

第2章

杭基礎構造システムの耐震設計及び設計方針

第2章 杭基礎構造システムの耐震設計及び設計方針

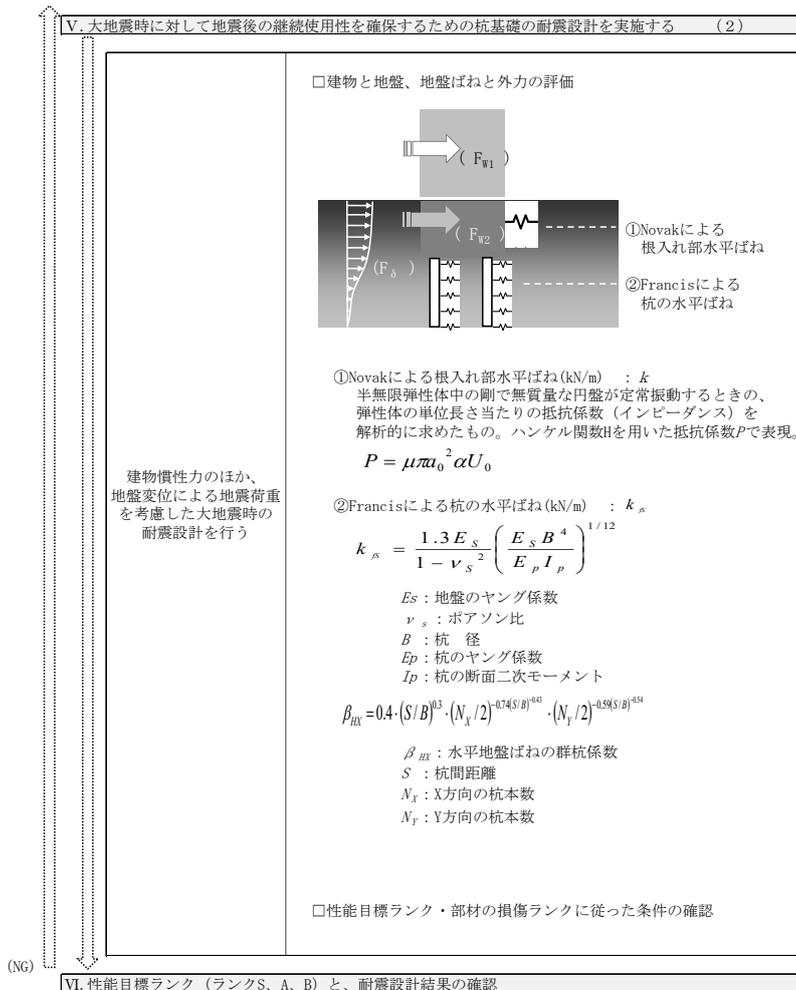
2.1 杭基礎構造システムの耐震設計

2.1.1 耐震設計フロー

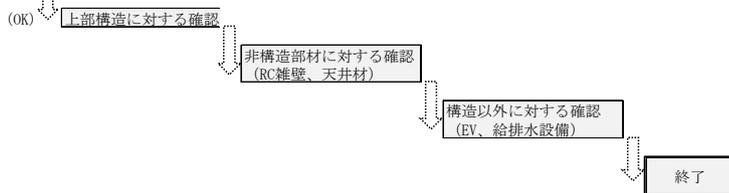
2013～2015 年度に作成した継続使用性を確保した杭基礎の耐震設計フローについては、最新の知見をもとに見直す必要がある。耐震設計フローの修正にあたり、ここでは、日本建築学会より発刊された規準・指針等より新たな知見を整理し、該当する項目を耐震設計フローの右側へ併記、整理している。詳細は、「1.2.2 最近の技術基準・指針」を参照のこと。

表 2.1.1-1 杭基礎の耐震設計フロー





- 杭応力の重ね合わせ ㉔
 - ・同時に作用させる。低減係数の設定。
- 土圧合力ばね (根入れ部) ㉔
 - ・地下基礎部の土圧合力算定法の設定。
(受動土圧—静止土圧, 相対変位 5%)
- 杭水平地盤ばね ㉔
 - ・既往の実験結果を整理した算定式。
(基準水平地盤反力係数 k_{h0} 評価法)
- 群杭の影響を考慮する係数 ㉔
 - ・水平地盤反力係数, 反力度への評価。
- パイルキャップの設計 ㉔
 - ・場所打ちコンクリート杭の設計法



2.1.2 性能目標ランクの設定

2011年東北地方太平洋沖地震および2016年熊本地震では、行政庁舎や避難所など防災拠点としての機能が期待される建築物においても、杭の損傷に起因する不同沈下等により継続使用が不可能となって取り壊される事例が確認されている [2-4][2-5]。このようなことから、大地震後の建築物の継続使用性を考えるうえで基礎構造の重要性が認識され、杭基礎に関する技術開発や知見の蓄積が進められているところである。

大地震時を想定した杭基礎の2次設計の必要性については日本建築学会でも議論され、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」(以降「基礎指針」と称す)では2019年改訂版 [2-3]において杭基礎の要求性能や2次設計について具体的な考え方や手法が明示された。また、「防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン(新築版)」[2-6]でも、杭基礎の設計においては、大地震時の応答を適切に評価し、杭の損傷が発生しても上部構造の支持性能に配慮して継続使用を図ることを求めている。

このような中、建築研究所の指定課題「既存鉄筋コンクリート造建築物の地震後継続使用のための

第2章 杭基礎構造システムの耐震設計及び設計方針

耐震性評価手法の開発の一環として、日本建築構造技術者協会に設置したWGにおいて既製杭を用いた杭基礎の継続使用性に着目した試設計および耐震性能評価を行ってきた[2-7][2-8]。本WGで用いている大地震時の要求性能は、文献[2-9]から引用しており、杭基礎は構造部材であることから、目標ランクS、A、Bはそれぞれ損傷ランクⅠ、Ⅱ、Ⅲに対応することとなる。目標ランクの定義を表2.1.2-1に、また基礎部材の損傷ランクの状態を表2.1.2-2に示す。

表 2.1.2-1 目標ランク

目標ランク	概要
S	地震後も使用制限することなく、建物全体が継続使用できる。
A	一部のエリアで、地震後に使用制限が生じる。活動上最も重要なエリアは、地震後も使用制限することなく、継続使用できる。
B	一部のエリア（活動上最も重要なエリアを含む）で、地震後に使用制限が生じるが、一定の措置後、活動上最も重要なエリアを継続使用できる。

表 2.1.2-2 基礎部材の損傷ランクと損傷状態

損傷ランク		損傷状態
Ⅰ	大地震動後、当該部分に被害（直ちに応急措置等を必要としない軽微な損傷を除く）を許容しない。	修復が不要な状態（例えば、部材は短期許容応力度以内に留まっていること）
Ⅱ	大地震動後、当該部の比較的小さな損傷に対して、応急措置又は軽微な修復の実施を許容する。	基礎部材の損傷・沈下により、上部構造が継続使用不能とならない状態で、必要に応じて軽微な修復による恒久復旧が必要な状態（例えば、部材は終局強度以内、かつせん断余裕度を確保できていること）
Ⅲ	大地震動後、当該部分の損傷に対して、応急措置又は修復の実施を許容する。	基礎部材の損傷・沈下により、上部構造が継続使用不能とならない状態で、大規模な修復による恒久復旧が必要な状態（例えば、一部に修復可能なヒンジ状態を許容すること）

