

第2章 鉄骨柱部材の疲労性能曲線式の検討

2.1 鉄骨柱部材の多数回繰り返し载荷実験（H30年度実施）

2.1.1 背景・目的

鉄骨柱部材に対する設計用疲労曲線式を提案することを目的として、既往知見（既存超高層、既往実験）の調査を行い、調査結果を考慮した実験計画を立案し、鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を実施する。

平成30年度の実験では、鉄骨柱部材の一定軸力および一定振幅に於ける基本的な多数回繰り返し特性を把握することを目的として、多数回繰り返し特性に影響を与えると考えられるパラメータを変化させた実験を実施し、多数回繰り返し载荷時の鉄骨柱部材の変形能力を把握する。

2.1.2 既往知見の調査

既往知見（既存鉄骨超高層建物、既往実験）の調査結果から実験範囲を考慮した実験計画を立案することを目的として、既存鉄骨超高層建物の柱諸元に関する実態調査、柱部材を用いた多数回繰り返し実験に関する文献調査を実施する。また、既往実験データを基に主要なパラメータが柱部材の多数回繰り返し性能に与える影響についても調査する。

(1) 既往鉄骨建物の実態調査

1960年代から1990年代に建設された鉄骨超高層建物について、柱諸元（幅厚比、径高さ比（細長比）等）の実態調査を行い、既存建物にどのような柱部材が使われているのかを把握する。

基整促 27-2「長周期地震動に対する鉄骨造建築物の安全性検証方法に関する検討」（H22～24）に於いても部材、接合部実験の実験条件（実験パラメータ）を設定するために、既存超高層（高さ：91～240m）の実態調査を実施している^{2.1-1)}。この中での調査対象は、制振装置の設置されていない建物で、年代分別（3区分：①～1985年、②1986～1995年、③1996年～）ごとに代表建物（棟数：13）を選定して調査を行っており、柱部材全般に関しては下記に示す知見が得られている。

- ・柱断面は主に溶接組立箱形断面（角形断面）
- ・最下層の柱の幅厚比はFAランク
- ・柱の細長比は12～25程度に分布（径高さ比は4～8程度に分布）
- ・柱の軸力比について長期は0.3～0.4程度、地震時の変動幅は0～0.6程度

なお、軸力比 n は、 $n=N/N_y$ （ $N_y=sA\times\sigma_y$ 、 N ：柱軸力、 N_y ：柱降伏軸力、 sA ：鋼管断面積、 σ_y ：鋼管の降伏点）である。

ここで、柱の軸力比（特に、変動幅）については、設計時と比べて地震力が大きくなっていることもあり、更に大きなものを考える必要がある。

地震時に塑性化する可能性のある最下層の柱に関して、基整促 27-2 の調査結果から代表的な柱諸元（幅厚比、径高さ比、細長比）と柱せいの関係を図 2.1-1 に示す。図 2.1-1 は角形断面柱に関するデータ（10点）である。また、既往資料^{2.1-2)}についても調査を行い、既存超高層（高さ：102～212m）の最下層の柱の幅厚比に関するデータ（2棟：5点、幅厚比のデータのみ）と、本事業で追加して実施した既存超高層の実態調査結果（4棟）を図 2.1-1 に追加している。また、図 2.1-2 に幅厚比および径高さ比の分布を示す。

図 2.1-2 を見ると、最下層の柱の幅厚比および径高さ比については、前述の知見に加えて下記の分布となっている。

- ・幅厚比はFAランクであり、10前後に多く分布（平均値 11.2、最小値 8.3）
- ・径高さ比は5～8程度に多く分布し、最大で12程度

ここで、径高さ比の値は、基整促 27-2 での知見も考慮すると、基準階で5～6程度、1階柱で7～8程度、1階吹抜け柱で12程度となっている。

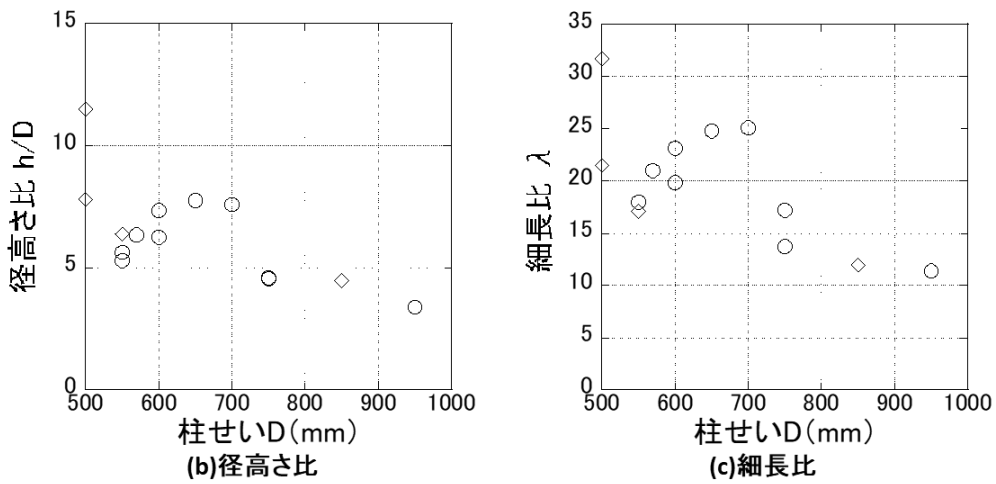
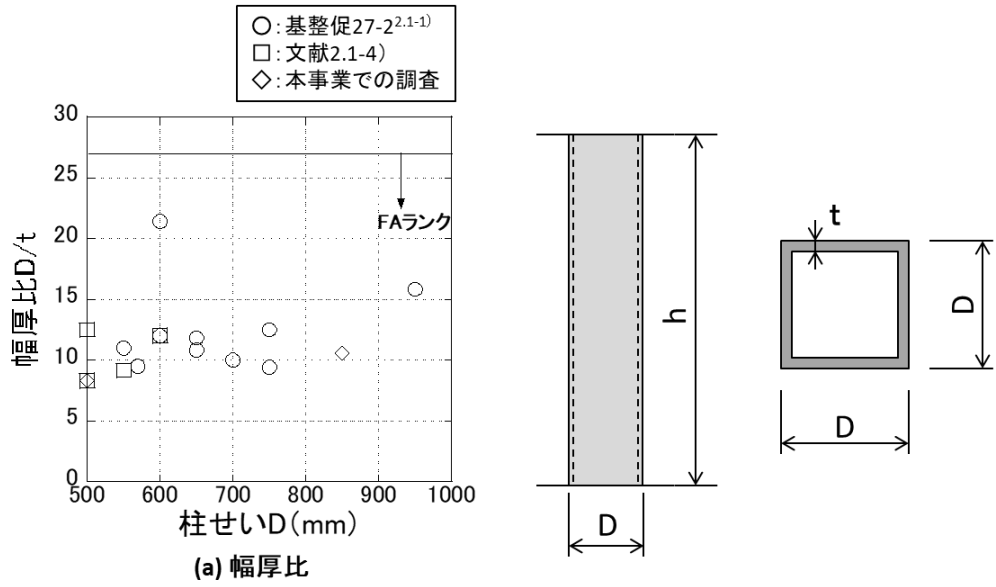


図 2.1-1 既存超高層の柱諸元(最下層の柱)

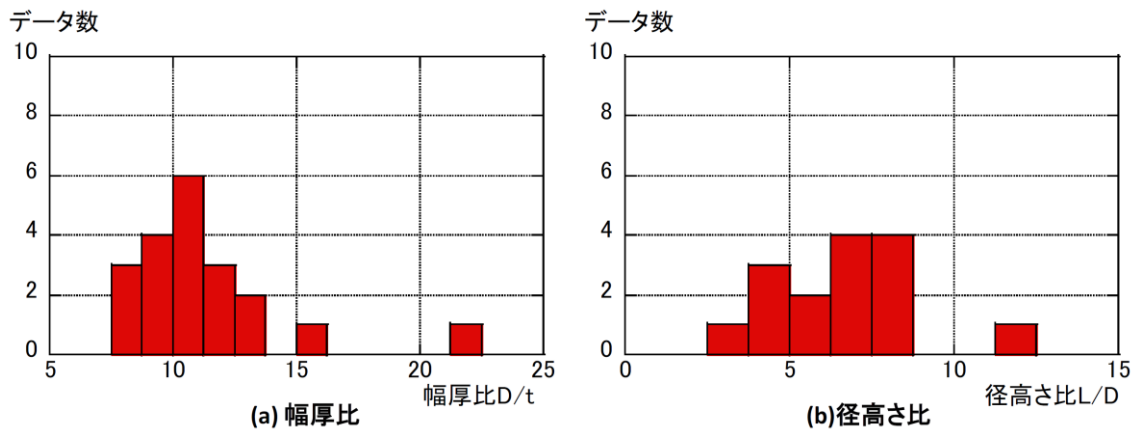


図 2.1-2 幅厚比・径高さ比の分布 (最下層の柱)

(2) 既往実験の調査

柱部材を用いた多数回繰り返し実験（一定振幅、軸力（一定、変動））について、調査を行い、既往実験の実施範囲を把握する。また、既往実験の範囲でわかる鉄骨柱部材の多数回繰り返し特性（設計用疲労曲線式）を推定する。

H22～24年度に実施した既往の基整促 27-2 に於いては既往研究の調査（44文献）を行い、下記結果を得ている^{2.1-1)}。

<ul style="list-style-type: none"> ・柱について、多数回（100回程度）の繰り返し载荷を行った研究はない。 ・鋼管柱に関して、一定振幅繰り返し载荷実験を実施した研究では、繰り返し数が10回程度、軸力比は$n=0\sim 0.3$程度、部材角は$R=1/13\sim 1/90\text{rad}$程度である。 ・H形柱に関して、一定振幅繰り返し载荷実験を実施した研究では、繰り返し数が最大30回程度、軸力比は$n=0\sim 0.6$程度、弾性限界変形比は$\Delta/\Delta_{pc}=1.7\sim 5.1$程度である。 ・既往の実験データの範囲を整理すると、下記ようになる。 	
箱形断面の場合	H形断面の場合
断面寸法：□-100～125	断面寸法：H-70～150×100～150
幅厚比：FA	幅厚比：FA(フランジ、ウェブ共に)
細長比：10～40	細長比：20～40
軸力比：0～0.3(変動、一定)	軸力比：0～0.3, 0.6～0.7(変動、一定)

この結果から判断し、基整促 27-2 では計画断面と同様な溶接組立箱形断面柱の実験資料がないことから、□-330×330×12（幅厚比 27.5）による構造実験を実施している。その際の細長比 λ は実態調査結果の最大値に近く、1階柱を想定した 23.1（径高さ比 9.1）を中心に実施し、実態調査結果の平均値程度で基準階を想定した 15.4（径高さ比 6.1）を数体、1階吹抜け柱を想定した 30.8（径高さ比 12.1）を1体実施している。なお、 $\lambda=30.8$ は変動軸力のみの実験である。

基整促 27-2 が実施された以降では、下記に示す溶接組立箱形断面柱を用いた多数回繰り返し実験が実施されている。

- ・基準整備促進事業 27-2^{2.1-1)}
- ・文科省プロジェクト（E-ディフェンス実験関連）^{2.1-2)}
- ・鹿島自社研（2018年度 AIJ 大会梗概）^{2.1-3)}

文献 2.1-2) と 2.1-3) では、柱せいは異なるが、幅厚比、細長比（径高さ比）は等しい。ここで、文献 2.1-1) ～2.1-3) で実施されている試験体の範囲について表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 既往試験体の諸元

		文献2.1-1)	文献2.1-2), 2.1-3)
柱断面		□-330×330×12	□-200×200×12 □-150×150×9
幅厚比D/t		27.5	16.7
細長比 λ		23.1(15.4, 30.8)	20.8
径高さ比L/D		9.1(6.1, 12.1)	8.0
軸力比n	一定	0.3(0.6)	0.3, 0.6, 0.9
	変動	0.3±0.3	0.6±0.3

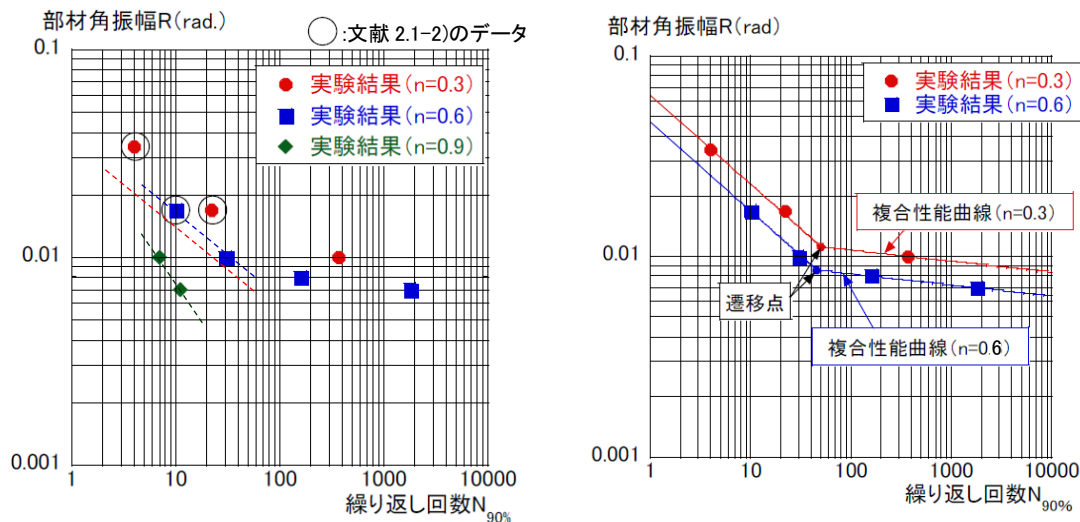
*:()内は各実験ケースで試験体数が少ない場合を示す。

表 2.1-1 より、文献 2.1-1) と文献 2.1-2)、2.1-3) では細長比 (径高さ比) は近い値であるが、幅厚比 D/t は 27.5 と 16.7 とかなり異なる値となっていることがわかる。幅厚比 $D/t=27.5$ は FA ランクぎりぎりの値である。

以下では、既往文献 2.1-1) ~2.1-3) の結果を基にして、基本的なパラメータ (軸力比、幅厚比、細長比 (径高さ比)) の柱部材の多数回繰返し性能に与える影響を調べる。また、多数回繰返し性能としては、最大荷重の 90% となるまでの繰返し数 $N_{90\%}$ を用いる。

【軸力比の影響】

文献 2.1-2)、2.1-3) での軸力比一定の場合の部材角振幅 R と繰返し回数 $N_{90\%}$ の関係を図 2.1-3 (a) に示す。軸力比が大きな領域 ($n=0.9$) では破壊モードが柱頭・柱脚の局部座屈後の全体座屈となり、軸力比が小さな領域 ($n=0.3$ 、 0.6) の柱頭・柱脚の局部座屈とは異なるものであり、図中の R - $N_{90\%}$ 関係 (点線) の傾きも異なっている。また、破壊モードがほぼ同じである $n=0.3$ 、 0.6 を対象にして、図 2.1-4 の複合性能曲線を評価すると図 2.1-3(b) のようになる。図より遷移点の繰返し回数 N_u は 50 程度であることがわかる。ここで、複合性能曲線の領域 1 は局部座屈にて荷重が低下する領域であり、領域 2 は局部座屈および溶接部のき裂・破断の連成により荷重が低下する領域である。ひずみ硬化による荷重上昇と破壊要因による荷重低下の大小関係により領域 1 と 2 が異なっている。



(a) 軸力比 $n = 0.3 \sim 0.9$

(b) 複合性能曲線

図 2.1-3 部材角振幅・繰返し数の関係

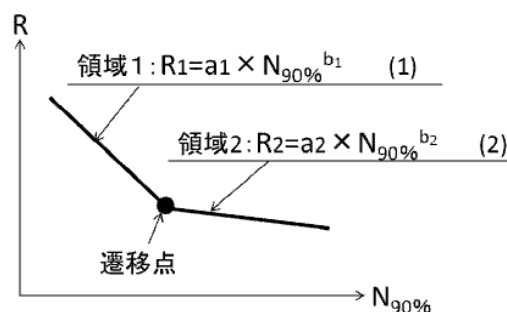


図 2.1-4 複合性能曲線の概要

【幅厚比の影響】

表 2.1-1 より細長比（径高さ比）が同じで、幅厚比のみが異なっている場合の実験データは無いが、幅厚比 16.7 の細長比は 20.8（径高さ比 8.0）、幅厚比 27.5 の細長比 23.1（径高さ比 9.1）と両者の細長比（径高さ比）の差は小さく、変形能力に与える影響も小さいと考えて、軸力比 0.3 の場合と同じグラフ上に部材角振幅 R と繰返し数 $N_{90\%}$ の関係を描画したものを図 2.1-5 に示す。

図 2.1-5 を見ると、少ないデータではあるが、幅厚比 16.7 と 27.5 の領域 1^{2.1-3} での性能曲線（点線）の傾きを比較すると幅厚比の小さな 16.7 の方の傾きが大きいことがわかる。また、図 2.1-3(b) のように幅厚比 16.7 では複合性能曲線となっており、2つの傾きが存在するが、幅厚比 27.5 の場合には1つの傾きのみとなっていると考えられる。

図のように、領域 1 での性能曲線（点線）の傾きおよび切片は幅厚比に依存しており、構造実験により確認する必要がある。

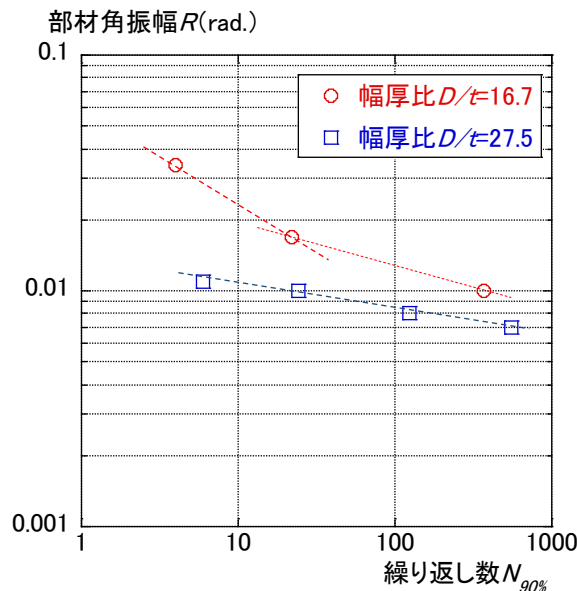


図 2.1-5 部材角振幅 R と繰返し数 $N_{90\%}$ の関係（軸力比 0.3, 細長比 20.8 と 23.1）

【細長比（径高さ比）の影響】

文献 2.1-1) での幅厚比が 27.5 と同じ場合の部材角振幅 R と繰返し回数 $N_{90\%}$ の関係を図 2.1-6 に示す。細長比 23.1 は 1 階柱相当、細長比 15.4 は基準階相当の柱である。

図より、細長比（径高さ比）が大きい程、変形能力は良くなっていることがわかる。また、細長比 23.1 と 15.4 のグラフ上の傾き（点線）はほぼ同じである。

よって、細長比（径高さ比）が異なる場合には、領域 1 での性能曲線（点線）の傾きは同じで、切片のみが異なることが推察されるので、どちらかのデータを基準として、割増または低減係数を乗じることにより、個々の性能曲線を推定することができると考えられる。例えば、図 2.1-6 の場合には、細長比 23.1（径高さ比 9.1）の性能曲線に約 0.8 を乗じることによって細長比 15.4（径高さ比 6.1）の性能曲線となる。

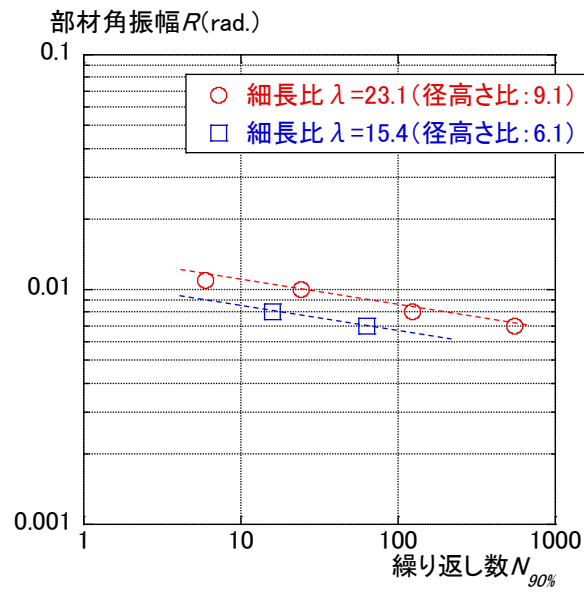


図 2.1-6 部材角振幅 R と繰り返し数 $N_{90\%}$ の関係 (幅厚比 27.5)

以上のように、既存の実験データを基にして、軸力比、幅厚比および細長比（径高さ比）の変形能力に与える影響について示した。しかしながら、柱部材の多数回繰り返し実験のデータが少なく、設計用疲労曲線を提案する上からも実験データを補充して行く必要があると考えられる。

