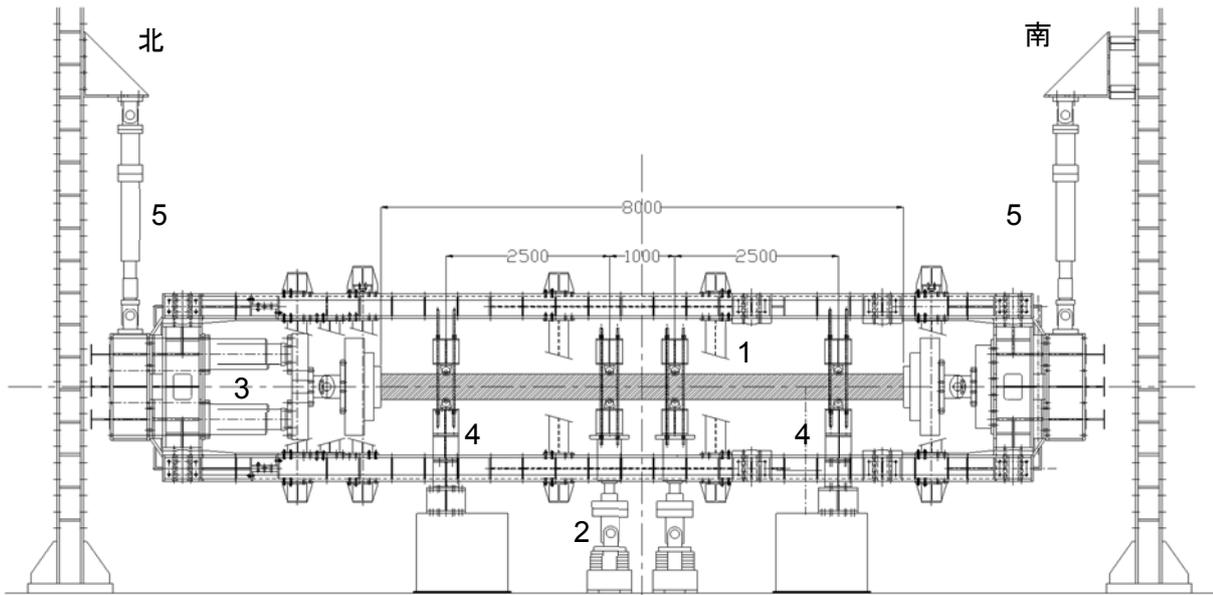
(1) 反カフレームにより軸力導入を行う場合

図 2.3.6 に加力装置を示す。装置は軸力載荷ジャッキと反カフレーム、試験体支持点、鉛直載荷ジャッキによって構成される。本実験では杭体を横向きに単純支持し、一定軸力を加えた状態で中央の 2 本の鉛直ジャッキにより同一方向にせん断力を加えた。杭体端部は反カフレーム内の載荷フランジに固定されており、載荷フランジの外部はクレビスによってピン支持となっている。載荷フランジ間はおおよそ 8m であり、長さ 6m の試験体について実験を行う際は、杭体の両端に長さ 1m のスペーサーを介して装置と接続した。試験体支持長さ L_s は杭長さ $L=8m$ の試験体では $L_s=6m$ 、杭長さ $L=6m$ の試験体では $L_s=5m$ とした。中央鉛直ジャッキの間隔は 1m であり、2 つのジャッキの荷重が等しくなるように載荷を行った。載荷区間の内側は等曲げモーメント区間であり、この範囲で杭体の曲率を計測した。

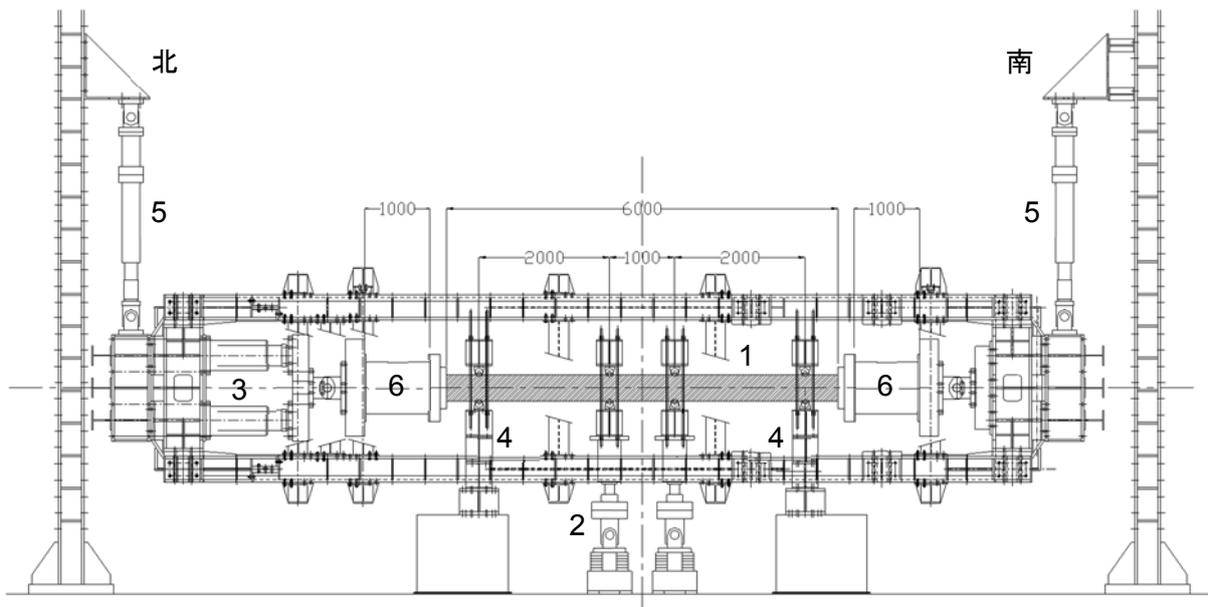
実験では、軸力載荷装置の重量が試験に影響を与えないように油圧ジャッキによって装置の自重を相殺した。装置の両端に 2 台ずつの油圧ジャッキを設置し、それを装置外側に立てた柱と接続した。試験中はこのジャッキが軸力載荷装置を吊り上げる荷重を一定に保持した。

2 つの試験体支持点を結ぶ直線と、試験体中央の鉛直距離（相対鉛直変位）を計測し、これを L_s の半分を除した値を変形角 R とした。加力は正負交番漸増繰り返し載荷とし、図 2.3.7 に示すように $R=\pm 0.125\%$ 、 $\pm 0.25\%$ 、 $\pm 0.375\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.75\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 3\%$ 、 $\pm 4\%$ 、 $\pm 5\%$ で各 2 回ずつ繰り返した。なお、上方向への加力を正載荷と定義し、はじめに正側から載荷した。

図 2.3.8 に載荷装置の全景、図 2.3.9 に試験体載荷点、試験体端部と載荷フレームとの接続部の詳細を示す。載荷点、支持点は上下ともにまくら材を介して鋼材によって挟み込み、4 本の PC 鋼棒を用いて固定した。杭端部には 2 枚の鋼端板（ $\phi=640$ ， $t=100$ と $\phi=1040$ ， $t=150$ ）を接続し、端版を PC 鋼棒によって載荷フレームに接続した。 $L=6m$ の試験体の場合は、鋼端版の外側にスペーサーを介して載荷フレームに接続した。



(a) L=8m の場合



(b) L=6m の場合

- 1: 試験体 2: 鉛直載荷ジャッキ (押 400t/引 150×2台) 3: 軸力載荷ジャッキ (押 500t/引 200×4台)
 4: 試験体支持点 5: フレーム自重相殺用吊り上げジャッキ 6: スペーサー

図 2.3.6 荷装置概要 (反カフレームによる軸力導入)

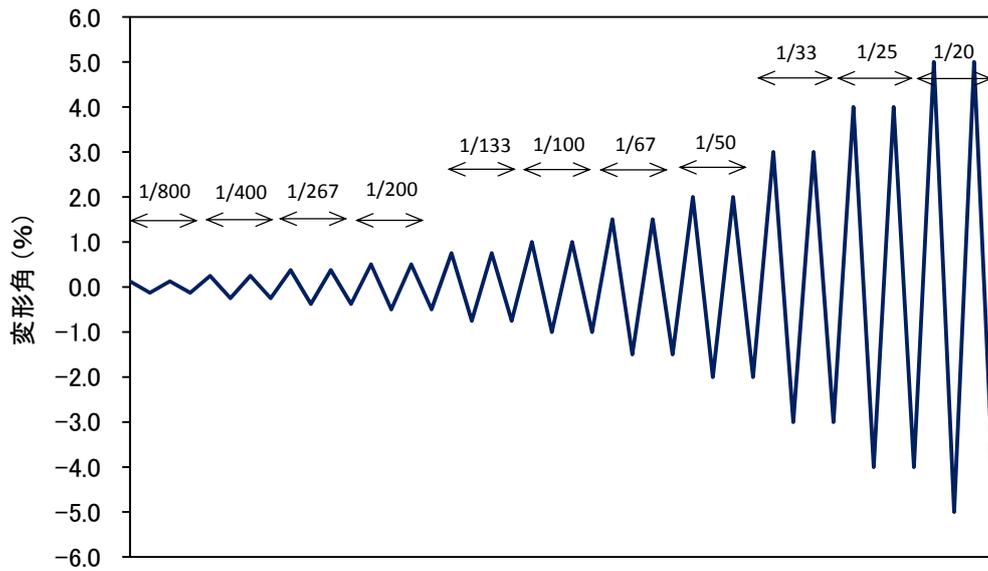
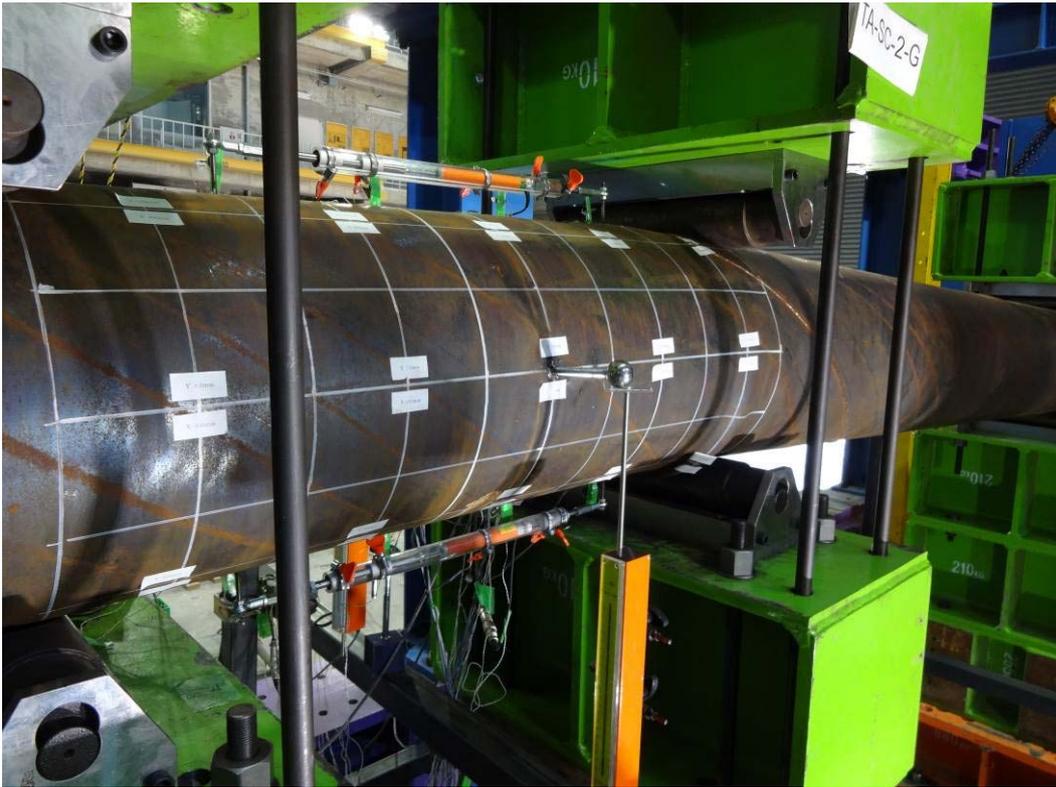


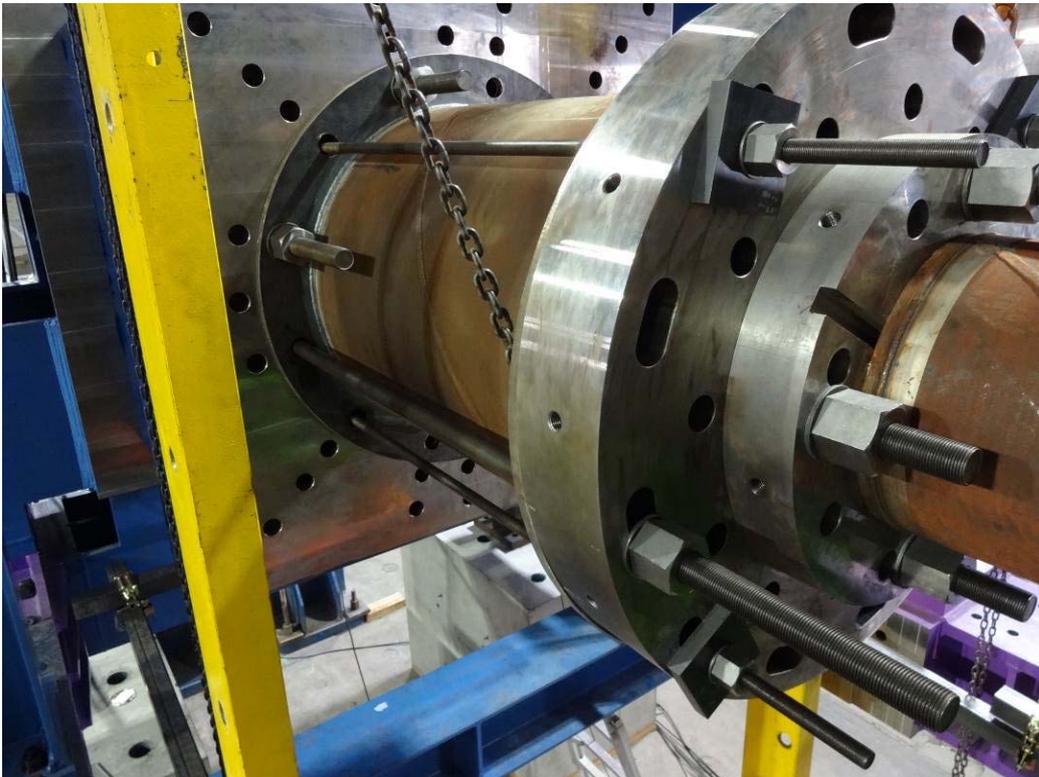
図 2.3.7 加力サイクル (反カフレームによる軸力導入)



図 2.3.8 加力装置 (反カフレームによる軸力導入)



(a) 試験体載荷点の支持状況



(b) 試験体端部におけるスペーサーの設置状況

図 2.3.9 加力装置詳細（反力フレームによる軸力導入）

(2) ロッドにより軸力導入を行う場合

荷重方法の例を図 2.3.10 に示す。i) と同様に杭体を横向きに単純支持し、一定軸力を加えた状態で中央の荷重装置によってせん断力を加えた。試験体支持長さ L_s は全て 6m で、荷重点間の距離は 1m である。軸力導入は図 2.3.11 に示すように、杭体内部に通した鋼ロッドと油圧ジャッキによって行った。ロッドを杭体端部の支圧板に固定し、もう一方の端部に設置した油圧ジャッキによってロッドに緊張力を与え、その反力によって杭体に軸力を導入した。油圧ジャッキの設置状況を図 2.3.13 に示す。

加力は i) と同様に試験体中央の支持点に対する相対変位を $L_s/2$ で除した変形角 R によって制御した。計画上の都合により各試験体の加力サイクルには若干の違いがある。加力サイクルを表 2.3.13 に示す。ロッドにより軸力導入を行った試験体の荷重は、試験装置によって鉛直一方向荷重、鉛直正負交番荷重、水平正負交番荷重が存在する。本論分では反力フレームによる軸力導入時にならない、正荷重時において杭体の引張側になる位置を「上側」、圧縮側になる位置を「下側」と表記する。また、2.3.6 項に示す軸方向変位計とひずみゲージについても、i) の場合と対応するように、荷重方向によって名称を定めた (例：正荷重時において杭体引張外縁に位置する軸方向変位計を H1 とする)。

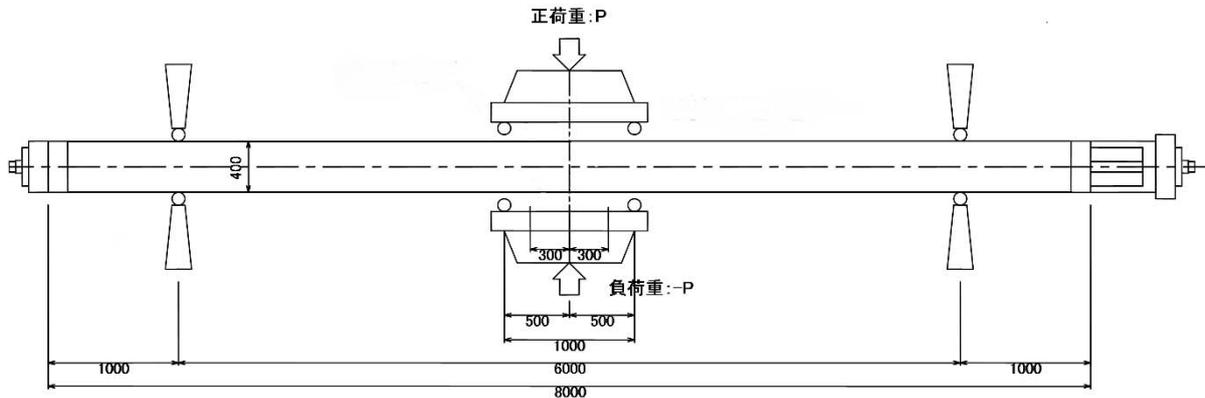


図 2.3.10 荷重方法例 (ロッドによる軸力導入)

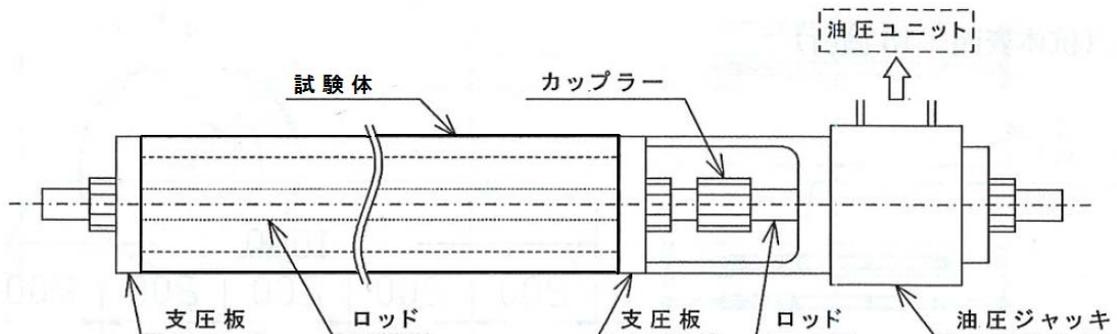


図 2.3.11 軸力導入装置 (ロッドによる軸力導入)



図 2.3.12 載荷状況（ロッドによる軸力導入 PRC_I_2_U ①）



(a) 油圧ジャッキおよびロードセル



(b) 試験体と油圧ジャッキの接合状況

図 2.3.13 軸力導入装置の設置状況（ロッドによる軸力導入 PRC_Ⅲ_2_U ①）

表 2.3.13 加力サイクル（ロッドによる軸力導入の場合）

試験体名	加力サイクル
SC17, PRC17, PRC15, PRC16, PRC12, PRC13, PHC10, PHC09	R=±0.125%, ±0.25%, <u>±0.375%</u> , ±0.5%, <u>±0.75%</u> , ±1%, ±1.5%, ±2%, ±3%, ±4%, ±5%
PRC22, PRC23, PRC18, PRC19, PRC20, PRC21, PHC14, PHC12, PHC13, PHC17, PHC16, PHC15	R=+0.125%, +0.25%, <u>+0.375%</u> , +0.5%, <u>+0.75%</u> , +1%, +1.5%, +2%, +3%, +4%, +5%
PRC14, PHC07, PHC08, PHC03, PHC04, PHC05, PHC06, PHC11	R=±0.125%, ±0.25%, <u>±0.3%</u> , ±0.5%, <u>±0.7%</u> , ± 1%, ±1.5%, ±2%, ±3%, ±4%, ±5%
SC16, PRC11, PRC09, PRC10	R=+0.125%, +0.25%, <u>+0.3%</u> , +0.5%, <u>+0.7%</u> , + 1%, +1.5%, +2%, +3%, +4%, +5%

2.3.6 計測方法

本実験では杭体中央, 支持点, 端部ピン位置で鉛直変位を計測した。また, 等モーメント区間内で軸方向変位を計測し, 曲率を算出した。加えて杭体表面の材軸方向ひずみ, PRC 杭および PHC 杭では杭体内部の PC 鋼材, 異形鉄筋のひずみを計測した。

(1) 杭体鉛直変位

実験では杭体中央, 支持点の鉛直変位を計測し, 相対鉛直変位を用いて载荷を行った。また, 軸力の P- δ 効果による付加モーメントを算出するため, 杭端部の鉛直変位を計測した。計測位置を図 2.3.14 に示す。計測は杭体の回転を考慮して試験体の両面で行い, 平均値を図中の D1~D5 とした。図 2.3.15 のように杭体中央と支持点の相対鉛直変位を δ_1 , 杭端部と支持点の相対鉛直変位平均値を δ_2 とすると, この値はそれぞれ以下のように算出される。以降は δ_1 を杭体中央の鉛直変位, δ_2 を杭端部の鉛直変位として記述する。

$$\delta_1 = D1 - (D2 + D3)/2 \quad (2.3.1)$$

$$\delta_2 = (D4 + D5)/2 - (D2 + D3)/2 \quad (2.3.2)$$

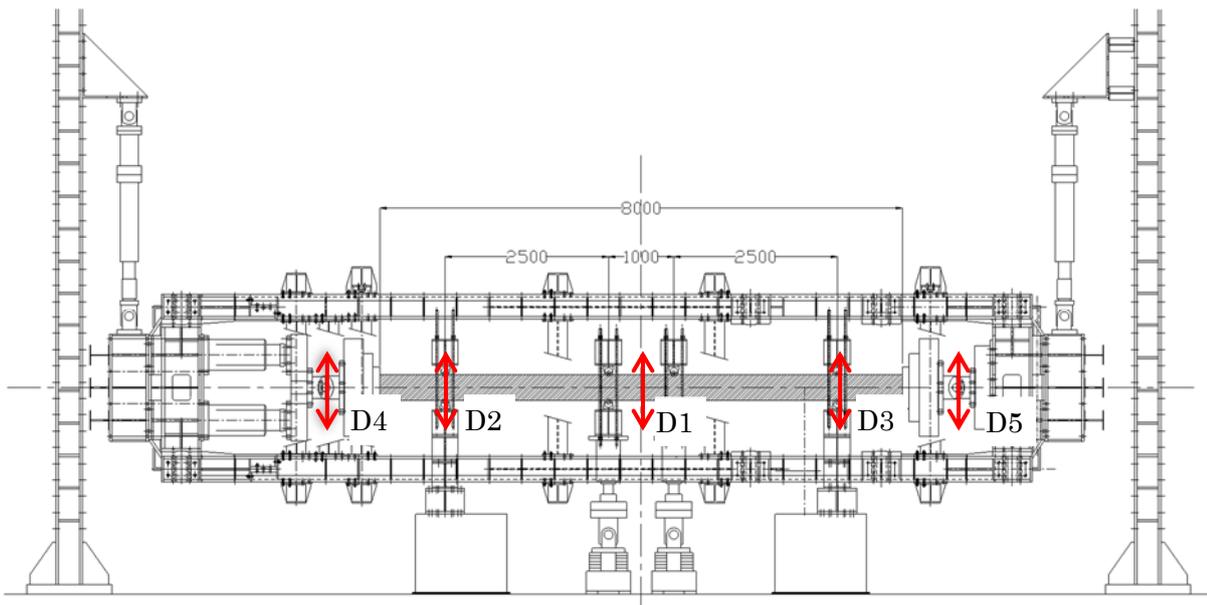


図 2.3.14 鉛直変位計測位置

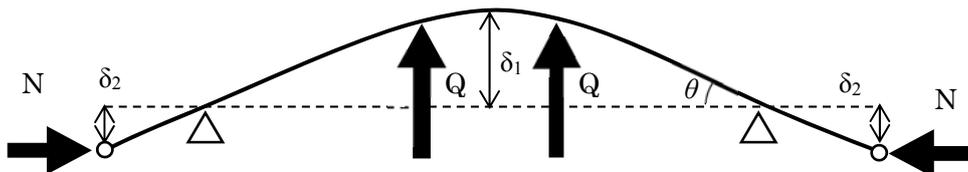


図 2.3.15 変形図

(2) 軸方向変位（曲率）

杭体の曲率は等モーメント区間内に軸方向変位計を設置して計測した。図 2.3.16 に曲率計測用変位計の設置位置を示す。軸方向変位計の検長は 600mm であり、杭表面から 50mm の位置に設置した。円周方向位置は杭体上下（H1, H5）と 45° 回転した位置（H2, H4）の 2 組であり、主に H1, H5 の計測値を用いた。曲率 ϕ は式(2.3.3)によって算出した。

$$\phi = (\delta_{H1} - \delta_{H5}) / (L_d \cdot (D + 2 \cdot d)) \quad (2.3.3)$$

ここに、 δ_{H1} : H1 の計測値 (mm) δ_{H5} : H5 の計測値 (mm)

L_d : 変位計の検長 (mm) D : 杭直径 (mm) d : 変位計と杭表面の距離 (mm)

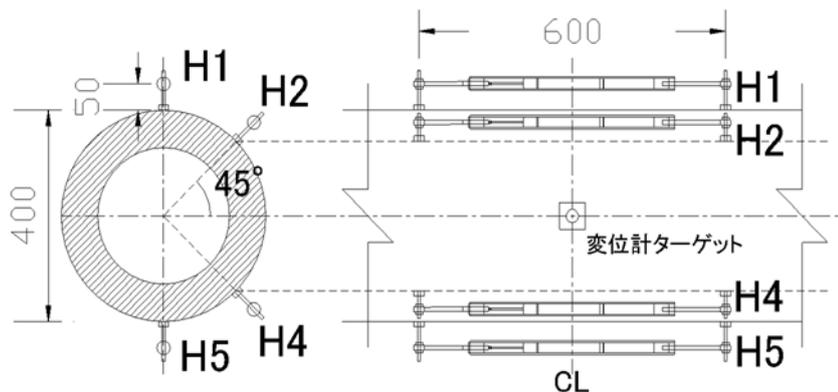


図 2.3.16 曲率用変位計設置位置

(3) 杭体表面ひずみ

杭体表面ひずみは、SC杭は FLK-2-11(東京測器研究所)、PRC杭および PHC杭は単軸用ゲージ PL-60-11(東京測器研究所)を用い計測した。図 2.3.17 にひずみゲージ貼付位置およびゲージ番号を示す。材軸方向位置としては杭体中央と左右 200mm 位置の 3 列で、北側から A, B, C 列とした。断面円周方向位置としては杭体上面から 45° ずつで、上から 1, 2, 3, 4, 5 番とした。ただし、中央の 1 枚 (B3) は鉛直変位の計測用ターゲット設置のために欠損しており、ひずみゲージは合計で 14 枚である。

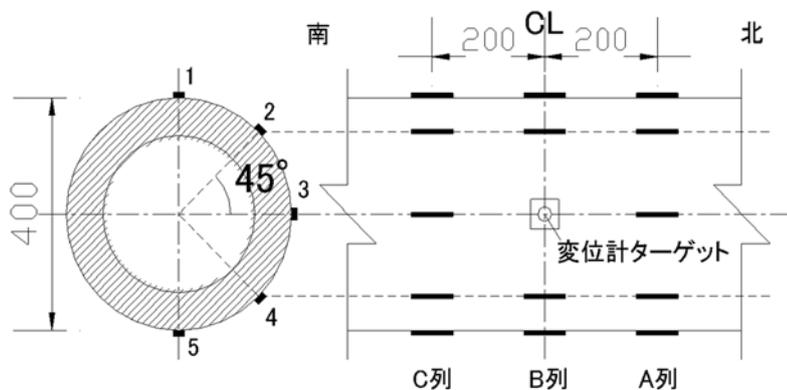


図 2.3.17 杭体表面ゲージ貼付位置

(4) PC鋼材・異形鉄筋ひずみ

PRC杭およびPHC杭では、杭体内部のPC鋼材，異形鉄筋のひずみを計測した。図2.3.18にひずみゲージ貼付位置を示す。計測にはFLK-2-11(東京測器研究所)を用い，圧縮および引張外縁に位置する1本ずつについて3ヶ所を計測した。なお，杭体を載荷装置に固定する際はPC鋼材が試験体上下縁に位置するようにした。材軸方向位置は杭体表面のひずみゲージと同様に杭体中心と左右200mmの位置である。ゲージ番号は，杭体上側は北側から1, 2, 3とし，下側は北側から4, 5, 6とした。

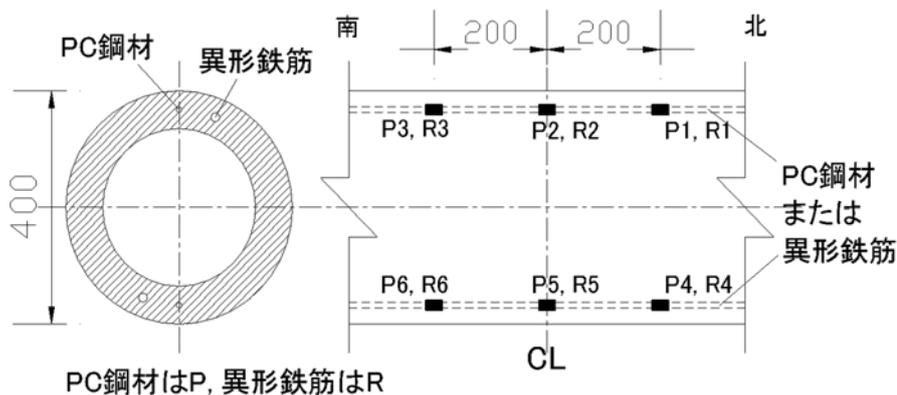


図 2.3.18 PC鋼材・異形鉄筋ひずみゲージ貼付位置

(5) 軸方向変位（座屈検知用）

SC杭では鋼管の局部座屈が発生すると座屈位置に圧縮変形が集中する。今回のような荷重方法では荷重点付近で局部座屈が発生するケースが多く、その場合は曲率計測区間で変形が進行しにくくなる。本実験では座屈の発生を検知するため、荷重点を挟んで軸方向変位を計測した。座屈検知用変位計の設置位置を図 2.3.19 に示す。材軸方向位置は荷重点を中心とし、検長と杭表面からの距離は曲率変位計と同様である。断面円周方向位置は、杭体断面中心位置から上下に 30° とした。(SC16, SC17, SC10 には設置していない。)

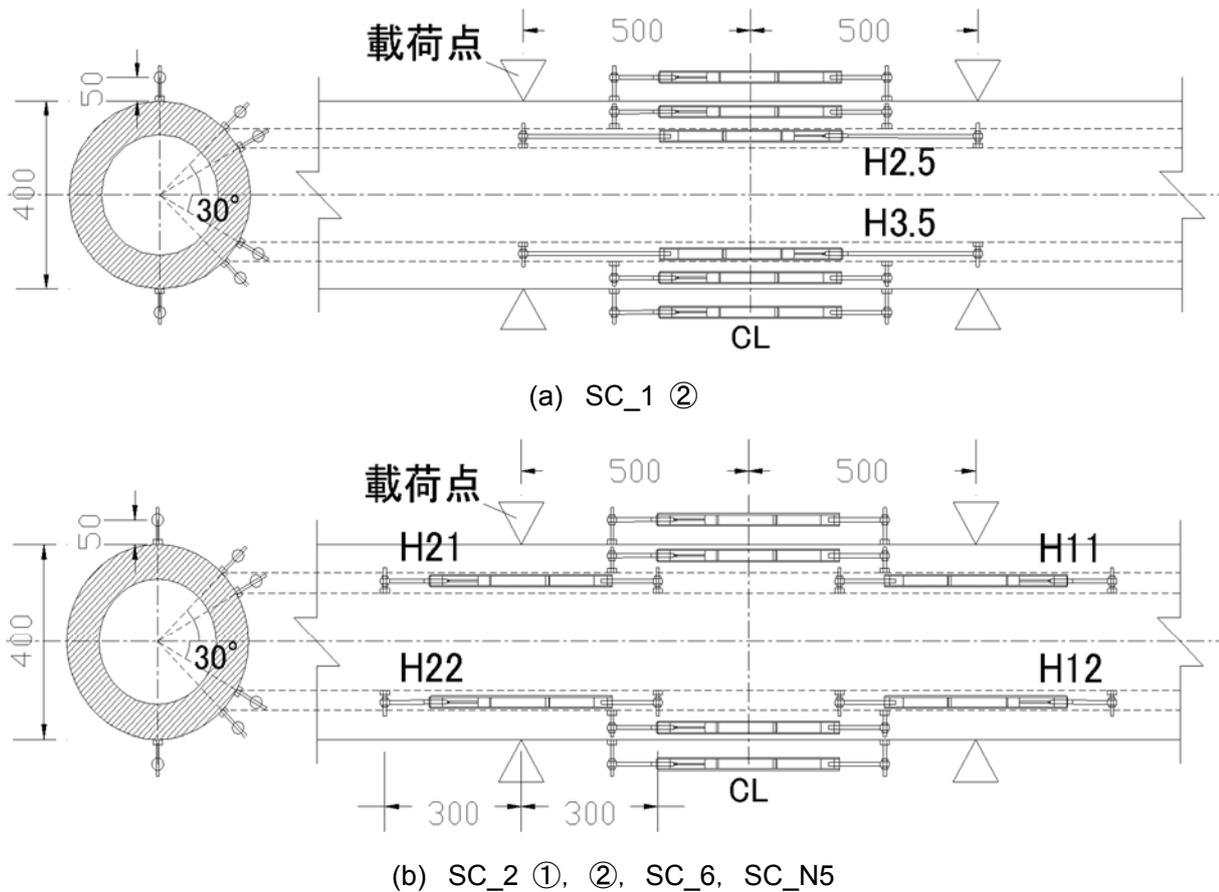


図 2.3.19 局部座屈検知用変位計の設置位置

2.4 実験結果

2.4.1 荷重－変形角関係

各試験体の荷重 Q －変形角 R 関係を図 2.4.1 から図 2.4.5 に示す。荷重 Q は载荷装置中央の鉛直载荷ジャッキ 2 本分の合計である。表 2.4.1 から表 2.4.5 には特性点の荷重・変形角の値を示した。表中の「—」は実験中に発生しなかったことを確認したもの、または、発生し得ないもの（一方向载荷の負側など）を表している。鋼材にひずみゲージを貼付していない試験体の降伏点や、計測の不良などによって現象の発生の有無が判断できないものについては「No Data」と表記した。また、現象の発生を確認したものの、計測不良等により発生した時期が不明瞭な場合は表中に「○」を表記した。破壊過程等は 2.4.4 項に示す。

表中の「終局」は鋼管の局部座屈，コンクリートの圧壊，PC 鋼材の破断を総称しており，各試験体の破壊形式は表右部に示した。「B」は鋼管の局部座屈，「C」はコンクリートの圧壊，「F」は PC 鋼材の破断を表している。また，終局変形の値は終局時の経験最大変形である。各特性点についての定義は以下のようなものである。

- ・ 曲げひび割れ：杭体にはじめて曲げひび割れが発生した点。杭体表面のひずみゲージの計測値から読み取ったもので，引張外縁のひずみ値が急激に増加した点，もしくは，変形が増加しているにもかかわらず引張外縁のひずみ値が減少に転じた点とした。
- ・ 鋼材（鋼管・PC 鋼材・異形鉄筋）の降伏：鋼材に貼付したひずみゲージの計測値のいずれかが材料試験の降伏ひずみに達した点。
- ・ 鋼管の局部座屈：载荷によって変形角 R が増加しているにもかかわらず曲率 ϕ が減少に転じた点，または，軸方向変位計 H1, H5 の計測値と比較して H11, 12 または H21, 22 の計測値（絶対値）が急激に増加した点。

表 2.4.1 各特性点の荷重・変形角（SC 杭）

試験体名	鋼管引張降伏				鋼管圧縮降伏				最大耐力				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	Q (kN)	R (%)															
SC16	359	1.25	—	—	452	3.01	—	—	488	7.54	—	—	○	○	—	—	B
SC17	375	1.35	407	1.50	421	2.30	No Data	No Data	482	7.35	440	3.01	444	7.82	—	—	B
SC10	447	1.59	346	1.27	No Data	No Data	389	2.01	472	1.99	398	2.58	356	4.63	—	—	B
SC11	408	1.41	393	1.52	452	2.27	404	2.12	453	2.43	413	1.87	319	4.05	—	—	B
SC12	424	1.64	398	1.62	427	2.26	398	1.62	437	1.84	402	2.04	399	2.89	—	—	B
SC13	448	1.64	381	1.85	430	1.41	381	1.85	458	1.91	382	1.97	416	2.95	—	—	B
SC14	—	—	—	—	307	1.22	328	0.65	316	1.08	417	0.85	300	1.30	—	—	B
SC15※1	358	0.74	315	0.72	—	—	—	—	609	2.99	635	2.99	—	—	—	—	—

※1：終局まで載荷を行っていないため、最大耐力は参考値。

表 2.4.2 各特性点の荷重・変形角（PRC 杭 I 種）

試験体名	曲げひび割れ				異形鉄筋引張降伏				異形鉄筋圧縮降伏				PC鋼材引張降伏				最大モーメント				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	Q (kN)	R (%)																							
PRC22	61.2	0.166	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	174	3.94	—	—	172	4.27	—	—	C
PRC23	62.5	0.171	—	—	114	0.777	—	—	—	—	—	—	139	1.27	—	—	173	3.93	—	—	173	4.12	—	—	C
PRC17	69.5	0.192	79.4	0.207	93.8	0.387	95.4	0.309	—	—	—	—	112	0.661	123	0.815	180	4.20	178	3.01	173	5.06	163	4.09	※2
PRC18	152	0.490	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	226	1.46	—	—	213	2.34	—	—	C
PRC19	175	0.503	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	232	1.50	—	—	221	2.22	—	—	C
PRC20	168	0.563	—	—	232	1.41	—	—	229	1.29	—	—	No Data	No Data	—	—	235	1.65	—	—	225	1.96	—	—	C
PRC21	155	0.504	—	—	224	1.11	—	—	No Data	No Data	—	—	236	1.47	—	—	236	1.49	—	—	224	2.02	—	—	C
PRC15	178	0.609	154	0.520	240	1.50	205	1.10	215	0.906	199	0.981	—	—	224	1.40	240	1.50	227	1.49	—	—	227	1.49	C
PRC16	177	0.635	157	0.539	231	1.32	216	1.38	188	0.751	157	0.539	—	—	—	—	235	1.49	218	1.50	231	1.58	—	—	C

※2：負側はPC鋼材の破断，正側はコンクリートの圧壊で，負側が先。

表 2.4.3 各特性点の荷重・変形角（PRC 杭 III種）

試験体名	曲げひび割れ				異形鉄筋引張降伏				異形鉄筋圧縮降伏				PC鋼材引張降伏				最大耐力				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	Q (kN)	R (%)																							
PRC11	68.0	0.163	—	—	154	0.828	—	—	—	—	—	—	184	1.18	—	—	236	3.84	—	—	236	3.84	—	—	C
PRC14	60.7	0.172	79.1	0.148	162	1.05	174	0.905	—	—	—	—	188	1.44	202	1.23	229	3.54	239	3.51	218	3.56	238	3.55	C
PRC09	192	0.571	—	—	275	1.35	—	—	246	0.961	—	—	284	1.66	—	—	290	1.92	—	—	288	2.19	—	—	C
PRC10	185	0.584	—	—	267	1.35	—	—	240	0.950	—	—	277	2.04	—	—	290	2.39	—	—	290	2.39	—	—	C
PRC12	110	0.432	163	0.503	—	—	—	—	137	0.591	222	0.890	—	—	—	—	192	1.41	229	0.973	191	1.44	—	—	C
PRC13	148	0.469	171	0.472	—	—	258	1.46	202	0.993	—	—	—	—	—	—	227	1.49	258	1.46	—	—	257	1.50	C
PRC07	312	0.808	181	0.892	—	—	—	—	206	0.246	72.5	0.275	—	—	—	—	322	0.874	184	0.948	314	1.00	—	—	C
PRC08	○※3	0.110	○※4	○※4	○※3	0.617	○※3	0.562	—	—	—	—	221	1.13	161	1.04	339	3.99	275	3.94	211	4.02	218	3.94	F

※3：載荷ミスにより荷重は計測できなかった。 ※4：負側曲げひび割れ発生点はひずみゲージの値から読み取れなかった。

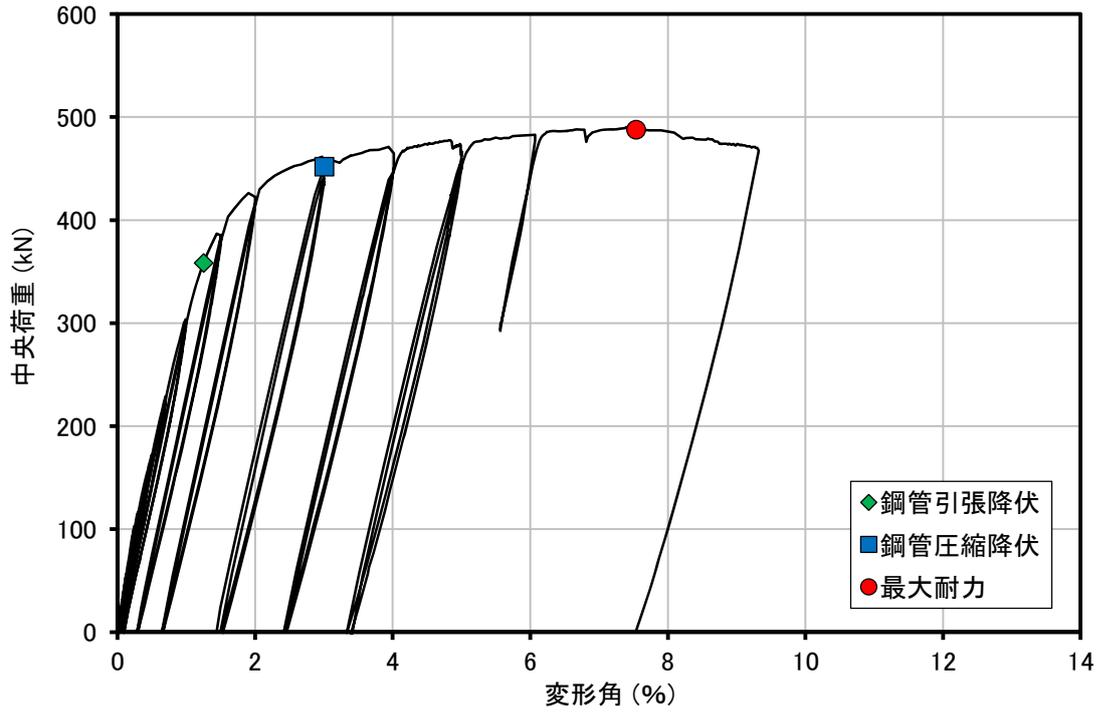
第2章 既製杭（SC杭，PRC杭，PHC杭）の曲げ破壊実験

表 2.4.4 各特性点の荷重・変形角（PHC杭 A種）

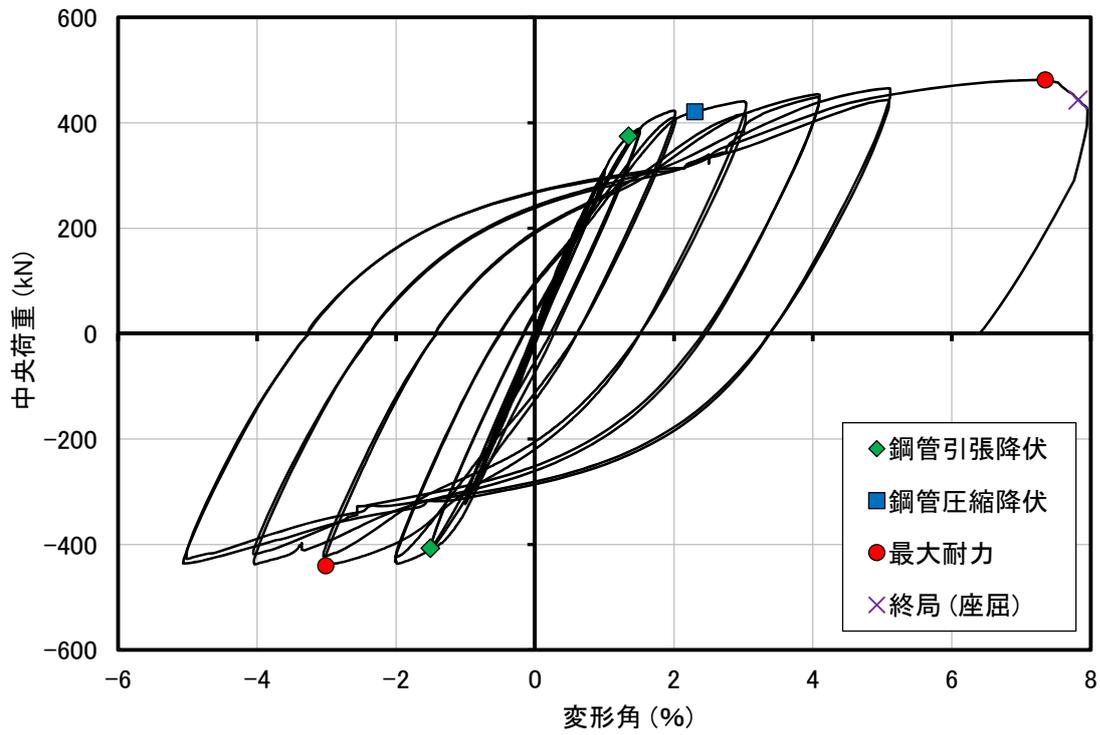
試験体名	曲げひび割れ				PC鋼材引張降伏				最大耐力				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	Q (kN)	R (%)															
PHC14	50.5	0.132	—	—	77.7	0.822	—	—	84.3	1.80	—	—	70.1	2.00	—	—	F
PHC07	37.3	0.109	48.0	0.157	No Data	No Data	No Data	No Data	74.3	1.48	76.3	1.51	—	—	70.0	2.07	F
PHC08	37.6	0.130	47.6	0.185	No Data	No Data	75.0	0.983	72.0	1.98	79.8	2.00	68.1	2.12	—	—	F
PHC12	160	0.512	—	—	194	1.67	—	—	205	1.19	—	—	173	2.08	—	—	C
PHC13	156	0.530	—	—	199	1.28	—	—	199	1.25	—	—	176	1.99	—	—	C
PHC03	155	0.696	123	0.561	No Data	No Data	No Data	No Data	176	1.01	146	1.00	174	1.28	—	—	C
PHC04	156	0.676	125	0.584	No Data	No Data	No Data	No Data	175	1.01	148	1.02	174	1.21	—	—	C
PHC05	134	0.578	127	0.651	No Data	No Data	—	—	161	0.980	147	0.972	151	1.08	—	—	C
PHC06	148	0.642	132	0.695	—	—	No Data	No Data	169	1.24	143	0.984	164	1.33	—	—	C

表 2.4.5 各特性点の荷重・変形角（PHC杭 C種）

試験体名	曲げひび割れ				PC鋼材引張降伏				最大耐力				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	Q (kN)	R (%)															
PHC17	89.8	0.243	—	—	157	1.12	—	—	197	3.42	—	—	196	3.43	—	—	C
PHC11	109	0.296	117	0.267	163	1.16	173	0.870	187	2.97	200	2.97	169	3.65	—	—	C
PHC16	146	0.408	—	—	223	1.18	—	—	231	1.80	—	—	223	2.43	—	—	C
PHC10	146	0.444	145	0.359	208	1.29	234	1.309	212	1.50	237	1.50	211	1.73	—	—	C
PHC15	193	0.588	—	—	261	1.46	—	—	261	1.45	—	—	255	1.80	—	—	C
PHC09	197	0.655	203	0.610	—	—	—	—	233	1.14	241	0.974	233	1.14	—	—	C
PHC01	—	—	—	—	—	—	—	—	303	0.934	178	0.747	303	0.934	—	—	C
PHC02	85.3	0.195	87.9	0.208	150	0.864	154	0.9332	244	3.00	236	3.00	235	3.41	—	—	F

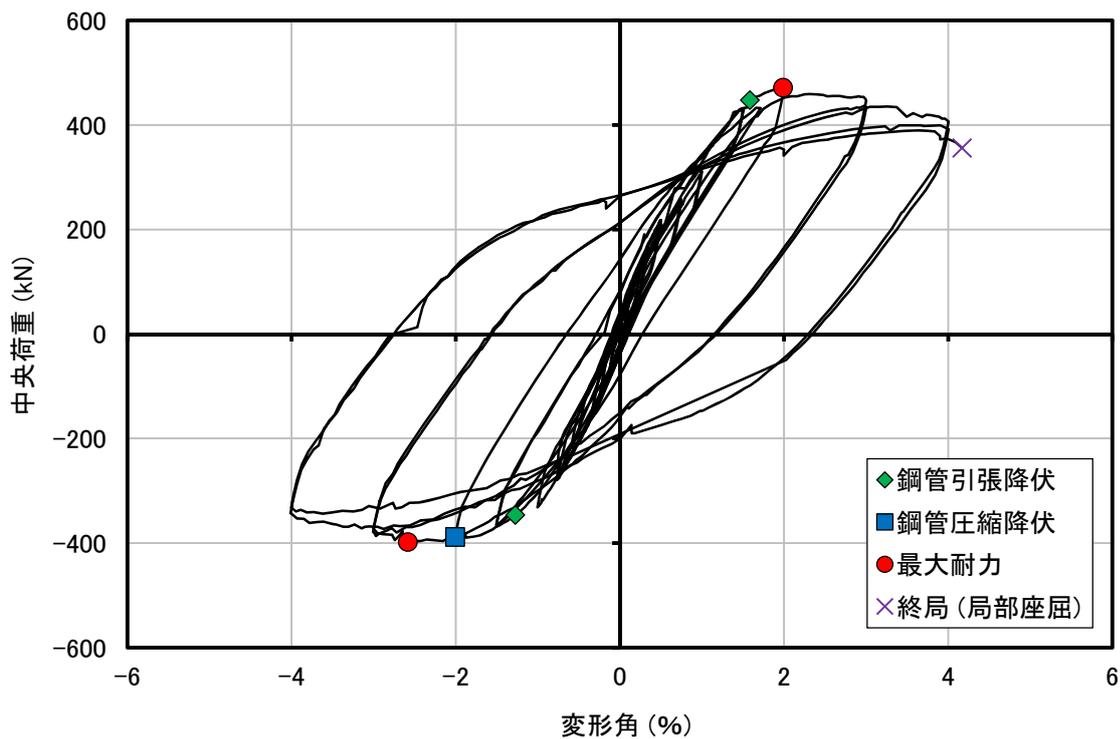


(a) SC16

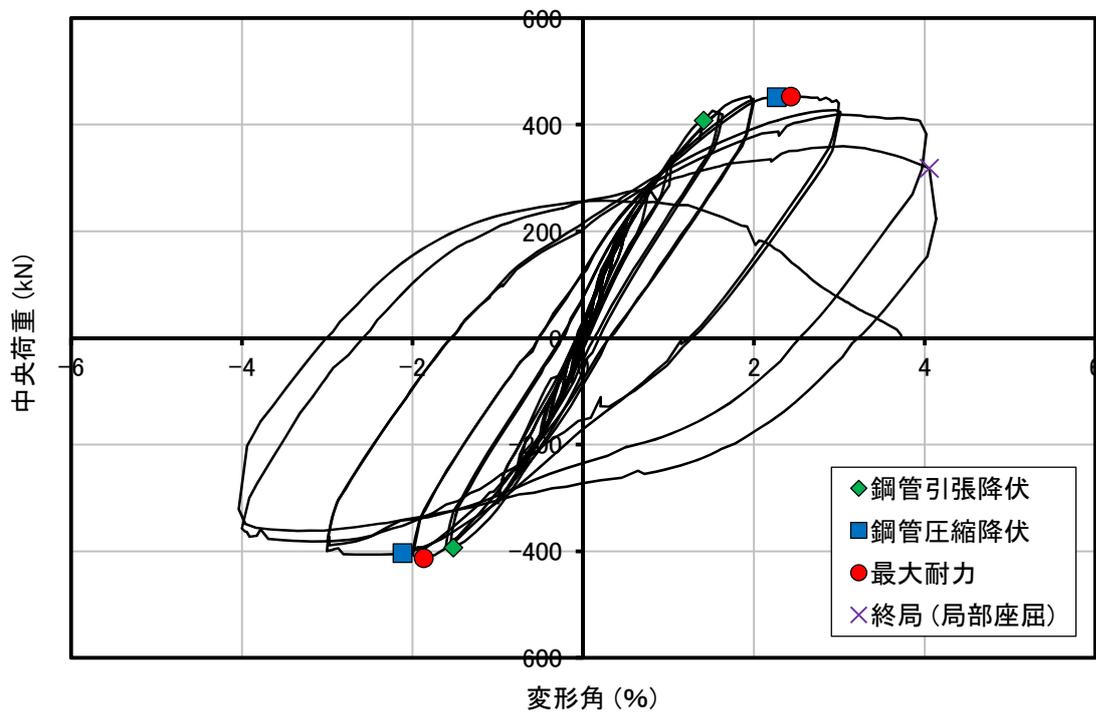


(b) SC17

図 2.4.1 荷重-変形角関係 (SC 杭) (次項に続く)

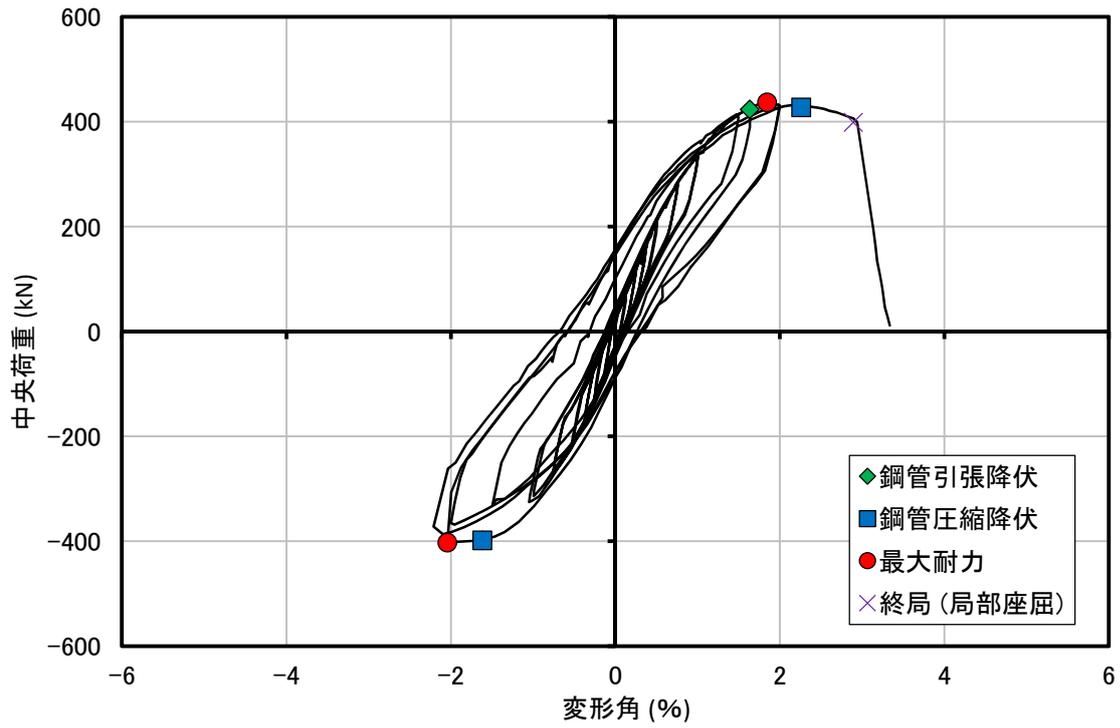


(c) SC10

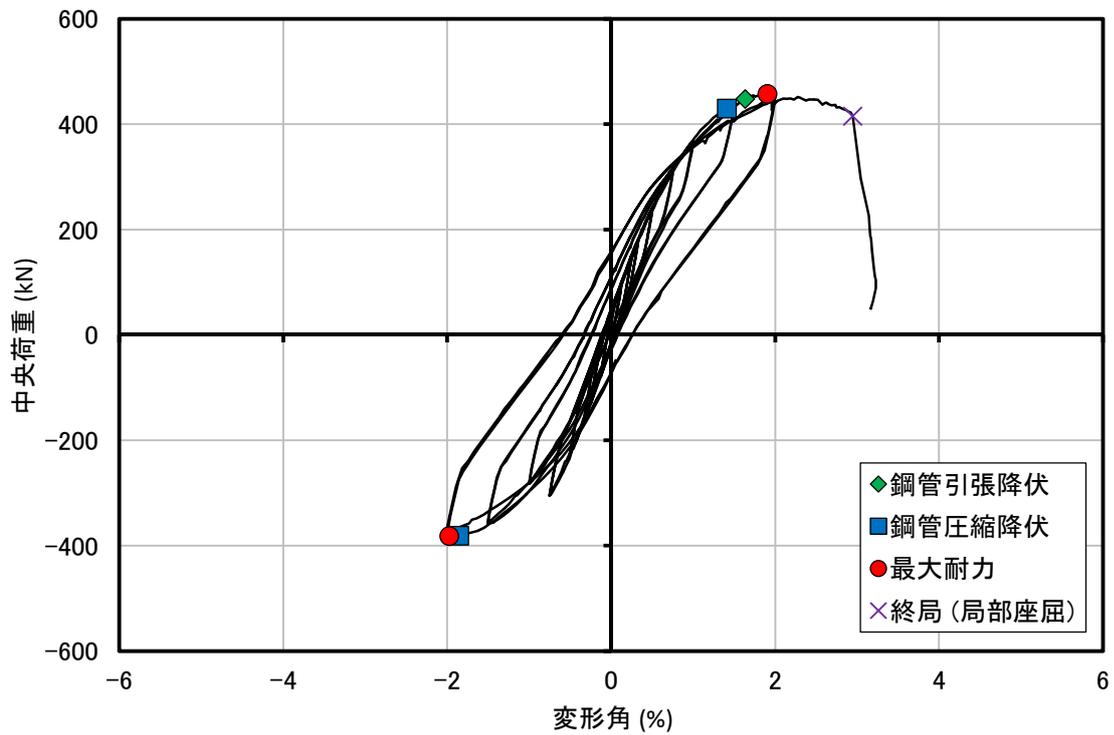


(d) SC11

図 2.4.1 荷重－変形角関係 (SC 杭) (次項に続く)

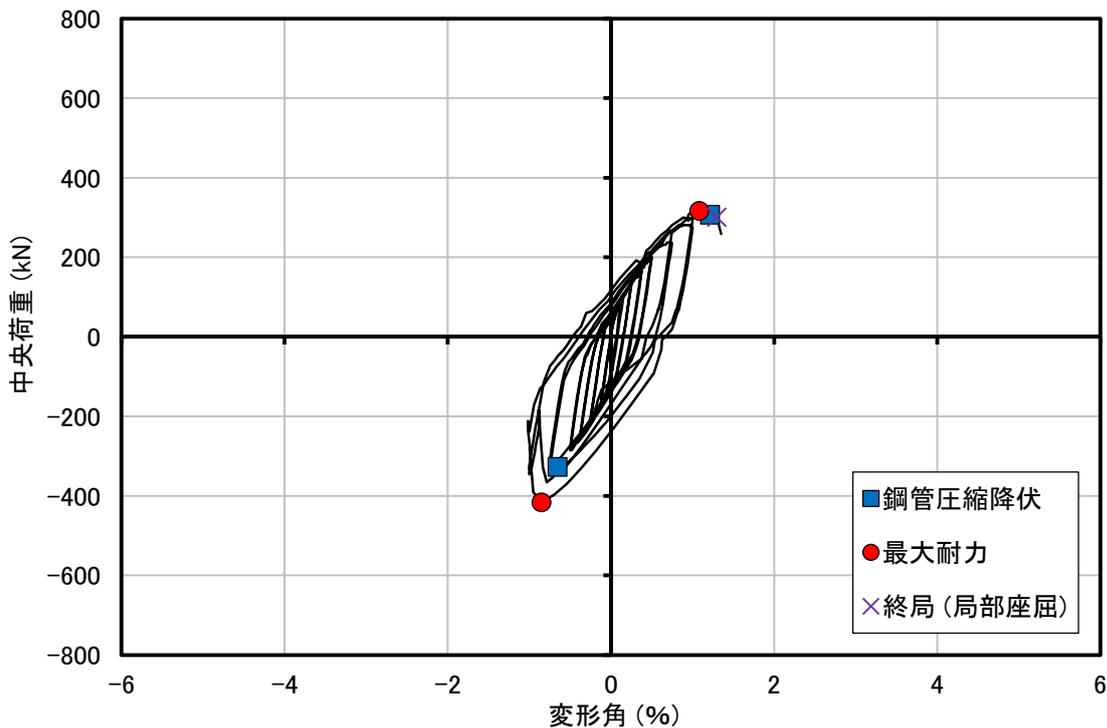


(e) SC12

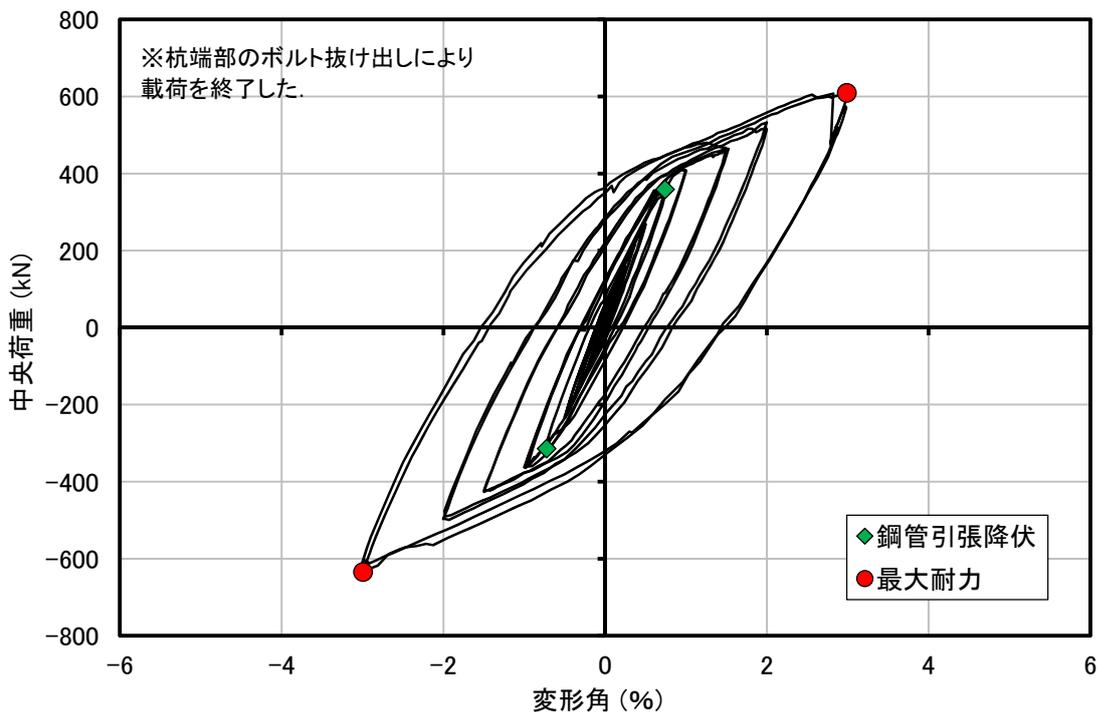


(f) SC13

図 2.4.1 荷重－変形角関係 (SC 杭) (次項に続く)

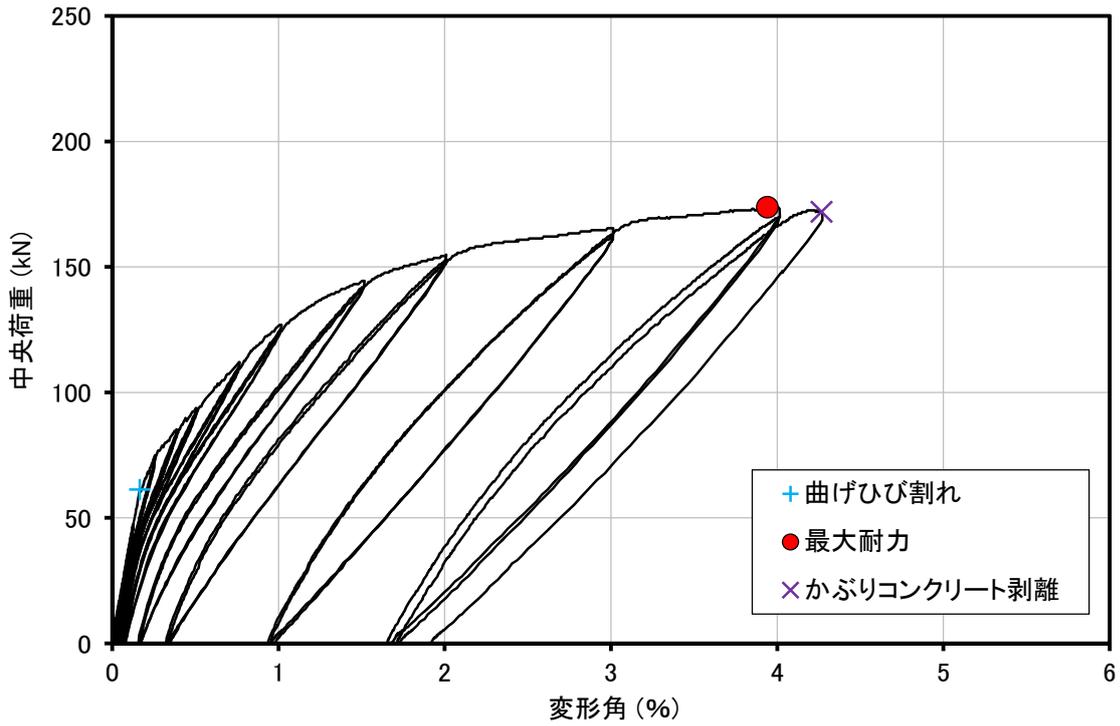


(g) SC14

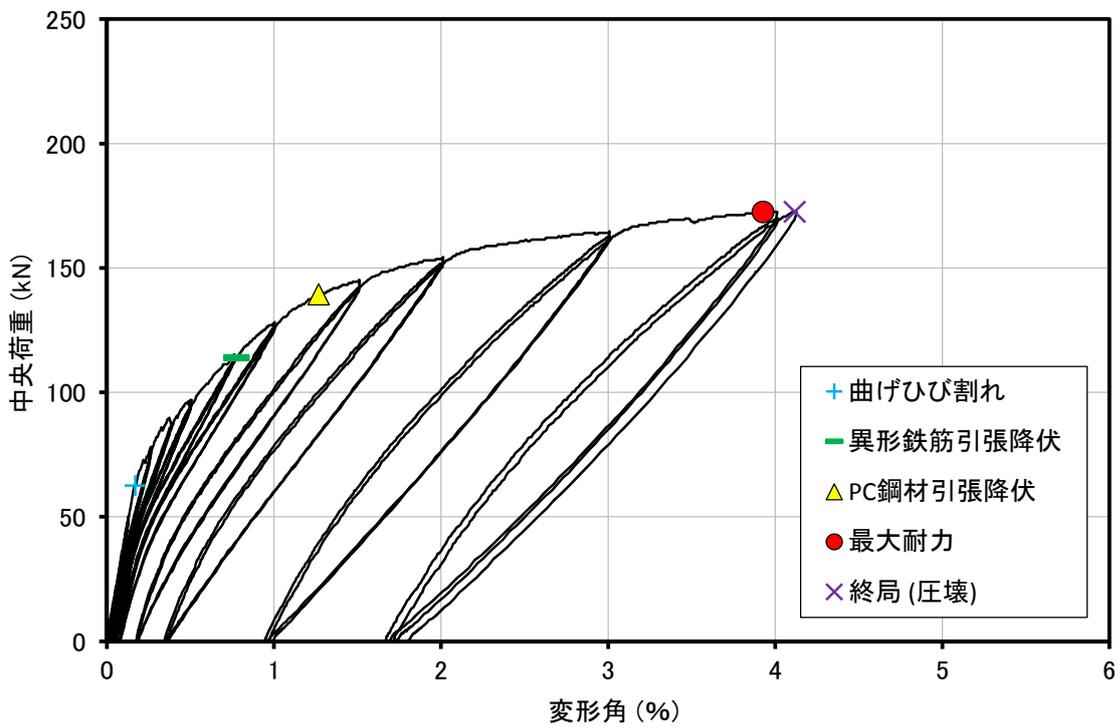


(h) SC15

図 2.4.1 荷重－変形角関係 (SC 杭)

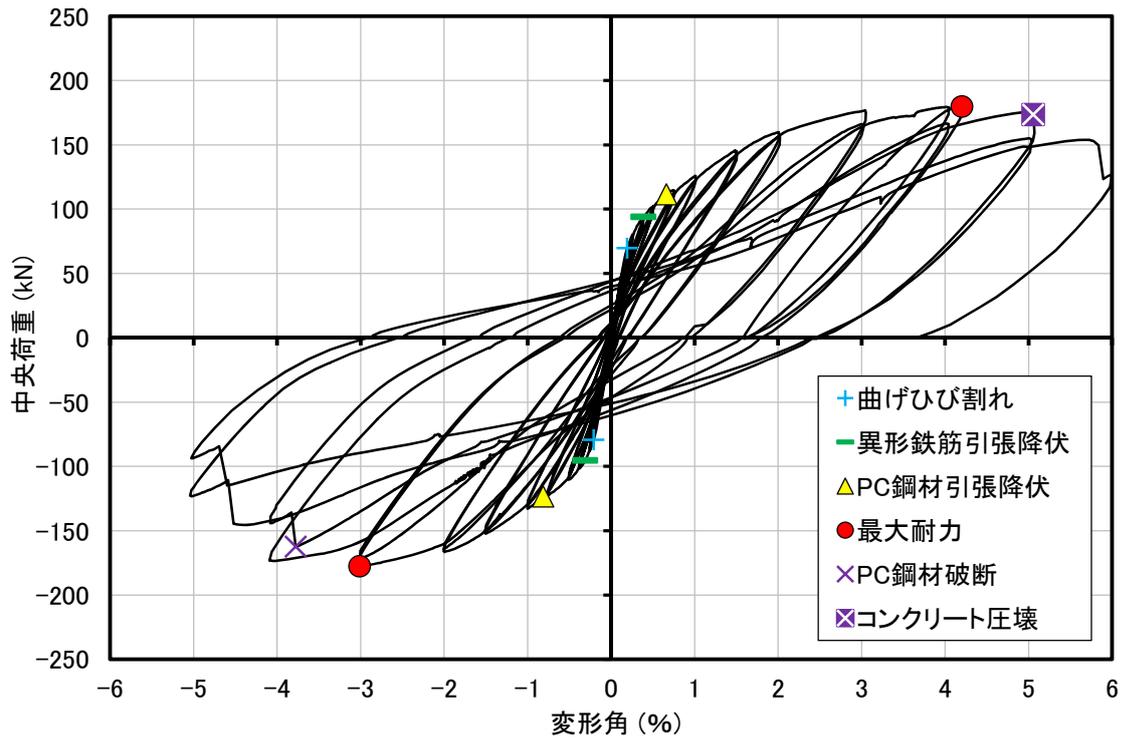


(a) PRC22



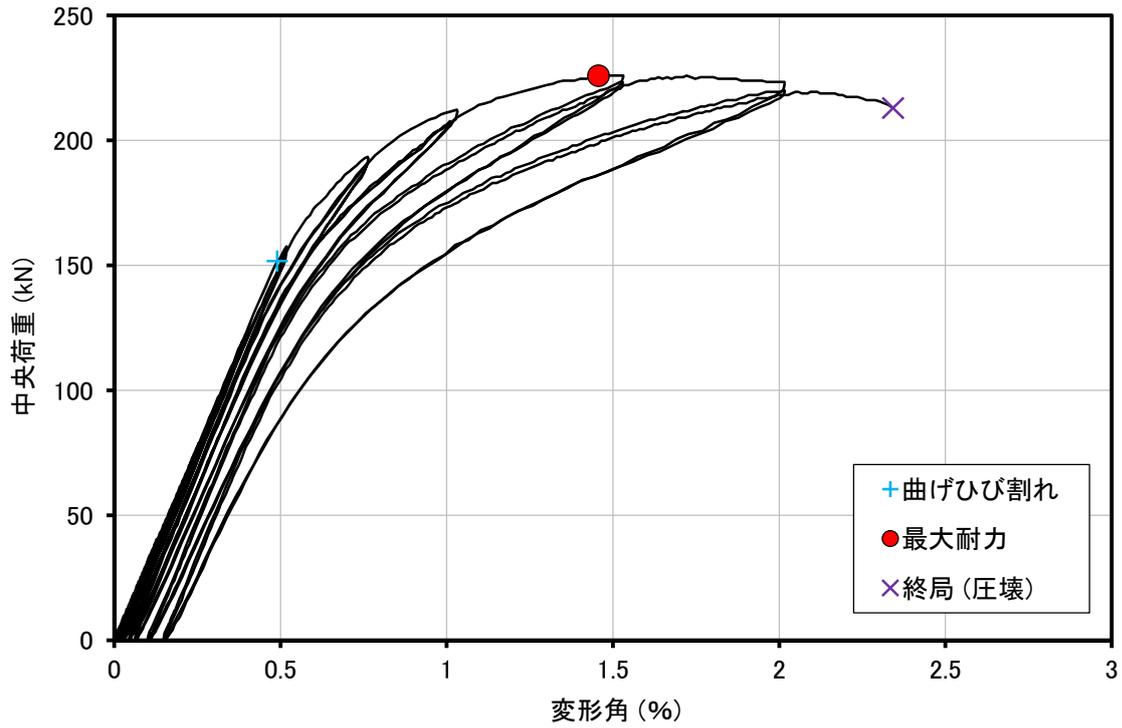
(b) PRC23

図 2.4.2 荷重—変形角関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

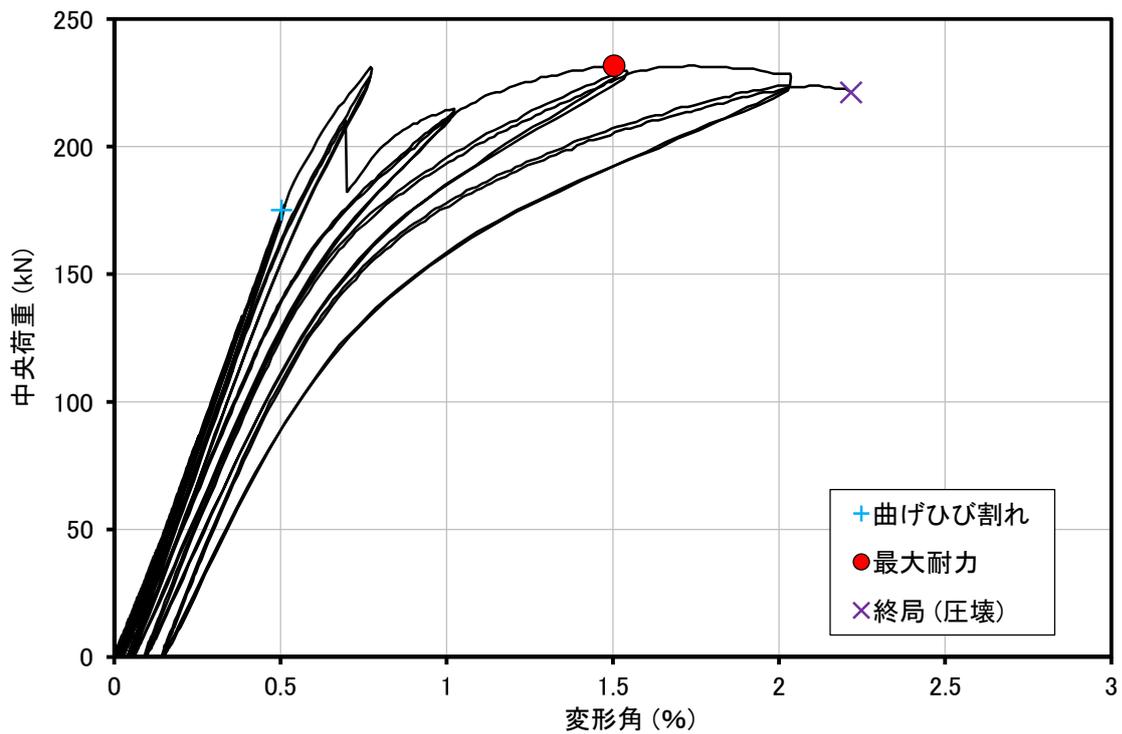


(c) PRC17

図 2.4.2 荷重—変形角関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

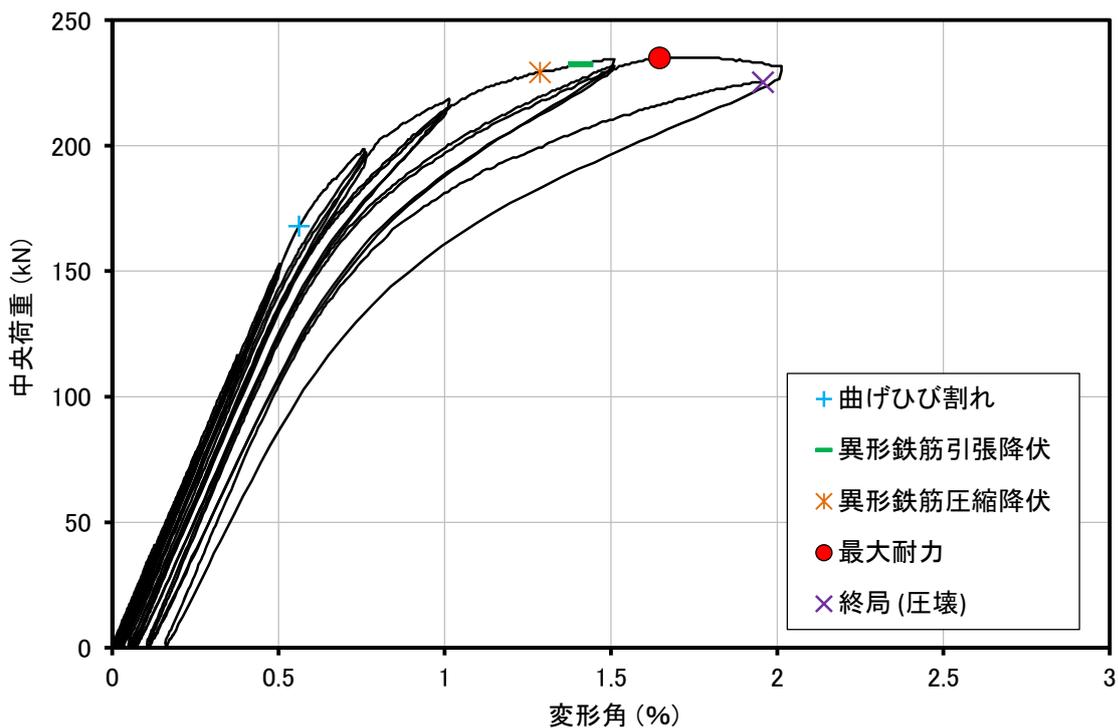


(d) PRC18

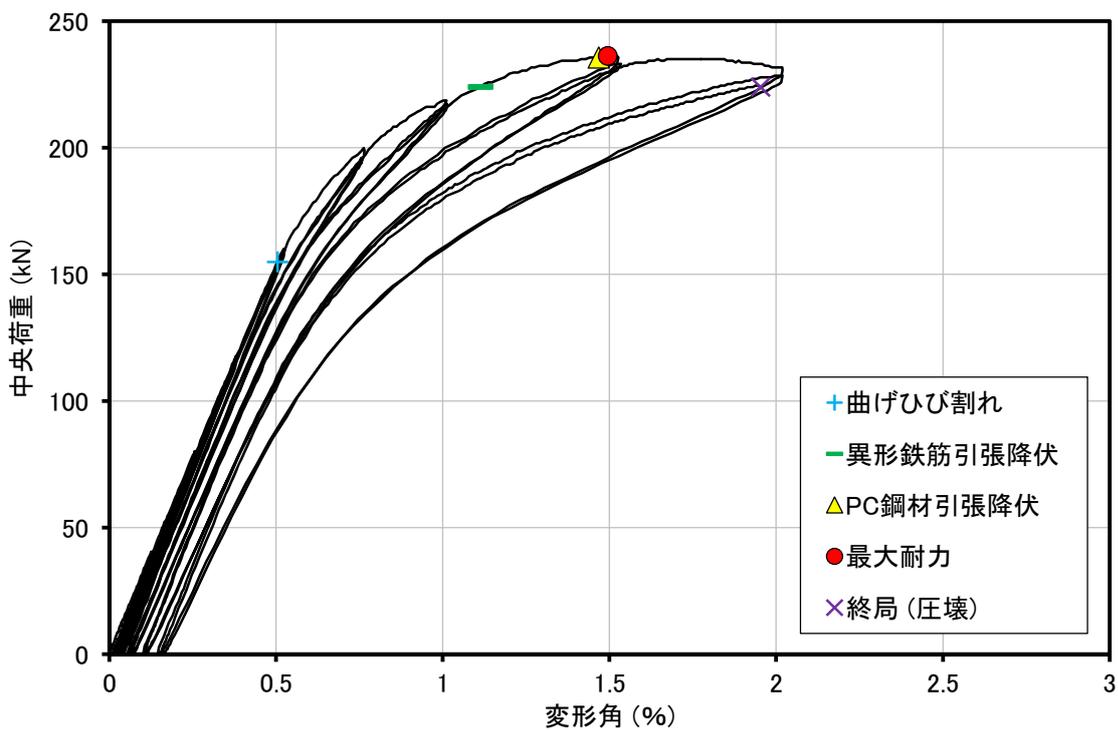


(e) PRC19

図 2.4.2 荷重—変形角関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

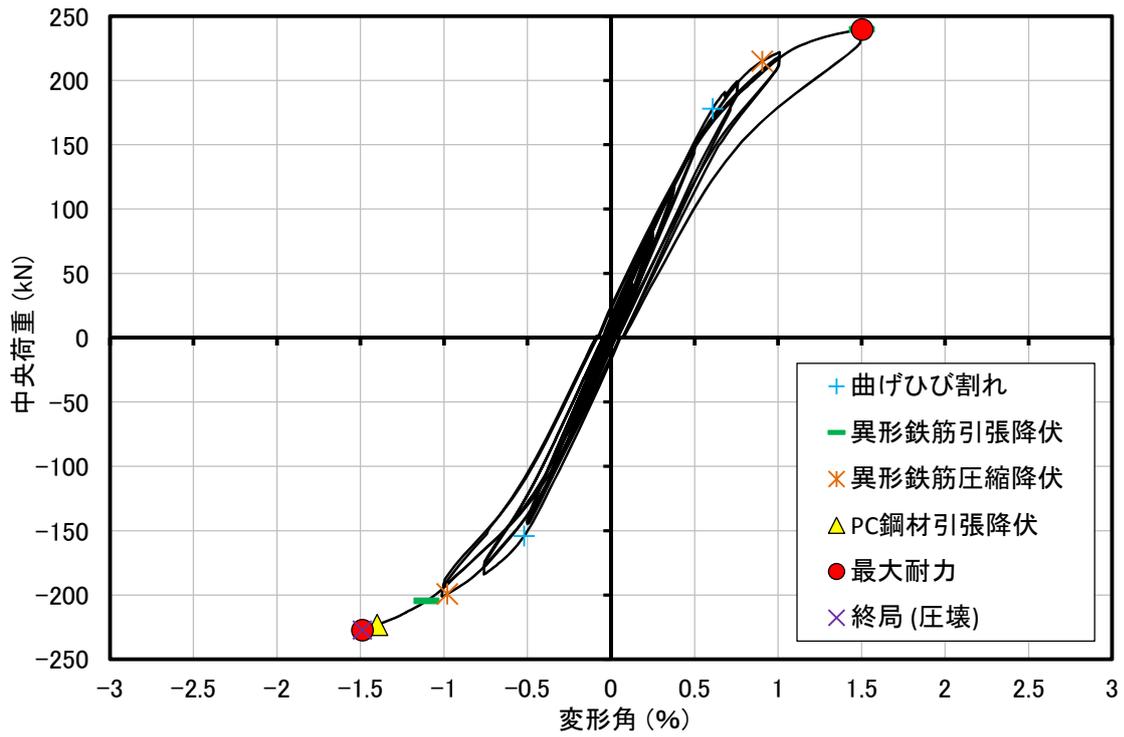


(f) PRC20

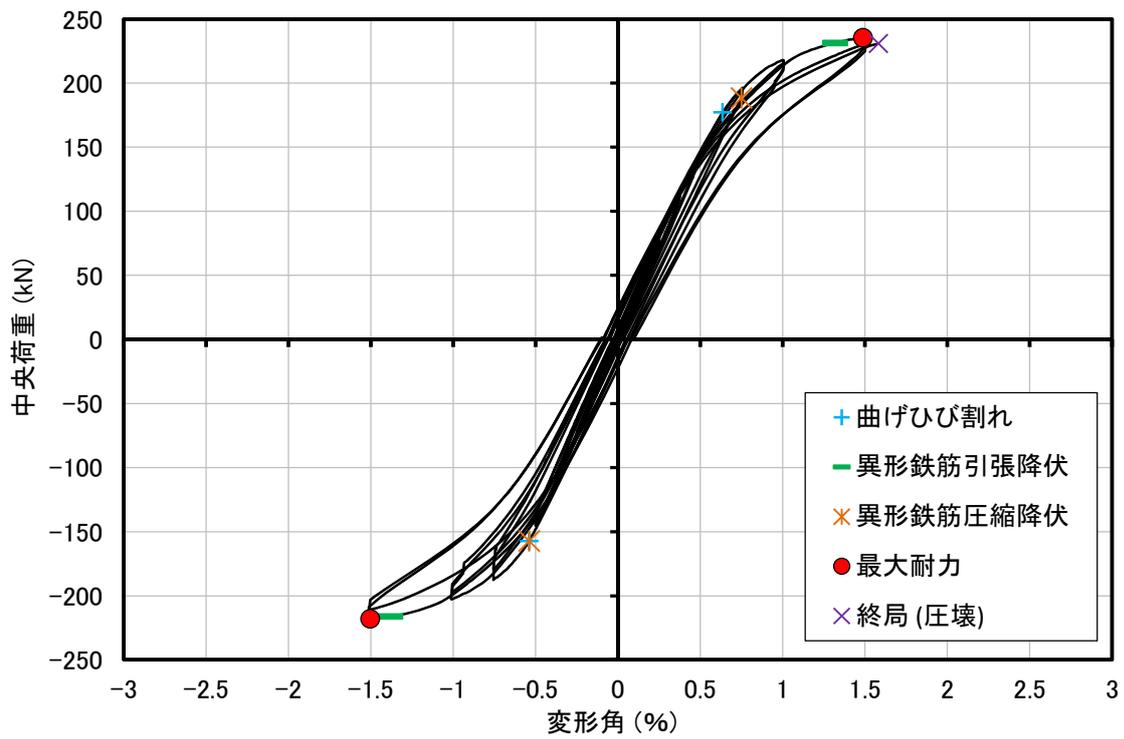


(g) PRC21

図 2.4.2 荷重—変形角関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

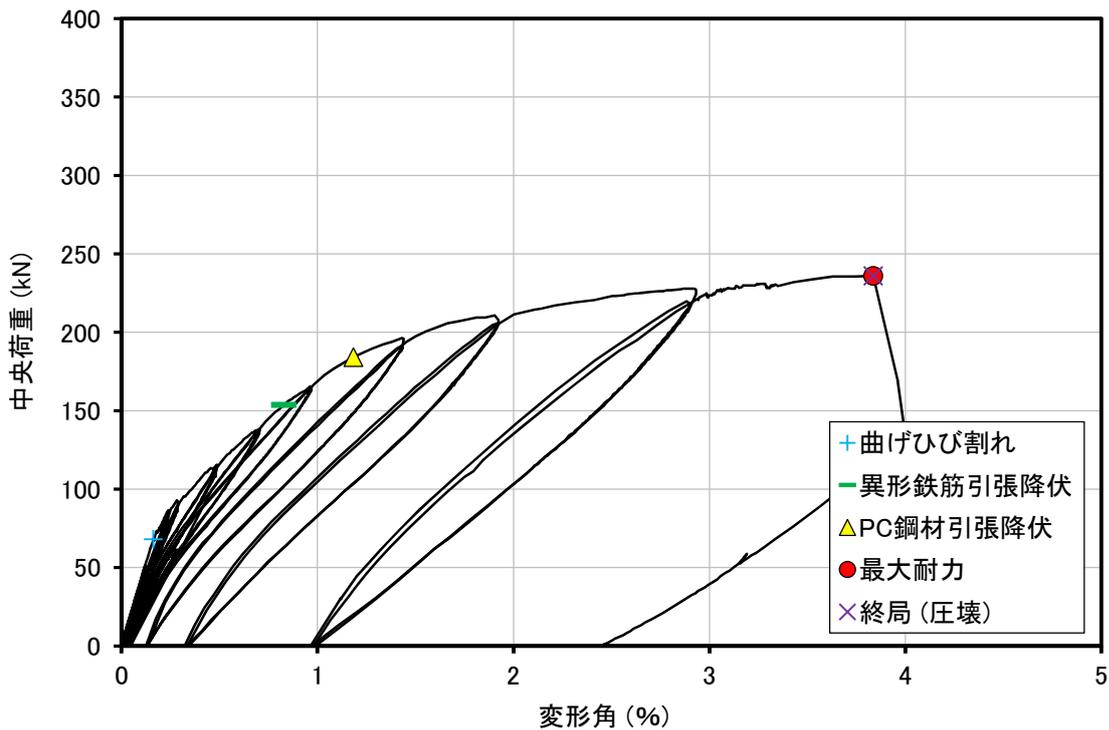


(h) PRC15

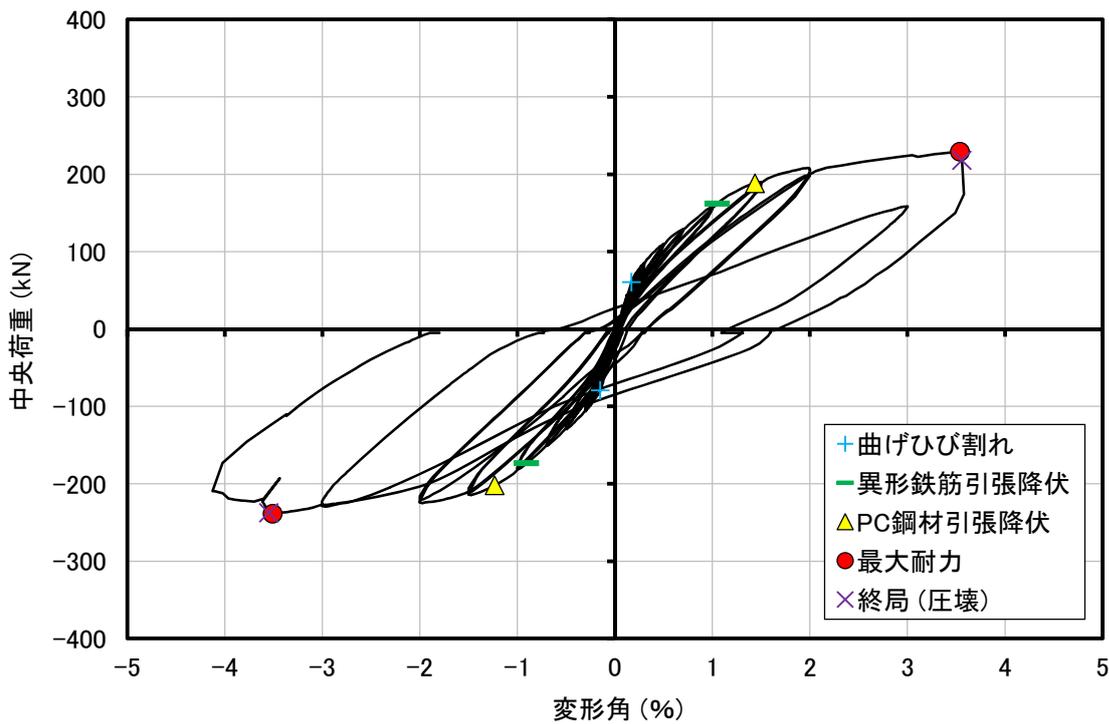


(i) PRC16

図 2.4.2 荷重－変形角関係 (PRC 杭 I 種)