試設計では、各ランク（ランクS、ランクA、ランクB）を目標とした杭基礎の2次設計および保証設計について検討した。ランクS、Aは基礎指針に示される性能グレードS、Aとほぼ同義であり、基礎指針に沿った設計法が踏襲されるが、ランクBについては具体的に示された指針などが無いため、表2.1.2-2より以下のように整理した。

条件①：上部構造が継続使用不能とならないこと

条件②：基礎構造に修復可能な損傷を許容すること

条件①については、杭の損傷が上部構造に有害な不同沈下や傾斜を起こさないことを定量的に示せばよいと考えられ、これについては「基礎指針」の要求性能などが適用可能と思われる。一方、条件②は杭に塑性ヒンジを許容することから、既製杭に対して靱性を期待し、またその塑性率について修復性を考慮したクライテリアを設定する必要がある。

ランクBの検討を行うにあたっては、既製杭の実験に関する文献（後述の文献[2-10]、[2-11]）等を参考にその終局回転角を定めて試設計を行う。また、その結果をランクS、ランクAの結果と比較検討

する。なお、R2年度ランクSとして検討した杭頭半剛接杭工法については、杭頭接合部の引抜き抵抗を仮定してランクAの試設計を行うとともに、本工法の設計合理化の可能性についても考察する。

2.1.3 設計荷重

設計用地震力は、稀に発生する地震（レベル1地震）、極稀に発生する地震（レベル2地震）とする。また、レベル2地震に対する余裕度および脆性破壊の防止を確認するための保証設計を行う。

考慮する設計荷重は、レベル1地震では上部構造の慣性力のみ、レベル2地震では上部構造の慣性力と地盤変位応力とする。レベル1地震で地盤変位応力を考慮しないのは、本検討では地盤の液状化はないとしていることから地盤変位は小さく杭応力に大きな影響を与えないと判断したためである。設計荷重の組み合わせと大きさを表2.1.3-1に再掲する。

表2.1.3-1 設計荷重

想定する地震		稀に発生する地震（レベル1）	極稀に発生する地震（レベル2）	
設計法		1次設計	2次設計	保証設計
設計荷重	慣性力	建築基準法に基づく	Cbは必要保有水平耐力以上かつ0.4以上	
	地盤変位	考慮しない	レベル2地震時地盤変位	

試設計では、まず上部構造を通常の実務で用いられる方法で応力解析を行い、基礎構造に発生する応力を求める。本検討で対象とする部材は、杭体、杭頭接合部、パイルキャップおよび基礎梁とし、これらに対して1次設計、2次設計を行う。また、これらについて保証設計を行う。

2.2 対象とする杭基礎工法

2.2.1 杭基礎工法の概要

目標ランク B とした設計において杭頭部での塑性ヒンジを許容できる杭基礎構造システムとして、降伏埋込工法と中実杭工法を採用する。また、杭頭の応力を低減させるための工法として、杭頭半剛接工法を採用する。それぞれの概要を以下に示す。

(1) 接合面降伏型埋込既製杭工法（略称：降伏埋込工法）

一般的な既製杭のパイルキャップへの接合方法として、文献[2-2]では 2 つの接合方法を紹介している。一つは、杭頭定着筋を用いてパイルキャップ内に定着する接合方法で、「接合法 A」と呼んでいる。もう一つは、杭頭部をパイルキャップに埋め込む接合方法で、「接合法 B」と呼んでいる。

一方、文献[2-10]では、既製杭をパイルキャップに埋め込み、かつ定着筋を用いてパイルキャップ内に定着する工法の検証が行われており、その設計法が示されている。この方法は、文献[2-2]でいうところの「接合法 A」と「接合法 B」を併せ持った接合方法である。この接合方法は、埋め込んだ部分でのパイルキャップの配筋を適切に設計することなどの条件により、靱性能のある復元力特性のもつ実験結果が報告されている。本試設計では、この工法をランク B の設計において杭頭部での塑性ヒンジを許容できる杭基礎構造システムとして考え、この工法を用いた試設計を実施する。また、本報告書ではこの接合方法の名称を「接合面降伏型埋込既製杭工法（略称：降伏埋込工法）」とする。

(2) 鋼管による拘束中実（既製）杭工法（略称：中実杭工法）

文献[2-11]及び文献[2-12]では、SC 杭の圧縮靱性を向上させることを目的として、拘束効果に期待した鋼管を用いた中実コンクリート杭の開発が行われている。この杭は、鋼管が座屈しないように拘束効果のみを期待した鋼管を、中実のコンクリート杭に巻き付けており、コンクリートの内部には軸方向鉄筋が配されている。この杭は、施工性を考慮し鋼管とコンクリートの間の付着を除去するような特別な処理はしていないが、上下端部にそれぞれ隙間を設けることで鋼管に直接圧縮力が伝達し座屈しないように設計している。この実験の結果、杭体が塑性化した後も高い靱性能を持つ復元力特性を持つことが確認できた。本試設計では、ランク B の設計において杭頭部での塑性ヒンジを許容できる杭基礎構造システムとして、この杭体を用いた試設計を実施する。また、本報告書ではこの杭を用いた工法の名称を「鋼管による拘束中実（既製）杭工法（略称：中実杭工法）」とする。

(3) 杭頭半剛接合工法

既製コンクリート杭の杭頭部はパイルキャップに剛接合されるのが通常であるが、杭頭固定のため地震時にはこの部分に応力が集中して被害が発生した事例が確認されている。近年、これを回避するために杭頭を剛接合とせず地震時に作用する杭頭曲げモーメントを低減し、杭基礎の耐震性能を向上（損傷を低減）させる構法の研究が進み、また実用化されてきている。

杭頭を剛接合としない構法には、杭頭に機械的なピンやローラー機構を設けるものと、杭頭をパイルキャップに浅く根入れする程度として回転靱性を考慮する半剛接合構法がある。半剛接合構法は軸力変動の影響を受けるためモデル化には十分な検討が必要であるが、接合方法が簡易であり施工性、経済性にメリットがあること、杭頭曲げモーメントの有意な低減が期待できることから実用的と考え、検討対象に加えることとした。試設計では、文献[2-13]、[2-14]等 に示される F.T.Pile 構法を取り上げる。ランク S では短期許容応力度以内で設計を行うため F.T.Pile 構法の設計法を用いるが、ランク A