2.1.3 実験計画

(1) 試験体

実態調査結果から、既往鉄骨超高層建物で使用されている鉄骨柱の範囲を把握し、その範囲内での柱諸元（幅厚比、細長比（径高さ比））に対して実験を計画する。計画の際には、文献調査から既往実験で実施されていない範囲のものを選択し、実験計画に反映させる。なお、柱断面については、既往の基整促 27-2 と同様に、柱断面は主に角形断面とし、溶接組立箱形断面柱を対象として実施する。

平成 30 年度の実験では、鉄骨柱部材の一定軸力および一定振幅に於ける基本的な多数回繰り返し特性を把握することを目的として、多数回繰り返し特性に影響を与えらるパラメータを変化させた実験を実施し、多数回繰り返し載荷時の鉄骨柱部材の変形能力を把握する。

試験体柱は、□-105×105（SM490A；1/5 縮尺程度）で、試験体数は 11 体とする。図 2.1-7 に試験体形状を示す。

性能曲線を取得する範囲としては、主として、大きな変形領域の範囲、すなわち、図 2.1-4 の領域 1 のような「終局状況が柱頭・柱脚の局部座屈」を検討する範囲を念頭に置いているが、幅厚比、軸力比、変位振幅の組み合わせにより、実験結果の「終局状況が溶接部のき裂進展・破断」となることも十分に考えられるため、柱頭・柱脚部の溶接部分の製作についての配慮が必要である。

ここでは、試験体は図 2.1-7 に示すように柱上下にベースプレートを有する形式（ベースプレート形式）であるが、通常ベースプレート形式のように、柱をベースプレートにすみ肉溶接するのではなく、柱通しの溶接形式で柱内部にダイアフラムを有するようになっている。これは、幅厚比の小さな試験体では、変位振幅を大きくしても、局部座屈で終局とはならず、柱頭・柱脚の溶接部でのき裂進展からの破断であることが予想されるため、通常の柱梁接合部パネルに柱が取り付けディテールと同様な柱通しの溶接形式を模擬したためである。

t	L	試験体数
9mm	840mm	4体
	525mm	2体
	1260mm	1体
12mm	840mm	4体

計11体

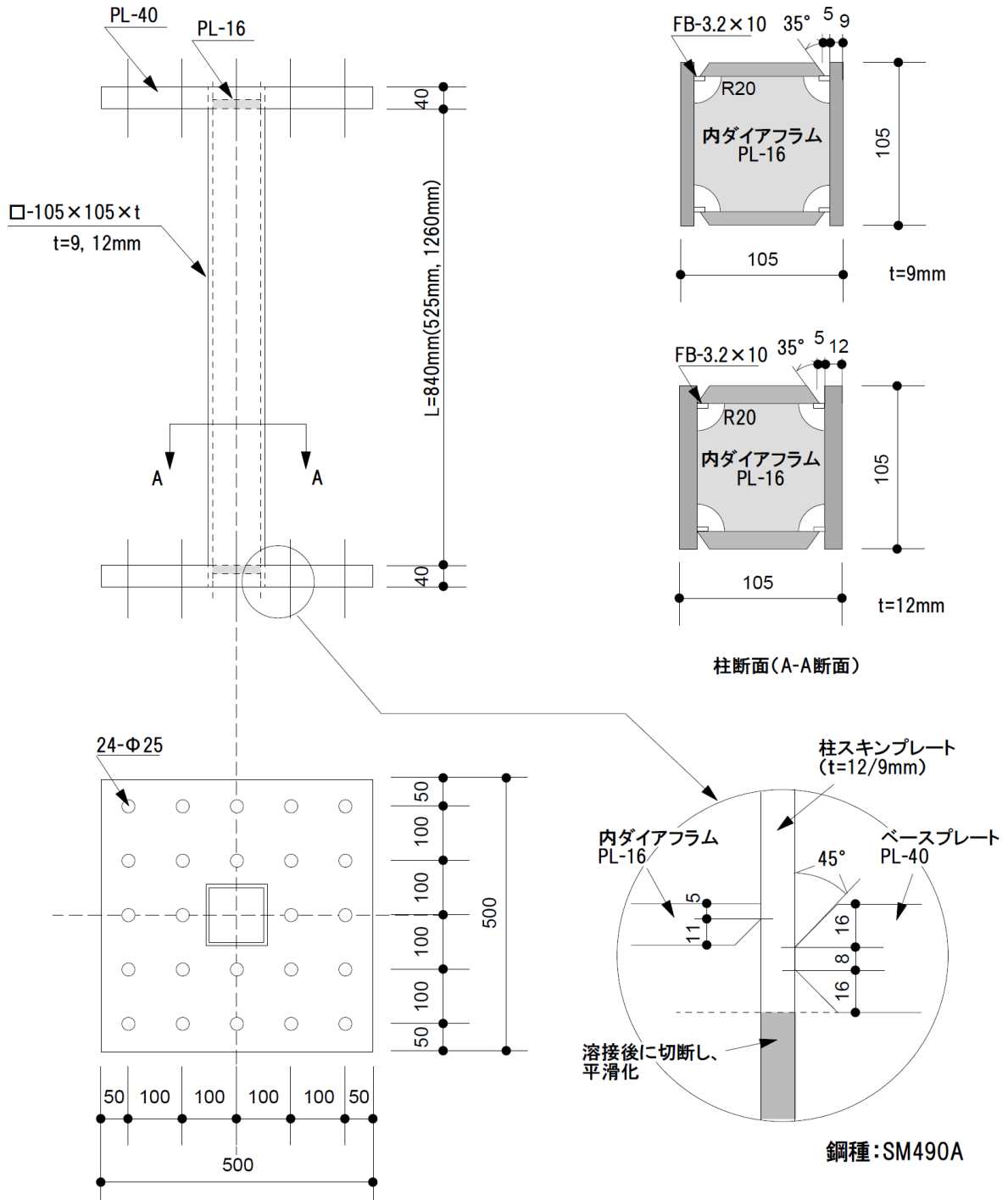


図 2.1-7 試験体形状

(2) 実験パラメータ

実験パラメータとしては、部材因子と外力因子がある。部材因子については建物の実態調査結果より決定し、外力因子については試設計建物に於ける時刻歴応答解析結果等から判断するものとする。

部材因子では、既往実験の考察でも示したように幅厚比と径高さ比（細長比）が挙げられる。幅厚比については、既往実験で $D/t=16.7\sim 27.5$ の範囲の実験が行われているが、最下層の柱に多く見られる $D/t=10$ 前後での実験は行われていない。このため、幅厚比については既存鉄骨建物の実態調査より $D/t=10$ 前後が多かったことから、この範囲での実験を行い、基本的な構造的性状を知ることが重要であるため、幅厚比 D/t として、最小値（8.3）近傍の 8.75 と全体の平均値（11.2）近傍の 11.67 の 2 水準を選定する。

径高さ比（細長比）については、既往の実験で $L/D=8.0\sim 9.1$ の塑性化が予想される下層階の柱を中心に実施されている。図 2.1-2(b)を見ると、下層階の柱でも $h/D=5$ 程度のものや $L/D=12$ 程度もあり、このような基準階相当や 1 階吹き抜け相当の柱長さの実験も必要である。図 2.1-6 で示すように、径高さ比（細長比）の変化は基準となる性能曲線に割増係数または低減係数を乗じることで求められるので、この傾向が幅厚比の異なった場合でも同様かを確認しておくことも重要である。よって、径高さ比 L/D としては、既存鉄骨建物の実態調査を参考にして、一階柱相当の 8.0 と基準階相当の 5.0 および 1 階吹き抜け相当の 12.0 の 3 水準を選定する。

軸力比については、文献 2.1-3) より大きな軸力比 $n=0.9$ とすると破壊モードが全体座屈モードへ変化することが考えられる。平成 30 年度は基本的な構造的性状を得ることを目的としていることから、軸力比 $n=0.3$ 、 0.6 の 2 水準を選定する。

振幅レベルについては、部材因子（幅厚比、細長比）や外力因子（軸力比）により異なる値を与えることで、図 2.1-4 の領域 1 の範囲の性能曲線を得ることを考えて、条件に応じて、適宜、大きな振幅を与えるものとする。また、振幅の基準については、塑性率か部材角かを選ぶことになるが、時刻歴応答解析を実施する場合に、部材角を用いる方が簡易な取扱いとなることから、本実験に於いては、主として部材角により整理を行うものとする。

下記の実験パラメータをまとめて示す。

【部材因子】

- 幅厚比 : 2 水準（FA ランク：8.75 ($t=12\text{mm}$)、11.67 (9mm))
- 径高さ比 : 3 水準（ $L/D=12.0$ ($L=1260\text{mm}$)、8.0 (840mm)、5.0 (525mm))

【外力因子】

- 振幅（一定振幅） : 2 水準（部材角 $R=1/75$ 、 $1/50$ 、 $1/25$ 等）
- 軸力比（一定軸力） : 2 水準（軸力比 $n=0.3$ 、 0.6 ）

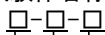
表 2.1-2 に、試験体一覧を示す。ここで、表 2.1-2 の部材角振幅は、 $R=1/50$ を基本として、幅厚比が小さな試験体 $D/t=8.75$ では $R=1/25$ と大きな振幅とし、幅厚比が大きな試験体 $D/t=11.67$ では $R=1/75$ と小さな振幅としている。

また、表 2.1-3 に試験体の諸耐力一覧を、図 2.1-8 に M-N 関係を示す。なお、鋼材の降伏点は $\sigma_y=357.5$ (N/mm²) とした。

表 2.1-2 試験体一覧

	試験体	幅厚比 D/t	軸力比 n	径高さ比 L/D	振幅	
					レベル	部材角振幅 R
1	M08-3C-RL	8.75 ($t=12\text{mm}$)	0.3	8.0	大	1/25 0.040
2	M08-3C-RS				小	1/50 0.020
3	M08-6C-RL		0.6		大	1/25 0.040
4	M08-6C-RS				小	1/50 0.020
5	M11-3C-RL	11.67 ($t=9\text{mm}$)	0.3	8.0	大	1/50 0.020
6	M11-3C-RS				小	1/75 0.013
7	M11-6C-RL		0.6		大	1/50 0.020
8	M11-6C-RS				小	1/75 0.013
9	S11-6C-RL		5.0	大	1/50 0.020	
10	S11-6C-RS			小	1/75 0.013	
11	L11-6C-RL			12.0	大	1/50 0.020

※試験体名称



径高さ比 M:L/D=8, S:5, L:12
 +幅厚比 8:D/t=8.75, 11:11.67
 軸力比 3C:0.3(一定), 6C:0.6(一定)
 部材角振幅 RL:大, RS:小

表 2.1-3 諸耐力一覧

	試験体	幅厚比 D/t	径高さ比 L/D	軸力		全塑性耐力*1	
				導入軸力 $N_a(\text{kN})$	軸力比 n	曲げモーメント $M_p(n)(\text{kNm})$	せん断力 $Q_p(n)(\text{kN})$
1	M08-3C-RL	8.75 ($t=12\text{mm}$)	8.0	479	0.3	49.3	117.3
2	M08-3C-RS			958	0.6	30.8	73.3
3	M08-6C-RL						
4	M08-6C-RS						
5	M11-3C-RL	11.67 ($t=9\text{mm}$)	8.0	371	0.3	39.3	93.5
6	M11-3C-RS			741	0.6	24.3	57.9
7	M11-6C-RL						
8	M11-6C-RS						
9	S11-6C-RL		5.0	12.0	38.6	92.6	
10	S11-6C-RS						
11	L11-6C-RL						

*1: 導入軸力での値。

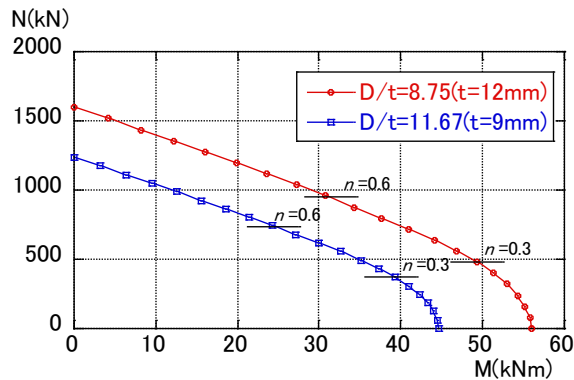


図 2.1-8 M-N 関係

(3) 使用材料

1) 鋼素材の材料試験

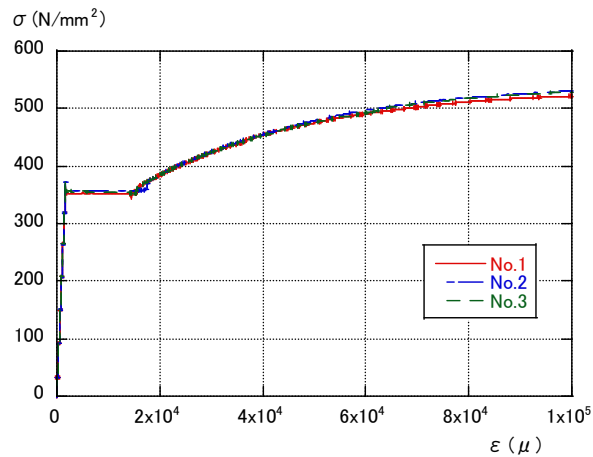
試験体 に用いる鋼材 (PL-9、 12) について JIS Z 2241 に従い引張試験を実施する。参考として、裏当て金 (PL-3.2) の引張試験についても実施し、基本的な性能を把握する。

使用材料の機械的性質を表 2.1-4 に、応力・ひずみ関係を図 2.1-9 に示す。

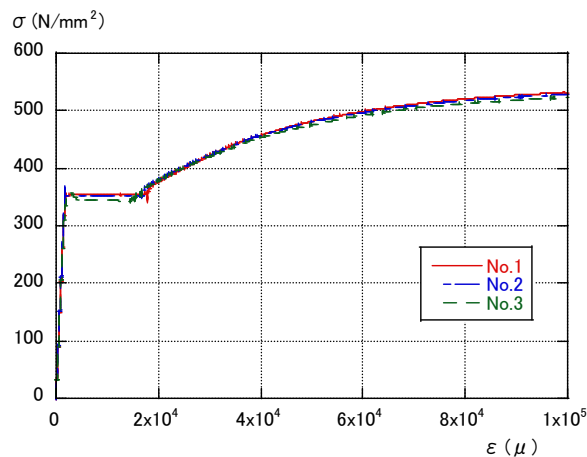
表 2.1-4 鋼材の機械的性質

	使用部位	公称板厚 (mm)	実測板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)
PL-9	柱	9	8.8	355	531	67	26
PL-12	柱	12	11.7	350	532	66	28
PL-3.2	裏当て金	3.2	3.1	311	437	71	21

*3本の平均値。PL-3.2は幅15mmのフラットバーによる試験値。



(a) PL-9



(b) PL-12

図 2.1-9 応力・ひずみ関係

2) 柱鋼管の短柱圧縮試験

柱試験部分の圧縮特性把握のために、アムスラーによる短柱圧縮試験を実施する。試験体の高さは柱せいの3倍とし、幅厚比の異なる2種類の柱について各2体の圧縮試験を実施する。圧縮試験の概要を図 2.1-10 に、圧縮試験状況を写真 2.1-1 示す。

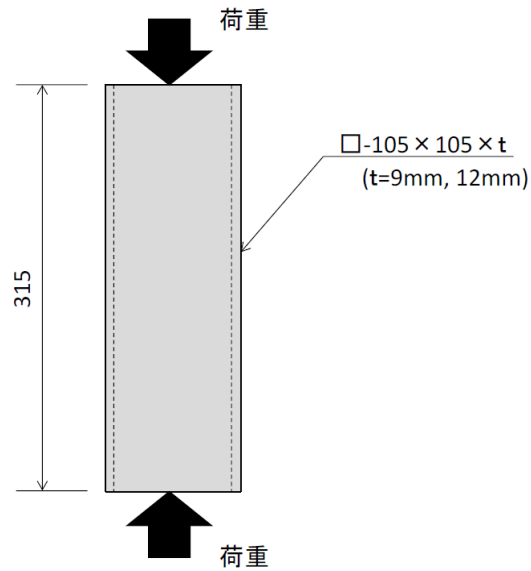


図 2.1-10 短柱圧縮試験の概要

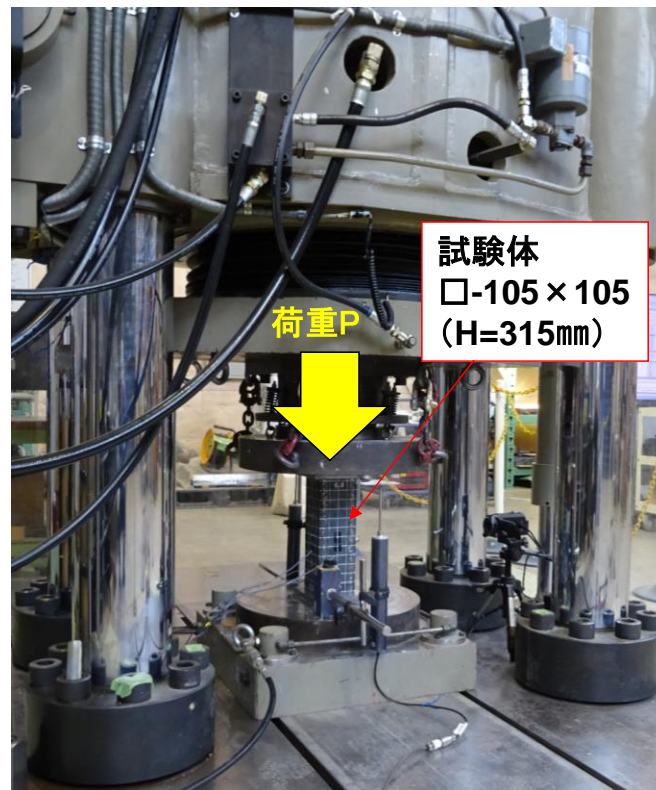
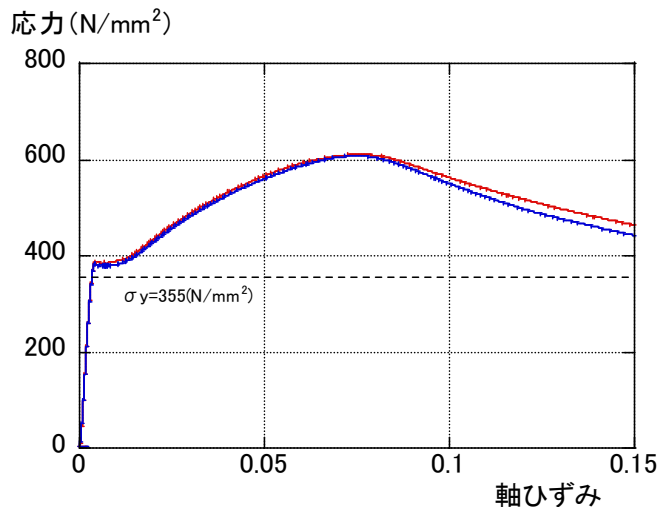


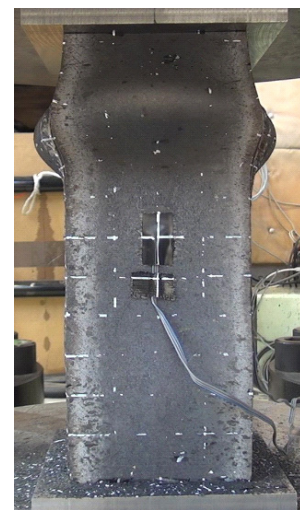
写真 2.1-1 短柱圧縮試験の状況

また、短柱圧縮試験での圧縮応力と軸ひずみの関係を図 2.1-11 に、最終破壊状況を写真 2.1-2 に示す。図 2.1-11 には素材試験で得られた降伏点（表 2.1-4）の値を参考として示す。なお、圧縮応力は実板厚を用いて計算した柱断面を用いて評価をした。また、軸ひずみは試験体の軸縮みを柱高さ（315 mm）で除した値である。

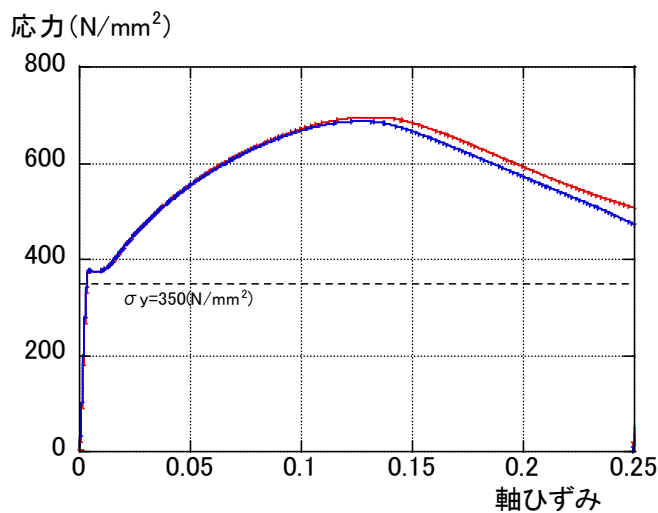
図 2.1-11 より、PL-9 および PL-12 とともに素材試験で得られた降伏点よりもやや大きな荷重で降伏し、その後、局部座屈が発生するまで荷重が上昇していることがわかる。最大荷重と素材降伏点（ σ_y ）の比は、PL-9 で 1.7、PL-12 で 1.9 であった。また、降伏荷重が素材降伏点よりもやや大きい要因として、裏当て金の影響も考えられるが、その与える影響は小さいことがわかった。