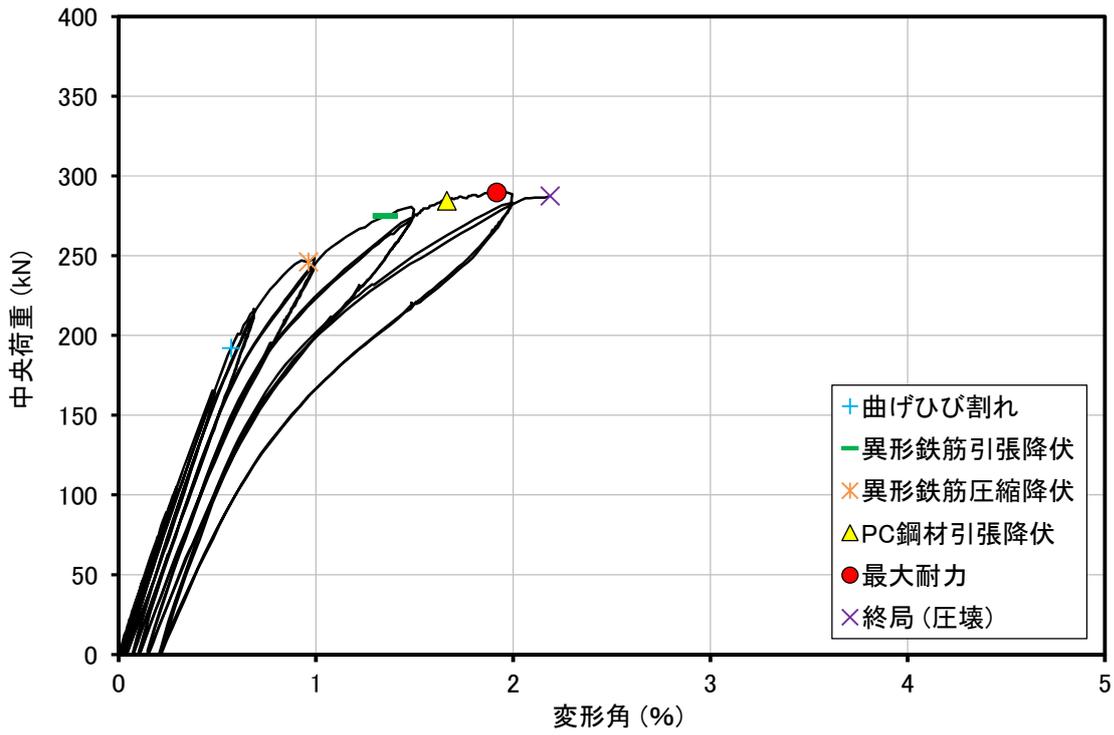


(a) PRC11

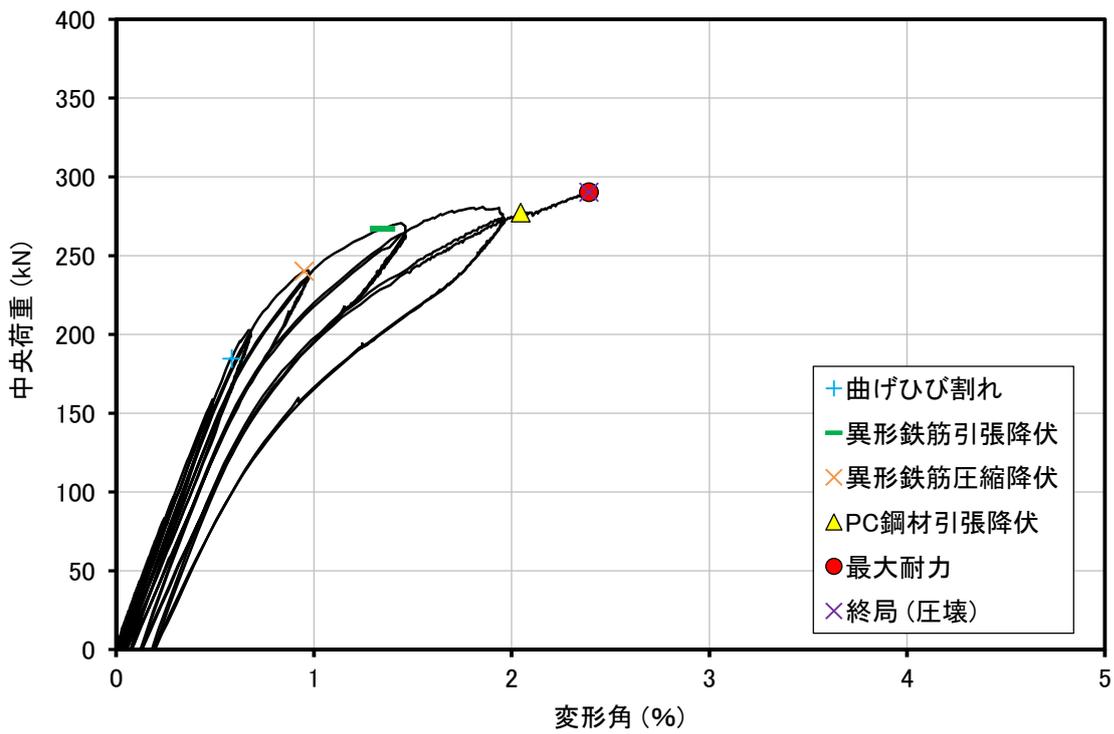


(b) PRC14

図 2.4.3 荷重—変形角関係 (PRC 杭 Ⅲ種) (次項に続く)

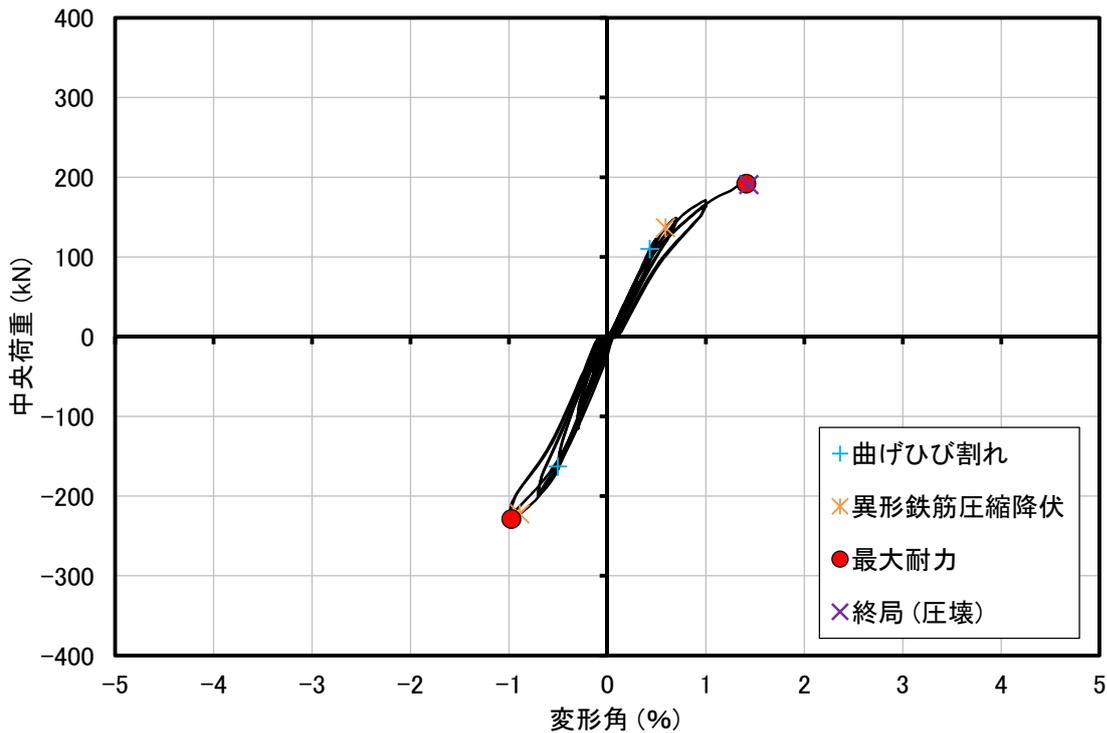


(c) PRC09

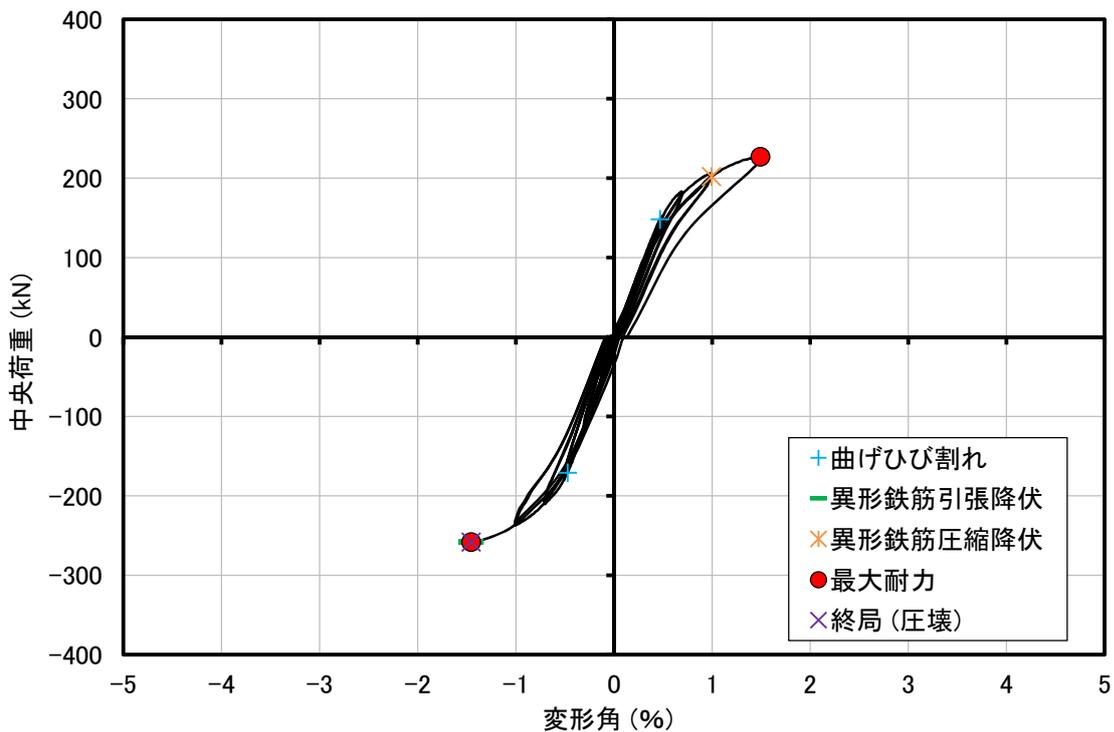


(d) PRC10

図 2.4.3 荷重—変形角関係 (PRC 杭 Ⅲ種) (次項に続く)

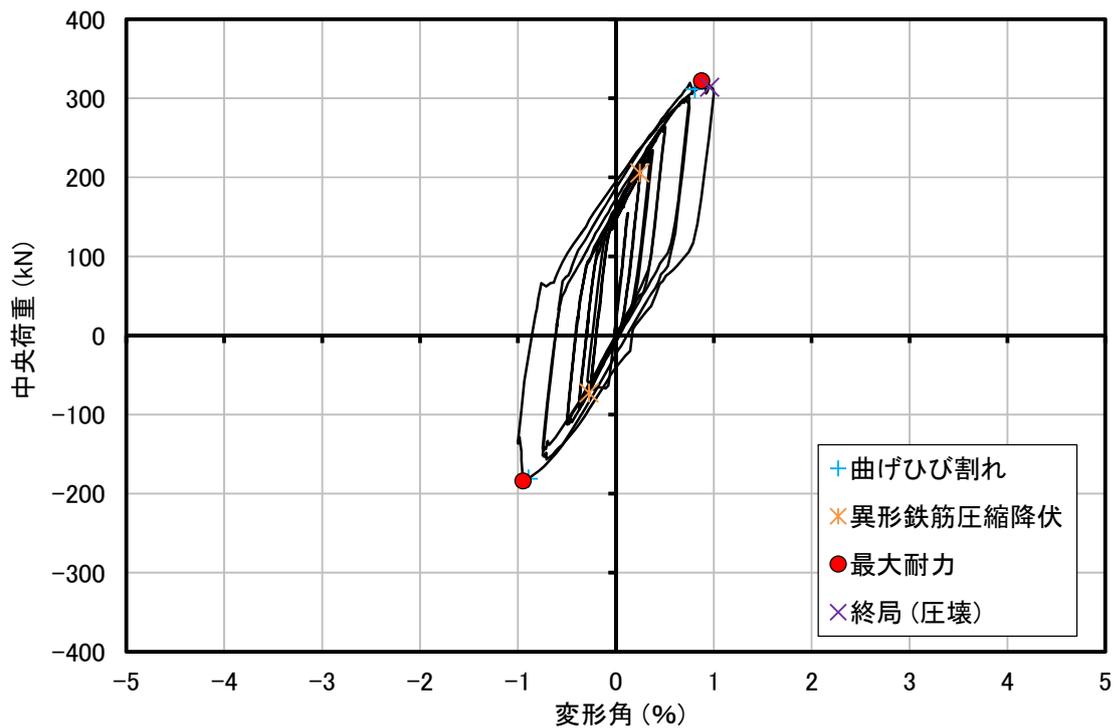


(e) PRC09

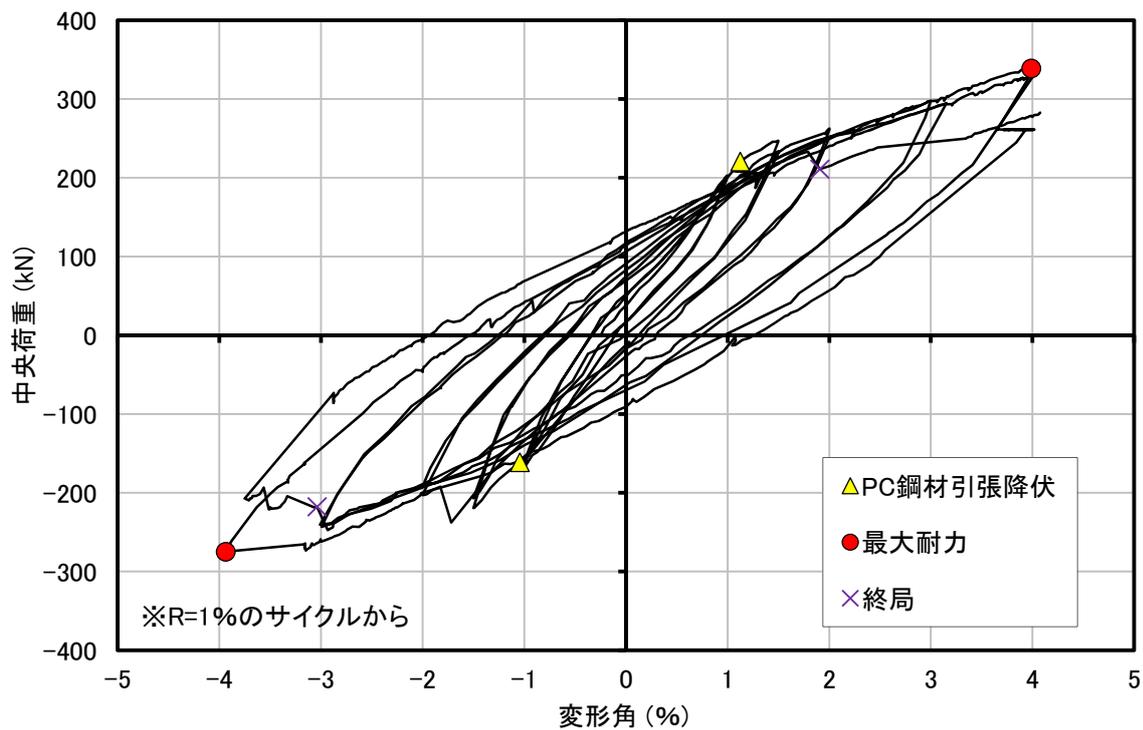


(f) PRC10

図 2.4.3 荷重—変形角関係 (PRC 杭 Ⅲ種) (次項に続く)

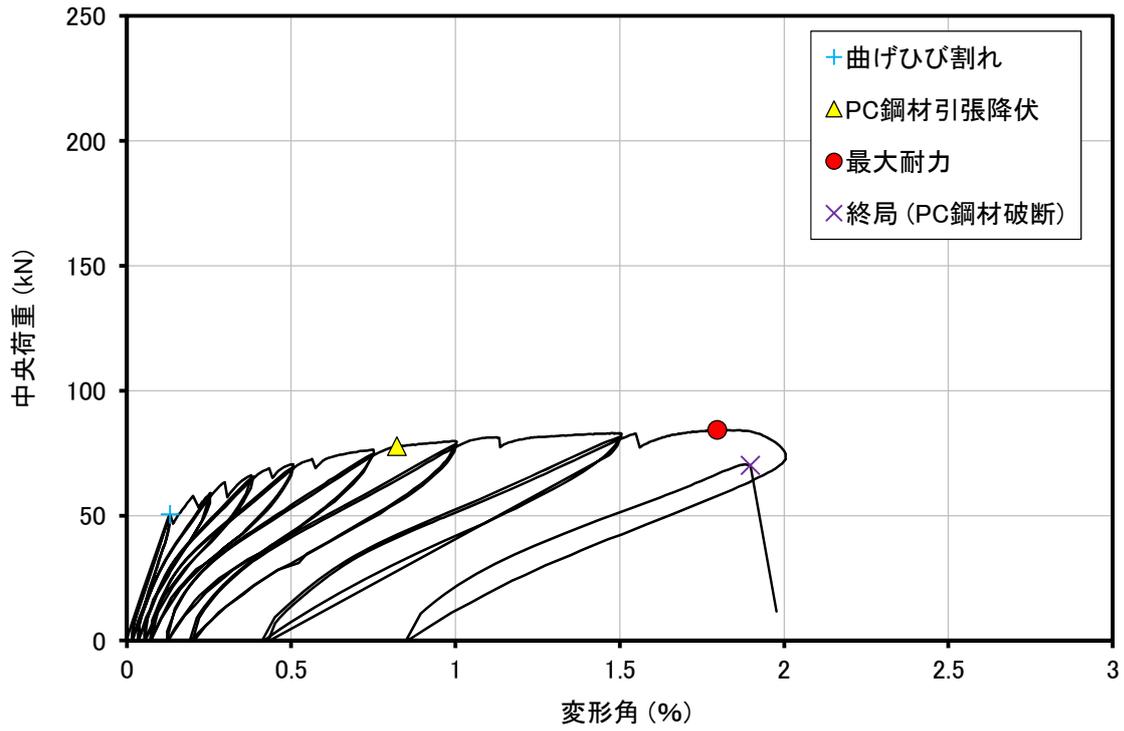


(g) PRC07



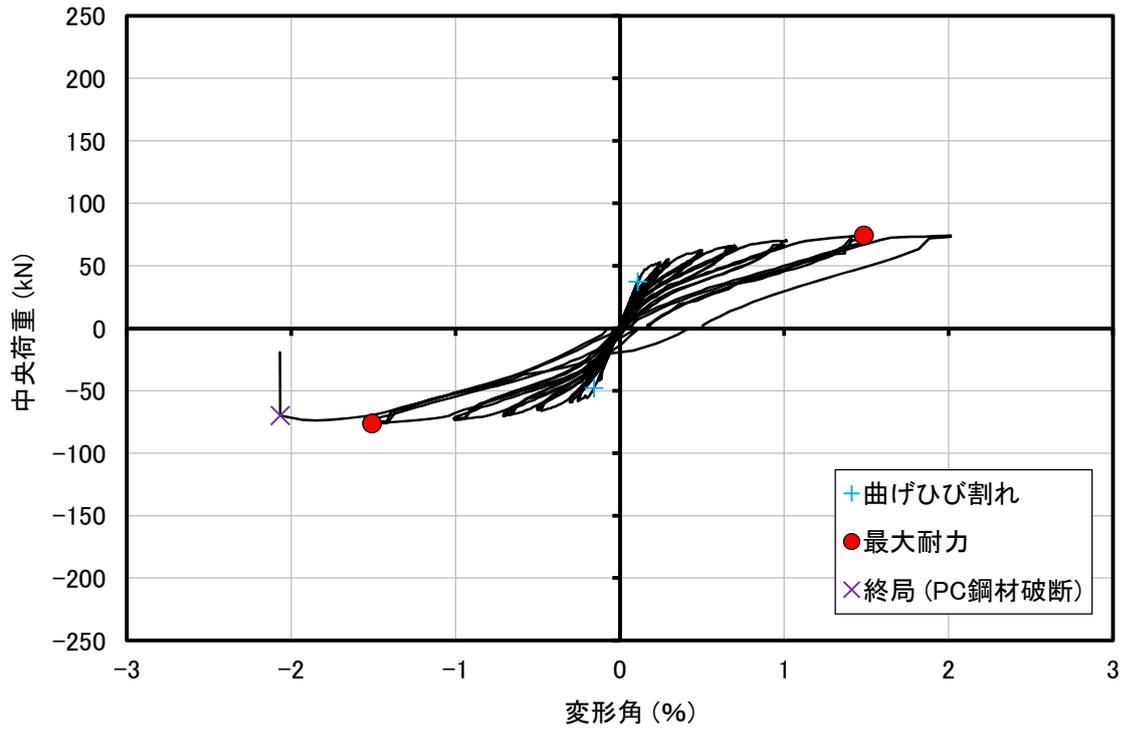
(h) PRC08

図 2.4.3 荷重—変形角関係 (PRC 杭 Ⅲ種)

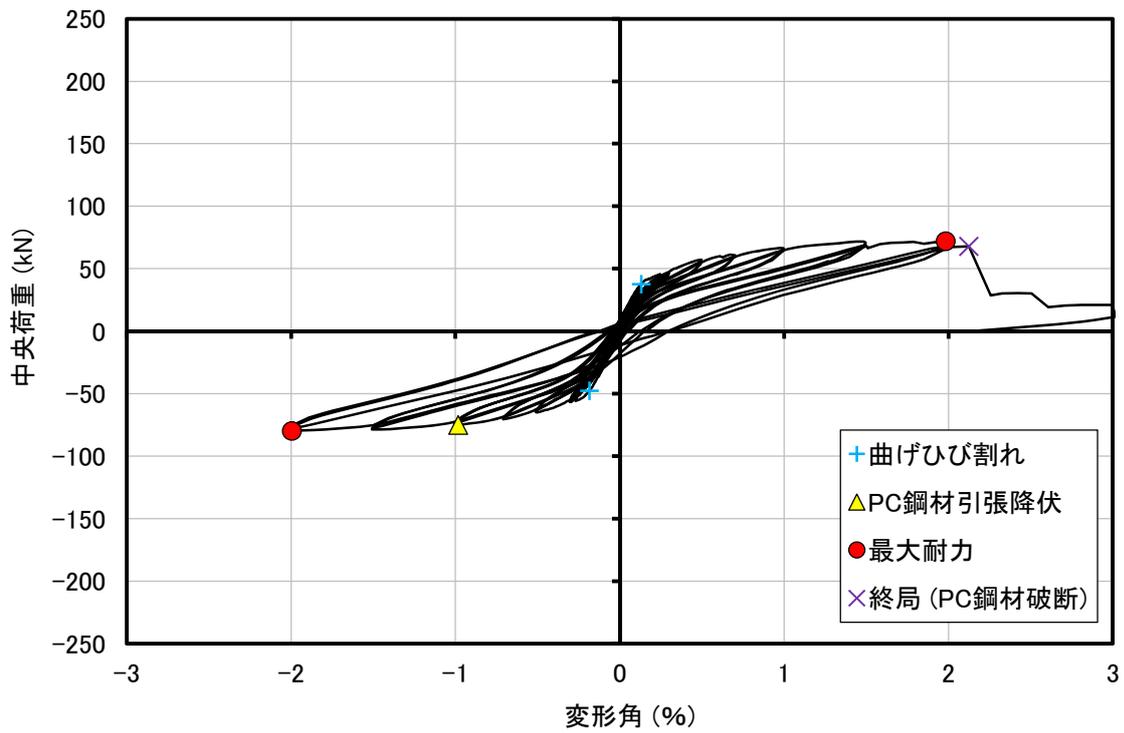


(a) PHC14

図 2.4.4 荷重—変形角関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

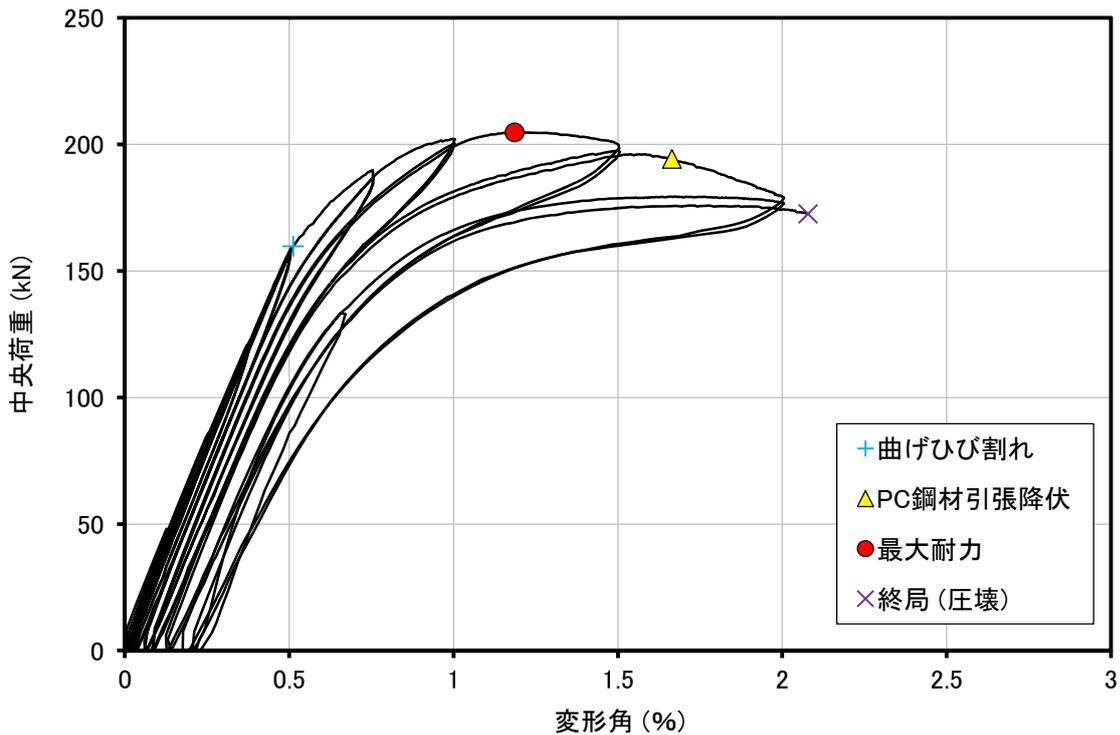


(b) PHC07

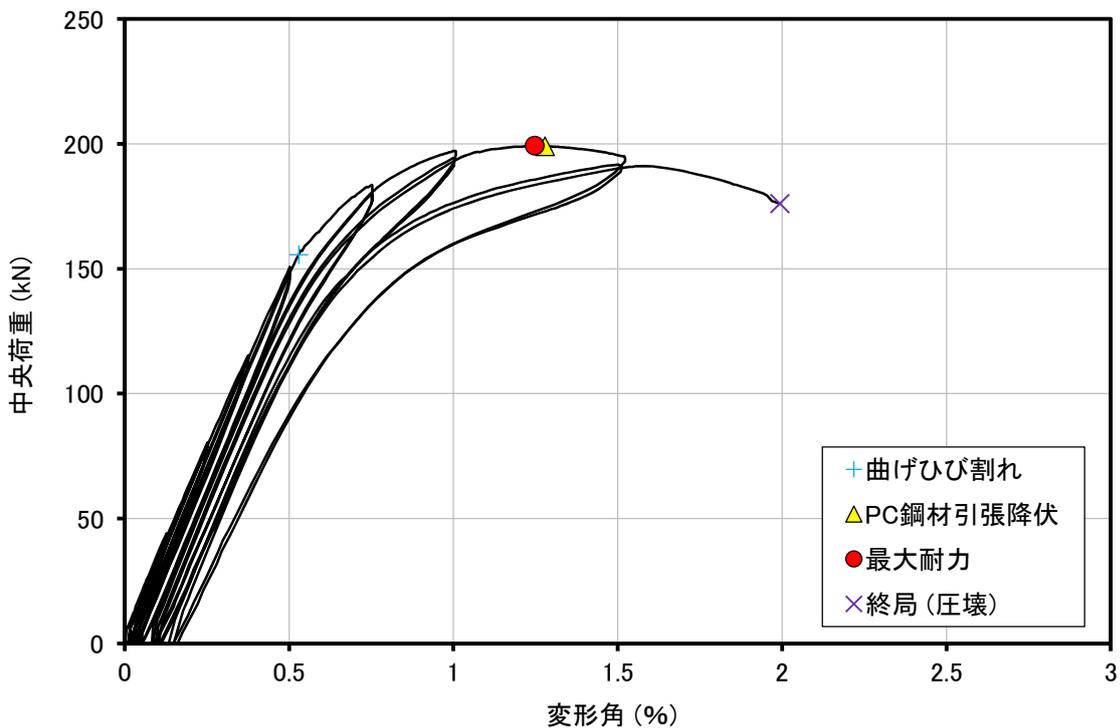


(c) PHC08

図 2.4.4 荷重—変形角関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

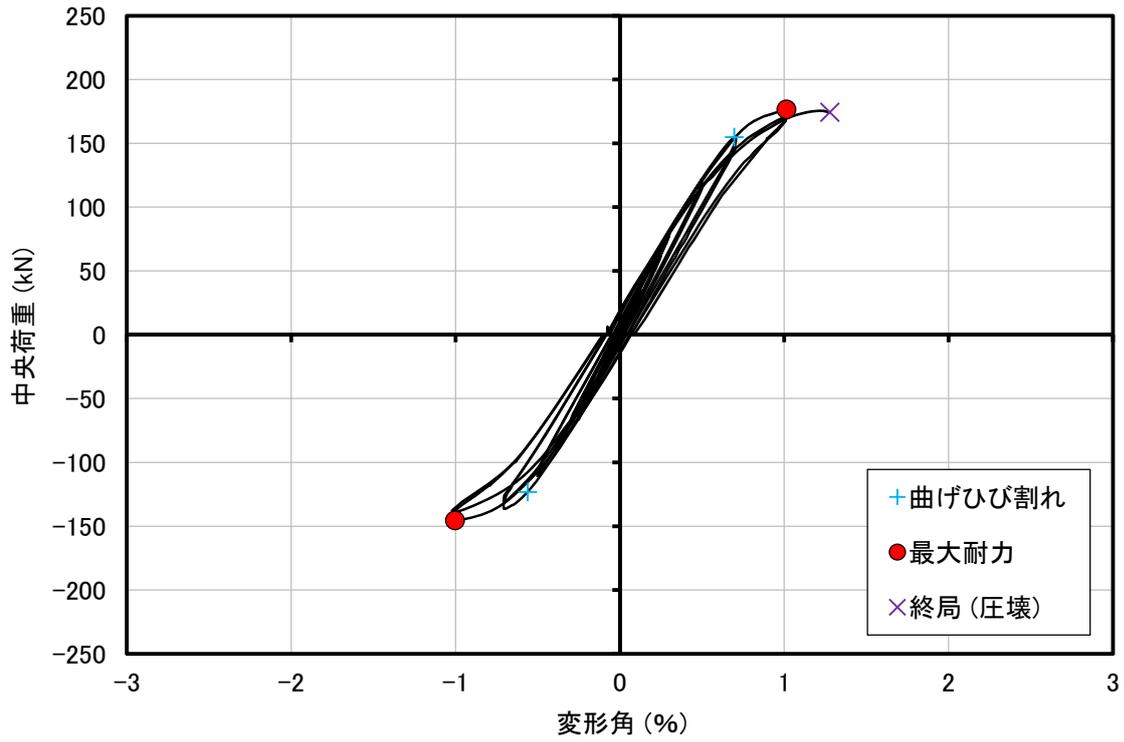


(d) PHC12

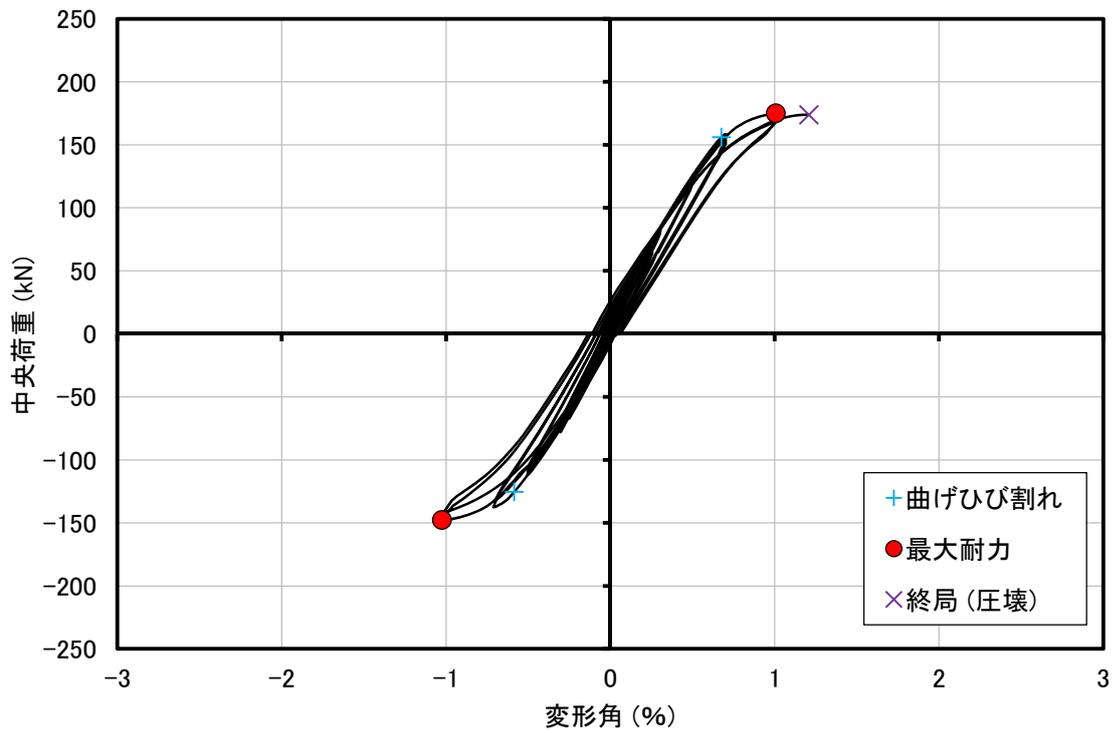


(e) PHC13

図 2.4.4 荷重—変形角関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

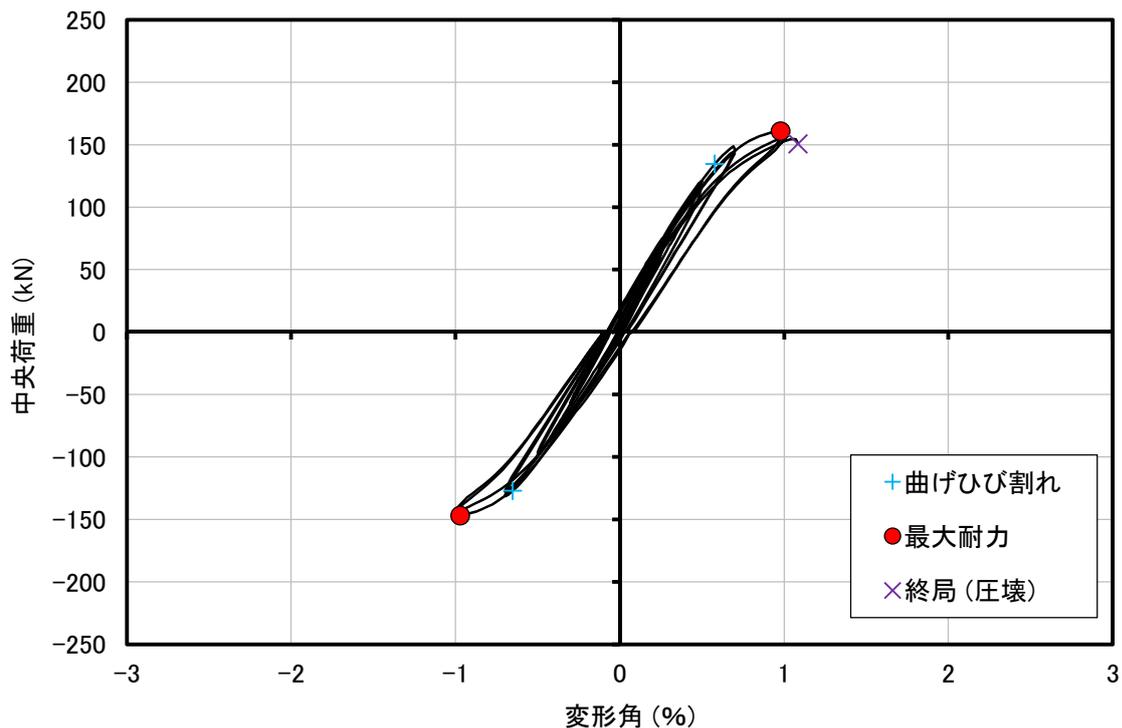


(f) PHC03

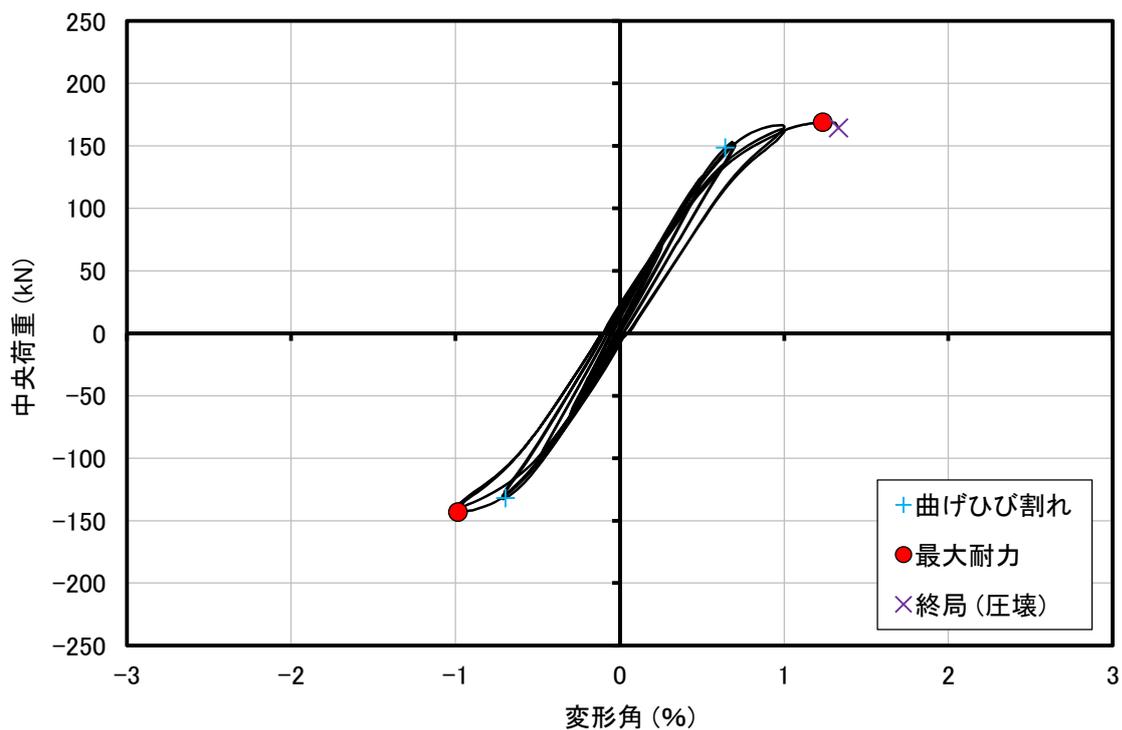


(g) PHC04

図 2.4.4 荷重－変形角関係（PHC杭 A種）（次項に続く）

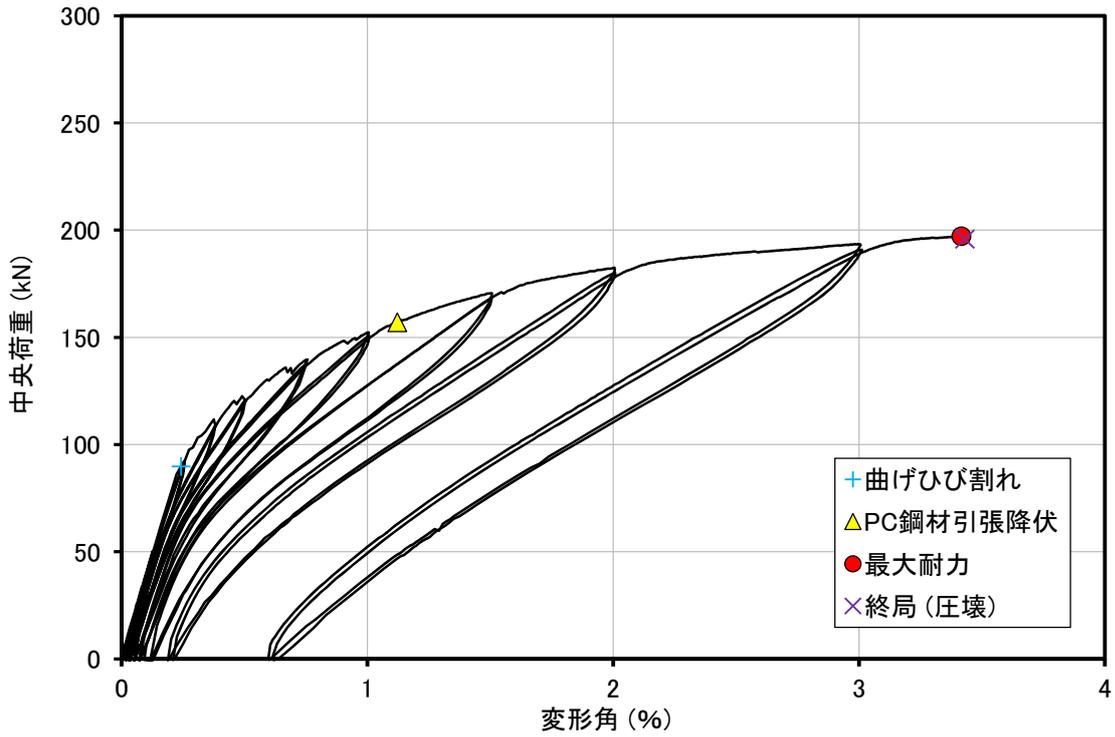


(h) PHC05

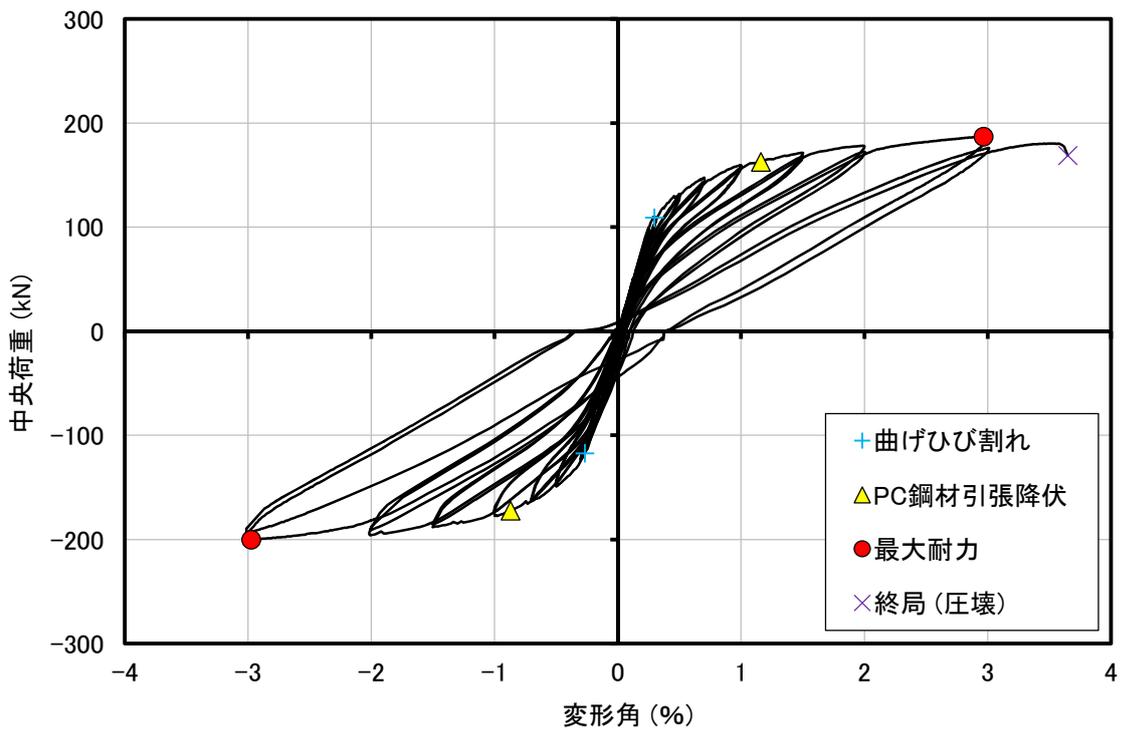


(i) PHC06

図 2.4.4 荷重—変形角関係 (PHC 杭 A 種)

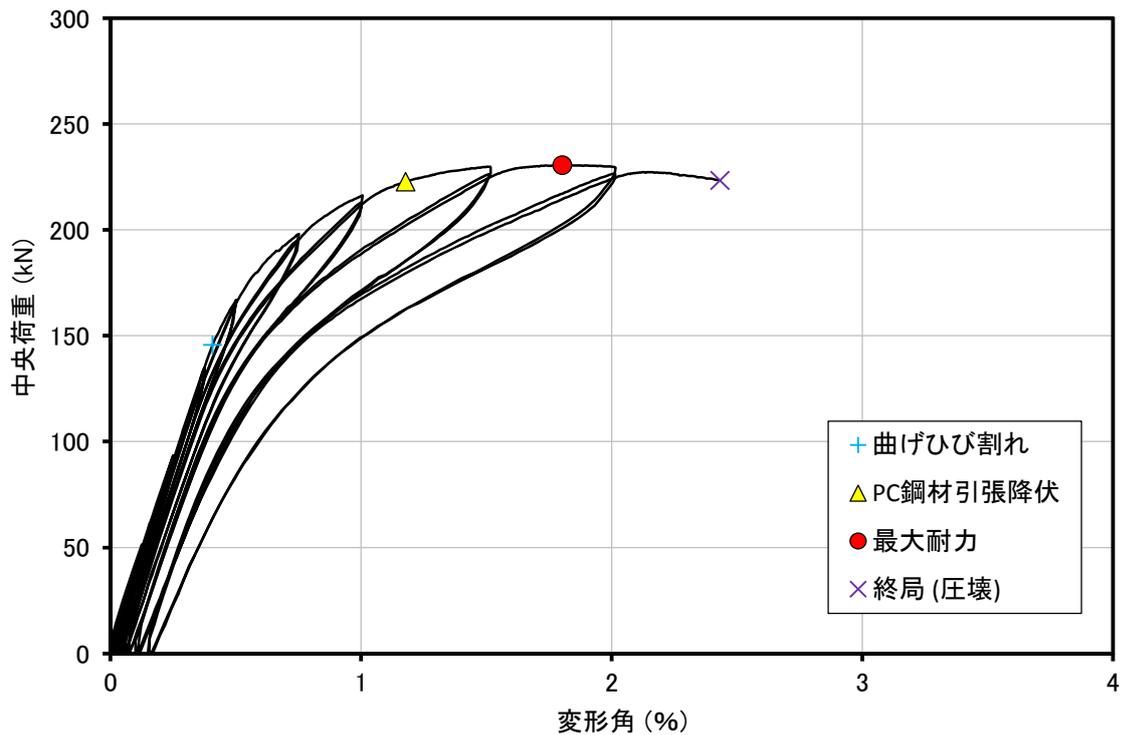


(a) PHC17

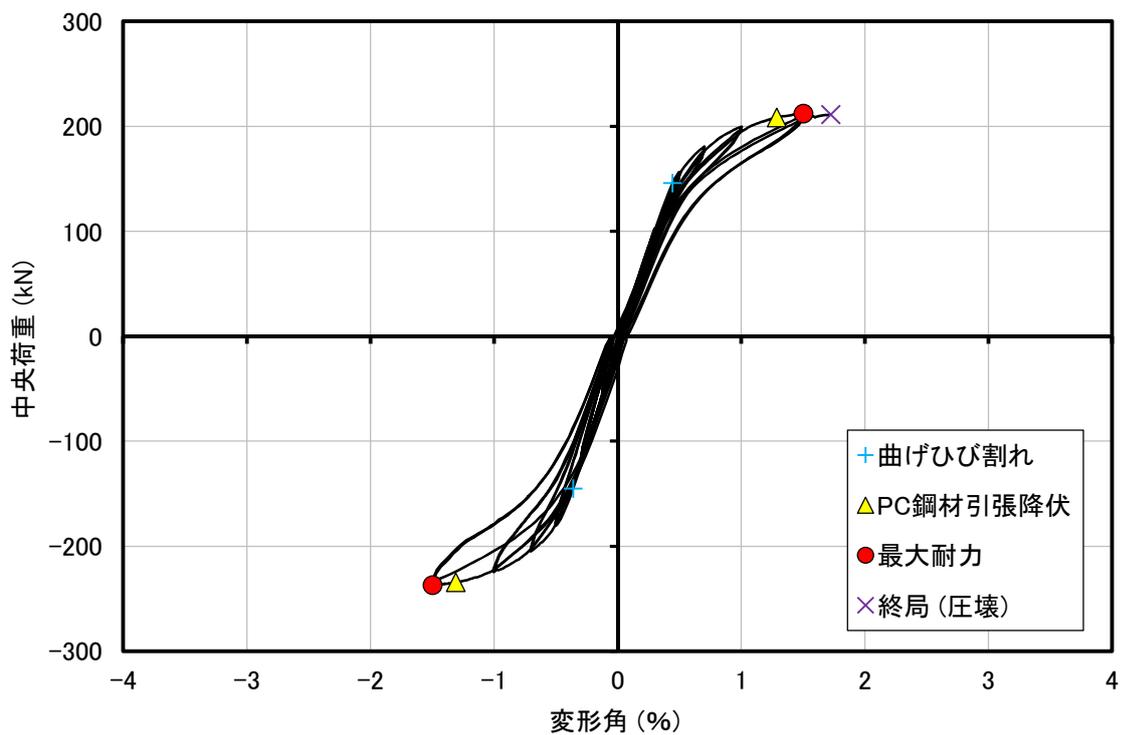


(b) PHC11

図 2.4.5 荷重—変形角関係 (PHC 杭 C 種) (次項に続く)

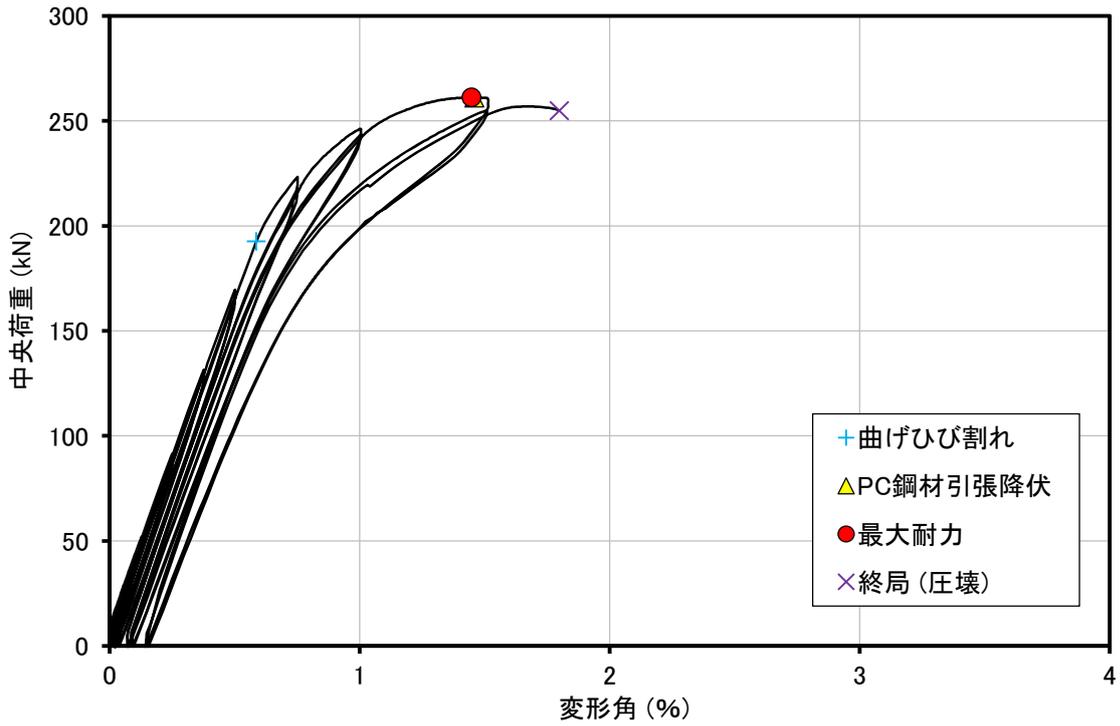


(c) PHC16

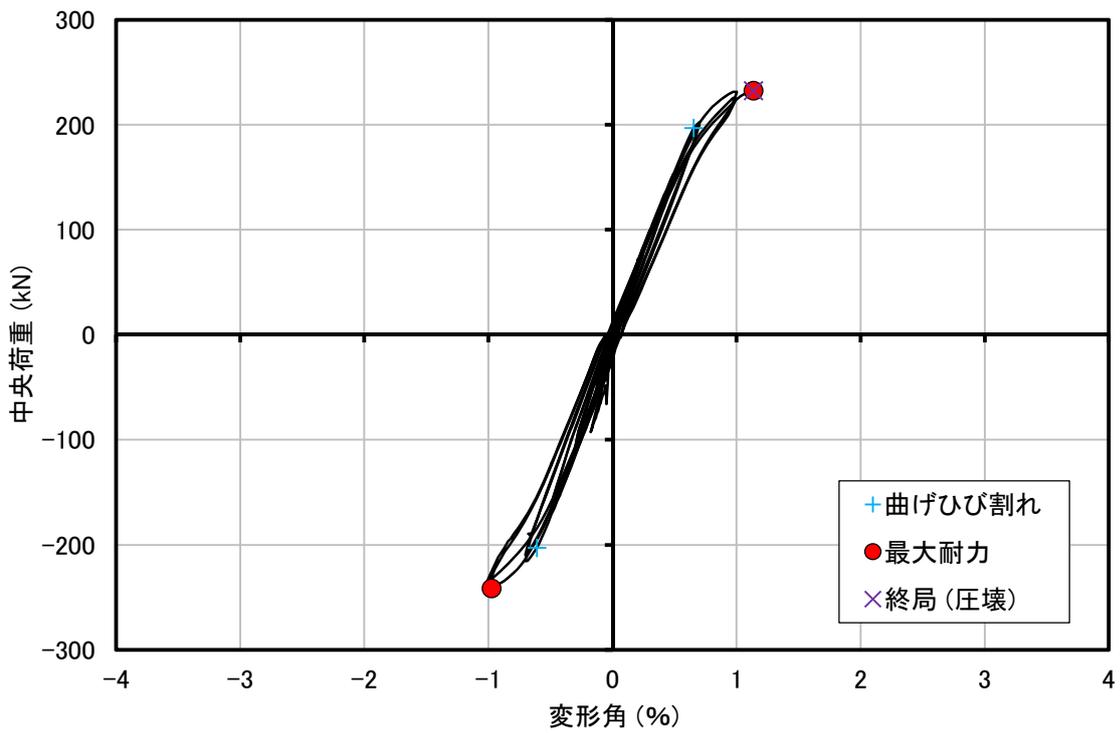


(d) PHC10

図 2.4.5 荷重—変形角関係 (PHC 杭 C 種) (次項に続く)

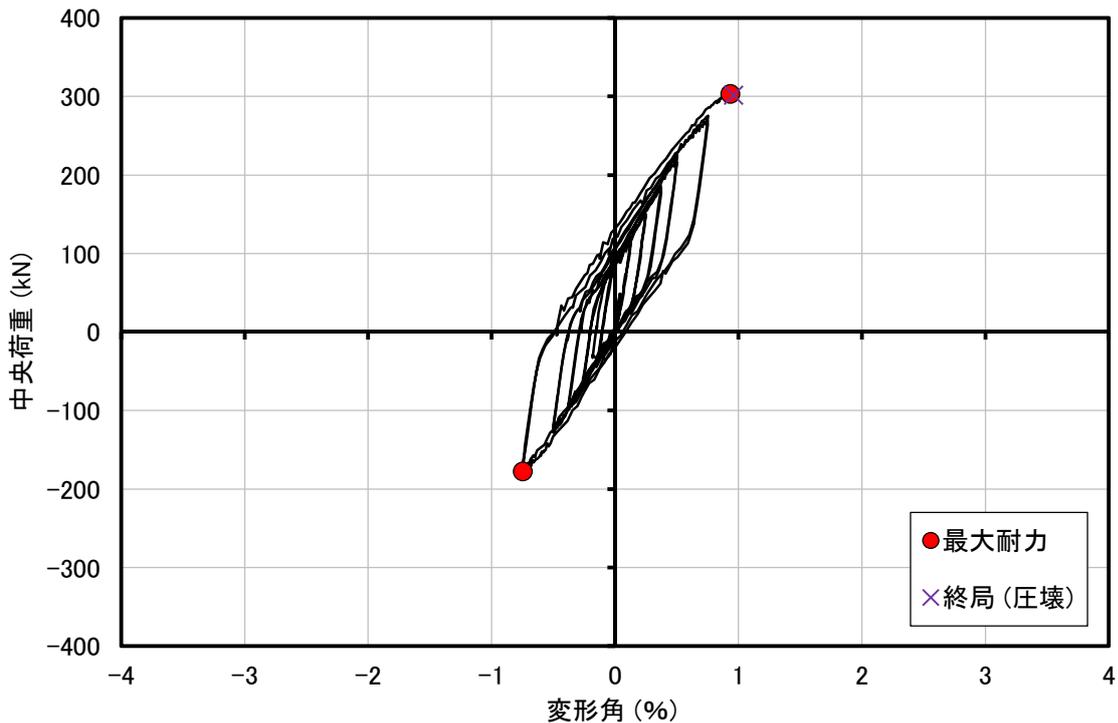


(e) PHC15

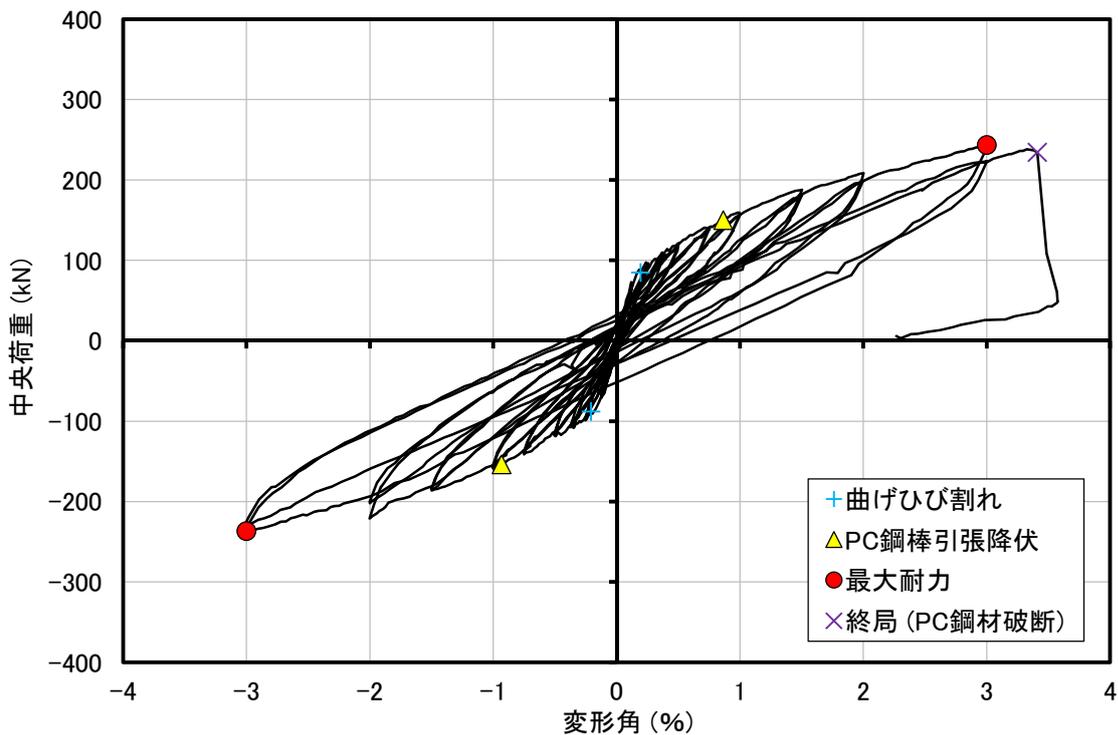


(f) PHC09

図 2.4.5 荷重—変形角関係 (PHC 杭 C 種) (次項に続く)



(g) PHC01



(h) PHC02

図 2.4.5 荷重—変形角関係 (PHC 杭 C 種)

2.4.2 モーメントー曲率関係

表 2.4.6 から表 2.4.10 に各特性点のモーメント・曲率の値，図 2.4.6 から図 2.4.10 に各試験体のモーメントー曲率関係を示す。荷重ー変形角関係の場合と同様に，表中の「—」は実験中に発生しなかったことを確認したもの，または，発生し得ないもの（一方向载荷の負側など）を表している。鋼材にひずみゲージを貼付していない試験体の降伏点や，計測の不良などによって現象の発生の有無が判断できないものについては「No Data」と表記した。また，現象の発生を確認したものの，計測不良等により発生した時期が不明瞭な場合は「○」を表記した。

モーメントは軸力の P- δ 効果による付加モーメントを考慮して式(2.4.1)によって算出した。軸力の P- δ 効果によってモーメントー ϕD 関係における最大耐力点は荷重ー変形関係における最大耐力点と必ずしも同一ではない。また，曲率 ϕ は特に注釈のない限り軸方向変位計 H1, H5 の計測値を用いて算出した値で，本論分では杭直径 $D=400\text{mm}$ を乗じて無次元化し， ϕD として扱った。

$$M = Q \cdot \frac{L_s - 1}{2} + N \cdot (\delta_1 - \delta_2) \quad (2.4.1)$$

ここに， M ：杭体中央のモーメント (kN・m) Q ：鉛直载荷ジャッキ 1 台によるせん断力 (kN)

L_s ：試験体支持スパン (m) N ：作用軸力 (kN) δ_1 ：杭体中央の鉛直変位 (m)
 δ_2 ：杭端部の鉛直変位 (m)

各特性点のモーメント・曲率の値は正負で概ね等しい。また，同条件下で実験を行った試験体では同様の結果が得られ，実験の再現性が確認できた。

第2章 既製杭 (SC 杭, PRC 杭, PHC 杭) の曲げ破壊実験

表 2.4.6 実験結果一覧 (SC 杭)

試験体名	鋼管引張降伏				鋼管圧縮降伏				最大モーメント				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	M (kN・m)	φD (%)															
SC16	437	0.427	—	—	565	1.55	—	—	613	4.32	—	—	○	○	—	—	B
SC17	469	0.527	509	0.575	526	1.14	No Data	No Data	602	4.31	550	1.66	555	4.38	—	—	B
SC10	642	0.591	510	0.491	No Data	No Data	602	0.885	726	1.84	659	1.93	677	1.97	—	—	B
SC11	589	0.532	576	0.501	691	0.989	619	0.772	719	1.96	677	1.89	579	2.01	—	—	B
SC12	707	0.615	679	0.601	784	0.972	679	0.601	824	1.35	729	0.821	822	1.38	—	—	B
SC13	741	0.623	690	0.695	695	0.521	690	0.695	846	1.35	703	0.775	787	1.45	—	—	B
SC14	—	—	—	—	726	0.421	536	0.273	747	0.452	696	0.403	747	0.452	—	—	B
SC15 ^{※1}	323	0.363	277	0.315	—	—	—	—	486	1.58	459	1.41	—	—	—	—	—

※1: 終局まで載荷を行っていないため、最大耐力は参考値。

表 2.4.7 実験結果一覧 (PRC 杭 I 種)

試験体名	曲げひび割れ				異形鉄筋引張降伏				異形鉄筋圧縮降伏				PC鋼材引張降伏				最大モーメント				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	M (kN・m)	φD (%)																							
PRC22	76.5	0.0440	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	217	2.24	—	—	215	2.37	—	—	C
PRC23	78.1	0.0573	—	—	142	0.345	—	—	—	—	—	—	174	0.585	—	—	216	2.25	—	—	216	2.35	—	—	C
PRC17	86.9	0.0707	99.3	0.0720	117	0.183	119	0.135	—	—	—	—	139	0.349	154	0.397	225	2.73	222	1.56	217	3.40	203	2.07	※2
PRC18	230	0.161	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	458	1.13	—	—	458	1.14	—	—	C
PRC19	261	0.163	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	No Data	No Data	—	—	460	1.01	—	—	460	1.03	—	—	C
PRC20	257	0.183	—	—	407	0.553	—	—	393	0.497	—	—	No Data	No Data	—	—	454	0.867	—	—	441	0.856	—	—	C
PRC21	236	0.168	—	—	371	0.457	—	—	No Data	No Data	—	—	415	0.633	—	—	454	0.929	—	—	439	0.932	—	—	C
PRC15	275	0.177	237	0.194	428	0.543	349	0.432	347	0.313	332	0.379	—	—	397	0.566	428	0.543	408	0.603	—	—	408	0.603	C
PRC16	277	0.213	244	0.179	402	0.537	388	0.543	300	0.277	244	0.179	—	—	—	—	422	0.662	400	0.608	422	0.662	—	—	C

※2: 負側はPC鋼材の破断, 正側はコンクリートの圧壊で, 負側が先。

表 2.4.8 実験結果一覧 (PRC 杭 III 種)

試験体名	曲げひび割れ				異形鉄筋引張降伏				異形鉄筋圧縮降伏				PC鋼材引張降伏				最大モーメント				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	M (kN・m)	φD (%)	
PRC11	85.0	0.0547	—	—	192	0.308	—	—	—	—	—	—	230	0.453	—	—	295	1.81	—	—	295	1.81	—	—	C
PRC14	75.9	0.0585	98.9	0.0453	203	0.377	217	0.321	—	—	—	—	236	0.545	253	0.454	287	1.78	299	2.31	273	1.84	297	2.34	C
PRC09	289	0.195	—	—	459	0.535	—	—	390	0.371	—	—	497	0.677	—	—	545	0.972	—	—	545	0.972	—	—	C
PRC10	281	0.193	—	—	449	0.491	—	—	381	0.340	—	—	520	0.836	—	—	565	1.05	—	—	565	1.05	—	—	C
PRC12	179	0.152	245	0.160	—	—	—	—	227	0.235	353	0.309	—	—	—	—	367	0.604	370	0.348	367	0.604	—	—	C
PRC13	226	0.153	256	0.155	—	—	450	0.561	338	0.375	—	—	—	—	—	—	412	0.591	452	0.589	—	—	452	0.589	C
PRC07	506	0.318	484	0.342	—	—	—	—	228	0.0857	186	0.114	—	—	—	—	561	0.410	504	0.368	551	0.411	—	—	C
PRC08	○ ^{※3}	0.0413	○ ^{※4}	○ ^{※4}	○ ^{※3}	0.275	○ ^{※3}	0.316	—	—	—	—	198	0.465	135	0.628	256	2.44	200	1.59	172	2.46	149	2.22	F

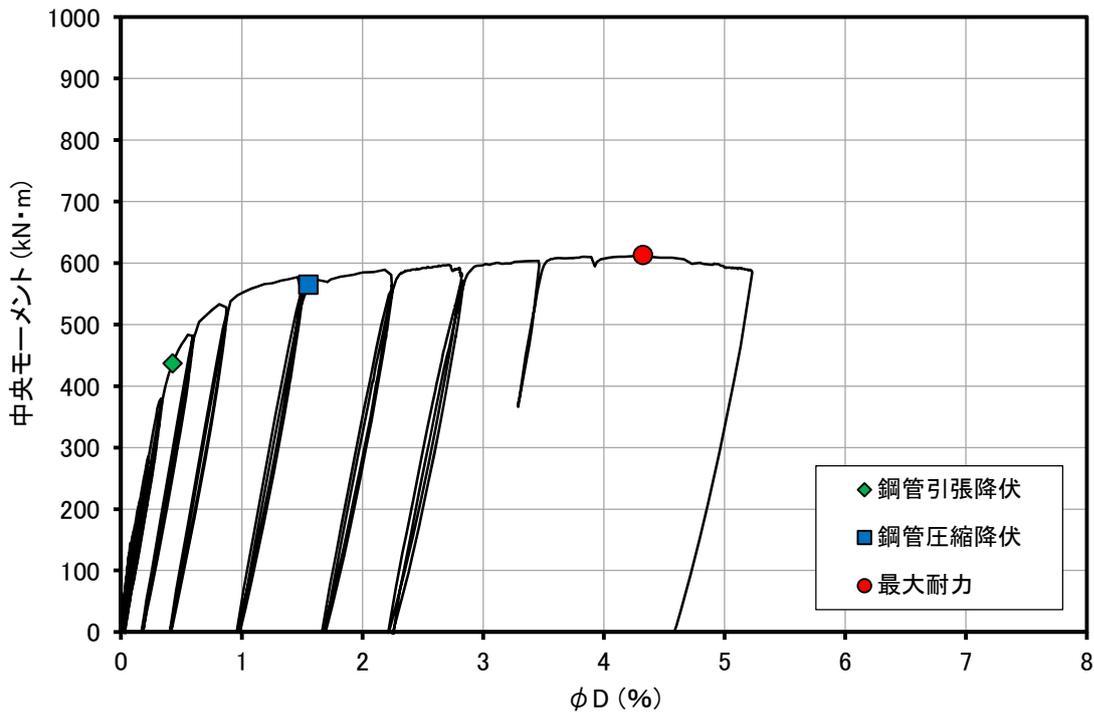
※3: 載荷ミスによりモーメントは計測できなかった. ※4: 負側曲げひび割れ発生点はひずみゲージの値から読み取れなかった。

表 2.4.9 実験結果一覧（PHC 杭 A 種）

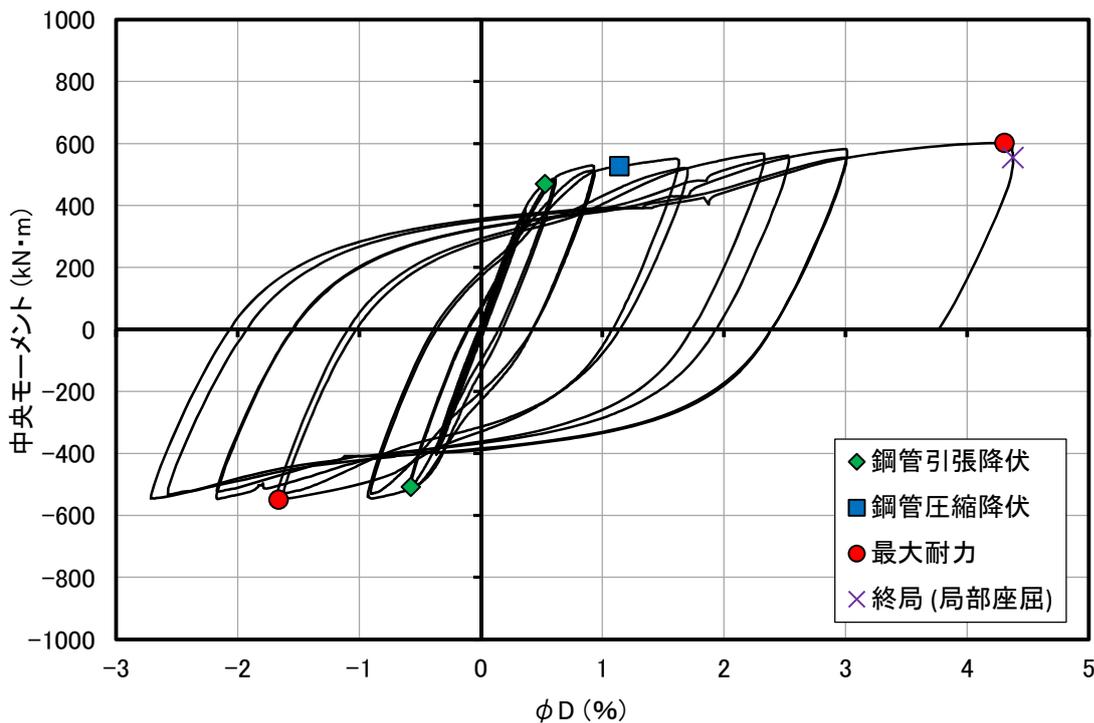
試験体名	曲げひび割れ				PC鋼材引張降伏				最大モーメント				終局				破壊形式	
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側			
	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD		
	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)		
PHC14	63.1	0.0413	—	—	97.1	0.587	—	—	105	1.35	—	—	87.6	1.37	—	—	F	
PHC07	46.6	0.0360	60.0	0.0427	No Data	No Data	No Data	No Data	92.9	0.847	95.4	0.731	—	—	87.5	1.31	F	
PHC08	46.9	0.0387	59.5	0.0533	No Data	No Data	No Data	No Data	93.8	0.628	90.0	1.18	99.7	1.66	85.1	1.50	—	F
PHC12	243	0.172	—	—	382	0.612	—	—	392	0.765	—	—	389	0.875	—	—	C	
PHC13	239	0.181	—	—	356	0.579	—	—	387	1.01	—	—	386	1.08	—	—	C	
PHC03	255	0.239	203	0.191	No Data	No Data	No Data	No Data	328	0.529	269	0.416	328	0.529	—	—	C	
PHC04	255	0.237	207	0.184	No Data	No Data	No Data	No Data	322	0.491	272	0.417	322	0.491	—	—	C	
PHC05	219	0.213	214	0.220	No Data	No Data	—	—	286	0.377	268	0.425	280	0.445	—	—	C	
PHC06	234	0.221	231	0.261	—	—	No Data	No Data	316	0.514	269	0.417	316	0.514	—	—	C	

表 2.4.10 実験結果一覧（PHC 杭 C 種）

試験体名	曲げひび割れ				PC鋼材引張降伏				最大モーメント				終局				破壊形式
	正側		負側		正側		負側		正側		負側		正側		負側		
	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	M	φD	
	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	(kN・m)	(%)	
PHC17	112	0.0933	—	—	196	0.505	—	—	247	1.72	—	—	245	1.81	—	—	C
PHC11	136	0.107	147	0.107	203	0.613	216	0.494	234	1.82	251	1.55	211	2.66	—	—	C
PHC16	199	0.135	—	—	327	0.576	—	—	380	1.41	—	—	380	1.41	—	—	C
PHC10	202	0.149	197	0.120	316	0.639	349	0.591	337	0.929	361	0.703	337	0.929	—	—	C
PHC15	291	0.201	—	—	449	0.552	—	—	470	0.704	—	—	470	0.704	—	—	C
PHC09	303	0.221	309	0.205	—	—	—	—	389	0.445	388	0.399	389	0.445	—	—	C
PHC01	—	—	—	—	—	—	—	—	504	0.374	422	0.302	504	0.374	—	—	C
PHC02	81.7	0.0973	84.1	0.135	134	0.475	137	0.568	190	1.78	184	2.08	174	1.88	—	—	F

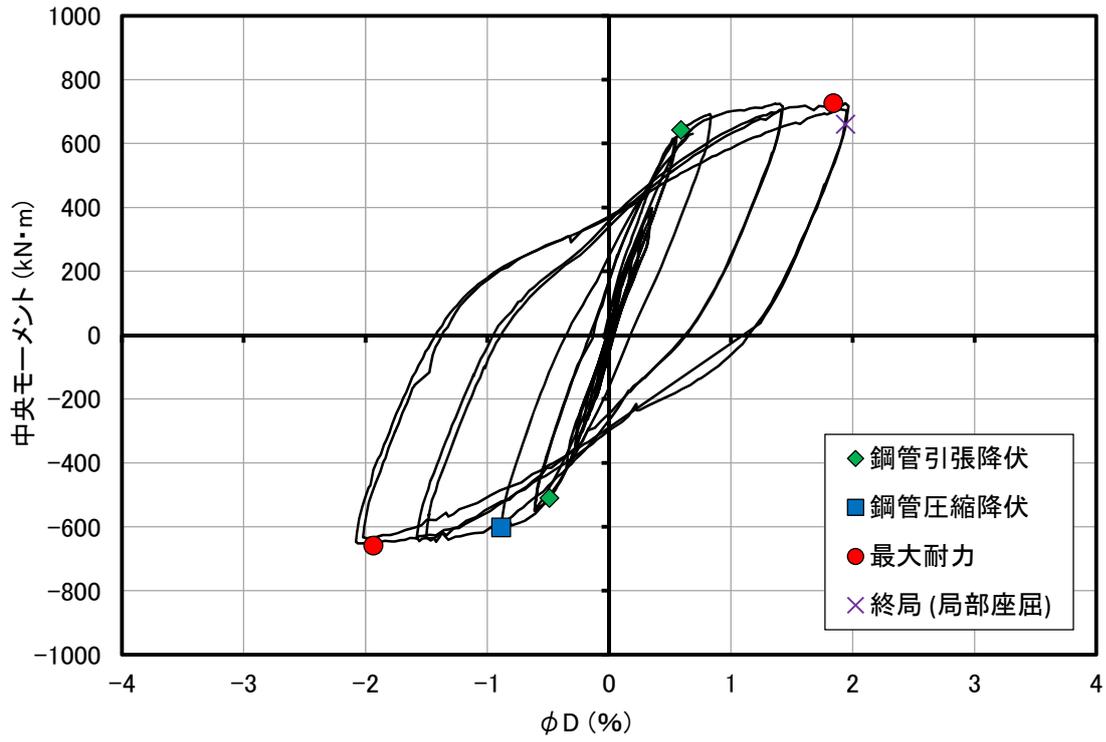


(a) SC16

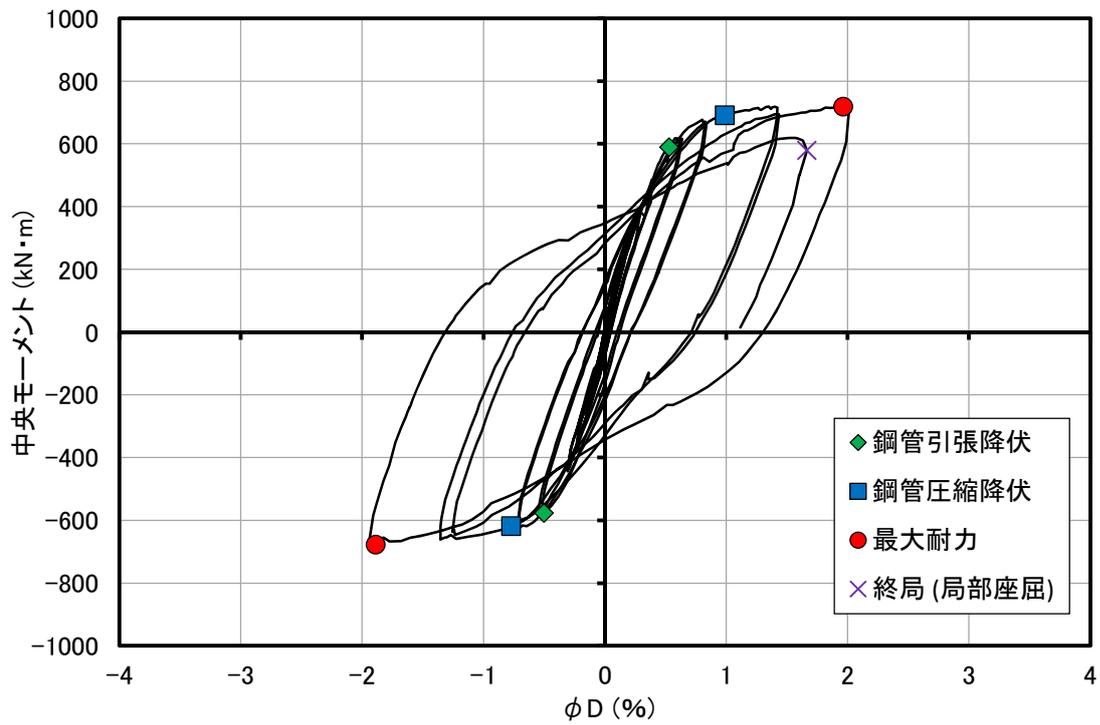


(b) SC17

図 2.4.6 モーメント-φD 関係 (SC 杭) (次項に続く)

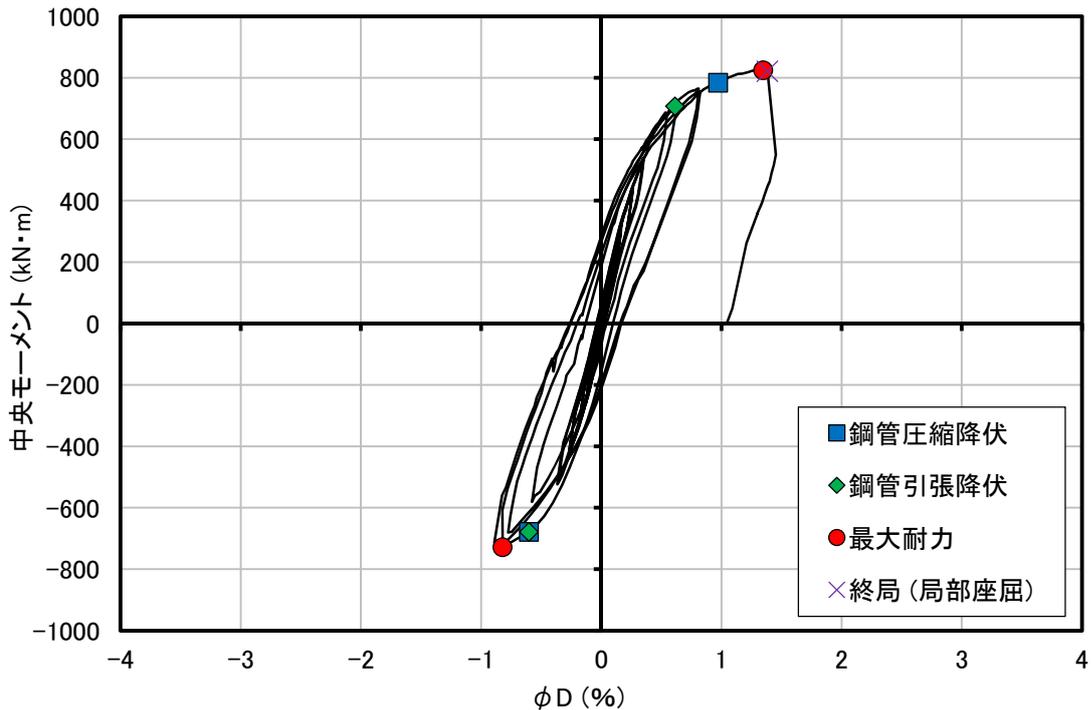


(c) SC10

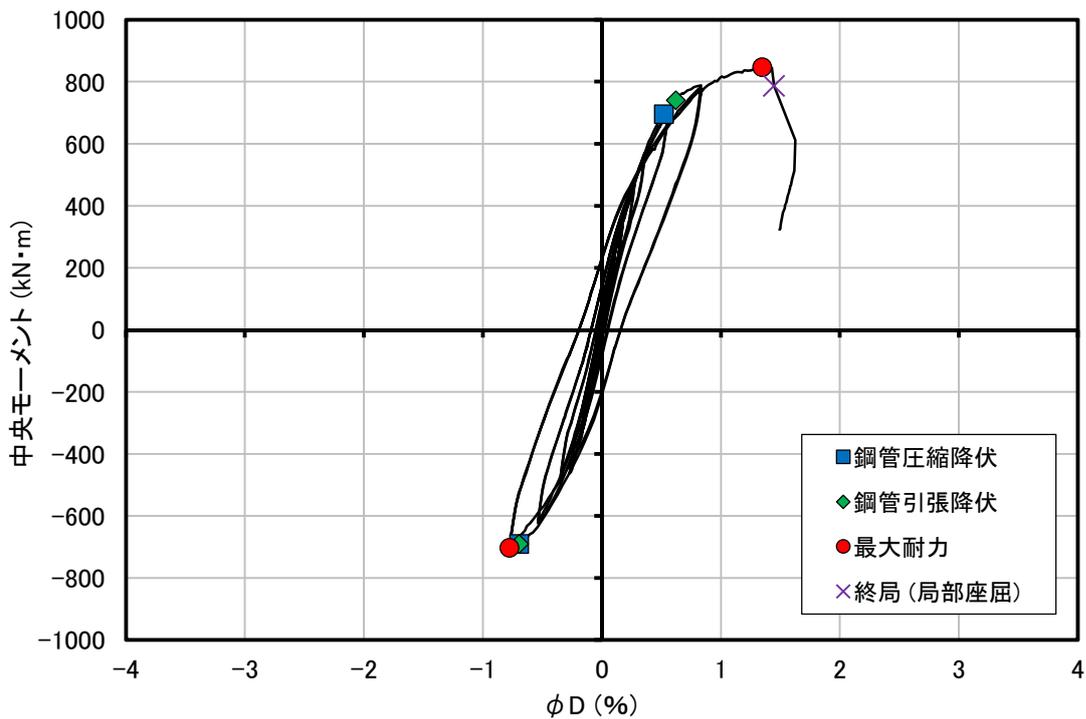


(d) SC11

図 2.4.6 モーメント- ϕD 関係 (SC 杭) (次項に続く)