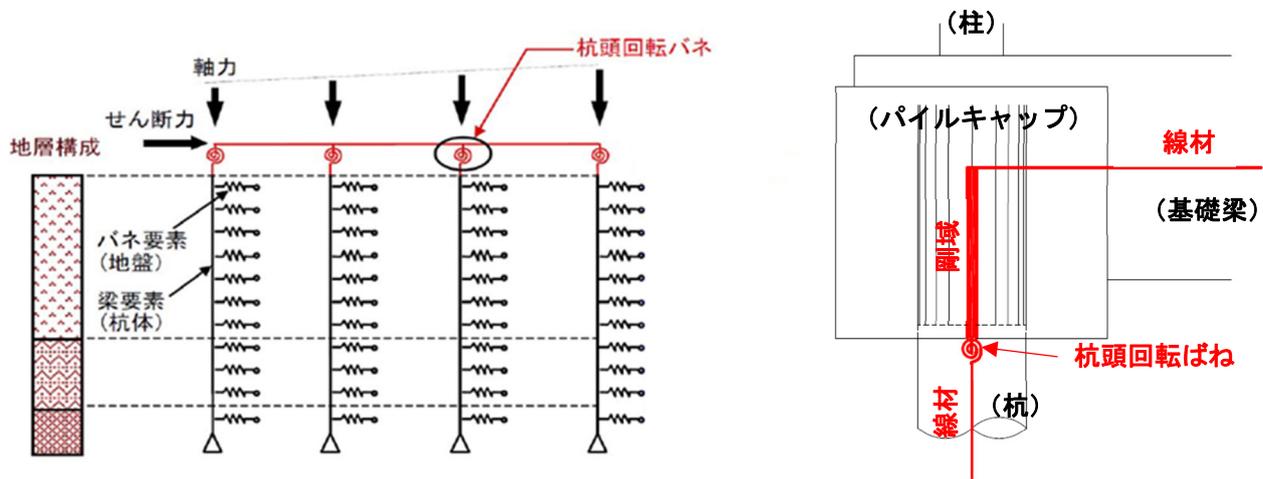
では構法として F.T.Pile 構法に限定せず、構法上の規定の引抜抵抗用鋼棒の配置できる本数の上限を設けず、F.T.Pile 構法の設計式・評価式を準用し検討を行う。

2.2.2 靱性能のある工法のモデル化

本検討で使用する降伏埋込工法と中実杭工法は、ともに靱性能のある杭工法として以下の要領でモデル化する。

(1) 杭応力解析モデルと杭頭バネ

降伏埋込工法と中実杭工法の杭応力解析モデルは、図 2.2.2-1 (a) のように設定する。図 2.2.2-1 (b) のように杭頭部には、杭頭バネを設ける。この杭頭バネは、図 2.2.2-2 のように杭頭のモーメント-杭頭回転角の復元力特性を持つバネとする。バネの特性は第一折れ点 (θ_y, M_u) を持つ完全弾塑性型とし、終局回転角 θ_u までは一定のモーメントを負担するものとする。杭頭バネはパイルキャップ下面に設けることとする。なお、基礎指針 [2-3] の「付録 鋼管杭の保有性能」にも杭頭接合部をバイリニア型の杭頭バネにモデル化する例が記載されているので、こちらも参考にされたい。



(a) 応力解析モデル全体図

(b) パイルキャップ部分のモデル化

図 2.2.2-1 杭応力解析モデル図

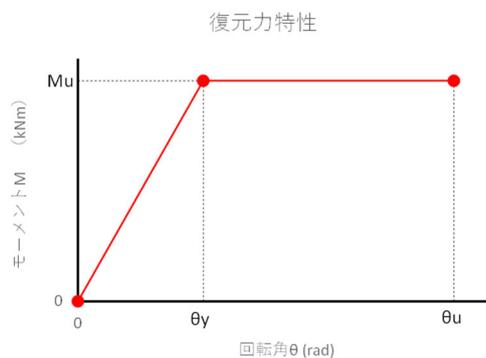


図 2.2.2-2 杭頭バネのモデル化

(2) 降伏埋込工法の復元力特性

1) M_u の計算方法

降伏埋込工法の復元力特性について、図2.2.2-2中の M_u は文献[2-10]の計算方法を用いて計算する。文献[2-10]の方法では、図2.2.2-1(b)と同様に検討断面位置（杭頭回転ばねの設置位置）をパイルキャップ下面としている。ため、図2.2.2-2中の M_u は文献[2-10]の(1.2)式中の M_{u0} であり、式(2.2.2-1)で計算できる。なお、式(2.2.2-1)以外の詳細な計算方法は、文献[2-10]を参照されたい。

$$M_u = M_{u0} = M_{teu0} + M_{Hu0} \quad (2.2.2-1)$$

ここで、 M_{u0} ：パイルキャップ下面の最大曲げ耐力
 M_{teu0} ：パイルキャップ下面でのてこ機構による曲げ耐力
 M_{Hu0} ：パイルキャップ下面での定着機構による曲げ耐力

第一折れ点の θ_y と、終局回転角 θ_u は文献[2-10]の実験結果から概算することとする。第一折れ点の θ_y は、実験における杭頭接合筋の降伏時の変形角の平均値を、終局回転角 θ_u は、実験において十分な靱性を発揮した試験体における、実験で確認できた範囲での最大回転角を用いることとする。表2.2.2-1に試験体諸元と θ_y 、 θ_u の実験値を示す。

埋込長さが大きい場合（1.0の場合）は靱性が乏しいため、埋込長さが小さい場合（0.5の場合）のみを対象とすると、4体の試験体における θ_y の平均値は0.27%となった。また、4体の試験体のうち、Case0.5/3Tのみ計測の問題により、回転角の情報が3.5%付近までしか記録できていないが、部材角の履歴からおそらく5.0%程度までは耐力低下しないと考えられることから、 θ_u は5.0%とする。

表2.2.2-1 試験体諸元と θ_y 、 θ_u の実験値

	Case0.5/3	Case0.5/2	Case1.0/3	Case1.0/2	Case0.5/3C	Case0.5/3T	Case1.0/3T
パイルキャップ コンクリート強度 [MPa]	31.0	31.0	31.0	31.0	23.0	23.0	23.0
杭頭定着筋	16-D22 [SD345]	16-D22 [SD345]	8-D22 [SD345]	8-D22 [SD345]	16-D22 [SD345]	16-D22 [SD345]	16-D22 [SD345]
軸力 [kN]	0	0	0	0	3000	-1000	-1000
圧縮接合面軸力比*1 =N/(Ac × σ_B + As × σ_y)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	-	-
引張接合面軸力比 =N/(As × σ_y)	-	-	-	-	-	0.42	0.42
埋込み長さ (Dは杭径)	0.5D	0.5D	1.0D	1.0D	0.5D	0.5D	1.0D
第一折れ点 θ_y	0.344	0.300	0.354	0.370	0.246	0.206	0.338
終局回転角 θ_u	5.000	5.000	靱性無	靱性無	5.000	3.500	靱性無

2) 適用範囲

実験で確認できている範囲を適用範囲とする。

- コンクリート強度はFc18～Fc60までとする。
- 杭頭定着筋および水平補強筋はSD295～SD490とする。
- 軸力は接合面軸力比（計算方法は表2.2.2-1参照）で計算し、圧縮の上限は0.57、引張の上限は0.42までとする。