(a) PL-9



(a) PL-9



(b) PL-12



(b) PL-12

図 2.1-11 応力・軸ひずみ関係

写真 2.1-2 最終破壊状況

(4) 実験方法

1) 加力方法

加力装置を図 2.1-12 に、加力状況を写真 2.1-3 に示す。加力は、建研式加力方法を採用し、反力床上に敷設した加力フレームの上に試験体を設置し、上下の加力フレームとベースプレートとを緊結することで試験体を固定し、上部に取り付いた加力装置を介して、鉛直方向の 1000kN アクチュエーター 2 台により軸力を導入した状態で、下部に取り付いた 500kN アクチュエーターにより水平方向の一定振幅载荷を行う。一定軸力としては、 $n=0.3, 0.6$ ($n=N/N_y$ 、 $N_y=sA\times\sigma_y$ 、 N : 柱軸力、 N_y : 柱降伏軸力、 sA : 鋼管断面積、 σ_y : 鋼管の降伏点) の軸力とする。载荷履歴としては、一定振幅を部材角 $R=1/50$ を中心として与える。また、実験終了時は原則として試験体耐力が最大耐力に対して、80%に低下した時点までとする。

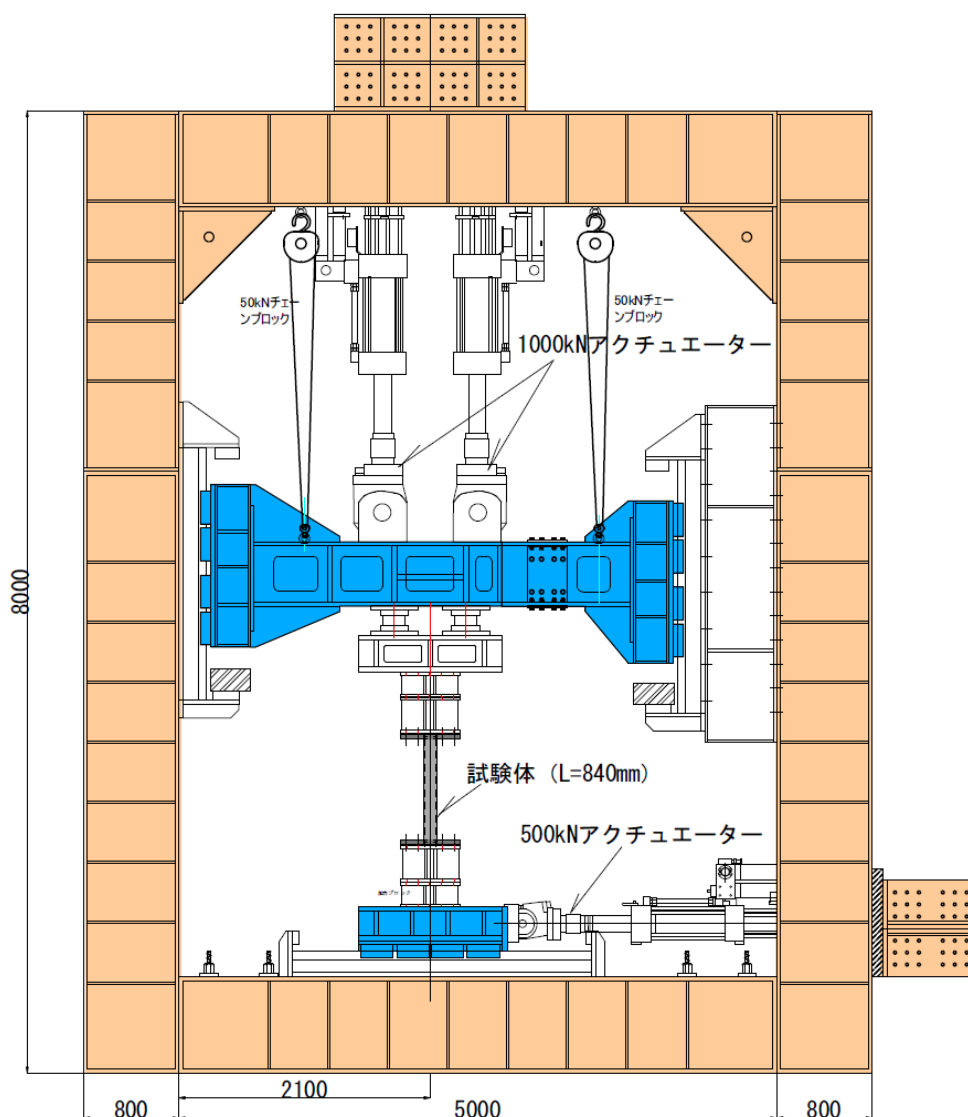
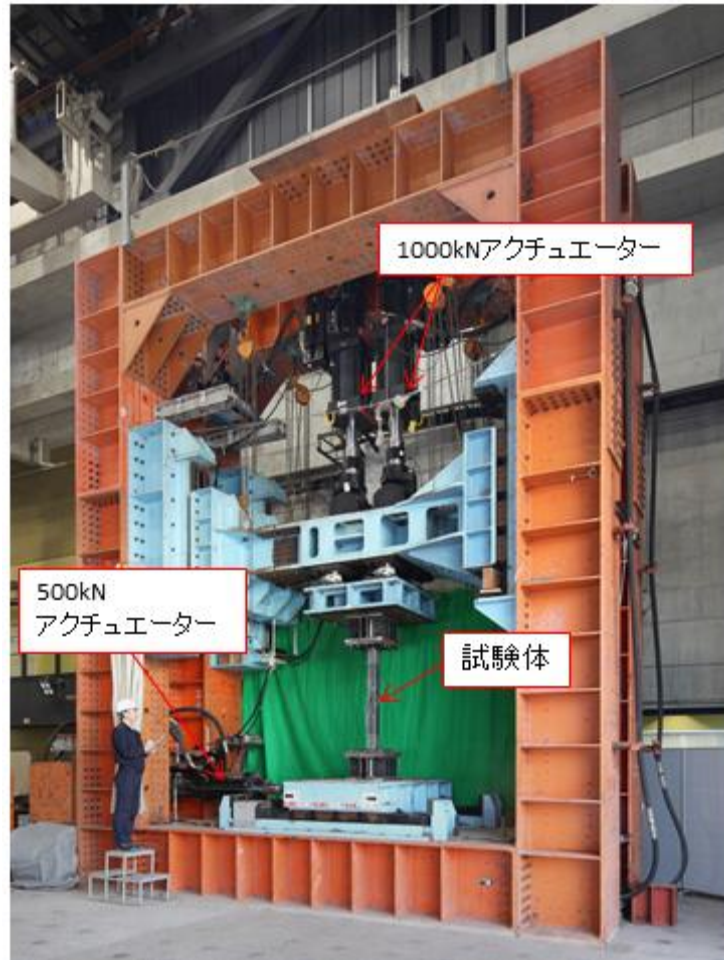
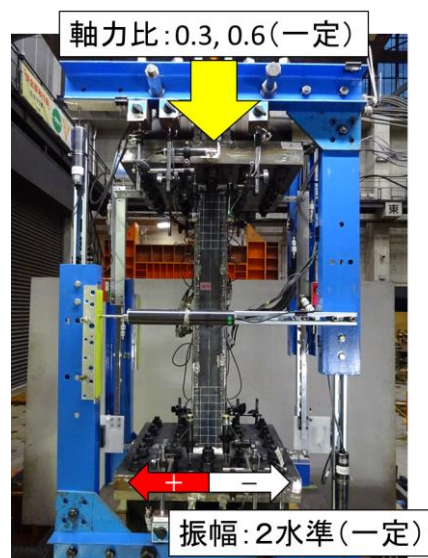


図 2.1-12 加力装置



(a) 実験状況全景 (L=1260 mm)



(b) 実験状況拡大 (L=840 mm)

写真 2.1-3 実験状況

2) 計測方法

計測項目一覧を表 2.1-5 に、変位計測位置を図 2.1-13 に、ひずみ計測位置を図 2.1-14 に示す。

計測は、試験体の作用荷重、柱部材の水平、鉛直、局部変形、区間伸び変形、鋼管フランジおよびウェブのひずみ等について行う。また、柱材端部の座屈高さについても計測を行う。実験時の変位振幅は、図 2.1-12 に従い、全体変形から回転変形を除くことにより求める。

表 2.1-5 計測項目一覧

計測項目	計測点数			計測点名称	備考	
	L=840	L=525	L=1260			
荷重	柱せん断力	1	1	1	P	
	柱軸力	2	2	2	NL, NR	
	分力計	8	8	8	L1-X, L2-X, L3-X, L4-X L1-Z, L2-Z, L3-Z, L4-Z	分力計は計4台 (水平・鉛直方向)
	小計	11	11	11		
変形	柱水平方向変形	2	2	2	D1F, D1B	
	柱軸方向変形	4	4	4	D2F, D3F D2B, D3B	
	局部浮き上がり 変形	8	8	8	D4F, D5F, D6F, D7F D4B, D5B, D6B, D7B	
	試験体と加力治具 のずれ変形	4	4	4	D8F, D9F D8B, D9B	
	柱区間変形	12	8	16	D10LB, D11LB, D12LB, D13LB, D14LB, D15LB, D16LB, D17LB D10RB, D11RB, D12RB, D13RB, D14RB, D15RB, D16RB, D17RB	裏側のみ計測
	小計	30	26	34		
ひずみ	柱フランジ	6	6	6	SF1L, SF2L, SF3L SF1R, SF2R, SF3R	
	柱ウェブ	2	2	2	SW1F, SW1B	
	小計	8	8	8		
計測点数合計		49	45	53		

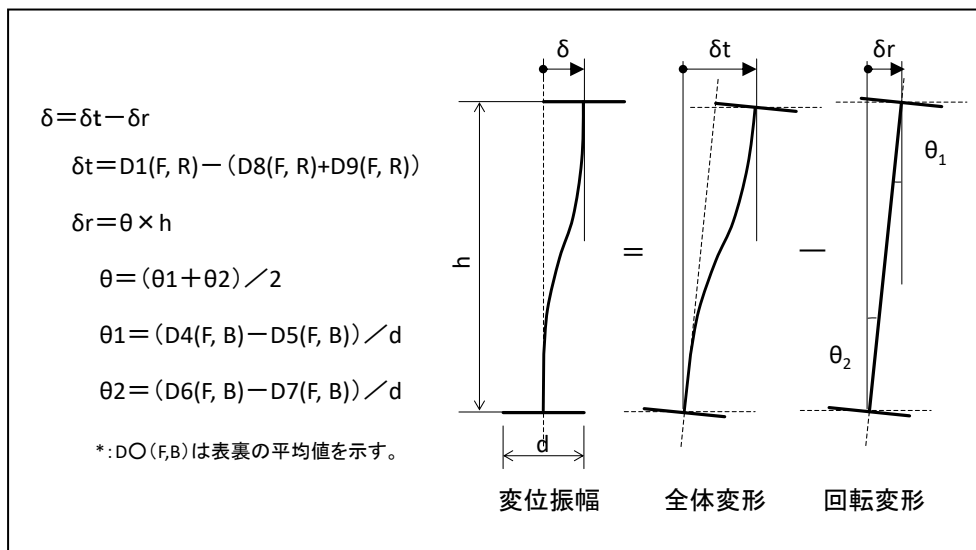
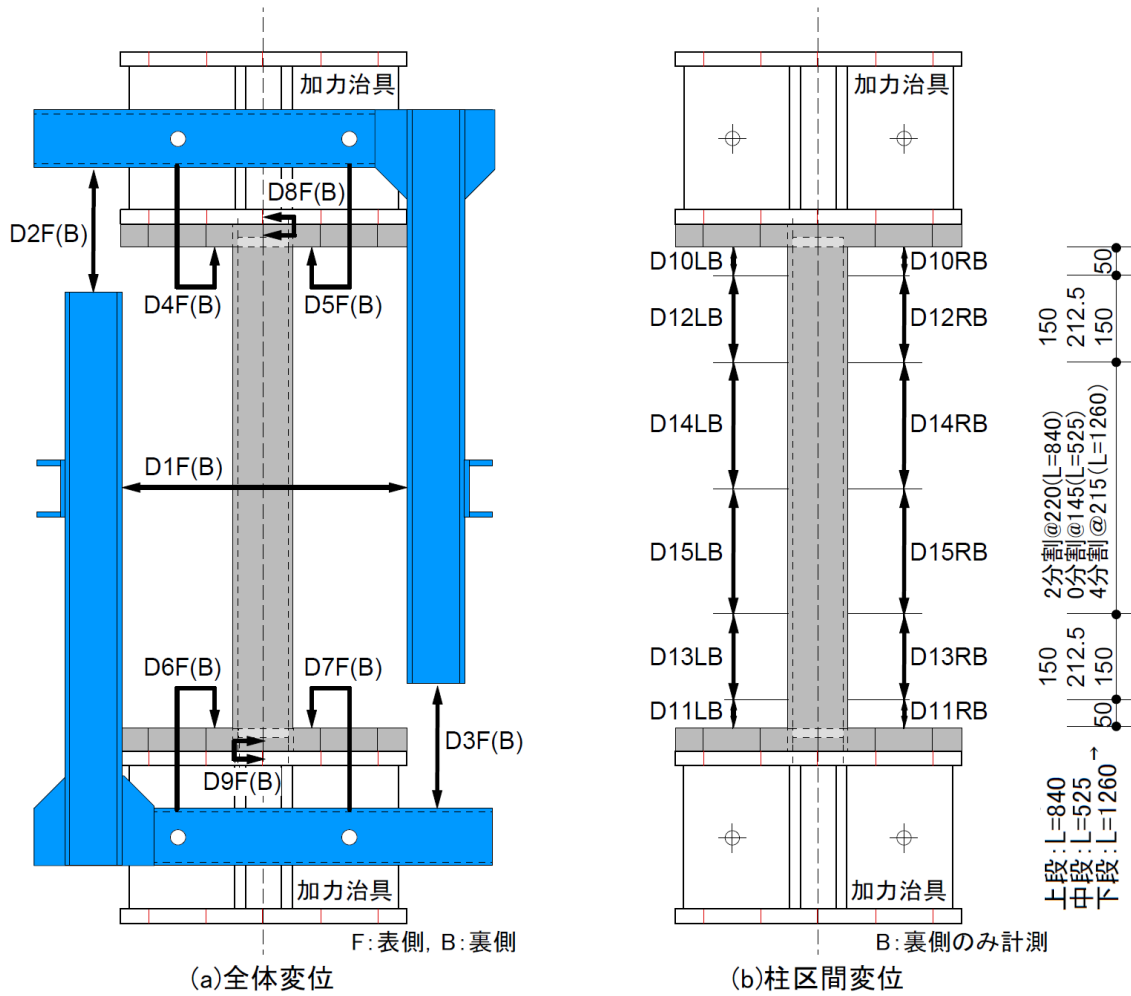


図 2.1-13 変位計測位置

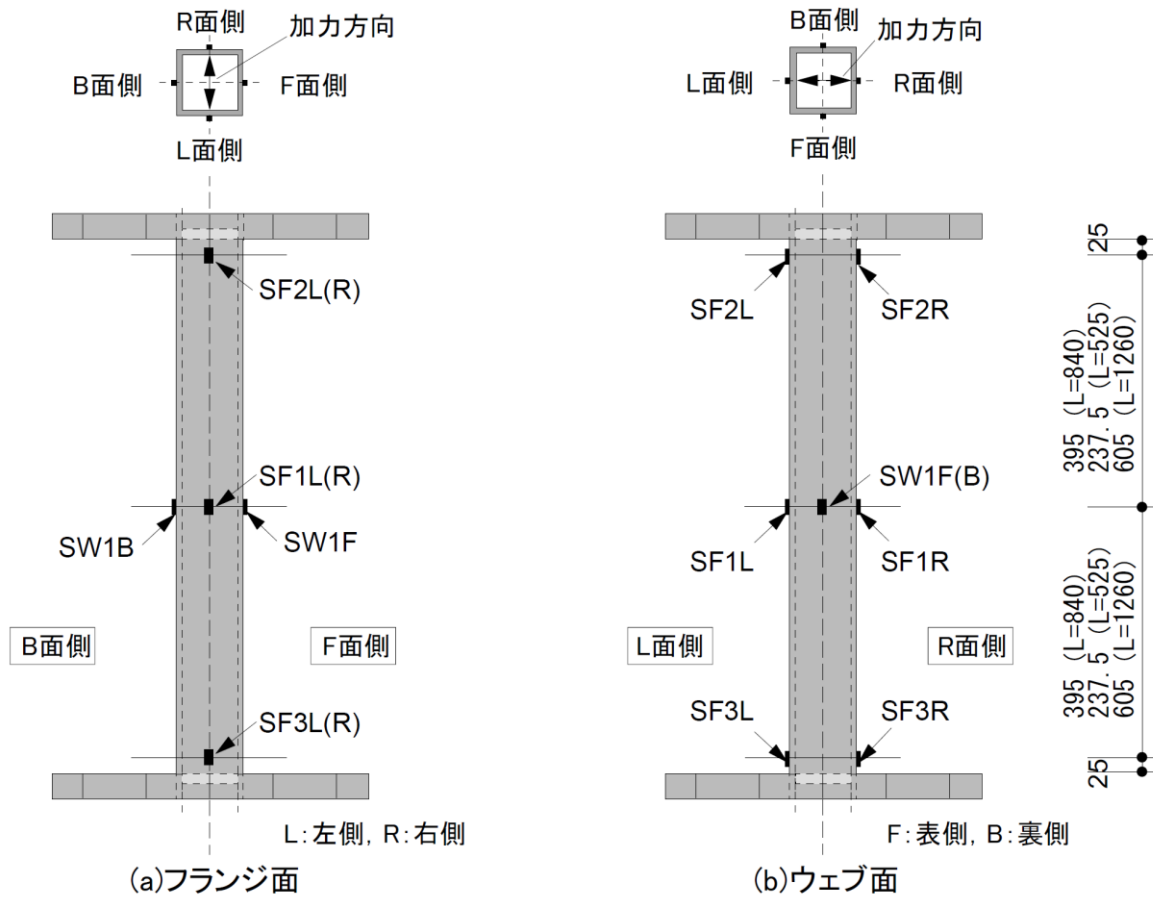


図 2.1-14 ひずみ計測位置

2.1.4 実験結果

(1) 実験経過および破壊性状

試験体の実験時の初期剛性、降伏荷重、最大荷重を表 2.1-6 に示す。また、実験結果一覧を表 2.1-7～2.1-9 に、実験終了後の写真を写真 2.1-4～2.1-14 に示す。なお、表 2.1-8 および表 2.1-9 の計測値は、観察を行ったサイクルでの値であり、表 2.1-7 の各荷重レベルのサイクルと近いサイクルでの値を示している。また、実験時の試験体温度は 8～13℃であった。

以下に、各試験体の実験経過を示す。

M08-3C-RL 試験体 ($D/t=8.75$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1/25$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+7 および-6 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは約 3 mm であり、柱頭・柱脚の引張側コーナー付近の溶接熱影響部（以下、熱影響部）に長さ 20～25 mm 程度のき裂（白い筋（ヘアクラック）：幅 0.05 mm 程度）が見られた。その後、上記のき裂が進展することにより、荷重が低下し、+8 サイクルには最大荷重の 79%、-8 サイクルには最大荷重の 70% となった。+8 サイクルでは、き裂の長さが 45 mm、幅が 2 mm 程度となった。

M08-3C-RS 試験体 ($D/t=8.75$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1/50$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+25 および-33 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは約 2 mm であり、柱頭・柱脚の溶接熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、+66 および-64 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際には柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 40 mm、幅 0.5 mm 程度のき裂が見られた。その後、上記のき裂が進展することにより、荷重が低下し、+75 サイクルには最大荷重の 80%、+82 サイクルには最大荷重の 70% となった。最終的には、き裂の長さが 40 mm、幅が 2 mm 程度となった。

M08-6C-RL 試験体 ($D/t=8.75$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.6$ 、 $R=1/25$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+5 および-4 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 4～5 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部のき裂は柱全幅（105 mm）に達した。その後、上記のき裂が進展することにより、荷重が低下し、+6 サイクルには最大荷重の 56% となった。+6 サイクルでは、き裂の幅が 2 mm 程度となった。

M08-6C-RS 試験体 ($D/t=8.75$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.6$ 、 $R=1/50$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+22 および-24 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは約 4 mm であり、柱頭・柱脚の溶接熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、+40 および-33 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際には柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 40～105 mm、幅 0.5～1.0 mm のき裂が見られた。その後、上記のき裂が進展することにより、荷重が低下し、+50 および-40 サイクルには最大荷重の 80%、-63 サイクルには最大荷重の 70% となった。最終的には、き裂は柱全幅に進展し、幅は 2 mm 程度となった。