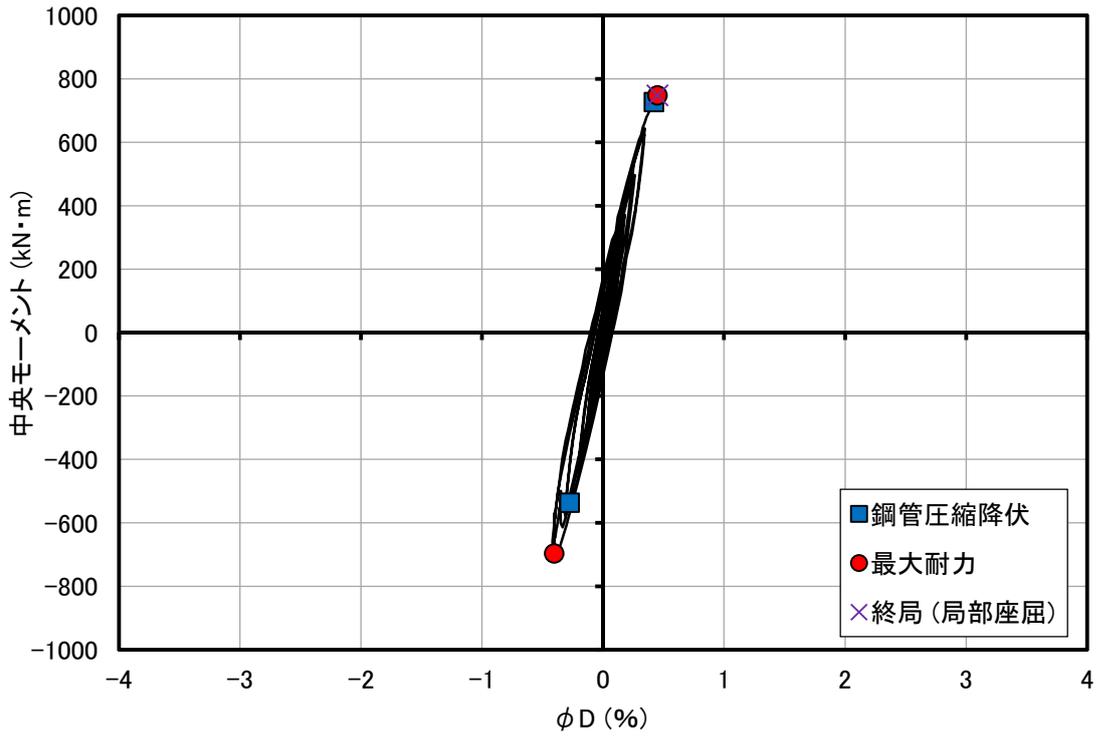


(e) SC12

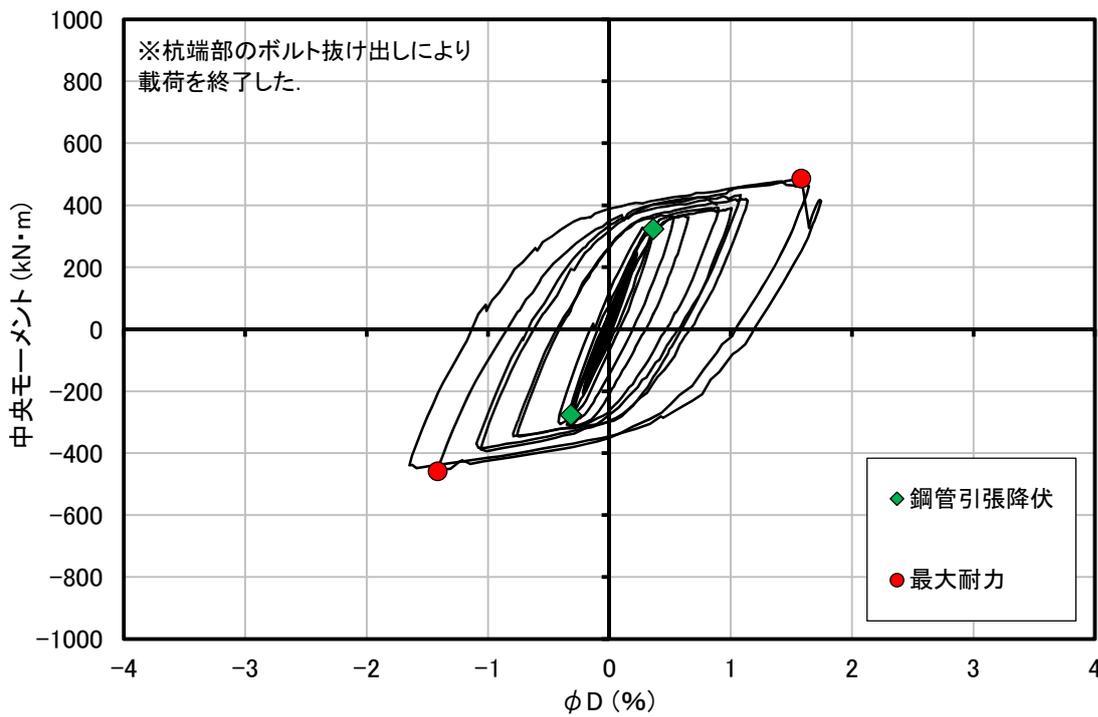


(f) SC13

図 2.4.6 モーメント-φD 関係 (SC 杭) (次項に続く)

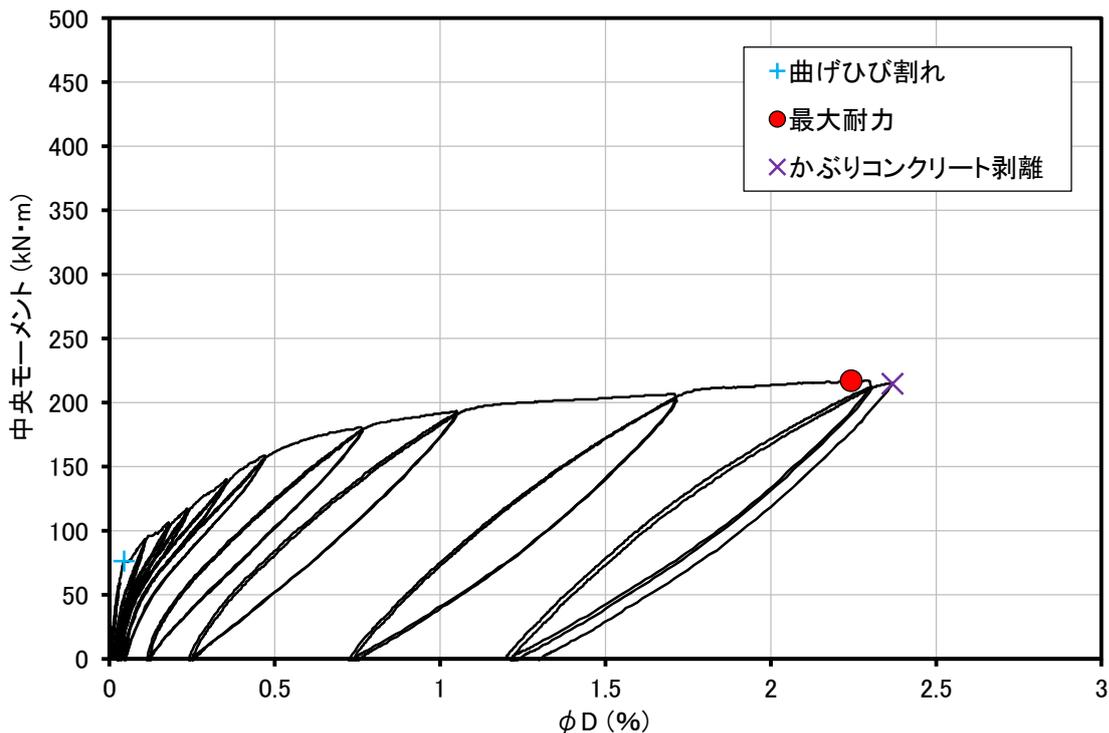


(g) SC14

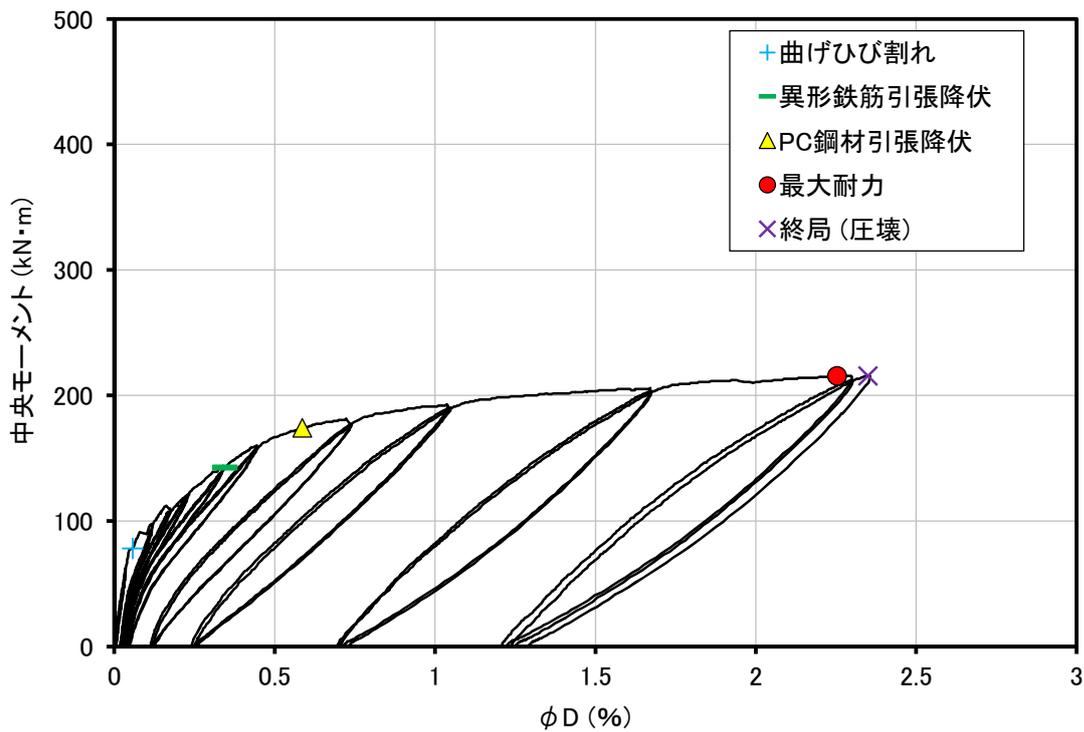


(h) SC15

図 2.4.6 モーメント-φD 関係 (SC 杭)

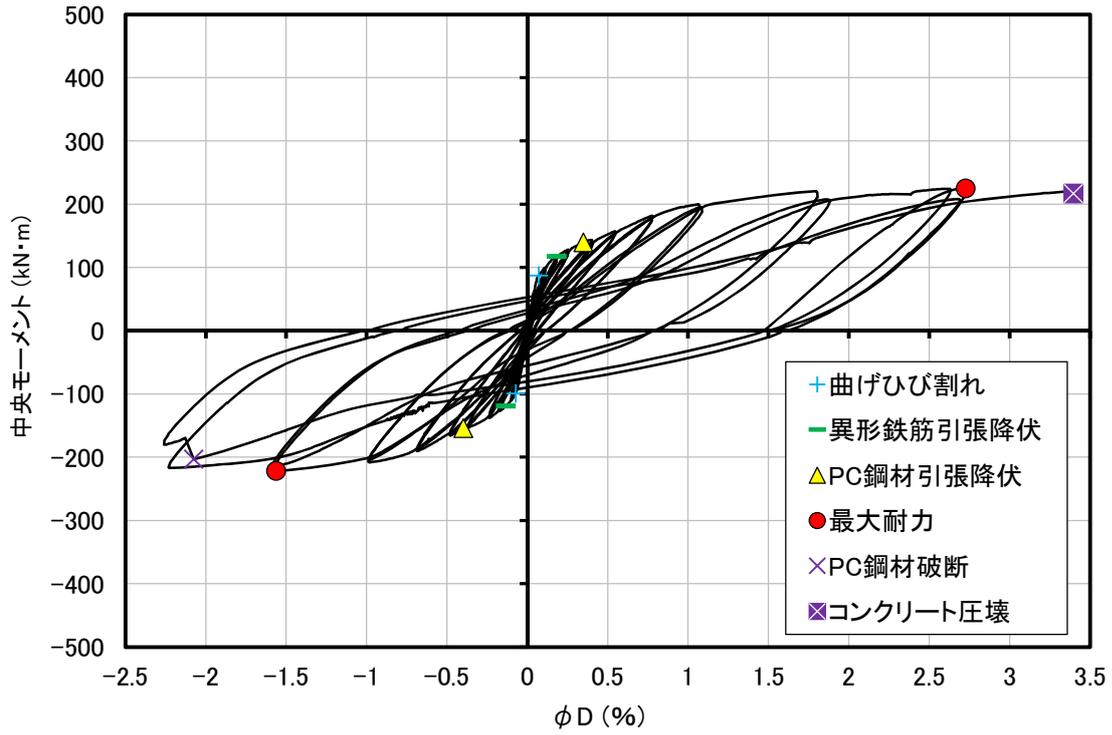


(a) PRC22



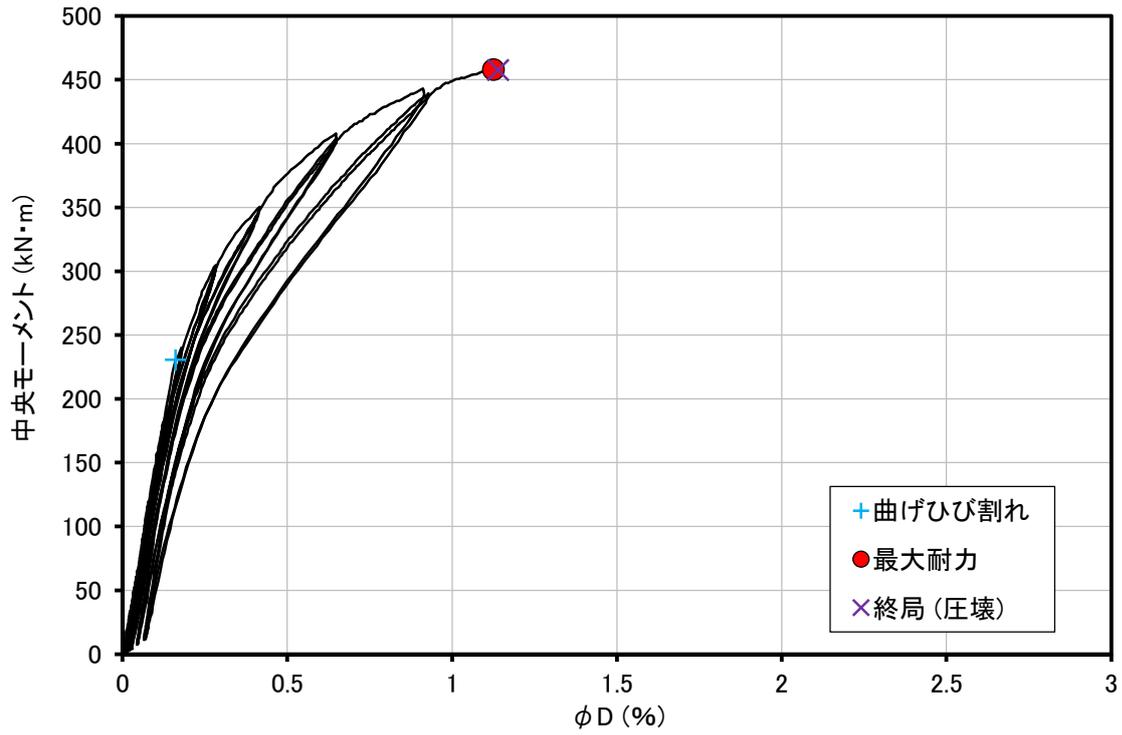
(b) PRC23

図 2.4.7 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

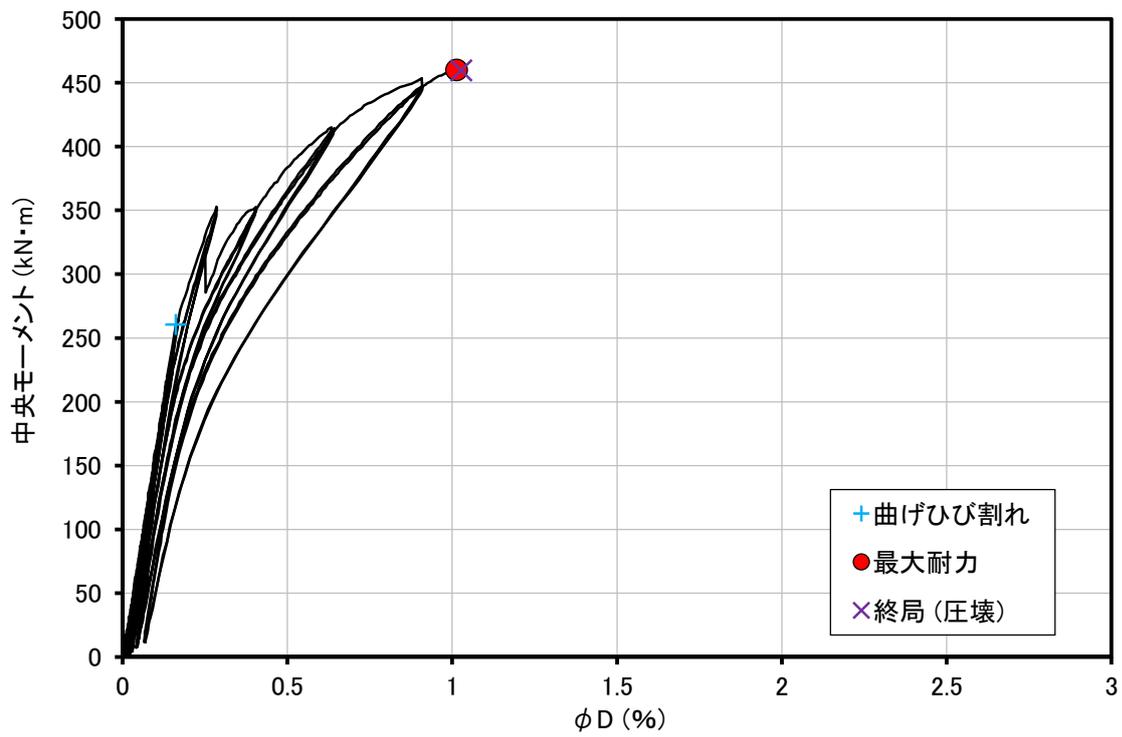


(c) PRC17

図 2.4.7 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

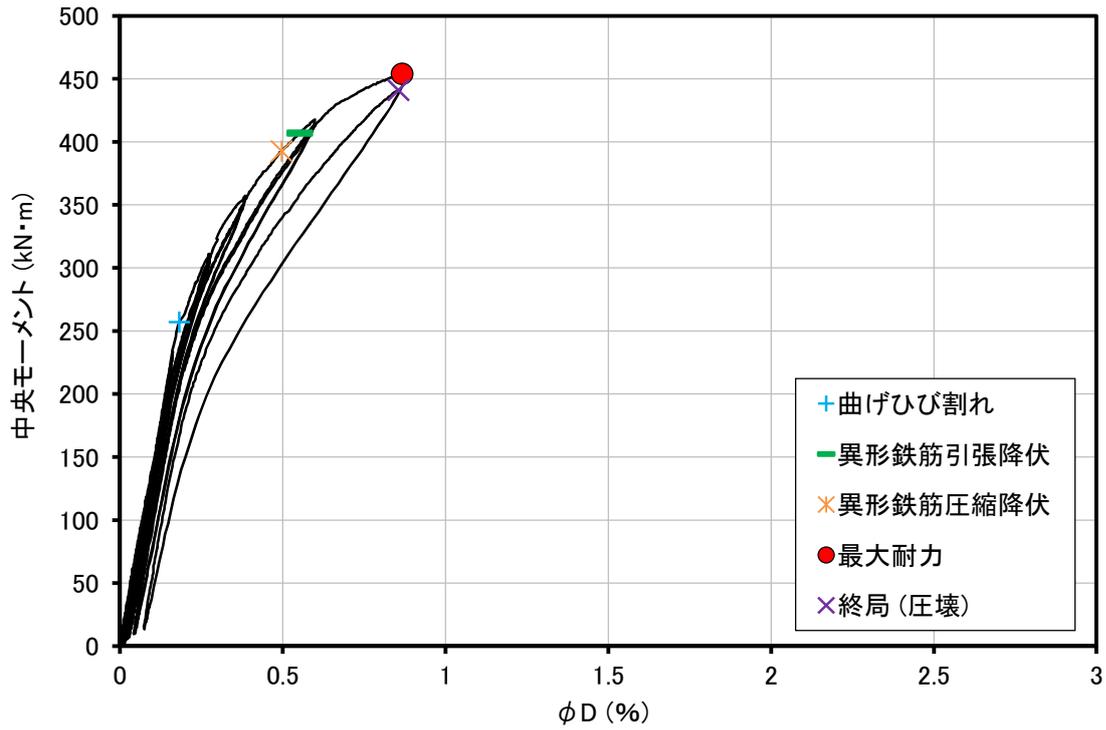


(d) PRC18

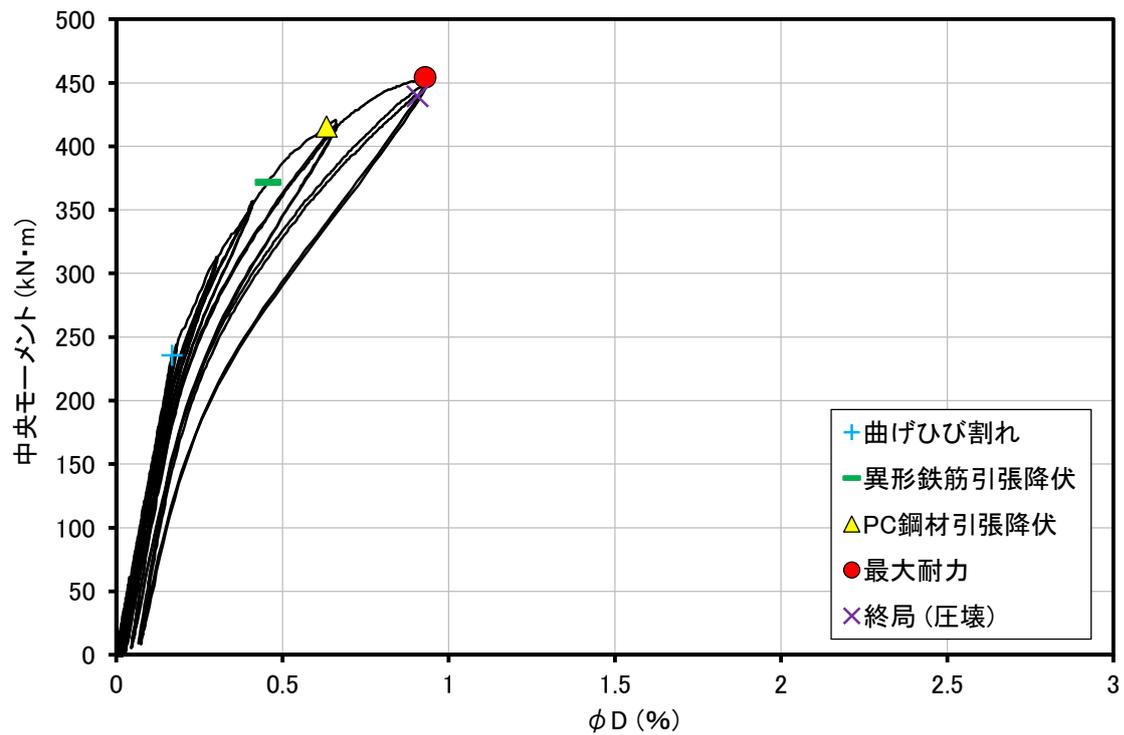


(e) PRC19

図 2.4.7 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

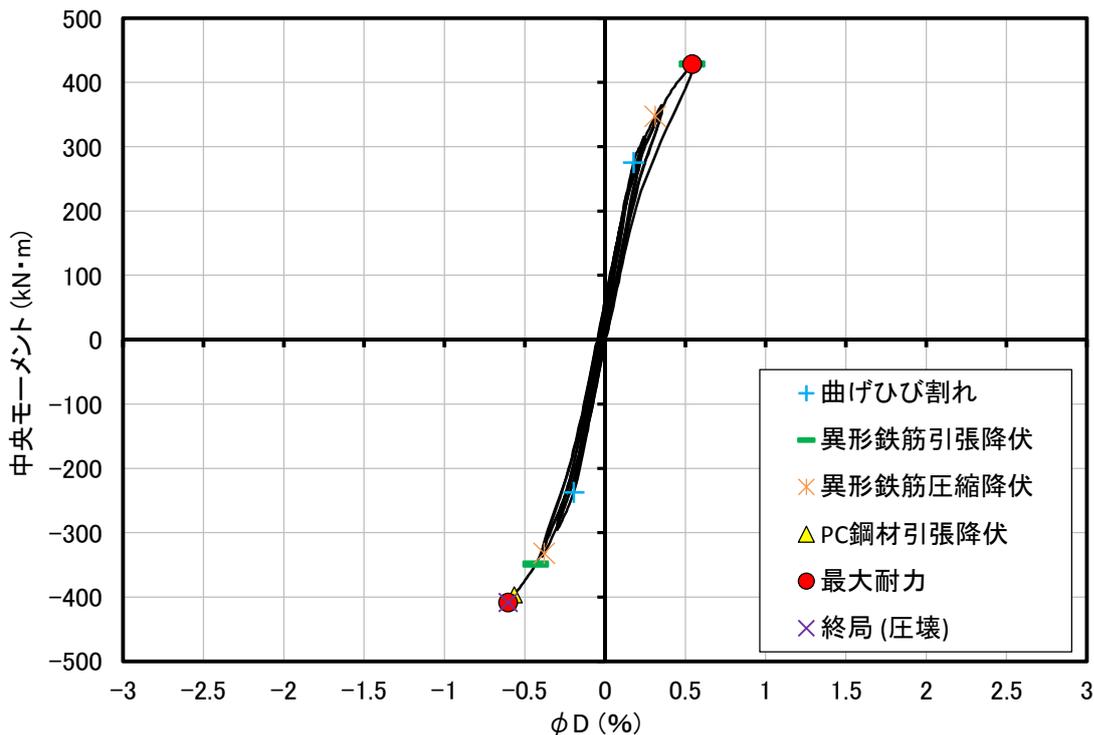


(f) PRC20

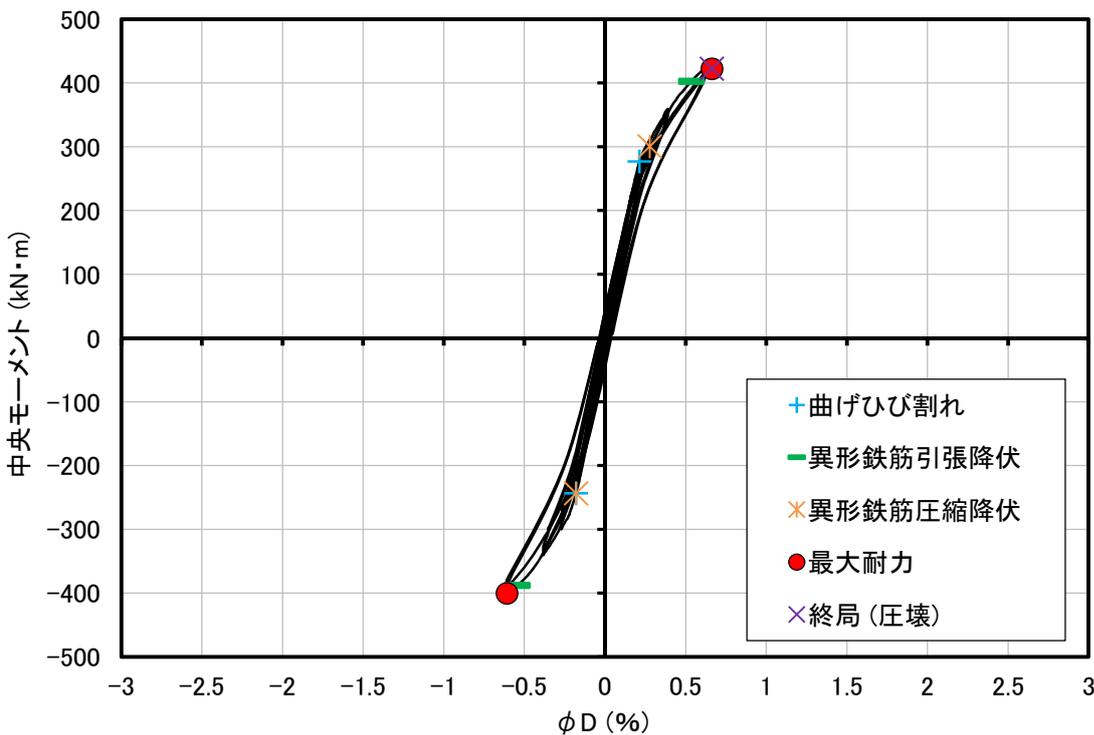


(g) PRC21

図 2.4.7 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 I 種) (次項に続く)

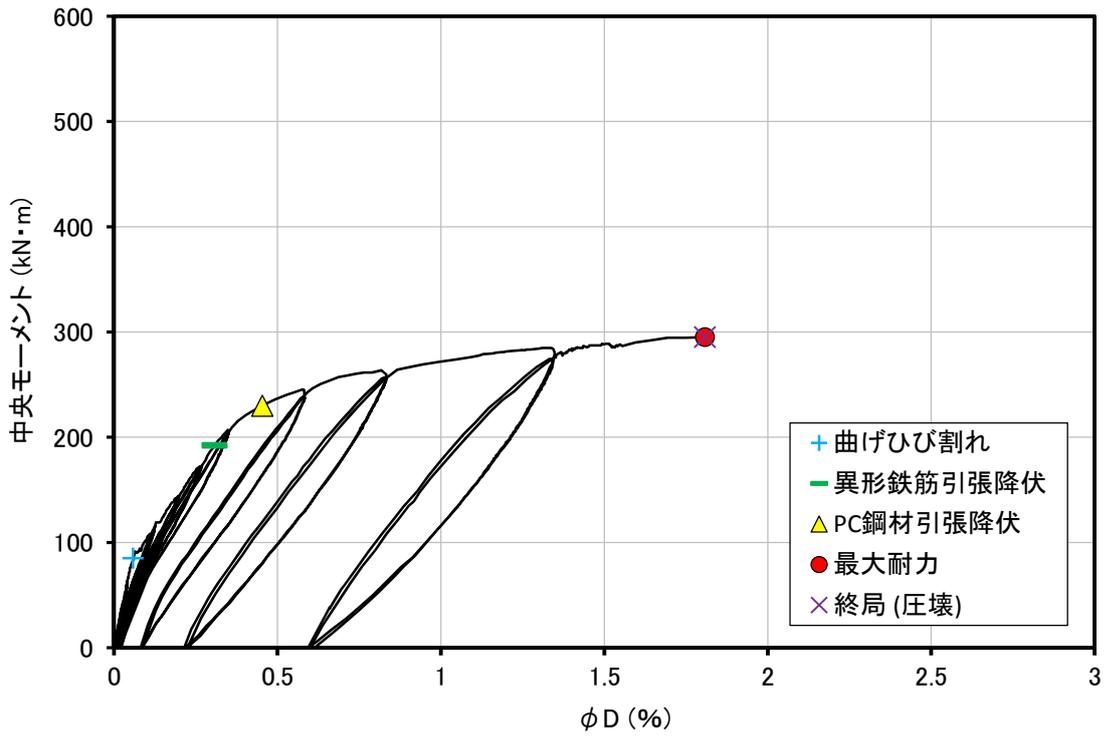


(h) PRC15

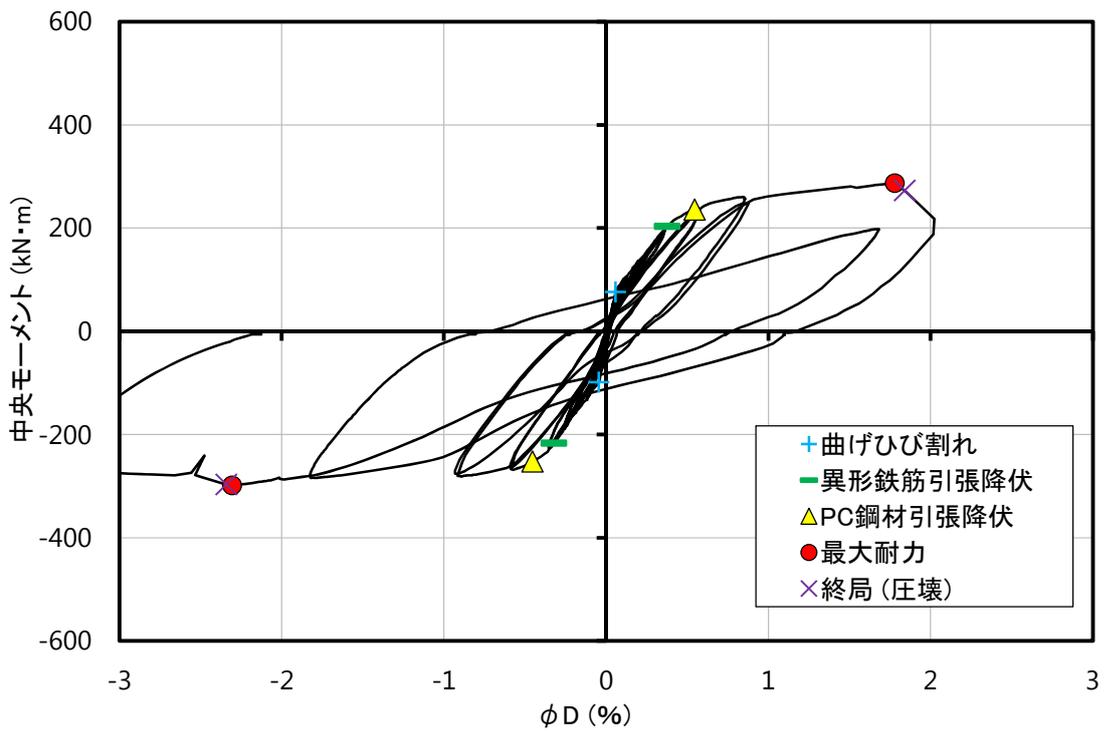


(i) PRC16

図 2.4.7 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 I 種)

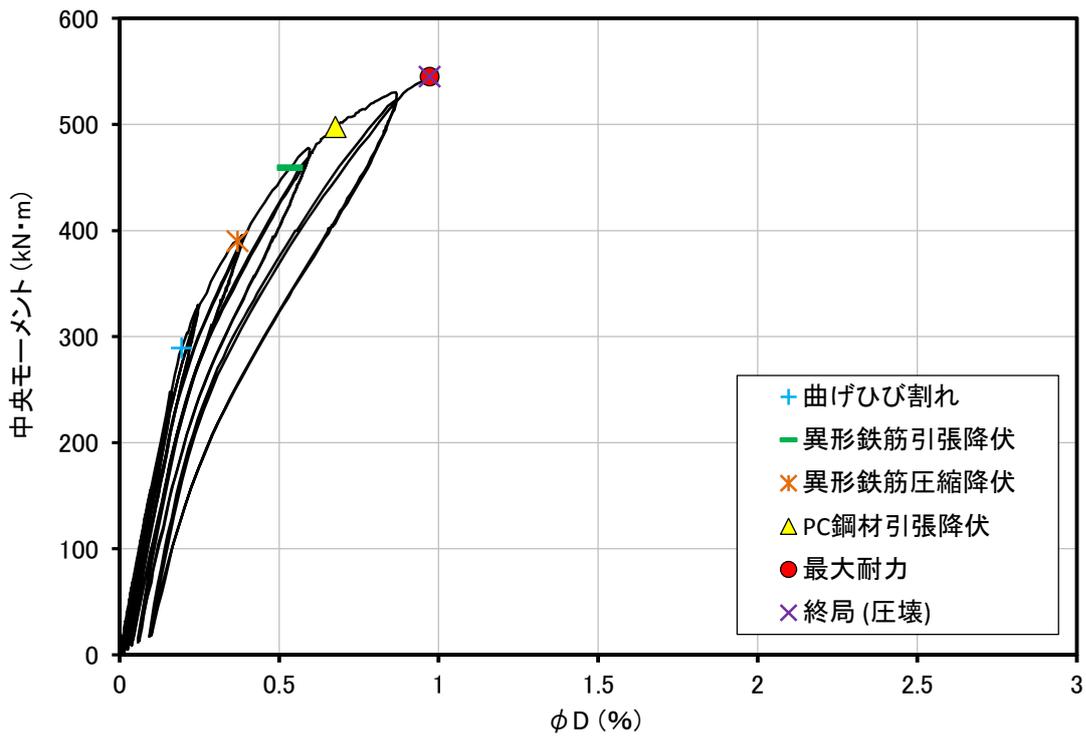


(a) PRC11

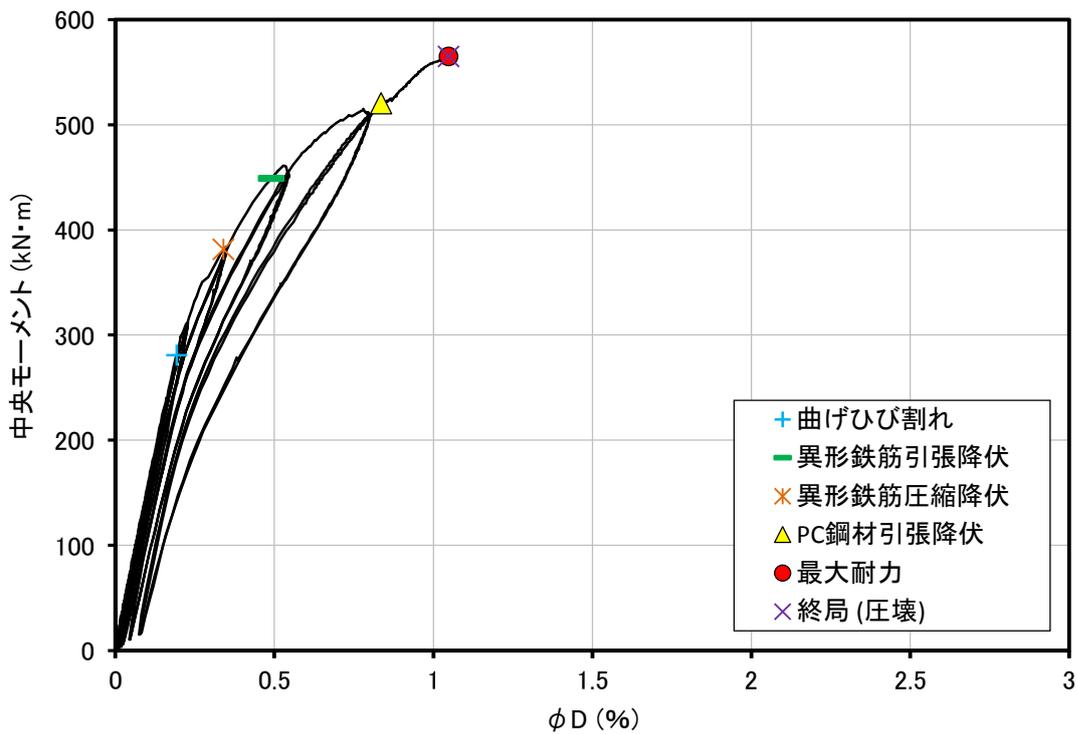


(b) PRC14

図 2.4.8 モーメント-φD 関係 (PRC 杭 Ⅲ種) (次項に続く)

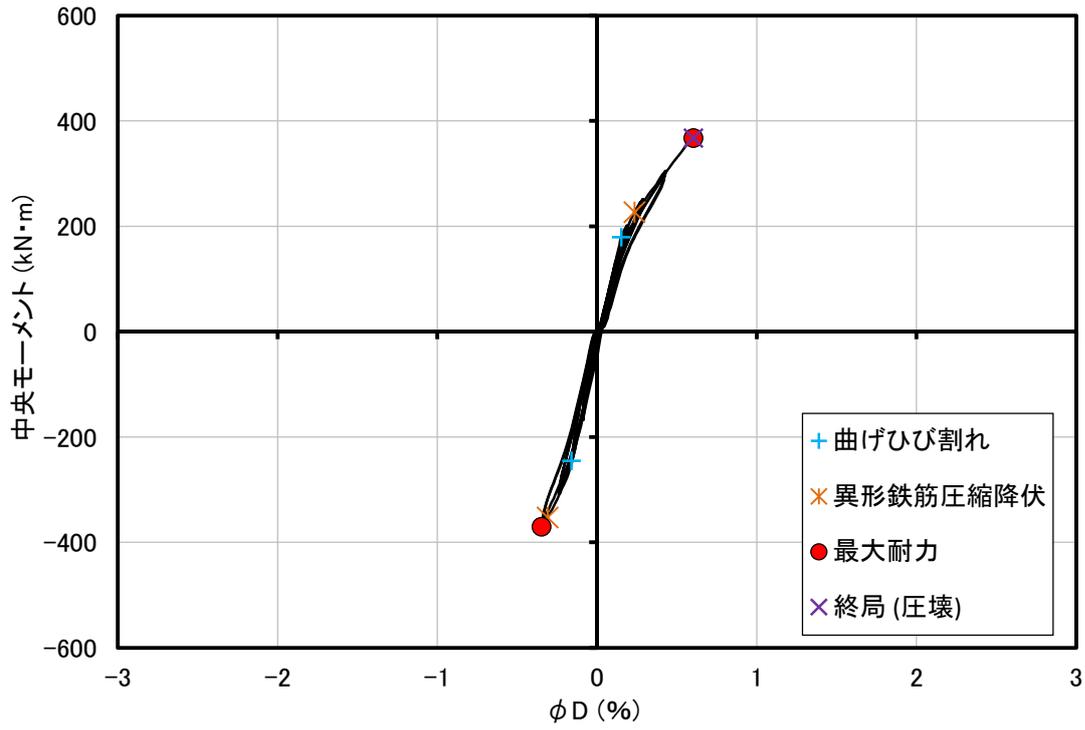


(c) PRC09

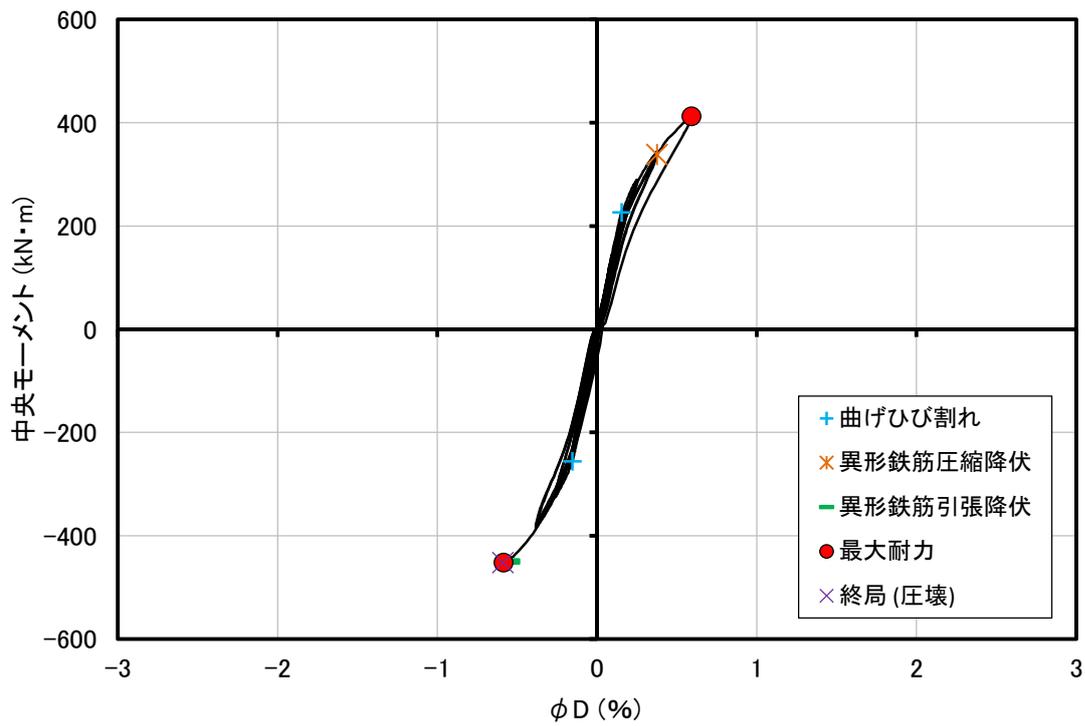


(d) PRC10

図 2.4.8 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 Ⅲ種) (次項に続く)

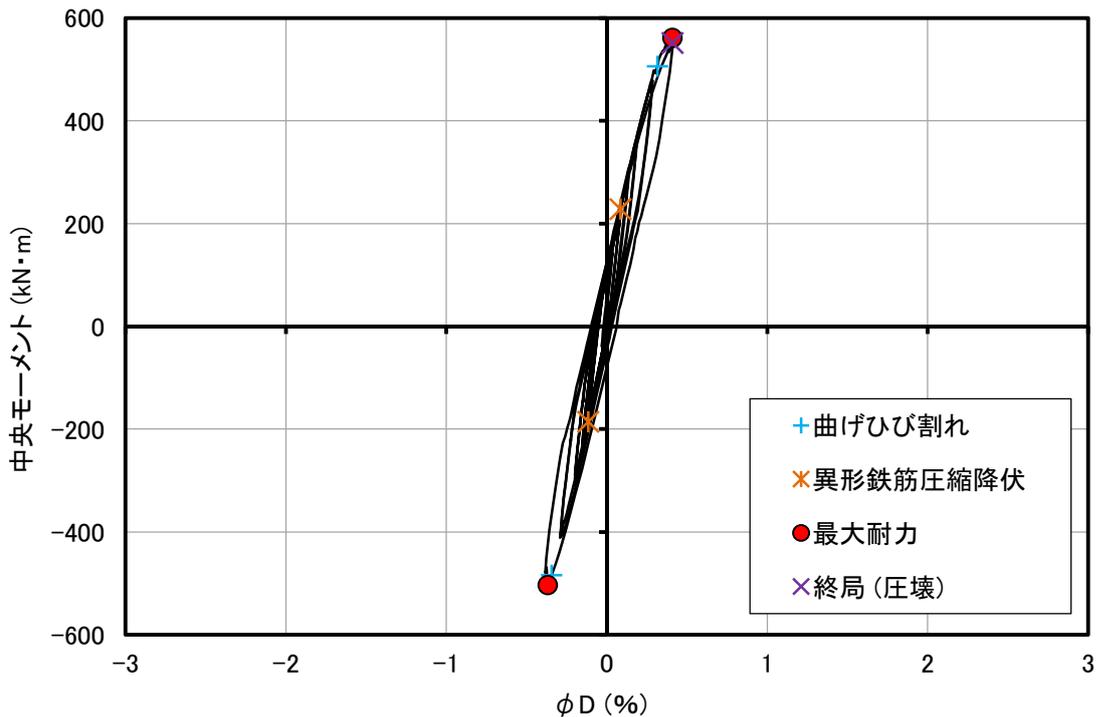


(e) PRC12

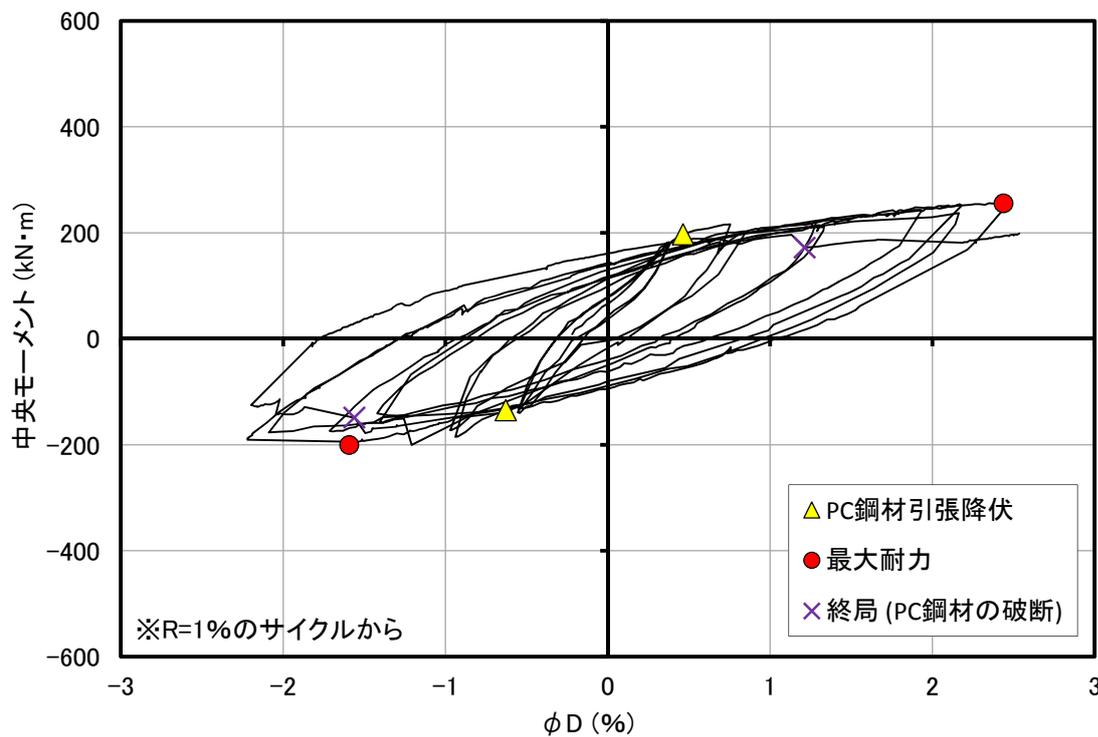


(f) PRC13

図 2.4.8 モーメント-φD 関係 (PRC 杭 Ⅲ種) (次項に続く)

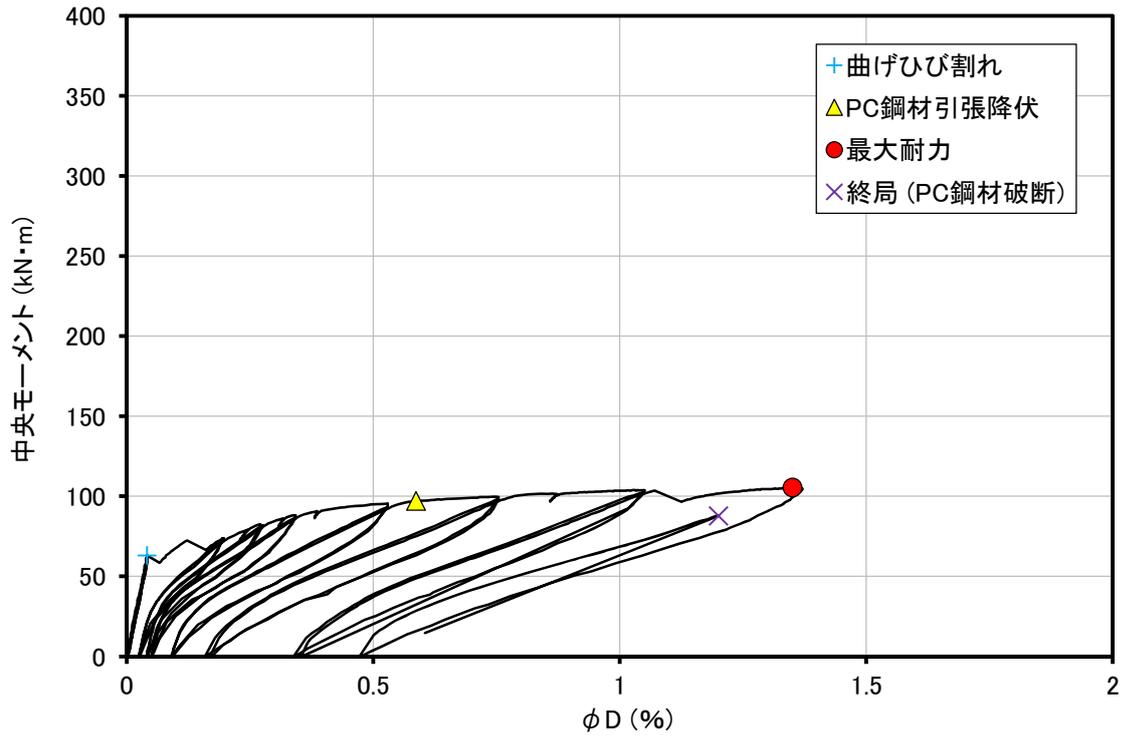


(g) PRC07



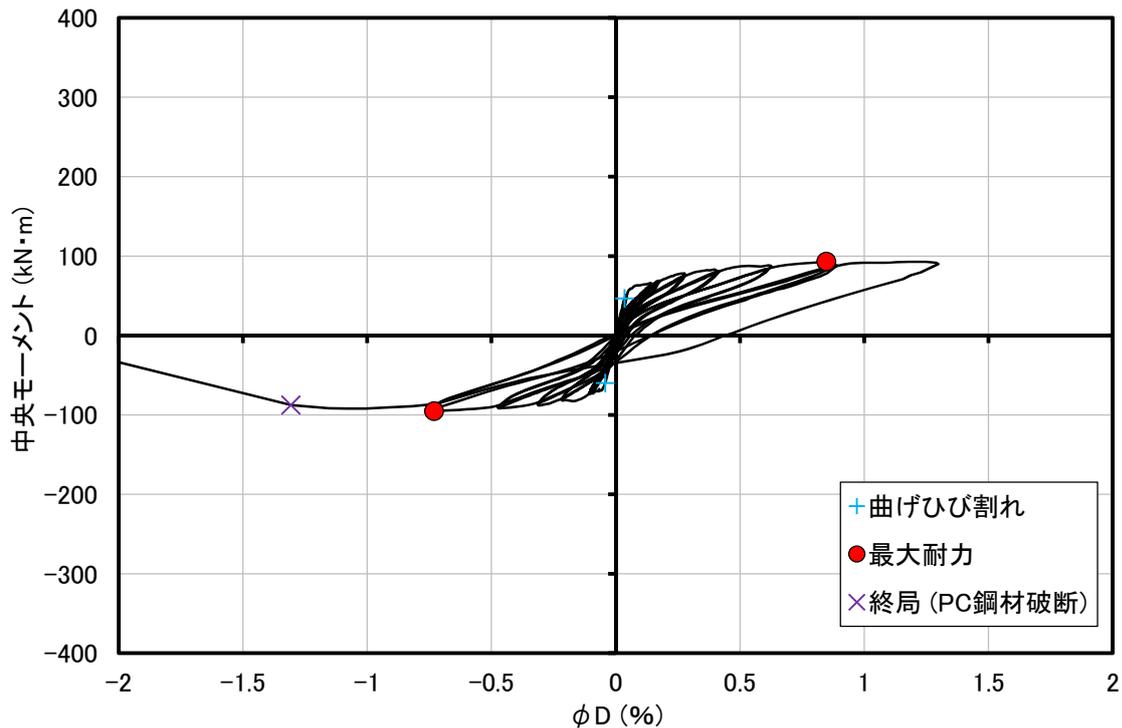
(h) PRC08

図 2.4.8 モーメント- ϕD 関係 (PRC 杭 Ⅲ種)

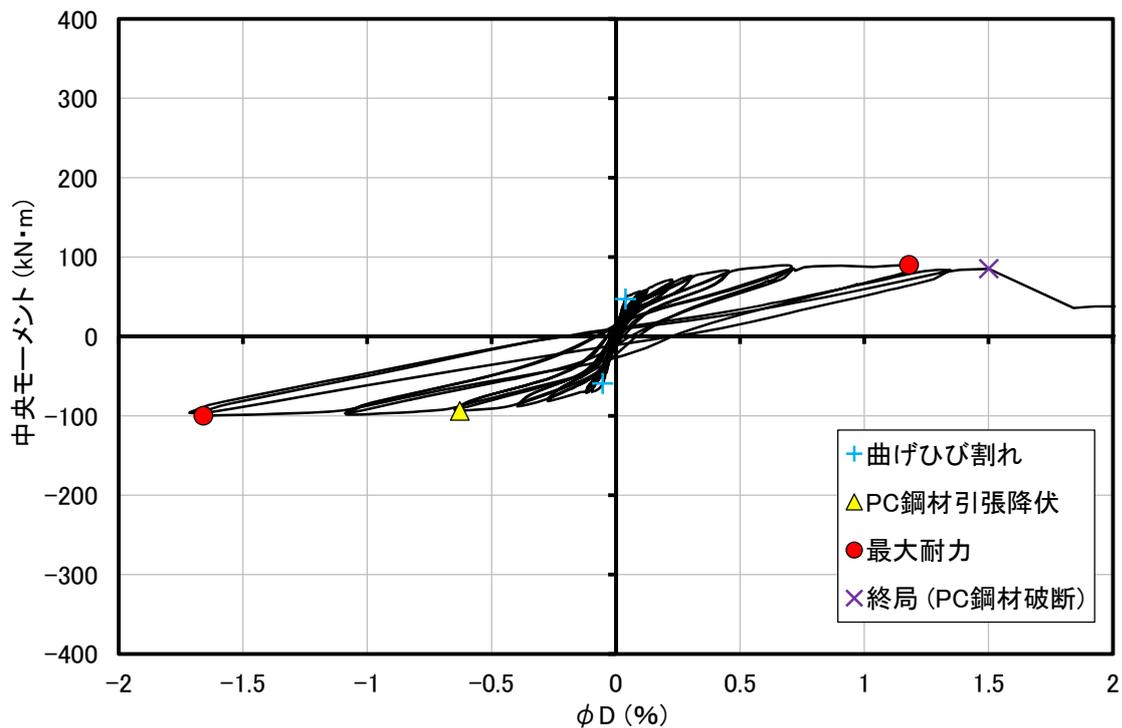


(a) PHC14

図 2.4.9 モーメント- ϕD 関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

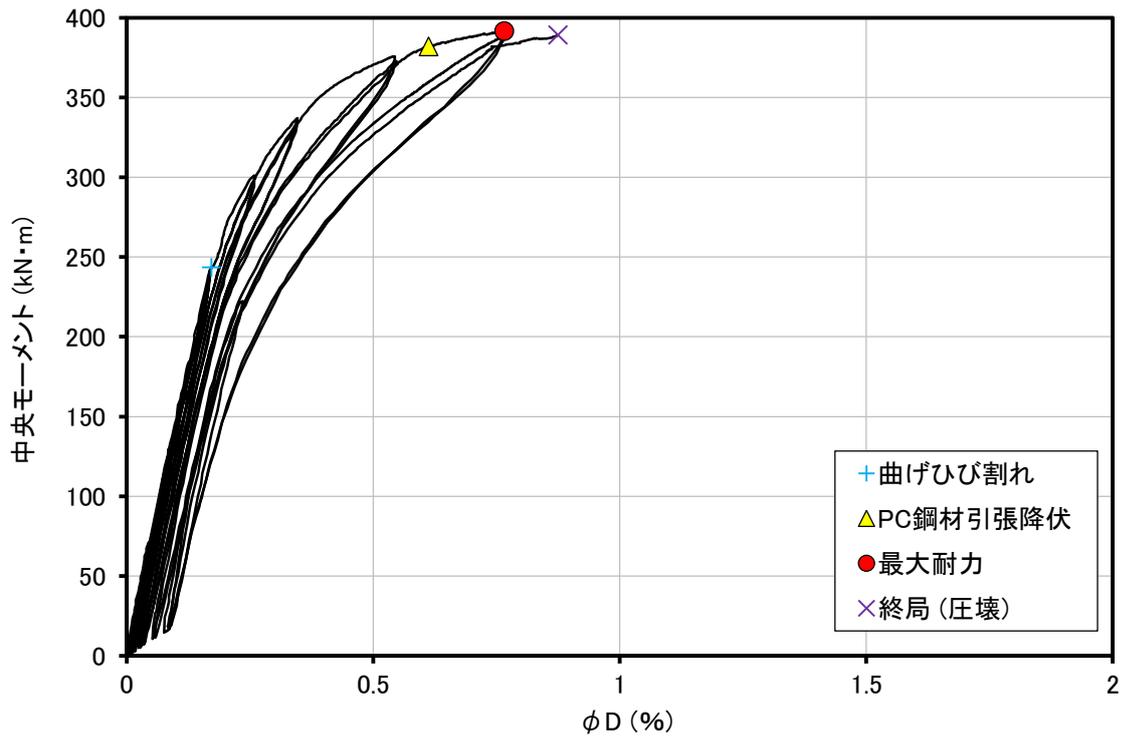


(b) PHC07

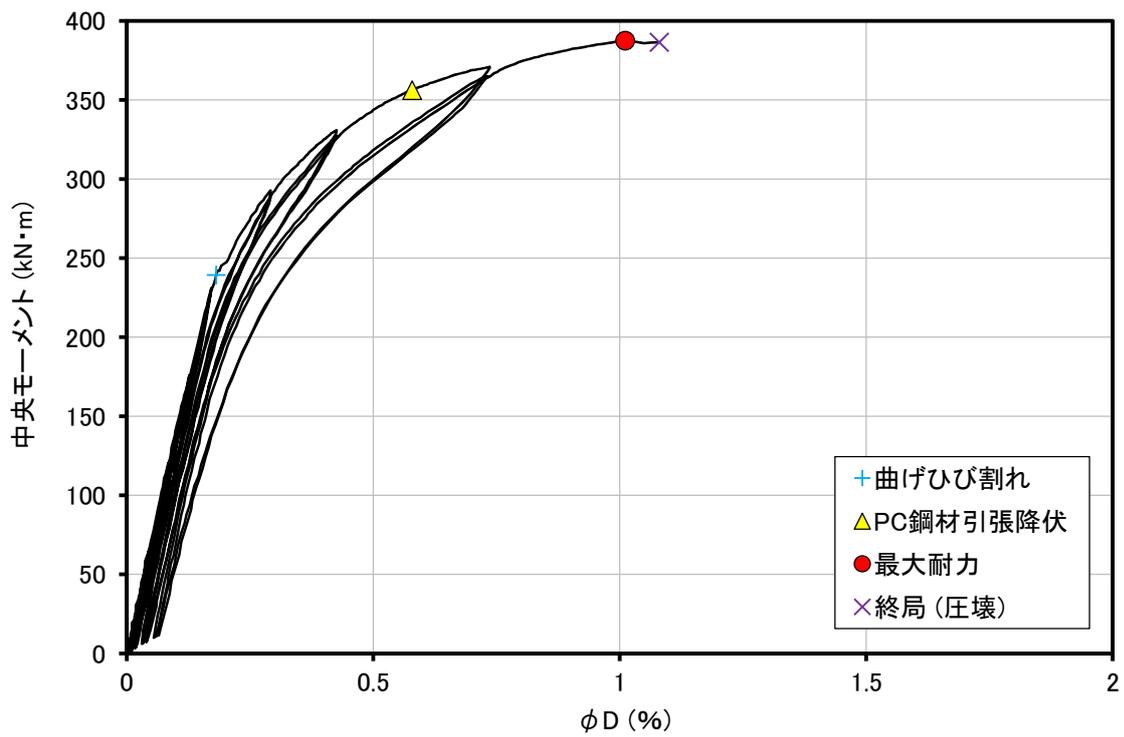


(c) PHC08

図 2.4.9 モーメント- ϕD 関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

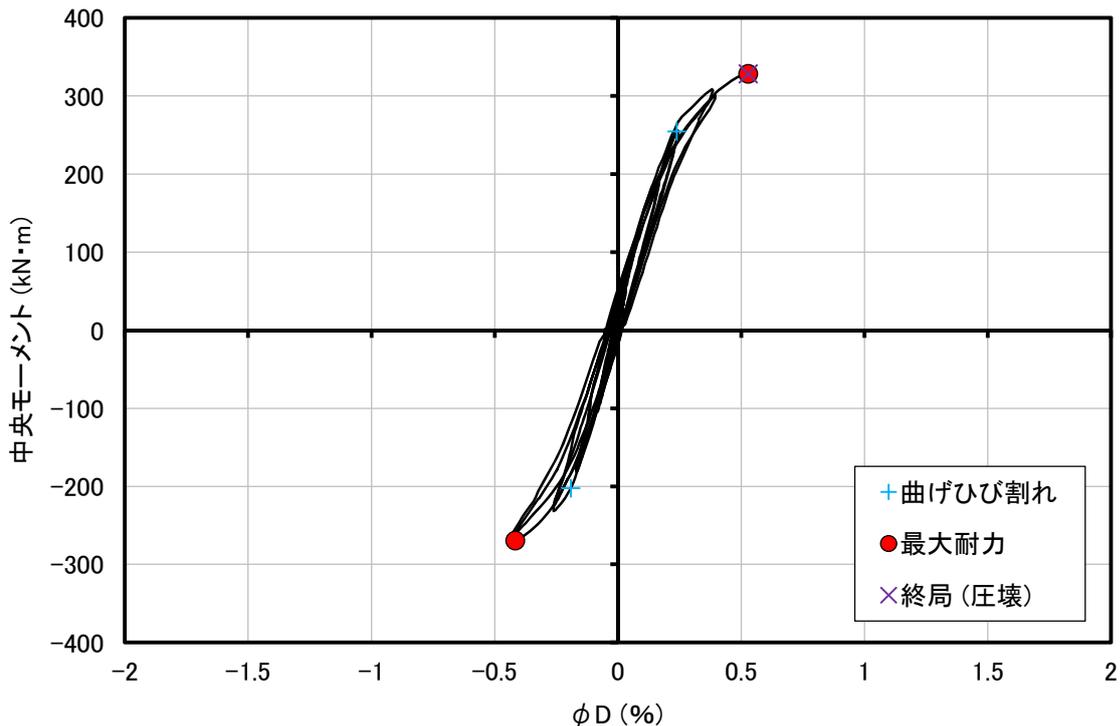


(d) PHC12

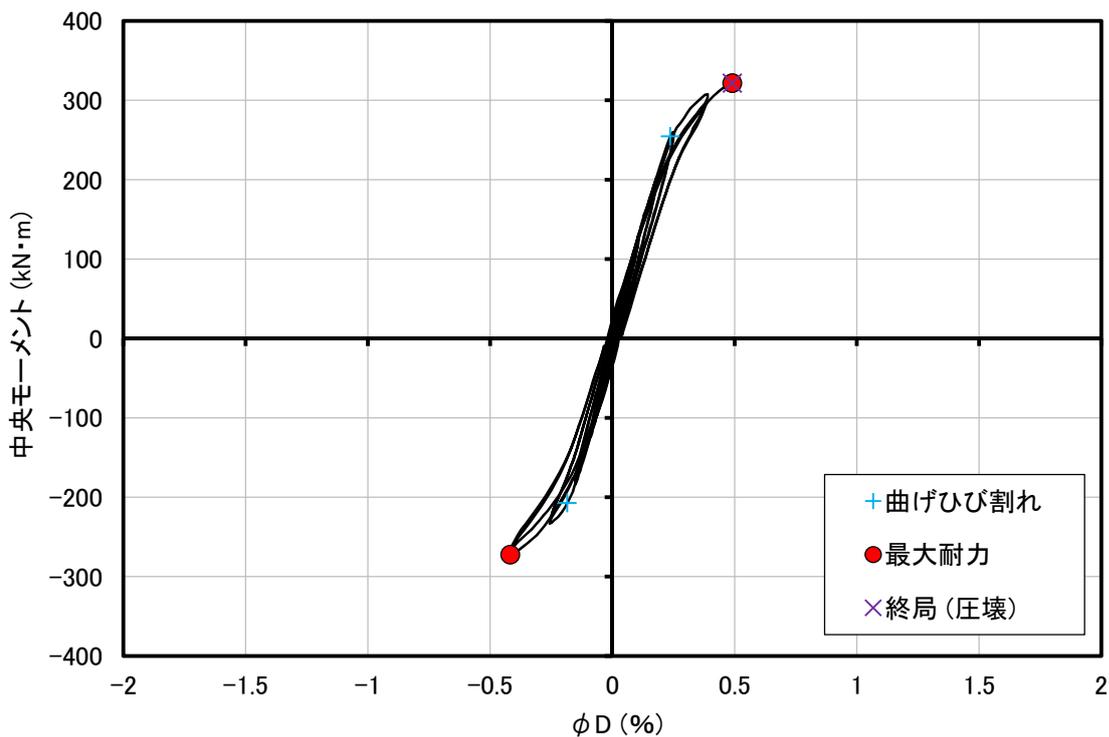


(e) PHC13

図 2.4.9 モーメント- ϕD 関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

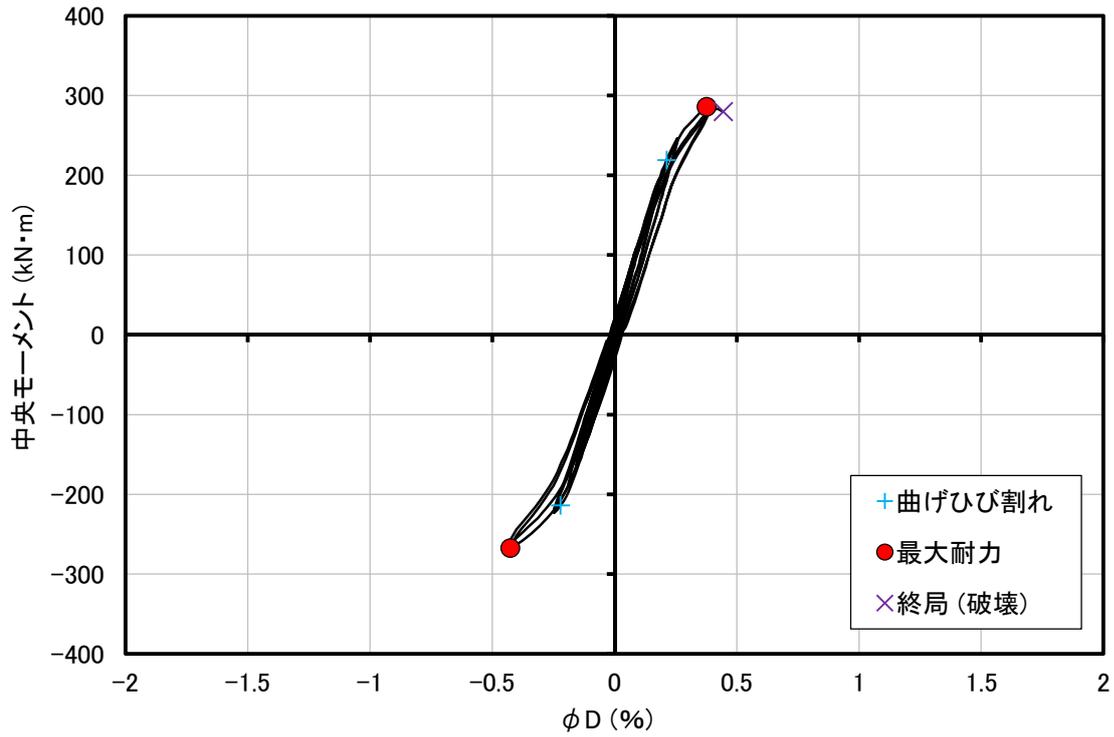


(f) PHC03

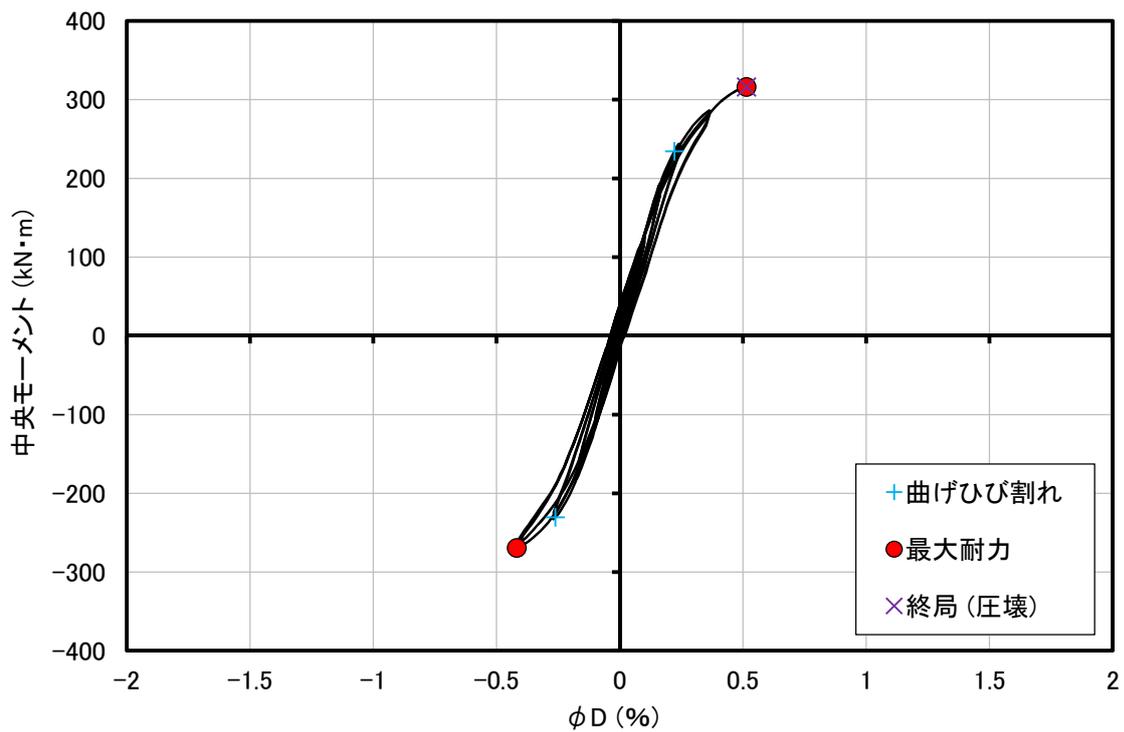


(g) PHC04

図 2.4.9 モーメント-φD 関係 (PHC 杭 A 種) (次項に続く)

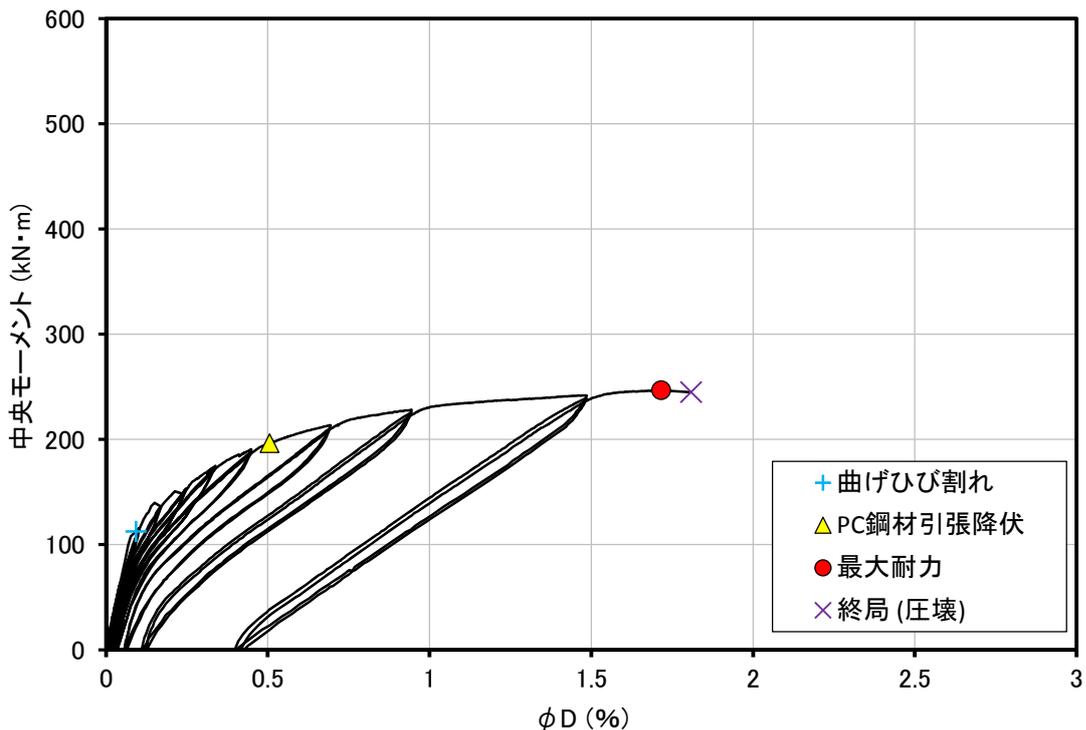


(h) PHC05

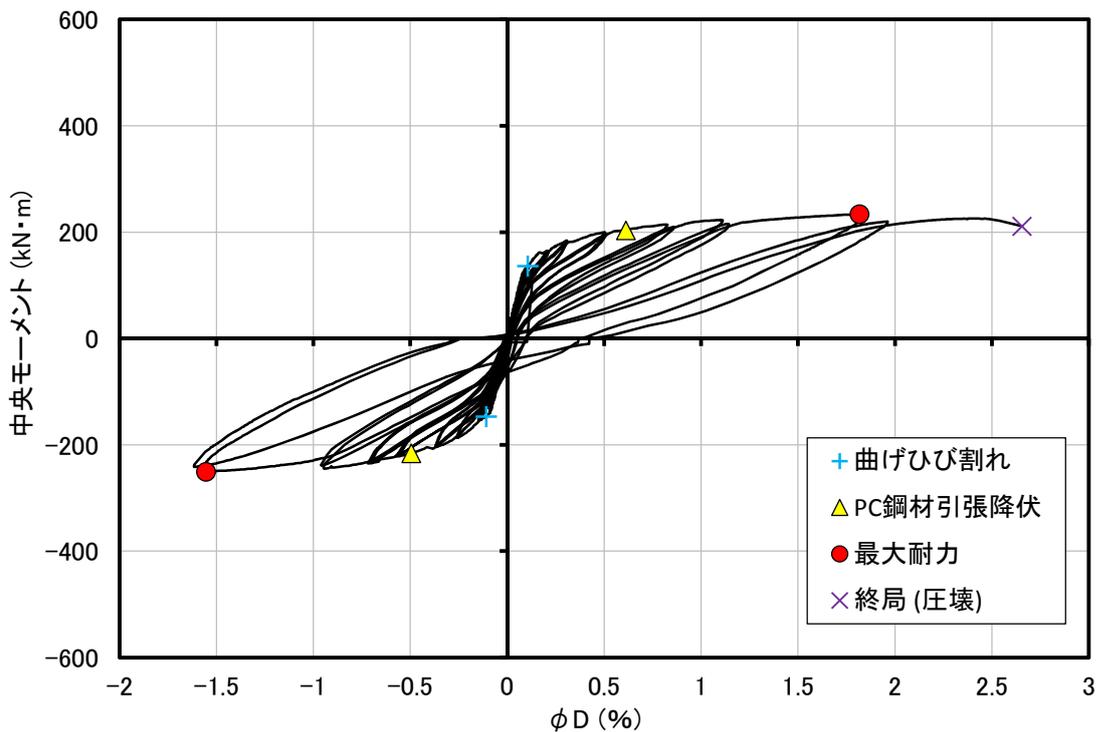


(i) PHC06

図 2.4.9 モーメント- ϕD 関係 (PHC 杭 A 種)

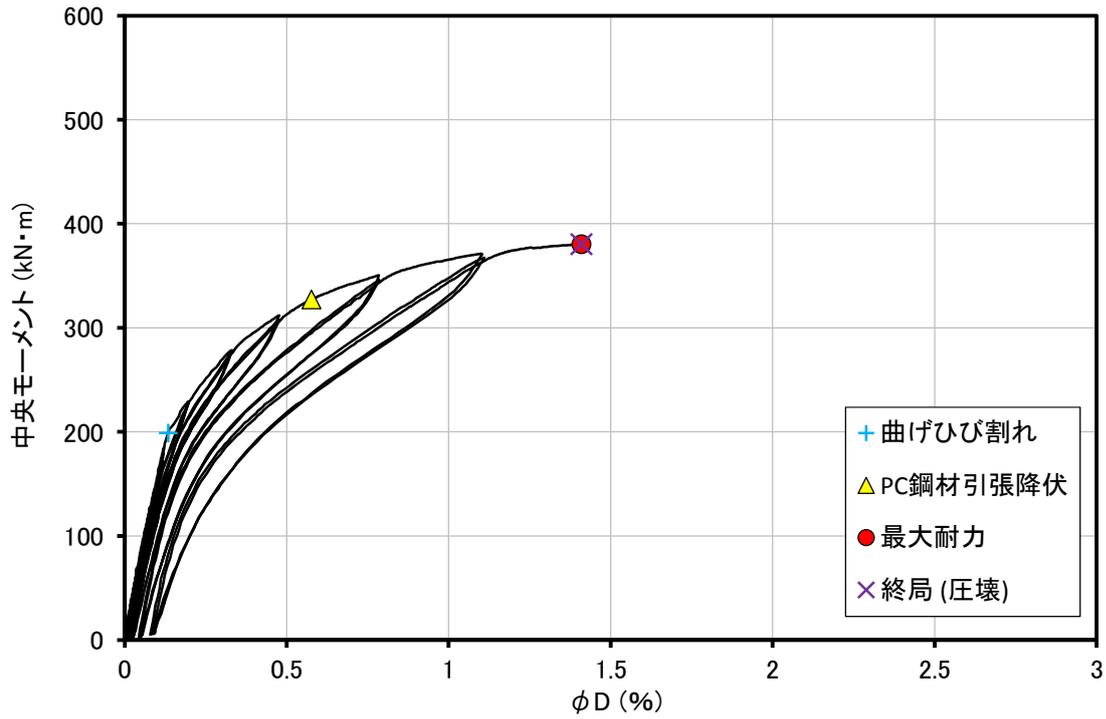


(a) PHC17

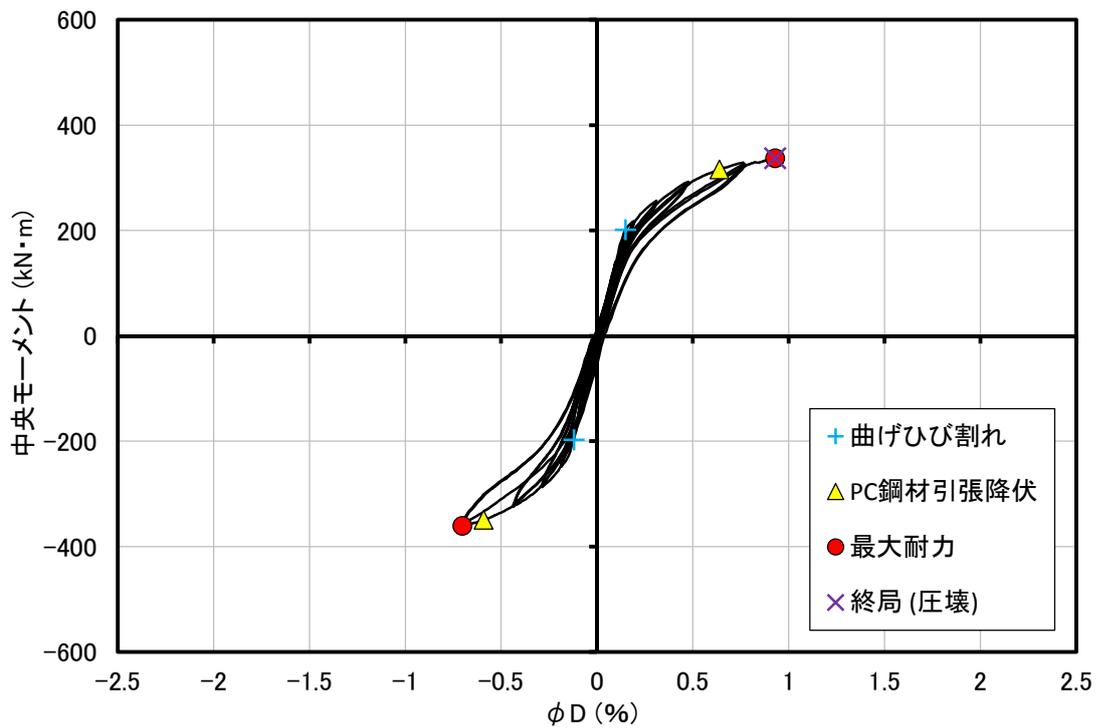


(b) PHC11

図 2.4.10 モーメント-φD 関係 (PHC 杭 C 種) (次項に続く)