- 埋込長さは杭径の0.5倍とする。(文献[2-10]では0.5~1.5倍としているが、今回は0.5とする。)
- 埋め込まれた周囲に水平筋を十分に配筋すること。具体的には、文献[2-10]の(3.3)式で計算される水平筋強度の総和 T_u が、てこによる押し出し力 R_{u1} を超えること。
- パイルキャップ径は杭径の2.5倍とする。

(3) 中実杭工法の復元力特性

1) M_u の計算方法

中実杭工法の復元力特性について、図 2.2.2-2 中の M_u および θ_y は断面解析を用いて計算する。なお、コンクリートと鉄筋のモデルは下記のモデルとする。ただし、鋼管はモデル化せず、コンクリートの拘束効果にのみ考慮する。断面解析で得られた所定の軸力における最大モーメントを M_u とする。

コンクリート： 完全弾塑性モデルで、図 2.2.2-3 及び(2.2.2-2)式、(2.2.2-3)式で計算する。ただし、コンクリートは圧縮応力のみ負担し、引張側の応力は 0 とする。

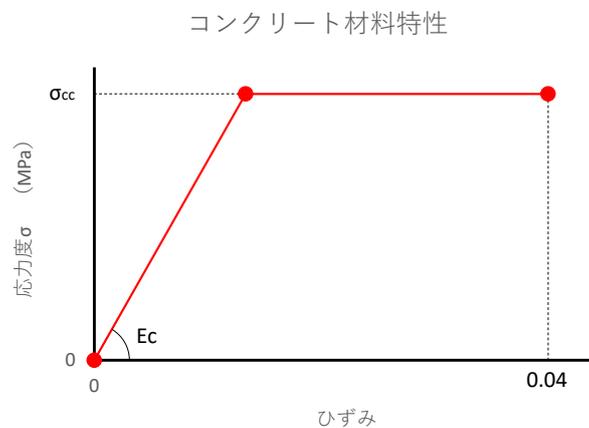


図 2.2.2-3 コンクリート材料モデル

$$\sigma_{cc} = c\gamma_U \cdot \sigma_B + k \cdot \sigma_r \quad (2.2.2-2)$$

$$\sigma_r = \frac{2t}{D-2t} \cdot \alpha \cdot \sigma_y \quad (2.2.2-3)$$

σ_{cc} : 拘束されたコンクリートの圧縮強度 (MPa)

$c\gamma_U$: コンクリートの強度低減係数で、 $c\gamma_U=1.0$ とする。

k : 拘束係数で、 $k=4$ とする。

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

σ_r : 拘束コンクリートに作用する側圧 (MPa)

α : 周方向応力成分比で、 $\alpha=1.0$ とする。

D : 杭直径 (mm)

t : 鋼管厚さ (mm)

σ_y : 鋼管降伏強度 (MPa)

E_c : コンクリートヤング係数 (MPa)

鉄筋：降伏強度で折れる完全弾塑性モデルとし、ヤング係数は200GPaまたは205GPaを用いること。

2) θ_y と θ_u の計算方法

断面解析で得られたモーメント曲率関係より、下記の方法で θ_y を計算する。また、 θ_u は実験で繰返しも含めて確認できている $\theta_u=4.0\%$ とする。

Step 1：断面解析で得られたモーメント曲率関係の曲率に杭直径 D を掛けて回転角にする。

Step 2：Step1 で得られたモーメント回転角関係における面積 A (図 2.2.2-4 の青網掛け部分) を計算する。

Step 3：Step2 で求めた面積と折れ点モデルによる面積が同じになるように θ_y を次式で計算する。

$$\theta_y = 2 \times \frac{M_u \cdot \theta_1 - A}{M_u} \tag{2.2.2-4}$$

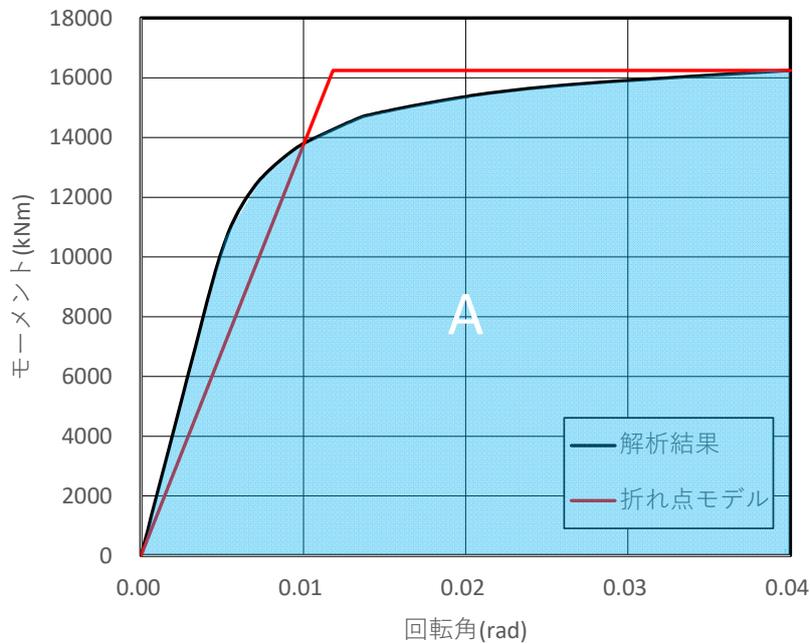


図 2.2.2-4 θ_y 計算のイメージ

2) 適用範囲

実験で確認できている範囲 [2-11],[2-12] を適用範囲とする。

- コンクリート強度はFc18～Fc60までとする。(実験 [2-11],[2-12] の実強度は66.0MPa)
- 軸方向鉄筋はSD295～SD490とする。
- 鋼管の強度はSKK490とする。
- 鋼管厚さ t 杭径を D としたとき、径厚比 (D/t) は40.0以下になるようにすること。(実験 [2-11],[2-12] では実測値で44.0)
- 軸力は下記の軸力比 η と有効軸力比 η_e の二つの範囲内とする。

$$\begin{aligned} -0.500 \text{ (引張)} &\leq \eta \leq 0.40 \text{ (圧縮)} && \text{(実験では 0.430)} \\ -0.500 \text{ (引張)} &\leq \eta_e \leq 0.25 \text{ (圧縮)} && \text{(実験では 0.254)} \end{aligned}$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{N}{\sigma_B A_c + {}_s\sigma_y A_s} & \text{(圧縮)} \\ \frac{N}{{}_s\sigma_y A_s} & \text{(引張)} \end{cases} \quad (2.2.2-5)$$

$$\eta_e = \begin{cases} \frac{N}{\sigma_{cc} A_c + {}_s\sigma_y A_s} & \text{(圧縮)} \\ \frac{N}{{}_s\sigma_y A_s} & \text{(引張)} \end{cases} \quad (2.2.2-6)$$

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

σ_{cc} : 拘束されたコンクリートの圧縮強度 (MPa) で, (2.2.2-2)式を用いる。

${}_s\sigma_y$: 軸方向鉄筋降伏強度 (MPa)