M11-3C-RL 試験体 ($D/t=11.67$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1/50$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、±31 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは約 2 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、+63 および-70 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際には柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 20～30 mm 程度のき裂（白い筋：幅 0.05 mm 程度）が見られた。その後、上記のき裂が進展することにより、荷重が低下し、+73 サイクルには最大荷重の 80%、+76 サイクルには最大荷重の 70% となった。最終的には、き裂は柱全幅に進展し、幅は 1.5 mm 程度となった。

M11-3C-RS 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.3$, $R=1/75$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+31 および-24 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは約 1 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、+212 および-220 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際には柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 30 mm 程度のき裂（白い筋：幅 0.05 mm 程度）が見られた。その後、上記のき裂が進展することにより、荷重が低下し、+288 および-272 サイクルには最大荷重の 80%、-290 サイクルには最大荷重の 70% となった。最終的には、き裂は柱全幅に進展し、幅は 1 mm 程度となった。

M11-6C-RL 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.6$, $R=1/50$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+13 および-14 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 3.6 ~ 4.5 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、柱頭・柱脚部の局部座屈が進展することにより、+26 および-24 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際の座屈波高さは 14 ~ 16 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 20 mm 程度のき裂（白い筋（ヘアクラック）：幅 0.05 mm 程度）が見られた。その後、き裂の進展は見られず、局部座屈が進展することにより、荷重が低下し、+36 および-34 サイクルには最大荷重の 80%、+47 サイクルには最大荷重の 70% となった。最終的な座屈波高さは 28 mm 程度となった。

M11-6C-RS 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.6$, $R=1/75$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+58 および-41 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 3 ~ 4 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、柱頭・柱脚部の局部座屈が進展することにより、+152 および-146 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際の座屈波高さは 11 ~ 12 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 40 mm で幅 0.2 mm 程度のき裂が見られた。その後、き裂の進展は見られず、局部座屈が進展することにより、荷重が低下し、±205 サイクルには最大荷重の 80% となった。また、251 サイクルで最大荷重の 71% まで荷重が低下したが、その後、座屈波が試験体緊結用の高力ボルトと干渉して荷重が低下しなくなったことにより、260 サイクルで実験を終了した。

S11-6C-RL 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=5.0$, $n=0.6$, $R=1/50$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+8 および-9 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 6 mm 程度であり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 10 ~ 20 mm 程度のき裂（幅 0.2 mm）が見られた。その後、き裂が進展する音が発生し、き裂および局部座屈が進展することにより、+19 および-20 サイクルで最大荷重の 90% となった。この際の座屈波高さは 9 ~ 10 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 30 ~ 40 mm で幅 1.0 ~ 1.5 mm 程度のき裂が見られた。その後、き裂および局部座屈が進展することにより、荷重が低下し、+27 および-30 サイクルには最大荷重の 80%、+34 サイクルには最大荷重の 70% となった。最終的なき裂長さは柱全幅（105 mm）に達し、幅は 2.5 mm であった。また、座屈波高さは 12 mm 程度となった。また、最大荷重以降から 90% に荷重が低下するまでは、き裂進展による影響が大きい。それ以降では局部座屈が荷重低下の主要因となり、80% に荷重が低下すると再びき裂進展による影響が大きくなる傾向にあった。

S11-6C-RS 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=5.0$, $n=0.6$, $R=1/75$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+25 および-31 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 5 ~ 7 mm であり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 10 mm 程度のき裂（白い筋（ヘアクラック）：幅 0.05 mm 程度）が見られた。その後、き裂が進展する音が発生し、き裂および局部座屈が進展すること

により、+56 および-62 サイクルで最大荷重の 90%となった。この際の座屈波高さは 9~10 mmであり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 35~40 mmで幅 0.5~1.0 mm程度のき裂が見られた。その後、き裂および局部座屈が進展することにより、荷重が低下し、+96 および-100 サイクルには最大荷重の 80%、+120 サイクルには最大荷重の 70%となった。最終的なき裂長さは 40 mm（幅 2.0 mm）に達した。また、座屈波高さは 11 mm程度となった。また、最大荷重以降から 90%に荷重が低下するまでは、き裂進展による影響が大きい、それ以降では局部座屈が荷重低下の主要因となり、80%に荷重が低下すると再びき裂進展による影響が大きくなる傾向にあり、同じ径高さ比と軸力比で振幅の大きな S11-6C-RL 試験体と同じ傾向を示した。

L11-6C-RL 試験体 (D/t=11.67、L/D=12.0、n=0.6、R=1/50) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+31 および-29 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 7~8 mm程度であり、柱頭・柱脚の熱影響部にはき裂は見られなかった。その後、柱頭・柱脚部の局部座屈が進展することにより、+61 および-58 サイクルで最大荷重の 90%となった。この際の座屈波高さは 20~22 mmであり、柱頭・柱脚の熱影響部に長さ 20 mm程度のき裂（白い筋（ヘアクラック）：幅 0.05 mm程度および幅 0.1 mm）が見られた。その後、き裂はあまり進展せず、局部座屈が進展することにより、荷重が低下し、+79 および-71 サイクルには最大荷重の 80%となった。その後、座屈波が試験体緊結用の高力ボルトと干渉して荷重が低下しなくなったことより、90 サイクルで実験を終了した。最終的な座屈波高さは 26~33 mm程度となった。また、荷重が最大荷重の 90%となった頃から、柱脚部の局部座屈がかなり進展し、回転角が一方向（正載荷の方向）のままとなり、その後に変形モードが全体座屈的なくの字形となった。このように変形モードが変化したが、柱頭・柱脚部の局部座屈は継続して進展し、これが荷重低下の主要因であると考えられる。

以上より、荷重低下要因（破壊モード）としては、①溶接部のき裂進展、②柱頭・柱脚部の局部座屈（L11-6C-RL 試験体を含む）、③①と②の併発の 3 種類に分類できることがわかる。表 2.1-9 に荷重低下要因（破壊モード）を、写真 2.1-15 に上記破壊モードの代表的な試験体の柱脚部の拡大写真を示す。

表 2.1-6 実験時の初期剛性、降伏および最大荷重

試験体	幅厚比 D/t	径高さ比 L/D	軸力比 n	部材角 振幅R		実験結果			
						初期剛性*1 Ke (kN/mm)	降伏荷重*2 Qy (kN)	最大荷重*3 Qmax (kN)	
1 M08-3C-RL	8.75 (t=12mm)	8.0	0.3	1/25	0.040	19.0	82.4	202	-198
2 M08-3C-RS				1/50	0.020	18.9	83.6	169	-166
3 M08-6C-RL			0.6	1/25	0.040	18.1	46.9	202	-191
4 M08-6C-RS				1/50	0.020	17.9	53.7	190	-187
5 M11-3C-RL	11.67 (t=9mm)	8.0	0.3	1/50	0.020	16.1	59.6	138	-137
6 M11-3C-RS				1/75	0.013	16.1	69.5	119	-118
7 M11-6C-RL			0.6	1/50	0.020	15.7	49.6	147	-145
8 M11-6C-RS				1/75	0.013	15.8	41.2	130	-130
9 S11-6C-RL		5.0	0.6	1/50	0.020	52.2	53.1	261	-259
10 S11-6C-RS				1/75	0.013	52.6	52.2	241	-244
11 L11-6C-RL				1/50	0.020	6.6	23.4	84	-79

*1: +1 サイクルでの Qy/3 時の割線剛性

*2: +1 サイクルでの材端フランジに貼付したひずみゲージが圧縮降伏した時の荷重

*3: 正負載荷時の最大荷重

表 2.1-7(a) 実験結果一覧

試験体 名称				荷重レベル						
				曲げ降伏時 Qy*1	最大荷重時 Qmax	0.95Qmax	0.90Qmax	0.85Qmax	0.80Qmax	0.70Qmax
M08-3C-RL D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.3 R=1/25	正	水平	cycle	+1	+7	-	-	-	+8(*2)	-
			せん断力 Q(kN)	82	202	-	-	-	160	-
			変位 δ(mm)	4.80	33.76	-	-	-	33.85	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	5.71	40.2	-	-	-	40.3	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	470	469	-	-	-	470	-
			変位 δ v(mm)	-0.62	-13.66	-	-	-	-13.72	-
	軸ひずみ ε v(%)		-0.07	-1.63	-	-	-	-1.63	-	
	負	水平	cycle	-	-6	-	-	-	-	-8
			せん断力 Q(kN)	-	-198	-	-	-	-	-143
			変位 δ(mm)	-	-33.75	-	-	-	-	-33.85
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-40.18	-	-	-	-	-40.29	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	469	-	-	-	-	469
変位 δ v(mm)			-	-13.35	-	-	-	-	-13.53	
軸ひずみ ε v(%)	-		-1.59	-	-	-	-	-1.61		
M08-3C-RS D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.3 R=1/50	正	水平	cycle	+1	+25	+51	+66	+72	+75	+82
			せん断力 Q(kN)	84	169	162	153	146	139	119
			変位 δ(mm)	5.18	16.88	16.88	16.91	16.87	16.9	16.89
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	6.17	20.1	20.1	20.13	20.09	20.12	20.11	
		鉛直	軸力 N(kN)	470	469	469	469	470	470	469
			変位 δ v(mm)	-0.62	-7.61	-8.93	-9.23	-9.3	-9.29	-9.2
	軸ひずみ ε v(%)		-0.07	-0.91	-1.06	-1.10	-1.11	-1.11	-1.10	
	負	水平	cycle	-	-33	-64	-77	-	-	-
			せん断力 Q(kN)	-	-166	-158	-149	-	-	-
			変位 δ(mm)	-	-16.9	-16.92	-16.88	-	-	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-20.12	-20.14	-20.1	-	-	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	470	469	470	-	-	-
変位 δ v(mm)			-	-8.43	-9.55	-9.77	-	-	-	
軸ひずみ ε v(%)	-		-1.00	-1.14	-1.16	-	-	-		
M08-6C-RL D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.6 R=1/25	正	水平	cycle	+1	+5	-	-	-	-	+6(*3)
			せん断力 Q(kN)	47	202	-	-	-	-	114
			変位 δ(mm)	3.2	33.66	-	-	-	-	33.75
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	3.81	40.07	-	-	-	-	40.18	
		鉛直	軸力 N(kN)	938	936	-	-	-	-	938
			変位 δ v(mm)	-1.31	-31.26	-	-	-	-	-32.6
	軸ひずみ ε v(%)		-0.16	-3.72	-	-	-	-	-3.88	
	負	水平	cycle	-	-4	-	-	-	-	-5(*3)
			せん断力 Q(kN)	-	-191	-	-	-	-	-166
			変位 δ(mm)	-	-33.61	-	-	-	-	-33.69
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-40.01	-	-	-	-	-40.11	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	936	-	-	-	-	937
変位 δ v(mm)			-	-29.25	-	-	-	-	-33.06	
軸ひずみ ε v(%)	-		-3.48	-	-	-	-	-3.94		
M08-6C-RS D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.6 R=1/50	正	水平	cycle	+1	+22	+33	+40	+46	+50	-
			せん断力 Q(kN)	54	190	181	171	162	154	-
			変位 δ(mm)	3.97	16.91	16.89	16.89	16.85	16.85	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	4.72	20.13	20.1	20.1	20.06	20.05	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	940	939	939	938	939	939	-
			変位 δ v(mm)	-1.22	-30.79	-34.66	-35.63	-36.06	-36.24	-
	軸ひずみ ε v(%)		-0.14	-3.67	-4.13	-4.24	-4.29	-4.31	-	
	負	水平	cycle	-	-24	-31	-33	-37	-40	-63
			せん断力 Q(kN)	-	-187	-181	-171	-159	-150	-132
			変位 δ(mm)	-	-16.94	-16.93	-16.94	-16.89	-16.89	-16.86
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-20.17	-20.15	-20.17	-20.1	-20.11	-20.07	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	939	940	940	940	940	939
変位 δ v(mm)			-	-32.21	-34.52	-34.85	-35.39	-35.64	-36.7	
軸ひずみ ε v(%)	-		-3.83	-4.11	-4.15	-4.21	-4.24	-4.37		

*1: +1サイクルでの材端フランジに貼付したひずみゲージが圧縮降伏した時の荷重

*2: 0.80Qmax以下(79%)の値であるが、参考値として示す。

*3: 最終サイクルでの値(正:56%、負:87%)を参考値として示す。

表 2.1-7(b) 実験結果一覧

試験体 名称				荷重レベル						
				曲げ降伏時 Qy*1	最大荷重時 Qmax	0.95Qmax	0.90Qmax	0.85Qmax	0.80Qmax	0.70Qmax
M11-3C-RL D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.3 R=1/50	正	水平	cycle	+1	+31	+53	+63	+70	+73	+76
			せん断力 Q(kN)	60	138	131	125	117	111	97
			変位 δ(mm)	4.38	16.84	16.82	16.85	16.85	16.82	16.82
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	5.21	20.05	20.03	20.05	20.05	20.03	20.03	
		鉛直	軸力 N(kN)	369	367	367	369	369	369	369
			変位 δ v(mm)	-0.58	-9.64	-10.89	-11.15	-11.26	-11.26	-11.15
	軸ひずみ ε v(%)		-0.07	-1.15	-1.3	-1.33	-1.34	-1.34	-1.33	
	負	水平	cycle	-	-31	-58	-70	-	-	-
			せん断力 Q(kN)	-	-137	-131	-124	-	-	-
			変位 δ(mm)	-	-16.83	-16.85	-16.86	-	-	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-20.03	-20.06	-20.07	-	-	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	368	368	368	-	-	-
変位 δ v(mm)			-	-9.95	-11.38	-11.66	-	-	-	
軸ひずみ ε v(%)	-		-1.18	-1.35	-1.39	-	-	-		
M11-3C-RS D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.3 R=1/75	正	水平	cycle	+1	+31	+157	+212	+260	+288	-
			せん断力 Q(kN)	69	119	114	108	101	95	-
			変位 δ(mm)	5.07	11.29	11.27	11.26	11.28	11.28	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	6.03	13.44	13.42	13.4	13.43	13.43	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	369	368	368	369	369	368	-
			変位 δ v(mm)	-0.61	-4.32	-5.81	-5.97	-6.04	-6.04	-
	軸ひずみ ε v(%)		-0.07	-0.51	-0.69	-0.71	-0.72	-0.72	-	
	負	水平	cycle	-	-24	-166	-220	-257	-272	-290
			せん断力 Q(kN)	-	-118	-112	-106	-100	-95	-83
			変位 δ(mm)	-	-11.31	-11.25	-11.27	-11.37	-11.24	-11.25
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-13.47	-13.39	-13.42	-13.54	-13.38	-13.39	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	370	370	370	370	370	370
変位 δ v(mm)			-	-4.15	-5.89	-6.03	-6.06	-6.04	-5.96	
軸ひずみ ε v(%)	-		-0.49	-0.70	-0.72	-0.72	-0.72	-0.71		
M11-6C-RL D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.6 R=1/50	正	水平	cycle	+1	+13	+21	+26	+29	+35	+46
			せん断力 Q(kN)	50	147	141	133	126	118	104
			変位 δ(mm)	4.31	16.86	16.88	16.95	16.94	16.82	16.87
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	5.13	20.07	20.1	20.18	20.17	20.02	20.09	
		鉛直	軸力 N(kN)	738	738	736	737	737	736	736
			変位 δ v(mm)	-1.31	-29.53	-43.26	-52.69	-58.27	-70.25	-96.55
	軸ひずみ ε v(%)		-0.16	-3.52	-5.15	-6.27	-6.94	-8.36	-11.49	
	負	水平	cycle	-	-14	-21	-24	-28	-33	-
			せん断力 Q(kN)	-	-145	-138	-133	-123	-117	-
			変位 δ(mm)	-	-16.84	-16.98	-16.87	-16.86	-16.94	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-20.04	-20.22	-20.08	-20.07	-20.17	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	738	737	737	736	736	-
変位 δ v(mm)			-	-32	-44.37	-49.95	-57.48	-67.27	-	
軸ひずみ ε v(%)	-		-3.81	-5.28	-5.95	-6.84	-8.01	-		
M11-6C-RS D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.6 R=1/75	正	水平	cycle	+1	+58	+117	+152	+181	+205	+260(*2)
			せん断力 Q(kN)	41	130	123	117	110	105	94
			変位 δ(mm)	3.32	11.28	11.28	11.26	11.32	11.24	11.27
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	3.95	13.43	13.43	13.4	13.48	13.38	13.42	
		鉛直	軸力 N(kN)	737	736	735	737	738	737	738
			変位 δ v(mm)	-1.1	-25.9	-37.38	-45.12	-52.81	-60.67	-90.1
	軸ひずみ ε v(%)		-0.13	-3.08	-4.45	-5.37	-6.29	-7.22	-10.73	
	負	水平	cycle	-	-41	-105	-146	-177	-205	-260(*2)
			せん断力 Q(kN)	-	-130	-124	-117	-111	-104	-93
			変位 δ(mm)	-	-11.33	-11.35	-11.27	-11.29	-11.29	-11.33
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-13.48	-13.51	-13.42	-13.45	-13.43	-13.48	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	736	736	737	737	739	738
変位 δ v(mm)			-	-22.9	-34.92	-43.77	-51.73	-60.79	-90.26	
軸ひずみ ε v(%)	-		-2.73	-4.16	-5.21	-6.16	-7.24	-10.75		

*1: +1サイクルでの材端フランジに貼付したひずみゲージが圧縮降伏した時の荷重

*2: 最終的に最大荷重の71%までしか荷重低下しなかったため、最終サイクルの値(72%)を参考として示す。

表 2.1-7(c) 実験結果一覧

試験体 名称				荷重レベル						
				曲げ降伏時 Qy*1	最大荷重時 Qmax	0.95Qmax	0.90Qmax	0.85Qmax	0.80Qmax	0.70Qmax
S11-6C-RL D/t=11.67 L/D=5.0 n=0.6 R=1/50	正	水平	cycle	+1	+8	+13	+17	+24	+27	+34
			せん断力 Q(kN)	53	261	249	237	223	213	183
			変位 δ(mm)	1.22	10.76	10.61	10.61	10.63	10.57	10.58
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	2.31	20.49	20.21	20.20	20.25	20.13	20.14	
		鉛直	軸力 N(kN)	739	736	737	736	737	738	737
			変位 δ v(mm)	-0.02	-19.99	-26.82	-30.53	-36.10	-38.27	-42.39
	軸ひずみ ε v(%)		0.00	-3.81	-5.11	-5.82	-6.88	-7.29	-8.07	
	負	水平	cycle	-	-9	-12	-18	-25	-30	-
			せん断力 Q(kN)	-	-259	-249	-235	-222	-208	-
			変位 δ(mm)	-	-10.69	-10.67	-10.61	-10.66	-10.61	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-20.36	-20.33	-20.21	-20.31	-20.20	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	735	736	737	737	737	-
変位 δ v(mm)			-	-22.64	-26.51	-32.12	-37.59	-40.95	-	
軸ひずみ ε v(%)	-		-4.31	-5.05	-6.12	-7.16	-7.80	-		
S11-6C-RS D/t=11.67 L/D=5.0 n=0.6 R=1/75	正	水平	cycle	+1	+25	+37	+56	+79	+96	+120
			せん断力 Q(kN)	52	241	230	217	205	193	169
			変位 δ(mm)	1.18	7.18	7.09	7.13	7.09	7.03	7.03
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	2.24	13.67	13.50	13.58	13.50	13.38	13.38	
		鉛直	軸力 N(kN)	738	736	736	736	736	737	738
			変位 δ v(mm)	-0.03	-20.12	-24.21	-27.13	-29.71	-30.96	-31.85
	軸ひずみ ε v(%)		-0.01	-3.83	-4.61	-5.17	-5.66	-5.90	-6.07	
	負	水平	cycle	-	-31	-39	-62	-83	-100	-
			せん断力 Q(kN)	-	-244	-233	-220	-208	-196	-
			変位 δ(mm)	-	-7.16	-7.13	-7.09	-7.11	-7.04	-
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-13.63	-13.57	-13.51	-13.55	-13.41	-	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	736	736	737	737	737	-
変位 δ v(mm)			-	-22.61	-24.71	-27.98	-30.09	-31.18	-	
軸ひずみ ε v(%)	-		-4.31	-4.71	-5.33	-5.73	-5.94	-		
L11-6C-RL D/t=11.67 L/D=12.0 n=0.6 R=1/50	正	水平	cycle	+1	+31	+51	+61	+70	+79	+90(*2)
			せん断力 Q(kN)	23	84.25	80.79	76.63	71.89	67.84	65.77
			変位 δ(mm)	5.82	25.20	25.28	25.21	25.22	25.26	25.31
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	4.62	20.00	20.06	20.01	20.02	20.05	20.08	
		鉛直	軸力 N(kN)	738	735	734	734	734	735	735
			変位 δ v(mm)	-0.10	-37.38	-52.17	-62.86	-74.32	-87.91	-103.10
	軸ひずみ ε v(%)		-0.01	-2.97	-4.14	-4.99	-5.90	-6.98	-8.18	
	負	水平	cycle	-	-29	-46	-58	-64	-71	-90(*2)
			せん断力 Q(kN)	-	-79	-76	-71	-67	-64	-64
			変位 δ(mm)	-	-25.21	-25.24	-25.29	-25.27	-25.25	-25.24
		部材角 R(×10 ⁻³ rad.)	-	-20.01	-20.03	-20.07	-20.05	-20.04	-20.03	
		鉛直	軸力 N(kN)	-	735	735	736	735	735	734
変位 δ v(mm)			-	-36.53	-48.36	-60.17	-67.35	-76.78	-103.93	
軸ひずみ ε v(%)	-		-2.90	-3.84	-4.78	-5.34	-6.09	-8.25		