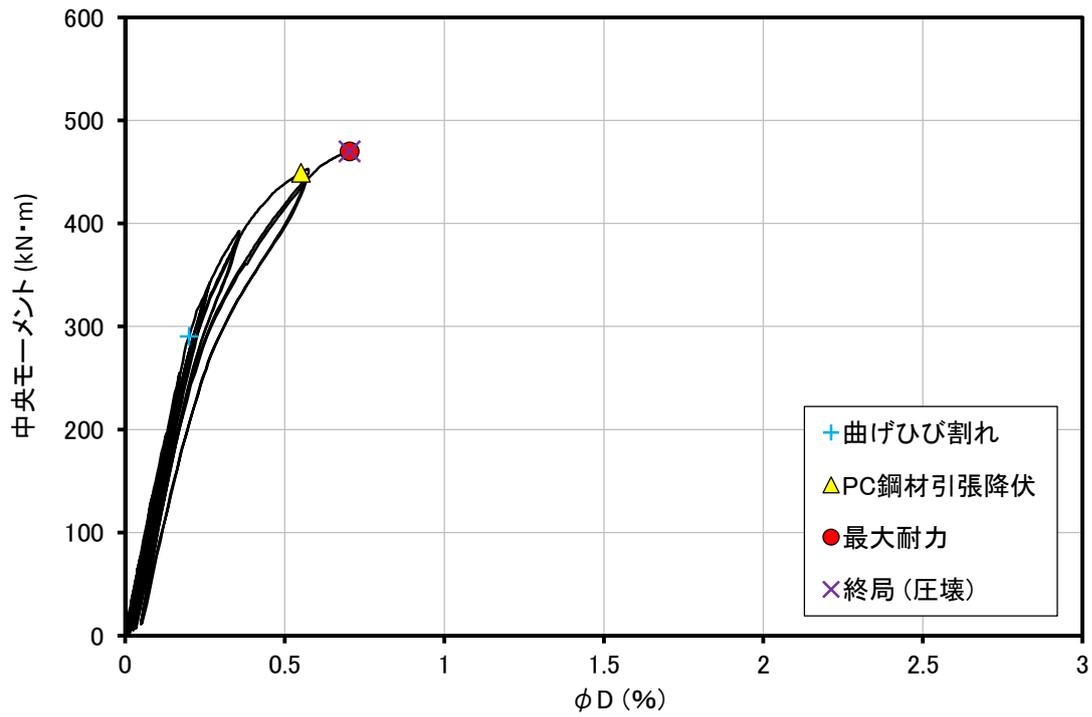


(c) PHC16

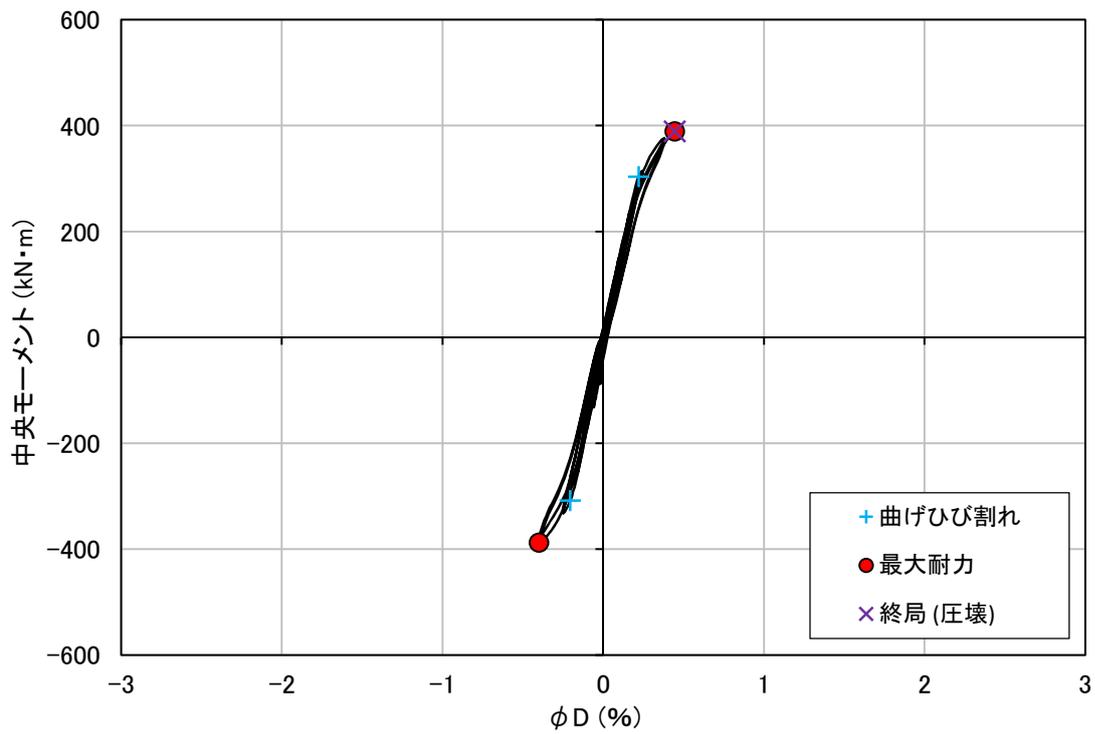


(d) PHC10

図 2.4.10 モーメント-φD 関係 (PHC 杭 C 種) (次項に続く)

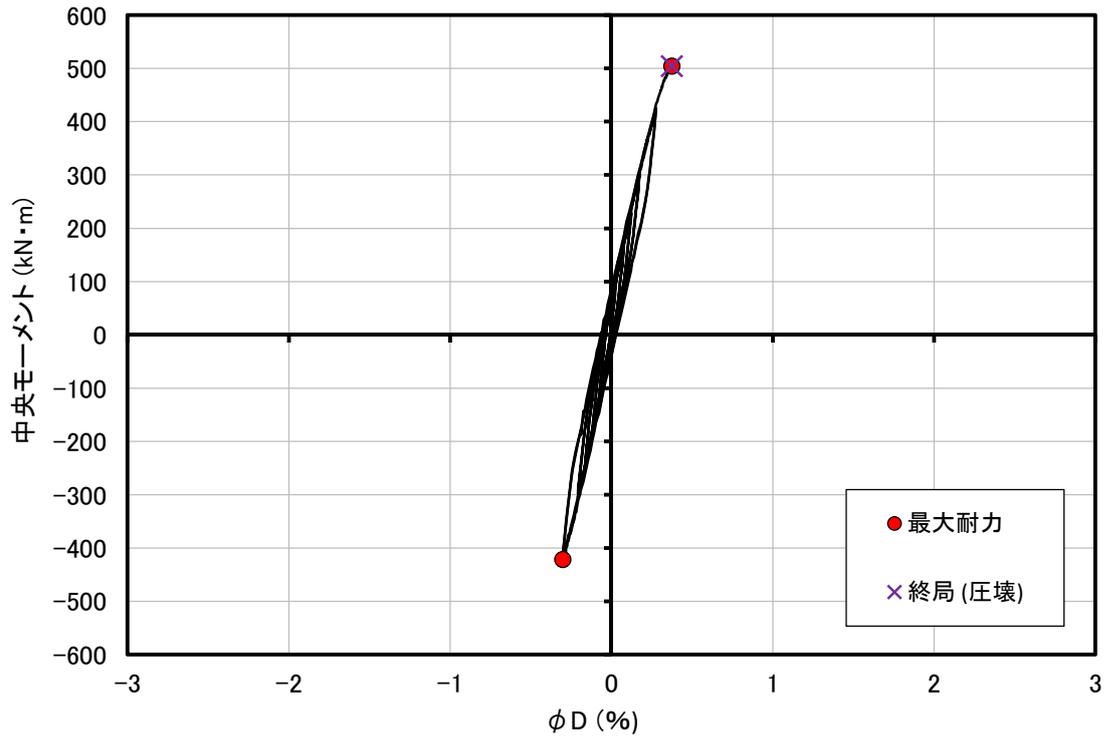


(e) PHC15

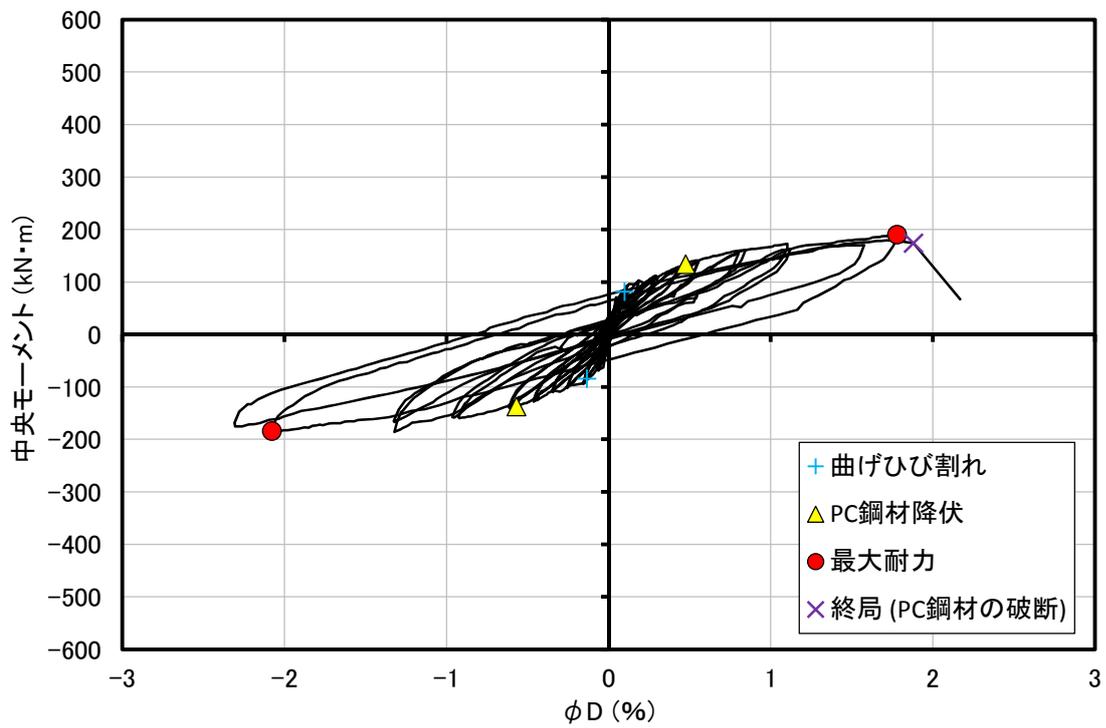


(f) PHC09

図 2.4.10 モーメント- ϕD 関係 (PHC 杭 C 種) (次項に続く)



(g) PHC01



(h) PHC02

図 2.4.10 モーメント-φD 関係 (PHC 杭 C 種)

2.4.3 変形性能

杭体の曲げ変形性能の指標として、終局時曲率および塑性率を比較した。塑性率は降伏時曲率 ϕ_y に対する終局時曲率 ϕ_u の比率である。杭体の「降伏時」は「鋼管・異形鉄筋・PC鋼材が引張降伏ひずみに達した時点のうち、最も早期に達した点」と定義した。

終局時曲率、降伏時曲率の値は試験体が破壊した载荷方向のもので、正载荷、負载荷の両方で終局状態となった試験体は先に到達した载荷方向の値を用いた。杭体が降伏せずに破壊した試験体の塑性率は1.0として扱った。鋼材にひずみゲージを貼付していない試験体、計測不良などにより降伏時曲率が不明である試験体については塑性率を算出しなかった。また、SC16は局部座屈発生点が明確でないため、便宜上最大耐力点の曲率を終局時曲率として用いた。SC15は終局状態まで载荷を行っていないため、参考値として最大耐力時の曲率を示した。

表 2.4.11 に各試験体の降伏時および終局時の ϕ/D 、塑性率を示した。図 2.4.11 および図 2.4.12 は、終局時 ϕ/D と軸力比、塑性率と ϕ/D の関係をそれぞれ示したものである。終局時 ϕ/D と軸力比の関係をみると、各杭種とも無軸力の試験体から作用する圧縮軸力が增大するにしたがって変形性能が低下していることが確認できる。引張軸力下では、今回の軸力レベルでは無軸力試験体と同程度か、やや大きな変形性能を示した。ただし、2.4.8項に示すように引張軸力下では繰り返し载荷によって杭体に軸方向変形が生じ、外縁ひずみの推移にも大きな影響を与えた。したがって引張軸力下における杭体の変形性能は载荷サイクルに依存して変化すると思われる。

塑性率を変形性能の指標として見ても、終局時 ϕ/D と同様、各杭種とも作用圧縮軸力の増大に伴って変形性能が低下していることが確認できる。

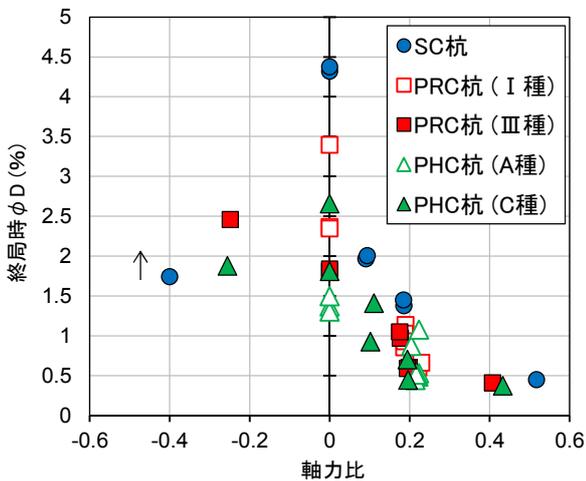


図 2.4.11 終局時 ϕ/D と軸力比の関係

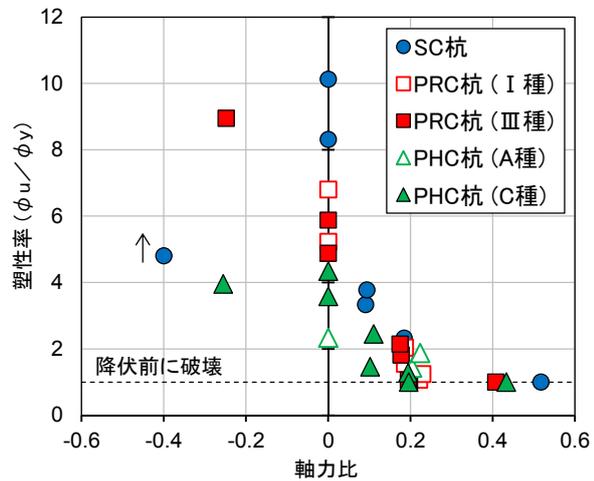


図 2.4.12 塑性率と軸力比の関係

表 2.4.11 各試験体の塑性率

試験体名	軸力比	降伏時 ϕ D (%)	終局時 ϕ D (%)	塑性率
SC16	0.00	0.427	4.32	10.1
SC17	0.00	0.527	4.38	8.31
SC10	0.09	0.591	1.97	3.33
SC11	0.09	0.532	2.01	3.78
SC12	0.18	0.615	1.38	2.24
SC13	0.18	0.623	1.45	2.33
SC14	0.52	—	0.452	1.00
SC15	-0.40	0.363	1.74	4.80
PRC22	0.00	—	2.37	—
PRC23	0.00	0.345	2.35	6.80
PRC17	0.00	0.397	2.07	5.22
PRC18	0.19	—	1.14	—
PRC19	0.19	—	1.03	—
PRC20	0.19	0.553	0.856	1.55
PRC21	0.19	0.457	0.932	2.04
PRC15	0.22	0.566	0.603	1.07
PRC16	0.23	0.537	0.662	1.23
PRC11	0.00	0.308	1.81	5.88
PRC14	0.00	0.377	1.84	4.88
PRC09	0.18	0.535	0.972	1.82
PRC10	0.17	0.491	1.05	2.14
PRC12	0.20	—	0.604	1.00
PRC13	0.19	0.561	0.589	1.05
PRC07	0.41	—	0.411	1.00
PRC08	-0.25	0.275	2.46	8.95
PHC14	0.00	0.587	1.37	2.34
PHC07	0.00	—	1.31	—
PHC08	0.00	—	1.50	—
PHC12	0.20	0.612	0.875	1.43
PHC13	0.22	0.579	1.08	1.87
PHC03	0.22	—	0.529	—
PHC04	0.22	—	0.491	—
PHC05	0.21	—	0.445	—
PHC06	0.22	—	0.514	—
PHC17	0.00	0.505	1.81	3.58
PHC11	0.00	0.613	2.66	4.34
PHC16	0.11	0.576	1.41	2.45
PHC10	0.10	0.639	0.929	1.45
PHC15	0.19	0.552	0.704	1.28
PHC09	0.20	—	0.445	1.00
PHC01	0.43	—	0.374	1.00
PHC02	-0.26	0.475	1.88	3.96

2.4.4 破壊性状

以下に各試験体の破壊過程を述べる。実験終了後の各試験体の破壊状況は附録に示した。

(1) SC杭

圧縮軸力を加えた試験体は全て鋼管の局部座屈によって終局を迎えた（写真 2.4.1）。無軸力試験体でも荷重によって鋼管の局部座屈が発生したが、これらの試験体には座屈検知用の軸方向変位計を設置していなかった。SC16については座屈発生点を明確に読み取ることができなかつたため、今回は便宜的に最大耐力点の変形を終局変形として扱う。引張軸力を加えた SC15 は、正側 $R=4\%$ の荷重 1 周目で杭端部を荷重装置に固定するボルトが抜け出してしまい（写真 2.4.2）、杭体が終局に至る前に荷重を終了した。

各試験体とも荷重の進行に伴って鋼管が降伏したが、作用軸力によって圧縮・引張降伏のいずれが先行するか異なっていた。軸力 $-1200\sim 1000\text{kN}$ の範囲では引張降伏が先行し、SC16, SC17, SC10, SC11 ではその後、圧縮降伏が発生した。ただし、一部試験体では圧縮降伏の発生は一方の荷重方向のみで見られた。SC12, SC13 では試験体、荷重方向によって圧縮・引張降伏が発生する順序が異なっていた。SC14 では圧縮降伏のみが発生した。

さらに荷重が進行すると、各試験体とも最大耐力を記録後に正荷重側で鋼管の局部座屈が発生した。座屈発生位置は全て荷重点近傍であり、SC14 を除いて等モーメント区間の内側であった。軸力を加えた試験体は座屈発生後に急激に耐力低下を生じたが、各試験体とも終局に至っても軸力を保持していた。

(2) PRC杭

i) I種

軸力 2000kN を加えた試験体は全てコンクリートの圧壊によって終局に至った。無軸力の試験体は、一方向荷重の試験体は荷重の進行によってかぶりコンクリートの剥離が発生し、荷重を終了した。正負交番荷重（PRC17）ではコンクリートの圧壊に先行して PC 鋼材の破断が発生した。その後、コンクリートの圧壊が発生したが、正側 $R=6\%$ の 1 周目まで荷重を継続した。モーメント $-\phi D$ 関係については、コンクリート圧壊以降は曲率を正確に計測できなかったため、圧壊時点までを示した。

全試験体とも荷重の進行に伴って曲げひび割れが発生した。無軸力の試験体ではその後、異形鉄筋の引張降伏、PC 鋼材の引張降伏が続いて発生し、最大耐力を迎えた。PRC23 と比較して PRC17 はやや早期に引張降伏が発生する結果となった。鋼材ゲージの有無、荷重方法によって最大耐力に顕著な差は見られなかったが、最大耐力後、一方向荷重ではコンクリートの圧壊が先行し、正負交番荷重では PC 鋼材の破断が先行した。これは、2.4.7 項に示す軸方向変形の差、つまり、正負交番荷重によって引張側の軸方向ひずみが進行したためであると思われる。

軸力 2000kN を加えた試験体では、曲げひび割れの発生後、異形鉄筋の圧縮降伏が先行して発生した。その後は異形鉄筋の引張降伏が発生し、PRC21, PRC15 では PC 鋼材の引張降伏が発生後にコンクリートが圧壊した。PRC20, PRC16 では PC 鋼材が降伏する前にコンクリートの圧壊によって終局に至った。杭体の肉厚やコンクリート強度等が異なるため直接の比較は困難であるが、正負交番荷重の試験体は一方向荷重の試験体と比較して最大耐力、変形性能ともに小さくなった。また、一方向荷重の

試験体では鋼材ゲージの有無によって最大耐力に顕著な差は見られなかったものの、鋼材ゲージを貼付した試験体の方がやや早期にコンクリートが圧壊した。

ii) III種

PRC08は載荷ミスによってR=0.75%のサイクルまで荷重を正確に計測できなかった。そのため、図中にはR=1%のサイクル以降を示した。載荷に伴い曲げひび割れ、異形鉄筋の引張降伏が発生したが、R=0.75%以前であるため図中には示していない。PRC08はPC鋼材の破断、その他の試験体はコンクリートの圧壊によって終局に至った。

載荷が進行すると、PRC07を除きはじめに曲げひび割れが発生した。PRC11、PRC14では一方向・正負交番載荷に関わらず異形鉄筋の引張降伏、PC鋼材の引張降伏が続いて発生した。また、耐力・変形性能も同程度であった。PRC14では正側の圧壊後も載荷を継続し、負側でも圧壊に至った。

PRC09、PRC10、PRC12、PRC13では載荷方式によって耐力・変形性能に差が見られ、PRC12、PRC13が比較的早期に破壊に至った。PRC09、PRC10では曲げひび割れ後に異形鉄筋の圧縮降伏、引張降伏が順に発生し、PC鋼材が引張降伏した後にコンクリートが圧壊した。PRC12、PRC13では曲げひび割れ後に異形鉄筋が降伏したものの、載荷方向・試験体によって圧縮降伏のみ、引張降伏のみが見られる場合があった。PC鋼材は引張降伏に至らず、コンクリートが圧壊した。また、PRC12、PRC13は同条件下の試験でも耐力に比較的大きな差が見られた。

PRC07では異形鉄筋の圧縮降伏が先行し、曲げひび割れが発生後、終局に至った。圧縮軸力を加えた試験体は非常に激しくコンクリートが圧壊し、軸力を保持できなくなった。

PRC08は載荷の進行によって曲げひび割れ、異形鉄筋の引張降伏、PC鋼材の引張降伏が順に発生し、最大耐力を迎えた。その後、負側R=4%の2週目の載荷でPC鋼材が破断し、耐力が最大時の6割程度まで低下したが軸力は保持していた。続く正側R=5%の載荷でもPC鋼材が破断し、耐力が最大時の8割程度まで低下したため載荷を終了した。終局に至っても軸力保持性能は喪失しなかった。

iii) I種とIII種の比較

無軸力試験体では、III種では全てコンクリートの圧壊によって終局に至ったのに対し、I種では正負交番載荷によってPC鋼材の破断が先行した。これは、異形鉄筋量の少ないI種では引張側の応力を負担するために、中立軸位置が浅くなり、大きな引張ひずみが生じたことが一因であると思われる。曲げひび割れ発生後の鋼材の降伏発生順序に関しては、無軸力、軸力2000kNともにI種、III種で顕著な違いは見られなかった。

(3) PHC杭

i) A種

無軸力試験体はPC鋼材の破断、軸力2000kNの試験体はコンクリートの圧壊によって終局に至った。

無軸力試験体では載荷の進行に伴って、曲げひび割れ、PC鋼材の引張降伏が発生し、最大耐力を迎えた。載荷を進めると耐力がやや低下した後にPC鋼材が破断した。破断時には急激に耐力低下を起こした。

軸力 2000kN を加えた場合は、一方向載荷の試験体では曲げひび割れ発生後に PC 鋼材の引張降伏が発生し、コンクリートの圧壊に至った。一方で、正負交番載荷の試験体では、PC 鋼材のひずみが計測できているものに関しては降伏ひずみに達する前にコンクリートが圧壊した。一方向載荷と正負交番載荷では最大耐力、変形性能に差が見られており、正負交番載荷では早期にコンクリートが圧壊した。

ii) C 種

PHC02 は PC 鋼材の破断，その他の試験体はコンクリートの圧壊によって終局に至った。PHC01 以外の試験体は載荷の進行によってはじめに曲げひび割れが発生した。その後，各試験体とも PC 鋼材が引張降伏し，最大耐力後に終局を迎えた。ただし，PHC09 は PC 鋼材の降伏前にコンクリートが圧壊し，終局に至った。

PHC17，PHC11 は圧縮外縁のコンクリートが圧壊するに留まったが，圧縮軸力を加えた試験体は最大耐力と同時に急激に圧壊し，ほぼ全断面のコンクリートが飛散する非常に脆性的な破壊となった。試験体ごとにコンクリート強度や肉厚が異なるため直接の比較は困難だが，載荷方式による耐力の差が他の杭種と比較して大きく，軸力が増大するにつれてその差は顕著となった。

PHC01 については曲げひび割れ，PC 鋼材の降伏は見られず，杭体は弾性的のまま載荷が進行した。R=1%の正側 1 周目でコンクリートが激しく圧壊して終局に至った。PHC02 は曲げひび割れ，PC 鋼材の引張降伏が順に発生し，その後最大耐力を迎えた。正側 R=4%の載荷で PC 鋼材が破断して急激な耐力低下を起し，軸力を保持できなくなった。

iii) A 種と C 種の比較

無軸力試験体では，A 種では PC 鋼材の破断，C 種ではコンクリートの圧壊によって終局に至った。PHC 杭の A 種と C 種では，PRC 杭の場合と同様に軸方向鋼材の量が異なっている。よって，A 種では C 種と比較して中立軸位置が浅いため引張側ひずみの進行が早く，結果的に破壊モードの差が生じたと考えられる。

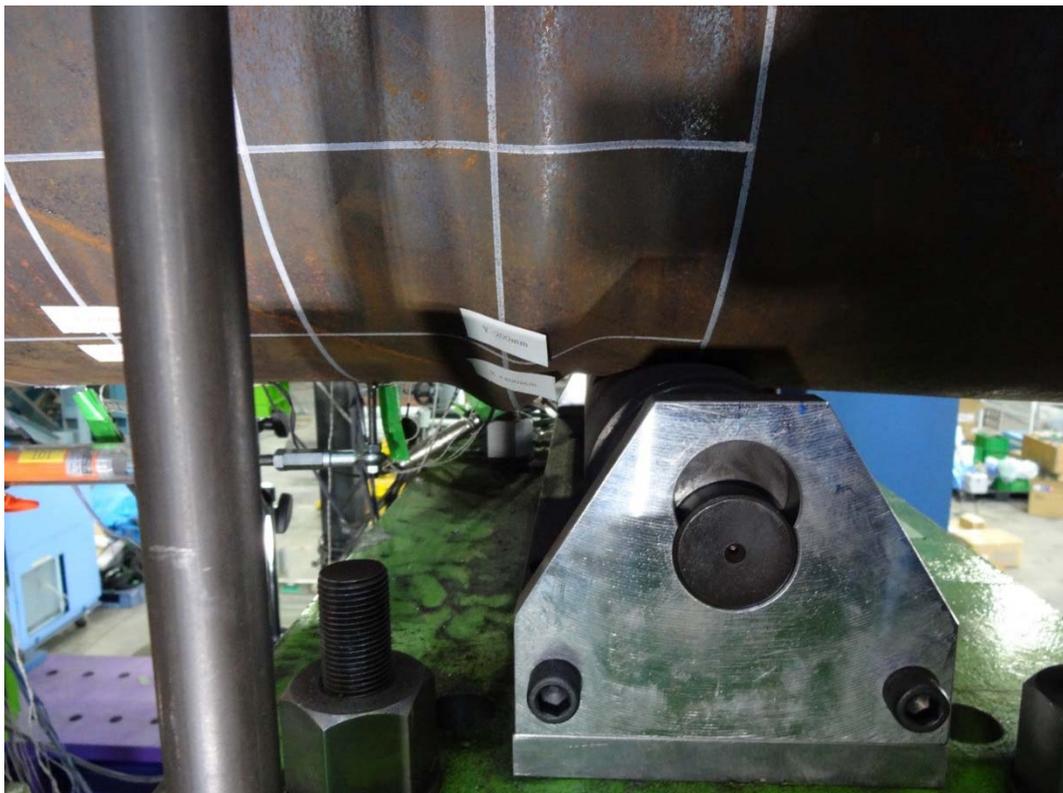


写真 2.4.1 載荷点近傍における鋼管の局部座屈（SC12）

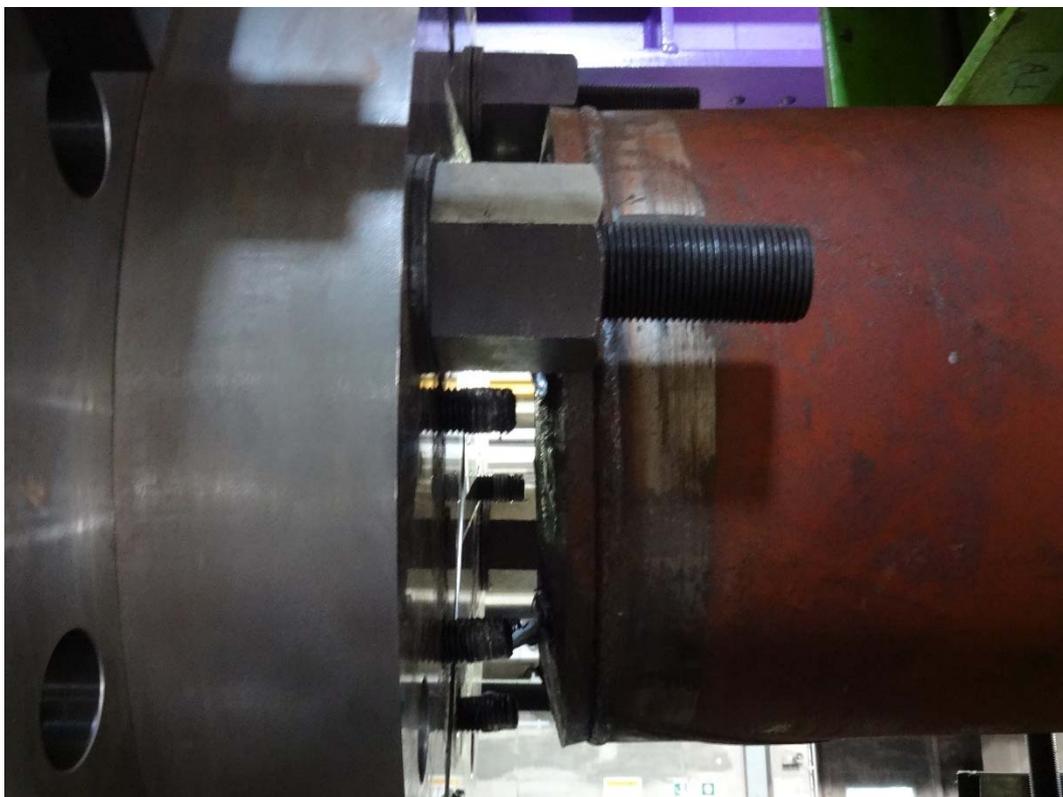


写真 2.4.2 杭端部のボルトの抜け出し（SC15）

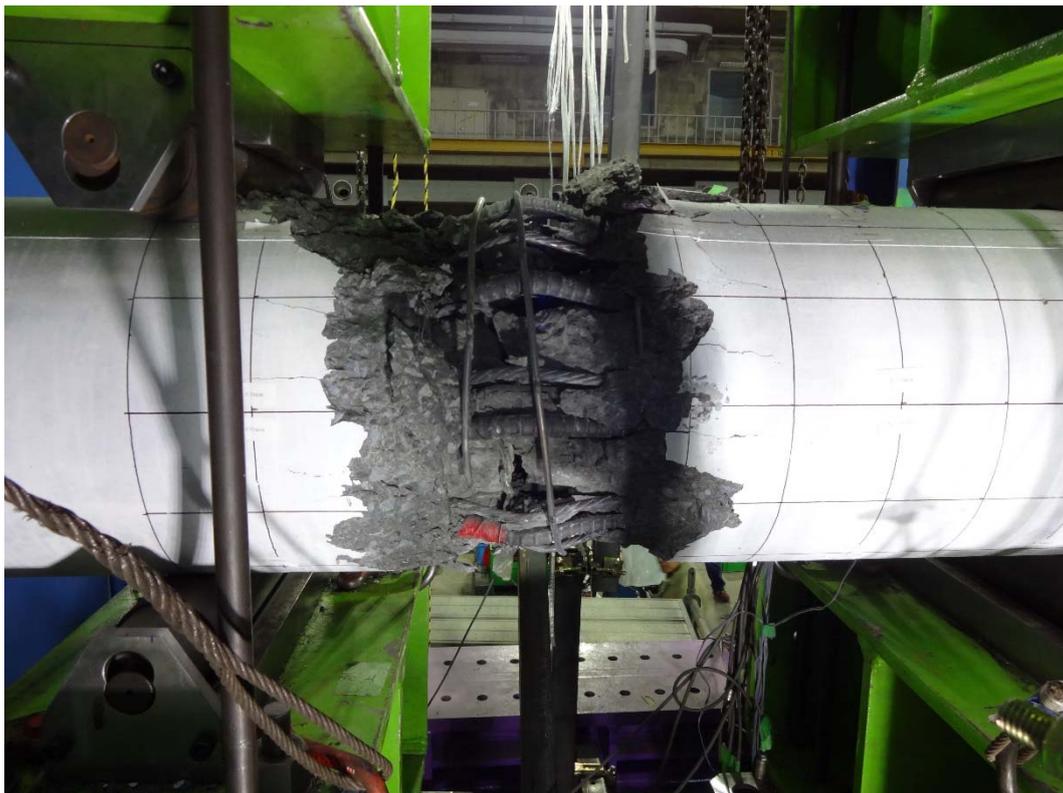


写真 2.4.3 試験体の最終状況（PRC07）

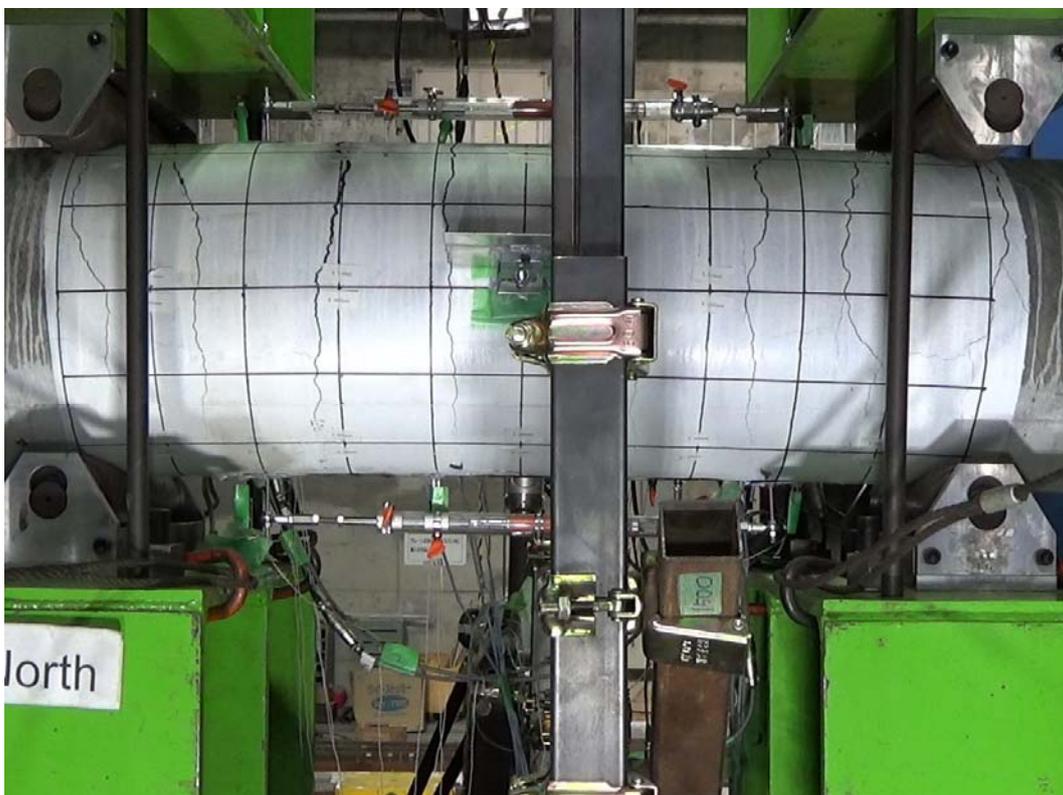


写真 2.4.4 試験体の最終状況（PHC02）

2.4.5 プレストレスによる初期ひずみ

今回の実験では、PRC杭およびPHC杭内部のPC鋼材・異形鉄筋にひずみゲージを貼付し、ひずみの計測を行った。プレストレスを導入することによって生じるひずみ（以下、初期ひずみ）を計測するため、計測は実験時だけでなく杭体製造前（緊張力導入前）、杭体製造後（載荷装置への設置前）にも行った。

表 2.4.12 に計測した初期ひずみを示す。同一のPC鋼材・異形鉄筋に貼付した計測値にもばらつきが大きく、設計値から大きく外れるものが見られる。そこで、本実験では初期ひずみを計算によって算出し、杭体に軸力およびせん断力を載荷することによって生じるひずみ増分を加えることで、ひずみの絶対値を求めることとした。

表 2.4.12 ひずみゲージにより計測した初期ひずみ（単位： μ ）

試験体名	P1	P2	P3	P4	P5	P6	平均	R1	R2	R3	R4	R5	R6
PRC23	1339	1532	1520	1977	1827	1870	1745	918	880	812	1259	1167	1111
PRC17	—	3992	—	3661	3918	3979	3963	-196	-215	—	-8	19	218
PRC20	1636	1816	1954	3199	3093	2788	3146	771	1083	863	-92	-164	345
PRC21	2649	2546	1031	2667	2948	3051	2829	126	-126	—	-310	-172	-2450
PRC15	2309	3803	—	—	—	—	3803	22	91	—	-98	-52	-121
PRC16	—	—	4024	4527	3748	—	4276	362	-68	-67	632	439	613
PRC11	4458	3510	2335	3490	1409	3776	3915	109	-739	614	-613	369	321
PRC14	—	—	5020	—	4095	—	4558	8	-58	-180	-48	—	-189
PRC09	3489	3876	3424	—	3952	4224	3885	-288	-396	-79	727	-71	-369
PRC10	—	3556	—	—	3553	—	3555	—	245	-204	720	-185	—
PRC12	—	—	3701	3130	2635	—	3416	-358	—	-352	-312	-558	-117
PRC13	3739	3876	3667	2998	—	3285	3761	-197	-158	-196	-158	-158	-195
PRC07	3546	3705	3574	3538	3765	3761	3670	-86	-57	-8	-15	113	-80
PRC08	3378	3928	2017	3482	2438	2215	3705	-53	-221	-128	-20	52	-18
PHC14	3426	2851	3474	2858	1388	3494	3313	—	—	—	—	—	—
PHC08	2634	—	3915	—	—	—	3915	—	—	—	—	—	—
PHC12	3326	3446	2413	3094	3173	3372	3329	—	—	—	—	—	—
PHC13	3280	3525	3319	3203	2963	3116	3289	—	—	—	—	—	—
PHC05	3608	3580	3790	—	—	—	3659	—	—	—	—	—	—
PHC06	—	—	—	2082	3741	3952	3847	—	—	—	—	—	—
PHC17	3040	3132	3034	2459	3137	2972	3086	—	—	—	—	—	—
PHC11	4528	4290	4029	5338	5451	—	5106	—	—	—	—	—	—
PHC16	3760	3851	3687	3443	2985	3283	3605	—	—	—	—	—	—
PHC10	6530	5075	4285	3821	4542	3448	5382	—	—	—	—	—	—
PHC15	2840	3177	2480	2148	3142	3446	3255	—	—	—	—	—	—
PHC09	2385	3326	3762	4377	—	4807	4592	—	—	—	—	—	—
PHC01	2285	1675	3405	2855	1925	3424	3415	—	—	—	—	—	—
PHC02	3696	3669	3125	3352	3356	3233	3461	—	—	—	—	—	—

※斜線，網掛け部の数値は平均値の計算から除外した。

初期ひずみの計算方法

初期ひずみの計算方法を以下に示す。計算は JIS A 5337^[2-18]に従った。図 2.4.13 には PC 鋼材の初期ひずみの計算手順を示す。

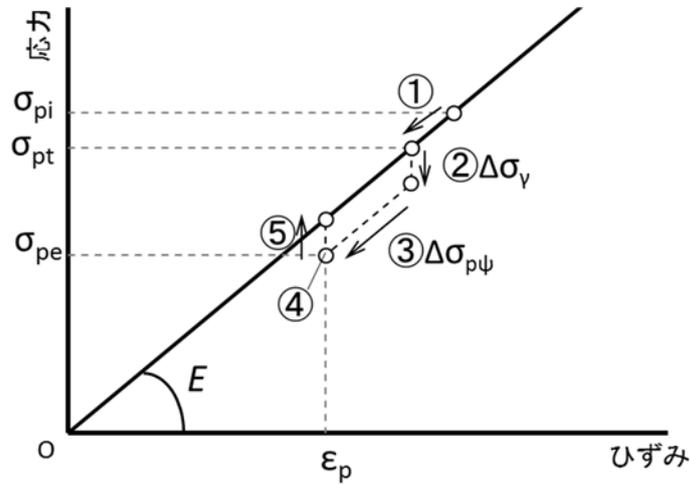


図 2.4.13 PC 鋼材の初期ひずみ計算の手順

- ① プレストレス導入直後の PC 鋼材の引張応力度 σ_{pt} (N/mm²)

$$\sigma_{pt} = \frac{\sigma_{pi}}{1 + n' \frac{A_p}{A_c}} \tag{2.4.2}$$

- σ_{pi} : PC 鋼材の初期引張応力度 (N/mm²)
- A_p : PC 鋼材の断面積 (mm²)
- A_c : コンクリートの断面積 (mm²)
- n' : プレストレス導入時の PC 鋼材とコンクリートの弾性係数比 (E_p/E_c')
- E_p : PC 鋼材の弾性係数 (N/mm²)
- E_c' : プレストレス導入時のコンクリートの弾性係数 (N/mm²)

PRC 杭の計算においてはコンクリートと異形鉄筋がプレストレスによって同量の圧縮ひずみを受けるとし、 A_c に代わり $A_c + (E_d/E_c')A_d$ を用いた。

- E_d : 異形鉄筋の弾性係数 (N/mm²)
- A_d : 異形鉄筋の断面積 (mm²)

- ② PC 鋼材のリラクセーションによる引張応力度の減少量 $\Delta \sigma_\gamma$ (N/mm²)

$$\Delta \sigma_\gamma = \gamma_0 (\sigma_{pt} - 2\Delta \sigma_{p\psi}) \tag{2.4.3}$$

- γ_0 : PC 鋼材の純リラクセーション
- $\Delta \sigma_{p\psi}$: コンクリートのクリープ及び乾燥収縮による PC 鋼材の引張応力度の減少量

- ③ コンクリートのクリープ及び乾燥収縮による
PC鋼材の引張応力度の減少量 $\Delta\sigma_{p\psi}$ (N/mm²)

$$\Delta\sigma_{p\psi} = \frac{n\psi\sigma_{cpt} + E_p\varepsilon_s}{1 + n\frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}}\left(1 + \frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.4.4)$$

σ_{cpt} : プレストレス導入直後のプレストレス (N/mm²)

$$\sigma_{cpt} = \frac{\sigma_{pt}A_p}{A_c}$$

n : PC鋼材とコンクリートの弾性係数比 (E_p/E_c)
 ψ : コンクリートのクリープ係数
 ε_s : コンクリートの乾燥収縮度
 E_p : PC鋼材の弾性係数 (N/mm²)
 E_c : コンクリートの弾性係数 (N/mm²)

- ④ PC鋼材の有効引張応力度 σ_{pe} (N/mm²)

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pt} - \Delta\sigma_{p\psi} - \Delta\sigma_\gamma \quad (2.4.5)$$

有効プレストレス応力度 σ_{ce} (N/mm²)

$$\sigma_{ce} = \frac{\sigma_{pe}A_p}{A_c} \quad (2.4.6)$$

PRC杭の場合は①と同様に異形鉄筋の影響を考慮し、 A_c に代わり $A_c + (E_d/E_c)A_d$ を用いた。

- ⑤ PC鋼材の初期ひずみ ε_p

PC鋼材の初期ひずみを求める際は、PC鋼材の実際の応力度にリラクゼーションによる減退分を加えてから弾性係数で除して算出した。

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{pe} + \Delta\sigma_\gamma}{E_p} \quad (2.4.7)$$

- ⑥ 異形鉄筋・コンクリートの初期ひずみ ε_c

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_{ce}}{E_c} \quad (2.4.8)$$

初期ひずみの計算値を表 2.4.13 に示す。多くの試験体において、算出した PC 鋼材の初期ひずみとひずみゲージにより計測した初期ひずみの誤差は 20%程度におさまっており、ある程度の妥当性を持った値であると考えられる。そこで、本研究では全試験体とも算出した初期ひずみと载荷によるひずみ増分を足し合わせることでひずみの絶対値とした。ただし、一部の試験体では計算値と実測値との誤差が大きく、PRC17 のように実測値／計算値の比率が 0.43 という場合も見られる。

表 2.4.13 計算により求めた初期ひずみ

試験体名	PC鋼材のひずみ (μ)	実測値／計算値	コンクリートおよび 異形鉄筋のひずみ (μ)
PRC22	4316	—	-145
PRC23	4318	0.92	-151
PRC17	4088	0.43	-163
PRC18	4319	—	-142
PRC19	4320	—	-141
PRC20	4316	0.88	-154
PRC21	4313	0.99	-154
PRC15	4086	0.77	-166
PRC16	4073	0.69	-174
PRC11	3915	0.87	-146
PRC14	4558	0.97	-145
PRC09	3885	0.87	-148
PRC10	3555	0.80	-146
PRC12	3416	0.73	-142
PRC13	3761	0.81	-143
PRC07	3670	0.84	-141
PRC08	3705	0.85	-143
PHC14	3538	0.94	-81.2
PHC07	3958	—	-90.6
PHC08	3971	0.99	-104
PHC12	3545	0.94	-80.1
PHC13	3548	0.93	-81.1
PHC03	3993	—	-104
PHC04	3985	—	-103
PHC05	3997	0.92	-102
PHC06	3978	0.97	-102
PHC17	3610	0.85	-210
PHC11	4104	1.24	-210
PHC16	3592	1.00	-221
PHC10	3617	0.90	-207
PHC15	4196	1.28	-214
PHC09	4040	1.14	-207
PHC01	3619	0.94	-213
PHC02	3613	0.96	-205

2.4.6 ひずみの推移

(1) 杭体表面ひずみ

載荷サイクル1周目ピーク時の、杭体圧縮および引張外縁のひずみを表2.4.14に示す。値は軸方向変位計H1, H5の計測値から平面保持を仮定して求めた。表中の破壊時ひずみは、載荷サイクルの途中、前サイクルのピーク時変形よりも大きな変形で破壊した試験体についてのみ示した。図2.4.14から図2.4.18には、表2.4.14のひずみ値とピーク時 ϕD の関係を図示した。また、SC杭については杭体表面のひずみゲージA列～C列の値をあわせて示した。

i) SC杭

変位計から算出した平均的な外縁ひずみは、正負で概ね同様の挙動を示した。ただし、正側で先に鋼管が降伏して残留ひずみが残ることで、負側のひずみ挙動に影響を与える場合があった。特に引張降伏が先行した試験体では、負側のひずみ値が正側と比較してやや圧縮ひずみが小さく、引張ひずみが大きくなる傾向がみられた。

ひずみゲージの値が取得できている範囲では、変位計から算出した値はひずみゲージの計測値の平均的な挙動を捕らえている。ただし、等曲げモーメント区間内であっても鋼管のひずみの進展は必ずしも均一でなく、一部が降伏することでその位置に塑性ひずみが発生し、変形が集中して進行する場合があった。SC10, SC11, SC12, SC13は最大耐力時に圧縮外縁ひずみが 5000μ 程度まで進行しているものが多く、PRC杭, PHC杭と比較してやや大きな圧縮ひずみまで変形することが可能であった。SC15は載荷が進行すると鋼管の残留ひずみによって全断面引張状態になり、圧縮縁, 引張縁ともに引張方向にひずみが進行した。

ii) PRC杭

変位計から算出した外縁ひずみは、正負で概ね同様の挙動を示した。圧縮軸力を加えた試験体は圧縮外縁ひずみが $3000\sim 4000\mu$ 程度で圧壊した。また、コンクリートが圧壊した無軸力試験体では、圧壊時にやや大きな圧縮ひずみが記録された。PC鋼材の破断が発生した無軸力の試験体（PRC17）については、正側 $\phi D=3.4\%$ 時に、前サイクルよりも圧縮縁のひずみが小さくなっており、引張側に大きくひずみが推移していることが分かる。PRC08では圧縮外縁のひずみも載荷の進行に伴って引張側に移行し、大変形時には全断面引張となった。

iii) PHC杭

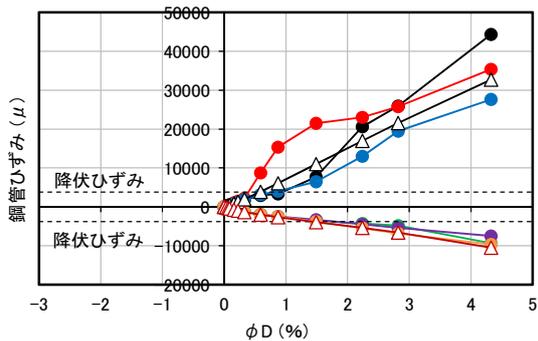
変位計から算出した外縁ひずみは、正負で概ね同様の挙動を示した。作用軸力によるひずみの進展状況の違いはPRC杭と概ね同様であった。コンクリートの圧壊によって破壊した試験体を見ると、正負交番載荷の試験体と比較して一方向載荷の試験体では破壊時の圧縮外縁ひずみがやや大きかった。また、PHC02では載荷の進行によって圧縮外縁ひずみの進展が小さくなったものの、大きく引張側に移行することはなかった。

表 2.4.14 外縁位置のひずみ (次項に続く)

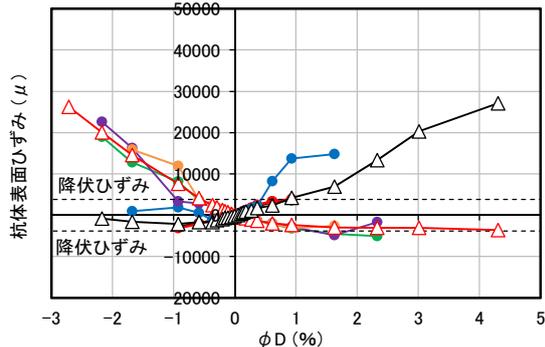
		外縁ひずみ (μ)																								
		1/800		1/400		1/267		1/200		1/133		1/100		1/67		1/50		1/33		1/25		1/20		破壊時		
		正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	
SC16	圧縮	-173	—	-332	—	-408	—	-687	—	-967	—	-1337	—	-1995	—	-2643	—	-3922	—	-5403	—	-6610	—	-10512	—	
	引張	173	—	348	—	458	—	887	—	1300	—	1970	—	3912	—	6077	—	10972	—	16970	—	21577	—	32728	—	
SC17	圧縮	-275	-233	-452	-428	-602	-573	-735	-703	-1040	-1010	-1338	-1245	-1978	-1705	-2385	-1675	-2993	-2170	-3052	-1635	-3048	-845	-3277	—	
	引張	325	300	602	678	852	973	1118	1270	1707	1843	2355	2395	4195	4122	6935	7592	13327	14603	20268	20085	27098	26262	40510	—	
SC10	圧縮	-619	-378	-861	-591	-978	-743	-1271	-916	-1538	-1316	-1891	-1576	-2791	-4403	-3545	-4743	-1952	-5822	-2454	-6077	—	—	—	—	
	引張	39	131	14	83	195	310	696	624	1163	1291	1716	1818	3311	3228	5718	8368	13938	13246	18643	—	—	—	—	—	
SC11	圧縮	-388	-377	-626	-475	-866	-696	-1122	-844	-1720	-1121	-1946	-1354	-2853	-1963	-3377	-2222	-4870	-3120	-5453	-3330	—	—	—	—	
	引張	46	77	234	258	474	538	705	736	1520	1313	1754	1746	3461	3538	4877	5005	9303	10453	14594	16097	—	—	—	—	
SC12	圧縮	-416	-738	-855	-850	-938	-1049	-1001	-1028	-1580	-1652	-1981	-2022	-2692	-2609	-3178	-3249	—	—	—	—	—	—	-5008	—	
	引張	676	378	228	250	104	43	74	55	647	802	1239	1338	2642	2784	3928	4558	—	—	—	—	—	—	7933	—	
SC13	圧縮	-895	-688	-1093	-886	-1227	-1001	-1502	-1264	-1860	-1621	-2193	-1891	-2934	-2533	-3686	-3163	—	—	—	—	—	—	-5809	—	
	引張	255	454	40	239	93	74	485	289	1060	879	1601	1383	2859	2667	4828	4404	—	—	—	—	—	—	8851	—	
SC14	圧縮	-1565	-1418	-1780	-1683	-2058	-1944	-2329	-2297	-2819	-2986	-3400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-4180	—
	引張	818	1024	687	809	518	631	363	403	39	6	200	312	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	513	—
SC15	圧縮	690	462	431	238	217	35	28	-132	-238	-179	363	1312	1503	5034	10851	13732	19928	25041	—	—	—	—	—	—	
	引張	1010	1222	1344	1478	1683	1848	2055	2282	3063	3388	5403	4805	11330	12908	21991	24918	36881	41768	—	—	—	—	—	—	
PRC22	圧縮	-218	—	-456	—	-634	—	-759	—	-994	—	-1191	—	-1676	—	-2068	—	-2946	—	-3746	—	-4021	—	—	—	
	引張	49	—	571	—	1099	—	1574	—	2526	—	3289	—	5857	—	8199	—	14161	—	18827	—	19552	—	—	—	
PRC23	圧縮	-343	—	-551	—	-733	—	-834	—	-1079	—	-1264	—	-1663	—	-2068	—	-2829	—	-3528	—	-3556	—	—	—	
	引張	9	—	649	—	1014	—	1432	—	2294	—	3162	—	5711	—	8332	—	13877	—	19459	—	20004	—	—	—	
PRC17	圧縮	-358	-348	-568	-558	-731	-696	-825	-818	-1040	-1020	-1191	-1165	-1533	-1506	-1805	-1748	-2473	-2316	-3391	-2445	—	—	-3081	—	
	引張	82	39	592	415.3	1122	1037	1749	1542	3014	2660	4315	3622	6307	5347	8929	8105	15580	13390	23982	19835	—	—	—	30905	
PRC18	圧縮	-889	—	-1102	—	-1312	—	-1535	—	-1888	—	-2321	—	-2973	—	-3608	—	—	—	—	—	—	—	-4075	—	
	引張	416	—	262	—	18	—	305	—	992	—	1899	—	3568	—	5578	—	—	—	—	—	—	—	7378	—	
PRC19	圧縮	-899	—	-1115	—	-1314	—	-1518	—	-1942	—	-2261	—	-2899	—	-3555	—	—	—	—	—	—	—	-3799	—	
	引張	542	—	351	—	136	—	93	—	876	—	1736	—	3391	—	5489	—	—	—	—	—	—	—	6425	—	
PRC20	圧縮	-792	—	-997	—	-1204	—	-1413	—	-1799	—	-2220	—	-2889	—	-3616	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	引張	566	—	344	—	137	—	47	—	774	—	1454	—	2898	—	4891	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
PRC21	圧縮	-747	—	-998	—	-1194	—	-1411	—	-1834	—	-2202	—	-2919	—	-3539	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	引張	427	—	218	—	47	—	203	—	1126	—	1752	—	3628	—	5714	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
PRC15	圧縮	-817	-1098	-1031	-1298	-1252	-1521	-1466	-1743	-1905	-2200	-2379	-2648	-3246	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3048	—	
	引張	690	418	484	218	272	28	66	177	582	793	1188	1299	2247	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2699	—	
PRC16	圧縮	-962	-1327	-1171	-1556	-1402	-1780	-1618	-2004	-2045	-2462	-2541	-2897	-3356	-3749	—	—	—	—	—	—	—	—	-3620	—	
	引張	936	554	744	342	555	160	372	23	322	638.5	993	1324	2458	2718	—	—	—	—	—	—	—	—	2614	—	
PRC11	圧縮	-328	—	-523	—	-590	—	-867	—	-1102	—	-1407	—	-1918	—	-2438	—	-3465	—	—	—	—	—	-4302	—	
	引張	72	—	583	—	650	—	1093	—	1512	—	2100	—	3895	—	5882	—	9975	—	—	—	—	—	13778	—	
PRC14	圧縮	-189	-227	-422	-480	-486	-557	-746	-822	-952	-1021	-1189	-1277	-1647	-1695	-2093	-2135	-4787	-2662	—	—	—	—	—	—	
	引張	189	244	539	613	702	707	1196	1272	1669	1638	2356	2344	4047	4245	6393	7085	15370	15629	—	—	—	—	—	—	
PRC09	圧縮	-818	—	-1017	—	-1103	—	-1430	—	-1753	—	-2197	—	-2832	—	-3478	—	—	—	—	—	—	—	-3736	—	
	引張	511	—	304	—	210	—	117	—	607	—	1543	—	3028	—	5082	—	—	—	—	—	—	—	5890	—	
PRC10	圧縮	-781	—	-989	—	-1087	—	-1430	—	-1744	—	-2196	—	-2901	—	-3567	—	—	—	—	—	—	—	-4510	—	
	引張	541	—	349	—	301	—	16.83	—	322.7	—	1124	—	2313	—	4246	—	—	—	—	—	—	—	5764	—	
PRC12	圧縮	-374	-760	-995	-920	-1090	-1015	-1422	-1359	-1749	-1759	-2222	-2239	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-2787	—	
	引張	760	374	89	214	10	135	471	241	1131	641	2071	1255	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3253	—	
PRC13	圧縮	-791	-780	-1010	-1026	-1140	-1138	-1470	-1481	-1813	-1818	-2288	-2298	-3036	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3108	—	
	引張	378	406	210	226	180	165	184	212	694	782	1485	1529	2884	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2772	—	
PRC07	圧縮	-1473	-1769	-1759	-1818	-1965	-2022	-2301	-2300	-2831	-2883	-3540	-3502	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	引張	1007	704	779	803	565	608	321	447	109	97	727	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
PRC08	圧縮	324	227	172	-3	27	-204	-111	-328	-354	-516	-297	-943	-701	-1256	-465	-1158	27	1024	5463	7597	—	—	—	—	
	引張	1053	1025	1414	1414	1909	1807	2405	2223	3348	2802	3792	4288	7154	7809	12684	12560	21976	21595	30298	29481	—	—	—	—	

表 2.4.14 外縁位置のひずみ

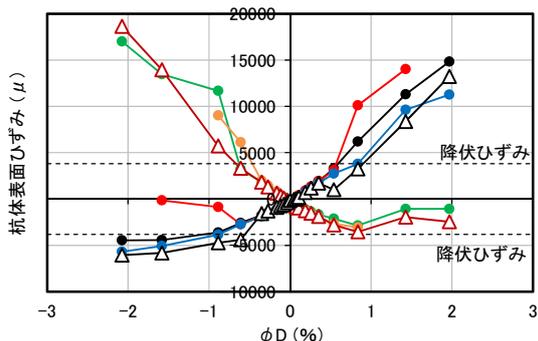
		外縁ひずみ (μ)																							
		1/800		1/400		1/267		1/200		1/133		1/100		1/67		1/50		1/33		1/25		1/20		破壊時	
		正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負
PHC14	圧縮	-248	—	-436	—	-511	—	-571	—	-788	—	-973	—	-1419	—	-1781	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	引張	152	—	1524	—	2182	—	2842	—	4492	—	6561	—	9074	—	11286	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PHC07	圧縮	-288	-304	-514	-526	-606	-593	-811	-853	-999	-1081	-1376	-1399	-1771	-1759	-2169	—	—	—	—	—	—	—	—	-2058
	引張	139	122	899	394	1141	461	1962	1321	3067	2066	4877	3334	7056	5694	10804	—	—	—	—	—	—	—	—	11009
PHC08	圧縮	-289	-306	-494	-504	-562	-559	-784	-797	-982	-946	-1232	-1152	-1667	-1386	-2011	-1464	—	—	—	—	—	—	—	-1857
	引張	98	81	519	429	704	601	1509	1923	2124	2988	3208	5261	5426	9428	9936	—	—	—	—	—	—	—	—	13183
PHC12	圧縮	-776	—	-1000	—	-1231	—	-1436	—	-1967	—	-2440	—	-3301	—	-4188	—	—	—	—	—	—	—	—	-5220
	引張	-409	—	-227	—	-38	—	184	—	540	—	947	—	2066	—	3412	—	—	—	—	—	—	—	—	3460
PHC13	圧縮	-794	—	-1009	—	-1231	—	-1459	—	-1933	—	-2451	—	-3243	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-4083
	引張	-427	—	-229	—	-31	—	181	—	921	—	1722	—	3997	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6637
PHC03	圧縮	-903	-1149	-1163	-1379	-1239	-1450	-1526	-1788	-1877	-2190	-2472	-2783	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-2957
	引張	-830	-509	-770	-312	-652	-217	-99	138.5	269	657	1122	1650	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2083
PHC04	圧縮	-896	-1188	-1136	-1440	-1303	-1569	-1711	-1931	-2100	-2309	-2773	-2899	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3247
	引張	-776	-535	-596	-400	-570	-362	-245	-83.8	60	578	800	1601	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1333
PHC05	圧縮	-948	-1070	-1194	-1365	-1388	-1520	-1767	-1939	-2149	-2182	-2789	-2690	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3125
	引張	-648	-617	-460	-405	-408	-334	-87	34.67	345	378	985	1670	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1229
PHC06	圧縮	-907	-1096	-1149	-1333	-1229	-1425	-1555	-1784	-1912	-2196	-2446	-2737	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3177
	引張	-747	-516	-522	-313	-442	-212	-115	163	341	717.2	1001	1650	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1756
PHC17	圧縮	-438	—	-650	—	-880	—	-1035	—	-1303	—	-1615	—	-2175	—	-2630	—	-3688	—	—	—	—	—	—	-4933
	引張	2	—	363	—	827	—	1432	—	2083	—	2878	—	4772	—	6810	—	11152	—	—	—	—	—	—	13147
PHC11	圧縮	-400	-433	-644	-630	-758	-740	-1099	-1046	-1358	-1259	-1823	-1615	-2372	-2138	-2959	-2530	-4096	-3101	—	—	—	—	—	-5715
	引張	6	51	231	276	351	619	1010	1469	1766	2350	3285	3946	5876	5235	8225	7311	14321	13239	—	—	—	—	—	19638
PHC16	圧縮	-439	—	-615	—	-889	—	-1077	—	-1509	—	-1859	—	-2525	—	-3166	—	—	—	—	—	—	—	—	-3727
	引張	-53	—	165	—	305	—	877	—	1792	—	2908	—	5308	—	7874	—	—	—	—	—	—	—	—	10360
PHC10	圧縮	-629	-662	-829	-841	-924	-936	-1289	-1347	-1592	-1687	-2021	-2086	-2697	-2704	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3036
	引張	-216	-249	-16	13	63	91	644	519	1514	1193	2726	2274	5036	4309	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6258
PHC15	圧縮	-867	—	-1060	—	-1240	—	-1438	—	-1960	—	-2436	—	-3274	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3687
	引張	-480	—	-287	—	-33	—	182	—	621	—	1064	—	2393	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3273
PHC09	圧縮	-1004	-955	-1254	-1232	-1335	-1299	-1684	-1637	-2034	-2027	-2679	-2604	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-2934
	引張	-577	-542	-427	-365	-362	-299	-30	-10	420	480	1148	1423	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1520
PHC01	圧縮	-1483	-1691	-1718	-1945	-1969	-2183	-2228	-2442	-2724	-2905	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-3436
	引張	-1196	-983	-984	-779	-758	-583	-538	-372	-100	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	310
PHC02	圧縮	-413	-527	-563	-713	-640	-770	-640	-853	-698	-1045	-793	-1238	-933	-1405	-227	-1403	-447	-1292	—	—	—	—	—	6180
	引張	53	233	437	953	1080	1910	2147	2760	3488	3702	4633	5028	7373	7928	10667	11943	17220	19615	—	—	—	—	—	24860



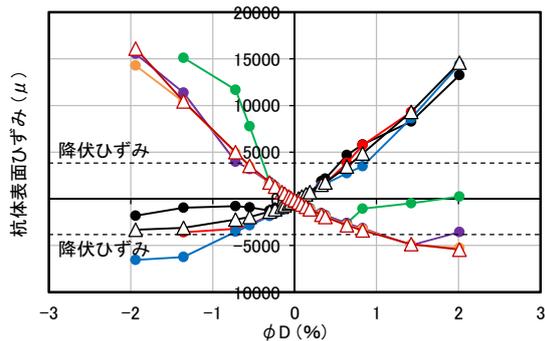
(a) SC16



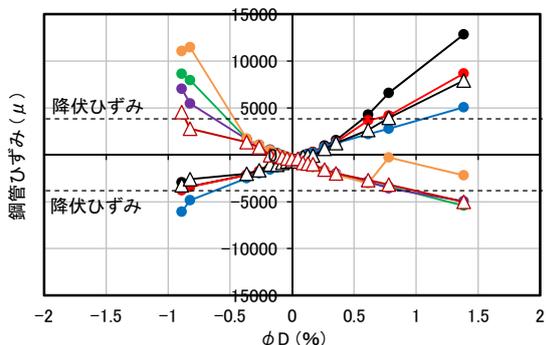
(b) SC17



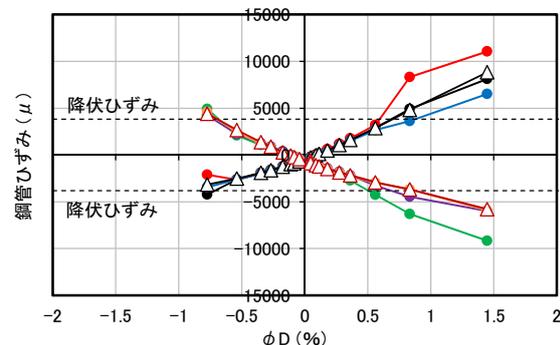
(c) SC10



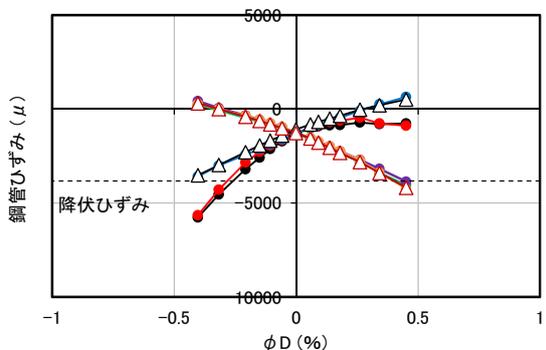
(d) SC11



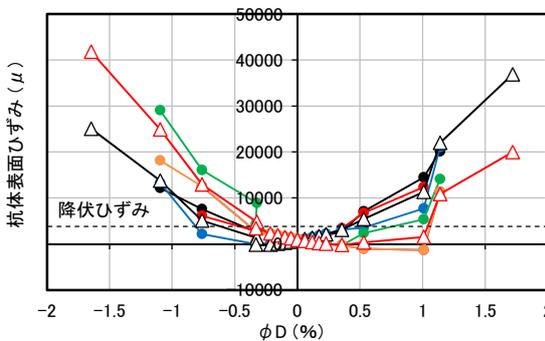
(e) SC12



(f) SC13



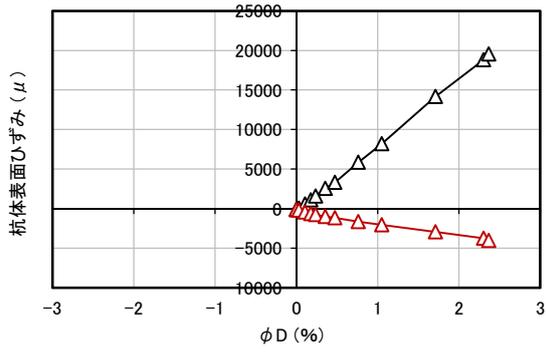
(g) SC14



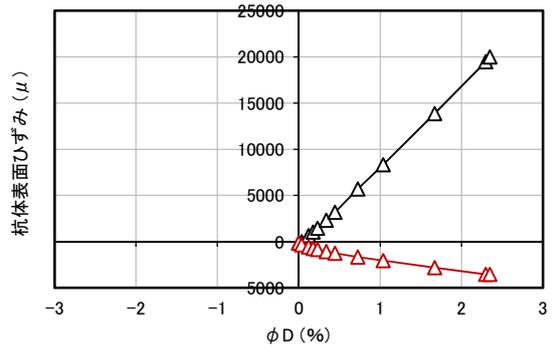
(h) SC15

● CA1 ● CB1 ● CC1 ● CA5 ● CB5 ● CC5 △ 変位計

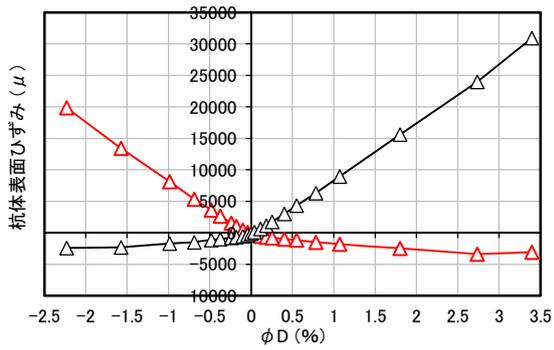
図 2.4.14 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (SC 杭)



(a) PRC22



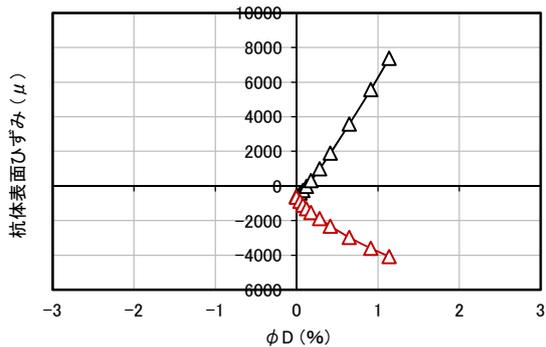
(b) PRC23



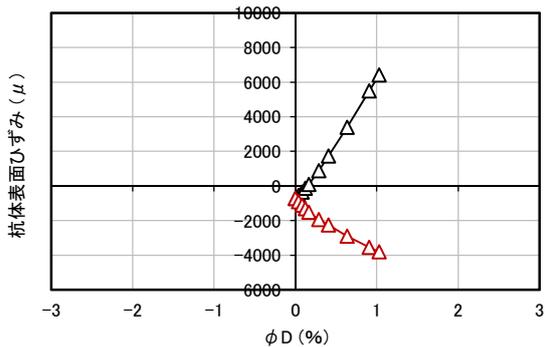
(c) PRC17

△変位計 (杭体上側) ▽変位計 (杭体下側)

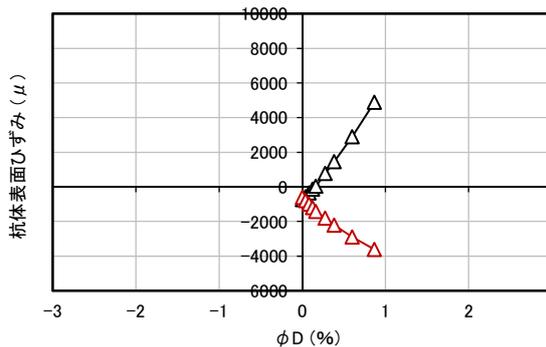
図 2.4.15 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (PRC 杭 I 種) (次項に続く)



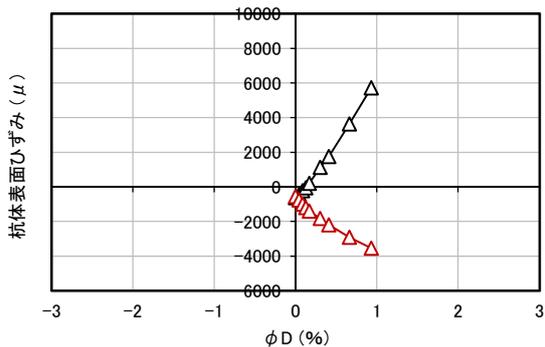
(d) PRC18



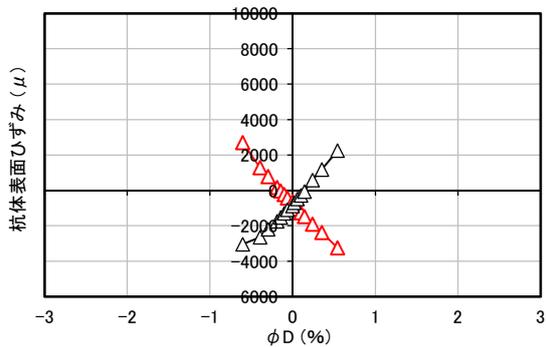
(e) PRC19



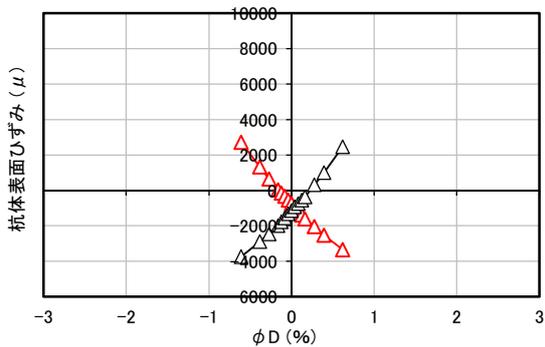
(f) PRC20



(g) PRC21



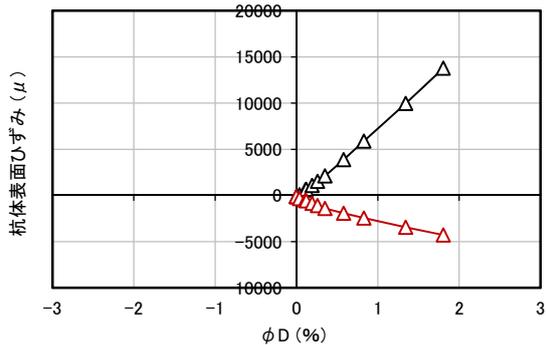
(h) PRC15



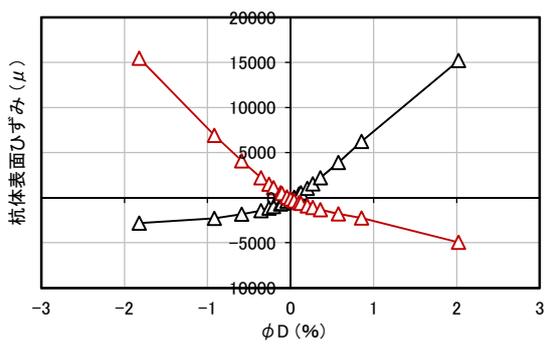
(i) PRC16

△変位計 (杭体上側) ▽変位計 (杭体下側)

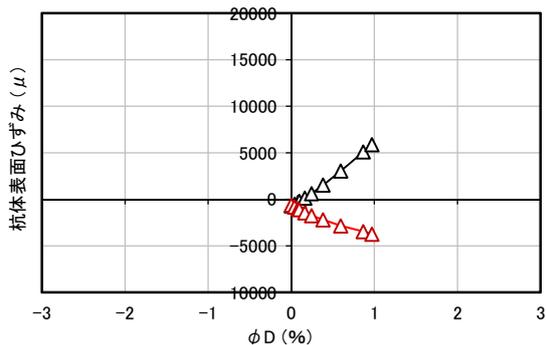
図 2.4.15 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (PRC 杭 I 種)



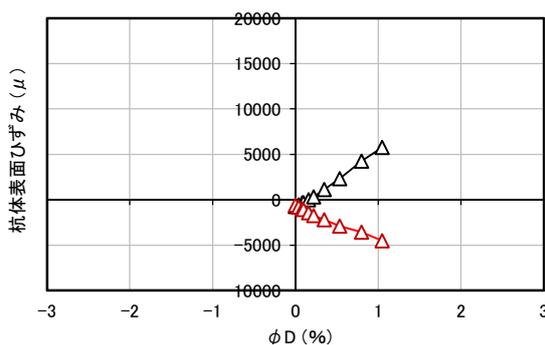
(a) PRC11



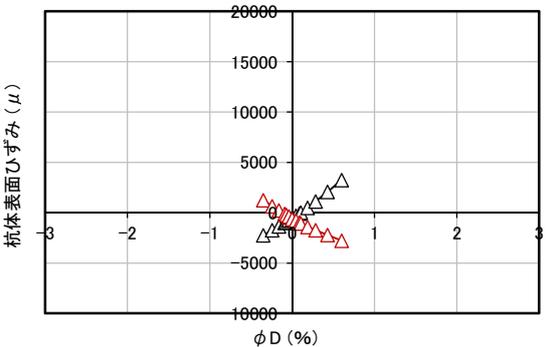
(b) PRC14



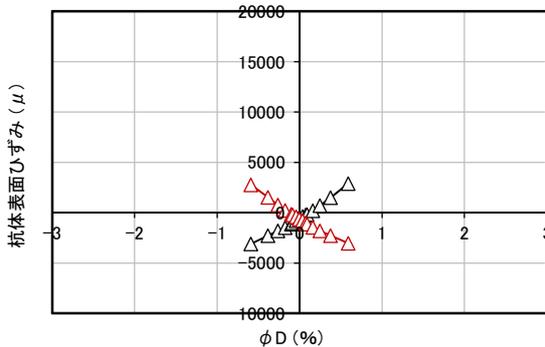
(c) PRC09



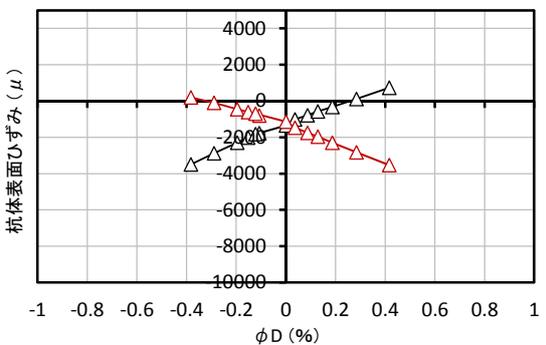
(d) PRC10



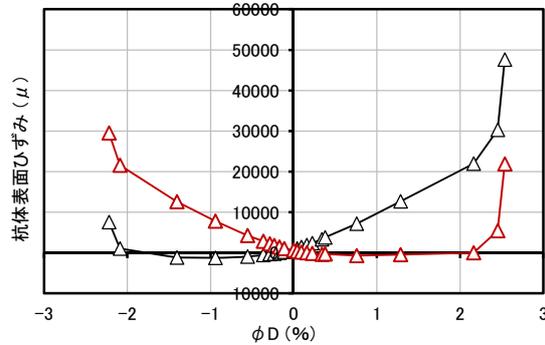
(e) PRC12



(f) PRC13



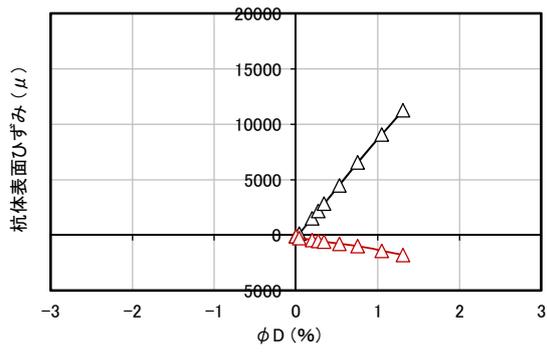
(g) PRC07



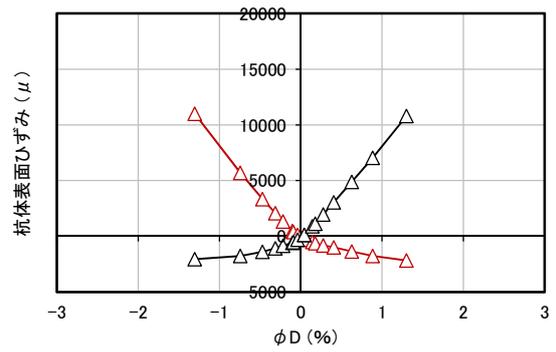
(h) PRC08

△変位計 (杭体上側) ▽変位計 (杭体下側)

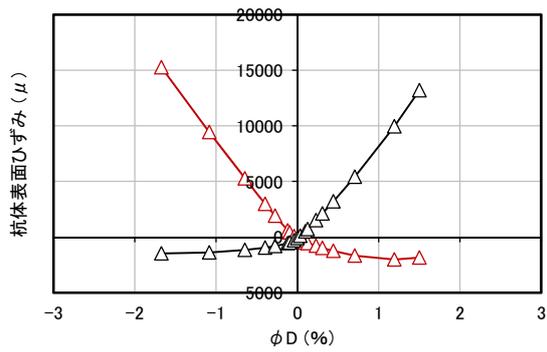
図 2.4.16 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (PRC 杭 Ⅲ種)



(a) PHC14



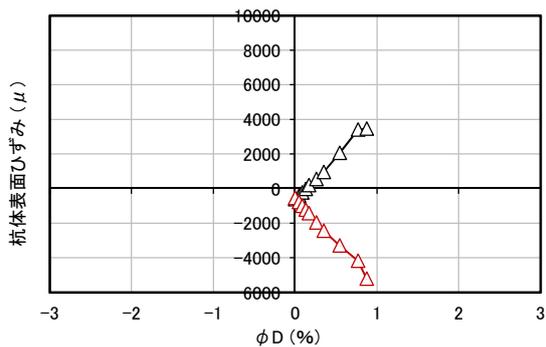
(b) PHC07



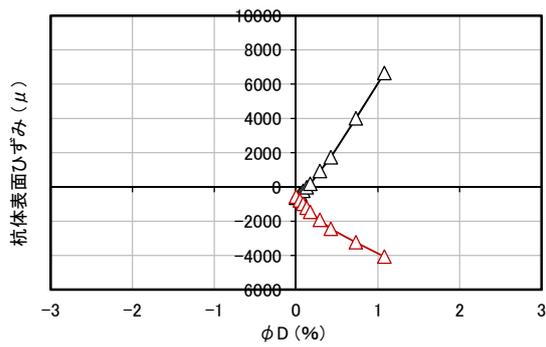
(c) PHC08

△変位計 (杭体上側) ▽変位計 (杭体下側)

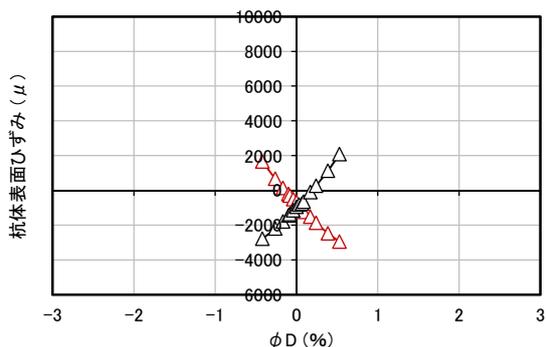
図 2.4.17 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (PHC 杭 A 種) (次項に続く)



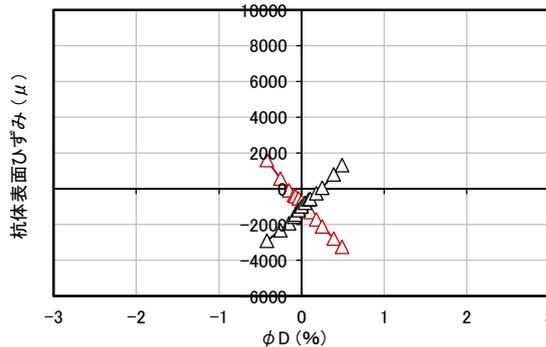
(d) PHC12



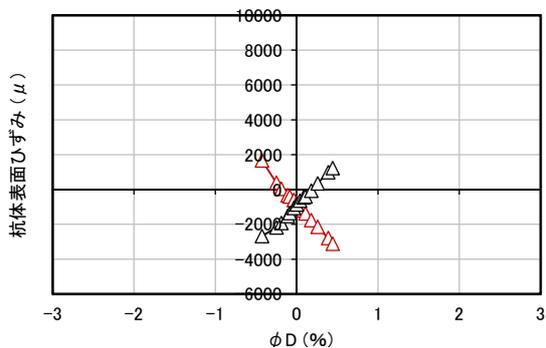
(e) PHC13



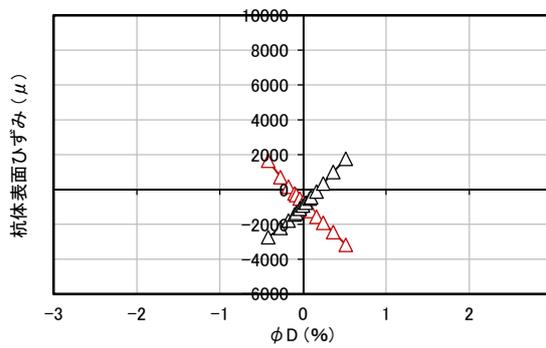
(f) PHC03



(g) PHC04



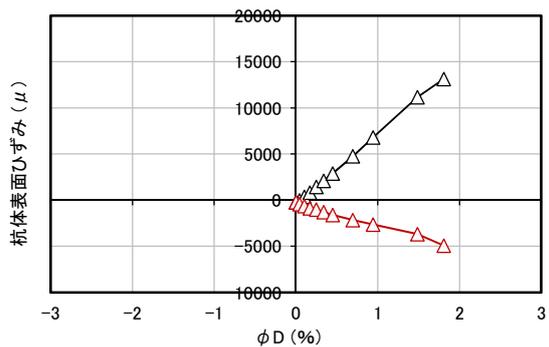
(h) PHC05



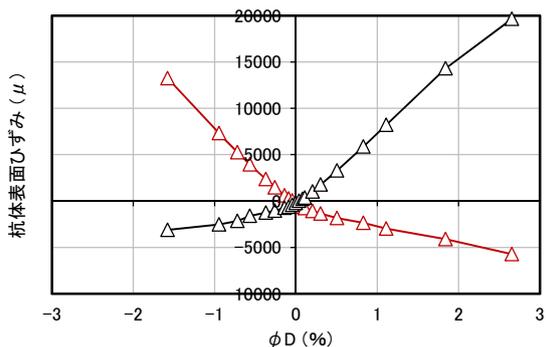
(i) PHC06

△変位計 (杭体上側) ▽変位計 (杭体下側)

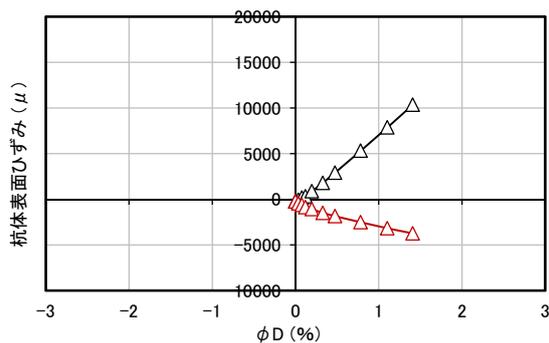
図 2.4.17 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (PHC 杭 A 種)



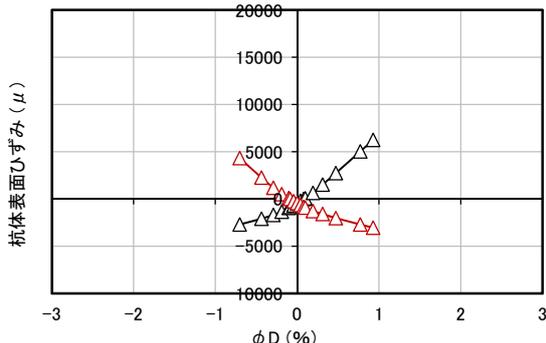
(a) PHC17



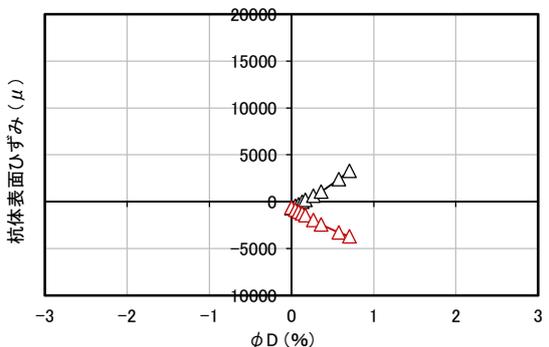
(b) PHC11



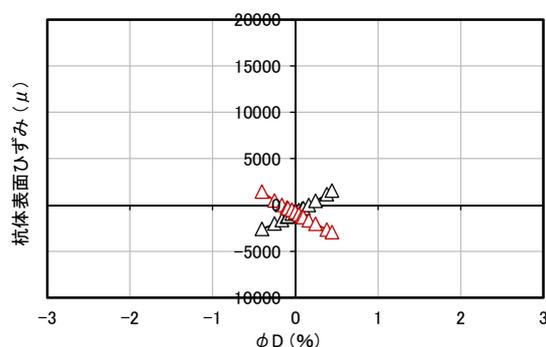
(c) PHC16



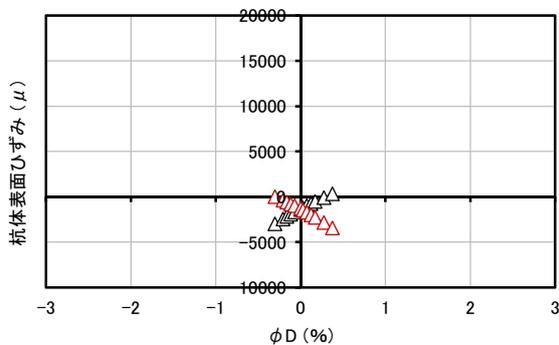
(d) PHC10



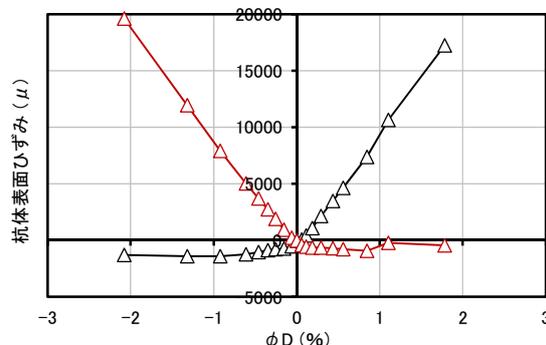
(e) PHC15



(f) PHC09



(g) PHC01



(h) PHC02

△変位計 (杭体上側) ▽変位計 (杭体下側)