A_c : コンクリート断面積 (mm²)

A_s : 鉄筋断面積 (mm²)

N : 軸力 (N) 圧縮を正, 引張を負とする。

4) そのほかの計算

杭中央部の短期許容せん断耐力は, SC 杭のせん断設計と同様に, 鋼管のみの短期許容せん断耐力として, (2.2.2-7)式で計算する。

$$Q_{as1} = A_{cs} \cdot \frac{f_{cs}}{k_s} \quad (2.2.2-7)$$

Q_{as1} : 杭中央部の短期許容せん断耐力 (N)

A_{cs} : 鋼管の断面積 (mm²)

f_{cs} : 鋼管の短期許容せん断応力度 (MPa)

k_s : 薄肉鋼管の形状係数 (断面に発生する最大せん断応力度に対する平均せん断応力度の比) で, ここでは SC 杭や CFT 指針などと合わせて $k_s=2.0$ とする。

杭隙間部の短期許容せん断耐力は, 鉄筋のダボ抵抗の短期許容耐力として, (2.2.2-8)式で計算する。

$$Q_{as2} = A_s \cdot \frac{{}_s\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (2.2.2-8)$$

Q_{as2} : 杭隙間部の短期許容せん断耐力 (N)

${}_s\sigma_y$: 軸方向鉄筋降伏強度 (MPa)

A_s : 鉄筋断面積 (mm²)

2.2.3 杭頭半剛接合工法のモデル化

(1) 杭応力解析モデル

本検討では、杭頭半剛接合構法は F.T.Pile 構法と限定していないが、以下の設計式、評価式などは、F.T.Pile 構法の式を準用する。

杭頭半剛接合工法の杭応力解析モデルは、図 2.2.3-1 のように設定する。図 2.2.3-1 のように杭頭部には、杭頭半剛接合構法による杭頭回転ばね (M- θ 関係) を設ける。

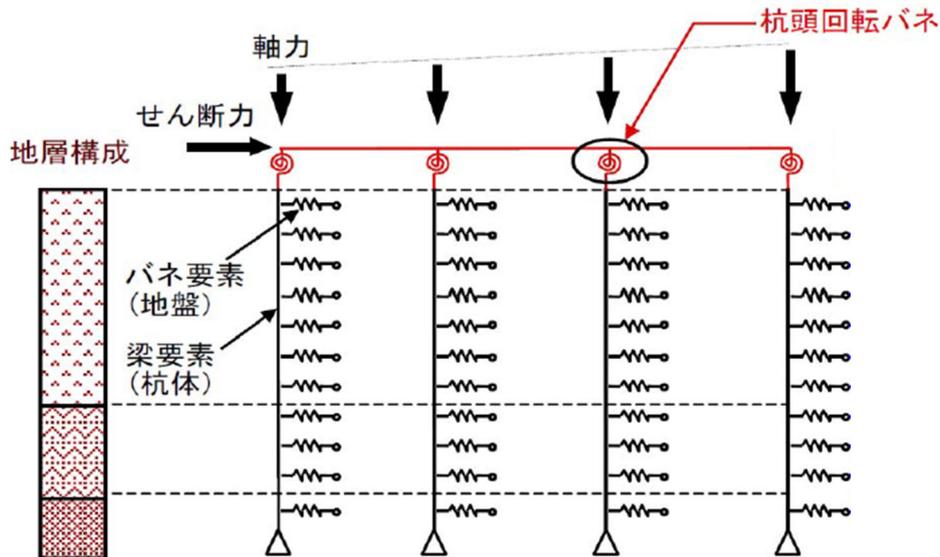


図 2.2.3-1 杭応力解析モデル図

(2) 杭頭接合部の回転剛性 (杭頭回転ばね)

杭頭半剛接合構法を採用した杭頭接合部の回線性状は、軸力に応じた非線形挙動を示す。応力解析では、杭頭接合部の回転性状をモデル化し、杭頭接合部の応力変形状態に対応した回転剛性を収斂計算によって用いている。

1) M- θ 関係の基本式

杭頭の曲げモーメント M と回転角 θ の関係 (以下、M- θ 関係) を浮き上がり回転角により (2.2.3-1) および (2.2.3-2) 式でモデル化して用いる。図 2.2.3-2 に M- θ 関係のモデル化の概要を示す。

$$(0 \leq \theta \leq \theta_c \text{の時}) \quad M = K_0 \cdot \theta \quad (2.2.3-1)$$

$$(\theta > \theta_c \text{の時}) \quad M = \frac{\theta}{\theta + \theta_f} \cdot M_{\max} \quad (2.2.3-2)$$

ここで、

- M : 杭頭接合部の曲げモーメント (kN・m)
- θ : 杭頭接合部の回転角 (rad)
- θ_c : 浮き上がり回転角 (rad)
- θ_f : 基準回転角 (rad)
- K_0 : 初期回転剛性 (kN・m/rad)
- M_{\max} : 最大抵抗モーメント (kN・m)

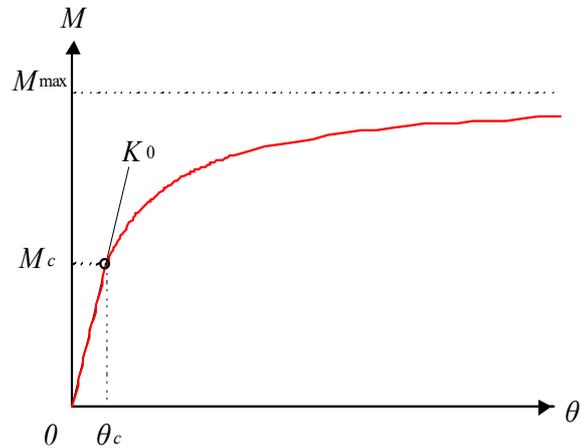


図 2.2.3-2 M- θ 関係のモデル化の概要

浮き上がり回転角 θ_c は、(2.2.3-3)式により算定する。

$$\theta_c = \frac{M_c}{K_0} \quad (2.2.3-3)$$

ここで、

- θ_c : 浮き上がり回転角 (rad)
- M_c : 浮き上がりモーメント (kN・m)
- K_0 : 初期回転剛性 (kN・m/rad)

浮き上がりモーメント M_c は、杭頭引張縁の鉛直応力がゼロになる時の曲げモーメントに等しいと考え、(2.2.3-4)式により算定する。

$$M_c = \frac{D_1^2 + D_2^2}{8D_1} \cdot N \quad \text{ただし, } M_c \geq 0 \quad (2.2.3-4)$$

ここで,

- M_c : 浮き上がりモーメント (kN・m)
- D_1 : 杭の外径 (m)
- D_2 : 杭の内径 (m)
- N : 軸力 (kN)

基準回転角 θ_f は, (2.2.3-5)式により求めることができる。

$$\theta_f = \frac{M_{\max} - M_c}{K_0} \quad (2.2.3-5)$$

ここで,

- θ_f : 基準回転角(rad)
- M_{\max} : 最大抵抗モーメント (kN・m)
- M_c : 浮き上がりモーメント (kN・m)
- K_0 : 杭頭接合部の初期回転剛性(kN・m/rad)