*1: +1サイクルでの材端フランジに貼付したひずみゲージが圧縮降伏した時の荷重

*2: 最終的に最大荷重の70%まで荷重低下しなかったため、最終サイクル(±90サイクル)の値を参考として示す。

表 2.1-8 実験結果一覧(座屈波高さ:最大値)

試験体 名称		荷重レベル								
		軸力導入時	1cycle	最大荷重時 Qmax	0.95Qmax	0.90Qmax	0.85Qmax	0.80Qmax	0.70Qmax	
M08-3C-RL D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.3 R=1/25	正	cycle	0	+1	+5	-	-	-	+9	-
		L	0.08	2.24	2.94	-	-	-	3.25	-
		R	-0.14	-1.12	-0.42	-	-	-	0.08	-
	負	cycle	-	-1	-5	-	-	-	-	-9
		L	-	-0.98	0.03	-	-	-	-	0.25
		R	-	2.63	2.97	-	-	-	-	3.44
M08-3C-RS D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.3 R=1/50	正	cycle	0	+1	+30	+50	+67	+73	+76	+83
		L	0.64	1.68	2.16	2.66	2.38	2.30	2.35	2.41
		R	0.56	-0.25	0.39	0.53	0.73	0.70	0.73	0.67
	負	cycle	-	-1	-30	-65	-78	-	-	-
		L	-	-0.22	0.50	0.84	1.01	-	-	-
		R	-	1.57	1.88	2.04	1.99	-	-	-
M08-6C-RL D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.6 R=1/25	正	cycle	0	+1	+5	-	-	-	-	+6
		L	0.11	3.11	4.98	-	-	-	-	4.48
		R	0.08	-0.73	1.76	-	-	-	-	2.94
	負	cycle	-	-1	-5	-	-	-	-	-
		L	-	-0.73	3.5	-	-	-	-	-
		R	-	3.28	4.12	-	-	-	-	-
M08-6C-RS D/t=8.75 L/D=8.0 n=0.6 R=1/50	正	cycle	0	+1	+20	+34	+41	+47	+51	-
		L	0.59	1.88	5.07	6.05	6.36	6.41	6.58	-
		R	0.22	-0.26	1.54	4.12	4.17	4.42	4.48	-
	負	cycle	-	-1	-20	-32	-34	-38	-41	-64
		L	-	0.22	3.72	4.87	5.01	5.18	5.40	5.91
		R	-	1.32	4.17	4.90	4.93	5.10	5.24	5.60
M11-3C-RL D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.3 R=1/50	正	cycle	0	+1	+30	+54	+64	+71	+74	+77
		L	0.20	0.90	1.74	1.96	1.99	1.91	2.13	2.02
		R	0.72	-0.09	0.64	1.17	1.34	1.59	1.76	1.87
	負	cycle	-	-1	-30	-59	-71	-	-	-
		L	-	-0.39	0.14	0.62	0.90	-	-	-
		R	-	1.96	2.01	2.52	2.54	-	-	-
M11-3C-RS D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.3 R=1/75	正	cycle	0	+1	+30	+160	+214	+260	+288	-
		L	0.06	0.48	0.87	0.95	1.04	1.15	1.06	-
		R	-0.03	-0.34	-0.03	0.28	0.28	0.50	0.50	-
	負	cycle	-	-1	-30	-170	-220	-260	-274	-292
		L	-	-0.42	-0.17	0.00	0.11	0.25	0.31	0.34
		R	-	0.42	0.87	1.06	1.18	1.12	1.09	1.15
M11-6C-RL D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.6 R=1/50	正	cycle	0	+1	+10	+20	+27	+30	+36	+47
		L	0.28	1.65	4.51	11.09	16.21	18.20	21.70	27.78
		R	0.34	-0.45	2.80	9.13	13.78	15.01	17.84	22.76
	負	cycle	-	-1	-10	-20	-25	-29	-34	-
		L	-	-0.53	3.64	10.78	14.31	17.00	19.80	-
		R	-	1.37	4.03	10.25	13.52	15.65	17.98	-
M11-6C-RS D/t=11.67 L/D=8.0 n=0.6 R=1/75	正	cycle	0	+1	+45	+117	+152	+181	+205	+260(*1)
		L	0.25	0.73	3.89	9.35	12.04	13.89	15	18.56
		R	0.62	0.11	3.56	9.44	11.93	13.89	15.46	18.56
	負	cycle	-	-1	-45	-105	-146	-177	-205	-260(*1)
		L	-	-0.28	3.14	7.92	11.06	13.02	15	17.61
		R	-	1.40	4.37	9.10	12.01	14.11	15.99	19.07
S11-6C-RL D/t=11.67 L/D=5.0 n=0.6 R=1/50	正	cycle	0	+1	+10	+14	+19	+25	+28	+35
		L	0.25	0.87	6.10	7.95	9.38	10.81	11.56	12.38
		R	0.06	-0.36	4.45	6.10	7.56	9.07	9.55	10.30
	負	cycle	-	-1	-10	-14	-20	-26	-31	-
		L	-	-0.06	6.19	7.78	9.46	10.84	11.62	-
		R	-	0.92	5.01	6.47	8.18	9.46	10.30	-
S11-6C-RS D/t=11.67 L/D=5.0 n=0.6 R=1/75	正	cycle	0	+1	+20	+38	+57	+80	+97	+121
		L	0.08	0.53	4.96	8.09	9.41	10.42	10.92	11.40
		R	0.06	-0.28	3.08	5.54	6.75	7.73	8.26	8.43
	負	cycle	-	-1	-30	-40	-63	-84	-101	-
		L	-	0.20	6.72	8.09	9.49	10.42	10.84	-
		R	-	0.59	5.04	6.05	7.22	8.12	8.51	-
L11-6C-RL D/t=11.67 L/D=12.0 n=0.6 R=1/50	正	cycle	0	+1	+30	+52	+62	+71	+80	+90(*1)
		L	-0.22	0.92	8.04	17.25	22.43	27.08	31.22	33.96
		R	-0.17	-0.95	3.64	10.44	15.18	19.52	23.32	26.46
	負	cycle	-	-1	-30	-48	-59	-65	-72	-90(*1)
		L	-	-0.87	7.06	14.45	20.27	23.49	27.02	33.15
		R	-	1.09	5.01	10.00	14.92	17.75	21.03	27.50

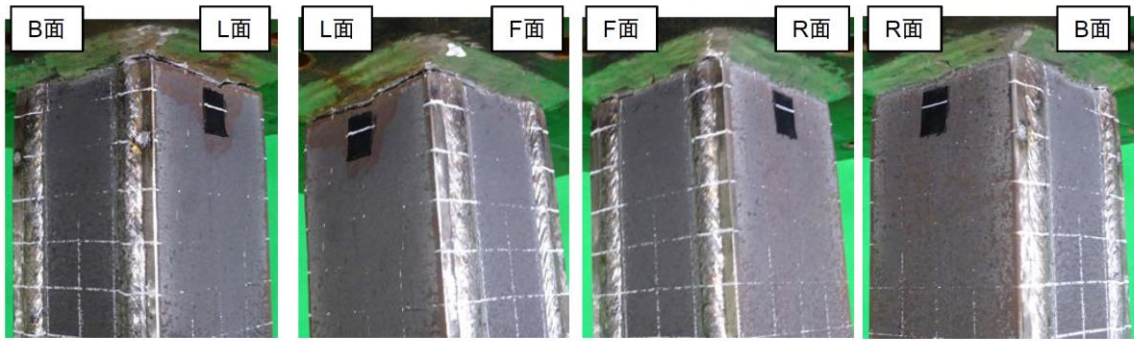
*1:最終的に最大荷重の70%まで荷重低下しなかったため、最終サイクルの値を参考として示す。

表 2.1-9 実験結果一覧(き裂長さ・幅:最大値)

試験体 名称		荷重レベル						破壊 モード	
		最大荷重時 Qmax	0.95Qmax	0.90Qmax	0.85Qmax	0.80Qmax	0.70Qmax		
M08-3C-RL	正	cycle	+5	-	-	-	+8	-	き裂進展
		長さ(幅)*1	20(HC)	-	-	-	45(2.0)	-	
	負	cycle	-5	-	-	-	-	-	
		長さ(幅)*1	25(HC)	-	-	-	-	-	
M08-3C-RS	正	cycle	+30	+50	+67	+73	+76	+83	き裂進展
		長さ(幅)*1	なし	-	-	25(0.5)	30(1.0)	40(2.0)	
	負	cycle	-30	-65	-78	-	-	-	
		長さ(幅)*1	なし	-	40(0.5)	-	-	-	
M08-6C-RL	正	cycle	+5	-	-	-	-	+6	き裂進展
		長さ(幅)*1	105(0.2)	-	-	-	-	105(2.0)	
	負	cycle	-5	-	-	-	-	-	
		長さ(幅)*1	105(2.0)	-	-	-	-	-	
M08-6C-RS	正	cycle	+20	+34	+41	+47	+51	-	き裂進展
		長さ(幅)*1	なし	30(HC)	40(0.5)	105(1.0)	105(1.0)	-	
	負	cycle	-20	-32	-34	-38	-41	-64	
		長さ(幅)*1	なし	35(0.5)	105(1.0)	105(1.5)	105(2.0)	105(2.0)	
M11-3C-RL	正	cycle	+30	+54	+64	+71	+74	+77	き裂進展
		長さ(幅)*1	なし	20(HC)	30(HC)	105(HC)	105(HC)	105(1.5)	
	負	cycle	-30	-59	-71	-	-	-	
		長さ(幅)*1	なし	30(HC)	30(HC)	-	-	-	
M11-3C-RS	正	cycle	+30	+160	+214	+260	+288	-	き裂進展
		長さ(幅)*1	なし	20(HC)	30(HC)	30(HC)	30(0.2)	-	
	負	cycle	-30	-170	-220	-260	-274	-292	
		長さ(幅)*1	なし	20(HC)	30(HC)	40(0.5)	50(1.0)	105(1.0)	
M11-6C-RL	正	cycle	+10	+22	+27	+30	+36	+47	局部座屈
		長さ(幅)*1	なし	なし	20(HC)	20(HC)	-	-	
	負	cycle	-10	-22	-25	-29	-34	-	
		長さ(幅)*1	なし	なし	20(HC)	20(HC)	-	-	
M11-6C-RS	正	cycle	+40	+119	+152	+183	+207	+260(*2)	局部座屈
		長さ(幅)*1	なし	なし	40(0.2)	30(0.2)	40(0.2)	-	
	負	cycle	-40	-107	-146	-179	-207	-260(*2)	
		長さ(幅)*1	なし	35(HC)	40(0.2)	40(0.2)	105(0.5)	-	
S11-6C-RL	正	cycle	+10	+14	+19	+25	+28	+35	き裂進展 + 局部座屈
		長さ(幅)*1	10(0.2)	35(1.0)	40(1.5)	40(2.0)	40(2.0)	105(2.5)	
	負	cycle	-10	-14	-20	-26	-31	-	
		長さ(幅)*1	20(0.2)	25(1.0)	30(1.0)	30(1.0)	30(1.5)	-	
S11-6C-RS	正	cycle	+20	+38	+57	+80	+97	+121	き裂進展 + 局部座屈
		長さ(幅)*1	なし	20(0.2)	40(1.0)	40(1.0)	40(1.5)	40(2.0)	
	負	cycle	-30	-40	-63	-84	-101	-	
		長さ(幅)*1	10(HC)	10(0.5)	35(0.5)	50(1.0)	105(1.0)	-	
L11-6C-RL	正	cycle	+30	+52	+62	+71	+80	+90(*2)	局部座屈 (全体座屈)
		長さ(幅)*1	なし	20(HC)	20(0.1)	20(0.1)	20(0.1)	-	
	負	cycle	-30	-48	-59	-65	-72	-90(*2)	
		長さ(幅)*1	なし	10(HC)	20(HC)	30(0.1)	30(0.1)	-	

*1: HCはヘアクラック(幅0.05mm程度)を示す。また、「-」は計測値なしを示す。

*2: 最終的に最大荷重の70%まで荷重低下しなかったため、最終サイクルの値を参考として示す。



(a) B-L面柱頭部詳細

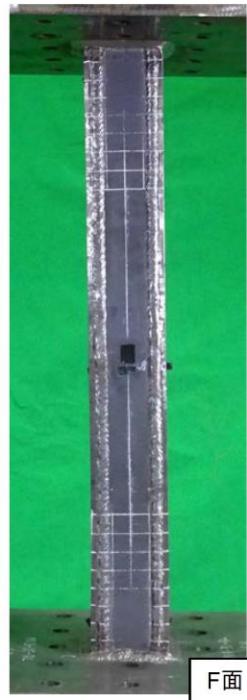
(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



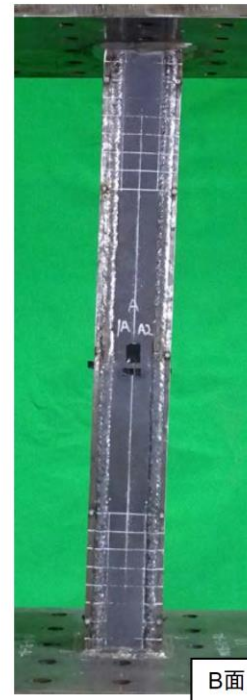
(e) L面全景



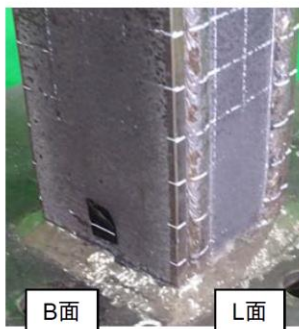
(f) F面全景



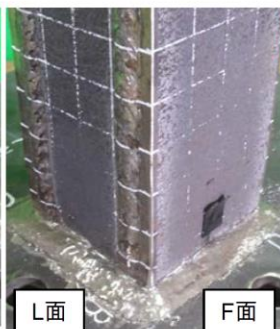
(g) R面全景



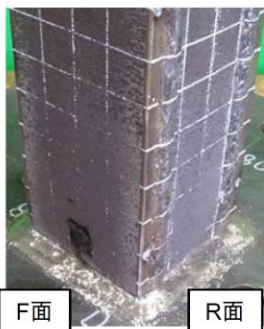
(h) B面全景



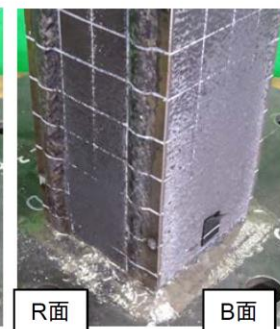
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

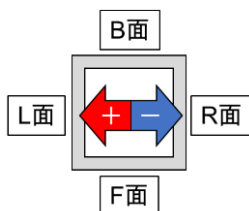
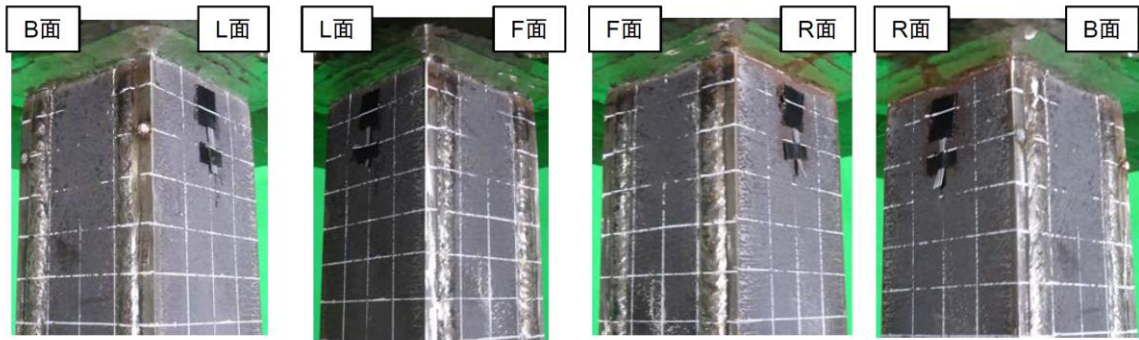


写真 2.1-4 試験体の最終状況[M08-3C-RL]
 (幅厚比 8.75, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.3, 振幅 1/25)

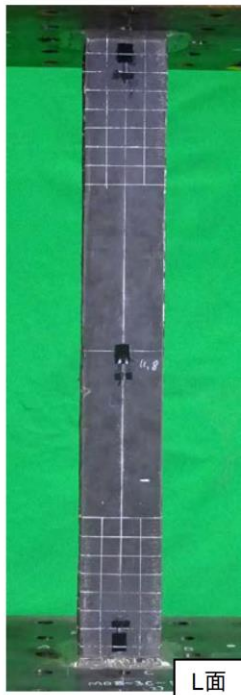


(a) B-L面柱頭部詳細

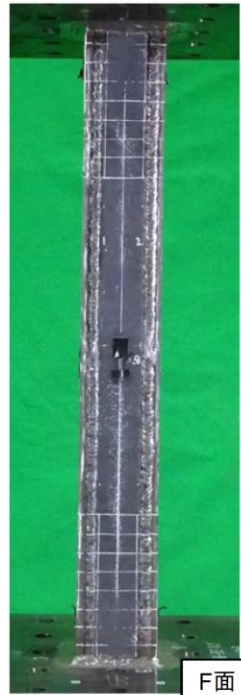
(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

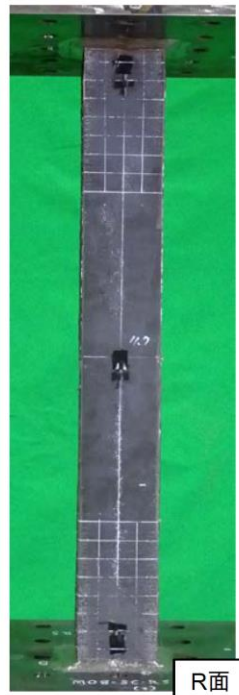
(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



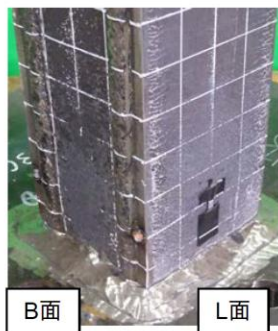
(f) F面全景



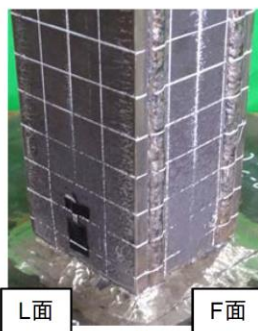
(g) R面全景



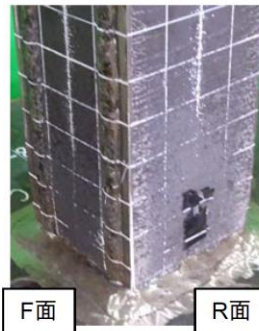
(h) B面全景



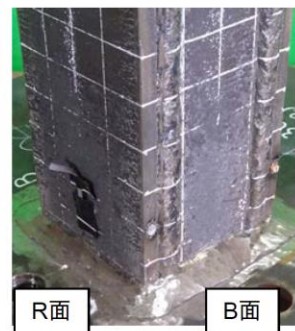
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

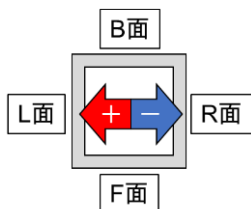
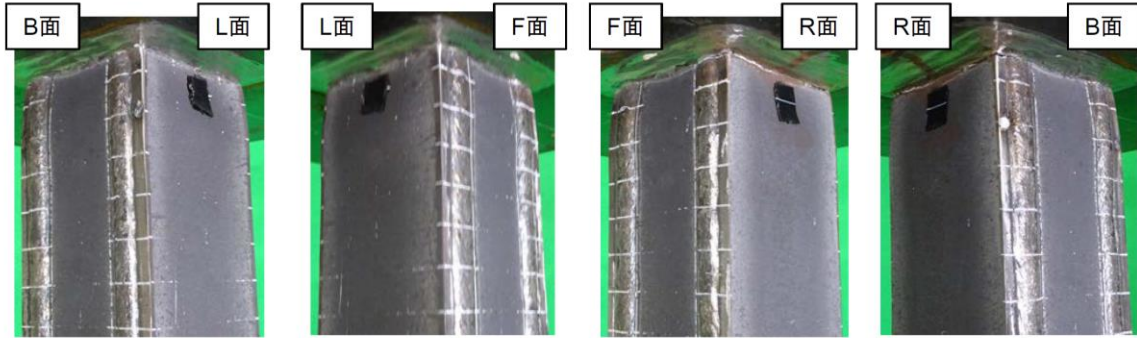