図 2.4.18 杭体の圧縮および引張外縁ひずみ (PHC 杭 C 種)

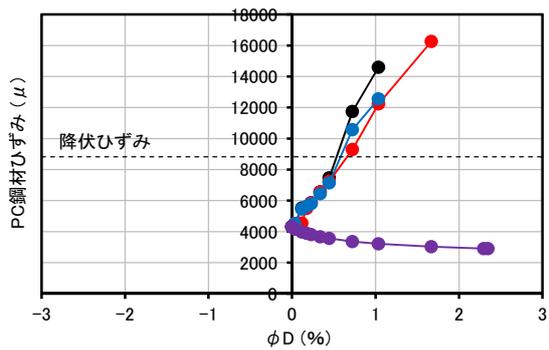
(2) PC鋼材・異形鉄筋のひずみ

以下に PRC 杭および PHC 杭内部の PC 鋼材，異形鉄筋のひずみの進展挙動を示す。値は荷重サイクル 1 周目ピーク時のものである。

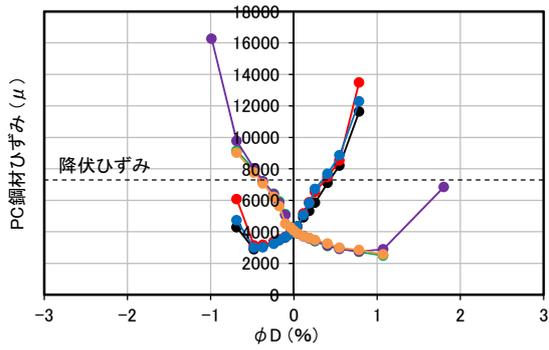
2.4.5 項に示したように，本研究では荷重以前の初期ひずみは計算値を用いているが，これに荷重による増加分を加えたひずみ値を見ても，各試験体とも降伏ひずみ付近で値（絶対値）が急激に大きくなっていることが確認できる。このことから，初期ひずみの計算値は実際のひずみとおおよそ一致しており，計算値を用いても鋼材の降伏を判断できていると考えられる。

同一の鋼材に貼付した 3 枚のひずみゲージの値は，鋼材が弾性範囲にある場合はほぼ同様の推移を示している。値が降伏ひずみに達するとひずみの増加率は変化し，3 つの計測値はそれぞれ別々に推移する。例えば，PHC17 の PC 鋼材のひずみ（図 2.4.24 (a)）を見ると，P1, P2, P3 が降伏ひずみに達した後に，P3 と比較して P1 および P2 のひずみは大きな値を示している。このように，鋼材の降伏後はひずみが局所的に進行し，他の部分のひずみの進行が鈍くなるような場合もみられた。

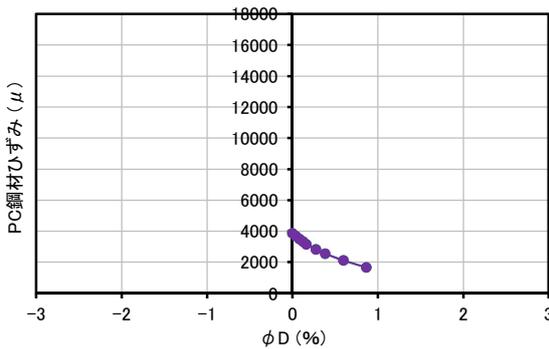
弾性範囲内では，圧縮縁および引張縁に位置する鋼材のひずみはそれぞれ圧縮方向，引張方向に単調に進行するが，降伏ひずみに到達してからは必ずしも同じ方向に進行しない場合がある。例えば，PRC17 の PC 鋼材のひずみ（図 2.4.19 (b)）を見ると，P1, P2, P3 の値は正側で降伏ひずみに達した後に負側では前サイクルピーク時よりも大きな値を示している。これは，正側荷重で鋼材が引張降伏した際に塑性ひずみが発生するためである。同様に P5 のひずみ値は負側荷重で降伏ひずみに達した後に，正側では前サイクルピーク時よりも大きなひずみ値を示している。



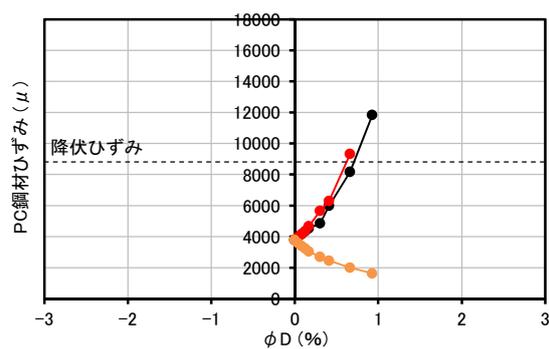
(a) PRC23



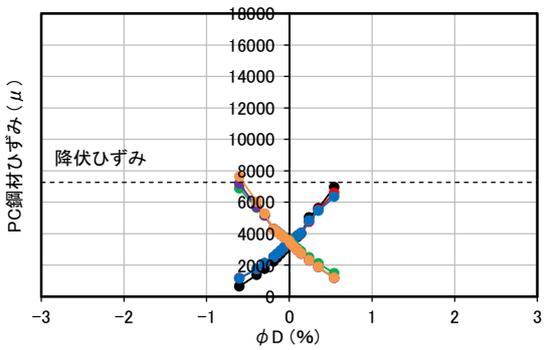
(b) PRC17



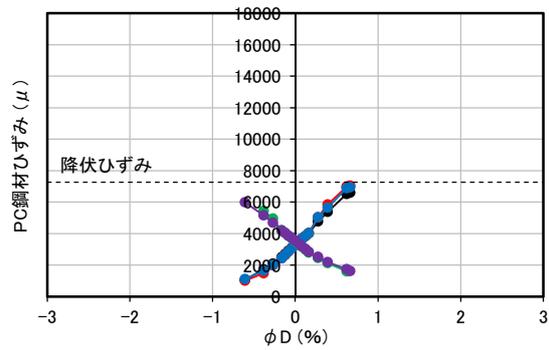
(c) PRC20



(d) PRC21



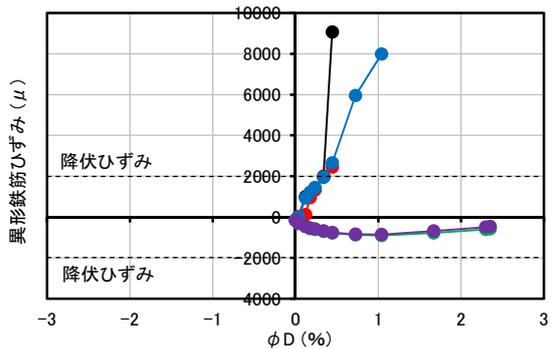
(e) PRC15



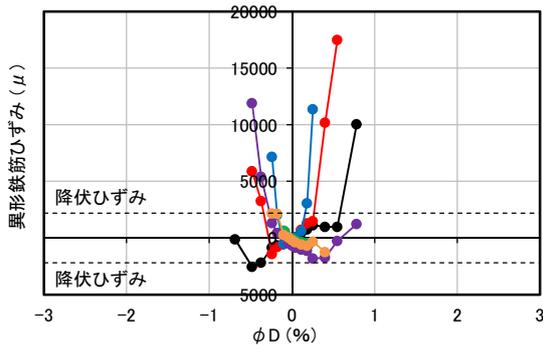
(f) PRC16

● P1 ● P2 ● P3 ● P4 ● P5 ● P6

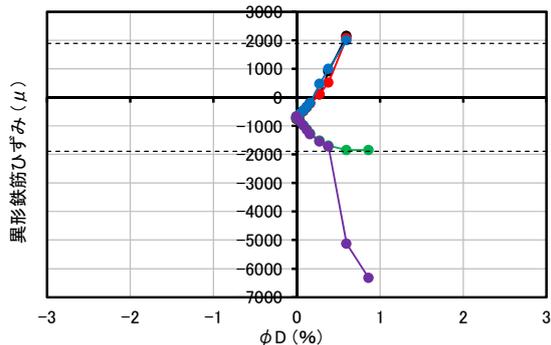
図 2.4.19 PC 鋼材のひずみ (PRC 杭 I 種)



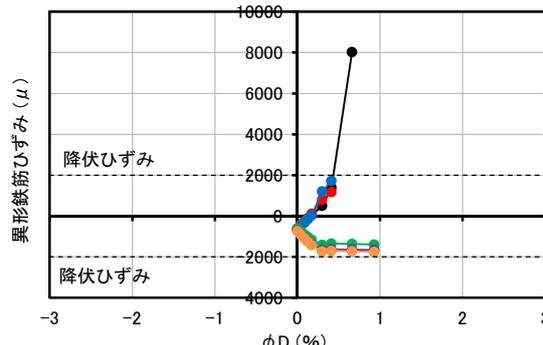
(a) PRC23



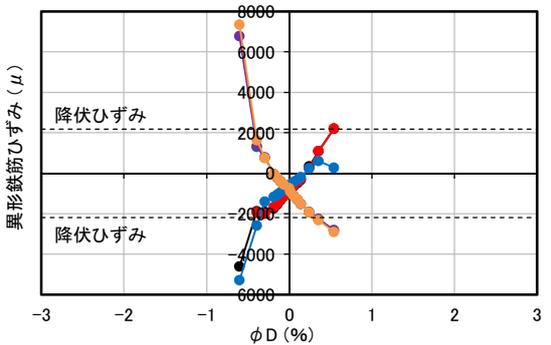
(b) PRC17



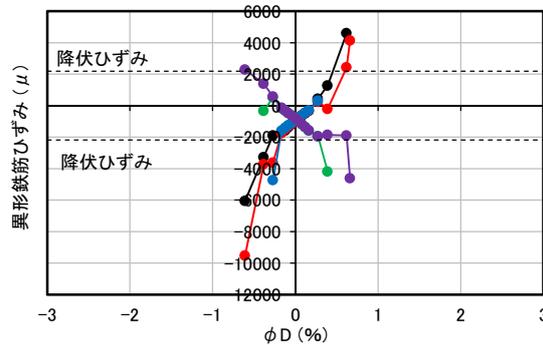
(c) PRC20



(d) PRC21



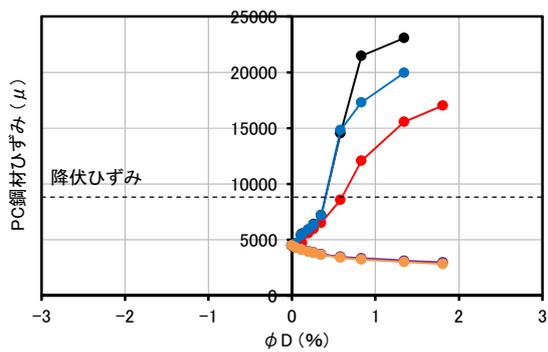
(e) PRC15



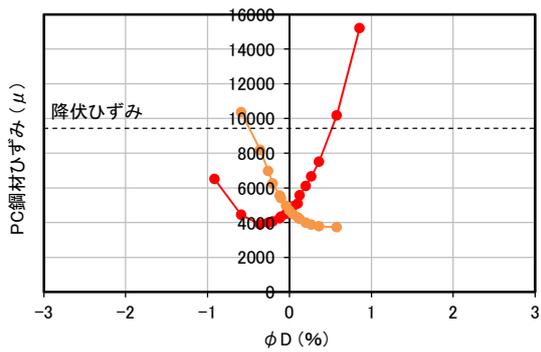
(f) PRC16

● R1 ● R2 ● R3 ● R4 ● R5 ● R6

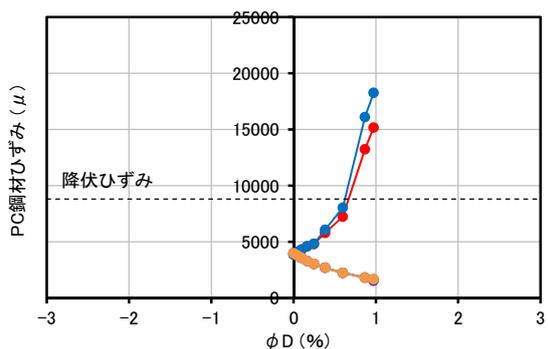
図 2.4.20 異形鉄筋のひずみ (PRC 杭 I 種)



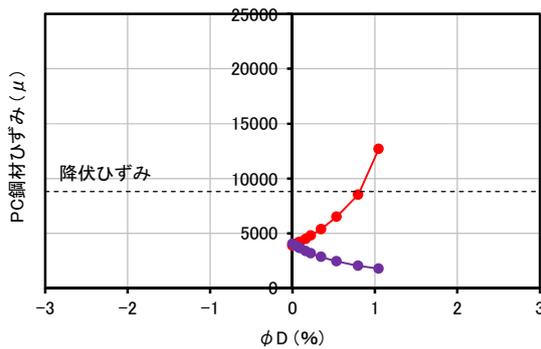
(a) PRC11



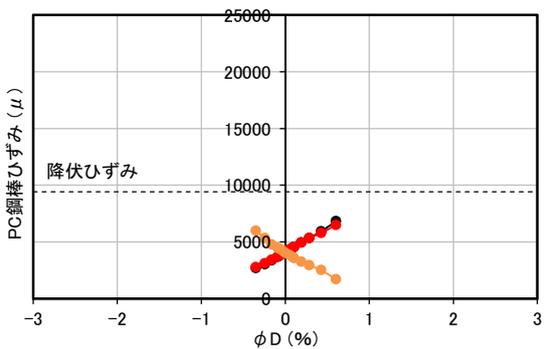
(b) PRC14



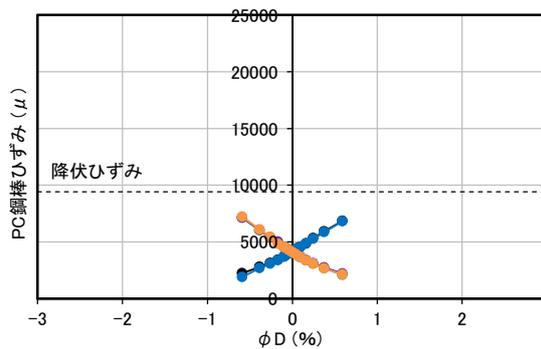
(c) PRC09



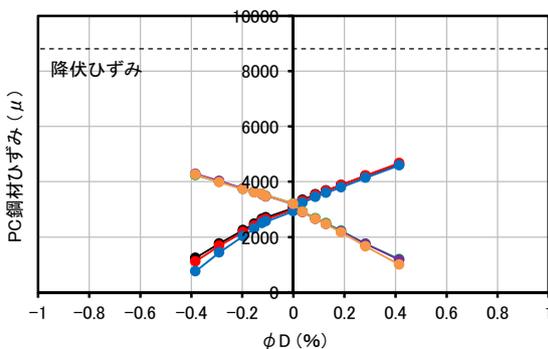
(d) PRC10



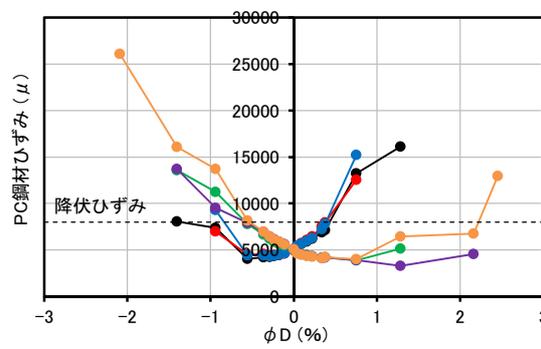
(e) PRC12



(f) PRC13



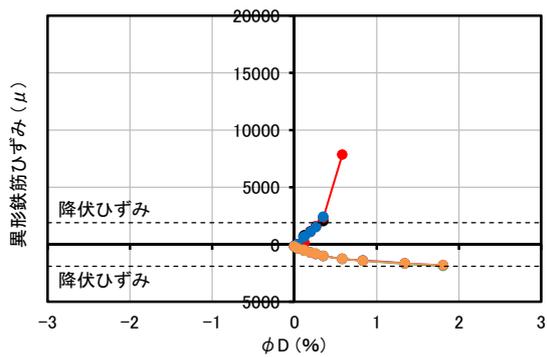
(g) PRC07



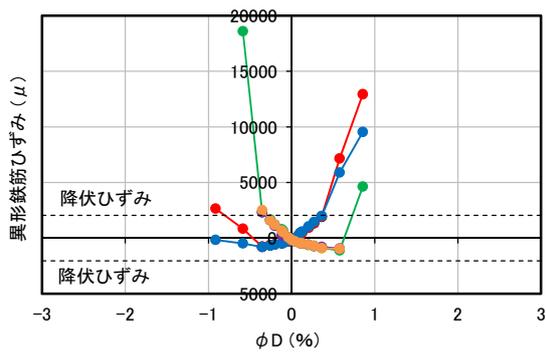
(h) PRC08

● P1 ● P2 ● P3 ● P4 ● P5 ● P6

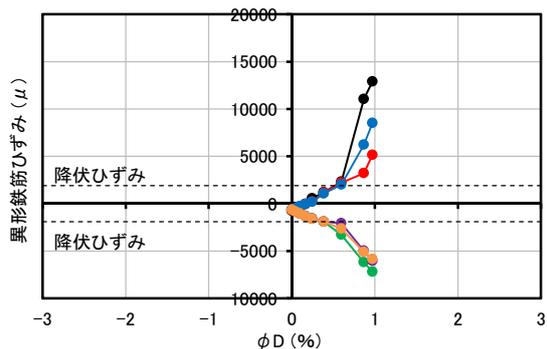
図 2.4.21 PC 鋼材のひずみ (PRC 杭 Ⅲ種)



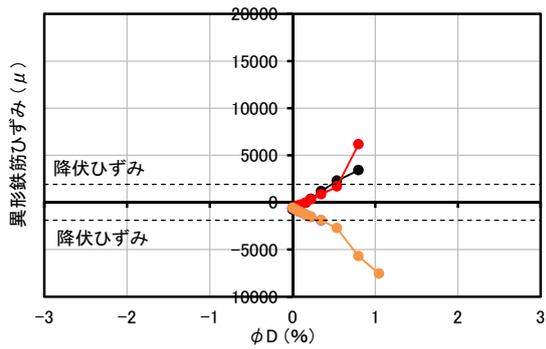
(a) PRC11



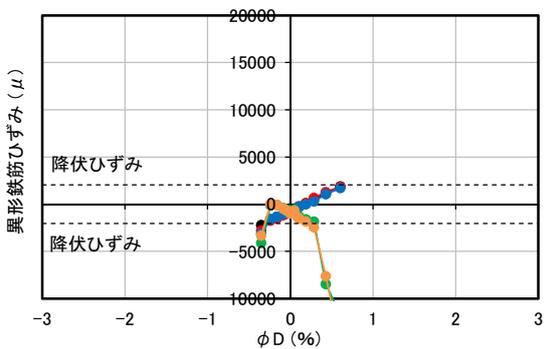
(b) PRC14



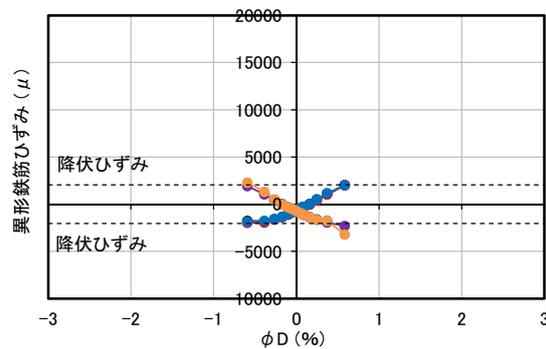
(c) PRC09



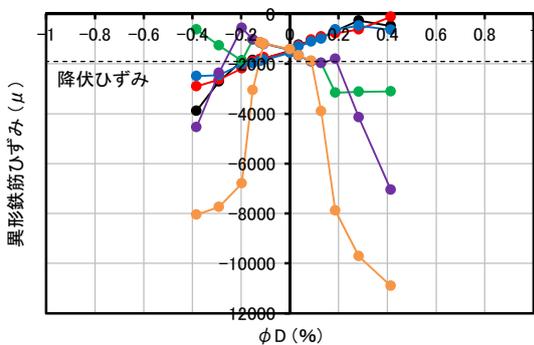
(d) PRC10



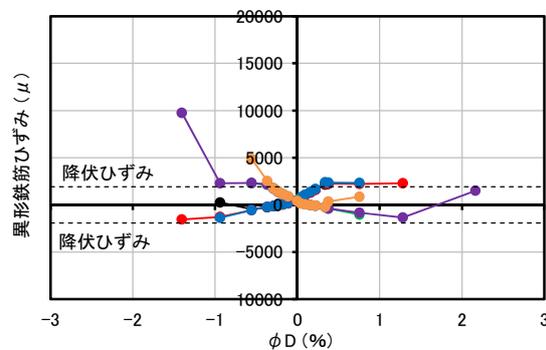
(e) PRC12



(f) PRC13



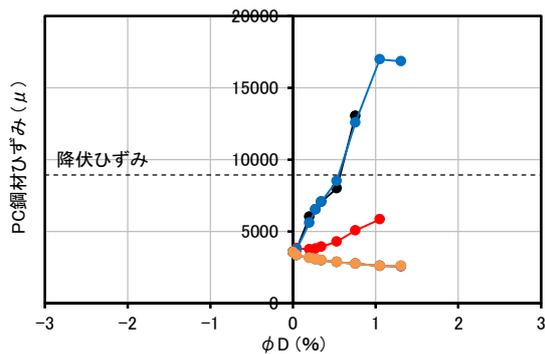
(g) PRC07



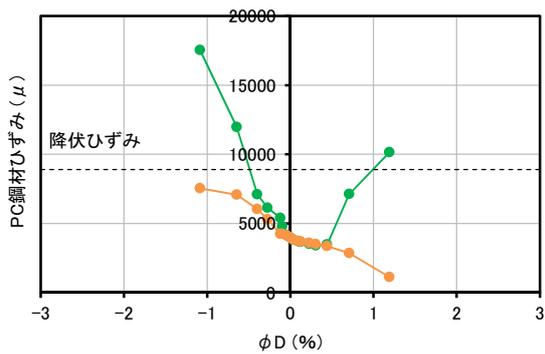
(h) PRC08

● R1 ● R2 ● R3 ● R4 ● R5 ● R6

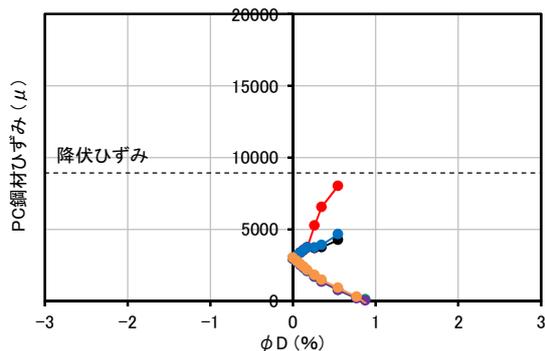
図 2.4.22 異形鉄筋のひずみ (PRC 杭 Ⅲ種)



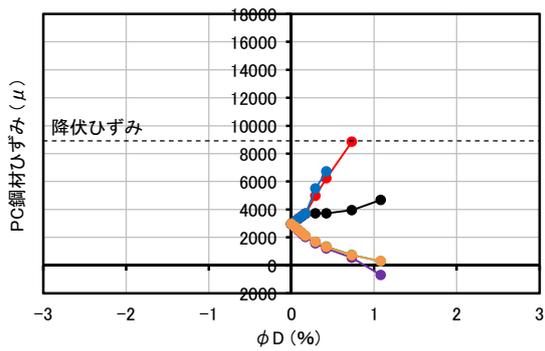
(a) PHC14



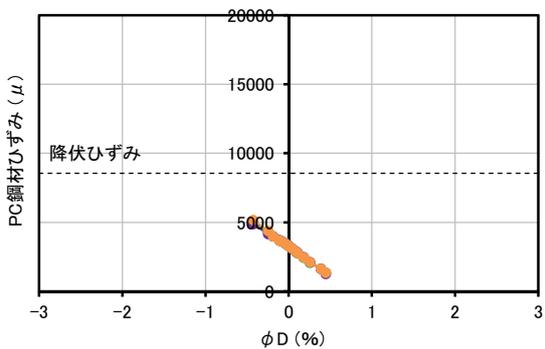
(b) PHC08



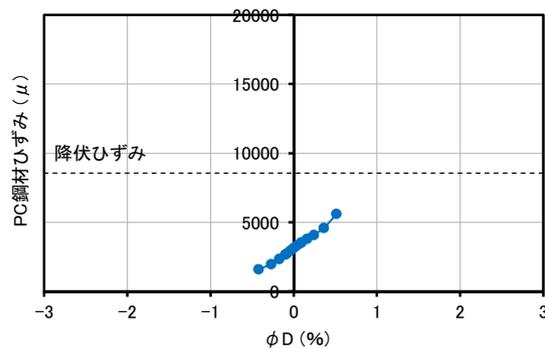
(c) PHC12



(d) PHC13



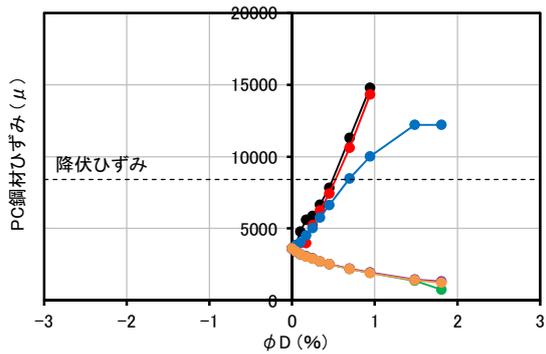
(e) PHC05



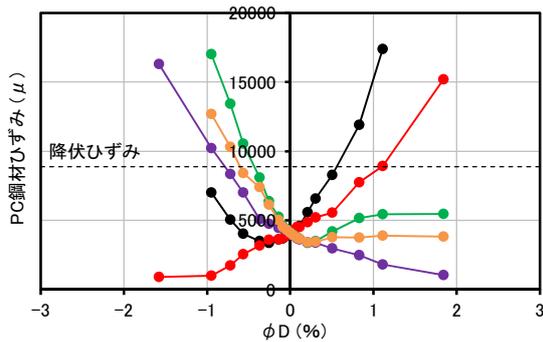
(f) PHC06

● P1 ● P2 ● P3 ● P4 ● P5 ● P6

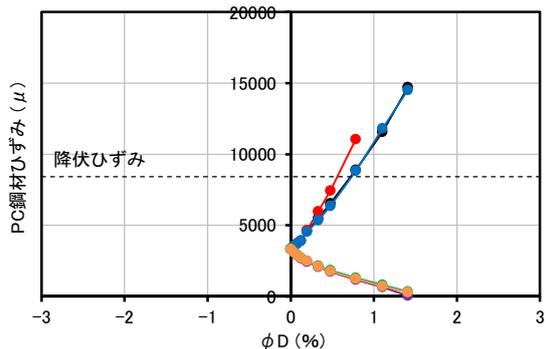
図 2.4.23 PC 鋼材のひずみ (PHC 杭 A 種)



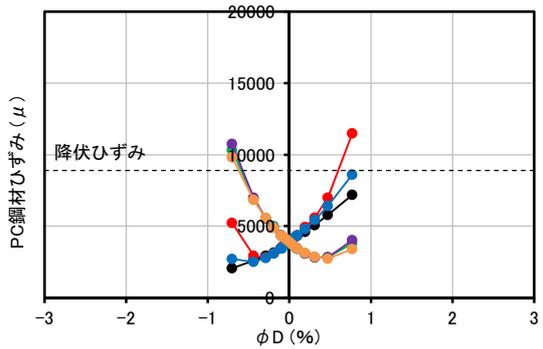
(a) PHC17



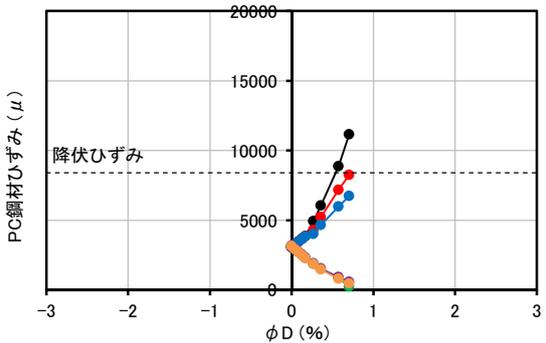
(b) PHC11



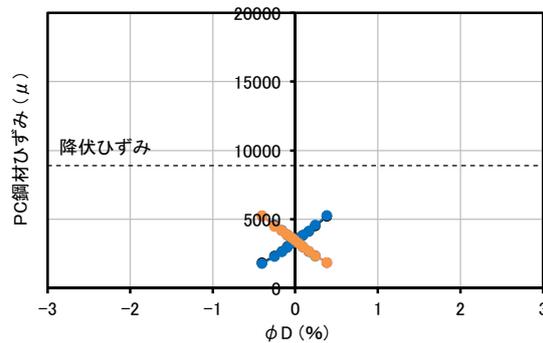
(c) PHC16



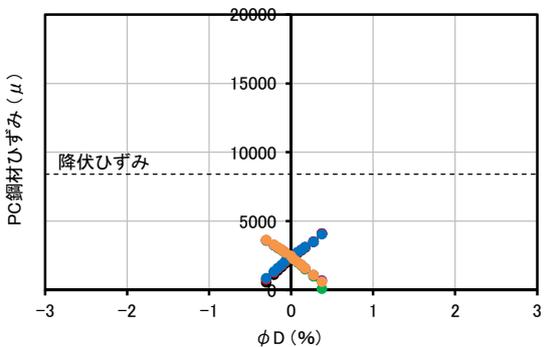
(d) PHC10



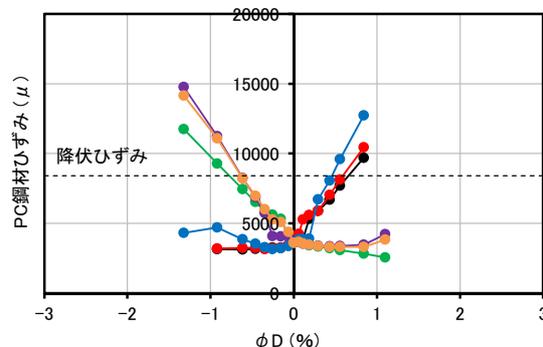
(e) PHC15



(f) PHC09



(g) PHC01



(h) PHC02

●—P1 ●—P2 ●—P3 ●—P4 ●—P5 ●—P6

図 2.4.24 PC 鋼材のひずみ (PHC 杭 C 種)

2.4.7 軸方向変形

図 2.4.25 から図 2.4.29 に杭体の曲率と軸方向ひずみの関係を示す。軸方向ひずみは軸方向変位計 H2, H4 計測値を平均して求めた。軸力導入によって生じたひずみは無視し、荷重サイクル開始後の増分値のみを示した。表 2.4.15 には各試験体の残留軸方向ひずみの値を示した。値は荷重サイクル 2 週目終了後に $\phi=0$ となった時点での断面中心位置でのひずみである。図 2.4.25 から図 2.4.29 と同様に軸力導入後の増分値を示した。一方向荷重の試験体は残留変形が発生し、 $\phi D=0$ まで変形が戻ることがないため、表からは除いた。また、図 2.4.30 は杭体の残留軸方向ひずみを杭種ごとに示したものである。一部の試験体は軸方向ひずみの値が大きいため、別図に示した。

表 2.4.15 残留軸方向ひずみ

	残留軸方向ひずみ (μ)										
	1/800	1/400	1/267	1/200	1/133	1/100	1/67	1/50	1/33	1/25	1/20
SC17	-17	-33	-33	-33	-25	525	592	2242	5575	8600	11583
SC10	-4	-13	-17	-17	13	38	217	563	1325	2713	—
SC11	-13	-29	-46	-88	-129	-129	46	1104	1871	—	—
SC12	-42	-46	-13	-63	-96	-133	-13	13	—	—	—
SC13	-17	-17	-13	-21	-29	-54	4	—	—	—	—
SC14	-75	-121	-175	-250	-450	-729	—	—	—	—	—
SC15	146	171	225	350	1288	3767	12983	24504	42621	—	—
PRC17	8	17	58	92	200	317	517	3508	4000	7575	—
PRC15	0	-25	-58	-75	-158	-225	—	—	—	—	—
PRC16	-29	-67	-108	-142	-221	-288	-379	—	—	—	—
PRC14	0	-33	-67	-83	-58	-25	142	1008	—	—	—
PRC12	0	-50	-83	-167	-233	-367	—	—	—	—	—
PRC13	-20	-45	-54	-81	-115	-155	—	—	—	—	—
PRC07	-37	-62	-104	-167	-329	—	—	—	—	—	—
PRC08	-4	33	25	83	213	500	2646	6850	14021	23250	—
PHC07	0	-50	-50	-50	-25	50	383	—	—	—	—
PHC08	-33	-33	-33	8	25	92	358	1683	—	—	—
PHC03	-58	-75	-67	-92	-150	-217	—	—	—	—	—
PHC04	-33	-117	-158	-225	-300	-425	—	—	—	—	—
PHC05	-25	-75	-100	-150	-158	-200	—	—	—	—	—
PHC06	-42	-63	-63	-100	-142	-217	—	—	—	—	—
PHC11	0	0	-25	-58	-100	-42	-25	133	1975	—	—
PHC10	8	-17	-75	-100	-108	-100	-67	—	—	—	—
PHC09	-17	-92	-100	-133	-192	-258	—	—	—	—	—
PHC01	-17	-42	-83	-133	-233	—	—	—	—	—	—
PHC02	33	58	83	192	275	508	1767	3875	8983	—	—

(1) SC杭

SC15, SC16, SC17, SC10, SC11では荷重の進行に伴って引張方向の残留ひずみが発生した。これらは鋼管の引張降伏が先行した試験体であり、降伏後の鋼管の塑性ひずみが主な残留軸方向ひずみの原因であると考えられる。SC16の軸方向ひずみはSC17のものと比較して小さい。杭体の一方のみで鋼管が引張降伏したこと、正側荷重のみで荷重回数が少ないことが原因だと思われる。SC15は前述のように荷重が進行すると全断面引張の状態になり、 $R=3\%$ の荷重で4%を超える大きな軸方向変形が生じた。SC12, SC13では軸方向の変形はほとんど見られなかった。SC14では荷重によって圧縮方向の軸方向ひずみが進行した。鋼管の圧縮降伏以前からひずみは進行しており、コンクリートの残留ひずみも軸方向の変形に影響を与えていると考えられる。

(2) PRC杭

i) I種

PRC17では、荷重が進行するにつれて引張方向の残留軸方向ひずみが生じた。この値はIII種の場合（PRC14）と比較して大きい。2.4.4項で述べたように、PRC14がコンクリートの圧壊によって破壊したのに対して、PRC17はPC鋼材の破断が先行した。異形鉄筋量の少ないI種は中立軸位置が浅く、引張縁のひずみが大きくなったのに加えて、発生した引張方向のひずみが残留軸方向ひずみとして蓄積したことで、より引張側のひずみが早期に進行することになったと思われる。

PRC15とPRC16では、荷重の進行に伴って圧縮方向に軸方向ひずみが進行していることが分かる。モーメント-曲率関係に明確な差は見られないが、PRC15と比較してPRC16の方が残留軸方向ひずみの値はやや大きい。一方向荷重の試験体では、残留変形が生じるため明確な残留軸方向ひずみの発生状況は分からないが、PRC21を除けば圧縮方向のひずみはほとんど見られない。PRC21については小変形時に圧縮側にひずみが進行しているが、PRC20と耐力や変形性能に明確な差は見られない。

ii) III種

PRC08では荷重によって大きな引張方向の軸方向ひずみが生じた。SC杭の場合と同様に、鋼材が引張降伏し、その塑性ひずみによって発生した変形であると考えられる。PRC11, PRC14では鋼材が引張降伏したものの、 $R=1.5\%$ までは顕著な残留軸方向変形が生じなかった。PRC14で正側圧壊後に残留変形が急増しているものの、それ以前は荷重方式による差はあまり見られない。PRC12, PRC13, PRC09, PRC10では荷重方式によって差が見られた。PRC12, PRC13では荷重に伴って徐々に圧縮方向の軸方向変形が進行した。PRC09, PRC10では微小な圧縮方向ひずみが見られるが、PRC09では荷重が進行するにつれて残留変形が引張側に移行した。PRC07では荷重によって比較的大きな圧縮方向変形が生じた。

(3) PHC 杭

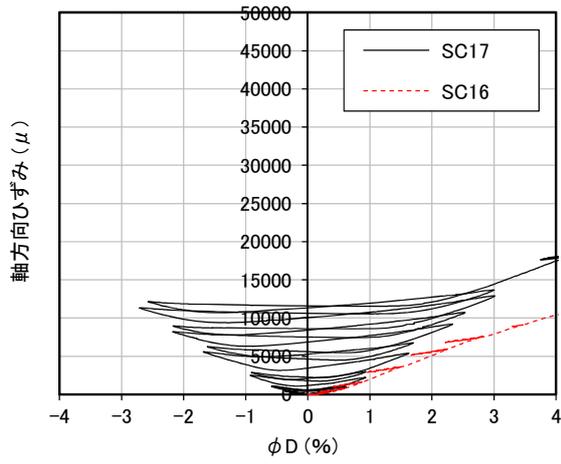
i) A 種

PHC07, PHC08 では、 $R=1.5\%$ の荷重からやや大きな引張方向の残留軸方向ひずみが見られた。PHC11 では $R=2\%$ 以降に引張方向の残留軸方向ひずみが発生しているが、A 種では C 種と比較して早期に引張方向の軸方向ひずみが生じたことになる。2.4.4 項で述べたように、PHC 杭の無軸力試験体は A 種では PC 鋼材の破断、C 種ではコンクリートの圧壊により破壊したが、引張側ひずみの進展の違いが軸方向ひずみにもあらわれている。

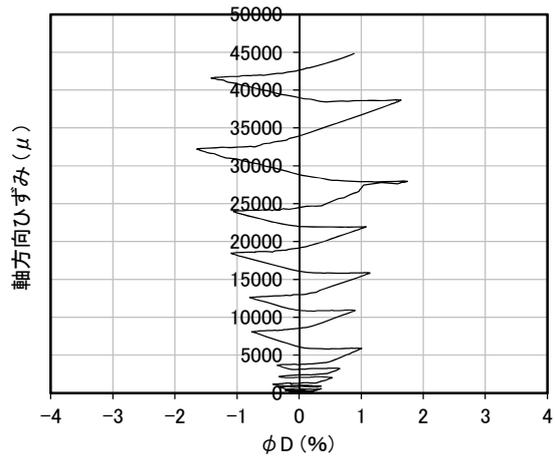
軸力 2000kN の試験体では荷重の進行に伴って圧縮方向の軸方向ひずみが発生した。残留軸方向ひずみの値はほとんどの試験体で C 種（PHC09）と同程度であるが、PHC04 では比較的大きな圧縮方向のひずみが発生した。ただし、耐力や変形性能に他試験体との差は見られなかった。

ii) C 種

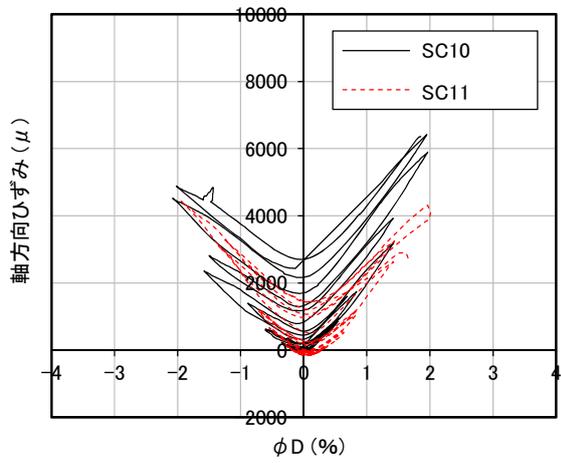
作用軸力による軸方向ひずみの発生状況の違いは PRC 杭 III 種と同様の傾向を示したが、生じた残留ひずみは比較的小さな値となった。PHC16, PHC10 では荷重方式による違いは小さいが、PHC15, PHC09 では正負交番荷重の試験体で比較的大きな圧縮側の残留軸方向ひずみが発生した。PHC09 と PHC01 では作用軸力が変化しても残留軸方向ひずみの値に顕著な差は見られなかった。



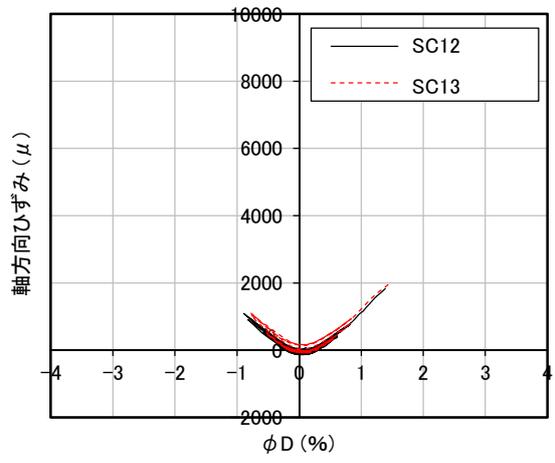
(a) SC16, SC17



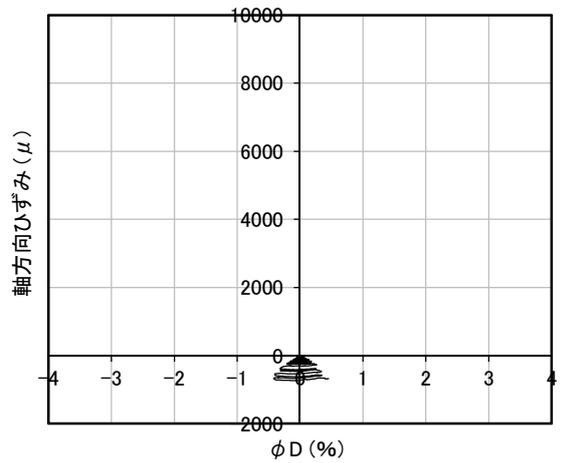
(b) SC15



(c) SC10, SC11

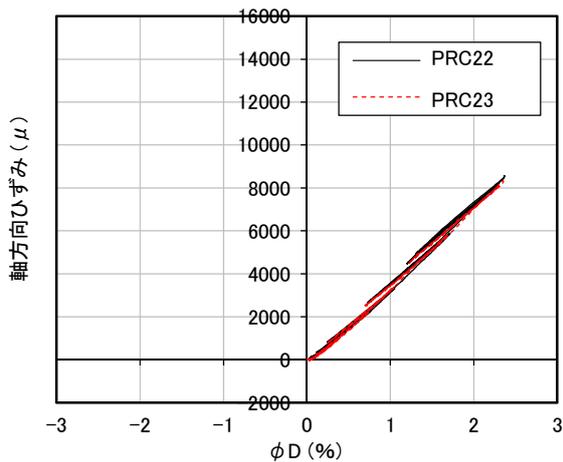


(d) SC12, SC13

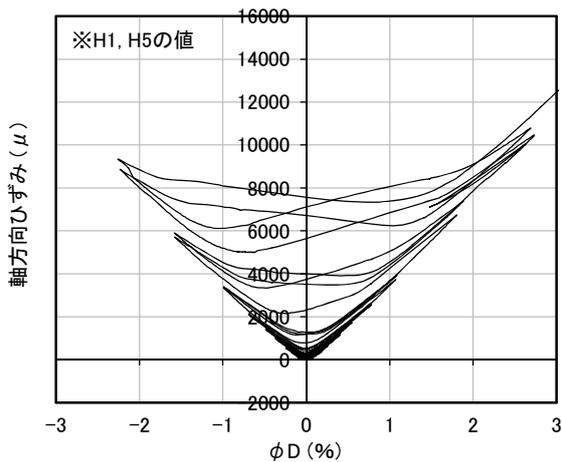


(e) SC14

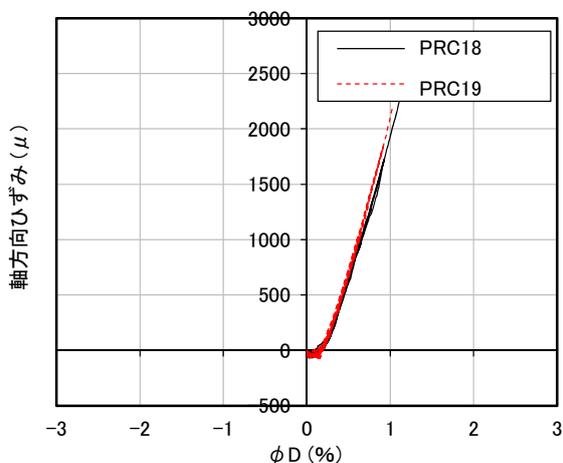
図 2.4.25 軸方向ひずみと曲率の関係 (SC 杭)



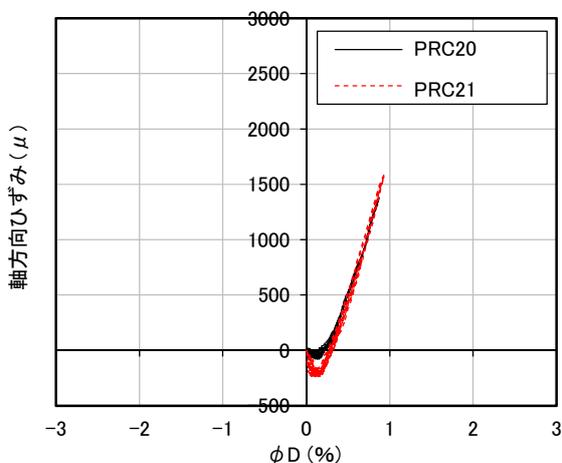
(a) PRC22, PRC23



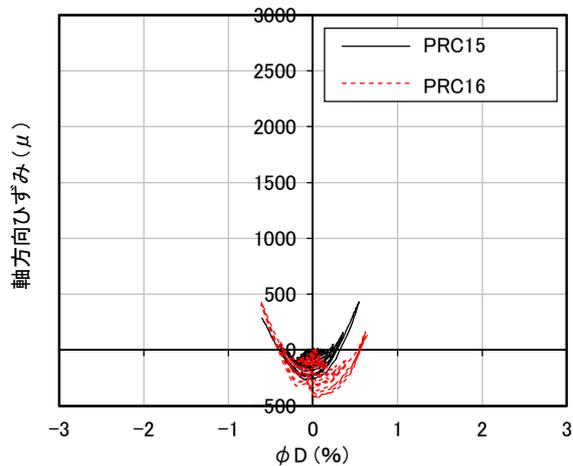
(b) PRC17



(c) PRC18, PRC19

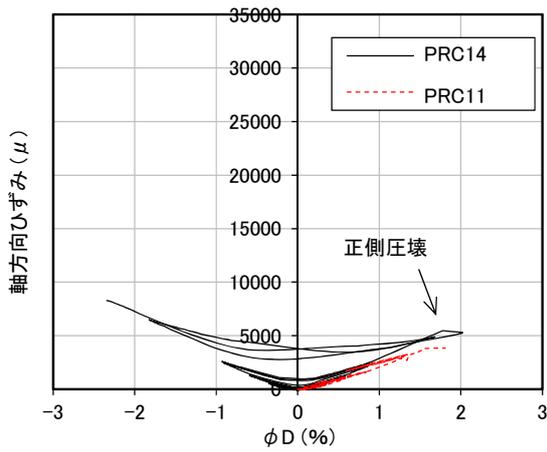


(d) PRC20, PRC21

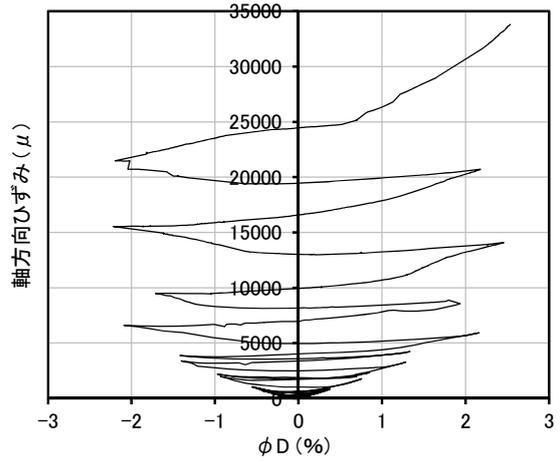


(e) PRC15, PRC16

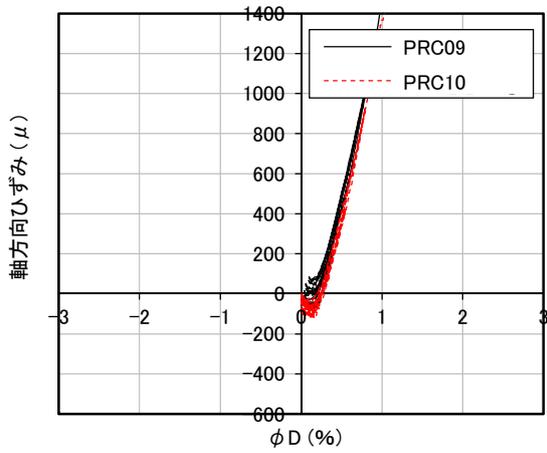
図 2.4.26 軸方向ひずみと曲率の関係 (PRC 杭 I 種)



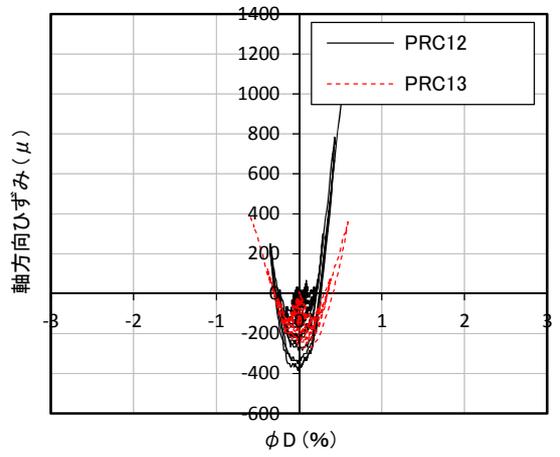
(a) PRC14, PRC11



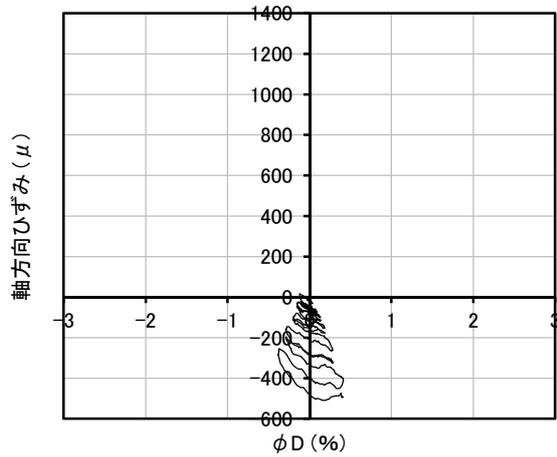
(b) PRC08



(c) PRC09, PRC10

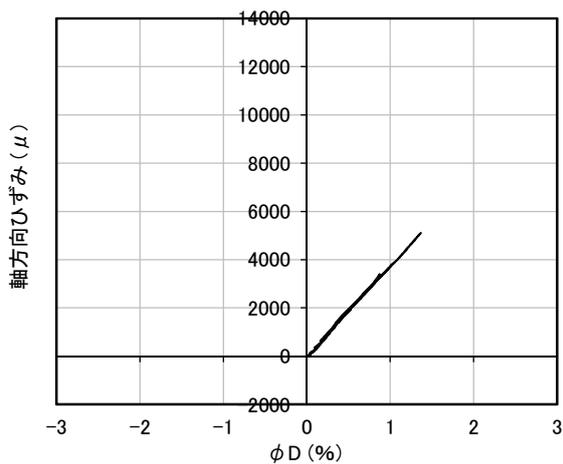


(d) PRC12, PRC13

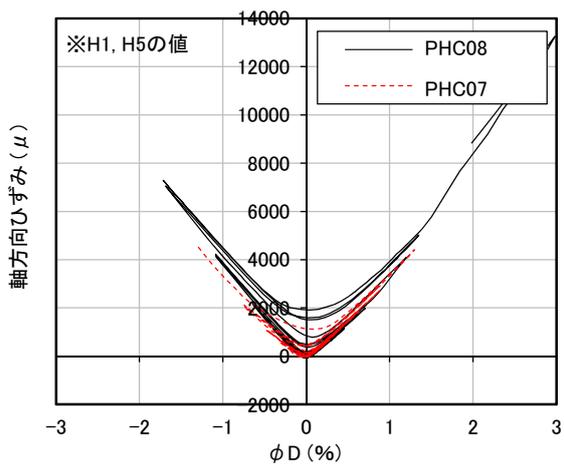


(e) PRC07

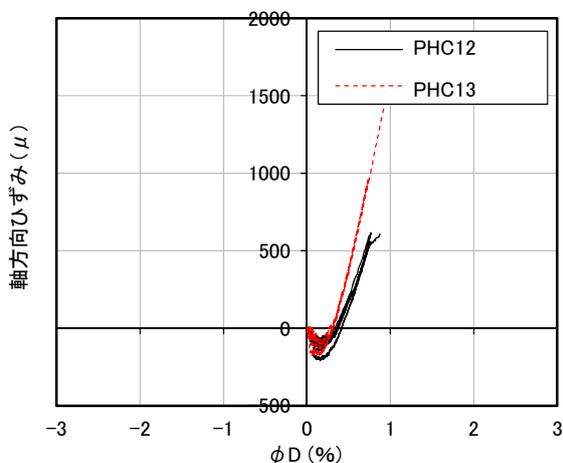
図 2.4.27 軸方向ひずみと曲率の関係 (PRC 杭 Ⅲ種)



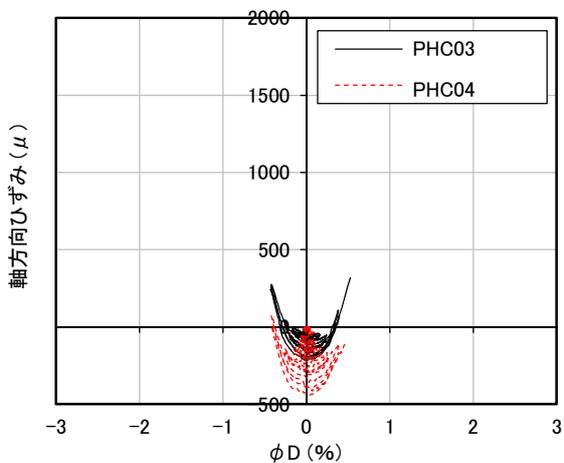
(a) PHC14



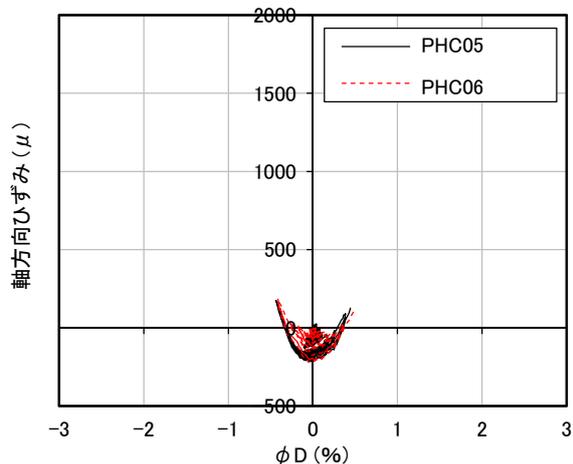
(b) PHC08, PHC07



(c) PHC12, PHC13

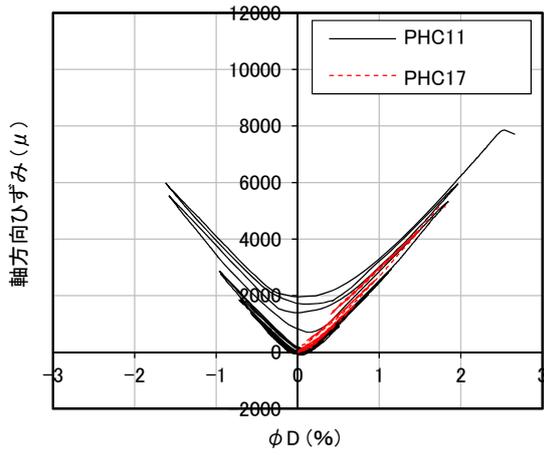


(d) PHC03, PHC04

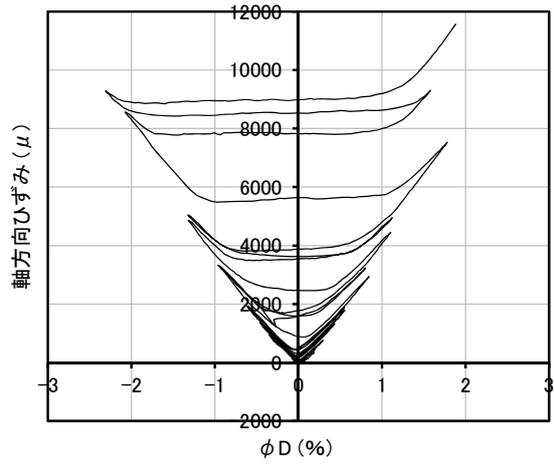


(e) PHC05, PHC06

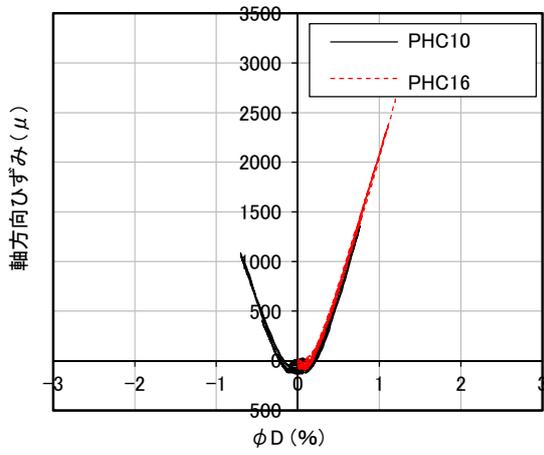
図 2.4.28 軸方向ひずみと曲率の関係 (PHC 杭 A 種)



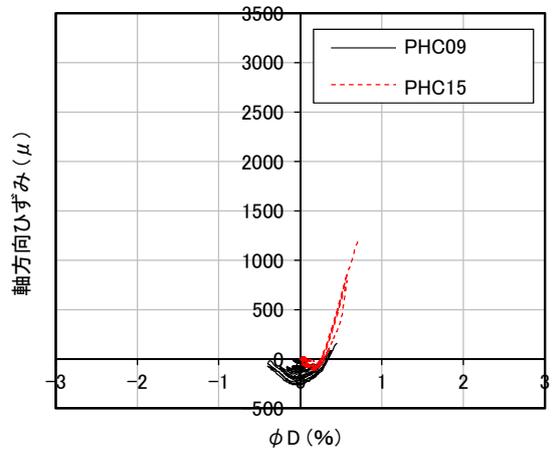
(a) PHC11, PHC17



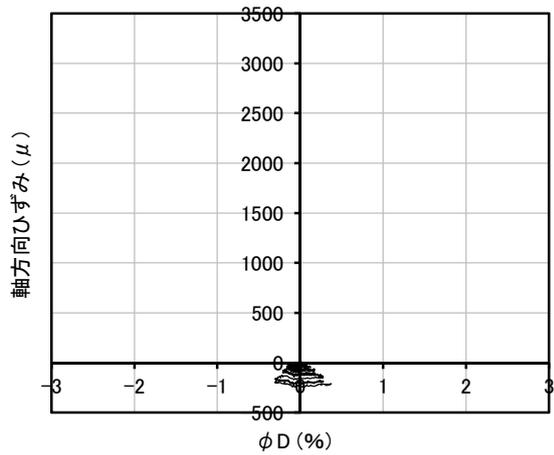
(b) PHC02



(c) PHC10, PHC16



(d) PHC09, PHC15



(e) PHC01

図 2.4.29 軸方向ひずみと曲率の関係 (PHC 杭 C 種)

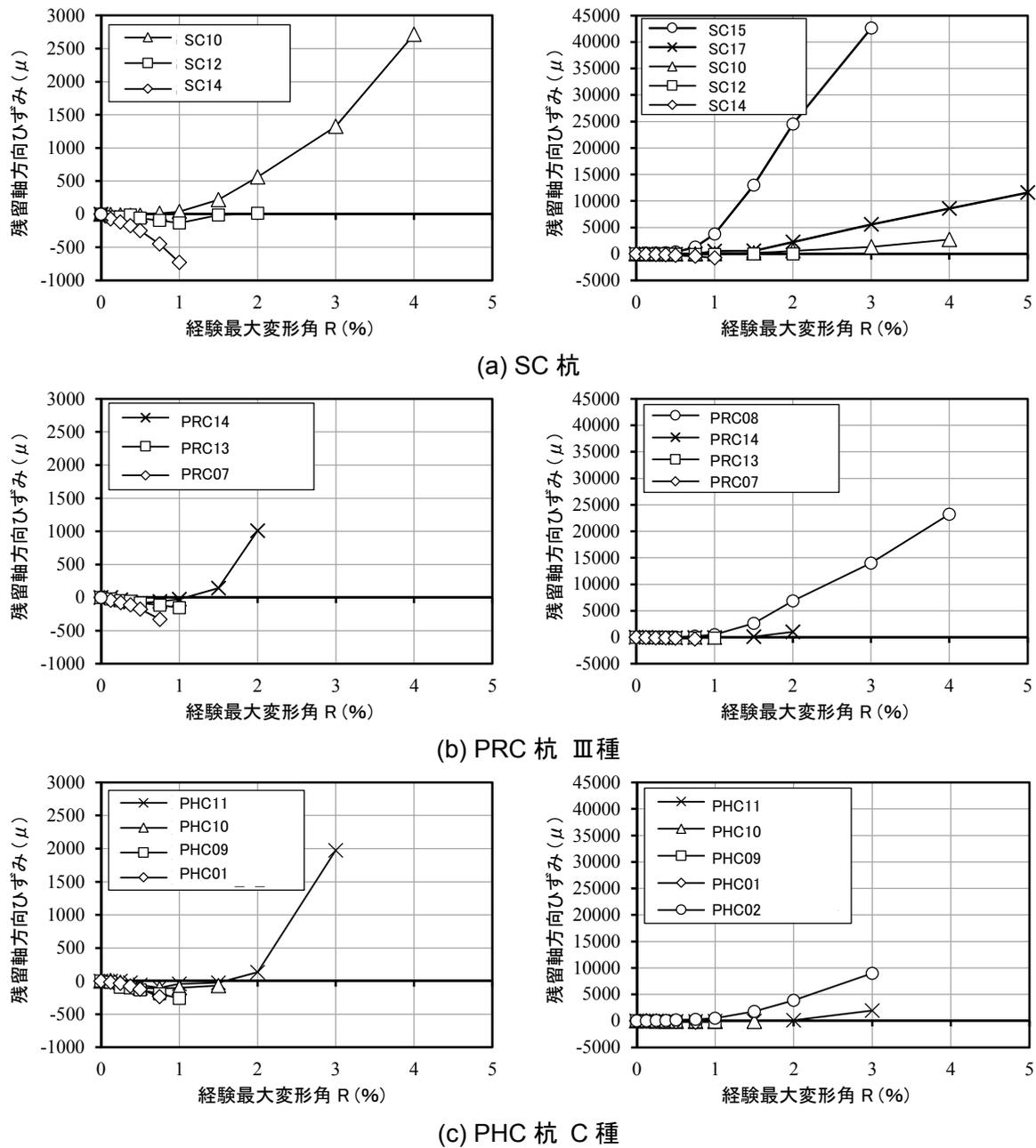


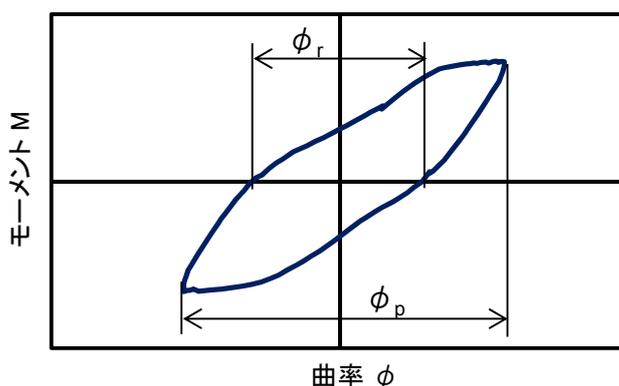
図 2.4.30 残留軸方向ひずみ

2.4.8 残留変形

表 2.4.16 および図 2.4.32 に各試験体のモーメントー曲率関係における残留変形率の推移を示す。残留変形率は図 2.4.31 に示すピーク時変形 ϕ_p に対する残留変形 ϕ_r の比であり、式(2.4.9)によって算出される。計算には載荷サイクル2週目の値を用いた。

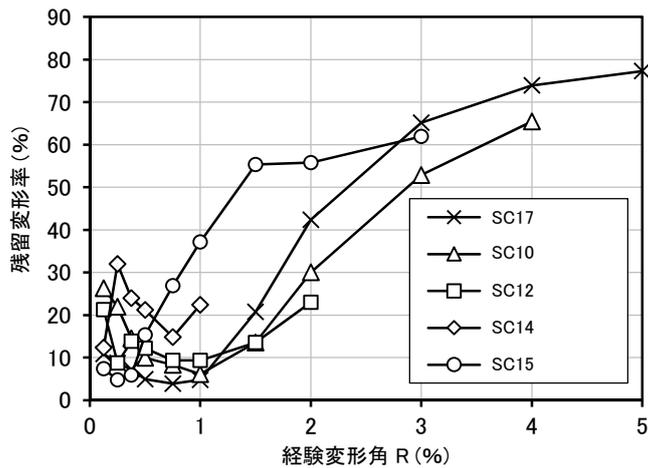
表 2.4.16 M- ϕ 関係における残留変形率の推移

	残留変形率 (%)										
	1/800	1/400	1/267	1/200	1/133	1/100	1/67	1/50	1/33	1/25	1/20
SC17	10.8	8.8	7.2	4.9	3.9	4.8	20.7	42.4	65.1	73.9	77.3
SC10	26.2	21.9	14.5	10.0	8.3	6.1	13.5	30.0	52.9	65.4	—
SC11	22.4	11.3	3.7	4.7	8.3	5.8	12.0	25.8	51.4	—	—
SC12	21.2	8.7	13.8	12.2	9.3	9.4	13.5	23.0	—	—	—
SC13	16.4	20.8	8.9	7.6	9.1	7.9	11.6	20.5	—	—	—
SC14	12.3	31.9	23.9	21.2	14.8	22.3	—	—	—	—	—
SC15	7.4	4.8	5.9	15.4	26.9	37.1	55.3	55.8	61.9	—	—
PRC17	4.8	5.1	4.1	4.3	6.9	7.8	10.7	19.2	32.9	50.4	—
PRC15	6.6	4.1	5.9	5.6	4.9	4.6	—	—	—	—	—
PRC16	5.8	4.5	4.6	4.4	4.5	4.0	5.2	—	—	—	—
PRC14	11.1	4.6	2.7	3.0	1.8	2.2	6.7	22.4	—	—	—
PRC12	1.7	2.5	5.5	6.5	2.0	2.6	—	—	—	—	—
PRC13	10.2	7.6	6.2	5.5	6.2	5.8	—	—	—	—	—
PRC07	36.1	22.8	18.5	22.4	18.8	—	—	—	—	—	—
PRC08	11.1	15.2	10.6	8.0	7.4	7.7	34.3	40.1	41.6	61.2	—
PHC07	6.3	4.0	3.4	3.8	3.8	4.2	8.1	—	—	—	—
PHC08	7.0	4.2	3.8	3.4	3.6	4.4	7.2	13.6	—	—	—
PHC03	-6.3	1.8	4.4	13.0	9.8	7.0	—	—	—	—	—
PHC04	11.7	8.2	9.0	8.0	7.1	6.2	—	—	—	—	—
PHC05	7.0	7.8	7.4	6.6	7.4	6.6	—	—	—	—	—
PHC06	10.7	10.5	9.0	9.5	9.5	7.9	—	—	—	—	—
PHC11	4.6	3.8	3.3	1.8	2.5	2.3	2.4	3.4	18.6	—	—
PHC10	11.3	7.2	4.6	4.2	4.5	2.9	3.4	—	—	—	—
PHC09	3.2	0.0	0.7	4.9	3.0	4.9	—	—	—	—	—
PHC01	36.0	22.8	21.5	15.0	15.0	—	—	—	—	—	—
PHC02	2.1	9.1	9.3	4.9	8.1	9.4	10.6	14.4	24.0	—	—

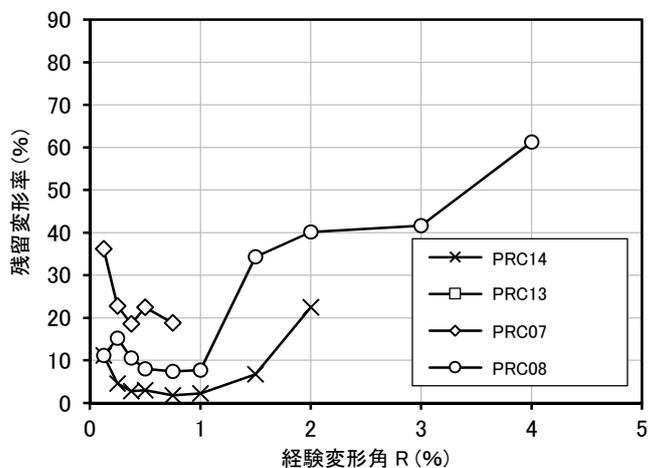


$$\text{残留変形率} = \phi_r / \phi_p \tag{2.4.9}$$

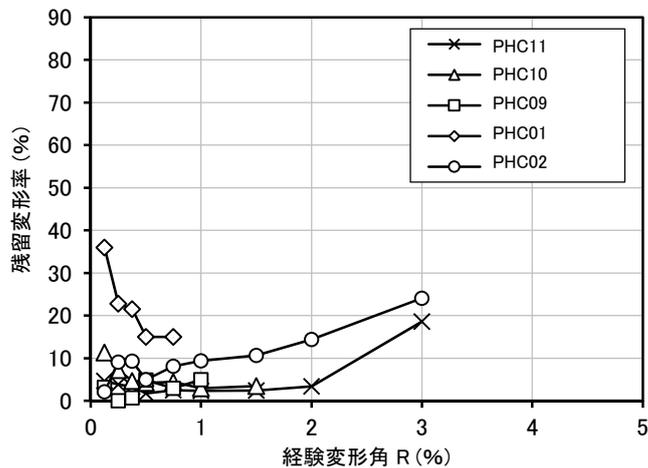
図 2.4.31 残留変形率の算出方法



(a) SC 杭



(b) PRC 杭 Ⅲ種



(c) PHC 杭 C種

図 2.4.32 M-φ 関係における残留変形率

2.4.9 まとめ

一定軸力下における既成コンクリート杭の曲げ実験を行い、以下の知見を得た。

- 杭体の曲げ変形性能は作用軸力が增大するに従って低下した。
- 作用軸力の違いによって杭体は異なる破壊過程を示し、曲げひび割れ、鋼材の降伏などの特性点は、発生の順序や有無が変化した。
- 今回の実験範囲では無軸力または圧縮軸力を作用させた SC 杭は鋼管の局部座屈によって耐力低下を起こし終局に至ったが、載荷終了時まで軸力保持性能を喪失しなかった。
- 圧縮軸力を作用させた PHC 杭，PRC 杭は最大耐力点においてコンクリートが急激に圧壊する脆性的な破壊性状を示した。
- 引張軸力を作用させた PHC 杭，PRC 杭は PC 鋼材の破断によって終局に至った。破断時，PHC 杭では急激に耐力低下し軸力保持性能を喪失したが，PRC 杭では異形鉄筋の存在によって軸力を保持した。
- PRC 杭および PHC 杭の内部の軸方向筋（PC 鋼材・異形鉄筋）は降伏すると急激にひずみが進行し，平面保持が成立しなくなった。
- 引張軸力から低圧縮軸力が作用し，鋼材の引張降伏が先行する場合には載荷が進行するにつれて引張方向の残留軸方向ひずみが発生し，特に引張軸力下では杭体の顕著な伸びが確認された。

2.5 断面解析

平面保持を仮定した断面解析によって、実験で取得したモーメントー曲率関係を評価した。ここで解析の対象としたのは本実験で実施した試験体とする。ただし、実験で最大耐力が記録できなかったSC15試験体は解析対象から外したため、計41体である。

2.5.1 解析モデルの概要

(1) 計算方法

断面解析では、平面保持の仮定に基づき曲率を増加させ、軸方向の力の釣り合いを満たすように中立軸位置を決定し、そのときのモーメントを求めた。解析は曲率を単調に増加させる方法（Pushover解析）と、実験で記録した曲率の履歴を解析で与える方法（繰返し解析）の2種類を実施した。

(2) 試験体のモデル化

解析に先立ち、試験体の杭体断面を図2.5.1のように要素分割した。鋼管、コンクリートは円周方向に36分割し、コンクリートはさらに半径方向に等厚に7分割した。PC鋼材と異形鉄筋による断面欠損は考慮しなかった。各要素の重心位置に、該当する材料の一軸応力ーひずみ関係を持つ非線形バネを設定して解析を行った。この非線形バネは、既往の文献などで紹介されている方法としてCase1、本研究で提案する方法としてCase2のそれぞれの場合についての解析を行った。両Caseともプレストレス力は各要素に初期ひずみを与えることで模擬した。ひずみはPC鋼材の引張合力とその他の要素の圧縮合力が釣り合うように与えており、PC鋼材のひずみは2.4.6項に示す初期ひずみと等しい。また、コンクリートの引張側の応力負担は無視した。本研究で実施した解析を、表2.5.1のようにまとめる。

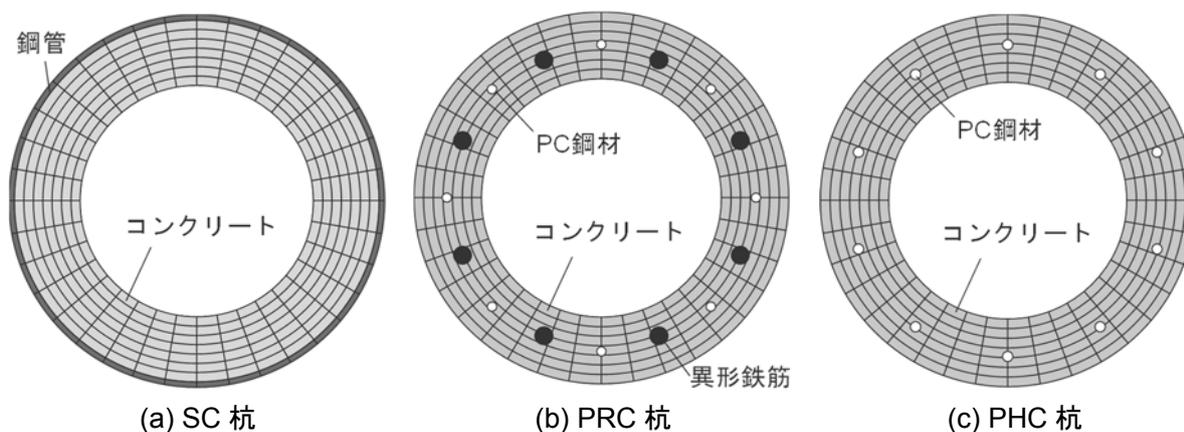


図 2.5.1 断面の分割図

表 2.5.1 実施した解析一覧

		PRC杭	PHC杭	SC杭
Pushover 解析	Case1	17体	17体	7体
	Case2	17体	17体	
繰返し 解析	Case1			
	Case2	17体	17体	

1) 解析 Case1

解析 Case1 で用いた材料の応力-ひずみ関係を図 2.5.2 に示す。Case 1 は、PHC 杭および PRC 杭では、RC 基礎指針^[2-20]で提案されている材料モデルを用いて計算を行ったものである。SC 杭は、RC 基礎指針^[2-20]に記載がないため、文献^[2-15]で提案されている材料モデルを用いた。コンクリートはひずみ軟化域を持たないバイリニア型のモデルで、圧縮応力は材料試験の 1/3 割線剛性で圧縮強度 σ_B まで直線的に上昇する。圧縮応力が圧縮強度 σ_B に到達してからは、終局ひずみ ϵ_{cu} までそれを維持する。終局ひずみ ϵ_{cu} の値には、RC 基礎指針^[2-20]や文献^[2-15]に従い SC 杭 5000μ ，PRC 杭・PHC 杭 2625μ を用いた。PRC 杭・PHC 杭の PC 鋼材はトリリニア型のモデルである。また、引張限界ひずみは 5000μ とした。PRC 杭の普通鉄筋や SC 杭の外殻鋼管はすべてひずみ硬化の影響を無視し、完全弾塑性とした。なお、この時の限界歪は設定していない。

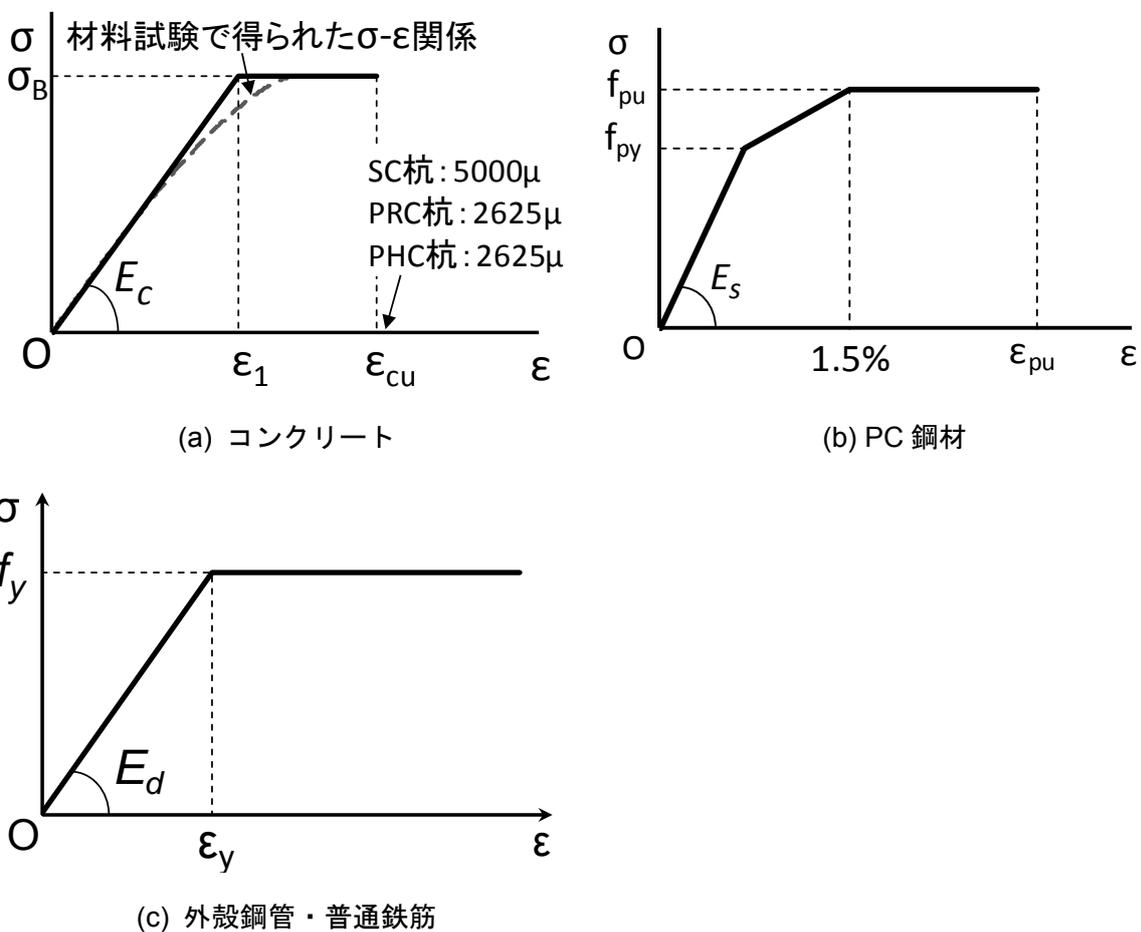


図 2.5.2 材料の応力-ひずみ関係 (Case1)

2) 解析 Case2

解析 Case 2 では、PHC 杭および PRC 杭について、既往の評価法と比べ材料の現状に即した材料特性を提案し解析を行った。本研究では、SC 杭については Case2 の解析を実施しなかった。Case2 では、Case1 からコンクリートモデルを変更し、六車渡邊モデル^[2-19]を用いた。ただし、スパイラル筋による拘束効果は考慮せず、全断面プレーンコンクリートとして計算した。圧縮強度時ひずみ ϵ_m には材料試験値

を用いた。六車渡邊モデルでは ϵ_m の値の上限を 2871μ と定めているが、今回は材料試験によってそれを上回る結果が得られたため、この上限を無視した。文献[2-19]では除荷・再載荷履歴は直線と2次曲線によって構成されているが、今回は実験の $M-\phi$ 関係との適合性を考慮してすべて直線状の履歴とした。除荷時はコモンポイント (ϵ_c, σ_c) と応力が0となる点 ($\epsilon_p, 0$) を直線で結んだ。再載荷時はコモンポイントまでは除荷時と同じ履歴とし、それ以降も勾配は変化せず、骨格曲線まで復帰することとした。材料モデルの ϵ_{cu} の値は、各試験体の実験値 $e\epsilon_u$ を参考に決定した。2.4.6 項 (1) では、本実験における杭体表面のひずみの計測結果が示されている。実験におけるコンクリート圧壊時の各試験体の圧縮側杭体表面のひずみを $e\epsilon_u$ とした。片側繰返し載荷の場合と、両側繰返し載荷の場合とに分けてそれぞれの実験値 $e\epsilon_u$ を図 2.5.3 に示す。図 2.5.3 に示すように、今回の実験の範囲ではコンクリート強度によって $e\epsilon_u$ の値が大きく変わることはなかった。一方、片側繰返し載荷の場合と比べると、両側繰返し載荷の場合は $e\epsilon_u$ の値が小さくなった。そこで、片側繰返し載荷の場合と両側繰返し載荷の場合とに分けて、それぞれの $e\epsilon_u$ を材料試験の圧縮強度時ひずみ ϵ_m で除したあとに平均値を算出した。その結果、片側繰返し載荷の場合は $e\epsilon_u/\epsilon_m$ の平均値が 1.437、両側繰返し載荷の場合は $e\epsilon_u/\epsilon_m$ の平均値が 1.133 となった。そこで材料モデルの ϵ_{cu} の値は、片側繰返し載荷の場合は $\epsilon_{cu}=1.437\epsilon_m$ 、両側繰返し載荷の場合は $\epsilon_{cu}=1.133\epsilon_m$ の値を用いた。

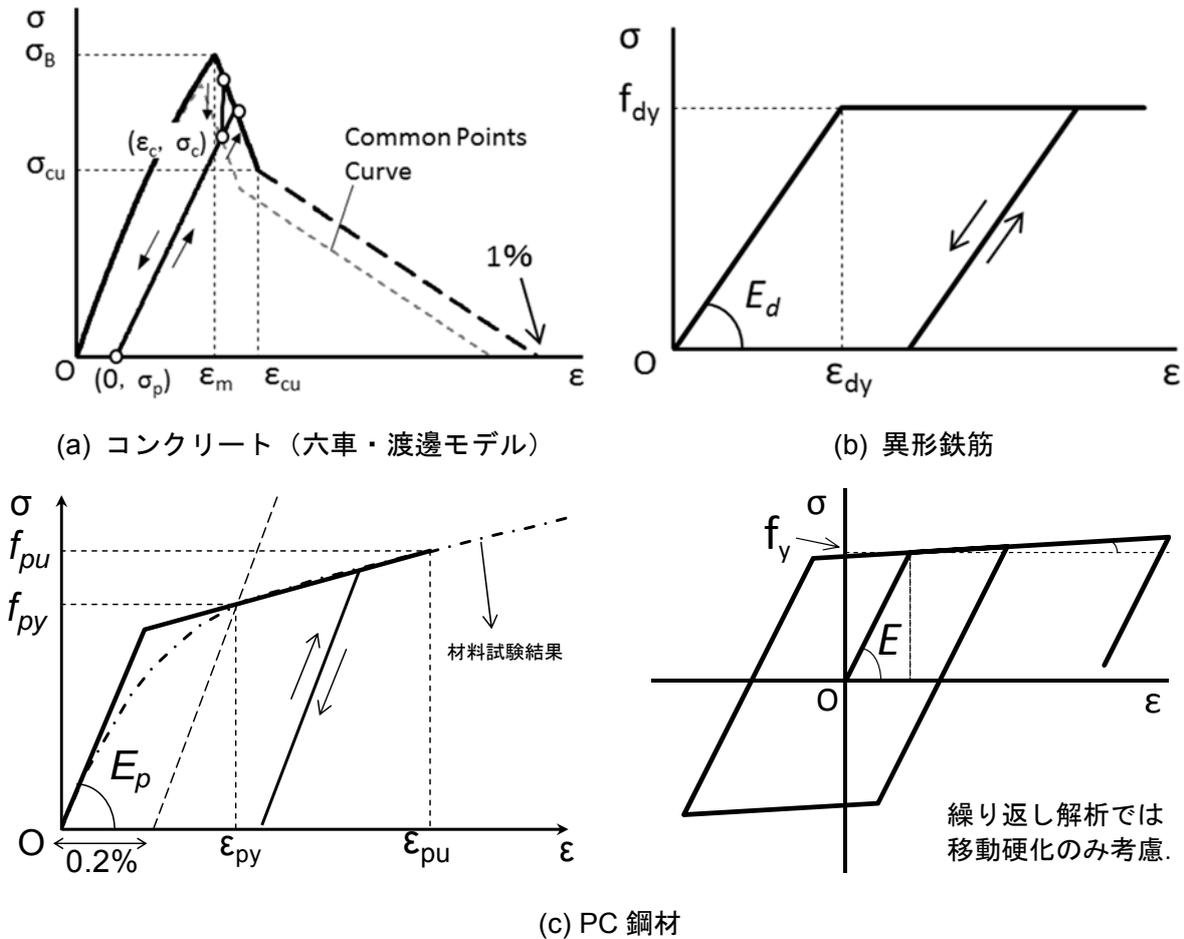


図 2.5.3 材料の応力-ひずみ関係 (Case 2)

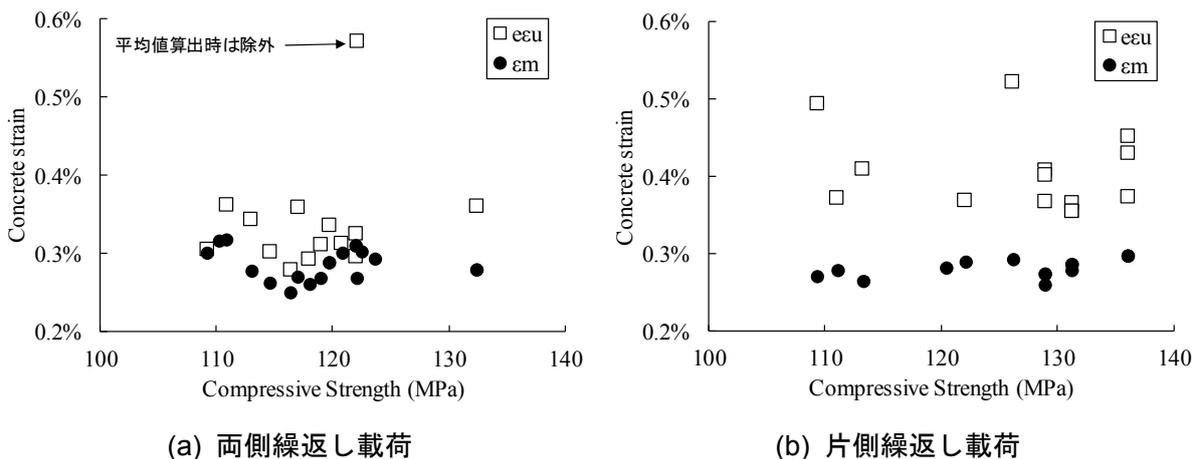


図 2.5.4 コンクリートの終局ひずみ (Case 2)