以降に, 初期回転剛性 K_0 と最大抵抗モーメント M_{\max} の設定方法を示す。

2) 初期回転剛性 K_0 の設定方法

初期回転剛性は, 杭頭に圧縮軸力が作用する場合と圧縮軸力が作用しない場合に分け, 以下のよう求める。

(a) 圧縮軸力が作用する場合 ($N > 0$)

圧縮軸力が作用する場合, 杭頭接合部の初期回転剛性 K_0 は, 図 2.2.3-3 に示すように, パイルキャップを半無限弾性体, 杭頭を円環形状の基礎にみたて, 基礎の回転剛性として弾性理論により求める。(2.2.3-6)式に圧縮軸力が作用する場合の初期回転剛性 K_0 の算定式を示す。

$$K_0 = \frac{\pi \cdot E}{32(1-\nu^2)} (D_1^3 - D_2^3) \times 10^3 \quad (2.2.3-6)$$

ここで、

- K_0 : 初期回転剛性 (kN・m/rad)
- E : パイルキャップコンクリートの弾性係数 (N/mm²)
- ν : パイルキャップコンクリートのポアソン比
- D_1 : 杭の外径 (m)
- D_2 : 杭の内径 (m)

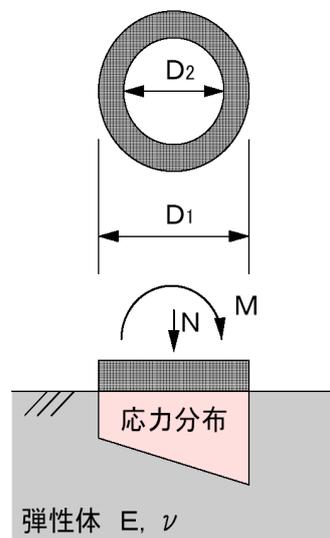


図 2.2.3-3 初期回転剛性を求める際の仮定

(b) 圧縮軸力が作用しない場合 ($N \leq 0$)

圧縮軸力が作用しない場合の初期回転剛性 K_0 は、引き抜き抵抗用鋼棒が弾性域における回転剛性として(2.2.3-7)式により求める。

$$K_0 = \frac{M_a}{\theta_a} \quad (2.2.3-7)$$

ここで、

- K_0 : 杭頭接合部の初期回転剛性 (kN・m/rad)
- M_a : 杭頭接合面の許容モーメント (kN・m)
- θ_a : 許容回転角 (rad)

杭頭接合面の許容モーメント M_a は、杭頭接合部の鋼棒量、配置間隔、許容応力、および作用軸力から(2.2.3-8)式により算定する。(2.2.3-8)式は杭頭の回転中心を圧縮側鋼棒の中心位置とした平面保持の仮定と力のつり合いから導いた(図 2.2.3-4)。

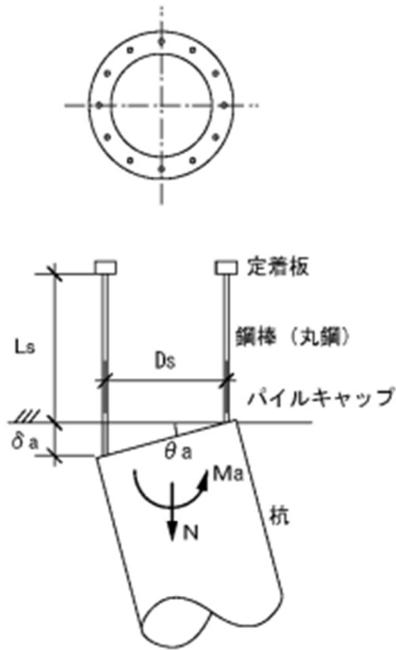


図 2.2.3-4 引抜き抵抗用鋼棒の短期許容応力で決まる許容回転角

$$M_a = 3.75 \times 10^{-4} \times a_g \cdot f_t \cdot D_s + 0.5N \cdot D_s \quad (2.2.3-8)$$

ここで、

- M_a : 引抜き対応タイプの許容モーメント (kN・m)
- a_g : 引抜き抵抗用鋼棒の全断面積 (mm²)
- f_t : 引抜き抵抗用鋼棒の許容応力度 (N/mm²)
- D_s : 引抜き抵抗用鋼棒の配置距離 (m)
- N : 軸力 (kN)

許容回転角 θ_a は、鋼棒の許容ひずみと有効長さ（定着長さ）、および鋼棒の配置距離から、(2.2.3-9)式により算定する。

$$\theta_a = \frac{\delta_a}{D_s} \quad (2.2.3-9)$$

ここで、

- θ_a : 許容回転角 (rad)
- δ_a : 鋼棒の許容伸び ($\delta_a = \epsilon_a \times L_s$) (m)
- ϵ_a : 鋼棒の許容ひずみ ($\epsilon_a = f_t / E_s$)
- f_t : 鋼棒の許容応力度 (N/mm²)
- E_s : 鋼棒の弾性係数 (N/mm²)
- L_s : 鋼棒の有効長さ (m)
- D_s : 鋼棒の配置距離 (m)

3) 最大抵抗モーメント M_{\max} の設定方法

最大抵抗モーメントは、高軸力下における曲げモーメントの補正係数を考慮し、(2.2.3-10)式により算定する。

$$M_{\max} = \eta \cdot M_e \quad (2.2.3-10)$$

ここで、

- M_{\max} : 最大抵抗モーメント(kN・m)
 η : 補正係数
 M_e : 基準抵抗モーメント(kN・m)

補正係数 η は、(2.2.3-11)式により算定する。

$$\eta = -0.16 \frac{\sigma_n}{F_c} + 1.0 \quad (\text{ただし, } 0.85 \leq \eta \leq 1.0) \quad (2.2.3-11)$$

ここで、

- σ_n : パイルキャップの軸応力度(N/mm²)
 $\sigma_n = \frac{N}{A_p} \times 10^{-3}$ (ただし, $\sigma_n \geq 0$)
 N : 軸力(kN), A_p : 杭頭面積(m²)
 F_c : パイルキャップのコンクリートの設計基準強度(N/mm²)

標準タイプの基準抵抗モーメント M_e は、軸力による最大偏心モーメントとして、(2.2.3-12)式により算定する。

$$\text{標準タイプ: } M_e = 0.5N \cdot D_1 \quad (2.2.3-12)$$

ここで、

- N : 軸力(kN)
 D_1 : 杭の外径(m)

引抜き対応タイプの基準抵抗モーメント M_e は、軸力と引抜き抵抗用鋼棒を考慮して、(2.2.3-13)式により算定する。同式は、 図 2.2.3-5 に示すように、鋼棒の応力分布を引張側鋼棒の半分が引張耐力 f_u に達するとして、力のつり合いから導いた。

引抜き対応タイプ： $M_e = 5 \times 10^{-4} \times a_g \cdot f_u \cdot D_s + 0.5N \cdot D_s$ (2.2.3-13)