写真 2.1-5 試験体の最終状況[M08-3C-RS]
 (幅厚比 8.75, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.3, 振幅 1/50)



(a) B-L面柱頭部詳細

(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



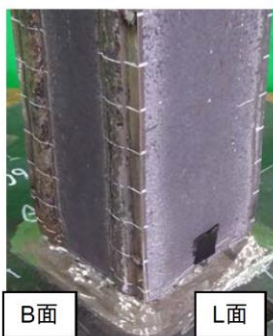
(f) F面全景



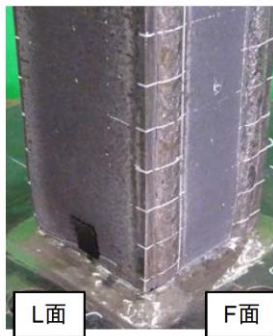
(g) R面全景



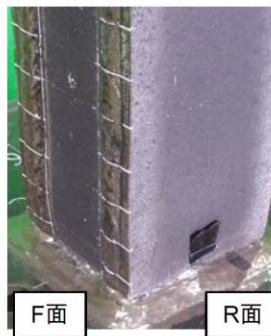
(h) B面全景



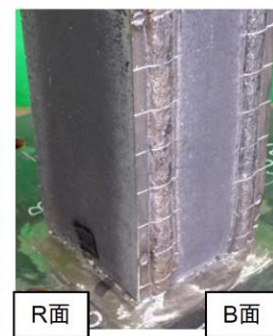
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

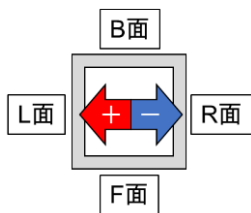
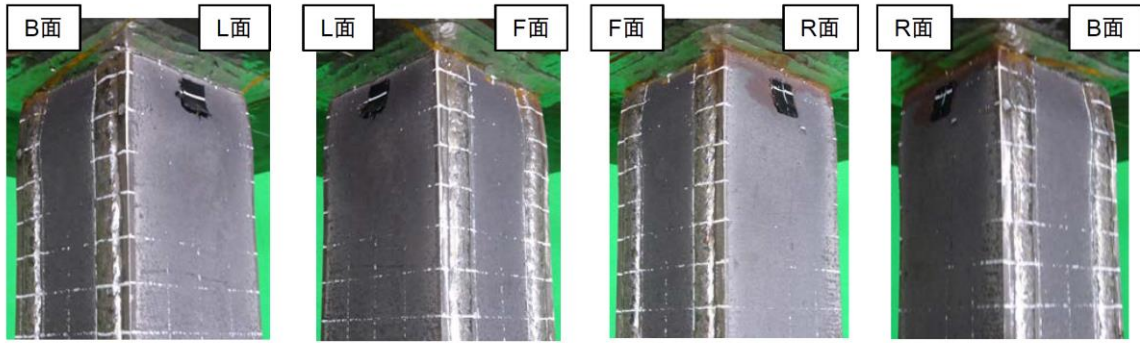


写真 2.1-6 試験体の最終状況[M08-6C-RL]
 (幅厚比 8.75, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/25)



(a) B-L面柱頭部詳細

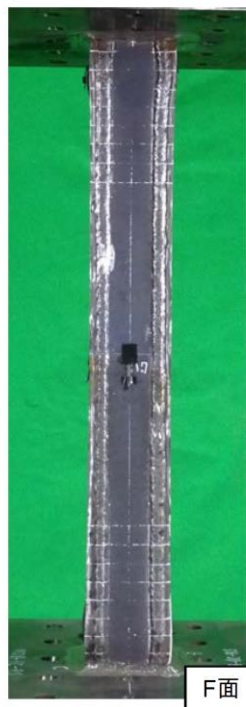
(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



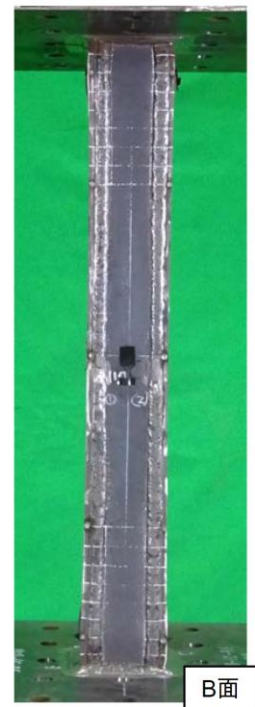
(e) L面全景



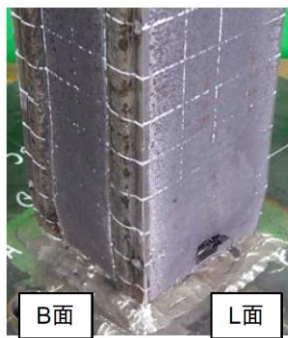
(f) F面全景



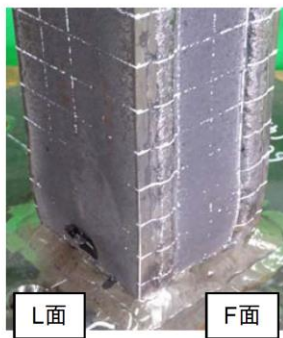
(g) R面全景



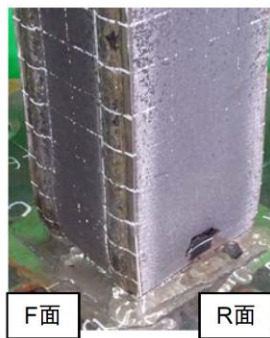
(h) B面全景



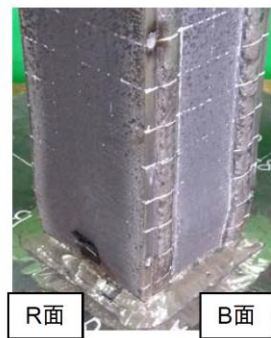
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

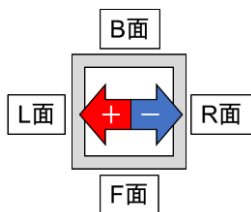
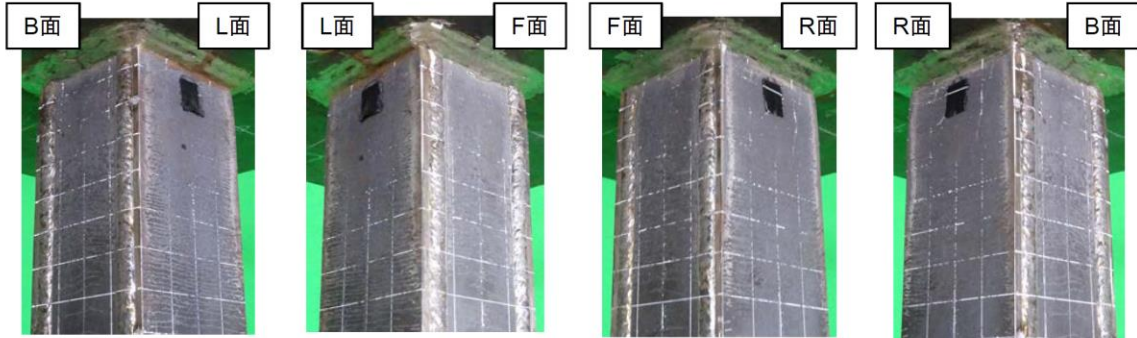


写真 2.1-7 試験体の最終状況[M08-6C-RS]
 (幅厚比 8.75, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/50)

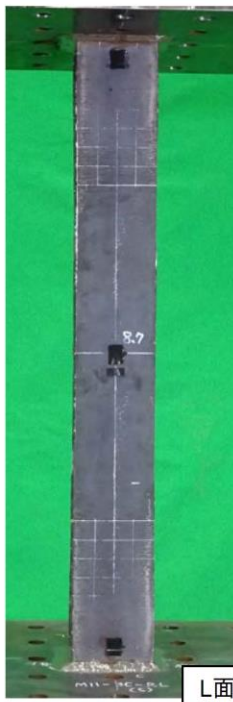


(a) B-L面柱頭部詳細

(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

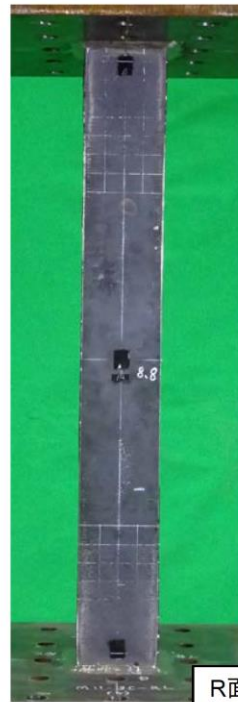
(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



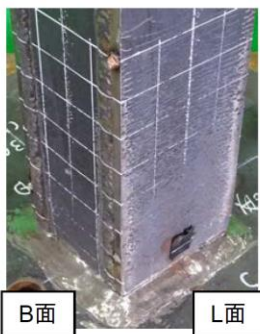
(f) F面全景



(g) R面全景



(h) B面全景



(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

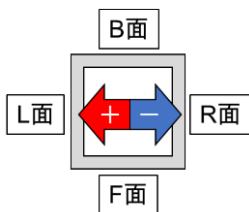
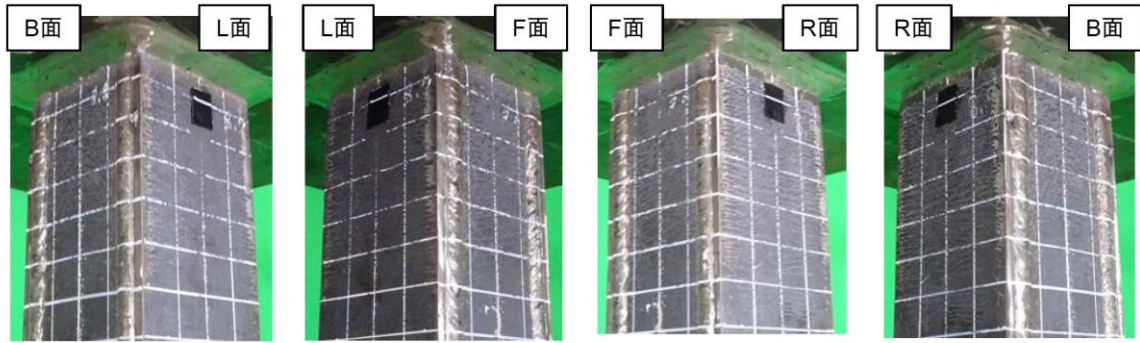


写真 2.1-8 試験体の最終状況[M11-3C-RL]
 (幅厚比 11.67, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.3, 振幅 1/50)



(a) B-L面柱頭部詳細

(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



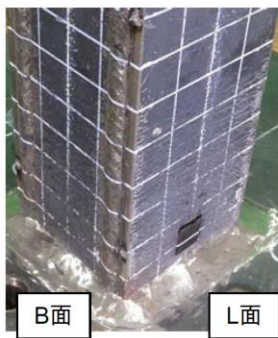
(f) F面全景



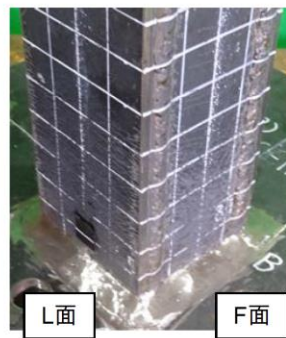
(g) R面全景



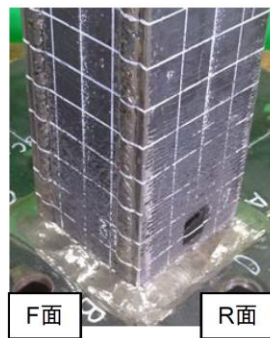
(h) B面全景



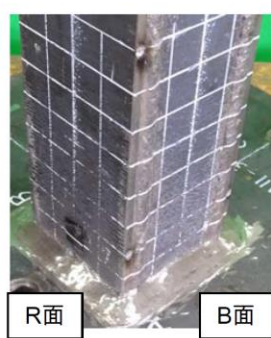
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

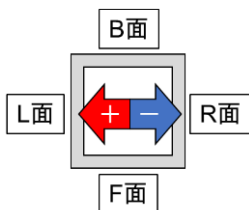
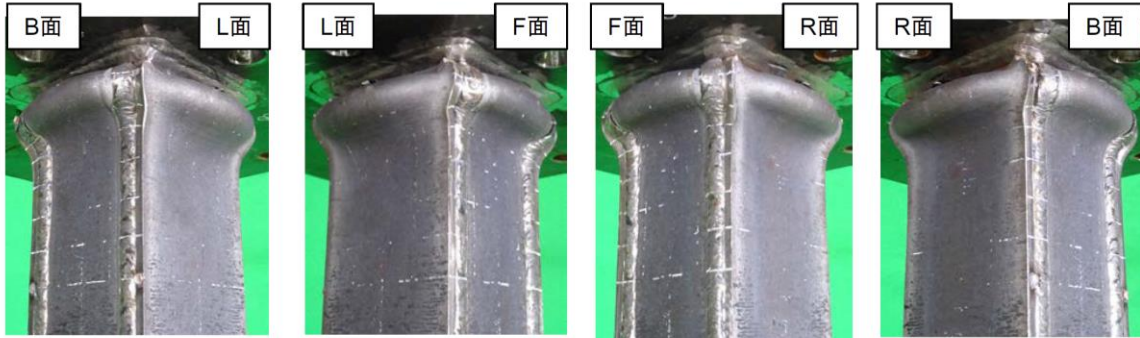


写真 2.1-9 試験体の最終状況[M11-3C-RS]
(幅厚比 11.67, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.3, 振幅 1/75)

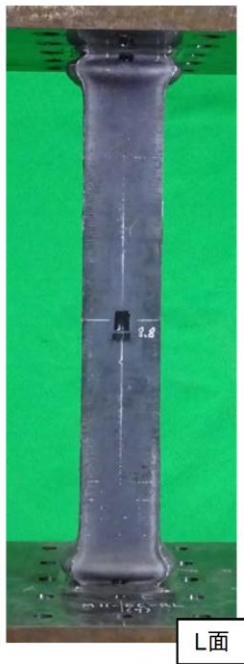


(a) B-L面柱頭部詳細

(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



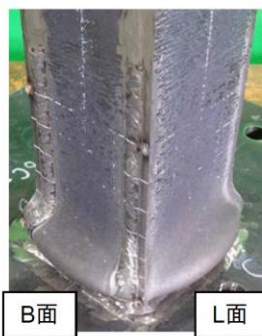
(f) F面全景



(g) R面全景



(h) B面全景



(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

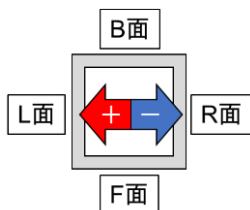
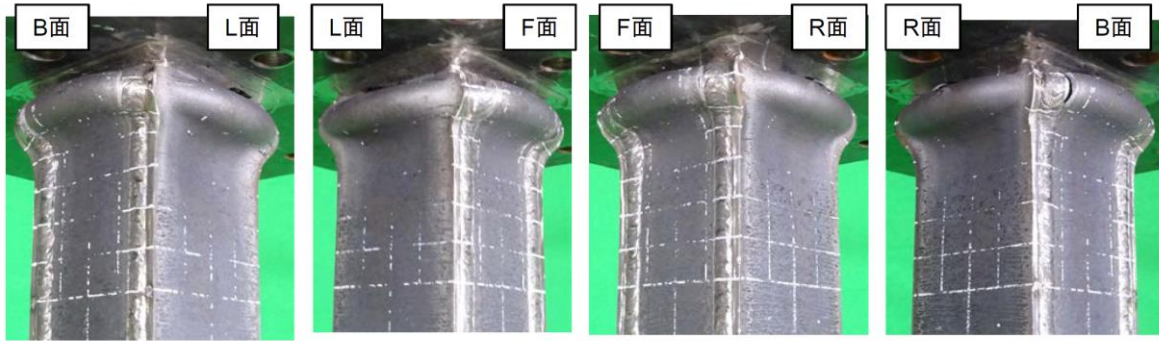


写真 2.1-10 試験体の最終状況[M11-6C-RL]
 (幅厚比 11.67, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/50)

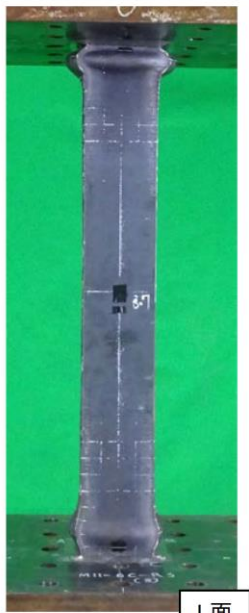


(a) B-L面柱頭部詳細

(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



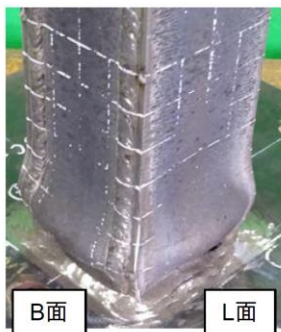
(f) F面全景



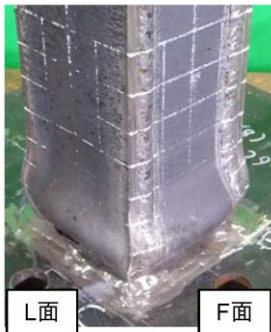
(g) R面全景



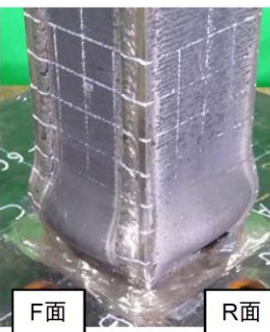
(h) B面全景



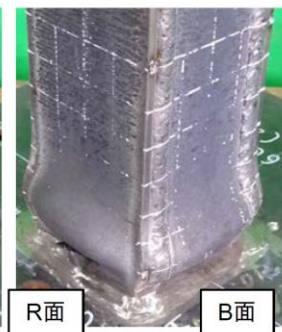
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

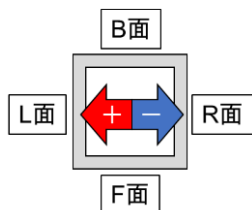
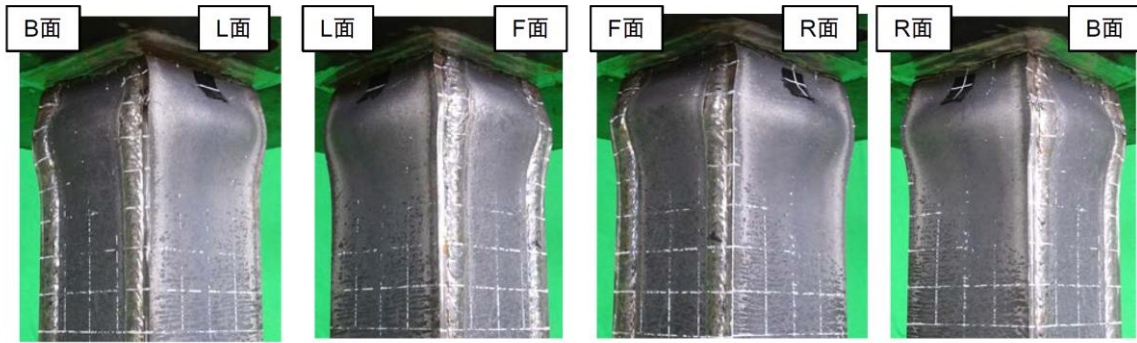


写真 2.1-11 試験体の最終状況[M11-6C-RS]
 (幅厚比 11.67, 径高さ比 8.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/75)



(a) B-L面柱頭部詳細

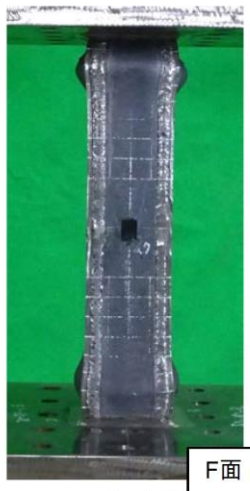
(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



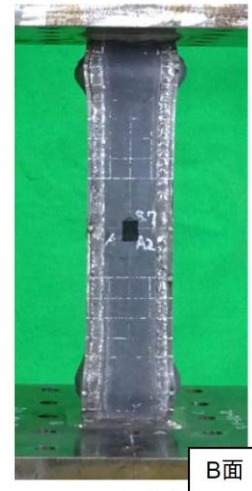
(e) L面全景



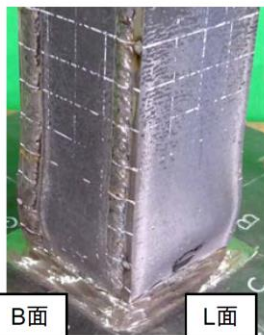
(f) F面全景



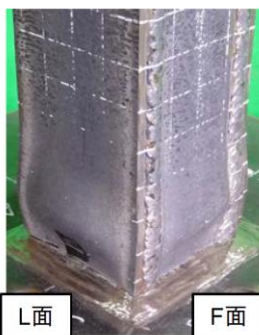
(g) R面全景



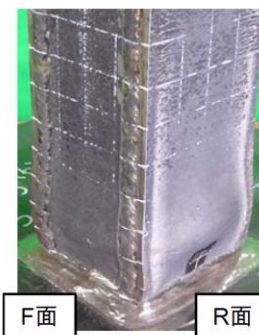
(h) B面全景



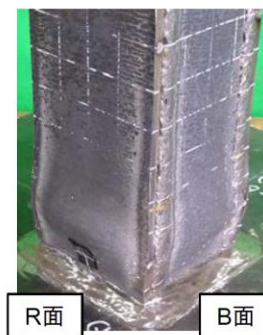
(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