PC 鋼材のモデルはトリリニア型のモデルであるが、折れ曲がり点は 2 次勾配部分が材料試験の 0.2% オフセットによる降伏点を通過するように設定した。また引張限界ひずみ時に材料試験の引張強度と一致するように 2 次勾配を決定した。PC 鋼材の引張限界ひずみは、PC 鋼材が破断によって終局を迎えた試験体の実験値を参考に決定した。PC 鋼材が破断によって終局を迎えた試験体の破断ひずみの一覧と、PHC 杭と PRC 杭のそれぞれの平均値を表 2.5.2 に示す。表に示した実験値は、PC 鋼棒に貼付した歪みゲージの値ではなく、2.4.6 項 (1) で示したように、変位計から推定したひずみである。そのため、この破断ひずみは実際に破断した箇所のように変形が集中した箇所のひずみではなく、変位計の計測区間で一様にならしたあとのひずみであるが、今回はこの値 (PHC 杭で 1.73%、PRC 杭で 2.70%) を採用した。

PRC 杭の普通鉄筋の材料モデルは Case1 と同様完全弾塑性とした。

表 2.5.2 PC 鋼材の破断ひずみ (Case 2)

試験体	破断時歪	試験体	破断時歪
PHC02	2.68%	PRC08	3.30%
PHC07	1.36%	PRC17	2.09%
PHC08	1.58%	平均	2.70%
PHC14	1.29%		
平均	1.73%		

(3) 特性点の定義

解析における各特性点の定義を表 2.5.3 に示す。曲げひび割れ点の算出に用いたコンクリート曲げ強度は式(2.5.1)および式(2.5.2)によって算出した^[2-21]。

$$\sigma_f = 0.440 \cdot \sigma_B^{0.678} \tag{2.5.1}$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_c} \tag{2.5.2}$$

ただし、 σ_f : コンクリート曲げ強度 (MPa)
 σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)
 E_c : コンクリートヤング係数 (MPa)

表 2.5.3 解析における特性点の定義

	定義
曲げひび割れ	引張側コンクリートのひずみが ε_f に達した点 (PRC および PHC 杭のみ)
PC 鋼材の降伏	PC 鋼材の引張ひずみが降伏ひずみ ε_y (材料試験値) に達した点
最大モーメント	最大のモーメントを記録した点
終局	以下のうち、はじめに到達した点 i) SC 杭 圧縮外縁コンクリートのひずみが終局ひずみ ε_{cu} に達した点または、モーメントが最大時の 80% まで低下した点 ii) PRC および PHC 杭 圧縮側コンクリートのひずみが終局ひずみ ε_{cu} に達した点または、引張側 PC 鋼材が引張限界ひずみに達した点または、モーメントが最大時の 80% まで低下した点。

2.5.2 解析結果

(1) 特性点のモーメントー曲率

以下に算出した各特性点のモーメントおよび曲率の値を示す。また、各数値の右欄の括弧内には計算値に対する実験値の比率を表記した。表下部には、各特性点のモーメントおよび曲率に対する実験値／計算値の平均と、その標準偏差を示した。

1) SC杭

計算値の終局点は全てコンクリートの圧壊によって決定した。しかし、実験では鋼管の局部座屈によって終局状態となっている。

降伏点について、モーメントは実験値／計算値が 1.03～1.19 となり、安全側に評価出来た。一方、降伏時の曲率は、実験値／計算値が 0.75～0.93 となり計算は実験値を過大評価していた。最大耐力時について、モーメントは実験値／計算値が 1.22～1.36 となり、安全側に評価出来たものの計算は実験値を過小評価していた。最大耐力時の曲率も実験値／計算値が 1.03～2.44 となり、安全側に評価出来たものの計算は実験値を過小評価していた。これは、今回の解析では鋼管のひずみ硬化による耐力の上昇や鋼管によるコンクリートの拘束状況を考慮していないことが原因であると考えられる。降伏点モーメント、降伏点曲率、最大耐力の実験値／計算値の標準偏差はそれぞれ 0.05, 0.07, 0.05 とばらつきの小さな結果となった。一方で、最大耐力時の曲率は 0.43 であり、ばらつきが大きな結果となった。

2) PRC杭

(a) Case1

曲げひび割れ時のモーメントは実験値／計算値が 0.77～2.11, その平均値が 1.53, 標準偏差が 0.34 となった。また、曲げひび割れ時の曲率は、実験値／計算値が 0.88～2.14, その平均値が 1.49, 標準偏差が 0.35 となった。モーメントも曲率も、計算値が実験値を過小評価しており、またばらつきが大きく精度が悪い結果となった。

PC 鋼材降伏時のモーメントは実験値／計算値が 0.79～1.05, その平均値が 0.95, 標準偏差が 0.08 となった。危険側になる試験体があるものの、実験値を精度良く評価出来た。また、PC 鋼材降伏時の曲率は、実験値／計算値が 0.67～0.98, その平均値が 0.78, 標準偏差が 0.10 となった。全体的に計算値が実験値を過大評価した結果となり精度が悪い結果となった。

最大耐力時のモーメントは実験値／計算値が 0.88～1.15, その平均値が 1.01, 標準偏差が 0.08 となった。危険側になる試験体があるものの、実験値を精度良く評価出来た。また、最大耐力時の曲率は、実験値／計算値が 0.73～1.33, その平均値が 0.91, 標準偏差が 0.18 となった。全体的に計算値が実験値を過大評価した結果となった。

(b) Case2

Case2 では、Pushover 解析と繰返し解析を実施した。表に示したように、両解析において大きな差はなかった。ただし、引張軸力を導入した PRC08 と軸力 0 の PRC14 試験体の最大耐力時の曲率の評価では、繰返し解析の推定精度が悪くなった。軸力が引張または 0 の場合は、鉄筋の繰返し挙動によって曲率の制度に影響が出る場合があることがわかった。

Case2のPushover解析における解析の精度について以下のように示す。

曲げひび割れ時のモーメントは実験値／計算値が0.75～1.20，その平均値が1.08，標準偏差が0.12となった。また，曲げひび割れ時の曲率は，実験値／計算値が0.70～1.10，その平均値が0.92，標準偏差が0.11となった。Case1と比べると，モーメントも曲率も計算精度が大きく向上した。

PC鋼材降伏時のモーメントは実験値／計算値が0.80～1.05，その平均値が0.96，標準偏差が0.08となった。危険側になる試験体があるものの，実験値を精度良く評価出来た。また，PC鋼材降伏時の曲率は，実験値／計算値が0.67～0.97，その平均値が0.77，標準偏差が0.10となった。Case1とほとんど同じ結果となった。

最大耐力時のモーメントは実験値／計算値が0.85～1.19，その平均値が1.06，標準偏差が0.08となった。また，最大耐力時の曲率は，実験値／計算値が0.81～1.49，その平均値が1.05，標準偏差が0.18となった。ばらつきに関してはCase1とほとんど同じ結果となったが，曲率の平均値が改善され精度がわずかに良くなった。

3) PHC杭

(a) Case1

曲げひび割れ時のモーメントは実験値／計算値が1.30～3.02，その平均値が1.76，標準偏差が0.48となった。また，曲げひび割れ時の曲率は，実験値／計算値が1.34～2.58，その平均値が1.87，標準偏差が0.70となった。モーメントも曲率も，計算値が実験値を過小評価しており，またばらつきが大きく精度が悪い結果となった。

PC鋼材降伏時のモーメントは実験値／計算値が0.89～1.08，その平均値が0.99，標準偏差が0.06となった。危険側になる試験体があるものの，実験値を精度良く評価出来た。また，PC鋼材降伏時の曲率は，実験値／計算値が0.58～0.80，その平均値が0.70，標準偏差が0.10となった。計算値が実験値を過大評価した結果となり精度が悪い結果となった。

最大耐力時のモーメントは実験値／計算値が0.80～1.21，その平均値が0.99，標準偏差が0.10となった。危険側になる試験体があるものの，実験値を精度良く評価出来た。また，最大耐力時の曲率は，実験値／計算値が0.34～1.15，その平均値が0.69，標準偏差が0.27となった。全体的に計算値が実験値を過大評価した結果となり精度が悪い結果となった。

(b) Case2

PRC杭と同様にCase2では，Pushover解析と繰返し解析を実施した。PRC杭と同様に，両解析において大きな差はなかった。ただし，PHC08試験体の最大耐力時の曲率の評価では，両者に差があった。

Case2のPushover解析における解析の精度について以下のように示す。

曲げひび割れ時のモーメントは実験値／計算値が1.02～1.59，その平均値が1.21，標準偏差が0.15となった。また，曲げひび割れ時の曲率は，実験値／計算値が0.64～1.57，その平均値が1.05，標準偏差が0.23となった。Case1と比べると，モーメントも曲率も計算精度が大きく向上した。

PC鋼材降伏時のモーメントは実験値／計算値が0.90～1.10，その平均値が1.02，標準偏差が0.06となった。Case1と同じように実験値を精度良く評価出来た。また，PC鋼材降伏時の曲率は，実験値／計算値が0.53～0.84，その平均値が0.68，標準偏差が0.10となった。Case1とほとんど同じ結果となっ

た。

最大耐力時のモーメントは実験値／計算値が0.84～1.48，その平均値が1.04，標準偏差が0.14となった。また，最大耐力時の曲率は，実験値／計算値が0.48～1.21，その平均値が0.83，標準偏差が0.23となった。Case1とほとんど同じ結果となったが，曲率の平均値が改善された。

表 2.5.4 各特性点のモーメント曲率一覧 (SC 杭)

(a) Case 1 (Pushover 解析)

Specimens	Tensile Yeilding of steel tube				The maximum moment point			
	M		ϕ		M		ϕ	
	kNm		1/km		kNm		1/km	
SC10	541.7	(1.19)	2.472	(0.93)	590.5	(1.23)	4.509	(1.58)
SC11	542.5	(1.09)	2.472	(0.84)	590.8	(1.22)	4.559	(1.67)
SC12	642.8	(1.10)	2.770	(0.86)	664.6	(1.24)	3.418	(1.53)
SC13	643.1	(1.15)	2.759	(0.88)	660.0	(1.28)	3.240	(1.62)
SC14	0.0	-	0.000	-	548.3	(1.36)	1.703	(1.03)
SC16	425.4	(1.03)	2.196	(0.75)	490.6	(1.25)	8.714	(1.92)
SC17	425.8	(1.10)	2.200	(0.93)	486.2	(1.24)	6.868	(2.44)
Ave.		1.11		0.86		1.26		1.68
S.D.		0.05		0.07		0.05		0.43

表 2.5.5 各特性点のモーメント曲率一覧（PRC杭）

(a) Case 1 (Pushover 解析)

Specimens	Flexural Crack				Tensile Yielding of PSBar				The maximum moment point			
	M		φ		M		φ		M		φ	
	kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km	
PRC07	364.7	(1.39)	0.996	(1.28)	0.0	-	0.000	-	518.5	(1.08)	1.628	(1.01)
PRC08	10.3	-	0.028	-	189.0	(1.05)	2.576	(0.72)	222.0	(1.15)	8.028	(1.22)
PRC09	184.8	(1.56)	0.508	(1.54)	500.9	(0.99)	3.392	(0.80)	517.5	(1.05)	4.784	(0.81)
PRC10	184.4	(1.52)	0.504	(1.53)	501.2	(1.04)	3.400	(0.98)	518.1	(1.09)	4.820	(0.87)
PRC11	42.4	(2.00)	0.116	(1.89)	249.0	(0.92)	2.692	(0.67)	290.5	(1.02)	9.920	(0.73)
PRC12	232.2	(0.77)	0.692	(0.88)	424.2	-	4.396	-	459.3	(0.80)	3.196	(0.76)
PRC13	183.8	(1.23)	0.500	(1.22)	0.0	-	0.000	-	468.8	(0.88)	2.752	(0.86)
PRC14	42.4	(1.79)	0.116	(2.02)	249.5	(0.95)	2.904	(0.75)	280.5	(1.02)	5.900	(1.21)
PRC15	184.6	(1.49)	0.580	(1.22)	414.4	-	2.756	-	422.7	(1.01)	3.060	(0.71)
PRC16	183.0	(1.51)	0.572	(1.49)	415.9	-	2.752	-	430.3	(0.98)	3.388	(0.78)
PRC17	41.2	(2.11)	0.132	(2.14)	176.7	(0.79)	2.004	(0.70)	214.8	(1.05)	8.192	(1.33)
PRC18	183.1	(1.26)	0.508	(1.27)	445.3	-	3.456	-	455.1	(1.01)	4.436	(1.01)
PRC19	182.7	(1.43)	0.504	(1.29)	445.4	-	3.448	-	455.6	(1.01)	4.468	(0.91)
PRC20	185.2	(1.39)	0.552	(1.32)	443.7	-	3.472	-	455.9	(1.00)	4.572	(0.76)
PRC21	185.0	(1.27)	0.552	(1.22)	443.7	(0.94)	3.476	(0.73)	455.8	(1.00)	4.564	(0.81)
PRC22	40.9	(1.87)	0.108	(1.63)	188.1	-	2.688	-	216.8	(1.00)	9.912	(0.91)
PRC23	40.6	(1.92)	0.116	(1.98)	186.4	(0.93)	2.680	(0.87)	217.0	(0.99)	10.580	(0.85)
Ave.		1.53		1.49		0.95		0.78		1.01		0.91
S.D.		0.34		0.35		0.08		0.10		0.08		0.18

(b) Case 2 (Pushover 解析)

Specimens	FlexuralCrack				Tensile Yeilding of PSBar				The maximum moment point				Ultimate point			
	M		φ		M		φ		M		φ		M		φ	
	kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km	
PRC07	429.2	(1.18)	1.224	(1.04)	0.0	-	0.000	-	469.6	(1.19)	1.472	(1.11)	464.6	(1.19)	1.532	(1.07)
PRC08	31.1	-	0.176	-	187.9	(1.05)	2.584	(0.72)	217.3	(1.18)	7.612	(1.28)	217.1	(0.79)	7.856	(1.25)
PRC09	243.2	(1.19)	0.712	(1.10)	493.5	(1.01)	3.460	(0.78)	494.9	(1.10)	3.784	(1.03)	491.7	(1.11)	4.368	(0.89)
PRC10	242.9	(1.16)	0.708	(1.09)	493.9	(1.05)	3.464	(0.97)	495.6	(1.14)	3.860	(1.09)	492.6	(1.15)	4.408	(0.95)
PRC11	77.8	(1.09)	0.288	(0.76)	247.5	(0.93)	2.708	(0.67)	283.5	(1.04)	8.948	(0.81)	283.3	(1.04)	9.472	(0.76)
PRC12	237.2	(0.75)	0.684	(0.89)	0.0	-	0.000	-	432.9	(0.85)	2.304	(1.05)	432.7	(0.85)	2.324	(1.04)
PRC13	236.5	(0.96)	0.696	(0.88)	0.0	-	0.000	-	442.6	(0.93)	2.520	(0.94)	442.5	(1.02)	2.560	(0.92)
PRC14	74.0	(1.03)	0.268	(0.87)	247.0	(0.96)	2.948	(0.74)	275.3	(1.04)	6.672	(1.07)	272.4	(1.00)	5.632	(1.31)
PRC15	229.3	(1.20)	0.808	(0.88)	389.9	-	2.960	-	393.1	(1.09)	2.680	(0.81)	392.7	(1.04)	2.744	(0.88)
PRC16	229.1	(1.21)	0.812	(1.05)	401.1	-	2.908	-	401.3	(1.05)	2.952	(0.90)	401.1	(1.05)	3.004	(0.88)
PRC17	70.5	(1.23)	0.300	(0.94)	175.0	(0.80)	2.028	(0.69)	209.2	(1.08)	7.304	(1.49)	208.9	(1.04)	7.628	(1.78)
PRC18	236.6	(0.97)	0.704	(0.92)	434.0	-	3.556	-	434.0	(1.06)	3.500	(1.29)	431.0	(1.06)	4.004	(1.14)
PRC19	236.4	(1.10)	0.700	(0.93)	434.6	-	3.540	-	434.6	(1.06)	3.536	(1.15)	431.7	(1.07)	4.040	(1.02)
PRC20	239.5	(1.07)	0.752	(0.97)	435.6	-	3.536	-	435.8	(1.04)	3.624	(0.96)	432.6	(1.02)	4.184	(0.82)
PRC21	240.3	(0.98)	0.756	(0.89)	435.5	(0.95)	3.540	(0.72)	435.6	(1.04)	3.612	(1.03)	432.5	(1.02)	4.176	(0.89)
PRC22	70.0	(1.09)	0.252	(0.70)	186.4	-	2.704	-	210.5	(1.03)	9.464	(0.95)	210.5	(1.02)	9.404	(1.01)
PRC23	71.7	(1.09)	0.280	(0.82)	185.1	(0.94)	2.692	(0.87)	211.2	(1.02)	10.320	(0.87)	211.2	(1.02)	10.100	(0.93)
Ave.		1.08		0.92		0.96		0.77		1.06		1.05		1.03		1.03
S.D.		0.12		0.11		0.08		0.10		0.08		0.18		0.09		0.24

(c) Case 2 (繰返し解析)

Specimens	FlexuralCrack				Tensile Yeilding of PSBar				The maximum moment point				Ultimate point			
	M		φ		M		φ		M		φ		M		φ	
	kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km	
PRC07	439.4	(1.15)	1.223	(1.04)	0.0	-	0.000	-	476.4	(1.18)	1.431	(1.15)	473.4	(1.16)	1.495	(1.10)
PRC08	29.9	-	0.165	-	185.8	(1.07)	2.476	(0.75)	192.3	(1.33)	3.020	(3.23)	150.9	(1.14)	6.480	(1.52)
PRC09	241.2	(1.20)	0.704	(1.11)	493.5	(1.01)	3.460	(0.78)	494.3	(1.10)	3.888	(1.00)	-	-	-	-
PRC10	241.0	(1.17)	0.700	(1.10)	492.0	(1.06)	3.476	(0.96)	495.6	(1.14)	3.844	(1.09)	-	-	-	-
PRC11	77.1	(1.10)	0.283	(0.77)	246.5	(0.93)	2.640	(0.69)	283.5	(1.04)	8.955	(0.81)	283.5	(1.04)	8.955	(0.81)
PRC12	238.0	(0.75)	0.684	(0.89)	0.0	-	0.000	-	432.9	(0.85)	2.304	(1.05)	432.9	(0.85)	2.304	(1.05)
PRC13	238.4	(0.95)	0.699	(0.88)	0.0	-	0.000	-	439.2	(0.94)	2.364	(1.00)	-	-	-	-
PRC14	72.5	(1.05)	0.256	(0.91)	246.5	(0.96)	2.800	(0.78)	276.9	(1.04)	10.960	(0.65)	266.6	(1.02)	6.600	(1.12)
PRC15	231.4	(1.19)	0.807	(0.88)	0.0	-	0.000	-	373.5	(1.15)	2.180	(1.00)	102.6	(3.98)	-16.820	-(0.14)
PRC16	230.3	(1.20)	0.808	(1.05)	400.8	-	2.888	-	401.1	(1.05)	2.968	(0.89)	401.1	(1.05)	2.968	(0.89)
PRC17	68.6	(1.27)	0.283	(1.00)	174.4	(0.80)	2.011	(0.69)	200.9	(1.12)	7.221	(1.51)	187.4	(1.16)	11.344	(1.20)
PRC18	234.0	(0.98)	0.693	(0.93)	434.0	-	3.531	-	434.0	(1.06)	3.499	(1.29)	430.0	(1.06)	3.973	(1.15)
PRC19	236.4	(1.10)	0.700	(0.93)	434.6	-	3.483	-	434.6	(1.06)	3.567	(1.14)	432.1	(1.06)	3.975	(1.03)
PRC20	238.3	(1.08)	0.747	(0.98)	428.7	-	3.584	-	435.4	(1.04)	3.488	(0.99)	432.8	(1.02)	4.171	(0.82)
PRC21	238.1	(0.99)	0.747	(0.90)	435.5	(0.95)	3.541	(0.72)	435.6	(1.04)	3.659	(1.02)	-	-	-	-
PRC22	69.2	(1.11)	0.245	(0.72)	186.4	-	2.704	-	210.5	(1.03)	9.029	(0.99)	206.9	(1.04)	9.205	(1.03)
PRC23	70.8	(1.10)	0.272	(0.84)	184.9	(0.94)	2.677	(0.87)	211.1	(1.02)	9.179	(0.98)	-	-	-	-
Ave.		1.09		0.93		0.96		0.78		1.07		1.16		1.30		0.96
S.D.		0.12		0.11		0.08		0.09		0.10		0.56		0.85		0.40

表 2.5.6 各特性点のモーメント曲率一覧 (PHC 杭)

(a) Case 1 (Pushover 解析)

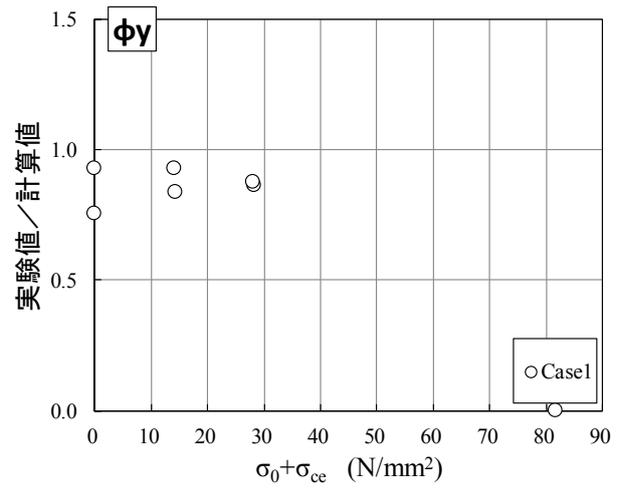
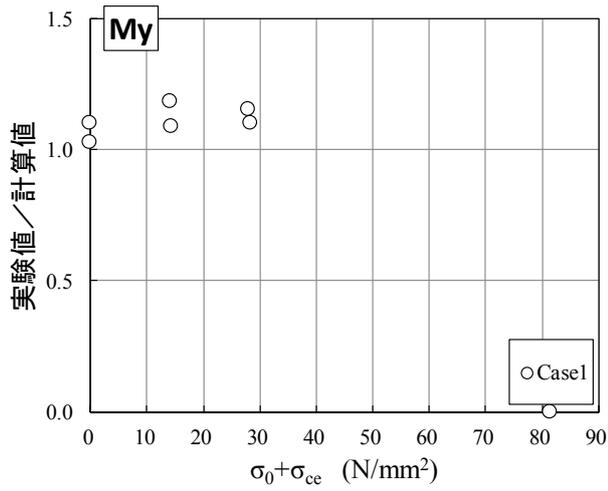
Specimens	Flexural Crack				Tensile Yielding of PSBar				The maximum moment point			
	M		ϕ		M		ϕ		M		ϕ	
	kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km	
PHC01	347.4	-	1.060	-	0.0	-	0.000	-	415.9	(1.21)	1.464	(1.02)
PHC02	33.0	(2.48)	0.096	(4.05)	151.3	(0.89)	2.772	(0.69)	184.0	(1.03)	9.312	(0.76)
PHC03	170.4	(1.49)	0.592	(1.61)	356.8	-	3.552	-	358.1	(0.92)	3.668	(0.58)
PHC04	169.8	(1.50)	0.588	(1.61)	356.8	-	3.552	-	358.3	(0.90)	3.688	(0.53)
PHC05	168.1	(1.30)	0.580	(1.47)	0.0	-	0.000	-	355.6	(0.80)	3.504	(0.43)
PHC06	169.3	(1.38)	0.564	(1.57)	0.0	-	0.000	-	354.5	(0.89)	3.328	(0.62)
PHC07	23.1	(2.02)	0.072	(2.00)	85.5	-	2.556	-	101.4	(0.92)	13.260	(0.26)
PHC08	24.4	(1.92)	0.084	(1.84)	85.3	-	2.564	-	101.0	(0.89)	12.380	(0.38)
PHC09	202.1	(1.50)	0.584	(1.51)	0.0	-	0.000	-	419.5	(0.93)	2.492	(0.71)
PHC10	131.5	(1.54)	0.388	(1.54)	334.4	(0.95)	3.256	(0.79)	338.5	(1.00)	3.608	(1.03)
PHC11	61.2	(2.22)	0.176	(2.43)	201.6	(1.01)	2.840	(0.86)	228.0	(1.03)	6.356	(1.15)
PHC12	165.6	(1.47)	0.504	(1.37)	366.8	(1.04)	3.868	(0.63)	376.4	(1.04)	5.456	(0.56)
PHC13	165.3	(1.45)	0.512	(1.42)	360.4	(0.99)	3.936	(0.59)	363.2	(1.07)	4.428	(0.91)
PHC14	20.9	(3.02)	0.064	(2.58)	89.7	(1.08)	2.924	(0.80)	104.7	(1.01)	15.944	(0.34)
PHC15	201.9	(1.44)	0.588	(1.37)	448.5	(1.00)	3.784	(0.58)	453.9	(1.04)	4.328	(0.65)
PHC16	132.1	(1.51)	0.404	(1.34)	333.3	(0.98)	3.380	(0.68)	351.1	(1.08)	5.496	(1.03)
PHC17	57.4	(1.95)	0.172	(2.17)	199.4	(0.98)	2.936	(0.69)	230.7	(1.07)	8.712	(0.79)
Ave.		1.76		1.87		0.99		0.70		0.99		0.69
S.D.		0.48		0.70		0.06		0.10		0.10		0.27

(b) Case 2 (Pushover 解析)

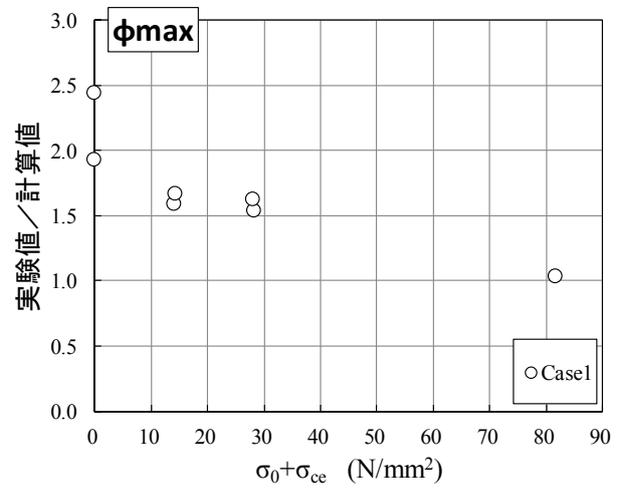
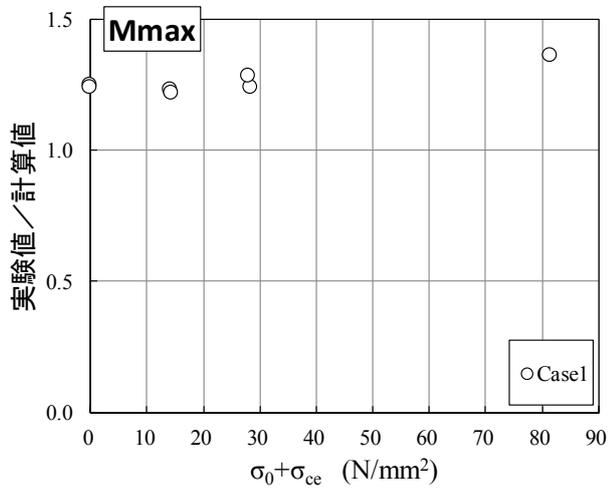
Specimens	Flexural Crack				Tensile Yielding of PSBar				The maximum moment point				Ultimate point			
	M		ϕ		M		ϕ		M		ϕ		M		ϕ	
	kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km	
PHC01	0.0	-	0.000	-	0.0	-	0.000	-	340.0	(1.48)	1.240	(1.21)	331.2	(1.52)	1.312	(1.14)
PHC02	57.9	(1.41)	0.248	(1.57)	148.2	(0.90)	2.816	(0.67)	176.9	(1.07)	7.460	(0.95)	176.8	(0.98)	7.464	(1.01)
PHC03	215.7	(1.18)	0.820	(1.16)	335.7	-	3.792	-	343.1	(0.96)	3.172	(0.67)	342.4	(0.96)	3.328	(0.64)
PHC04	215.4	(1.18)	0.816	(1.16)	336.9	-	3.780	-	343.4	(0.94)	3.164	(0.62)	342.7	(0.94)	3.348	(0.59)
PHC05	214.8	(1.02)	0.800	(1.07)	333.0	-	3.780	-	342.1	(0.84)	3.132	(0.48)	341.6	(0.82)	3.228	(0.55)
PHC06	214.9	(1.09)	0.776	(1.14)	317.6	-	3.948	-	340.1	(0.93)	2.984	(0.69)	339.6	(0.93)	3.052	(0.67)
PHC07	42.8	(1.09)	0.224	(0.64)	84.5	-	2.588	-	96.5	(0.96)	7.004	(0.48)	96.5	(0.91)	7.008	(0.75)
PHC08	43.1	(1.09)	0.240	(0.64)	84.4	-	2.592	-	96.4	(0.93)	7.016	(0.67)	96.4	(0.88)	7.020	(0.86)
PHC09	250.0	(1.21)	0.780	(1.13)	0.0	-	0.000	-	392.4	(0.99)	2.284	(0.78)	392.1	(0.99)	2.316	(0.77)
PHC10	173.6	(1.16)	0.564	(1.06)	324.9	(0.97)	3.412	(0.75)	324.9	(1.04)	3.416	(1.09)	324.8	(1.04)	3.368	(1.10)
PHC11	91.9	(1.48)	0.328	(1.30)	197.8	(1.03)	2.932	(0.84)	233.6	(1.00)	7.420	(0.98)	227.7	(0.93)	5.996	(1.77)
PHC12	212.1	(1.15)	0.712	(0.97)	359.3	(1.06)	3.996	(0.61)	359.5	(1.09)	4.284	(0.71)	357.4	(1.09)	4.844	(0.72)
PHC13	208.7	(1.15)	0.708	(1.02)	339.0	(1.05)	4.200	(0.55)	345.1	(1.12)	3.488	(1.16)	342.8	(1.13)	3.900	(1.11)
PHC14	39.6	(1.59)	0.208	(0.79)	88.6	(1.10)	2.948	(0.80)	99.5	(1.06)	7.196	(0.75)	99.5	(0.88)	7.200	(0.76)
PHC15	248.7	(1.17)	0.804	(1.00)	416.2	(1.08)	4.144	(0.53)	426.3	(1.10)	3.396	(0.83)	422.8	(1.11)	3.800	(0.74)
PHC16	171.9	(1.16)	0.592	(0.91)	326.6	(1.00)	3.512	(0.66)	333.1	(1.14)	4.696	(1.20)	333.0	(1.14)	4.912	(1.15)
PHC17	88.6	(1.26)	0.328	(1.14)	195.7	(1.00)	2.996	(0.67)	224.0	(1.10)	7.800	(0.88)	224.0	(1.09)	7.804	(0.93)
Ave.		1.21		1.05		1.02		0.68		1.04		0.83		1.02		0.90
S.D.		0.15		0.23		0.06		0.10		0.14		0.23		0.16		0.30

(c) Case 2（繰返し解析）

Specimens	FrexuralCrack				Tensile Yeilding of PSBar				The maximum moment point				Ultimate point			
	M		φ		M		φ		M		φ		M		φ	
	kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km		kNm		1/km	
PHC01	0.0	-	0.000	-	0.0	-	0.000	-	343.2	(1.47)	1.236	(1.21)	337.8	(1.49)	1.268	(1.18)
PHC02	57.1	(1.43)	0.240	(1.62)	147.8	(0.91)	2.748	(0.69)	163.5	(1.16)	6.960	(1.02)	163.5	(1.06)	6.960	(1.08)
PHC03	214.6	(1.19)	0.804	(1.19)	336.8	-	3.739	-	343.0	(0.96)	3.195	(0.66)	342.8	(0.96)	3.285	(0.64)
PHC04	212.5	(1.20)	0.792	(1.20)	337.0	-	3.772	-	343.4	(0.94)	3.172	(0.62)	342.9	(0.94)	3.332	(0.59)
PHC05	212.8	(1.03)	0.780	(1.09)	333.1	-	3.776	-	342.1	(0.84)	3.141	(0.48)	342.1	(0.82)	3.141	(0.57)
PHC06	215.8	(1.09)	0.772	(1.15)	318.1	-	3.933	-	340.0	(0.93)	2.995	(0.69)	339.6	(0.93)	3.053	(0.67)
PHC07	42.4	(1.10)	0.219	(0.66)	84.2	-	2.528	-	94.3	(0.99)	6.917	(0.49)	94.3	(0.93)	6.917	(0.76)
PHC08	42.5	(1.10)	0.229	(0.67)	83.3	-	2.485	-	85.1	(1.06)	2.827	(1.67)	80.3	(1.06)	2.891	(2.08)
PHC09	252.1	(1.20)	0.780	(1.13)	0.0	-	0.000	-	392.4	(0.99)	2.284	(0.78)	392.4	(0.99)	2.284	(0.78)
PHC10	173.5	(1.16)	0.560	(1.06)	325.3	(0.97)	3.392	(0.75)	327.9	(1.03)	3.568	(1.04)	325.3	(1.04)	3.392	(1.10)
PHC11	91.5	(1.49)	0.324	(1.32)	198.2	(1.02)	2.912	(0.84)	234.3	(1.00)	7.160	(1.02)	232.6	(0.91)	6.840	(1.56)
PHC12	211.2	(1.15)	0.708	(0.97)	0.0	-	0.000	-	346.7	(1.13)	2.908	(1.05)	-	-	-	-
PHC13	207.6	(1.15)	0.704	(1.03)	339.5	(1.05)	4.165	(0.56)	345.0	(1.12)	3.472	(1.16)	343.1	(1.13)	3.877	(1.11)
PHC14	36.9	(1.71)	0.165	(1.00)	88.5	(1.10)	2.932	(0.80)	94.0	(1.12)	4.280	(1.26)	94.0	(0.93)	4.280	(1.28)
PHC15	248.6	(1.17)	0.804	(1.00)	416.2	(1.08)	4.144	(0.53)	426.3	(1.10)	3.408	(0.83)	422.9	(1.11)	3.792	(0.74)
PHC16	168.9	(1.18)	0.576	(0.94)	325.9	(1.00)	3.508	(0.66)	332.9	(1.14)	4.920	(1.15)	332.7	(1.14)	4.880	(1.16)
PHC17	86.1	(1.30)	0.309	(1.21)	195.6	(1.00)	2.992	(0.68)	224.0	(1.10)	7.800	(0.88)	224.0	(1.09)	7.800	(0.93)
Ave.		1.23		1.08		1.02		0.69		1.06		0.94		1.03		1.01
S.D.		0.18		0.23		0.06		0.11		0.14		0.31		0.15		0.40

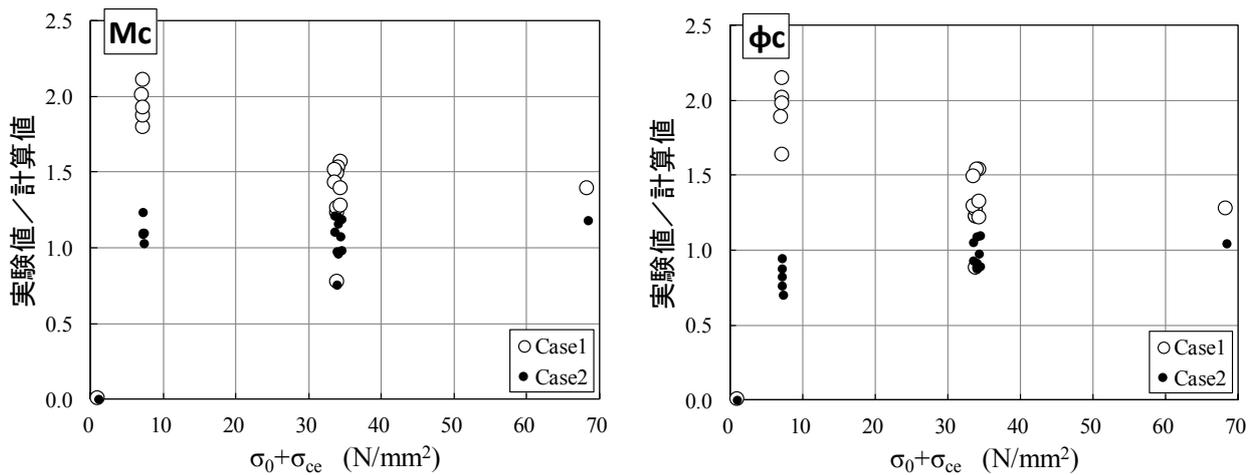


(a) 降伏時モーメント M_y および降伏時曲率 ϕ_y の推定精度

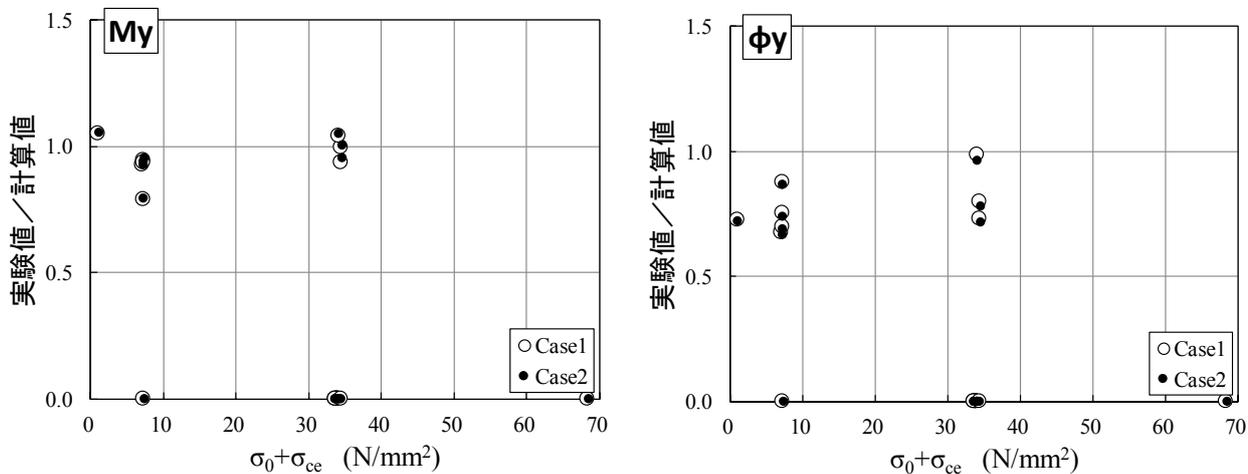


(b) 最大耐力時モーメント M_{max} および最大耐力時曲率 ϕ_{max} の推定精度

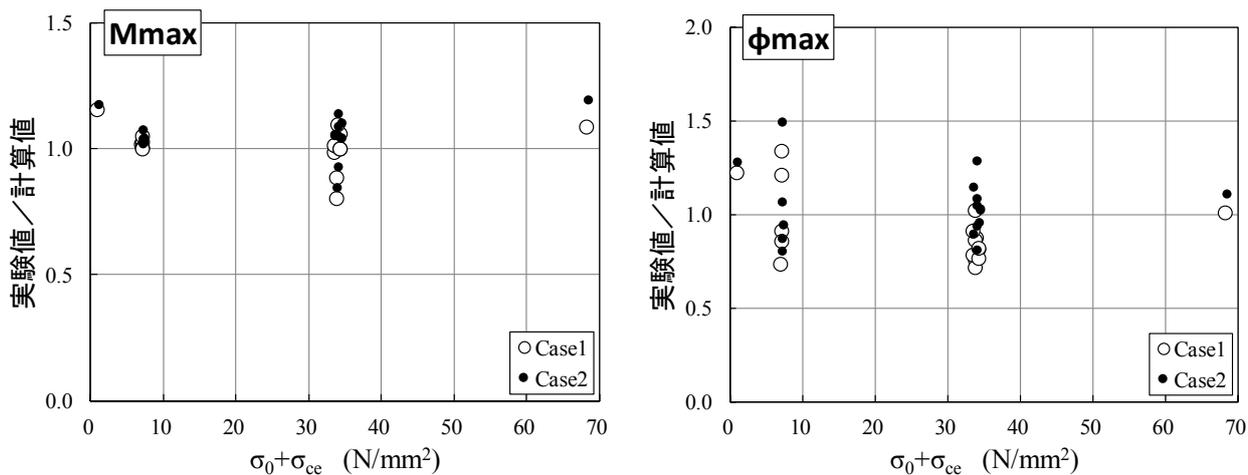
図 2.5.2 計算結果の精度 (SC 杭)



(a) 曲げひび割れ時モーメント M_c およびひび割れ時曲率 ϕ_c の推定精度

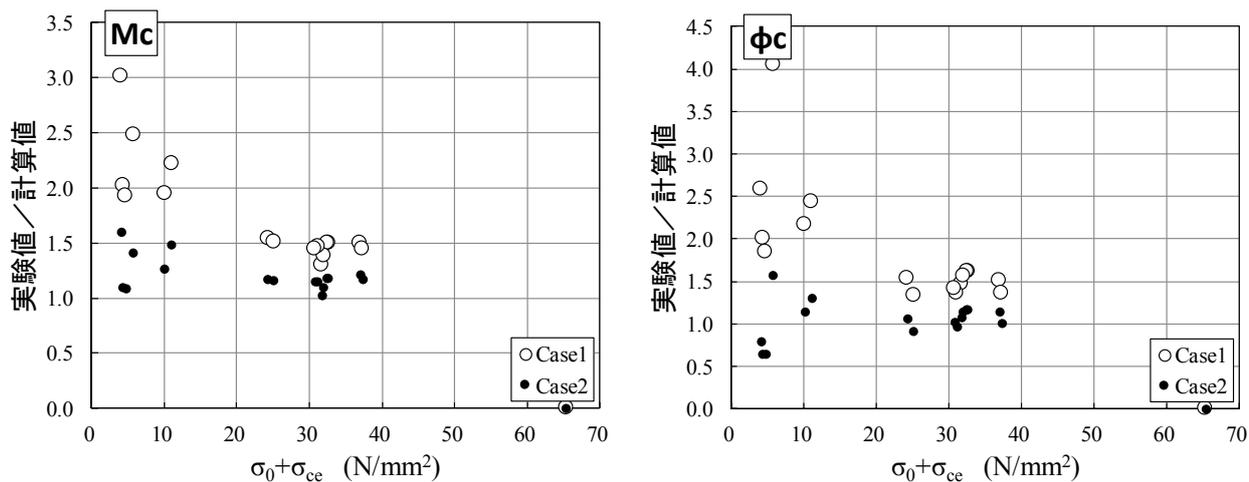


(b) 降伏時モーメント M_y および降伏時曲率 ϕ_y の推定精度

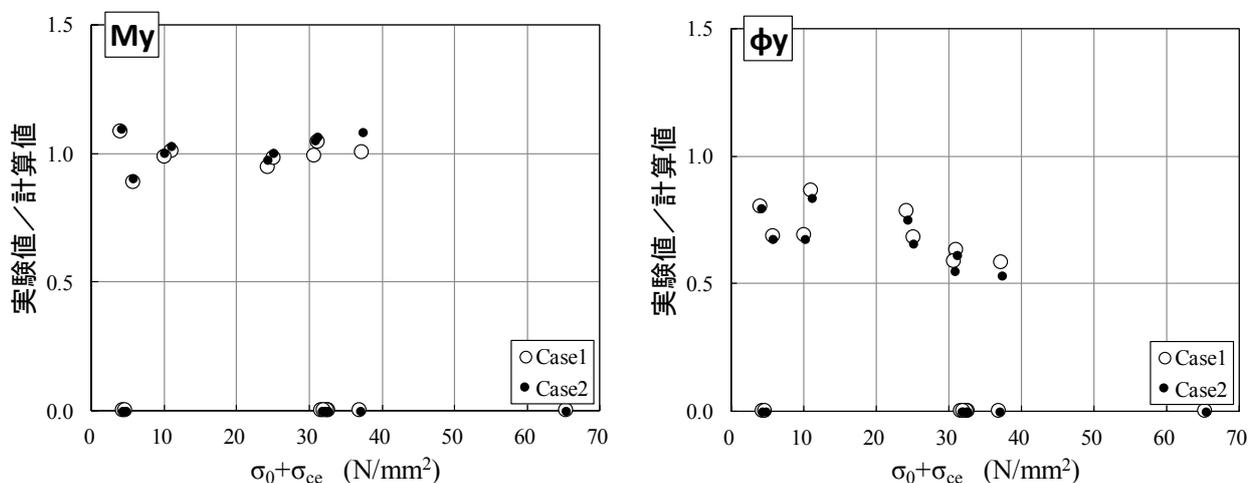


(c) 最大耐力時モーメント M_{max} および最大耐力時曲率 ϕ_{max} の推定精度

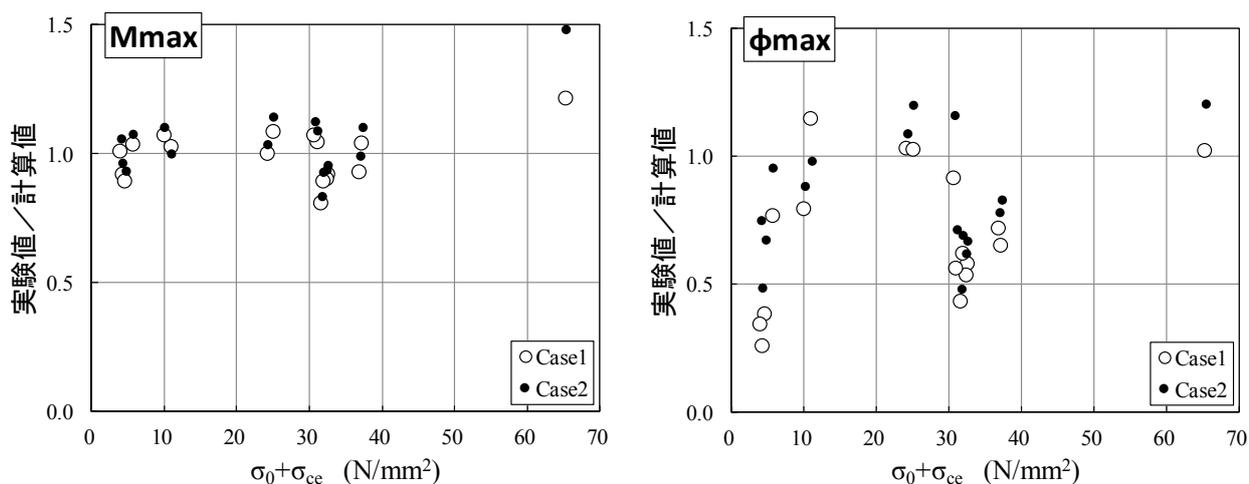
図 2.5.3 計算結果の精度 (PRC 杭)



(a) 曲げひび割れ時モーメント M_c およびひび割れ時曲率 ϕ_c の推定精度



(b) 降伏時モーメント M_y および降伏時曲率 ϕ_y の推定精度

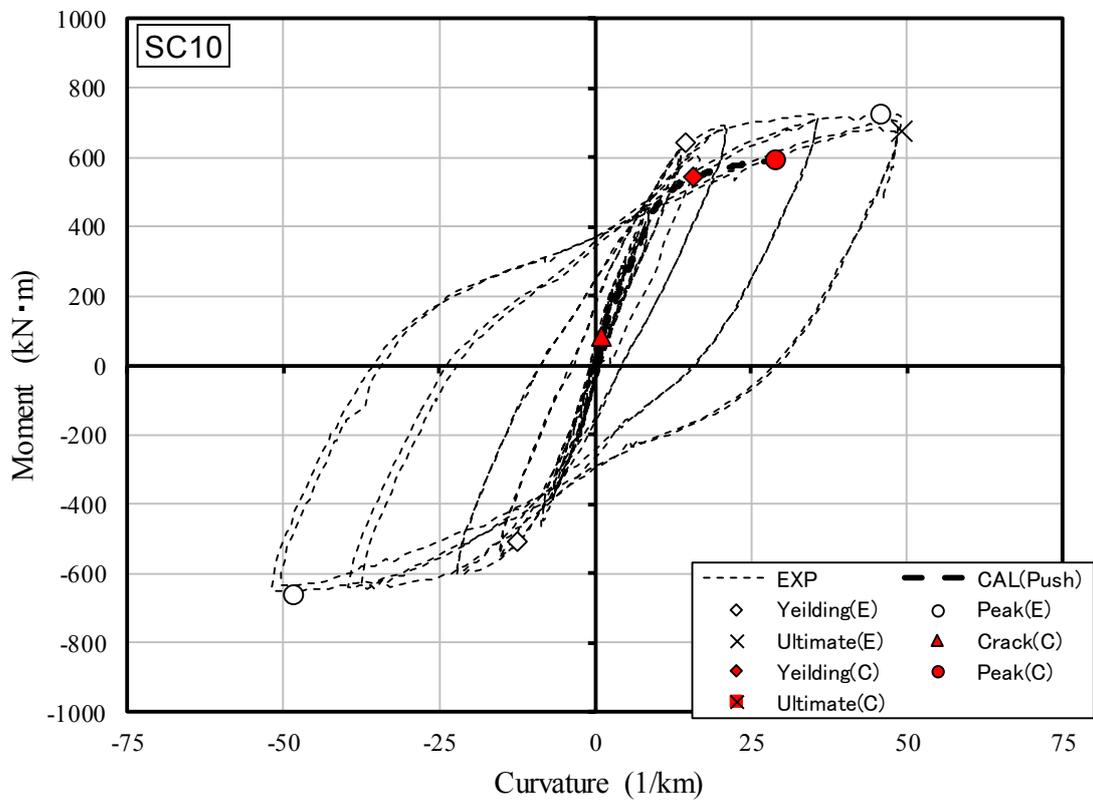


(c) 最大耐力時モーメント M_{max} および最大耐力時曲率 ϕ_{max} の推定精度

図 2.5.4 計算結果の精度 (PHC 杭)

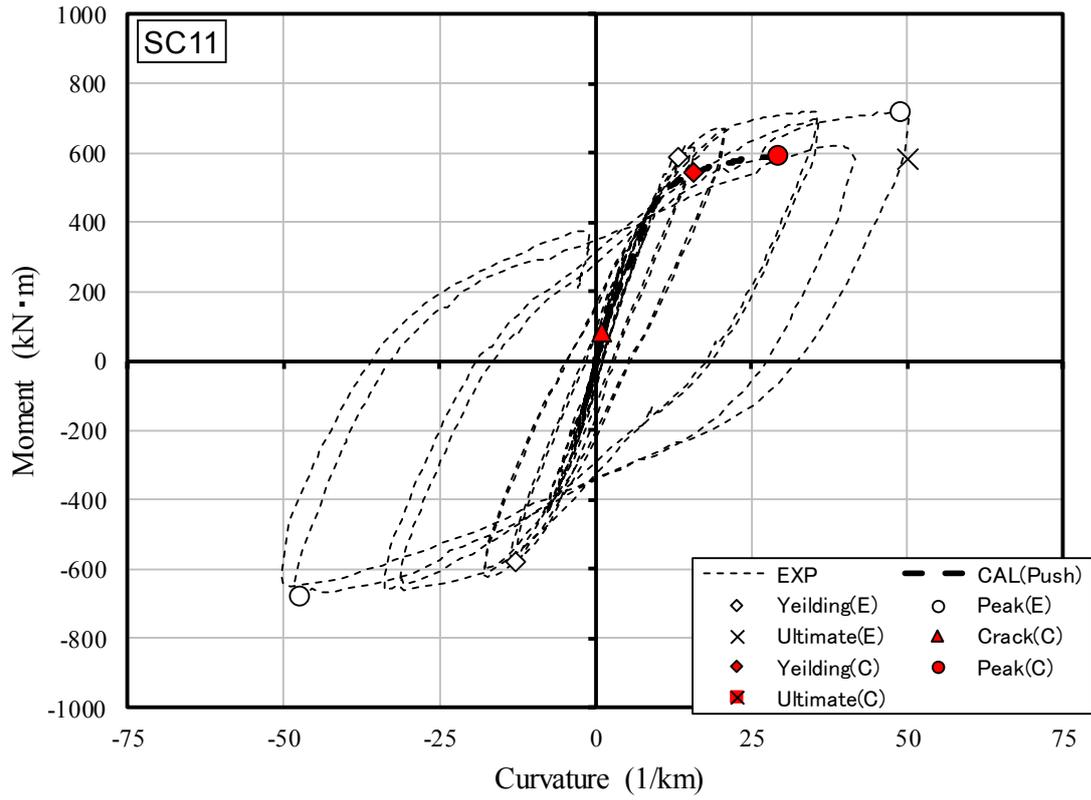
(2) モーメントー曲率関係

以下に、解析結果としてモーメントー曲率関係と実験値との比較を試験体ごとに示す。なお、グラフ中の特性点は繰返し解析のみプロットした。凡例の「(E)」は実験値を示し、「(C)」は繰返し解析の結果を示している。

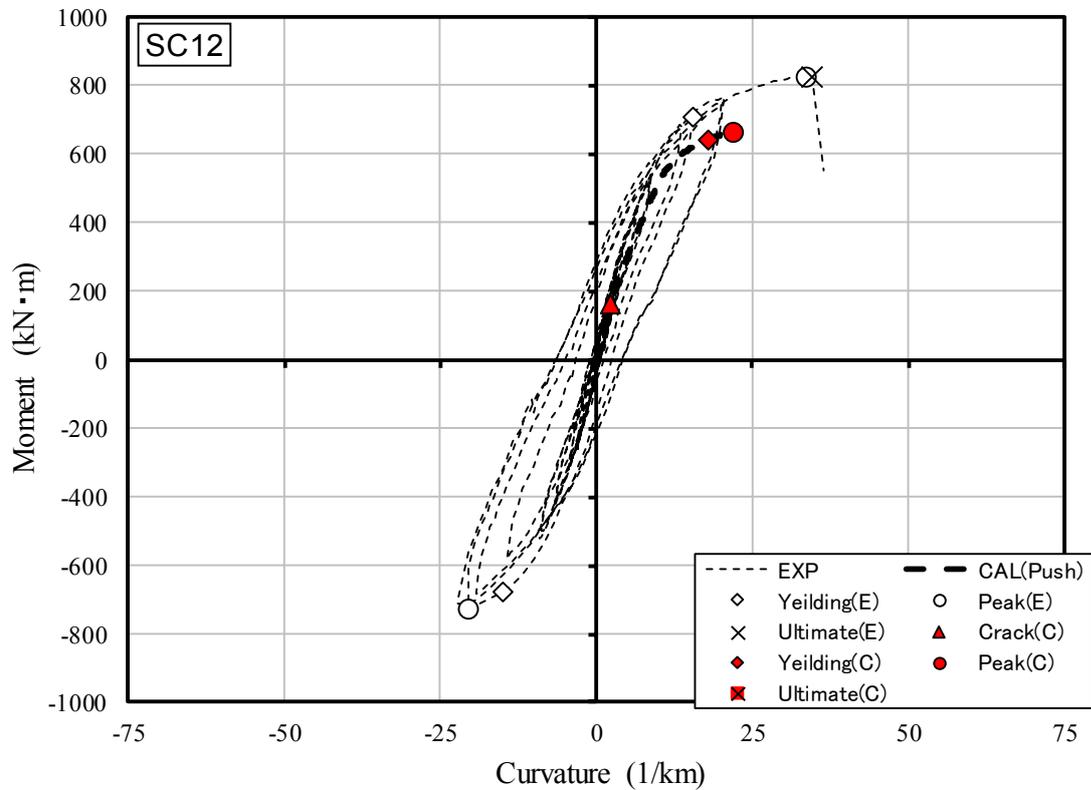


(a) SC10

図 2.5.5 モーメントーφD 関係の比較 (SC 杭) (次項に続く)

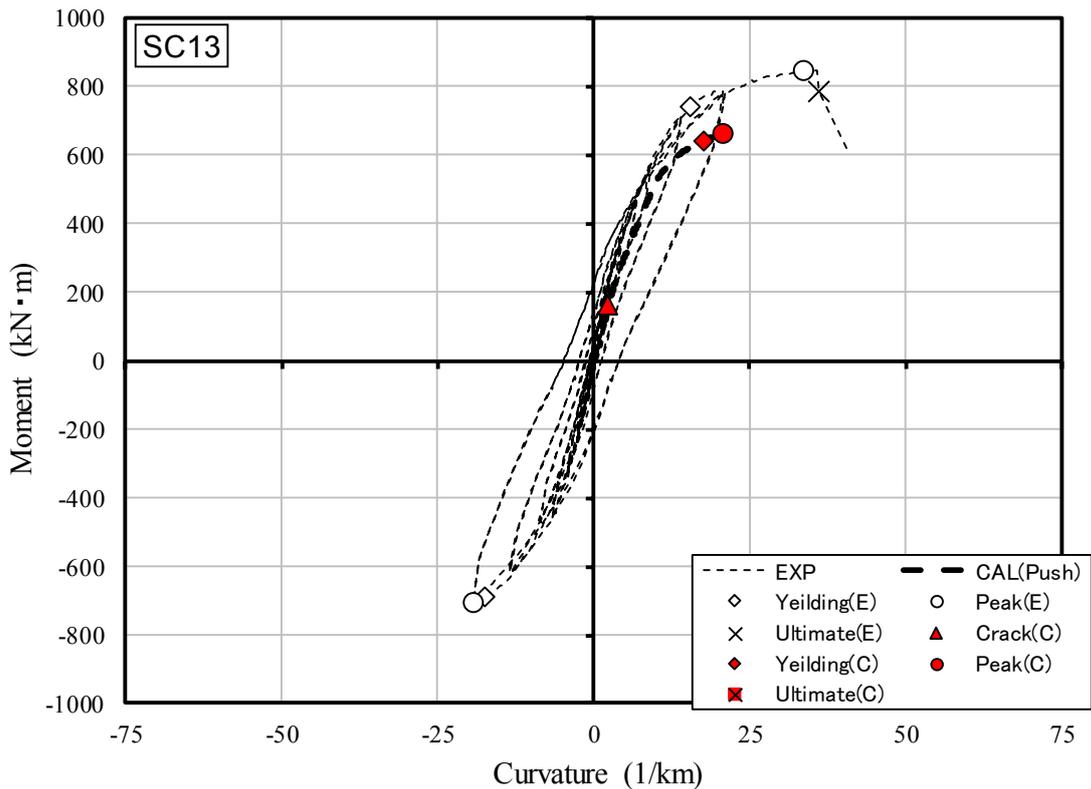


(b) SC11

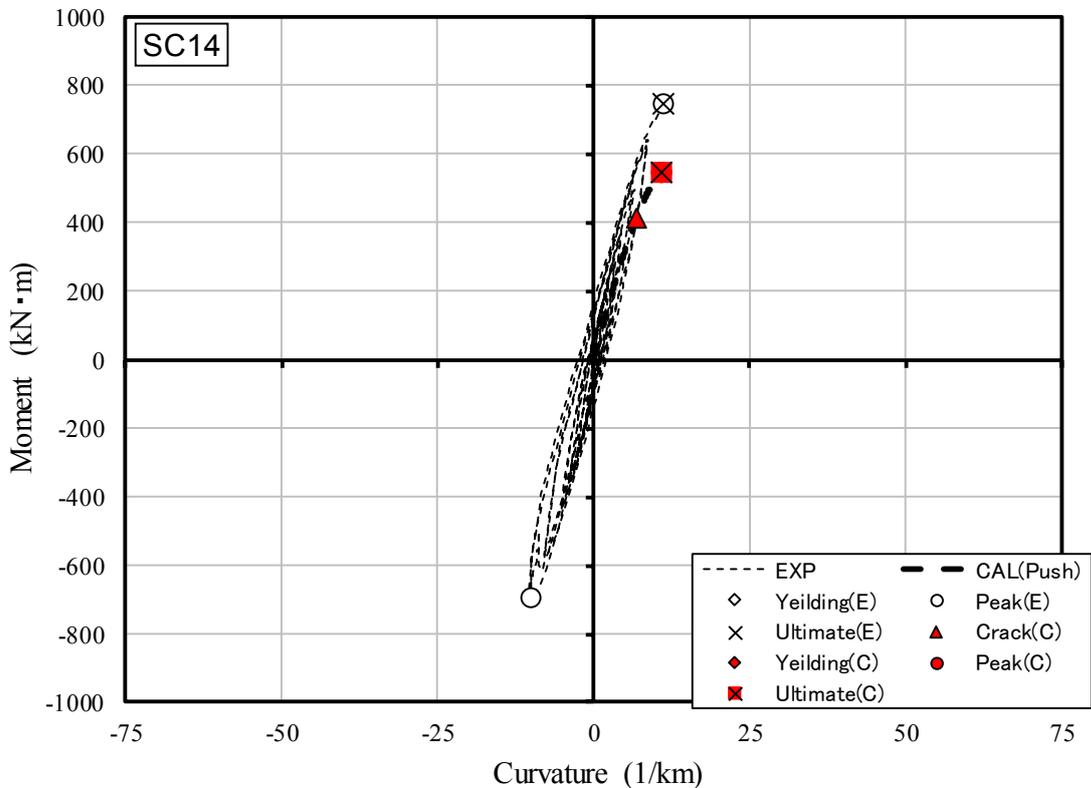


(c) SC12

図 2.5.5 モーメント- ϕ D 関係の比較 (SC 杭) (次項に続く)

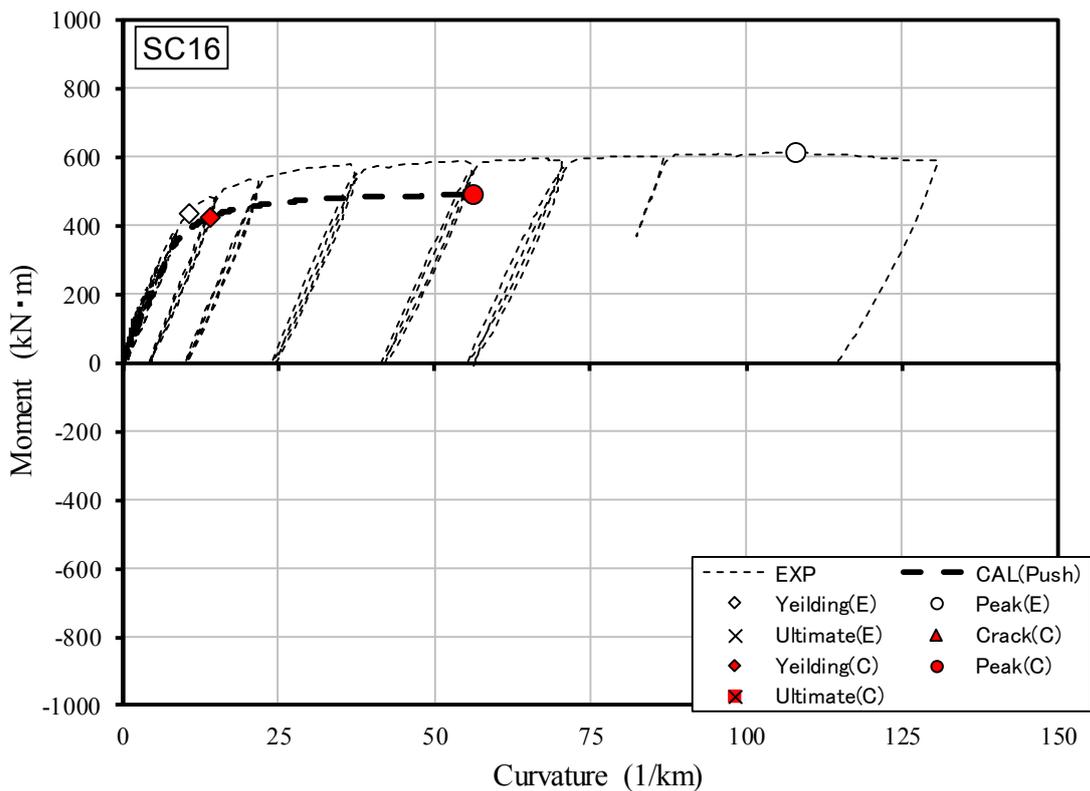


(d) SC13

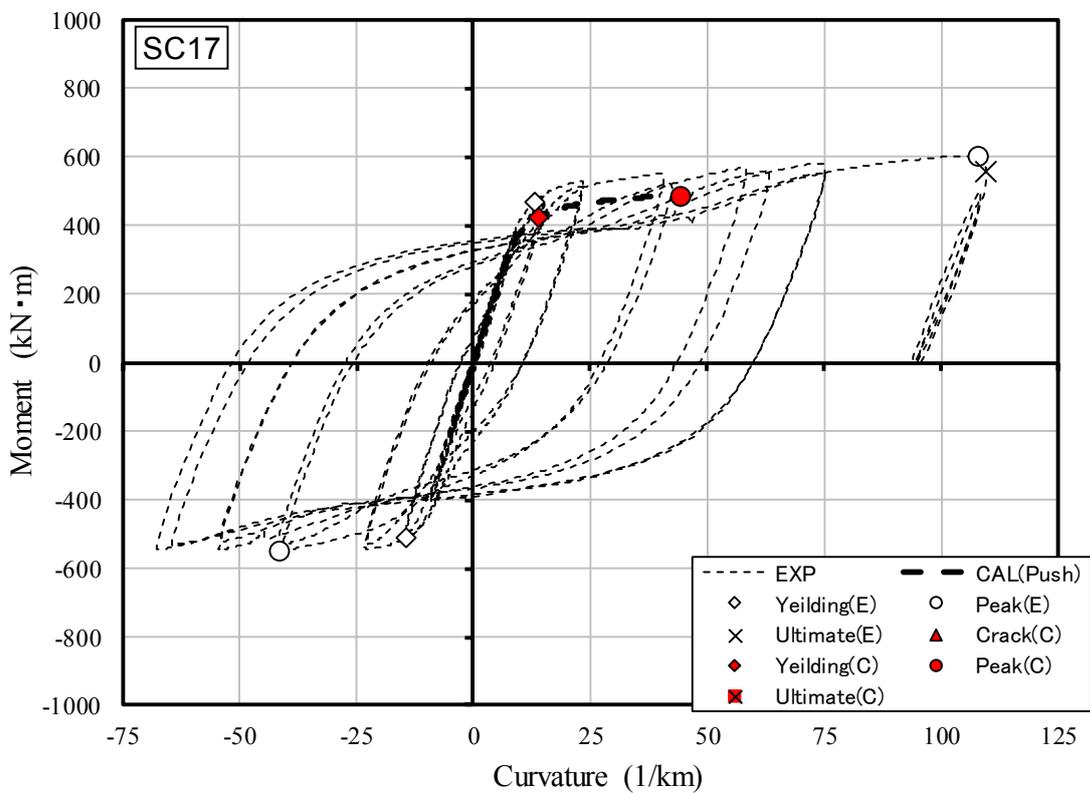


(e) SC14

図 2.5.5 モーメント- ϕ D 関係の比較 (SC 杭) (次項に続く)

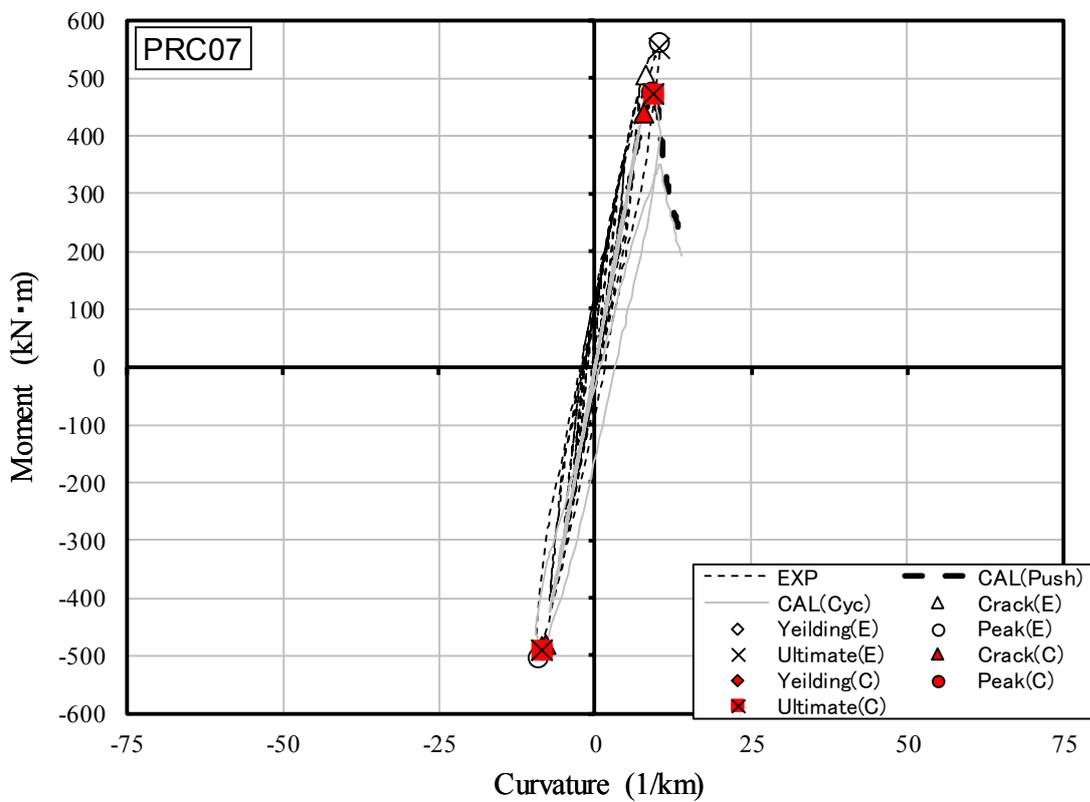
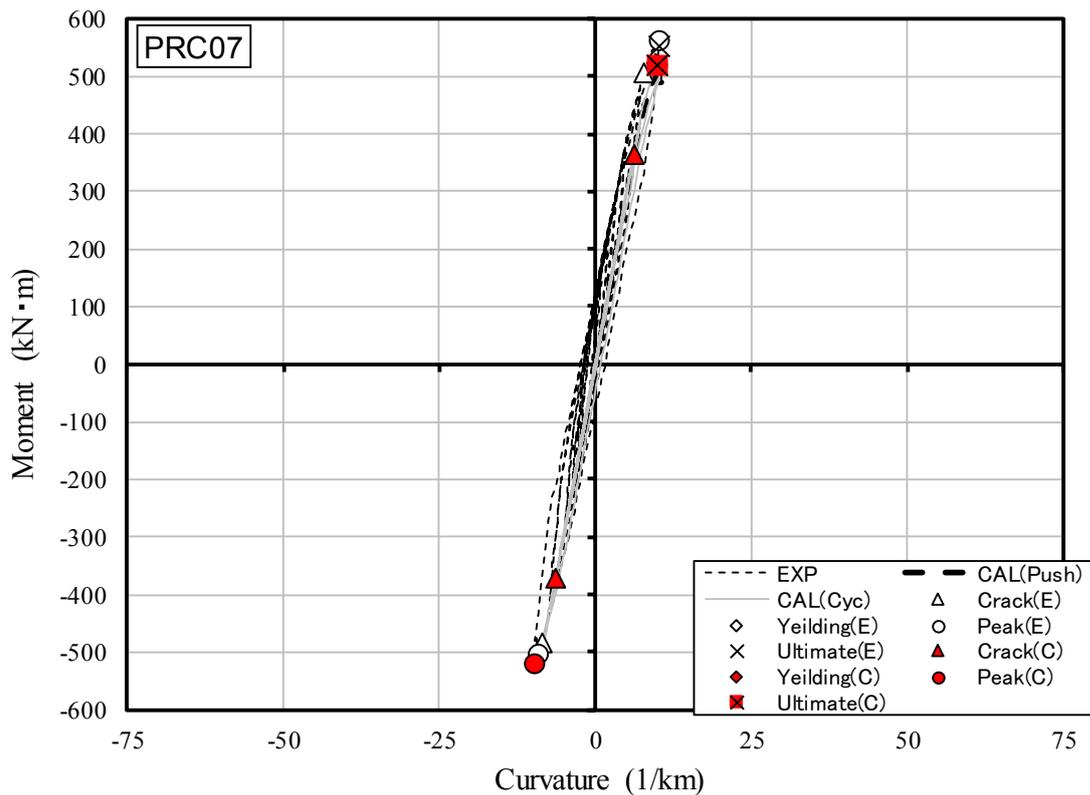


(f) SC16



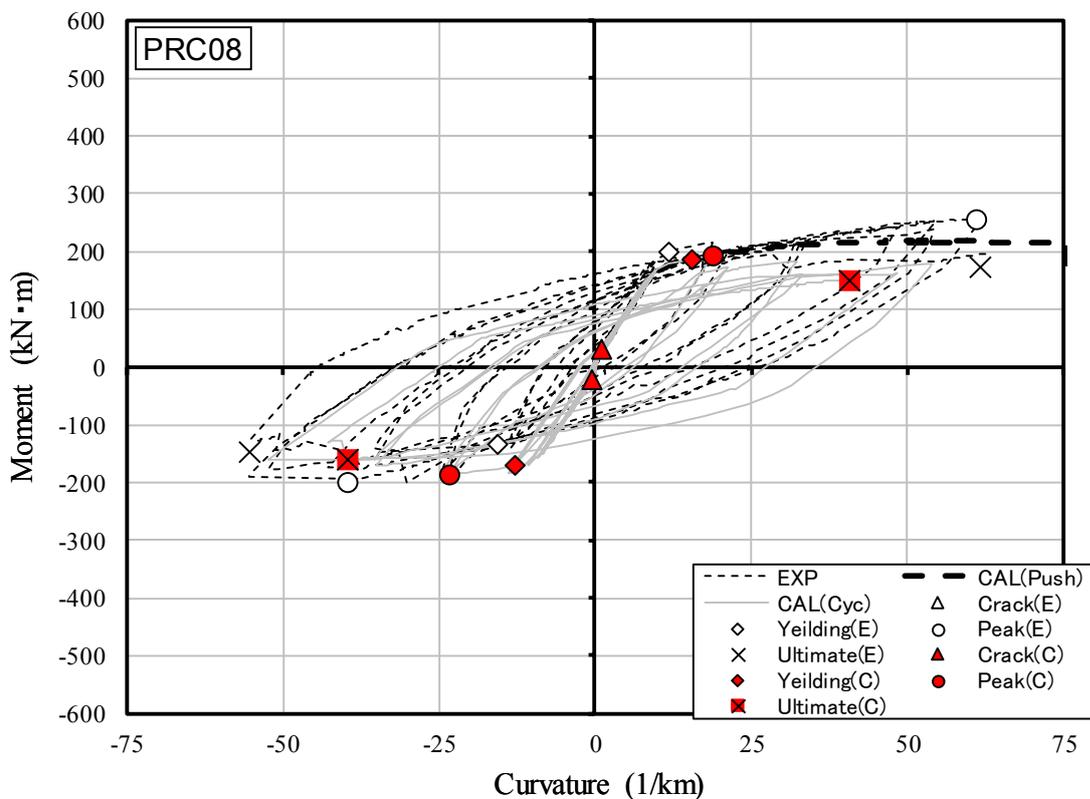
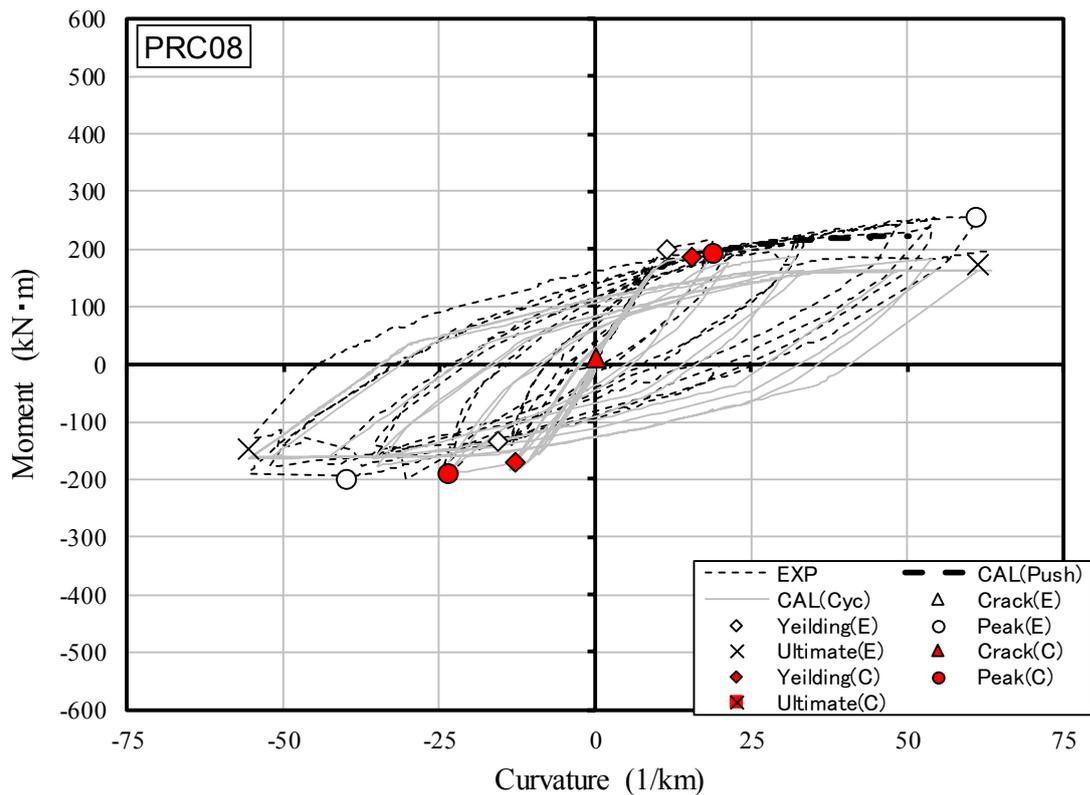
(g) SC17

図 2.5.5 モーメント- ϕ D 関係の比較 (SC 杭)



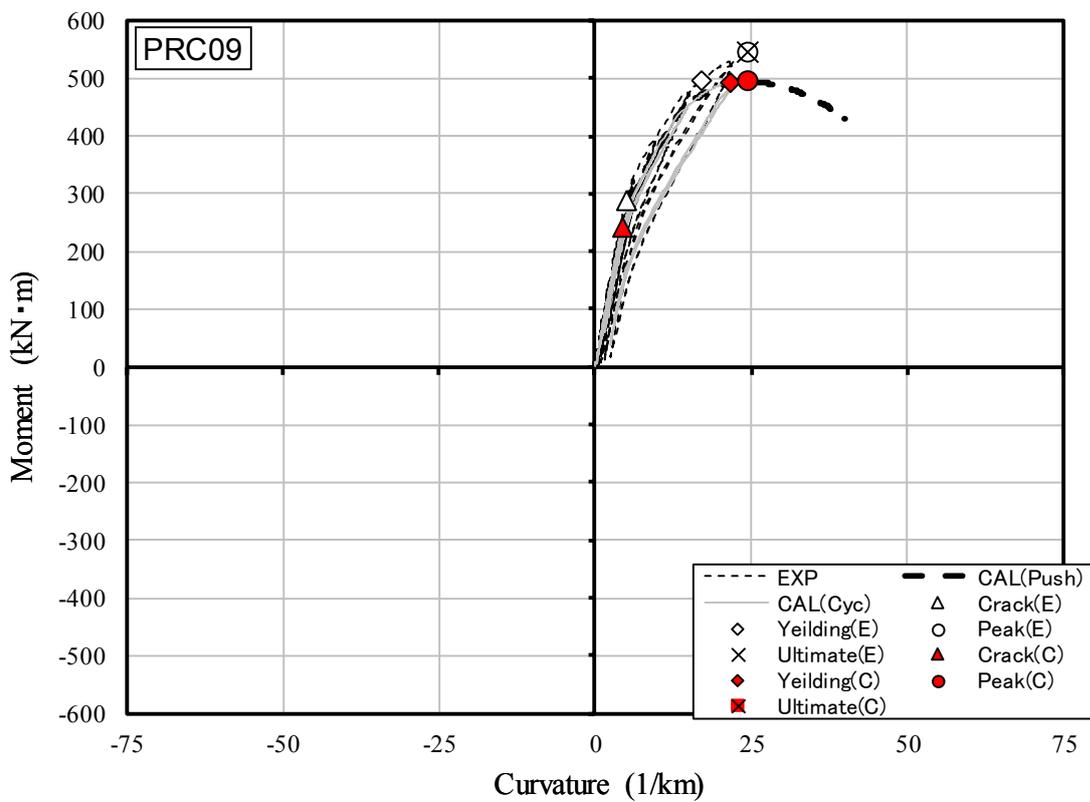
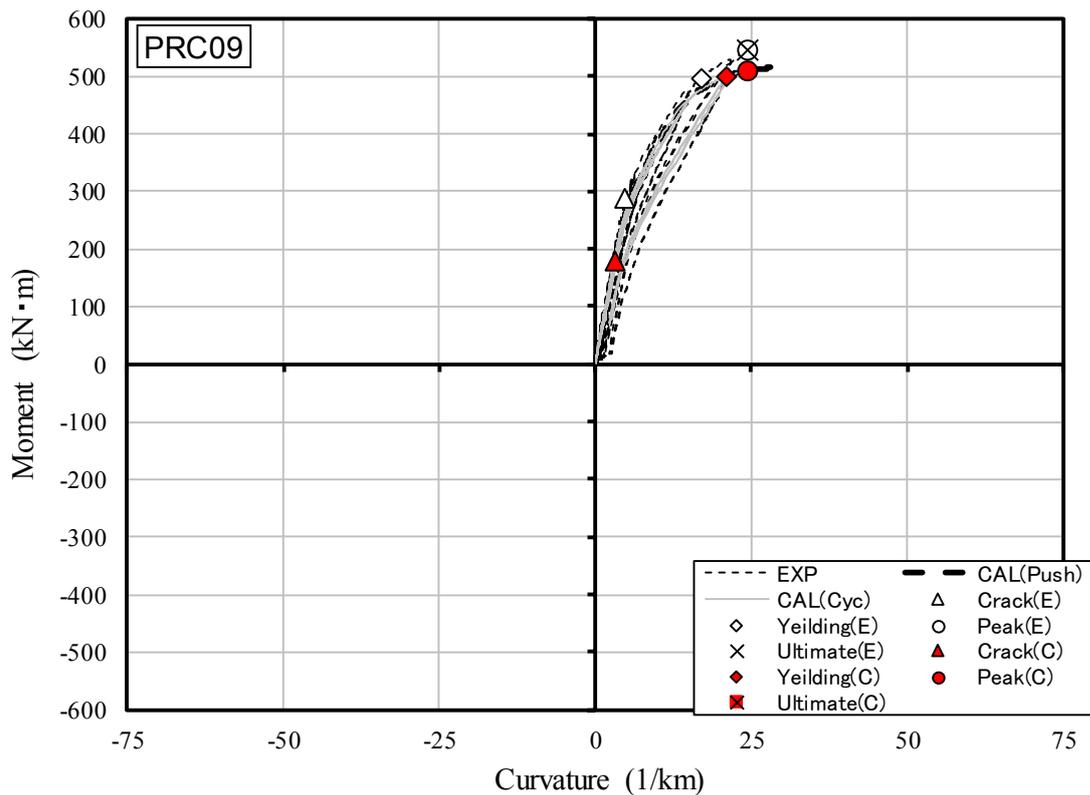
(a) PRC07

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



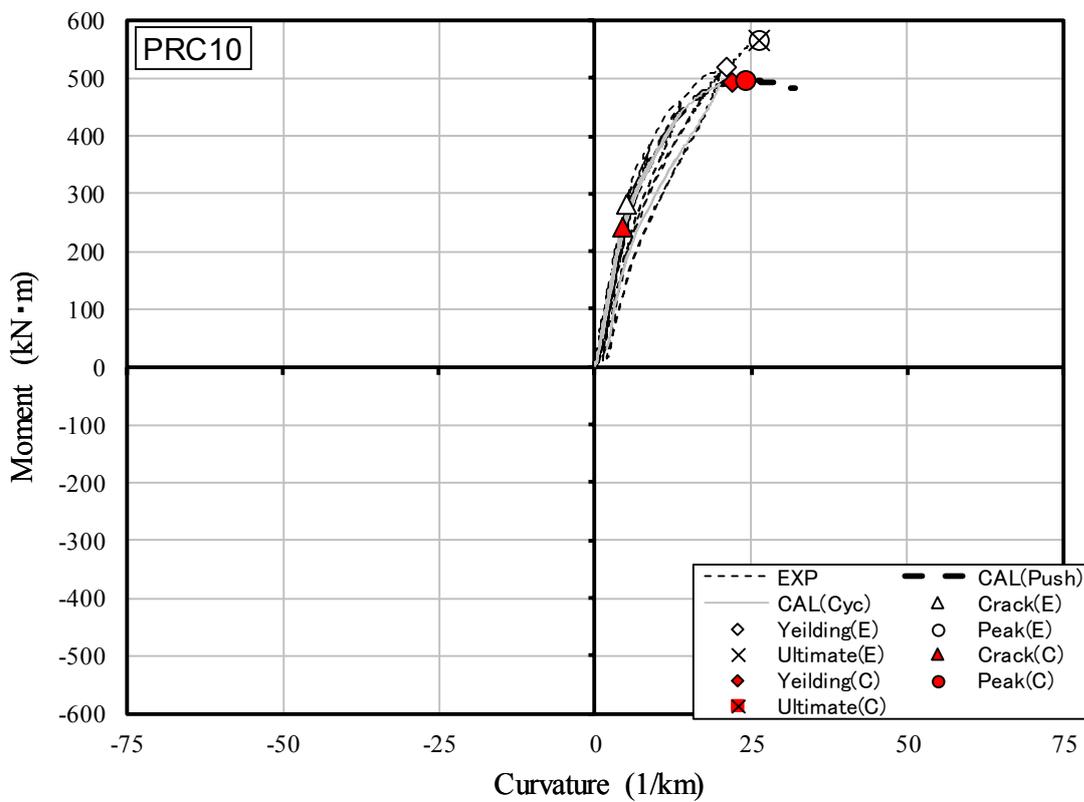
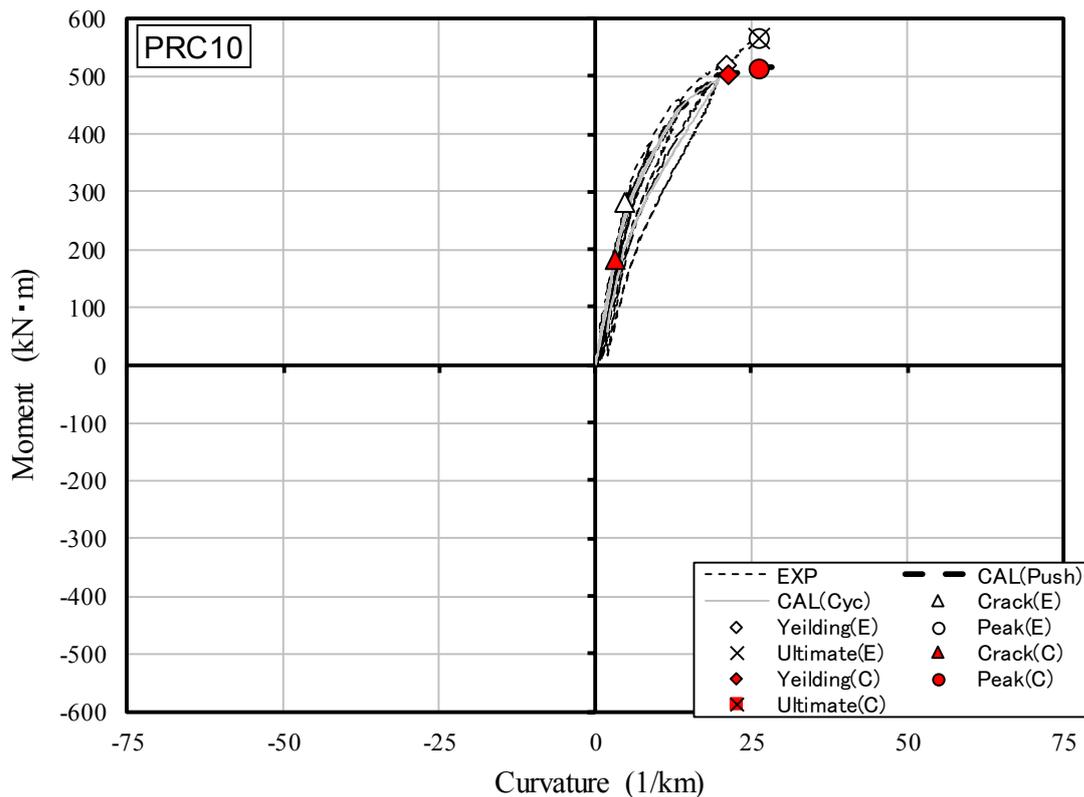
(b) PRC08