ここで、

- a_g : 鋼棒の全断面積 (mm^2)
- f_u : 鋼棒の引張耐力 (N/mm^2)
- N : 軸力 (kN)
- D_s : 鋼棒の配置距離 (m)

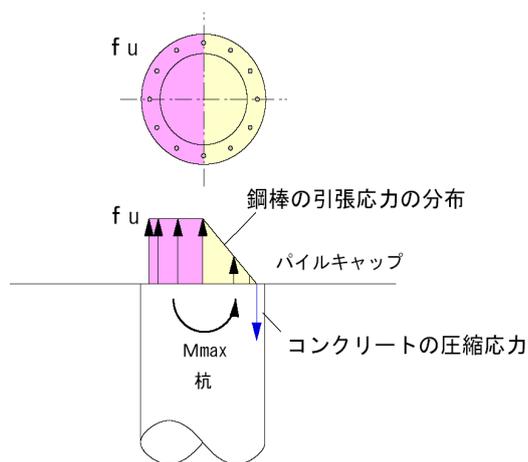


図 2.2.3-5 引抜き対応タイプにおける M_e 算定時の鋼棒の応力分布

2.3 設計方針

2.3.1 1次設計

現行の建築基準法に基づく1次設計を行う。主な設計方針は以下のとおりとする。

- ・ 1次設計レベルでは杭体はほぼ弾性であることを考慮し、解析モデルは単杭モデルとする。
- ・ 応力計算は一様地盤中の弾性支承梁の解によることとし、水平地盤ばねは基礎指針^[2-3]に準じて算定する。このとき、地盤の変形係数 E_0 は $700N$ とする。
- ・ 液状化の可能性のない地盤を対象としており、地盤変形は小さいと考えられるため、設計応力は慣性力のみとする。
- ・ 杭体および杭頭接合部の設計は、使用する既製杭の設計資料および RC 規準^[2-1]による。
- ・ パイルキャップの設計は、RC 規準^[2-1]による方法と、一般的に実務で用いられている方法で行い、比較する。

2.3.2 2次設計

大地震後の継続使用性を確保するため、目標ランクを定めて2次設計を行う。主な設計方針は以下のとおりとする。

- ・ 解析モデルは基礎指針^[2-3]に基づき、杭先端をローラー支承とした群杭フレームモデルを用いる。また、土圧合力ばねを考慮する。
- ・ 上部構造の慣性力は、ベースシャー係数 C_b は必要保有水平耐力以上かつ 0.4 以上とする。また、地下部分の設計震度は $0.4 \times Z$ とし、深さによる低減はしない。
- ・ 応答スペクトル法によって求めたレベル2地震時の地盤変位による応力を考慮する。
- ・ 応力解析は増分解析を基本とし、慣性力と地盤変位応力の応力解析の方法は、使用する解析ソフトで可能な方法から選択する。
- ・ 応力の評価方法では、基礎指針^[2-3]に倣い、慣性力と地盤変位の同時性を考慮した低減係数、群杭効率評価式を考慮する。
- ・ 杭体および杭頭接合部の設計は、使用する既製杭の設計資料および RC 規準^[2-1]による。
- ・ 杭頭半剛接構法の杭頭接合部の設計は、引張側について必要な引抜き抵抗鋼棒が配置できるものとして行う。詳細は7章による。
- ・ パイルキャップの終局時設計は、日本建築学会指針(案)^[2-2]の方法と、既往の学術論文^[2-15]の方法の2つで行い、結果を比較する。
- ・ 杭体の2次設計クライテリアを確保するため、基礎梁はヒンジを生じさせない設計とする。

2.3.3 保証設計

レベル2地震に対する余裕度および脆性破壊の防止を確認するために保証設計を行う。保証設計の対象は、杭体、杭頭接合部、パイルキャップ、基礎梁とする。以下に保証設計の方針を示す。

- ・ 基本的な方針は、レベル2地震時の応力を割り増した断面設計により、脆性破壊の防止を図るものとする。
- ・ 脆性破壊の対象は杭の軸圧破壊と各部のせん断破壊とし、具体的には、軸圧破壊に対しては圧縮軸力を $D_s=0.55$ 相当に割り増す。また、せん断破壊に対してはせん断余裕度 $n=1.25$ を考慮する。
- ・ 杭頭半剛接工法の場合も基本的には上記と同じであるが、引抜対応タイプの杭頭接合部については、 $D_s=0.55$ 相当の引張力に対して鋼棒が終局耐力以下とする。

第2章 杭基礎構造システムの耐震設計及び設計方針

2.3.4 設計方針のまとめ

表 2.3.4-1, 表 2.3.4-2 に試設計の方針をまとめる。

表 2.3.4-1 設計方針のまとめ (降伏埋込工法, 中実杭工法)

想定する地震		稀地震 (レベル1)	極稀地震 (レベル2)	
設計レベル		1次設計	2次設計	保証設計
設計法	設計応力	慣性力	1次設計時 応力	Cb は必要保有水平耐力以上かつ 0.4 以上
		地盤 変位	考慮しない	2次設計用地盤変位
	応力算定方法		単杭モデル 弾性解析	<ul style="list-style-type: none"> 群杭フレームモデル 慣性力と地盤変位応力の増分解析
要求性能	杭体	ランク S	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> 終局強度以内 (圧縮軸力は $D_s=0.55$ 相当に割増) せん断余裕度 $n=1.25$
	杭頭部 パイル キャップ	ランク A	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> 終局強度以内 ランク S と同じ
	基礎梁	ランク B	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭部以外はランク S と同じ 杭頭部は $\theta_u^{(*1)}$ 以内 (圧縮軸力は $D_s=0.55$ 相当に割増)

(*1) θ_u はパイルキャップ下面における杭の終局回転角。降伏埋込工法 (SC 杭) で $\theta_u=0.05$ (rad), 中実杭工法で $\theta_u=0.04$ (rad) とする。

表 2.3.4-2 設計方針のまとめ（杭頭半剛接工法）

想定する地震		稀地震 (レベル1)	極稀地震 (レベル2)		
設計レベル		1次設計	2次設計	保証設計	
設計 法	設計応力	慣性力	1次設計時 応力	Cbは必要保有水平耐力以上かつ0.4以上	
		地盤 変位	考慮しない	2次設計用地盤変位	
	応力算定方法		単杭モデル 弾性解析	<ul style="list-style-type: none"> 群杭フレームモデル 慣性力と地盤変位応力の増分 解析 	<ul style="list-style-type: none"> 二次設計応力に対して割増 を考慮
要 求 性 能	杭体 基礎梁	ランク S~A	杭頭固定杭と 同じ	杭頭固定杭と同じ (杭頭回転角を除く)	杭頭固定杭と同じ (杭頭回転角を除く)
	パイル キャップ	ランク S	2次設計にて 安全性確認 ^(*)	<ul style="list-style-type: none"> パイルキャップが短期許容せん断耐力以下 引抜対応タイプは鋼棒が短期許容応力度以下 杭頭回転角が損傷限界回転角以内 	<ul style="list-style-type: none"> パイルキャップが終局せん断耐力以下 (せん断余裕度 n=1.25 に対して) 引抜対応タイプは鋼棒が終局耐力以下 (引張力は D_s=0.55 相当) 杭頭回転角が終局限界回転角以内 (圧縮軸力は D_s=0.55 相当に割増)
				杭頭部	ランク A