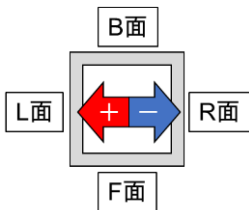


写真 2.1-12 試験体の最終状況[S11-6C-RL]
 (幅厚比 11.67, 径高さ比 5.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/50)

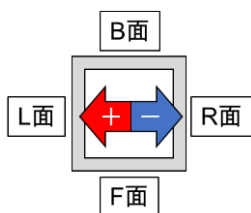
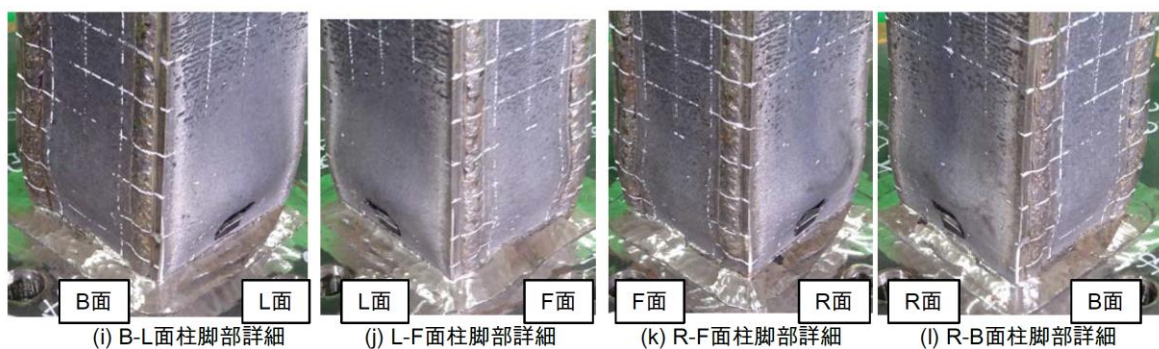
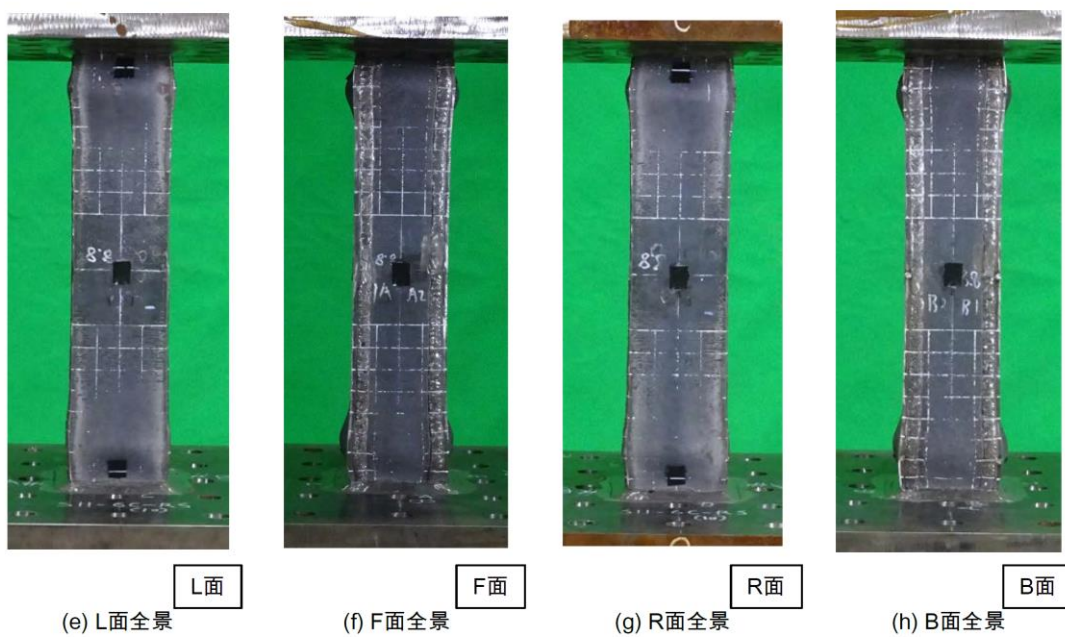
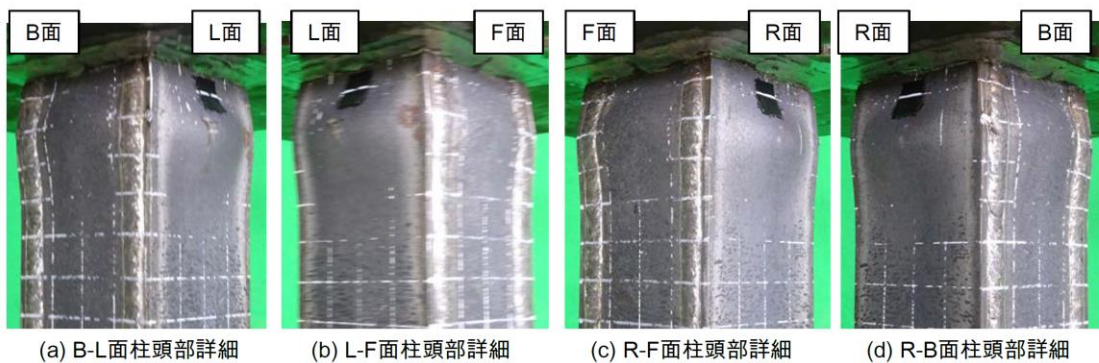
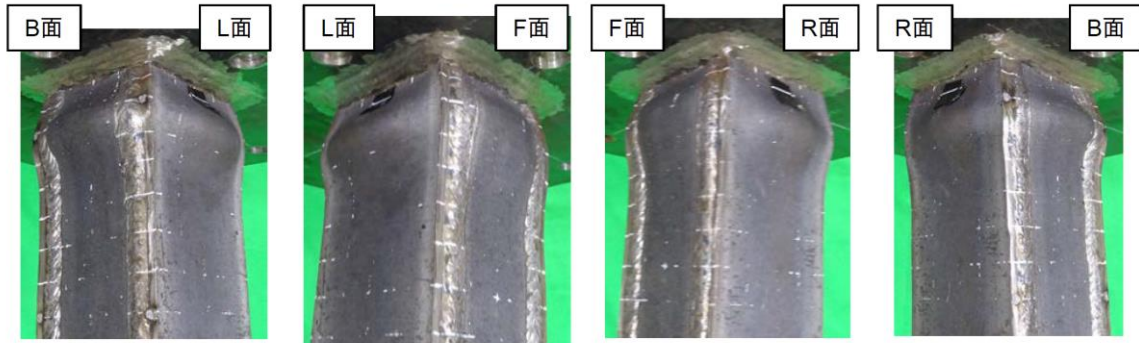


写真 2.1-13 試験体の最終状況[S11-6C-RS]
 (幅厚比 11.67, 径高さ比 5.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/75)



(a) B-L面柱頭部詳細

(b) L-F面柱頭部詳細

(c) R-F面柱頭部詳細

(d) R-B面柱頭部詳細



(e) L面全景



(f) F面全景



(g) R面全景



(h) B面全景



(i) B-L面柱脚部詳細



(j) L-F面柱脚部詳細



(k) R-F面柱脚部詳細



(l) R-B面柱脚部詳細

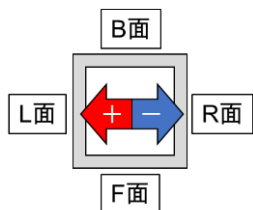


写真 2.1-14 試験体の最終状況[L11-6C-RL]
 (幅厚比 11.67, 径高さ比 12.0, 軸力比 0.6, 振幅 1/50)

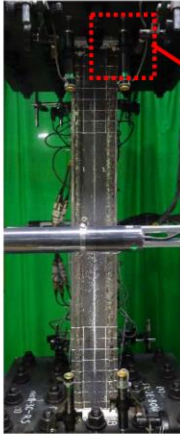




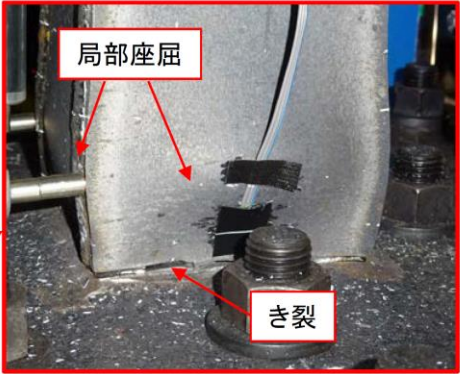
①荷重低下要因:き裂進展	
<p><u>M08-3C-RS</u></p> <p>径高さ比:8.0 幅厚比 :8.75 軸力比 :0.3 振幅 :1/50</p>	  <p style="text-align: right;">座屈高さ:最大2.4mm</p>
②荷重低下要因:局部座屈	
<p><u>M11-6C-RL</u></p> <p>径高さ比:8.0 幅厚比 :11.67 軸力比 :0.6 振幅 :1/50</p>	  <p style="text-align: right;">座屈高さ:最大23mm</p>
③荷重低下要因:き裂進展+局部座屈	
<p><u>S11-6C-RL</u></p> <p>径高さ比:5.0 幅厚比 :11.67 軸力比 :0.6 振幅 :1/50</p>	  <p style="text-align: right;">座屈高さ:最大8.5mm</p>

写真 2.1-15 代表的な荷重低下要因

(2) 荷重変形特性

各試験体の荷重・変形関係を図 2.1-15 に、荷重・軸縮み関係を図 2.1-16 に示す。荷重・変形関係の縦軸は柱せん断力 Q を、横軸は柱部材角 R である。また、荷重・軸縮み関係の縦軸は柱の軸縮み変形を柱高さで除した軸縮み ϵ_v で、横軸は柱せん断力 Q である。図 2.1-14 および図 2.1-15 では、荷重低下時の状況が分かるように、最大荷重 (Q_{max} 時) から荷重が 5%低下 ($0.95Q_{max}$ 時)、10%低下 ($0.90Q_{max}$ 時)、15%低下 ($0.85Q_{max}$ 時)、20%低下 ($0.80Q_{max}$ 時)、30%低下 ($0.70Q_{max}$ 時) した際の $Q-R$ および ϵ_v-R 関係を青色で示した。なお、M08-6C-RL では急激に荷重が低下したため、最終付近の 5 および 6 サイクルのみを青色で示した。

1) 荷重・変形関係 (図 2.1-15)

全ての試験体で、1 サイクル目に於ける柱頭・柱脚での曲げ降伏に伴い剛性が低下し、その後の載荷では鋼材のひずみ硬化により荷重が増加して、最大荷重に到達している。最大荷重以降では、荷重低下要因が①柱頭・柱脚部の局部座屈、②溶接部のき裂進展、③①と②の併発の 3 種類となり、荷重低下が顕著となると、ループ形状が紡錘形から平行四辺形に推移した。荷重低下要因を試験体毎にまとめると次のようになる (表 2.1-9 を参照)。

【①：柱頭・柱脚部の局部座屈】

○幅厚比：11.67、径高さ比：8.0～12.0、軸力比：0.6

(試験体名称) M11-6C-RL、M11-6C-RS、L11-6C-RL

【②：溶接部のき裂進展】

○幅厚比：8.75、径高さ比：8.0、軸力比：0.3～0.6

(試験体名称) M08-3C-RL、M08-3C-RS、M08-6C-RL、M08-6C-RS

○幅厚比：11.67、径高さ比：8.0、軸力比：0.3

(試験体名称) M11-3C-RL、M11-3C-RS

【③：①と②の併発】

○幅厚比：11.67、径高さ比：5.0、軸力比：0.6

(試験体名称) S11-6C-RL、S11-6C-RS

2) 荷重・軸縮み関係 (図 2.1-16)

荷重・軸縮み関係では、前述の荷重低下要因により異なる性状を示す。①柱頭・柱脚部の局部座屈では、最大荷重以降も軸縮み量が増加して終局となるが、②溶接部のき裂進展では、最大荷重近傍までは軸縮み量が増加するが、それ以降はき裂が進展するため、軸縮み量の増加は止まる傾向にある。また、③の併発する場合には①と同様な傾向にある。

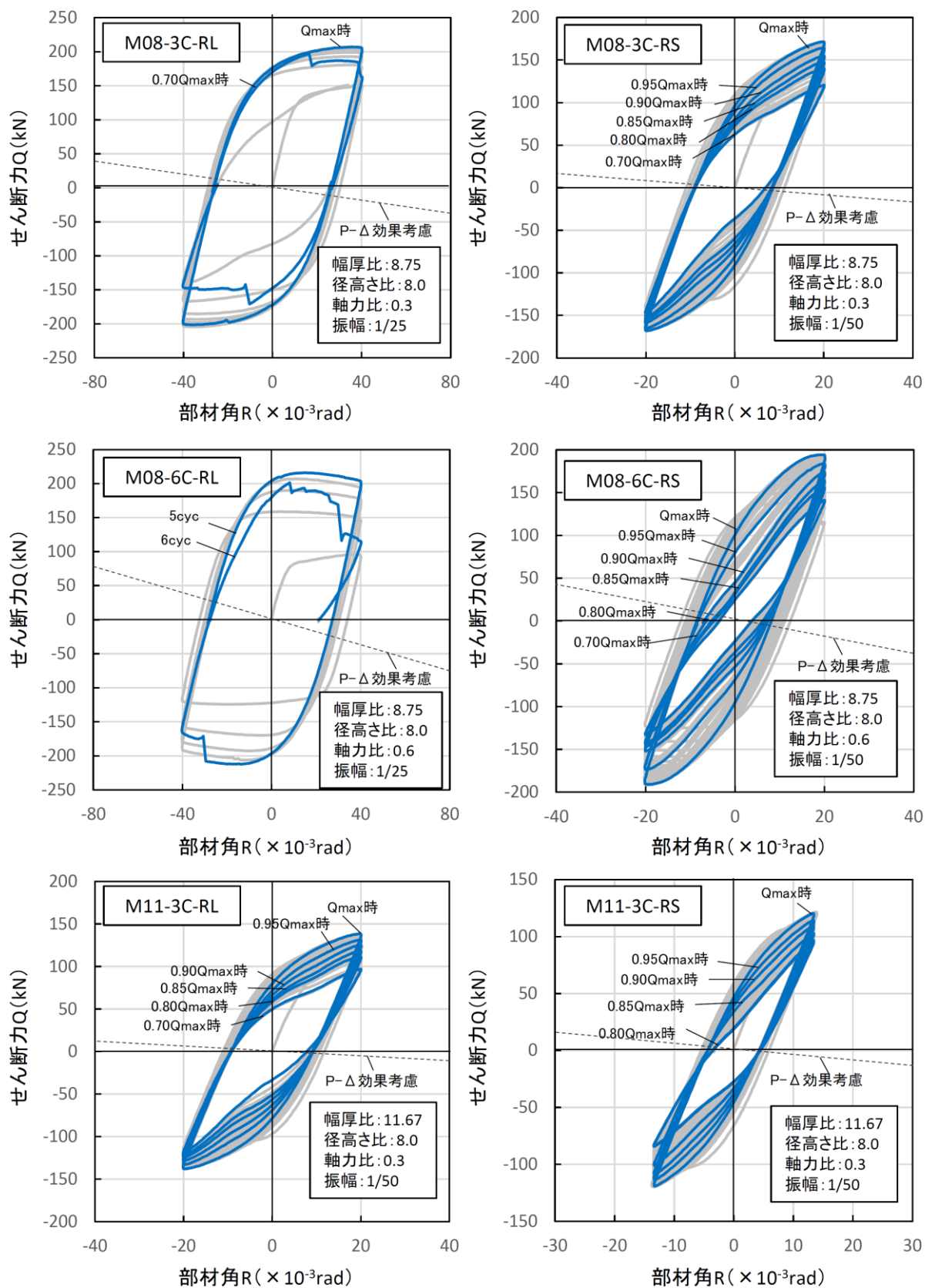


図 2.1-15(a) 荷重・変形関係

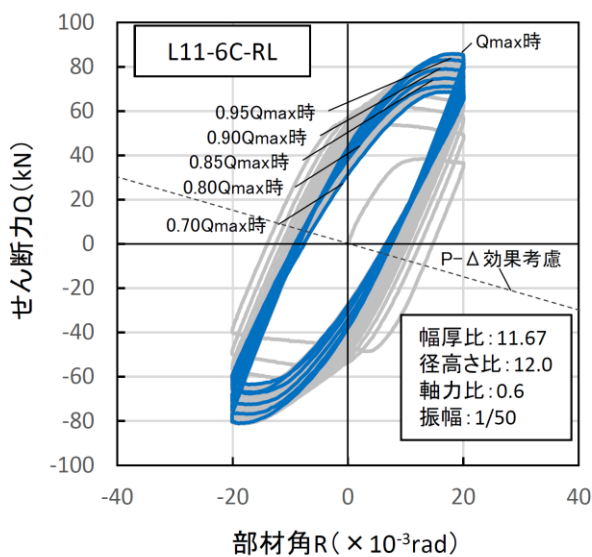
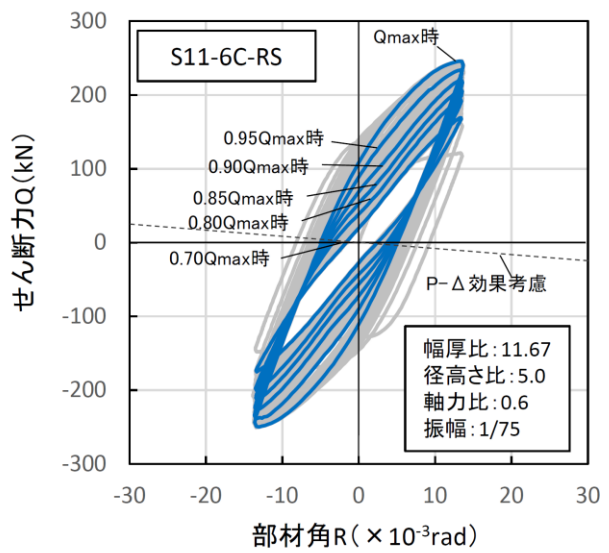
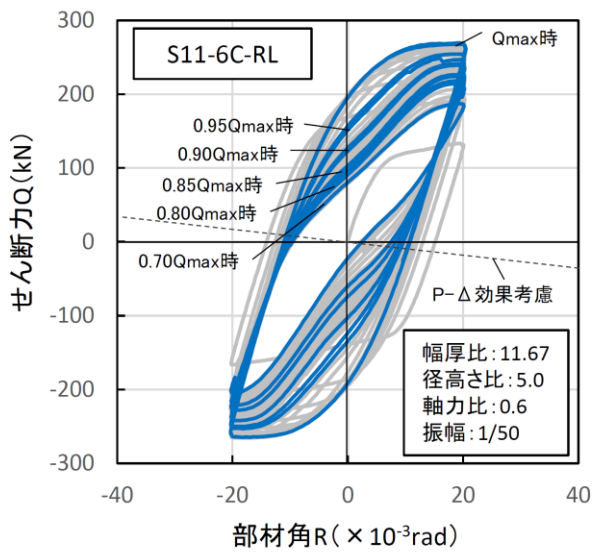
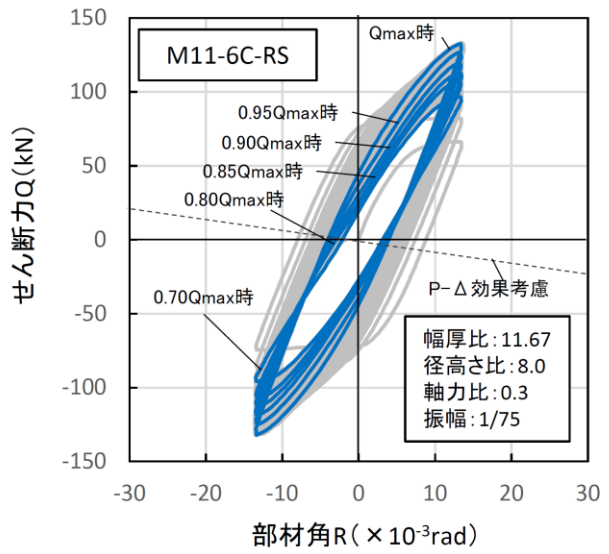
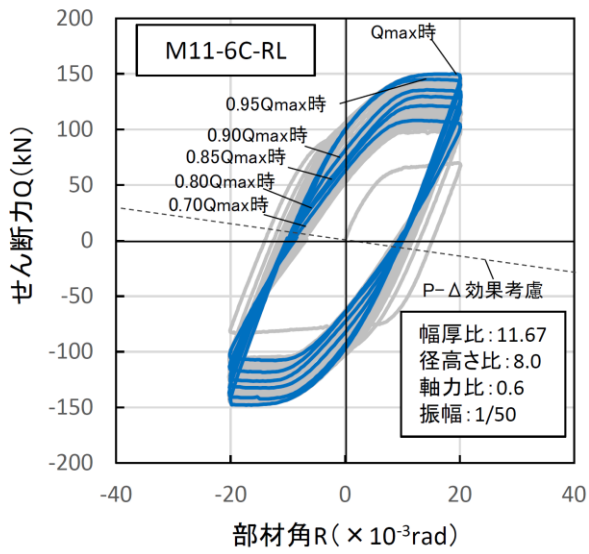