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



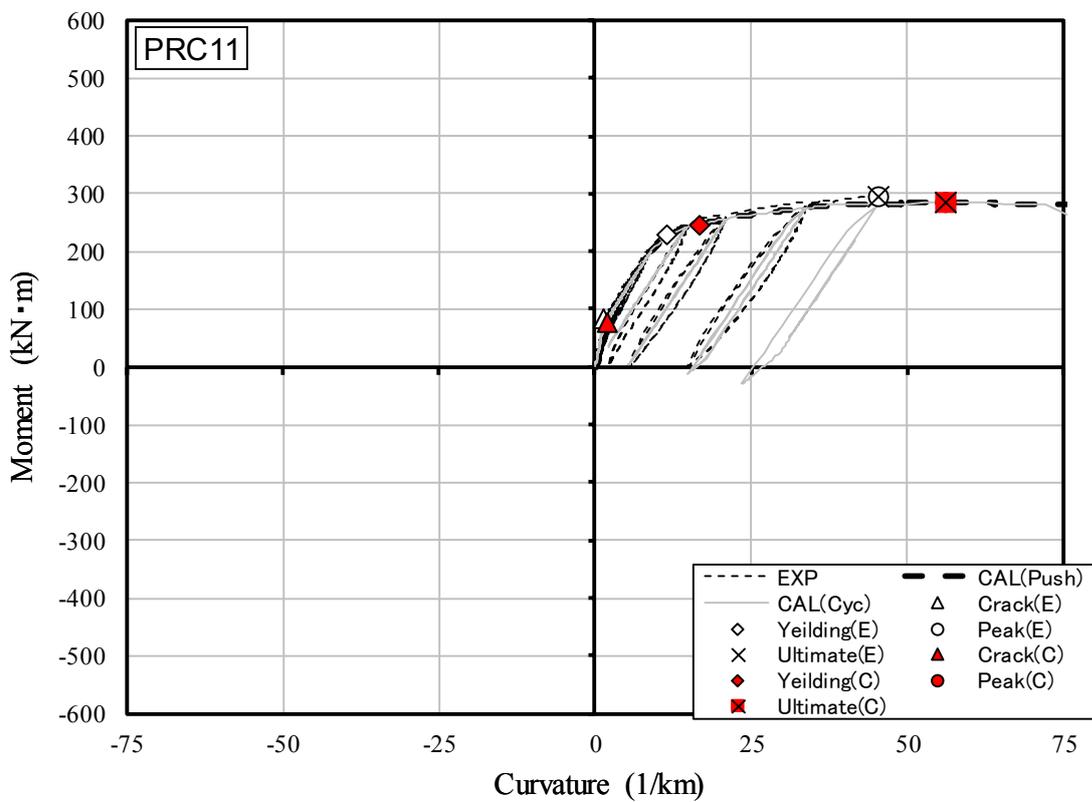
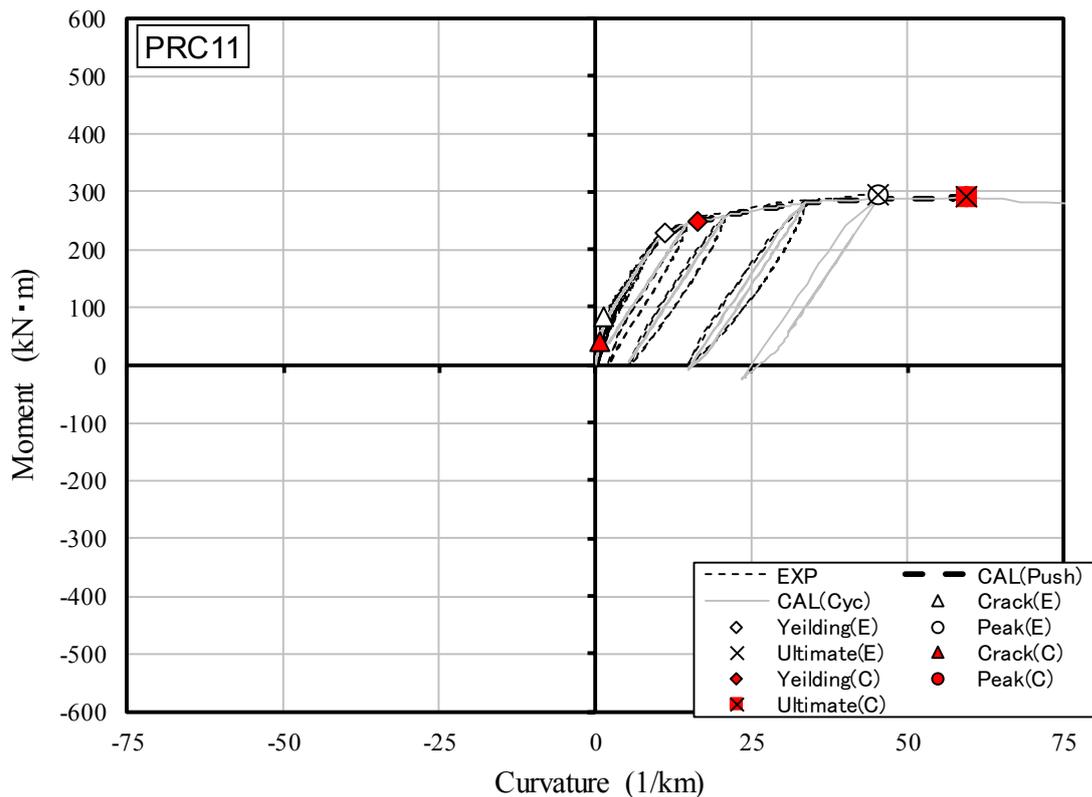
(c) PRC09

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



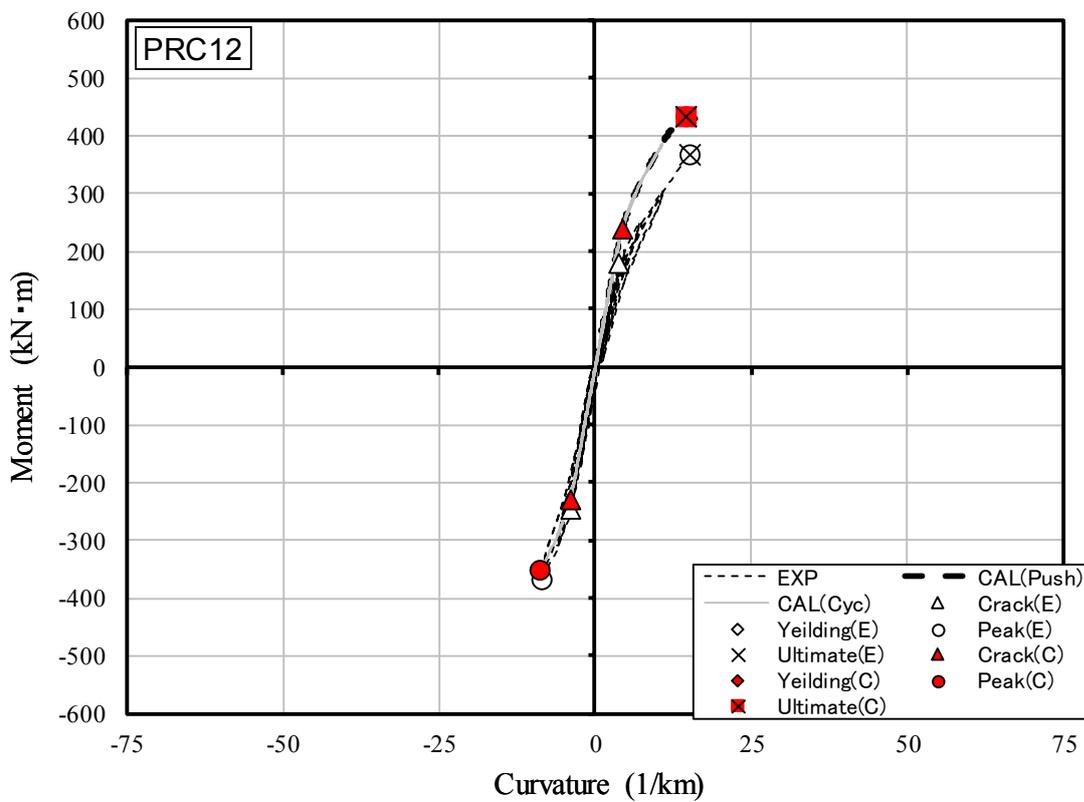
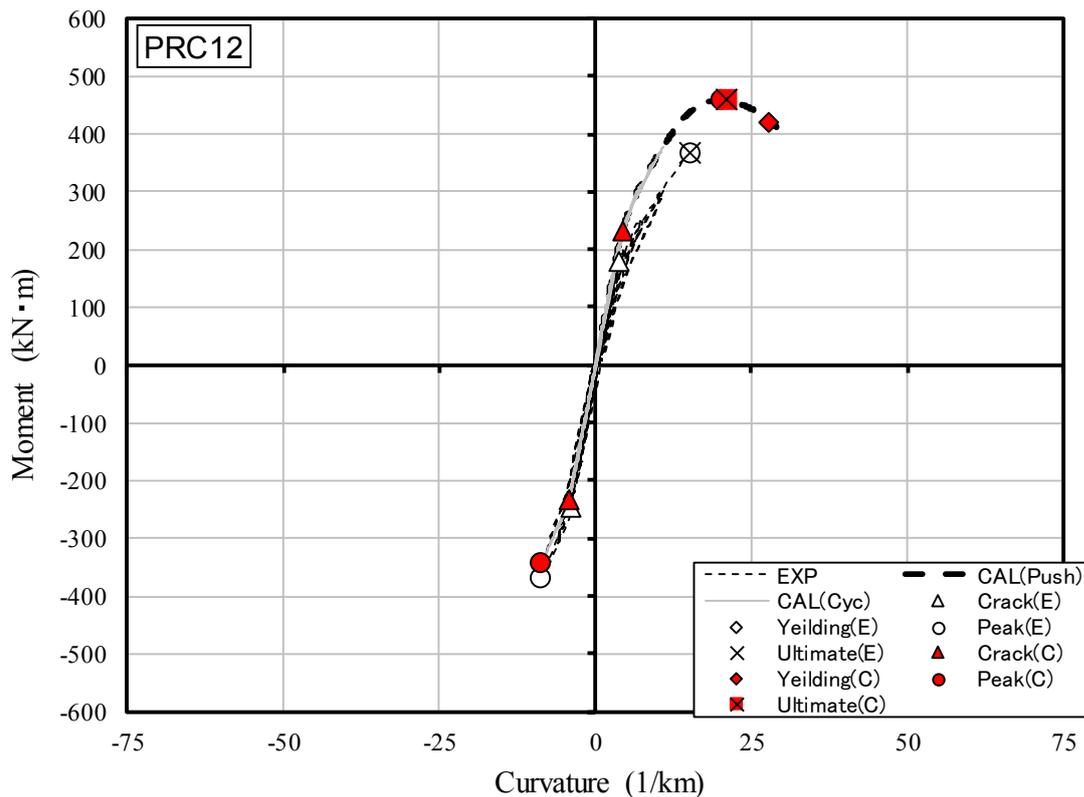
(d) PRC10

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



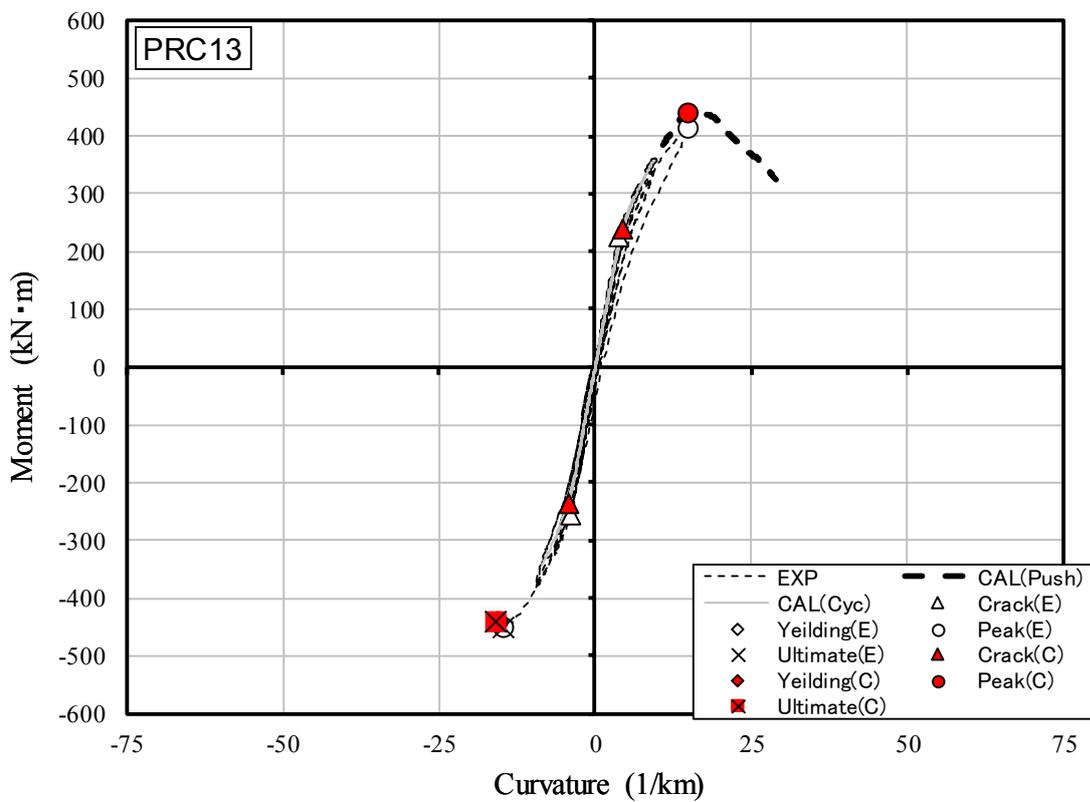
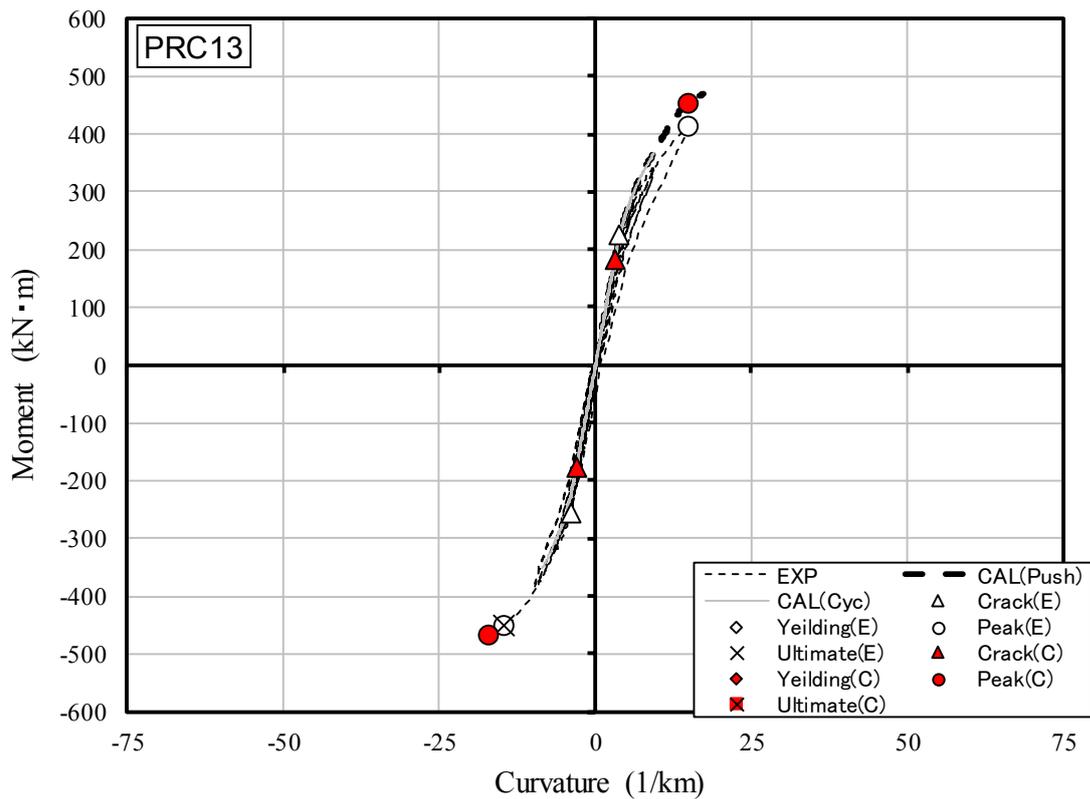
(e) PRC11

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



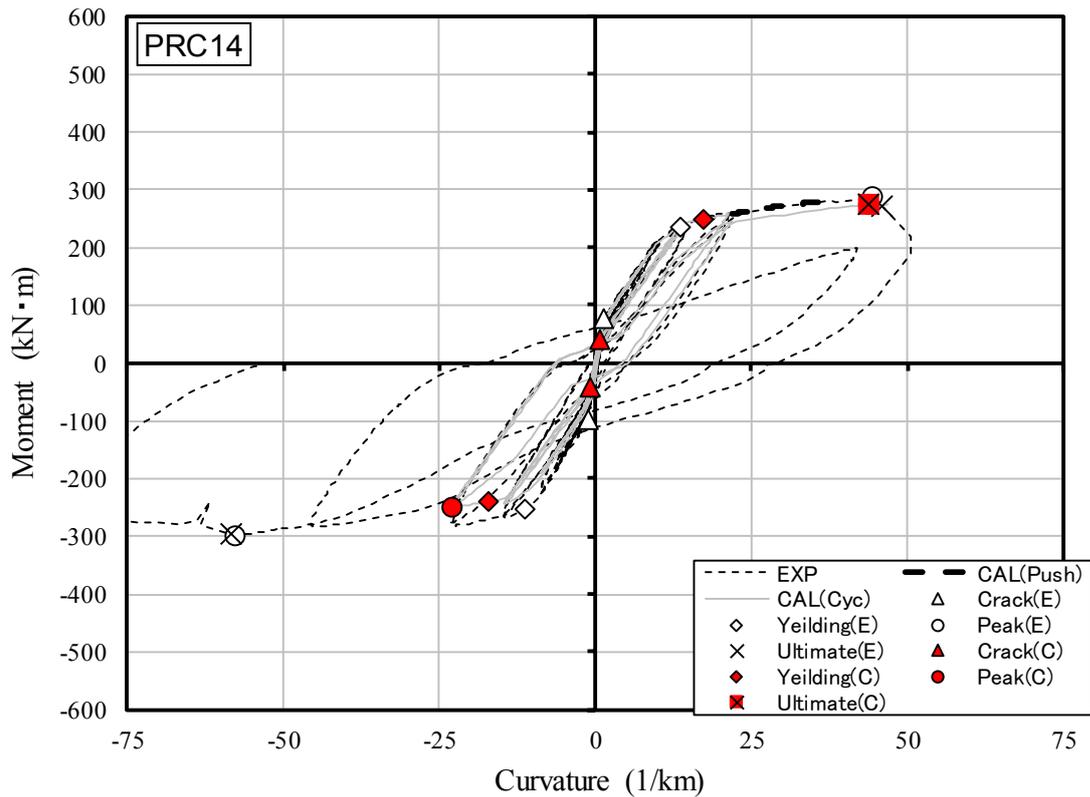
(f) PRC12

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)

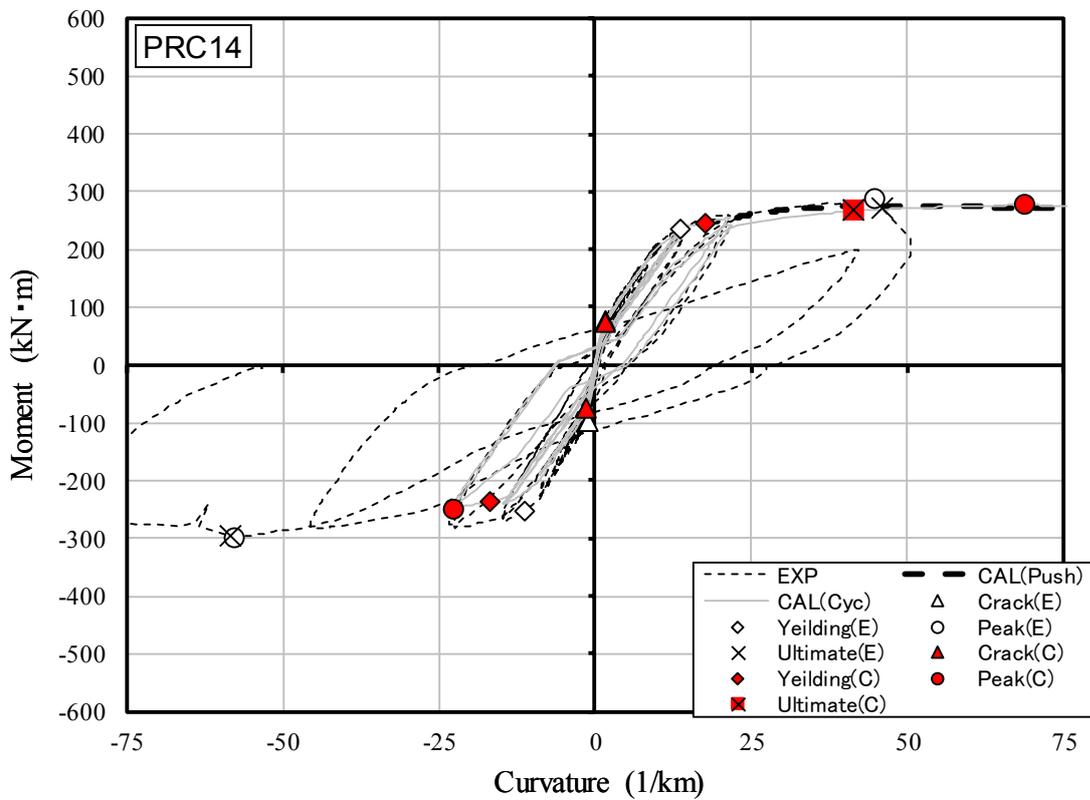


(g) PRC13

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



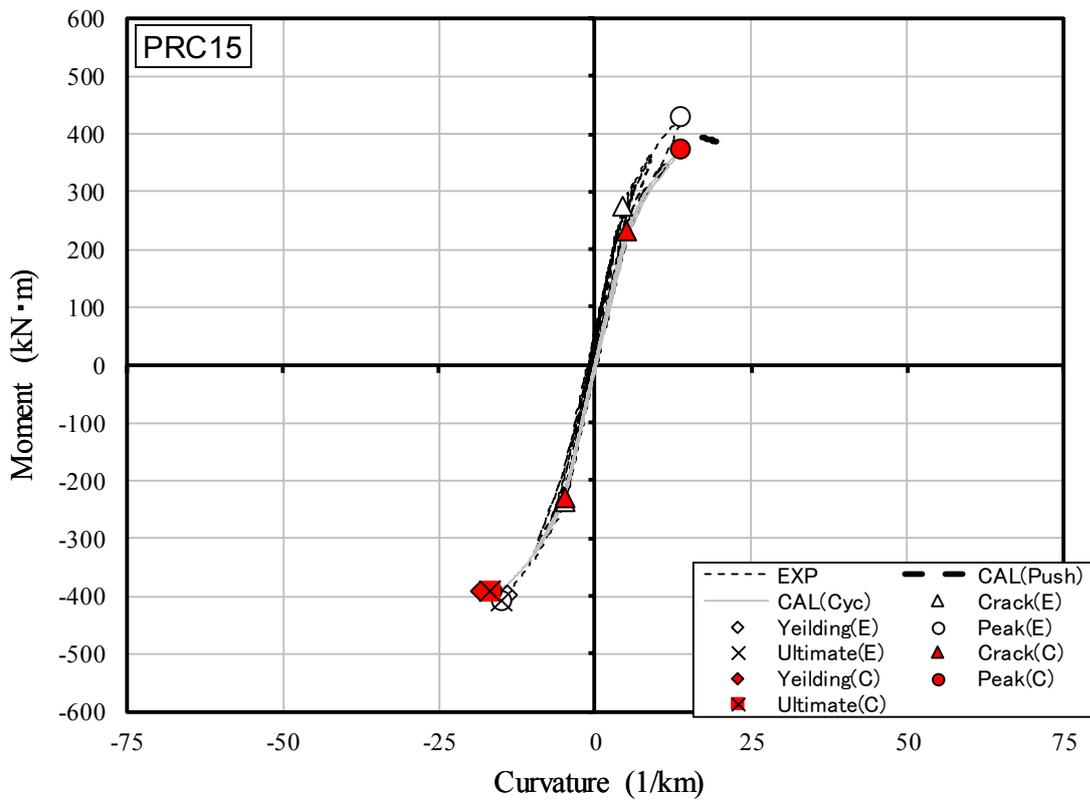
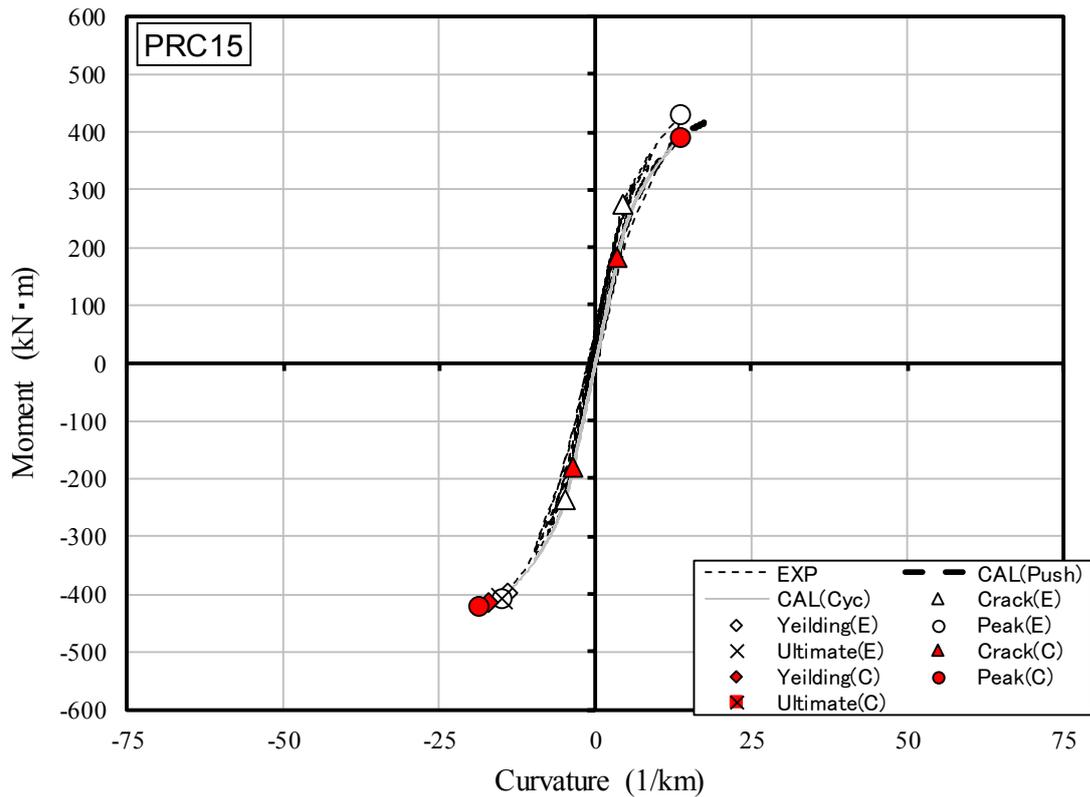
Case 1



Case 2

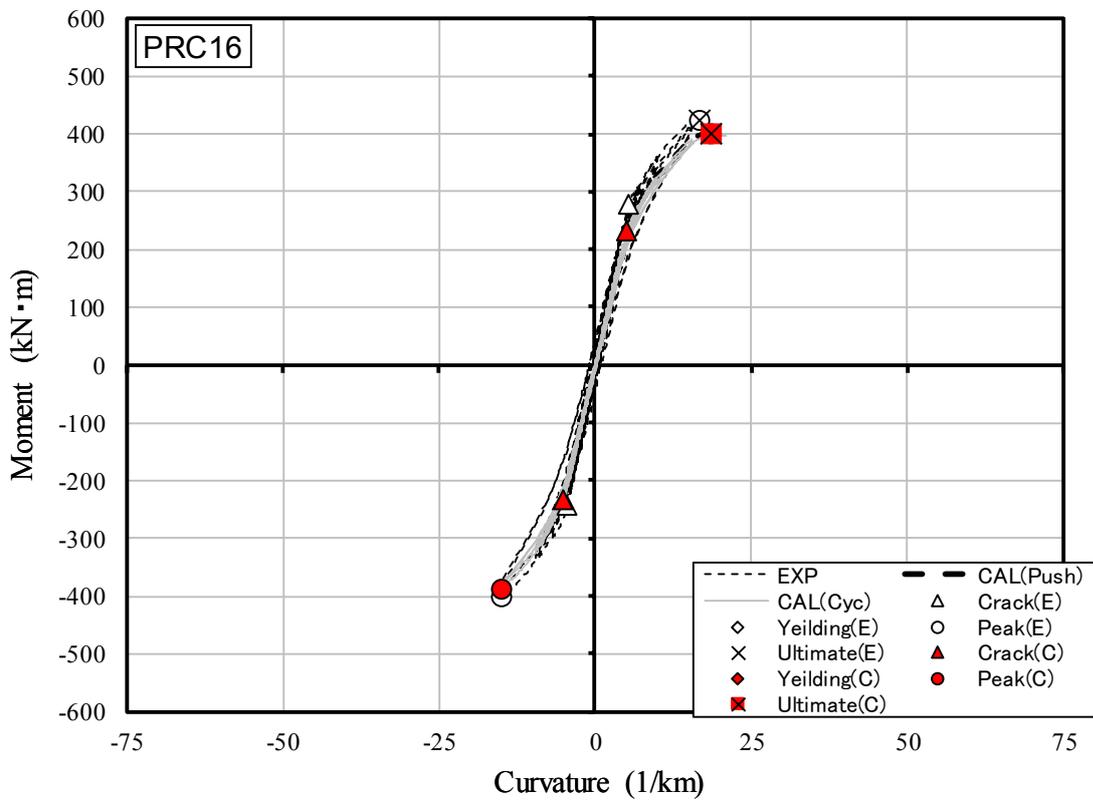
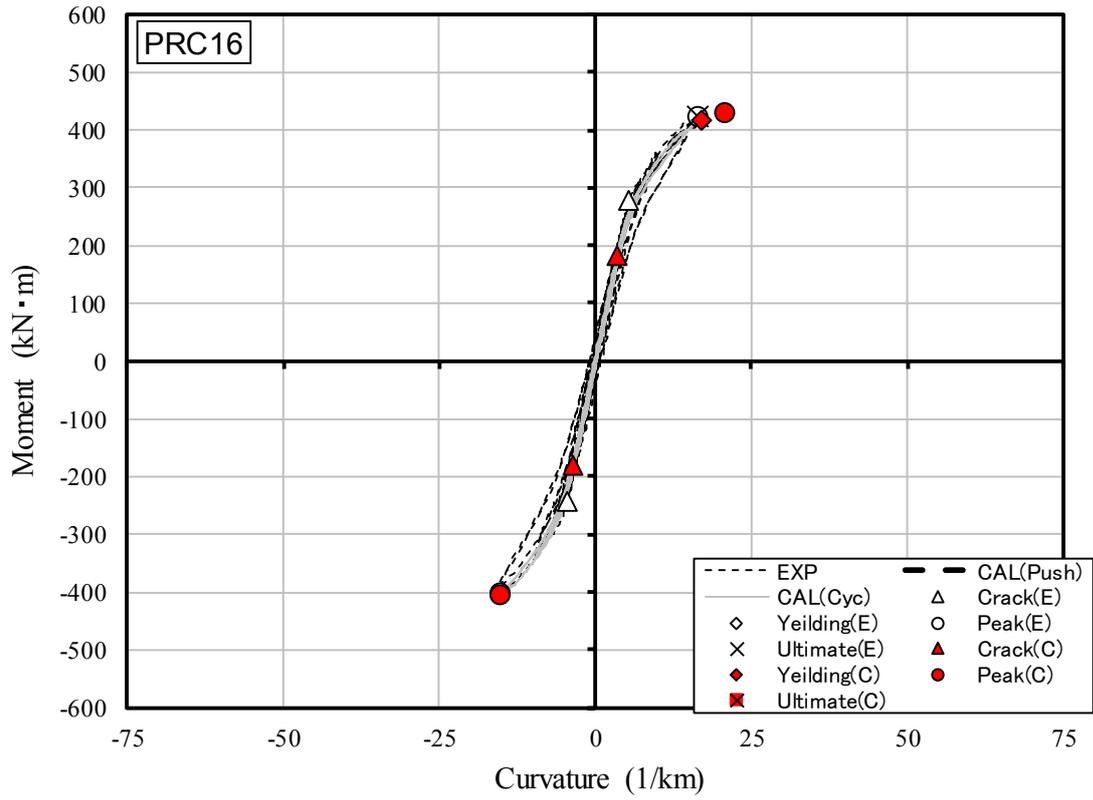
(h) PRC14

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



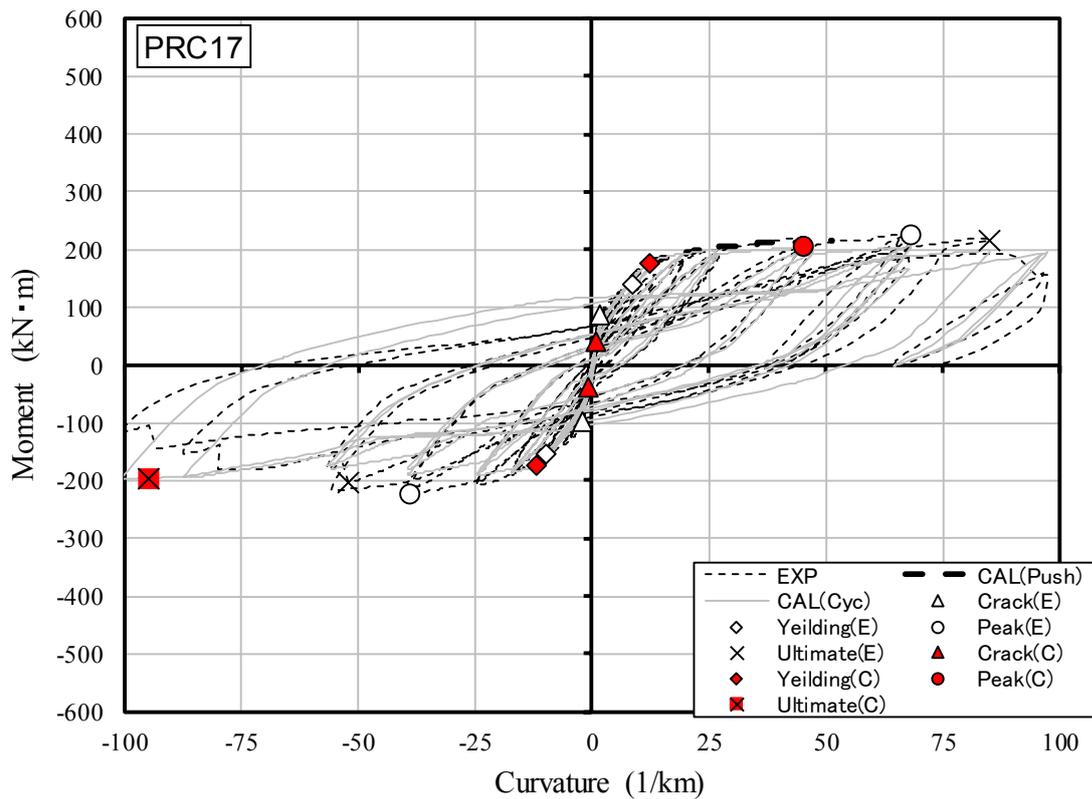
(i) PRC15

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)

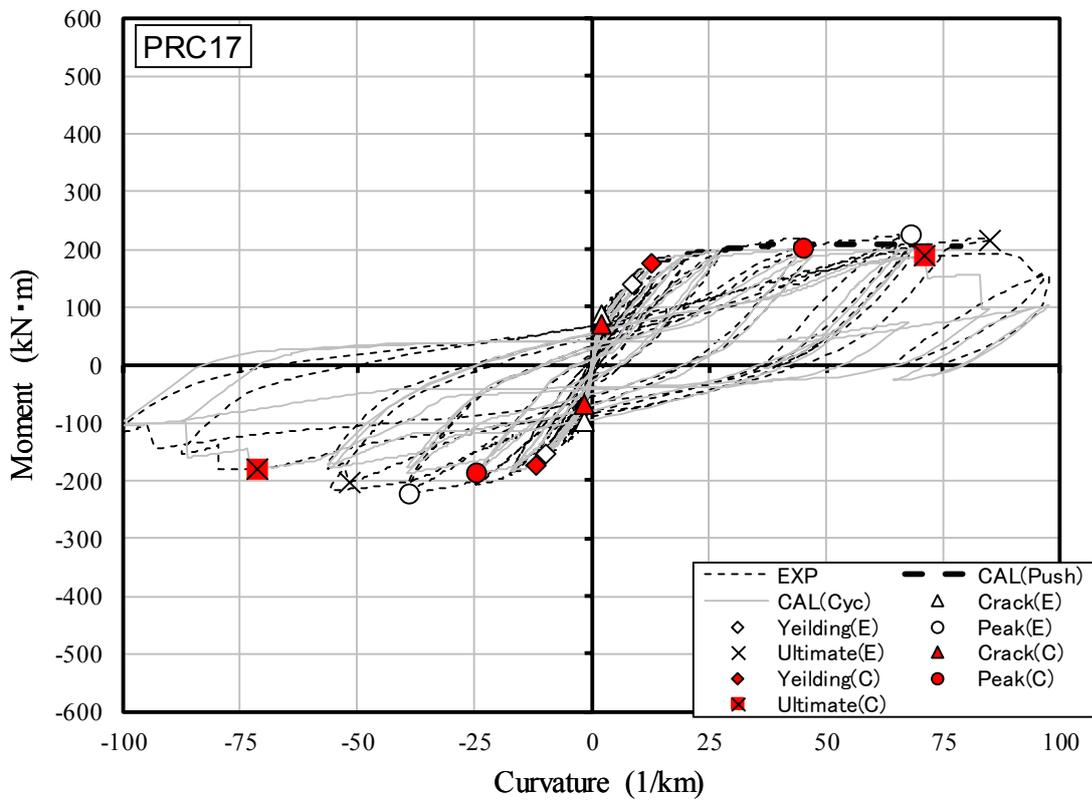


(j) PRC16

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



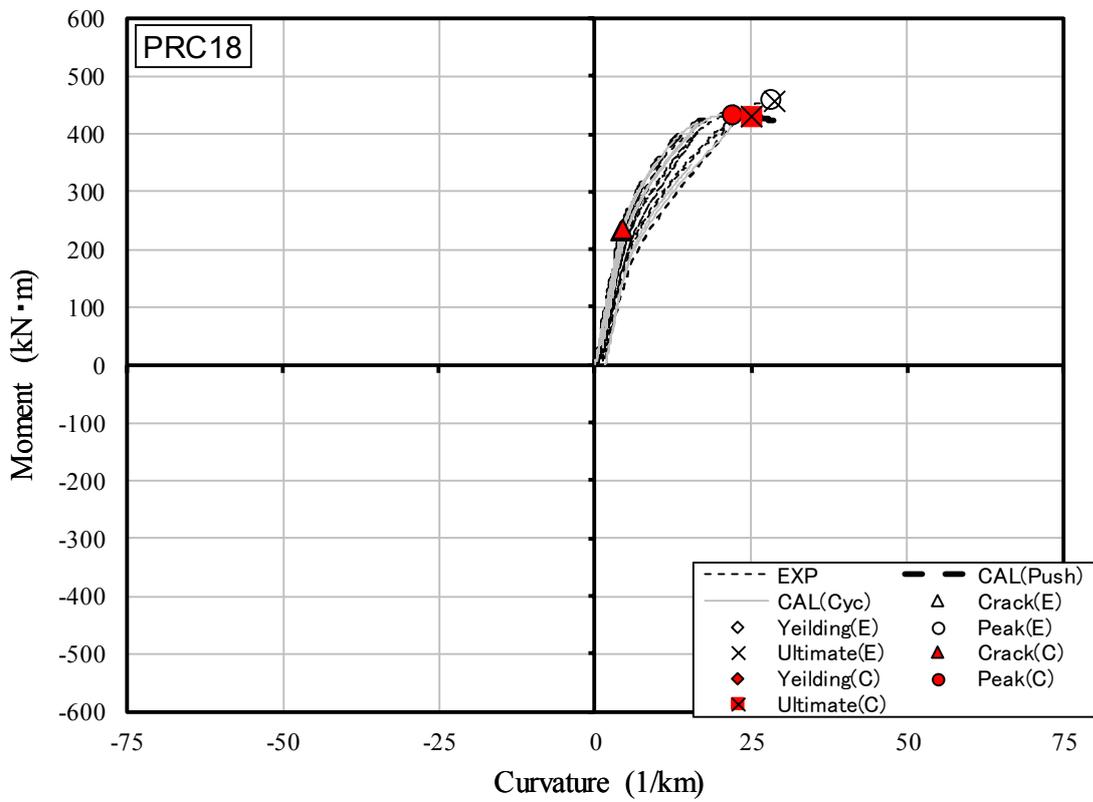
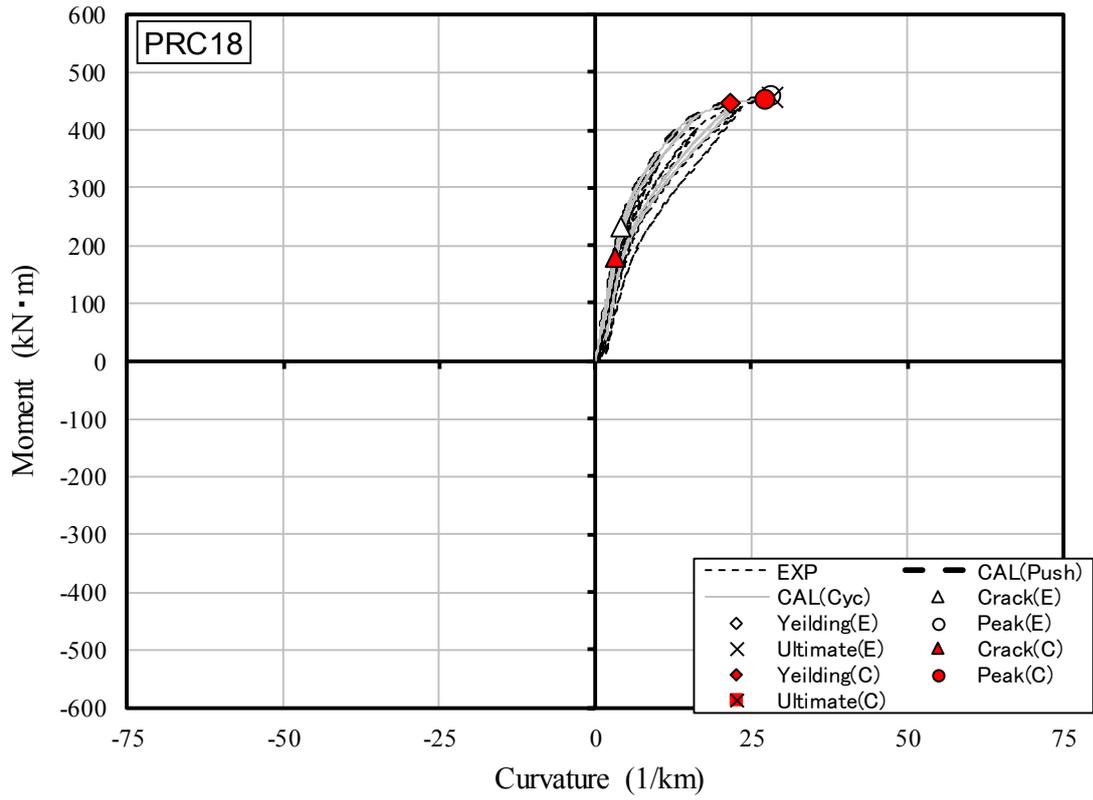
Case 1



Case 2

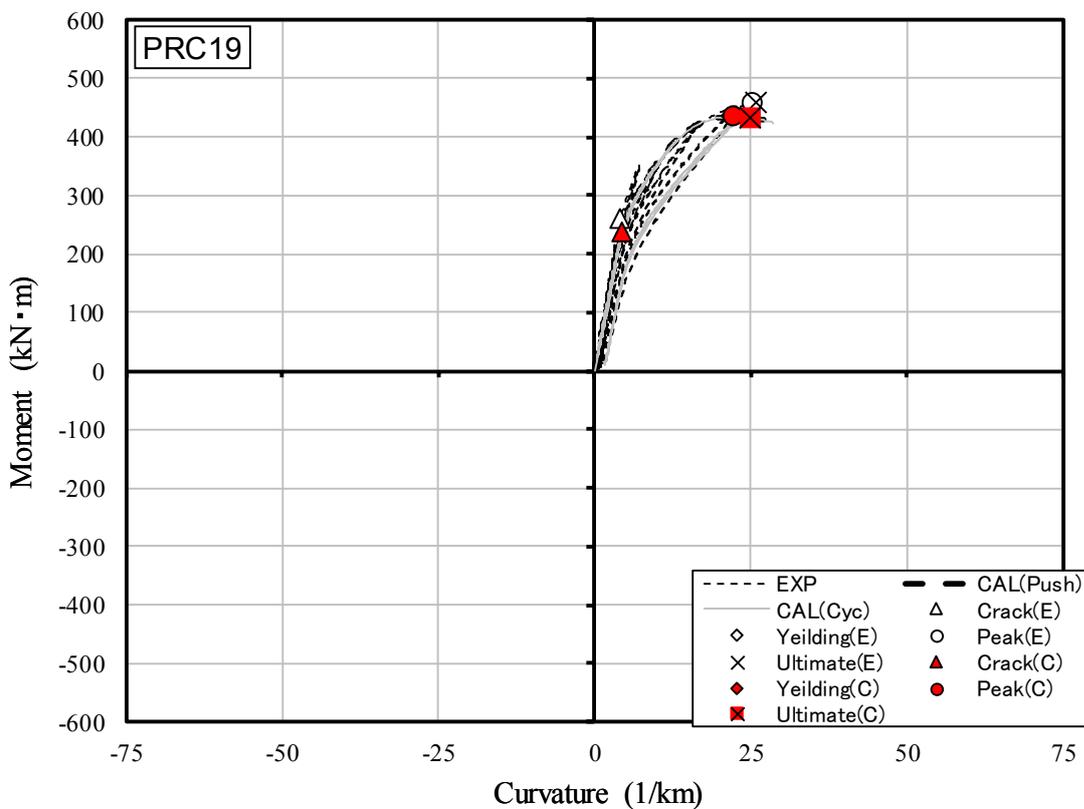
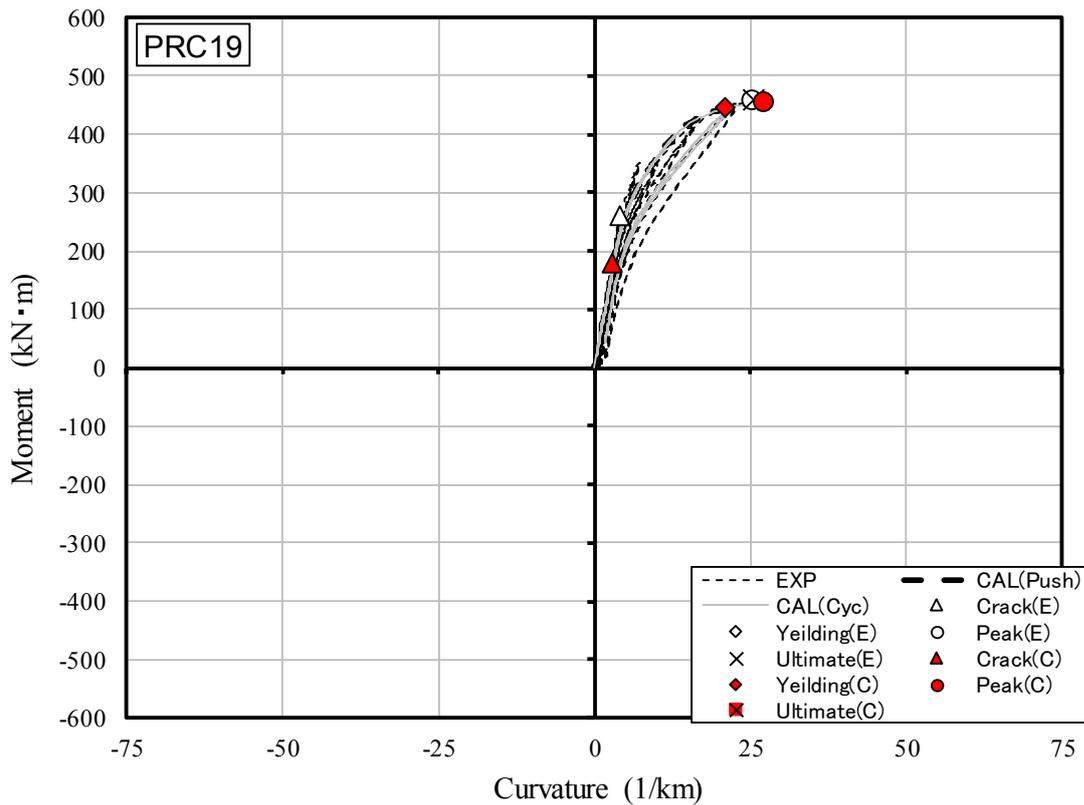
(k) PRC17

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



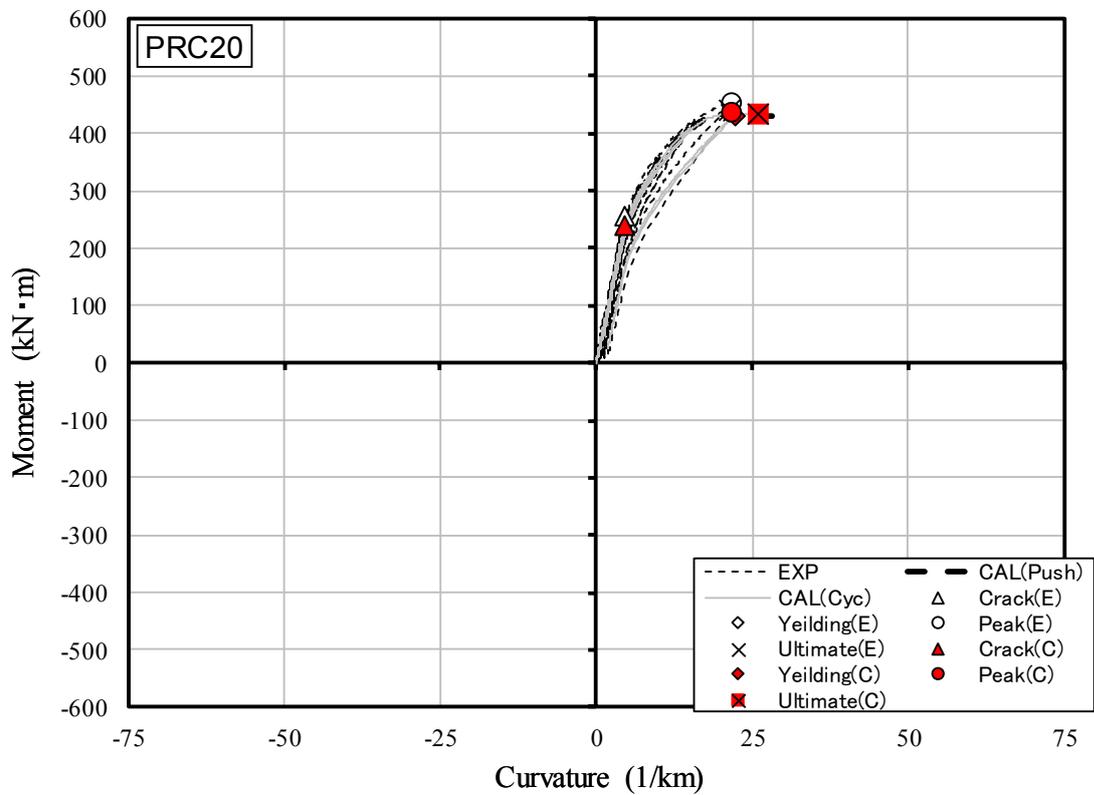
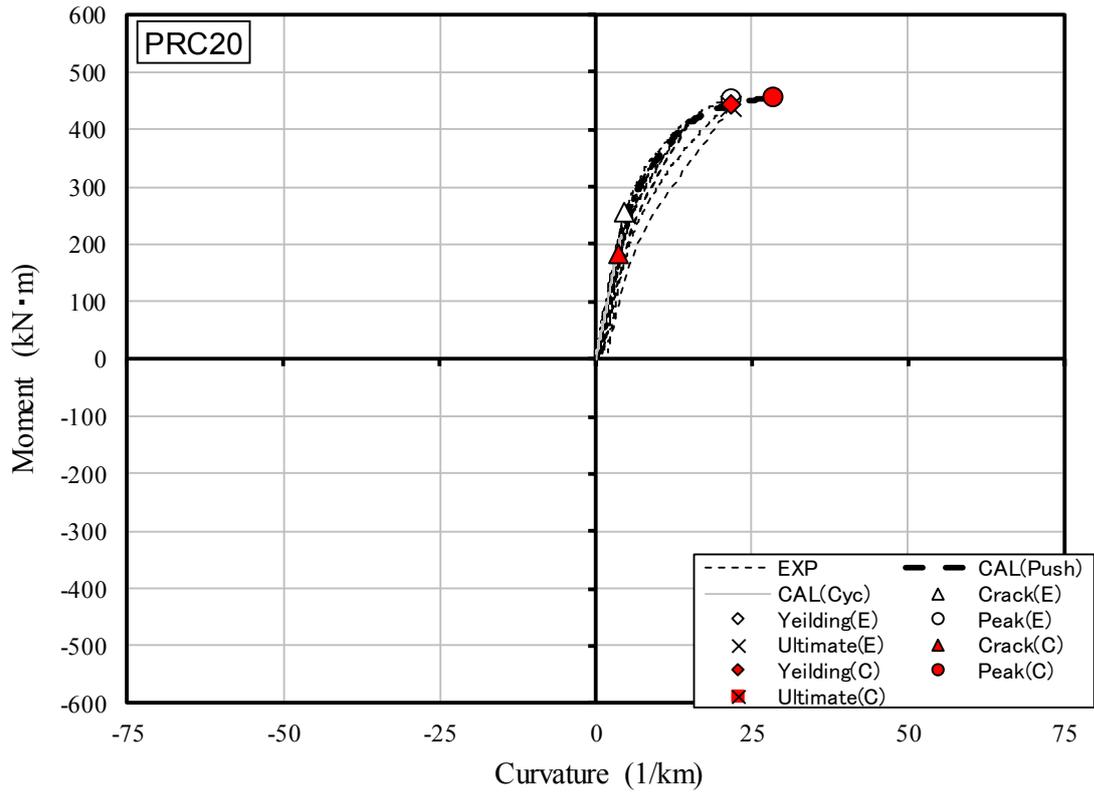
(I) PRC18

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



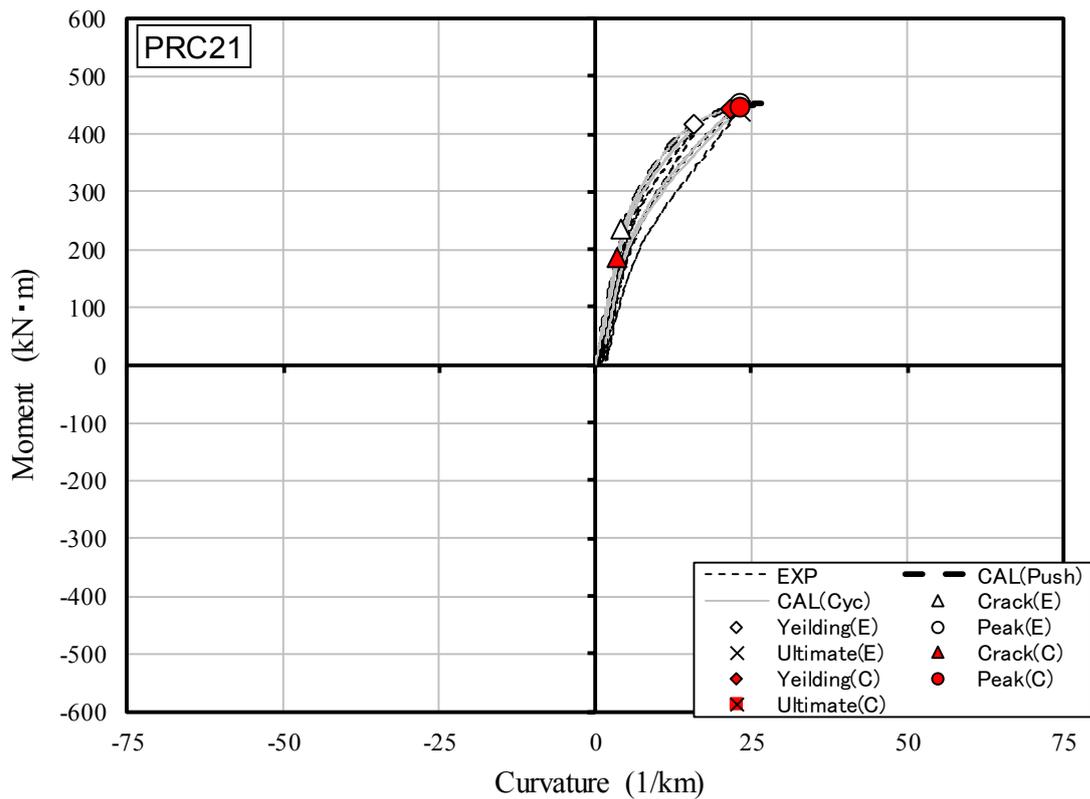
(m) PRC19

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)

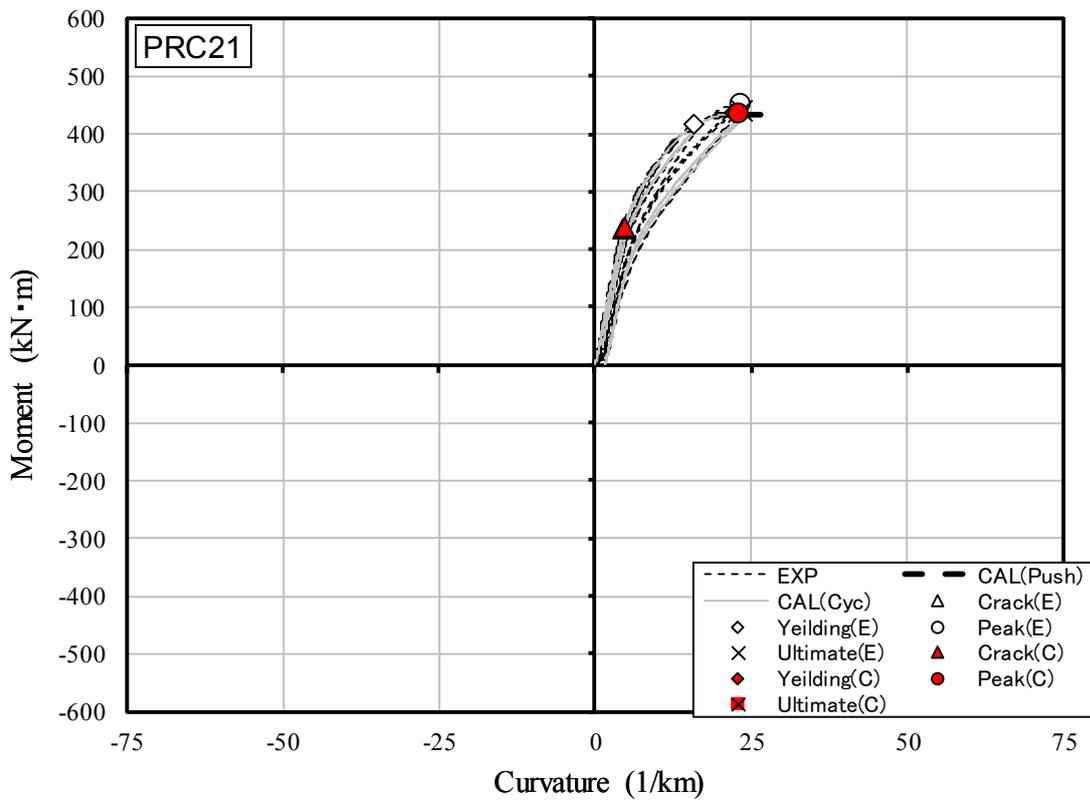


(n) PRC20

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



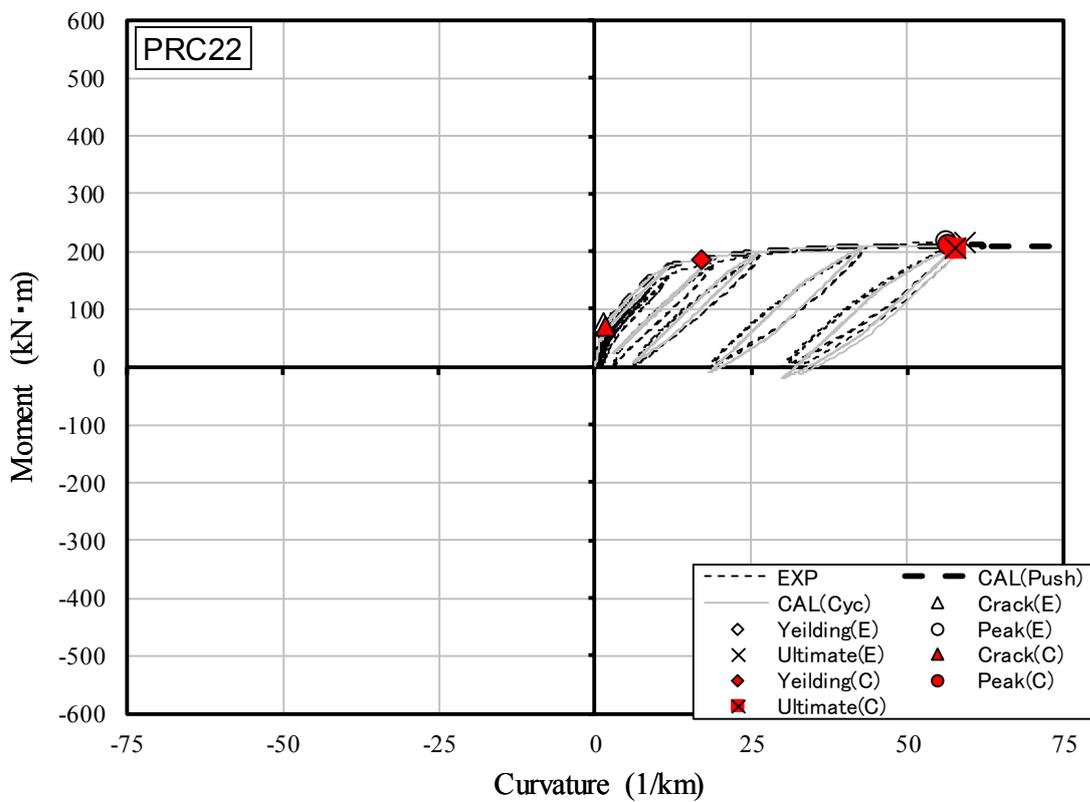
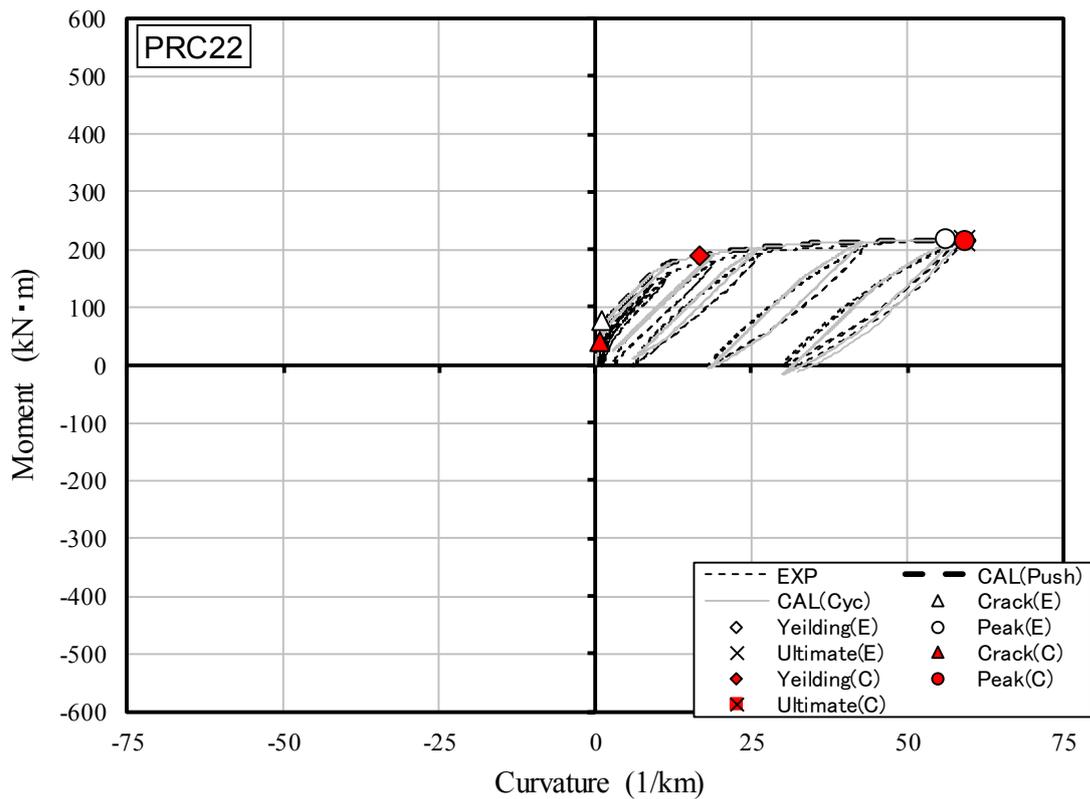
Case 1



Case 2

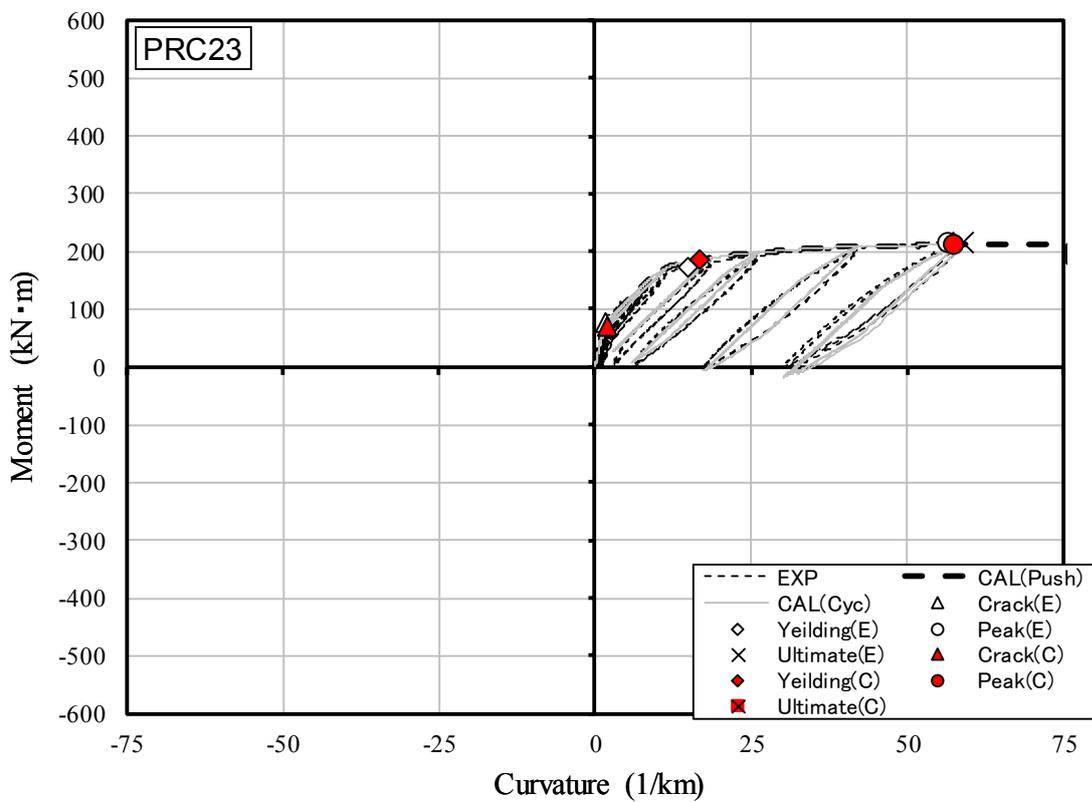
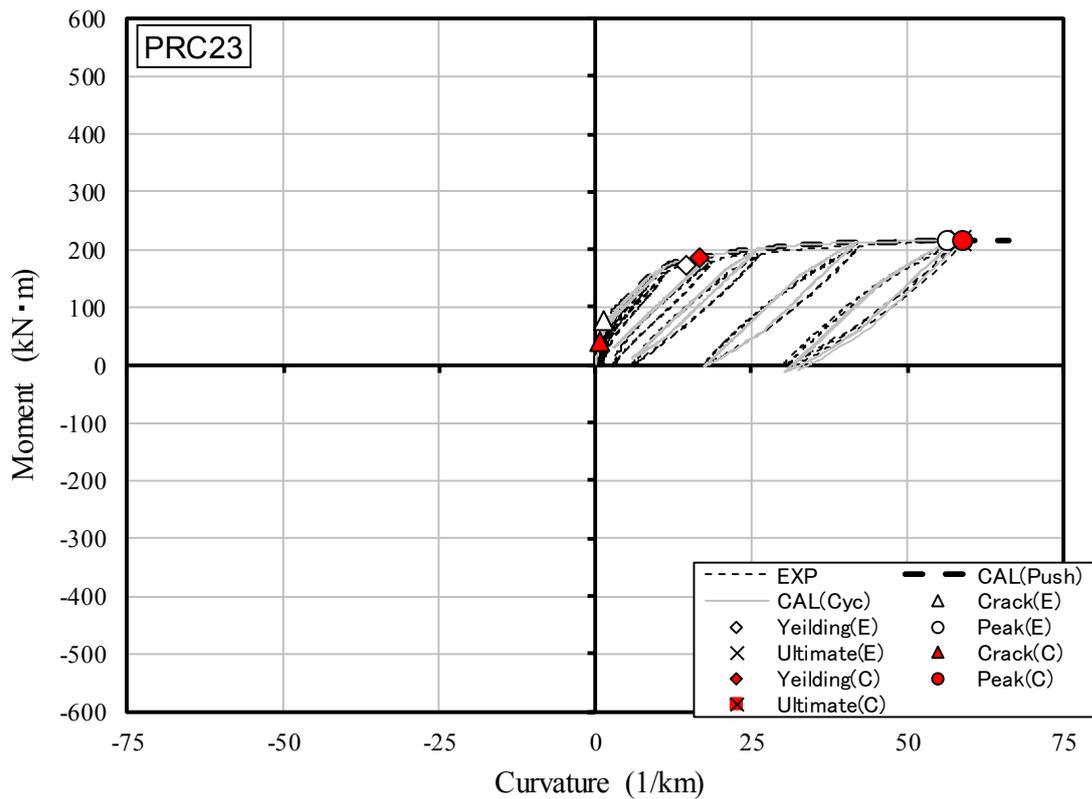
(o) PRC21

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)



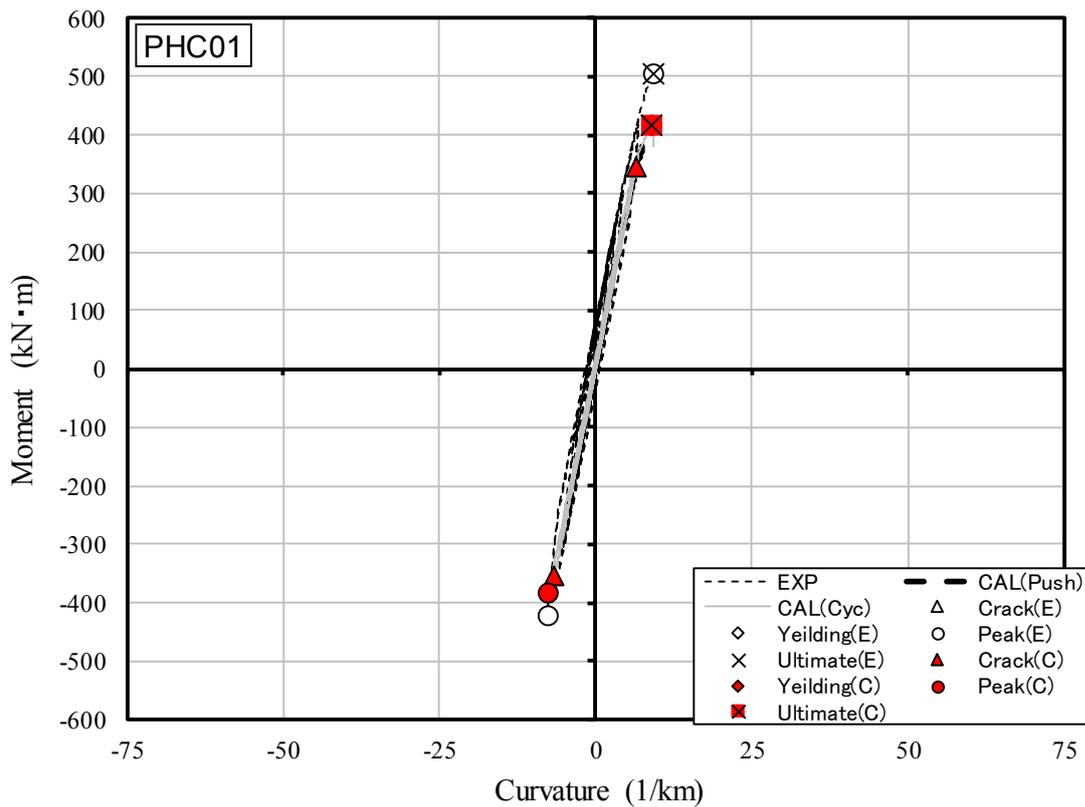
(p) PRC22

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭) (次項に続く)

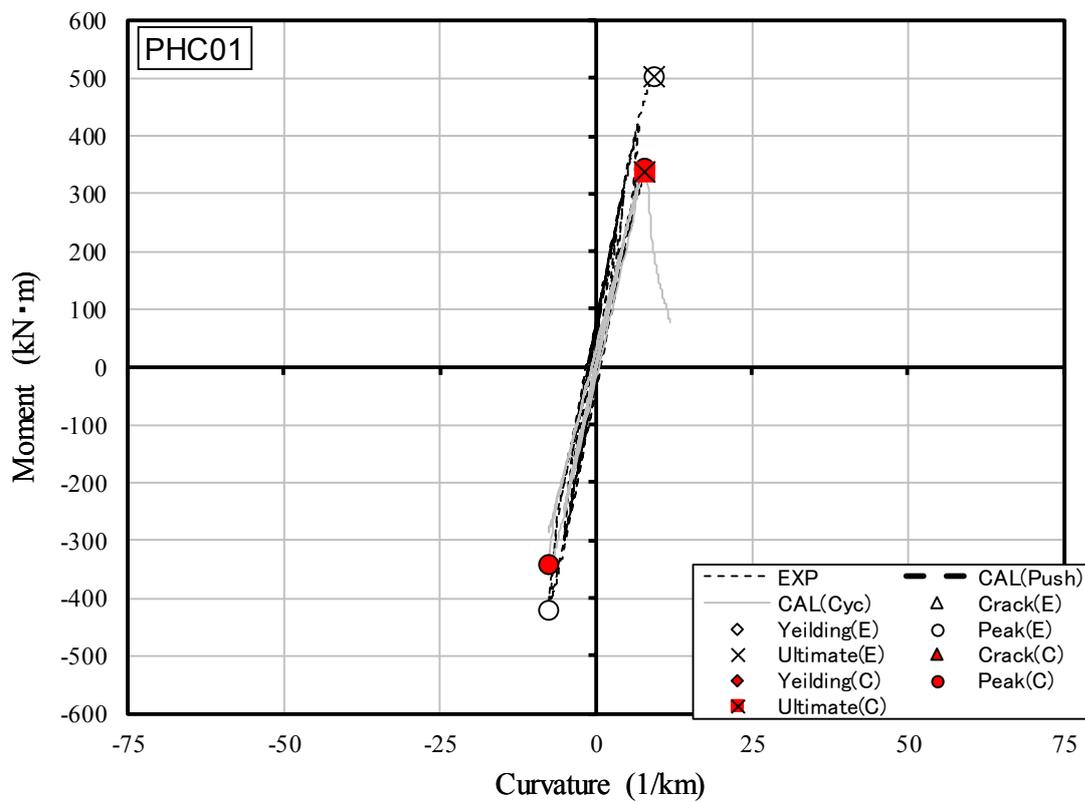


(q) PRC23

図 2.5.5 モーメントー曲率関係の比較 (PRC 杭)



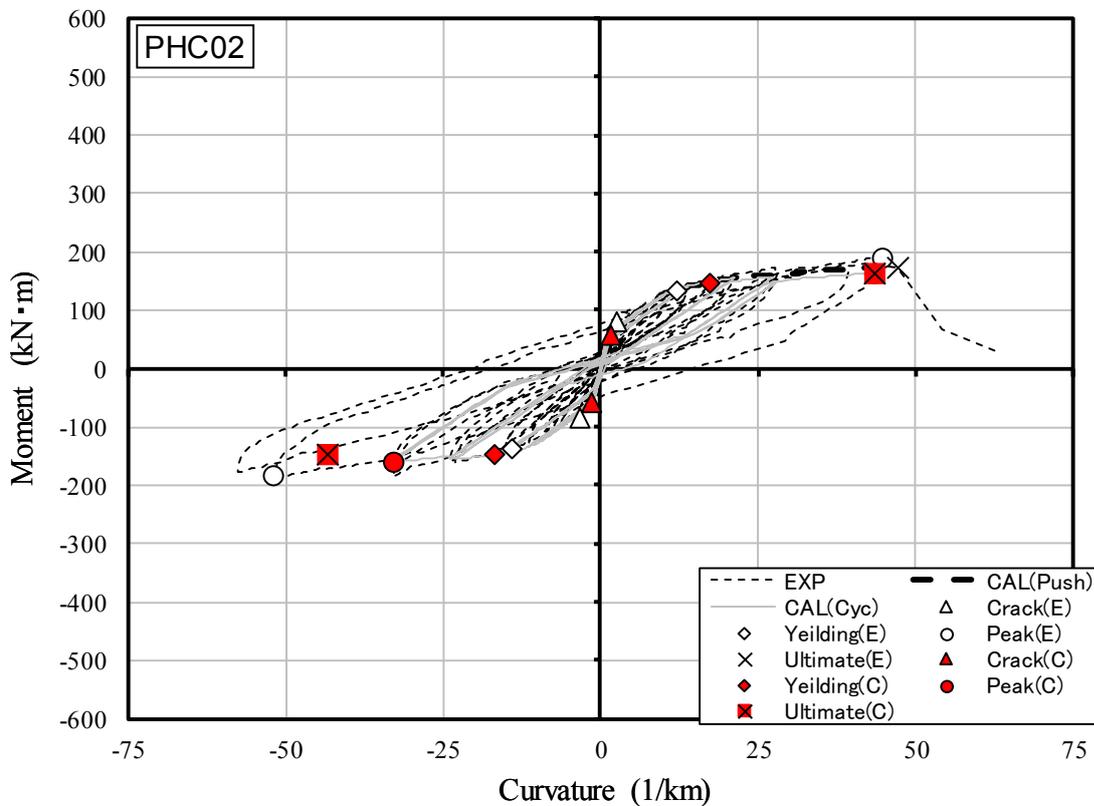
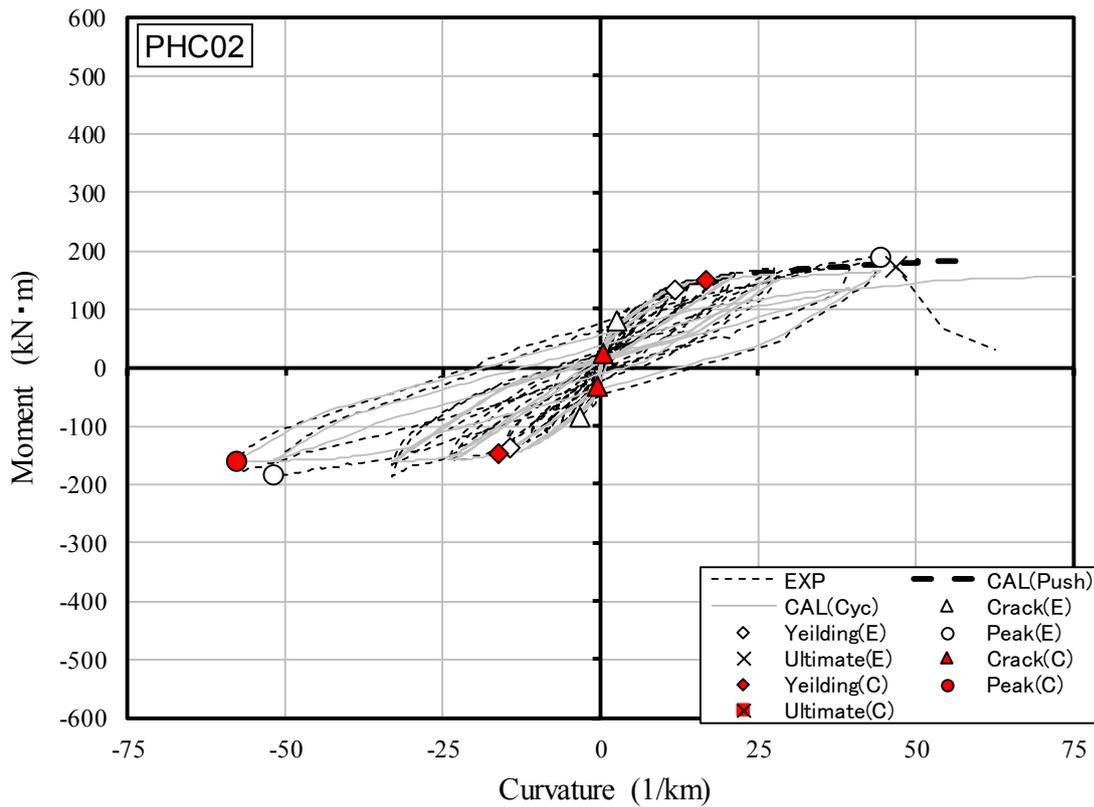
Case 1



Case 2

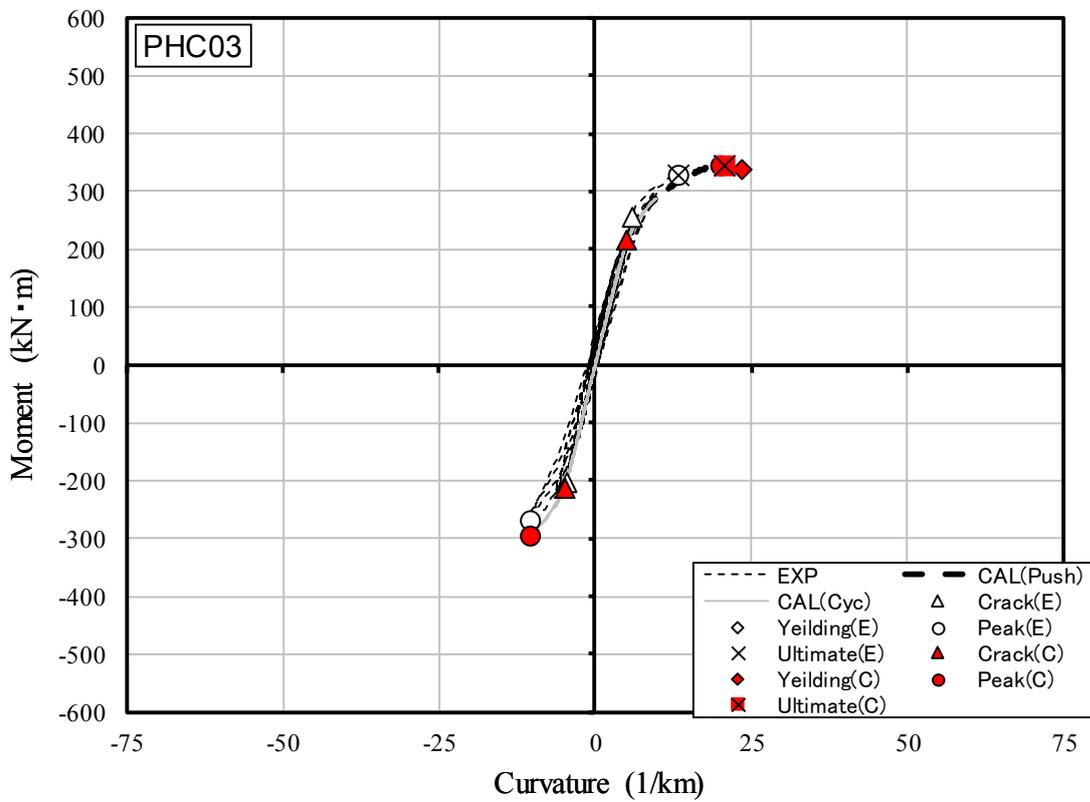
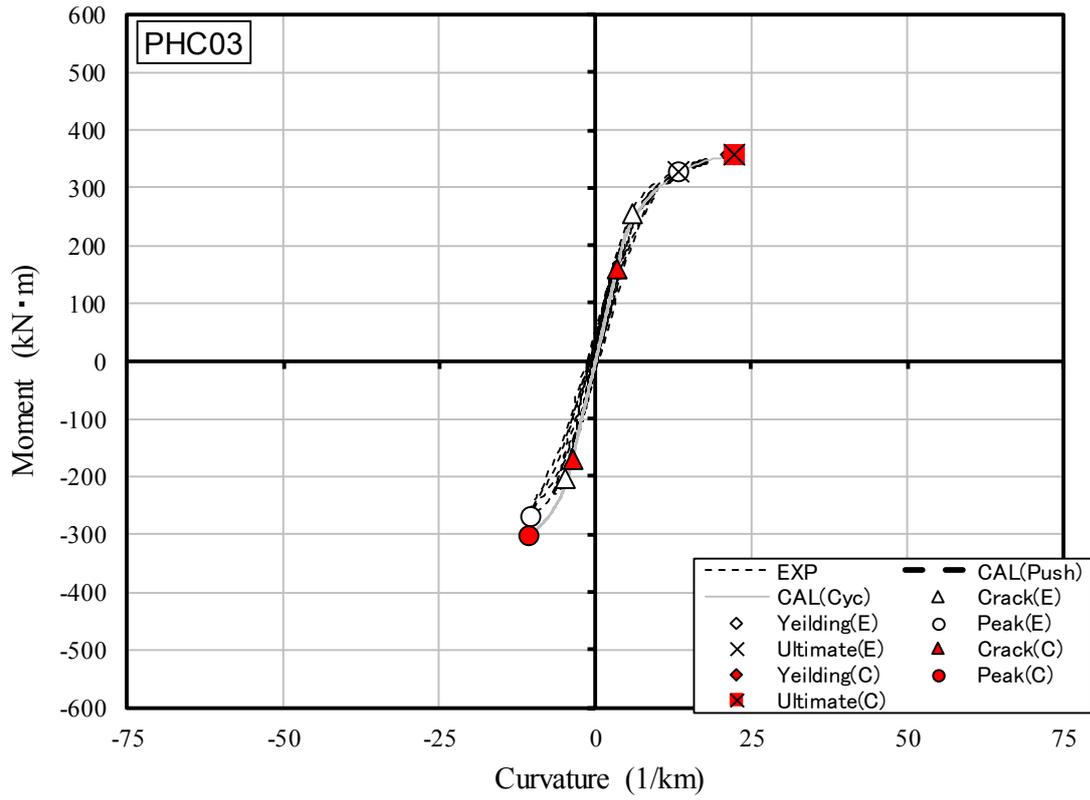
(a) PHC01