(*) 試設計では F. T. Pile をランク S で使用しており、二次設計における要求性能を短期許容応力度（損傷限界）以下としたため、一次設計の検討を省略している。

2.4 試設計概要

2.4.1 試設計建築物一覧

表 2.4.1-1 に示す検討対象建築物 3 棟について、耐震設計フロー（表 2.1.1-1）に基づいて杭基礎を対象に耐震性能評価を行う。なお、最新の知見を反映した検討を行うため、耐震設計フロー右欄に関連規準・指針において参照とする項目を示す。

検討では、同資料の継続使用性を確保するランクとして目標ランク S,A,B を選択し、ランクに応じたクライテリアを設定して試設計を行うことで耐震性能評価を実施する。

表 2.4.1-1 対象建築物一覧

	構造種別	階数	延床面積(m ²)	備考
学校校舎 A	RC 造	地上 3 階	約 3,300	耐力壁付ラーメン架構 地震被害建物
共同住宅 B	SRC 造	地上 8 階 塔屋 2 階	約 2,400	X 方向：ラーメン架構 Y 方向：耐力壁付ラーメン架構 地震被害建物
共同住宅 C	RC 造	地上 11 階	約 6,800	X 方向：ラーメン架構 Y 方向：連層耐力壁架構

2.4.2 実施内容一覧

本試設計で実施する内容について、表 2.4.2-1 に一覧を示す。また、各章の2次設計で用いるソフトウェア及び応力解析の方法を表 2.4.2-2 に示す。

表 2.4.2-1 実施内容一覧

(a) 3章

	建築物	性能目標 ランク	2次設計時 上部構造慣性力	地盤 種類	杭基礎工法
ケース A1	学校校舎 A	ランク S	Ds=0.55 相当	地盤 1	—
ケース A2	学校校舎 A	ランク A	Ds=0.55 相当	地盤 2	—
ケース A3	学校校舎 A	ランク B	Ds=0.55 相当	地盤 2	降伏埋込工法
ケース A4	学校校舎 A	ランク B	Ds=0.55 相当	地盤 1	中実杭工法

(b) 4章

	建築物	性能目標 ランク	2次設計時 上部構造慣性力	地盤 種類	杭基礎工法
ケース B1	共同住宅 B	ランク A	Ds=0.55 相当	地盤 2	—
ケース B2	共同住宅 B	ランク B	Ds=0.55 相当	地盤 2	降伏埋込工法
ケース B3	共同住宅 B	ランク B	Ds=0.55 相当	地盤 2	中実杭工法

(c) 5章

	建築物	性能目標 ランク	2次設計時 上部構造慣性力	地盤 種類	杭基礎工法
ケース B4	共同住宅 B	ランク S	Ds=0.55 相当	地盤 2	杭頭半剛接合工法
ケース B5	共同住宅 B	ランク A	Ds=0.55 相当	地盤 2	杭頭半剛接合工法

(d) 6章

	建築物	性能目標 ランク	2次設計時 上部構造慣性力	地盤 種類	杭基礎工法
ケース C1	共同住宅 C	ランク A	Ds=0.55 相当	地盤 1	—
ケース C2	共同住宅 C	ランク B	Ds=0.55 相当	地盤 1	—
ケース C3	共同住宅 C	ランク A	Ds=0.40 相当	地盤 1	—
ケース C4	共同住宅 C	ランク B	Ds=0.40 相当	地盤 1	—
ケース C5	共同住宅 C	ランク B	Ds=0.40 相当	地盤 1	降伏埋込工法
ケース C6	共同住宅 C	ランク B	Ds=0.40 相当	地盤 1	中実杭工法

表 2.4.2-2 2次設計で用いるソフトウェアと応力解析の方法

	3章	4章	5章	6章
建築物	学校校舎 A	共同住宅 B	共同住宅 B	共同住宅 C
杭モデル	群杭フレームモデル	群杭フレームモデル	群杭フレームモデル	群杭フレームモデル
解析ソフト	RESP-D (杭応答変位オプション) RESP-F3T	Midas iGen	PileExplorer X Ver.0	SNAP
応力解析	荷重増分解析 慣性力 (荷重増分) と地盤変位 (変位増分) の同時載荷	荷重増分解析 慣性力 (荷重増分) と地盤変位 (変位増分) の同時載荷	荷重増分解析 慣性力と地盤変位を 同時に作用	荷重増分解析 慣性力 (荷重増分) と地盤変位 (変位増分) の同時載荷
備考			杭頭半剛接工法	

参考文献

- [2-1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2018）
- [2-2] 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）
- [2-3] 日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2019改訂版）
- [2-4] 国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告書，国土技術政策総合研究所資料第674号，建築研究資料第136号，2012.3
- [2-5] 国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成28年（2016年）熊本地震建築物被害調査報告（速報），国土技術政策総合研究所資料第929号，建築研究資料第173号，2016.9
- [2-6] 国土交通省：防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン（新築版），令和元年6月
- [2-7] 日本建築構造技術者協会：杭基礎の試設計・耐震性能評価および最新の技術的知見の整理業務報告書，令和2年3月
- [2-8] 日本建築構造技術者協会：杭基礎の試設計・耐震性能評価業務報告書，令和3年3月
- [2-9] 喜々津他：地震後の継続使用性を確保した新築建築物の設計・耐震性能評価 その1 継続使用性に関する要求性能，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp45-46，2015年9月
- [2-10] 松田 竜，毛井 崇博，加藤 洋一，水嶋 康介，白石 将大：SC 杭頭埋込部の曲げ抵抗機構，日本建築学会構造系論文集，Vol.85，No.776，pp.1291-1301，2020.10
- [2-11] 渡辺臣，宮原清，向井智久，平出務，中村聡宏，渡邊秀和，小原拓，平尾一樹，木谷好伸，浅井陽一，松田竜：アンボンド鋼管巻き中実杭の載荷実験 その1 実験概要，日本建築学会大会講演梗概集，pp.593-594，2021.9
- [2-12] 宮原清，渡辺臣，向井智久，平出務，中村聡宏，渡邊秀和，平尾一樹，木谷好伸，浅井陽一，松田竜，小原拓：アンボンド鋼管巻き中実杭の載荷実験 その2 実験結果，日本建築学会大会講演梗概集，pp.595-596，2021.9
- [2-13] 青島他：改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭部の力学性状，日本建築学会構造系論文集，No.607，pp.125-132，2006.9
- [2-14] 青島他：改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭部の高軸力下における構造性能，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.653，pp.1271-1278，2010.7
- [2-15] 岸田他：大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究（その25 既製杭を用いたト形部分架構におけるパイルキャップせん断終局強度式の再検討），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp595-596，2018年9月