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



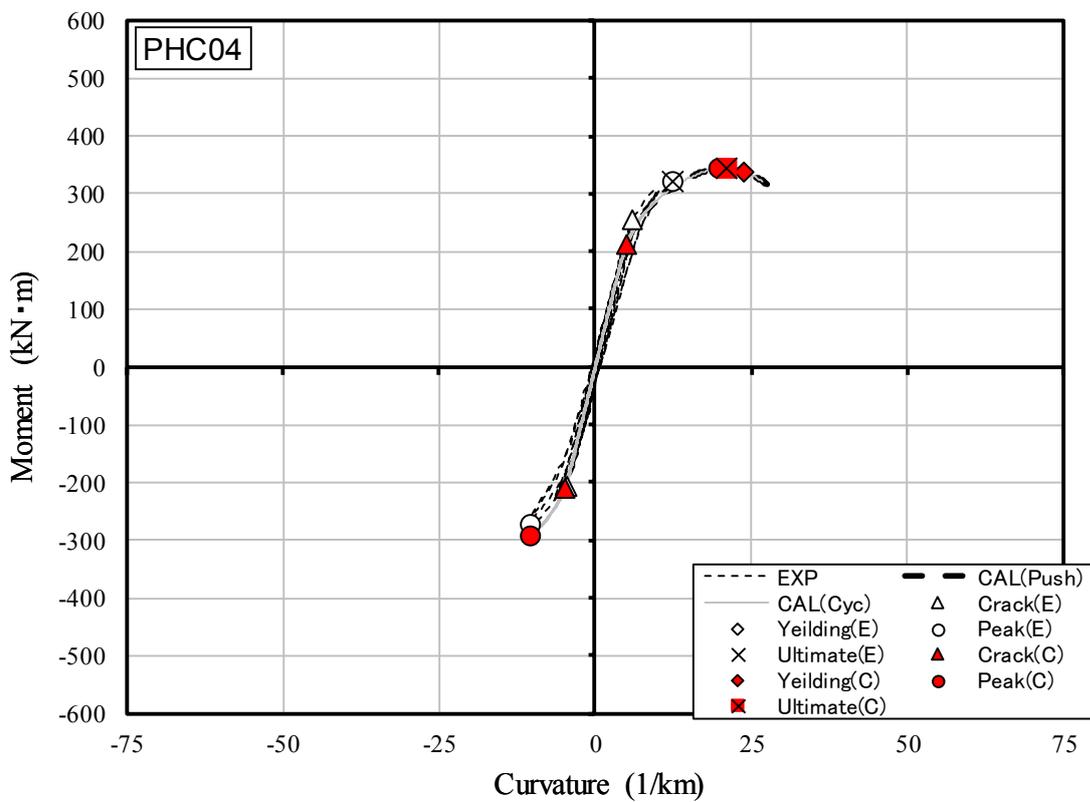
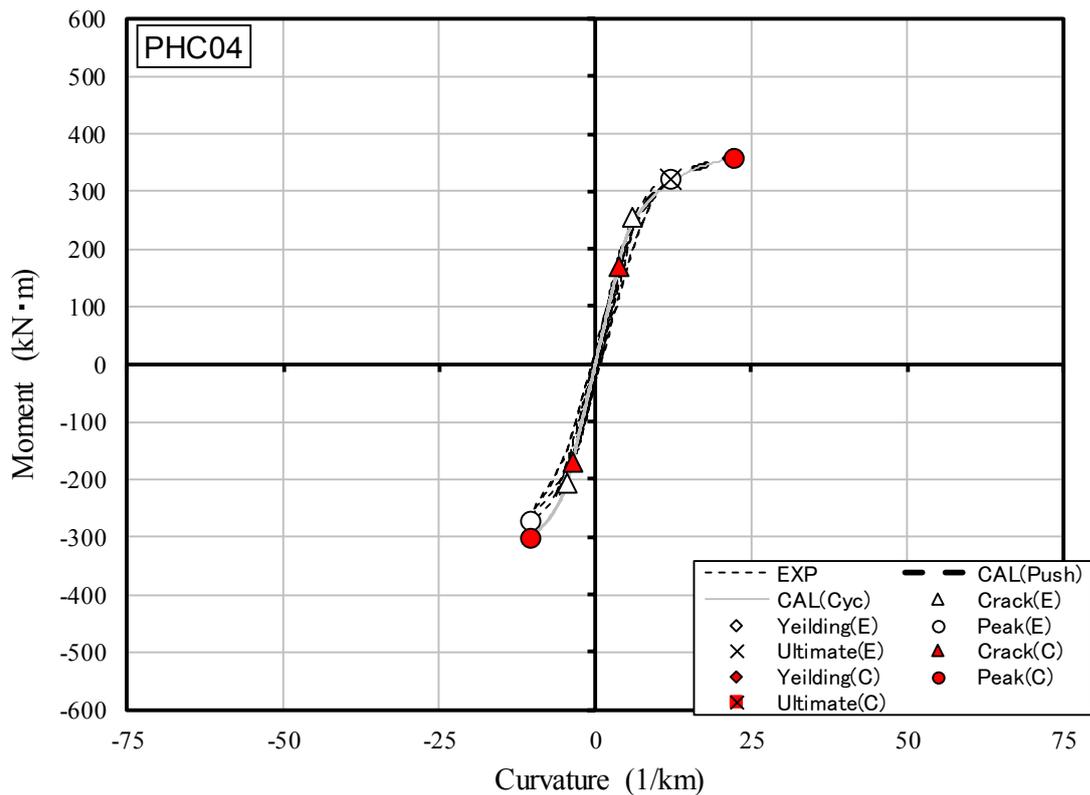
(b) PHC02

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



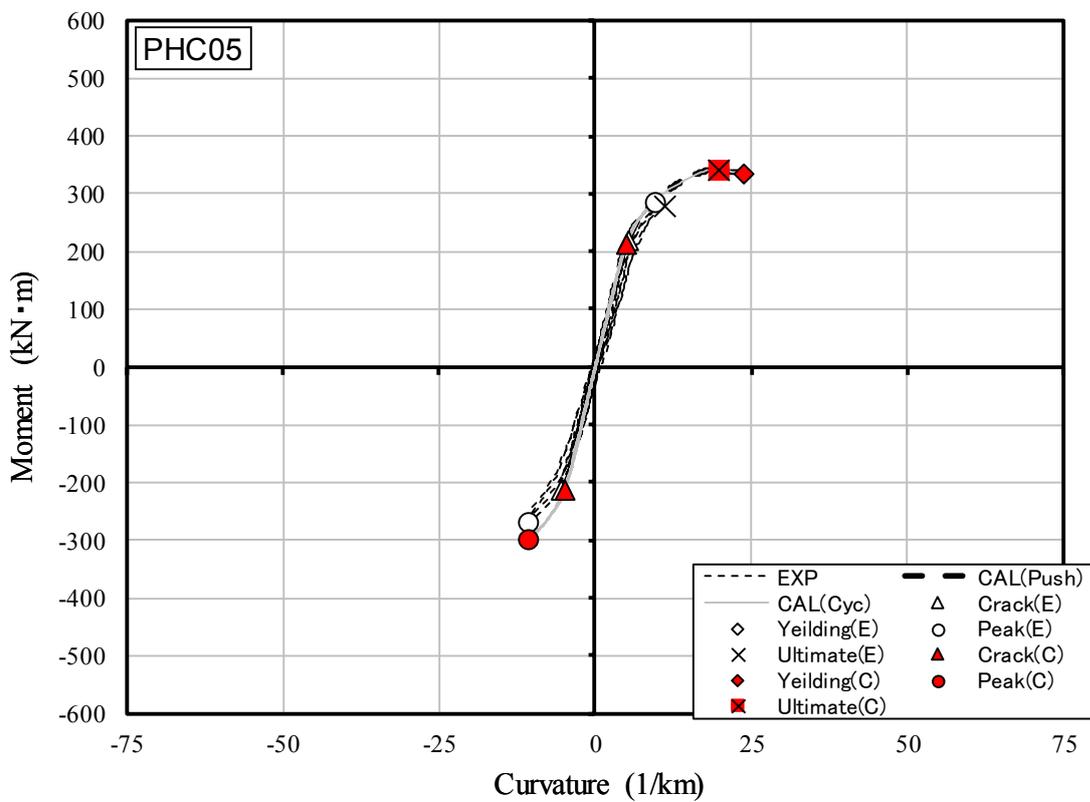
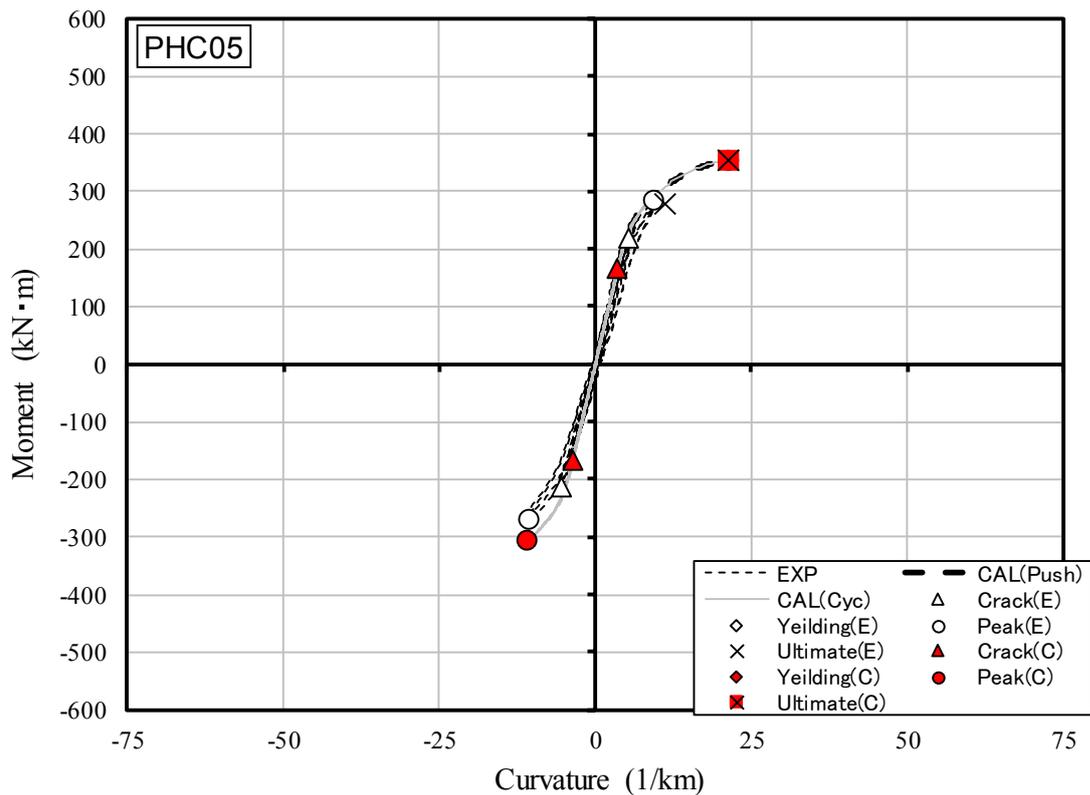
(c) PHC03

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



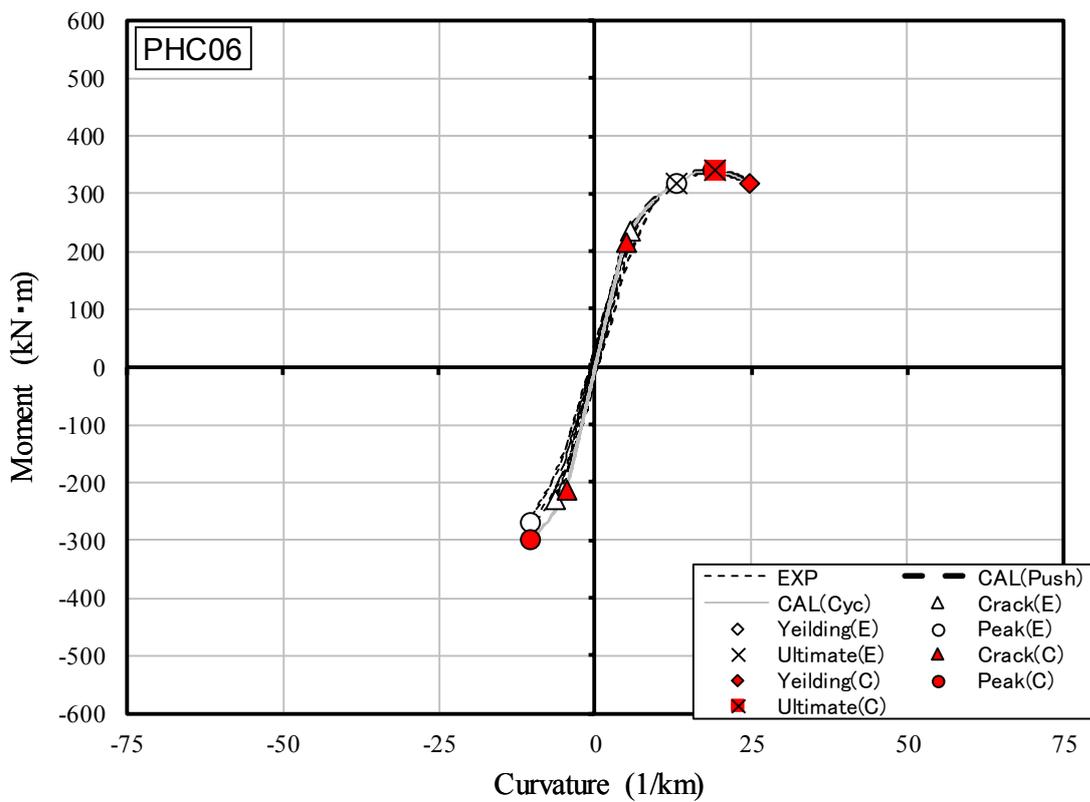
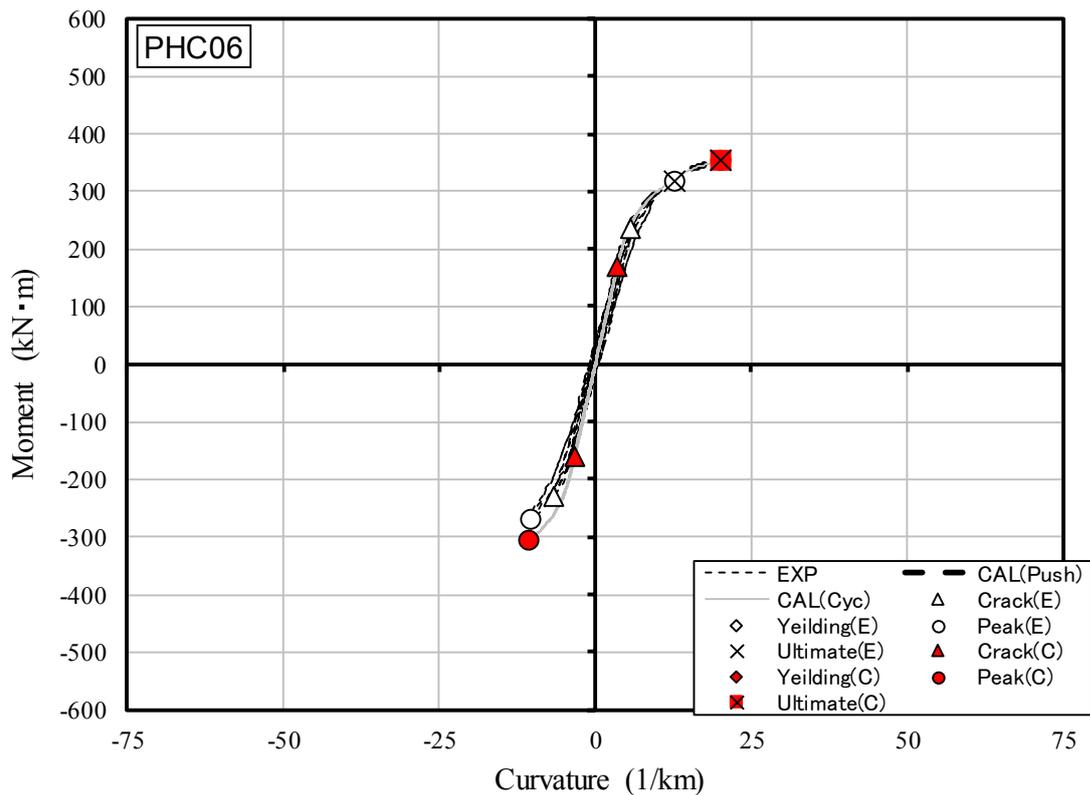
(d) PHC04

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



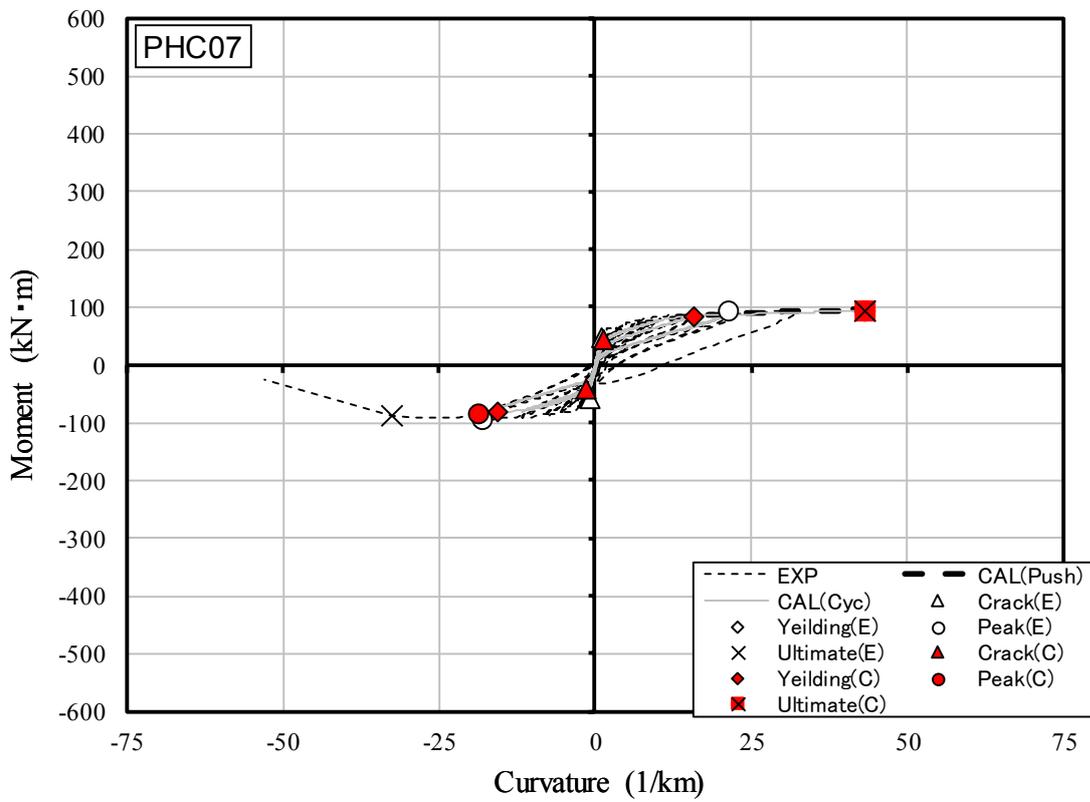
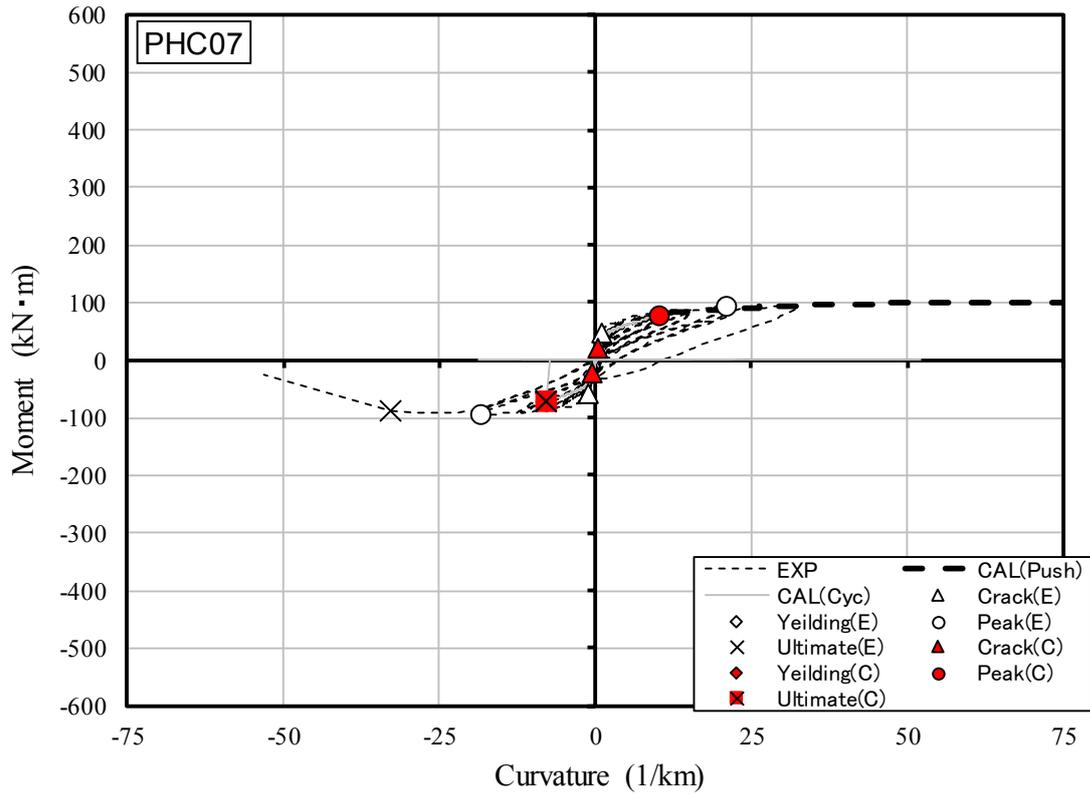
(e) PHC05

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



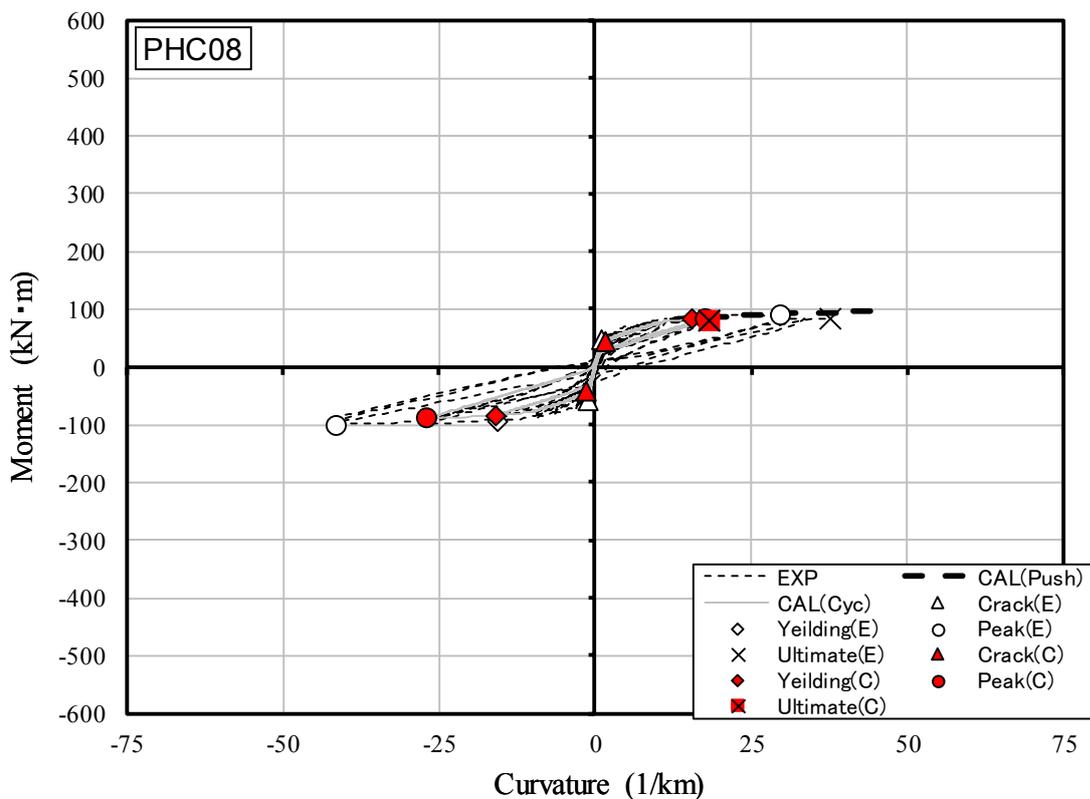
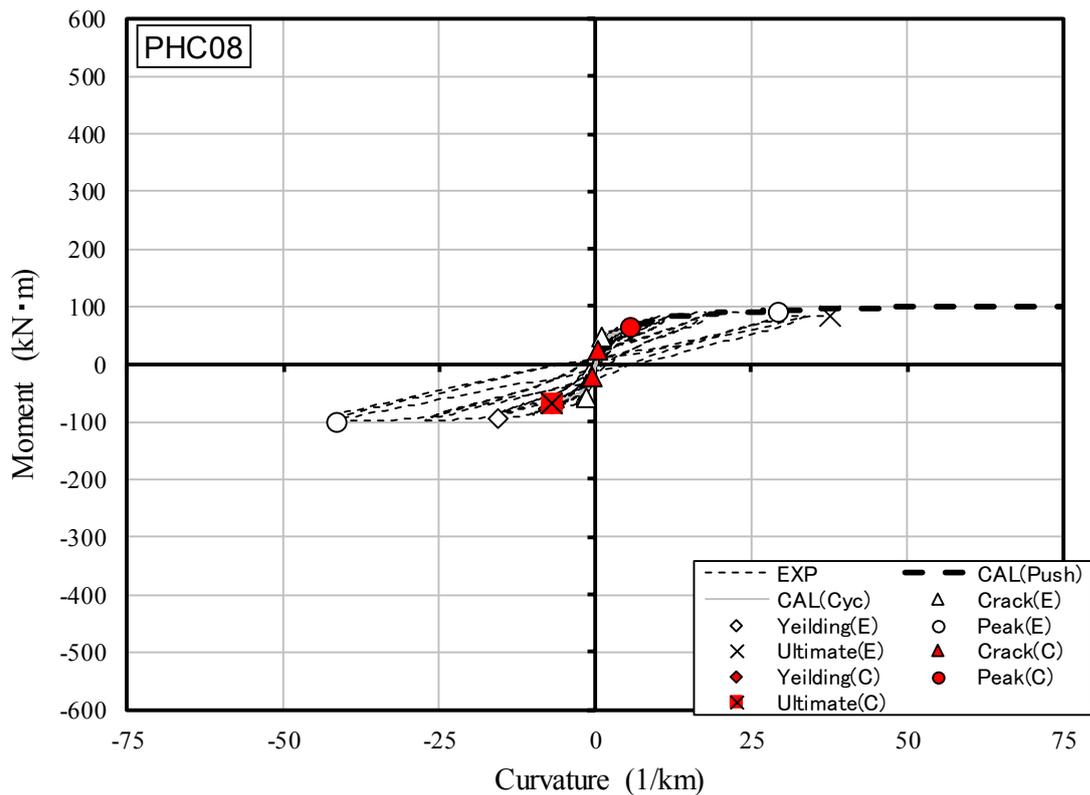
(f) PHC06

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



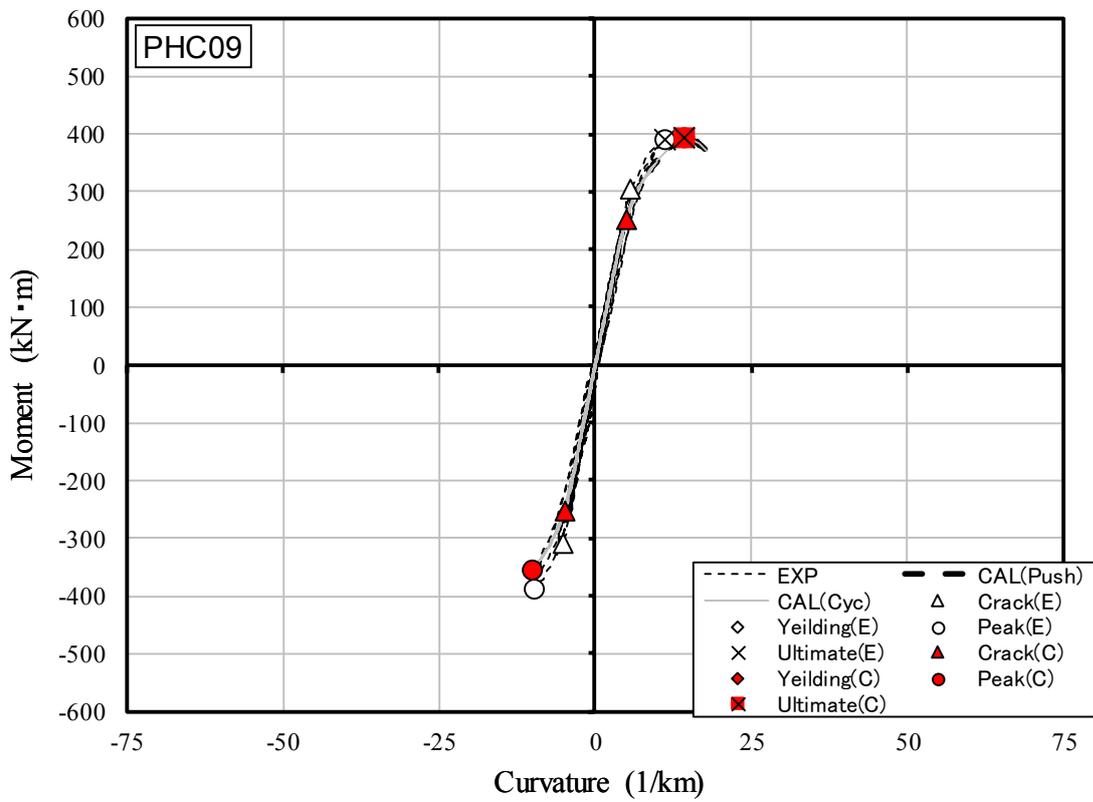
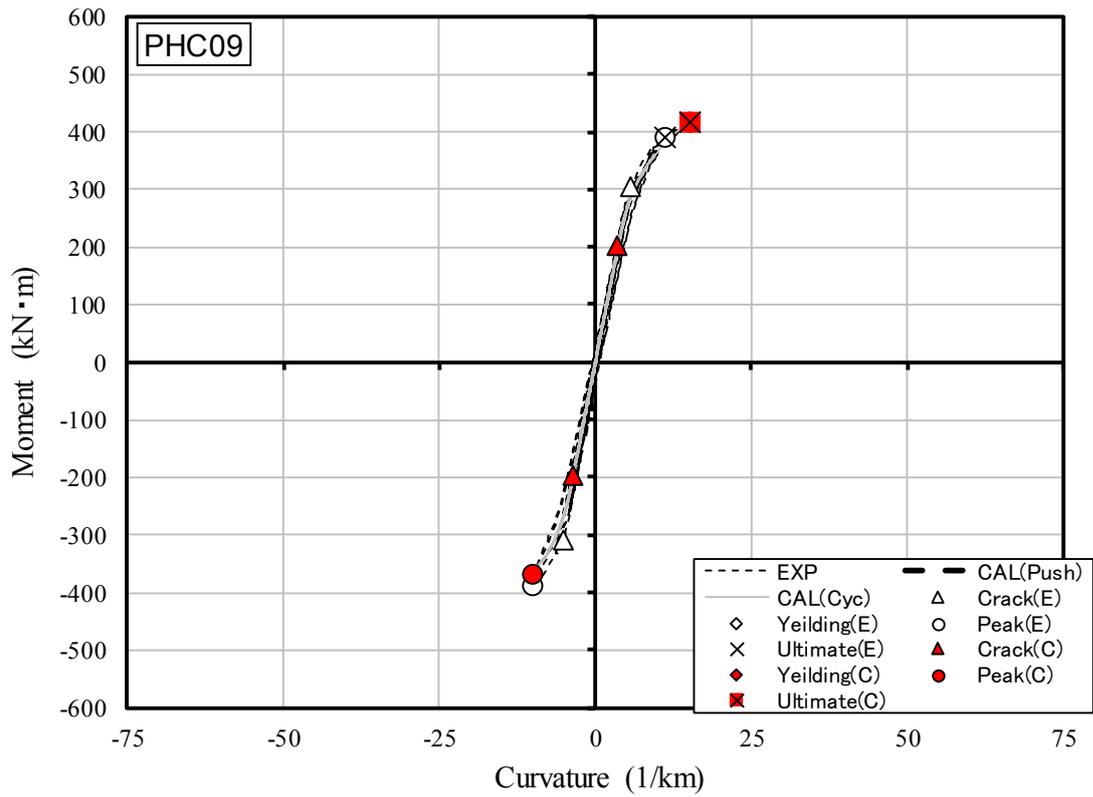
(g) PHC07

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



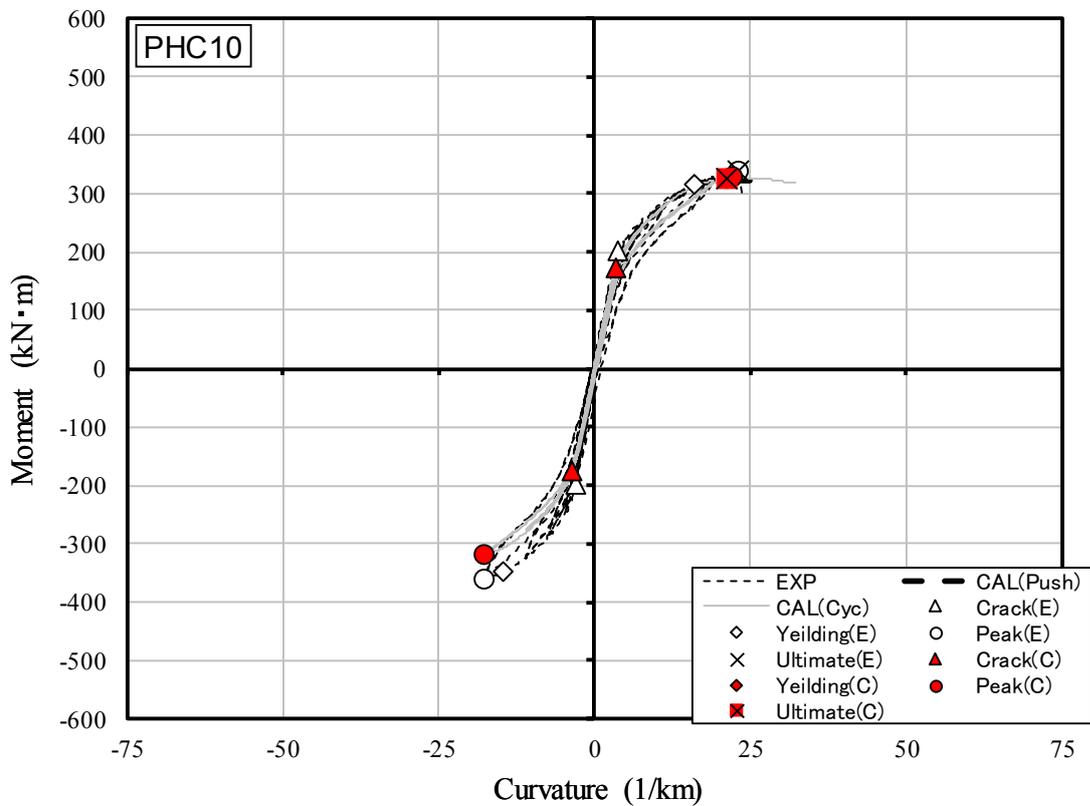
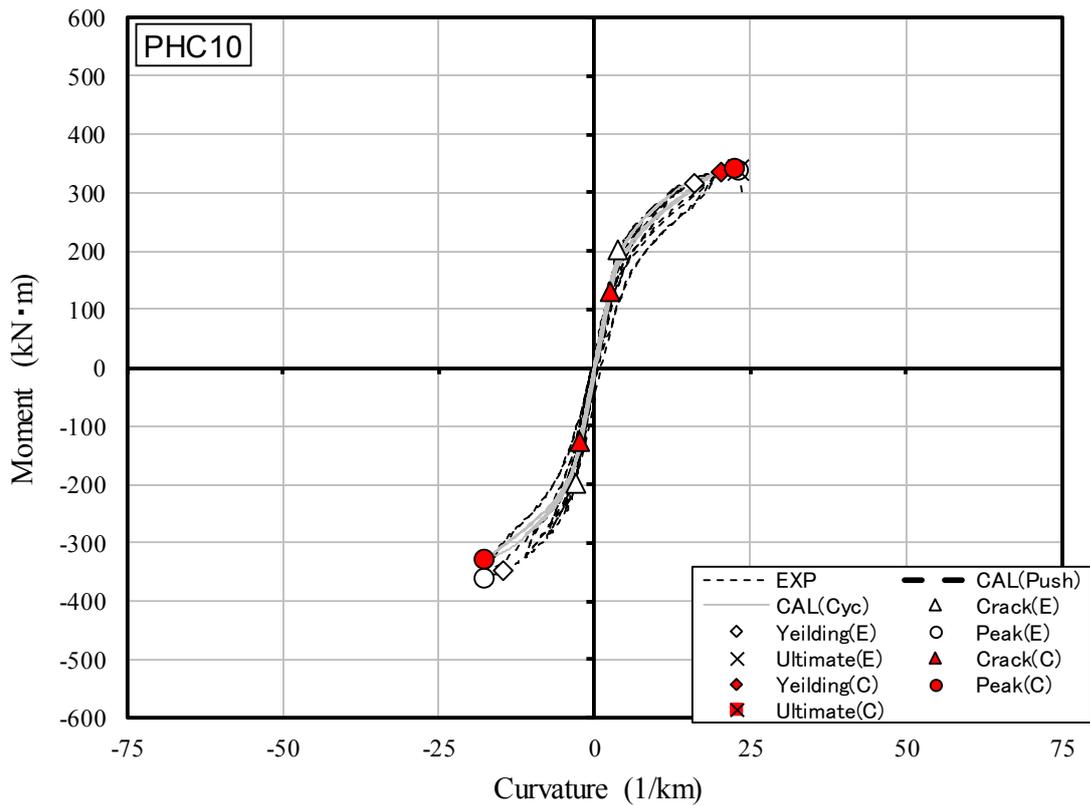
(h) PHC08

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



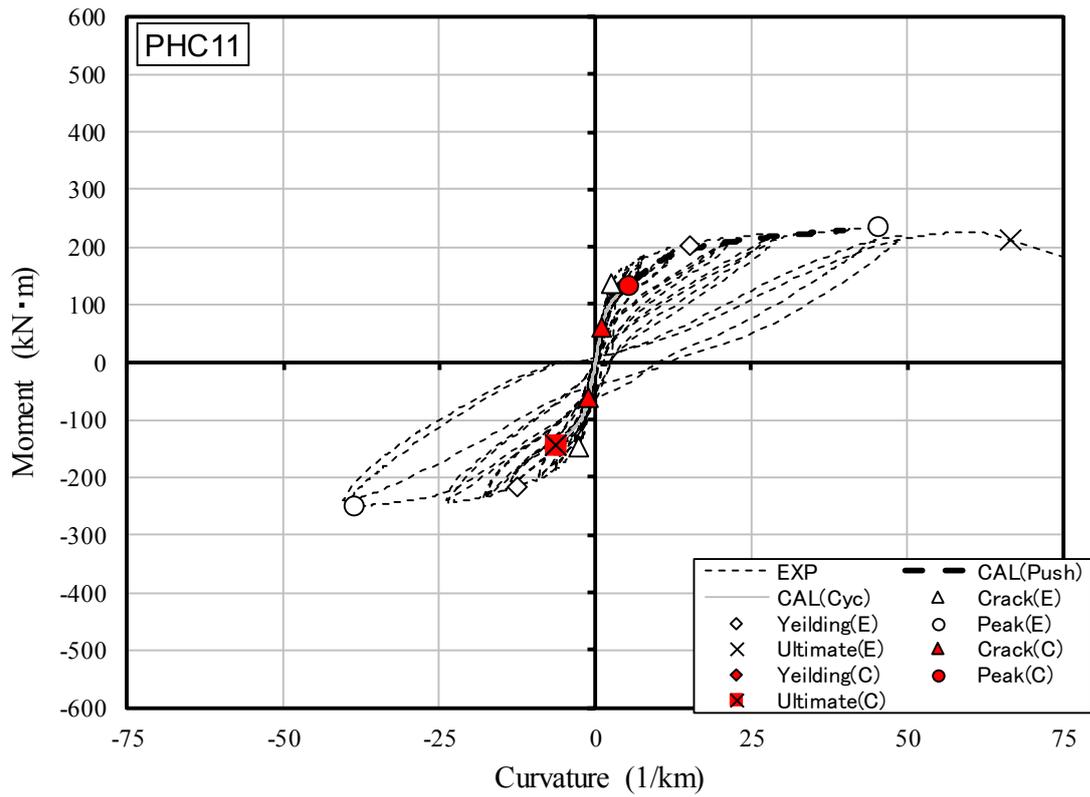
(i) PHC09

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)

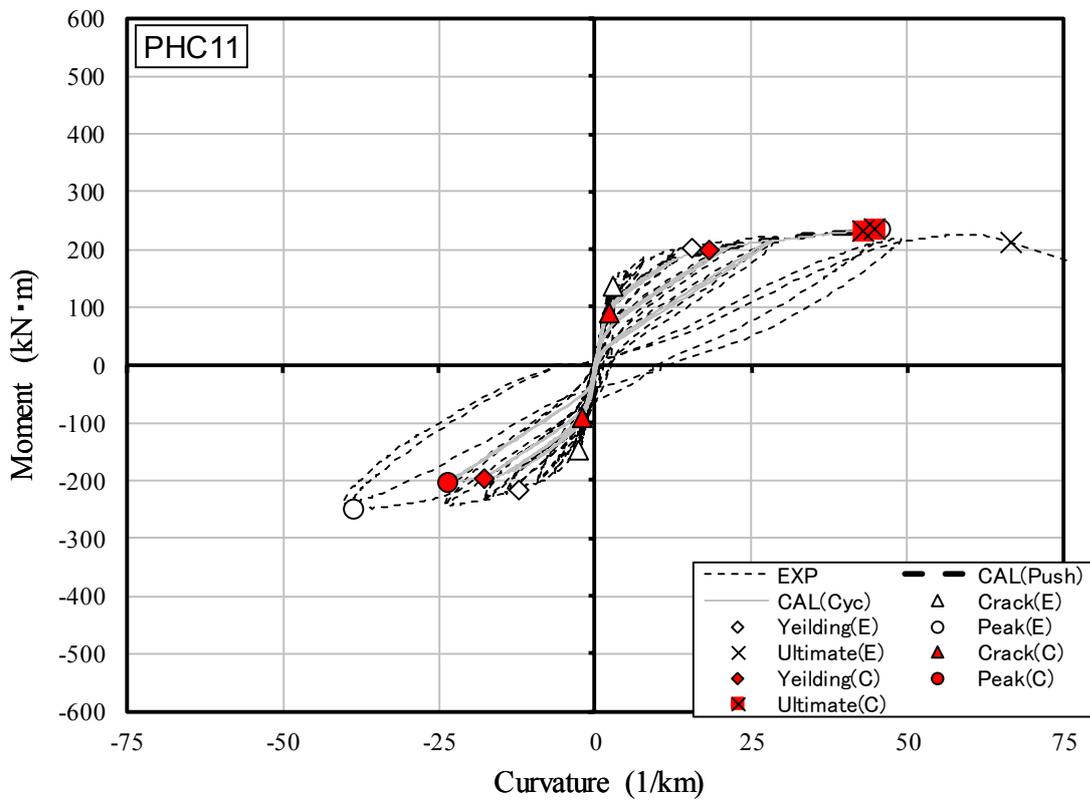


(j) PHC10

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



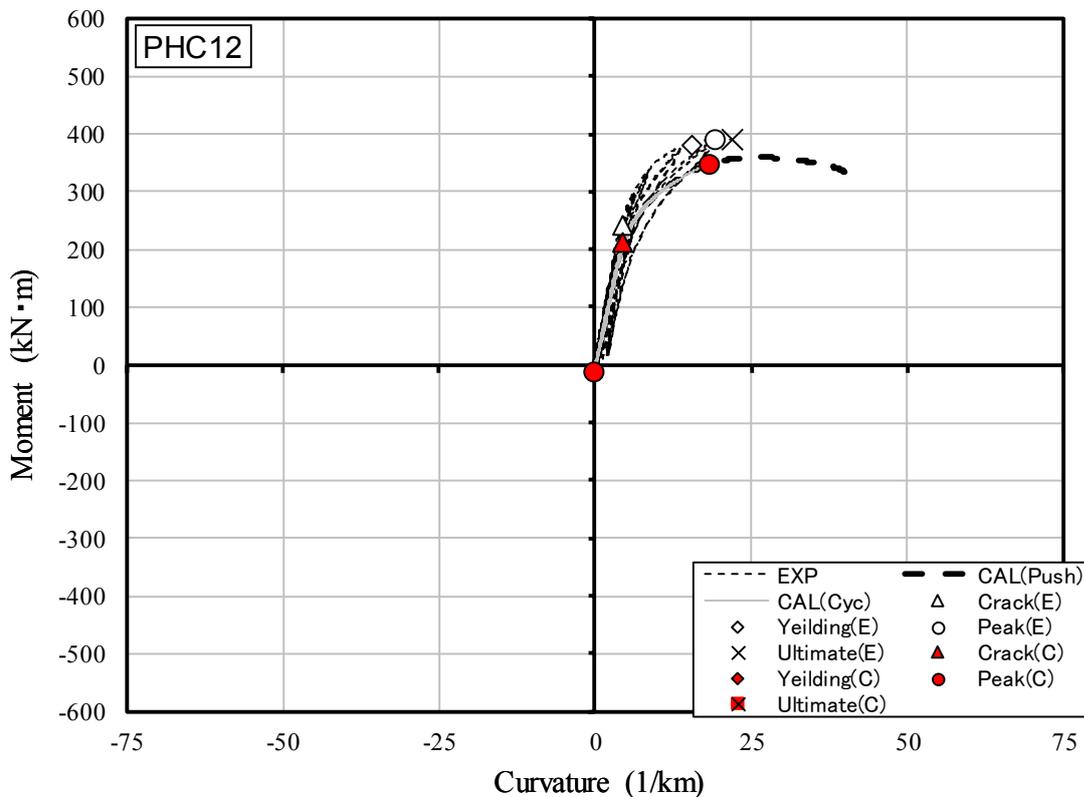
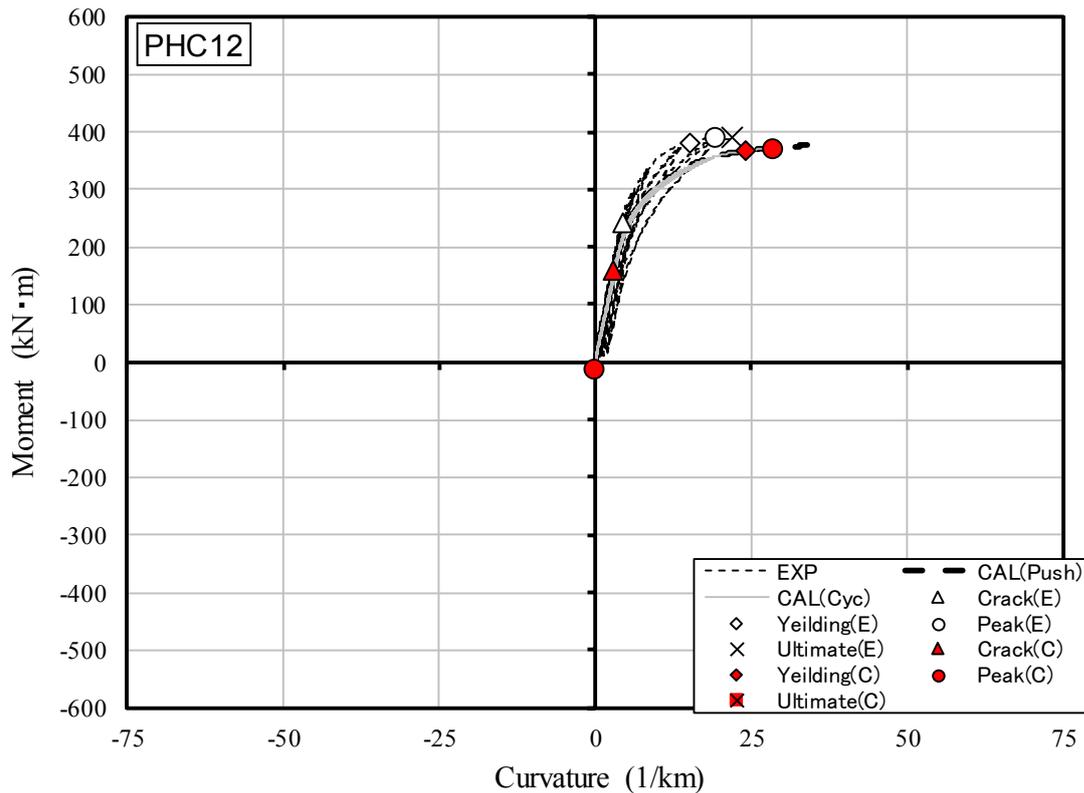
Case 1



Case 2

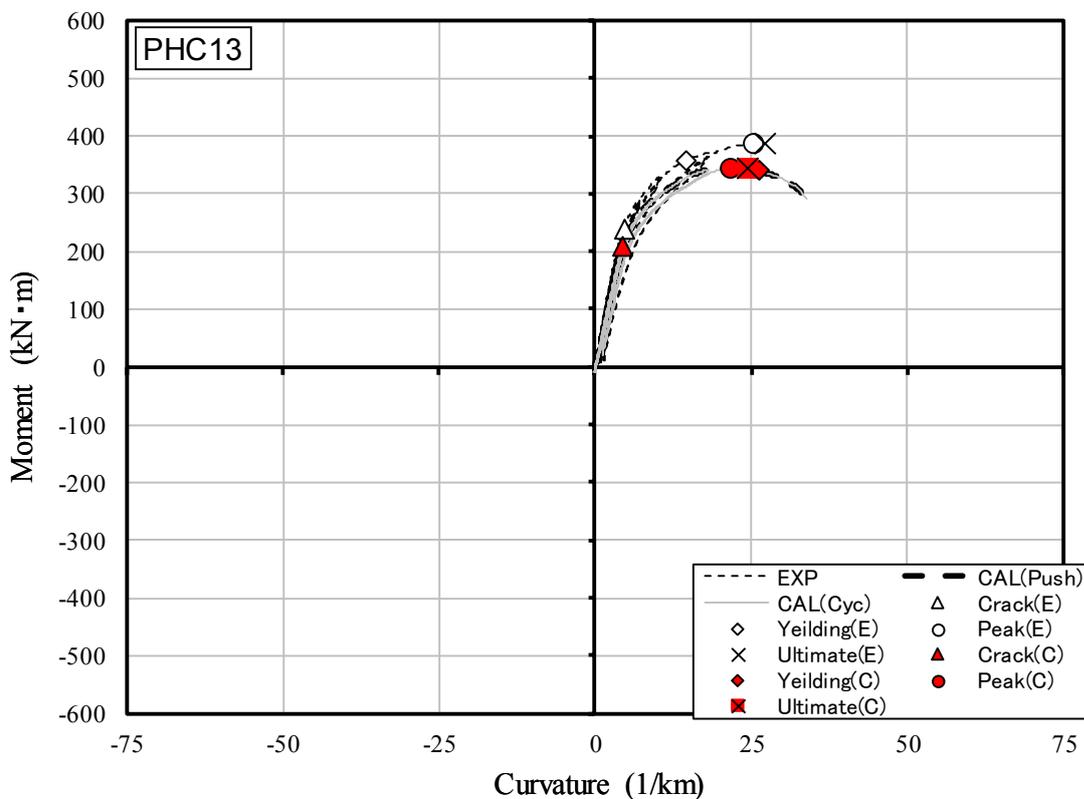
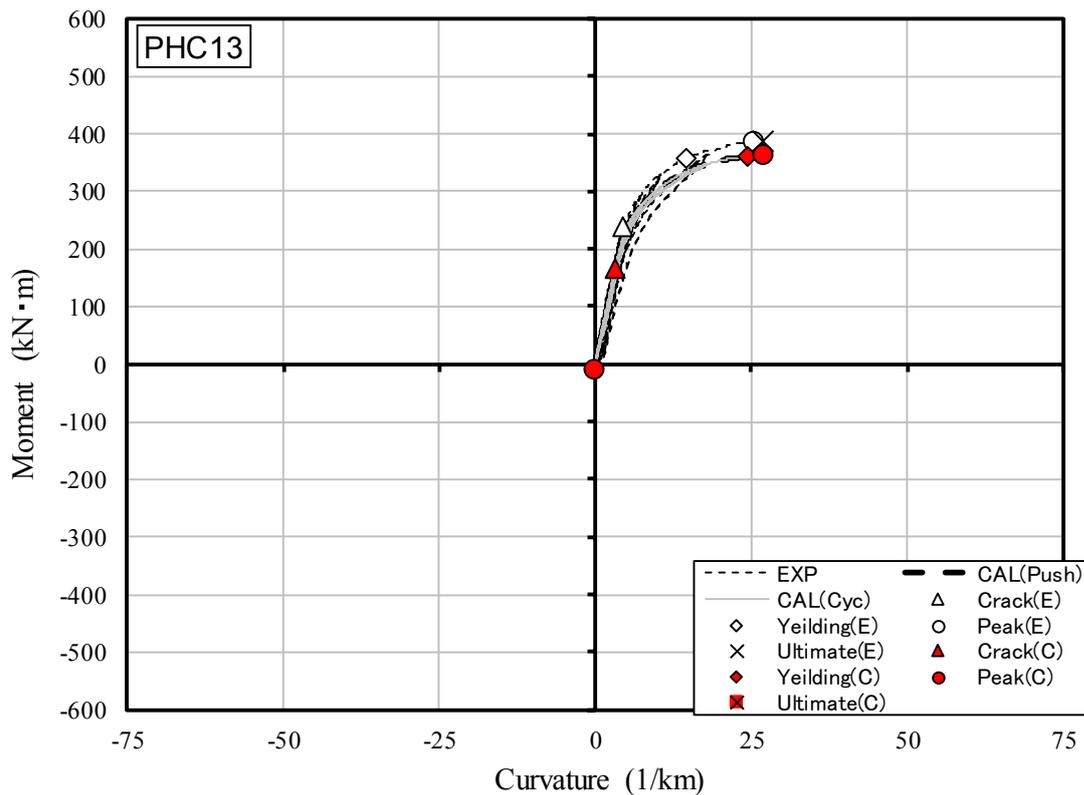
(k) PHC11

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



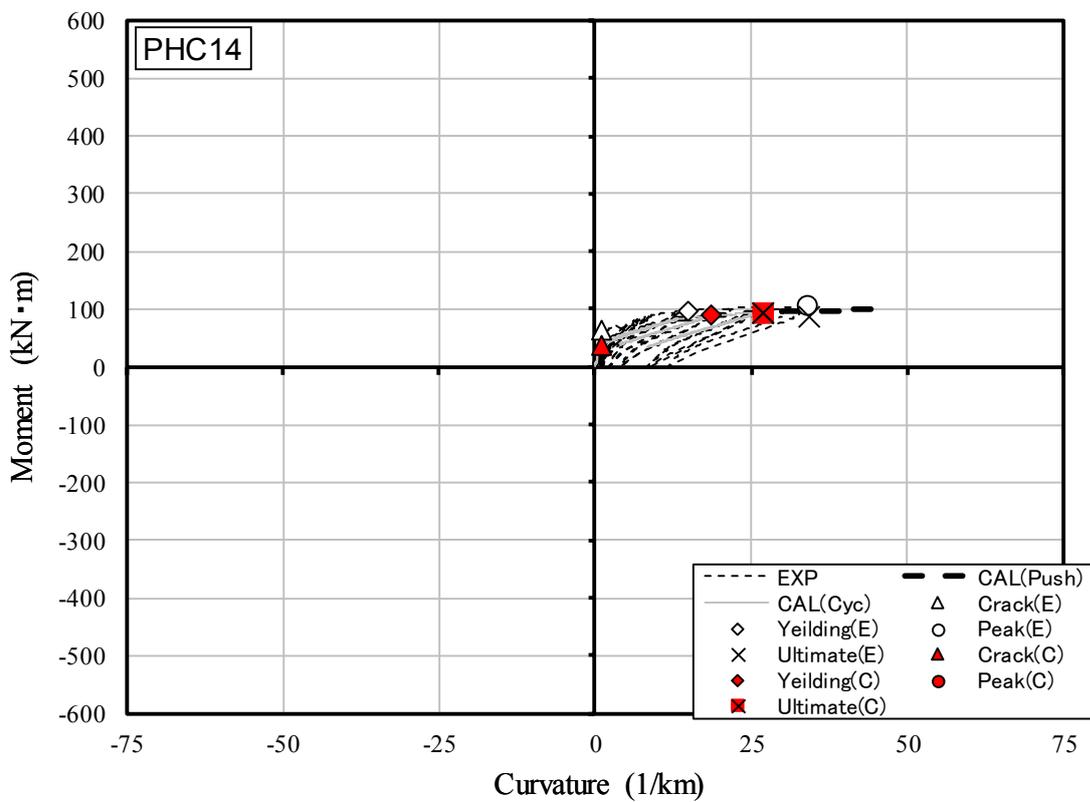
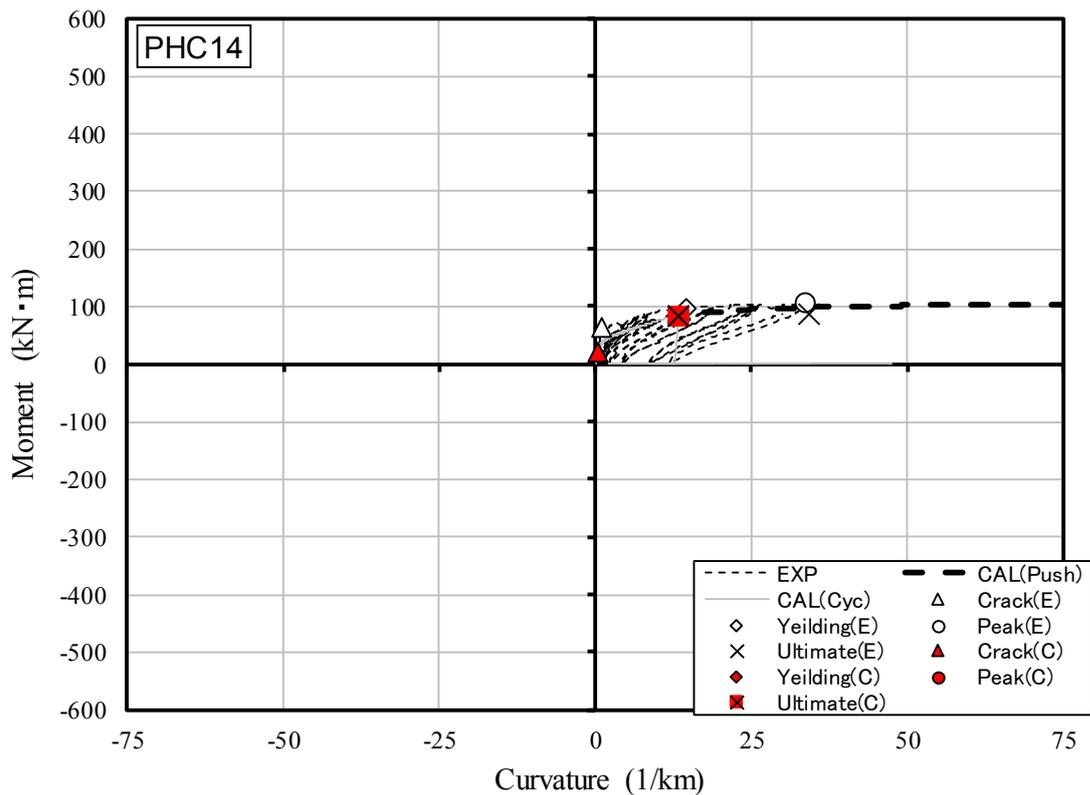
(I) PHC12

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



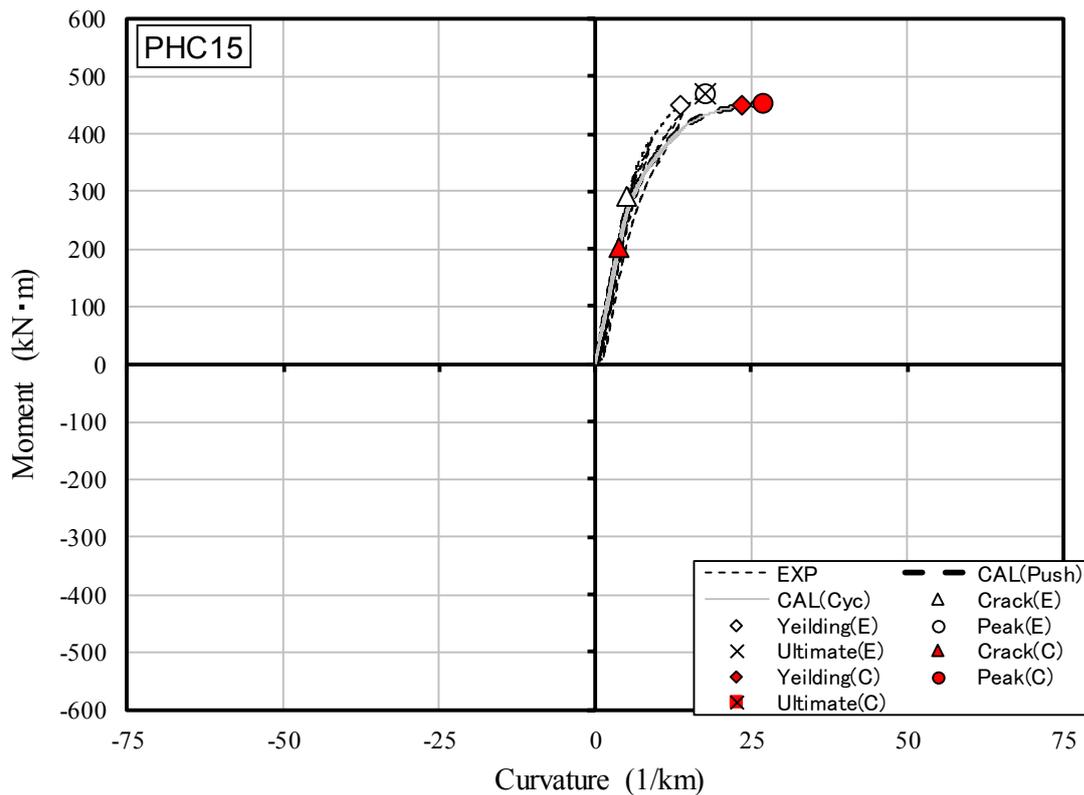
(m) PHC13

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)

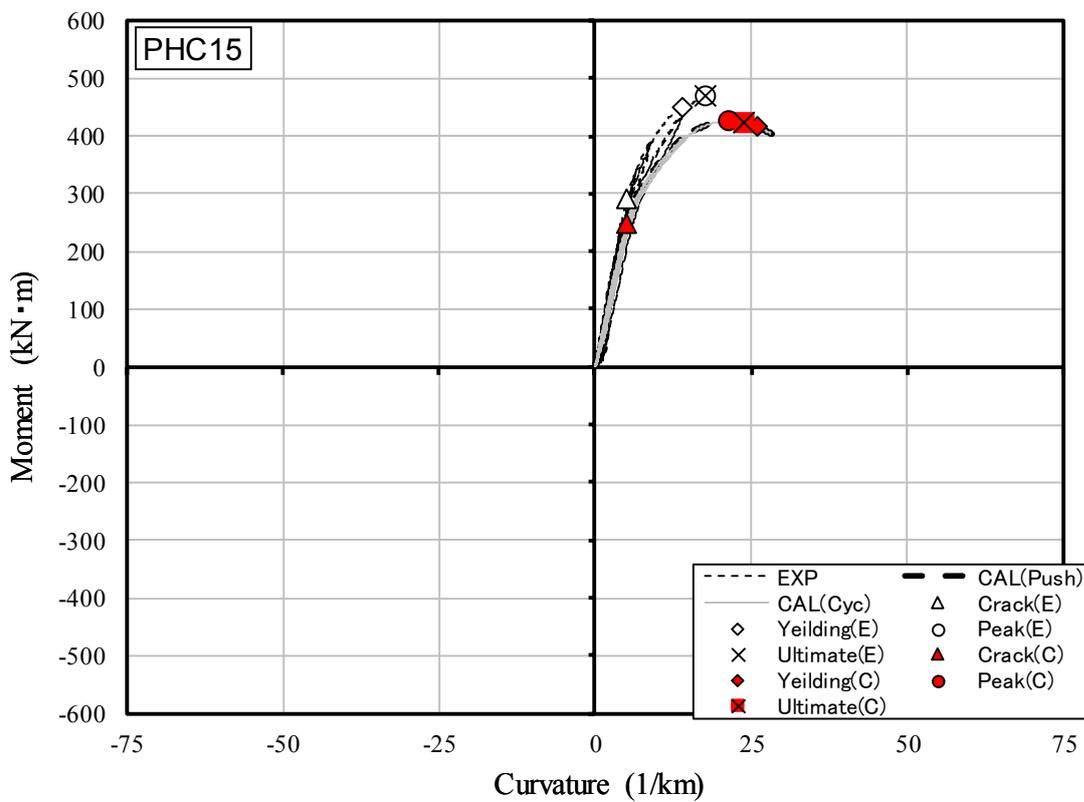


(n) PHC14

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



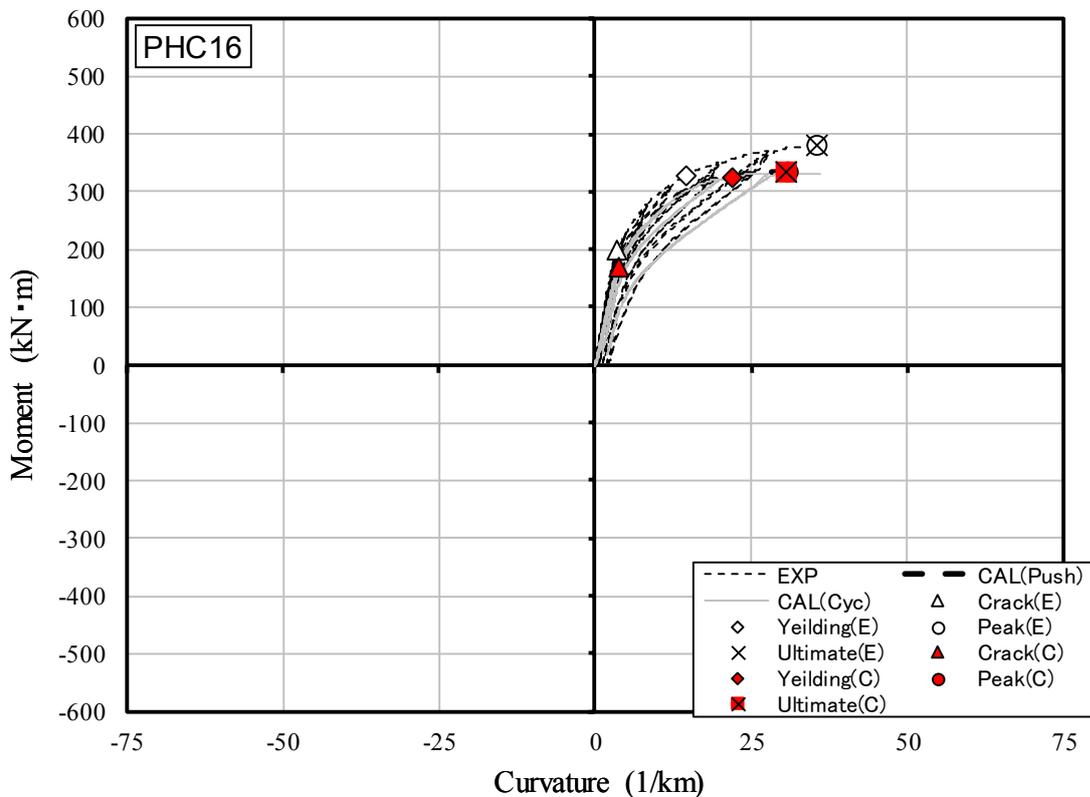
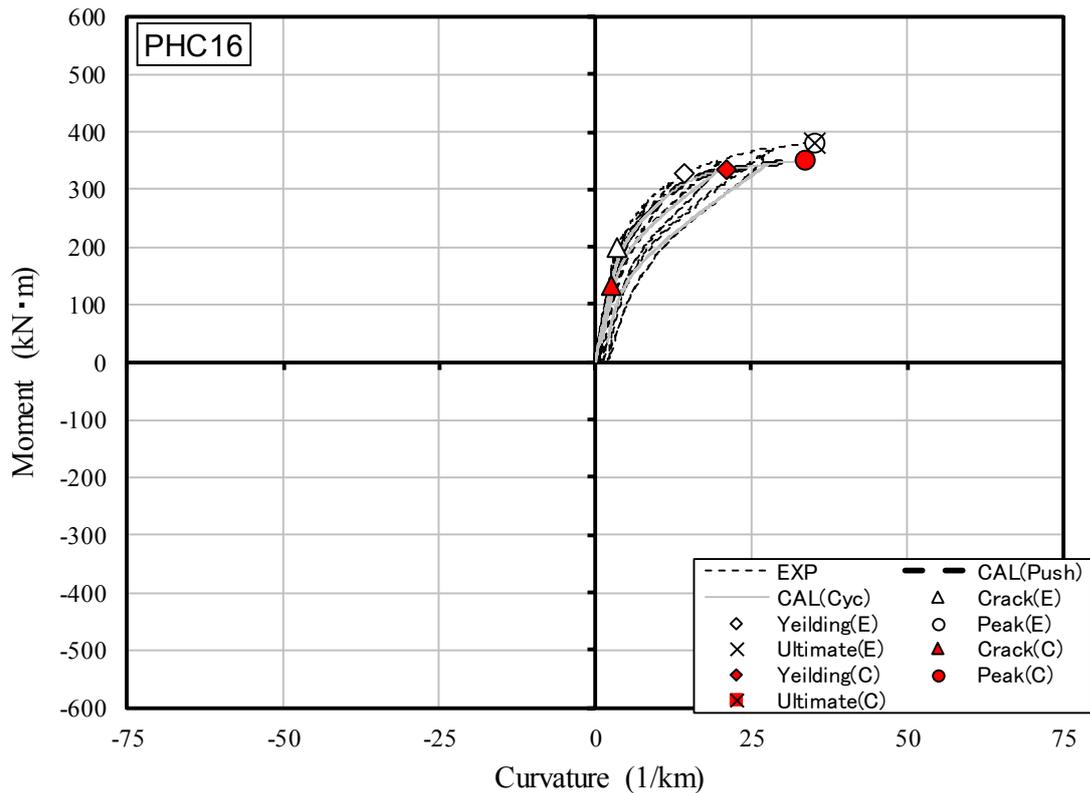
Case 1



Case 2

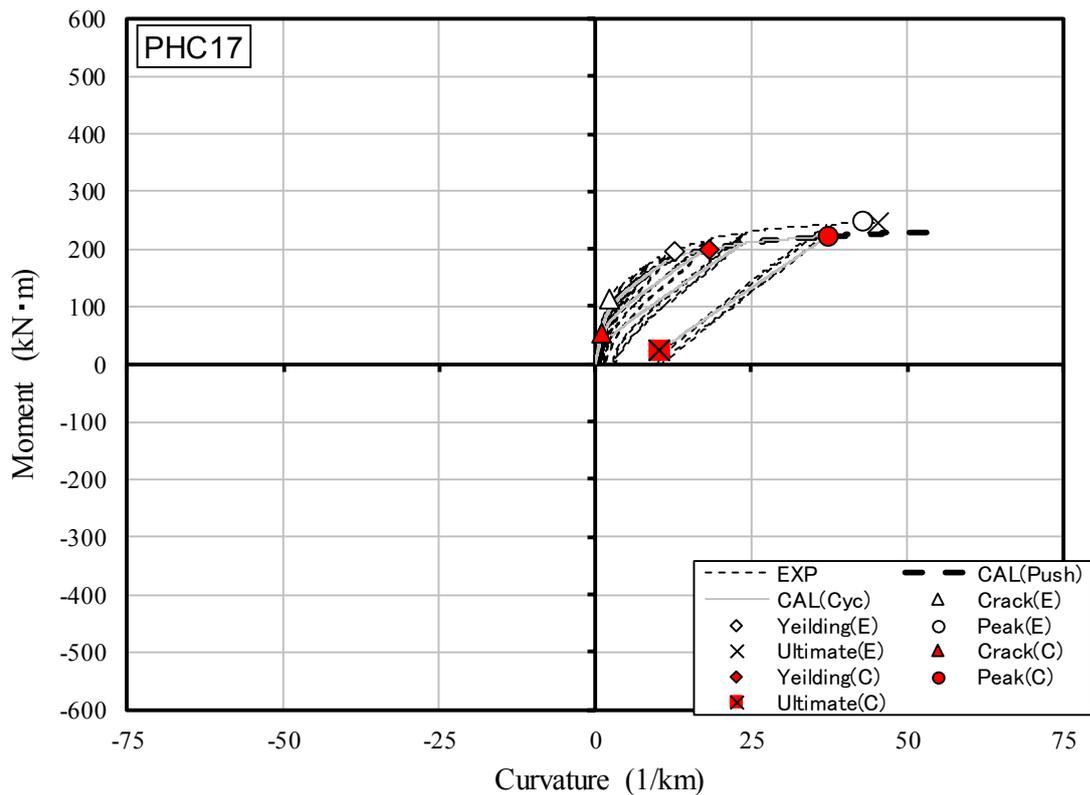
(o) PHC15

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)

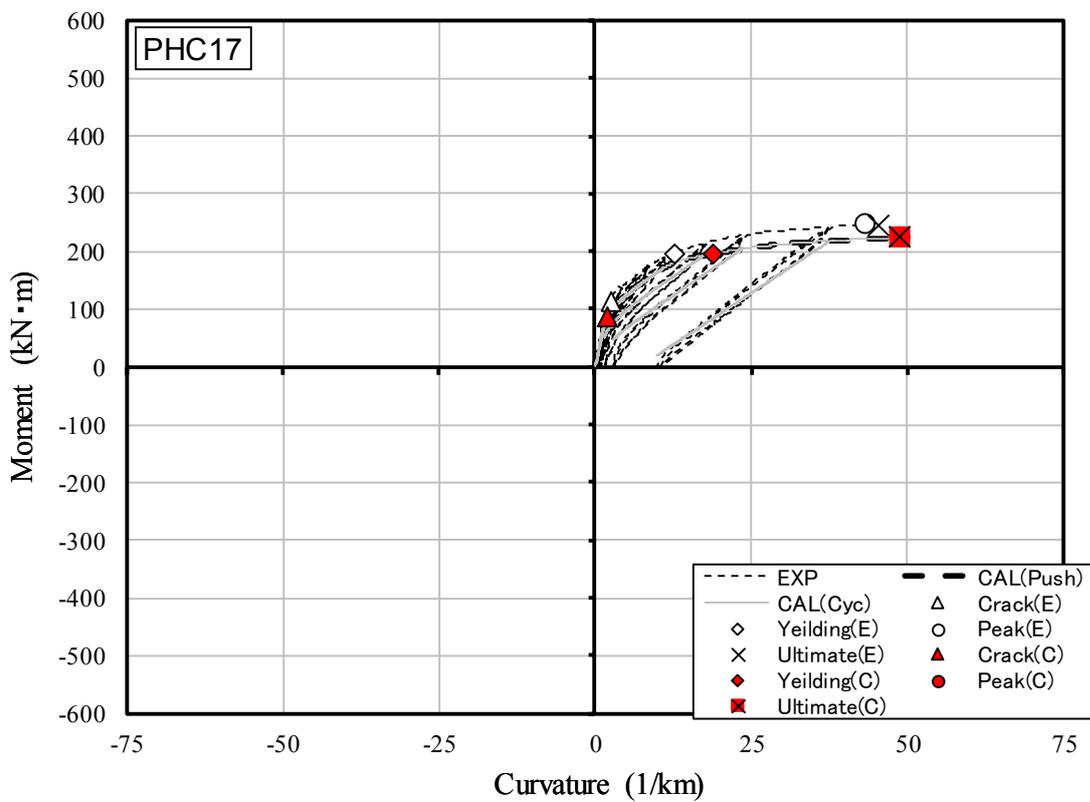


(p) PHC16

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭) (次項に続く)



Case 1



Case 2

(q) PHC17

図 2.5.6 モーメントー曲率関係の比較 (PHC 杭)

（3）破壊性状

今回の断面解析で得られた破壊形式と実験の破壊形式を表 2.5.7 に示す。C はコンクリートの圧壊による破壊，YC は PC 鋼棒降伏後コンクリートの圧壊による破壊，YF は PC 鋼棒降伏後 PC 鋼棒の破断による破壊，YB は外殻鋼管降伏後の外殻鋼管局部座屈による破壊を表している。なお，実験の結果のうち括弧で表示されているものは，実験において PC 鋼棒の降伏が記録出来ていないが，他の実験結果を元に PC 鋼棒の降伏が推定できるものは破壊形式を推定した。表中に網掛けしている箇所は，解析によって実験時の破壊性状が再現出来なかった箇所である。

1) SC杭

Case 1 では，外殻鋼管局部座屈を考慮できない。そのため，全ての試験体で破壊性状を再現出来なかった。

2) PRC杭およびPHC杭

PC 鋼材の破断によって終局に至った試験体（PRC杭 2 体，PHC杭 4 体）について，Case 1 では，PC 鋼材の破断と判定できなかった。一方，Case2 では PC 鋼材の破断ひずみを小さくすることで，PHC杭 4 体については実験を再現することができた。PRC杭 2 体は繰返し解析では PC 鋼材の破断を再現出来たものの，Pushover 解析では再現することが出来なかった。

コンクリートの圧壊によって終局に至った試験体（PRC杭 3 体，PHC杭 6 体）は，Case1 では 9 体中 6 体が，Case2 では 9 体全てについて実験を再現することが出来た。

PC 鋼棒降伏後コンクリートの圧壊による破壊によって終局に至った試験体（PRC杭 12 体，PHC杭 7 体）は，Case1 では 19 体全てが，Case2 では 19 体中 14 体について実験を再現することが出来た。Case2 で実験を再現出来なかった試験体のうち 5 体中 4 体は，PC 鋼棒降伏より前にコンクリートの圧壊による破壊と判定され，残りの 1 体は PC 鋼材の破断による破壊と判定された。

表 2.5.7 断面解析と実験の破壊形式の比較

	Experimental Results	Case1 Pushover	Case2 Pushover	Case2 Cyclic		Experimental Results	Case1 Pushover	Case2 Pushover	Case2 Cyclic		Experimental Results	Case1 Pushover
PHC01	C	C	C	C	PRC07	C	C	C	C	SC10	YB	C
PHC02	YF	YC	YF	YF	PRC08	YF	YC	YC	YF	SC11	YB	C
PHC03	(C)	YC	C	C	PRC09	YC	YC	YC	-	SC12	YB	C
PHC04	(C)	YC	C	C	PRC10	YC	YC	YC	-	SC13	YB	C
PHC05	C	C	C	C	PRC11	YC	YC	YC	YC	SC14	YB	C
PHC06	C	C	C	C	PRC12	C	YC	C	C	SC16	YB	C
PHC07	YF	YC	YF	YF	PRC13	C	C	C	-	SC17	YB	C
PHC08	YF	YC	YF	YF	PRC14	YC	YC	YC	YC			
PHC09	C	C	C	C	PRC15	YC	YC	C	C			
PHC10	YC	YC	C	YC	PRC16	YC	YC	YC	YC			
PHC11	YC	YC	YC	YC	PRC17	YF	YC	YC	YF			
PHC12	YC	YC	YC	-	PRC18	(YC)	YC	YC	YC			
PHC13	YC	YC	C	C	PRC19	(YC)	YC	YC	YC			
PHC14	YF	YC	YF	YF	PRC20	(YC)	YC	YC	YC			
PHC15	YC	YC	C	C	PRC21	YC	YC	YC	-			
PHC16	YC	YC	YC	YC	PRC22	(YC)	YC	YC	YC			
PHC17	YC	YC	YF	YF	PRC23	YC	YC	YC	-			

記号の意味：

C：コンクリートの圧壊による破壊

YC：PC 鋼棒降伏後コンクリートの圧壊による破壊

YF：PC 鋼棒降伏後 PC 鋼棒の破断による破壊

YB：外殻鋼管降伏後の外殻鋼管局部座屈による破壊

-：終局状態に達していない。

()：実験では PC 鋼棒の降伏が記録出来ていないが，他の実験結果を元に PC 鋼棒の降伏を推定して破壊形式を推定した。

2.5.3 まとめ

平面保持を仮定した断面解析によって、実験で得たモーメントー曲率関係、ひずみの推移、破壊性状について評価を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) SC杭の鋼管によるコンクリートの拘束状況に関しては不明瞭な部分が多く、引き続き研究が必要である。杭体の曲げ性状を適切に評価するためには、ひずみ軟化域の応力低下性状、曲げ圧縮限界ひずみなどを明らかにすることが求められる。また、鋼管のひずみ硬化による耐力の上昇や局部座屈発生点に関する知見を踏まえた断面解析により最大耐力の評価を行う必要がある。
- (2) PHC杭およびPRC杭において、コンクリートの圧壊によって終局に至った試験体の曲率評価には、コンクリートの終局ひずみを適切に設定することが重要である。既往の文献では、終局ひずみとしてPRC杭・PHC杭では 2625μ を用いているが、本研究ではコンクリートの材料モデルの変更と共に実情に合わせた終局ひずみを提案した。解析で用いた終局ひずみは、両側繰返し載荷の場合でコンクリートの最大強度時ひずみ（ ϵ_m ）の1.133倍である。その結果、コンクリートの圧壊によって終局に至った試験体の破壊モードを再現することが出来た。また、最大耐力時のモーメントおよび曲率を精度良く推定することが出来た。
- (3) PHC杭およびPRC杭において、PC鋼材の破断によって終局に至った試験体の評価には、PC鋼材の破断ひずみを適切に設定することが重要である。既往の文献では、破断ひずみとしてPRC杭・PHC杭では 50000μ を用いているが、本研究では実験結果から破断ひずみPHC杭で 17300μ 、PRC杭で 27000μ として計算を行った。既往の評価法では、PC鋼材の破断が解析で再現出来なかったが、PC鋼材の破断ひずみを小さくすることで、繰返し解析ではPC鋼材の破断を再現出来た。
- (4) 既往の文献による断面解析と、本研究で提案した材料モデルを用いた断面解析をPHC杭およびPRC杭を対象にそれぞれ実施した。その結果、提案手法は、曲げひび割れ時のモーメントおよび曲率の評価精度が大きく向上した。一方で、曲げ降伏時のモーメントや曲率はそれほど変化がなかった。また、曲げ耐力時は、曲率の評価精度が向上したことが確認出来た。

2.6 結論

2.6.1 まとめ

本研究では杭種、作用軸力が異なる既成コンクリート杭の終局までの曲げ性状に関するデータを収集するとともに、断面解析による曲げ性状の評価精度に計算条件が与える影響について考察した。結論を以下に示す。

- (1) PHC 杭と PRC 杭は、コンクリートの圧壊または PC 鋼棒の破断によって耐力が決定した。一方、SC 杭は、鋼管の局部座屈により耐力が決定した。
- (2) 杭種、作用軸力によって杭体は異なる曲げ破壊性状を示す。無軸力および圧縮軸力を作用させた SC 杭は鋼管の局部座屈によって耐力低下を起し終局に至ったが、軸力保持性能を喪失しなかった。無軸力および圧縮軸力を作用させた PHC 杭および PRC 杭はコンクリートの圧壊によって脆性的に破壊し、軸力保持性能を喪失した。引張軸力を作用させた PHC 杭および PRC 杭は PC 鋼材の破断によって終局に至った。終局時、PHC 杭では急激に耐力低下し軸力保持性能を喪失したが、PRC 杭では異形鉄筋が応力を負担し、軸力を保持した。
- (3) 既往の文献による断面解析と、本研究で提案した材料モデルを用いた断面解析を PHC 杭および PRC 杭を対象にそれぞれ実施した。その結果、提案手法は、曲げひび割れ時のモーメントおよび曲率の評価精度が大きく向上した。一方で、曲げ降伏時のモーメントや曲率はそれほど変化がなかった。また、曲げ耐力時は、曲率の評価精度が向上したことが確認出来た。

2.6.2 今後の課題

- (1) SC 杭の鋼管によるコンクリートの拘束状況に関しては不明瞭な部分が多く、引き続き研究が必要である。杭体の曲げ性状を適切に評価するためには、ひずみ軟化域の応力低下性状、曲げ圧縮限界ひずみなどを明らかにすることが求められる。また、鋼管のひずみ硬化による耐力の上昇や局部座屈発生点に関する知見を踏まえた断面解析により最大耐力の評価を行う必要がある。
- (2) 引張軸力を加えた SC 杭については終局状態を実験によって確認できなかった。
- (3) PHC 杭と PRC 杭が曲げ圧壊する場合は脆性的な破壊となるため、現状では十分な安全率を持った設計が必要になる。2次設計を PHC 杭と PRC 杭に適用するためには、現状よりも靱性のある杭の開発が望まれる。

参考文献

- [2-1] 金子治，中井正一，阿部秋男，飯場正紀，久世直哉，平出務：2011年東日本大震災における建築物の杭基礎の被害状況と要因分析，地盤工学会誌，vol62，No.1，pp.16-19，2012.1
- [2-2] 日本建築センター：地震力に対する建築物の基礎の設計指針，1984
- [2-3] 国土交通省告示第1113号，2001
- [2-4] 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- [2-5] 金子治，中井正一，向井智久，飯場正紀，平出務，阿部秋男：大地震時に対する耐震性能評価のための既製コンクリート杭の曲げ強度と変形特性，日本建築学会技術報告集，第21巻，第47号，pp.95-98，2015
- [2-6] 杉村義広，中田慎介，川島俊一，阿部道彦：高強度プレストレストコンクリートぐいの地震被害とその再現実験，日本建築学会論文報告集，第340号，pp.40-50，1984
- [2-7] 黒正清治，和田章，小林克巳，武秀彦，堀井昌博，木原碩美：高強度PC杭の曲げ変形性能に関する実験研究（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.2135-2138，1987
- [2-8] 六車熙，渡邊史夫，幅伊佐男，浅井政宏：超高強度PCぐいの曲げ靱性改善に関する研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.69-72，1985
- [2-9] 西山峰広，六車熙，渡邊史夫：高一様伸び鋼棒と横拘束併用による高強度PCぐいの曲げ靱性改善，コンクリート工学年次論文報告集，pp.477-482，1987
- [2-10] 黒正清治，和田章，小林克巳，光木史朗，上田邦成：軸力と水平力を受ける高強度PC杭の力学性状に関する実験，日本建築学会構造系論文報告集，第376号，pp.71-80，1987
- [2-11] 黒正清治，堀井昌博，和田章，林静雄，小林克巳，渡辺厚，光木史朗，上田邦成：高強度PC杭の中空部にコンクリートを中詰めした効果に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第390号，pp.134-141，1988
- [2-12] 長江拓也，岸田慎司，香取慶一，林静雄：PRC杭の耐震性能に及ぼす軸方向異形鉄筋と横補強筋の影響，日本建築学会構造系論文集，第538号，pp.123-129，2000
- [2-13] 長江拓也，岸田慎司，柳瀬高仁，香取慶一，林静雄：PRC杭の耐震性能と横補強筋量の関係－杭径および軸力が異なる場合－，日本建築学会構造系論文集，第551号，pp.95-102，2002
- [2-14] 宮蔭和人，長江拓也，岸田慎司，林静雄：せん断破壊と圧縮破壊が混在するPRC杭の変形性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1153-1158，2003
- [2-15] 既製コンクリート杭－基礎構造設計マニュアル－建築編，コンクリートパイル建設技術協会，2009.5
- [2-16] 日本工業規格 JIS A 1136，1993
- [2-17] 日本工業規格 JIS Z 2241，2011
- [2-18] 日本工業規格 JIS A 5337，1995
- [2-19] 六車熙，岩清水隆，光枝良，井上弘行：横補強による高強度コンクリートの靱性改善に関する研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.97-100，1983.6.
- [2-20] 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説，2017.3
- [2-21] 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第472号，pp.11-16，1995.6

謝辞

本研究は、平成28年度住宅・建築物技術高度化事業「大地震後の継続使用性に資する杭および杭頭接合部の技術開発」および(国研)建築研究所指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性能評価技術の開発」により実施しました。関係各位に謝意を表します。