図 2.1-15(b) 荷重・変形関係

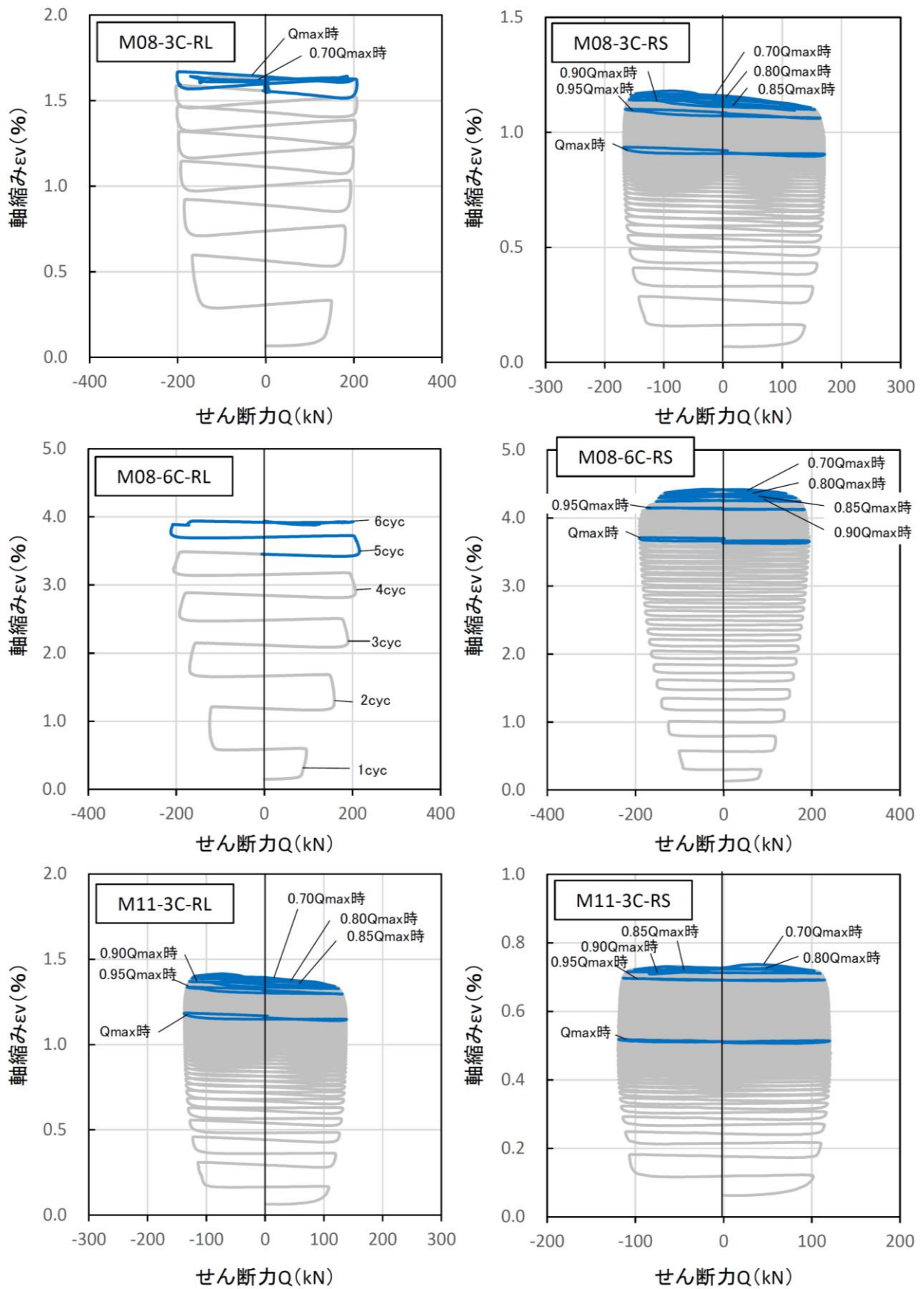


图 2.1-16(a) 荷重・軸縮み関係

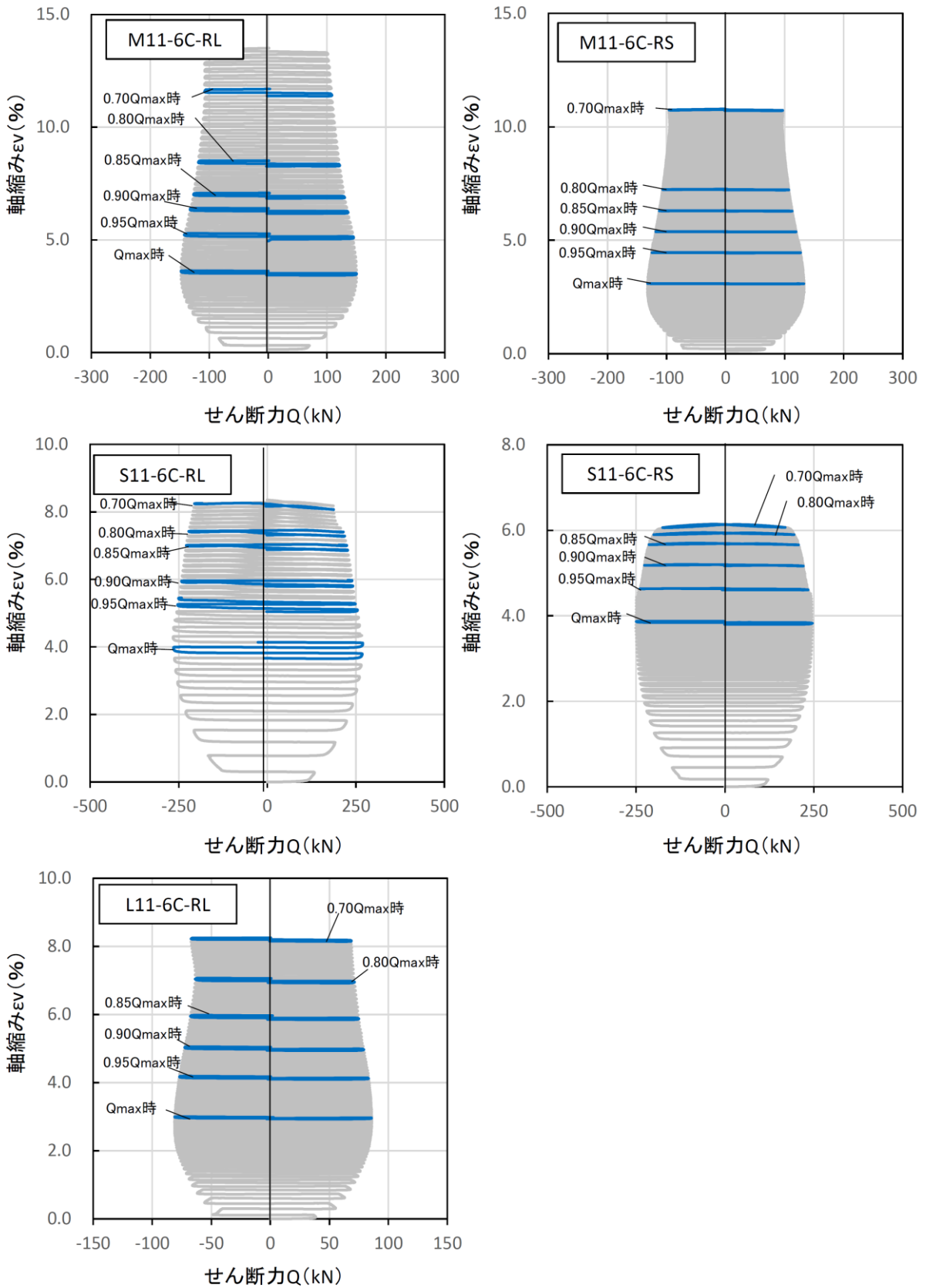


図 2.1-16(b) 荷重・軸縮み関係

(3) 多数回繰り返し特性

各サイクルピークでの荷重（以下、ピーク荷重）の推移を図 2.1-17 に、ピーク荷重での軸縮みおよび座屈波高さの推移を図 2.1-18～19 に示す。平成 30 年度の実験で得られた変位振幅と繰り返し数 $N_{90\%}$ の関係を表 2.1-10 および図 2.1-20 に示す。また、既往実験と平成 30 年度の実験結果での繰り返し数 $N_{90\%}$ の比較を図 2.1-21 に示す。また、図中には荷重低下の主要因（き裂進展、局部座屈、き裂・座屈併発）を併記した。なお、L11-6C-RL 試験体では、柱頭・柱脚の局部座屈が進展した後に全体座屈的なモードに変化したが、荷重低下の主要因は局部座屈であると考えられるため、「局部座屈（全体座屈）」と記した。

1) 各サイクルピークでの荷重の推移（図 2.1-17）

荷重低下の要因がき裂進展となる試験体では、大振幅（ $R=1/25$ ）の試験体を除き、最大荷重以降は一定の傾きで荷重が低下し、90～85%に荷重が低下する付近からき裂進展が大きくなり、荷重の低下割合が増加する傾向にある。また、大振幅（ $R=1/25$ ）の試験体では最大荷重以降にき裂進展が大きくなり、急激に荷重が低下している。

荷重低下の要因が局部座屈となる試験体では、最大荷重以降は一定の傾きで荷重が低下する傾向にある。

荷重低下の要因がき裂進展と局部座屈が併発している試験体（S 試験体： $L=525\text{mm}$ ）では、最大荷重以降から 90%に荷重が低下するまで、き裂進展による荷重低下への影響が大きい。それ以降では局部座屈が荷重低下の主要因となり一定の傾きで荷重が低下する。80%に荷重が低下すると再びき裂進展による影響が大きくなる傾向にある。

2) 各サイクルピークでの軸縮みおよび座屈波高さの推移（図 2.1-18、図 2.1-19）

軸縮みに関しては、荷重低下の主要因がき裂進展となる試験体では、最大荷重以降にほぼ一定となり、軸縮みが進まない傾向にある。荷重低下の主要因が局部座屈となる試験体（L11-6C-RL 試験体も含む）では、最大荷重以降も一定の勾配で軸縮みが大きくなり、荷重が 80%低下以降で勾配が更に大きくなる傾向にある。

座屈波高さに関しては、計測時のばらつきはあるが、軸縮みと同様な傾向にあり、荷重低下の主要因がき裂進展となる試験体では、最大荷重以降に座屈波高さの増加は小さくなり、一定となり、座屈波高さが増長しない傾向にある。また、荷重低下の主要因が局部座屈となる試験体では、最大荷重以降も座屈波高さが大きくなる傾向にある。

以上より、軸縮みと座屈波高さは連動しており、軸縮みの進展は局部座屈の進展による影響が大きいことがわかる。

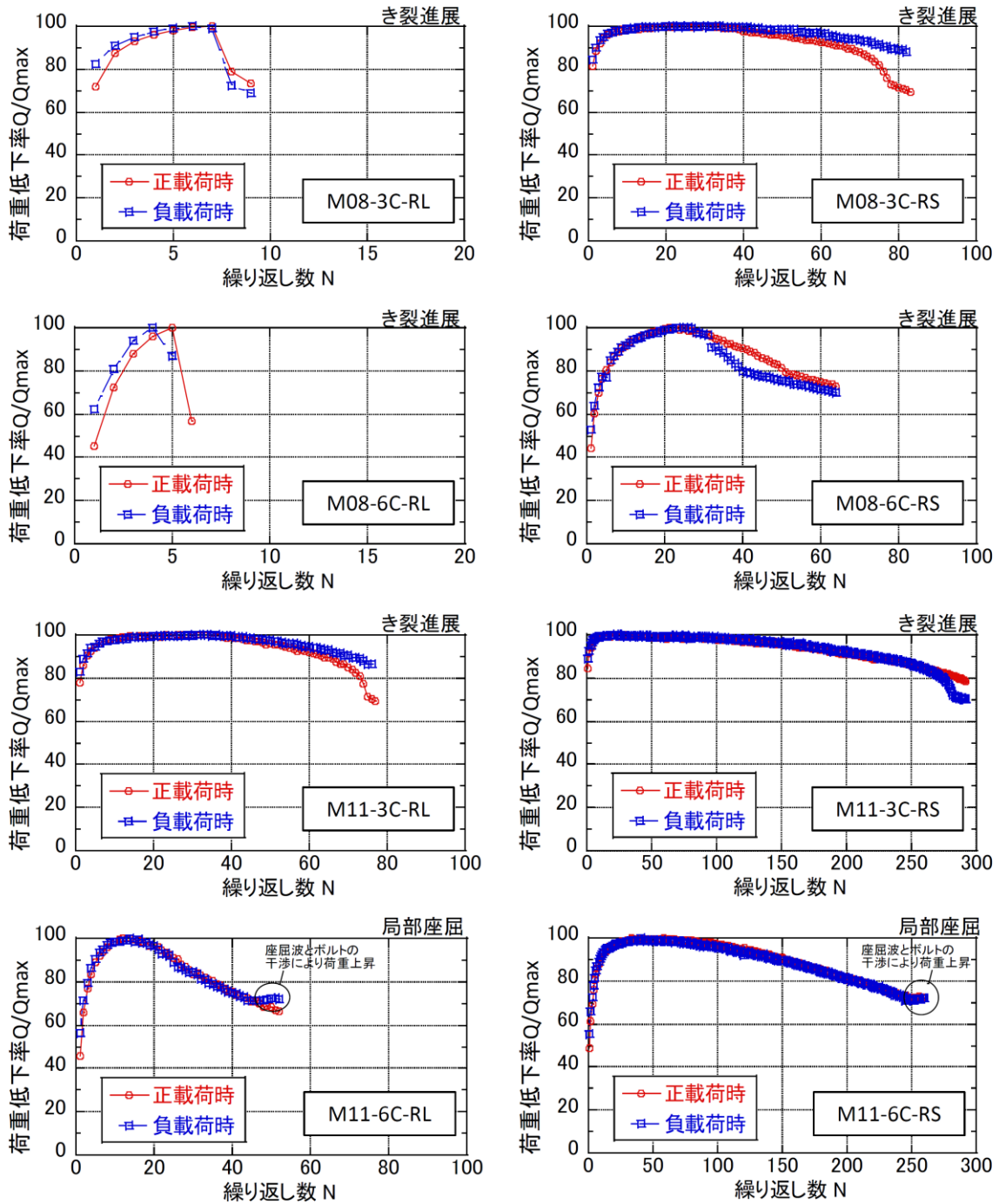


図 2.1-17(a) 各サイクルピークでの荷重の推移

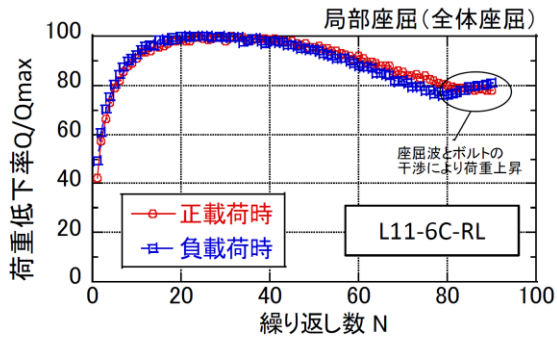
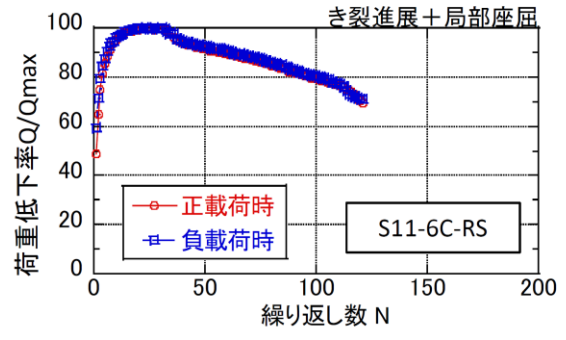
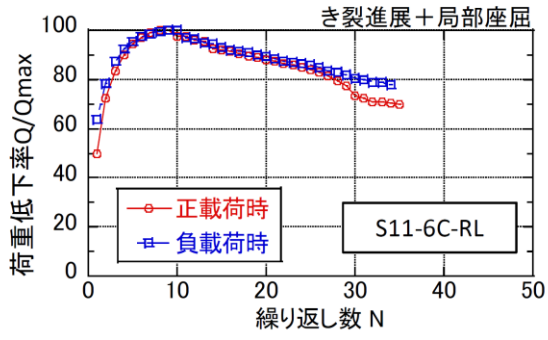


図 2.1-17(b) 各サイクルピークでの荷重の推移

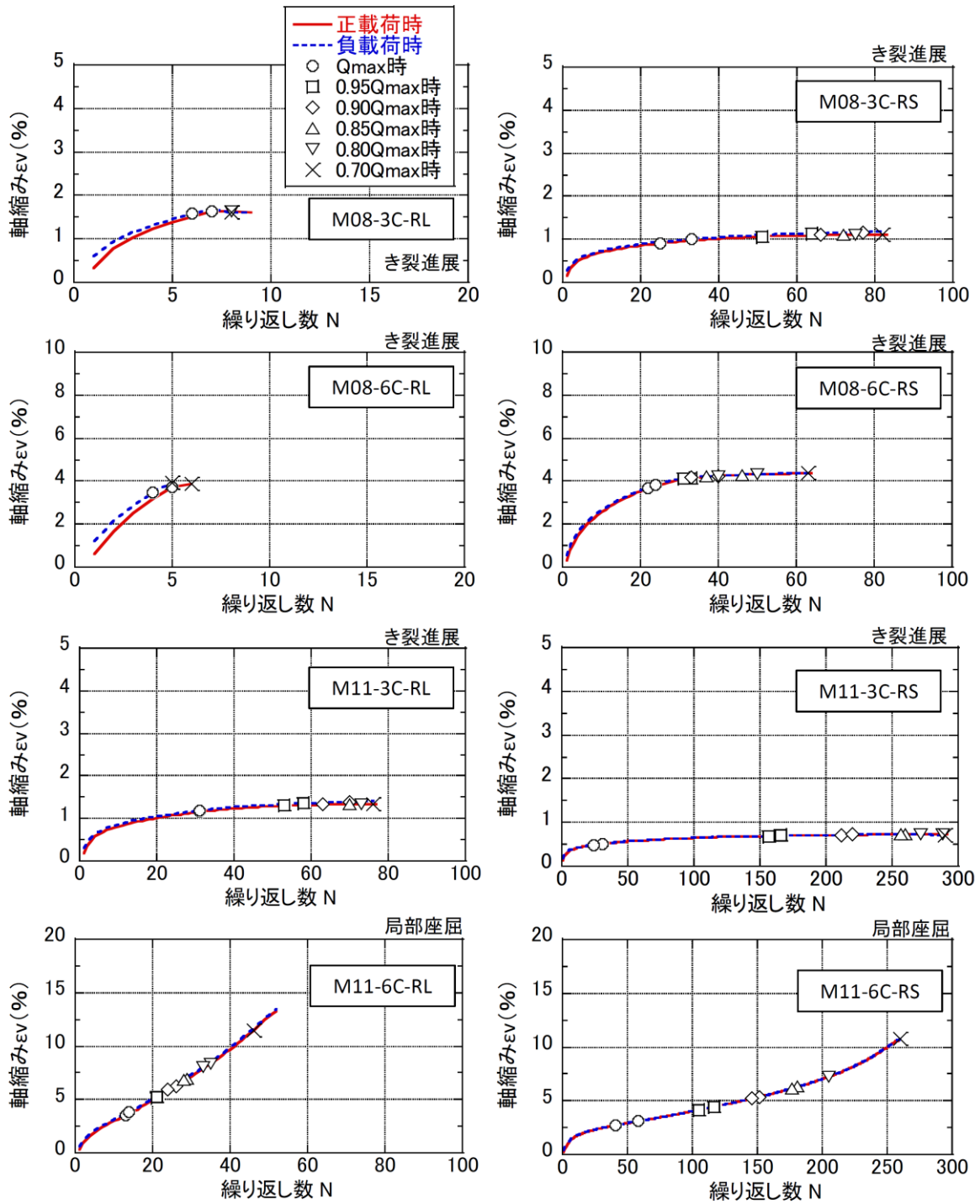


図 2.1-18(a) 各サイクルピークでの軸縮みの推移

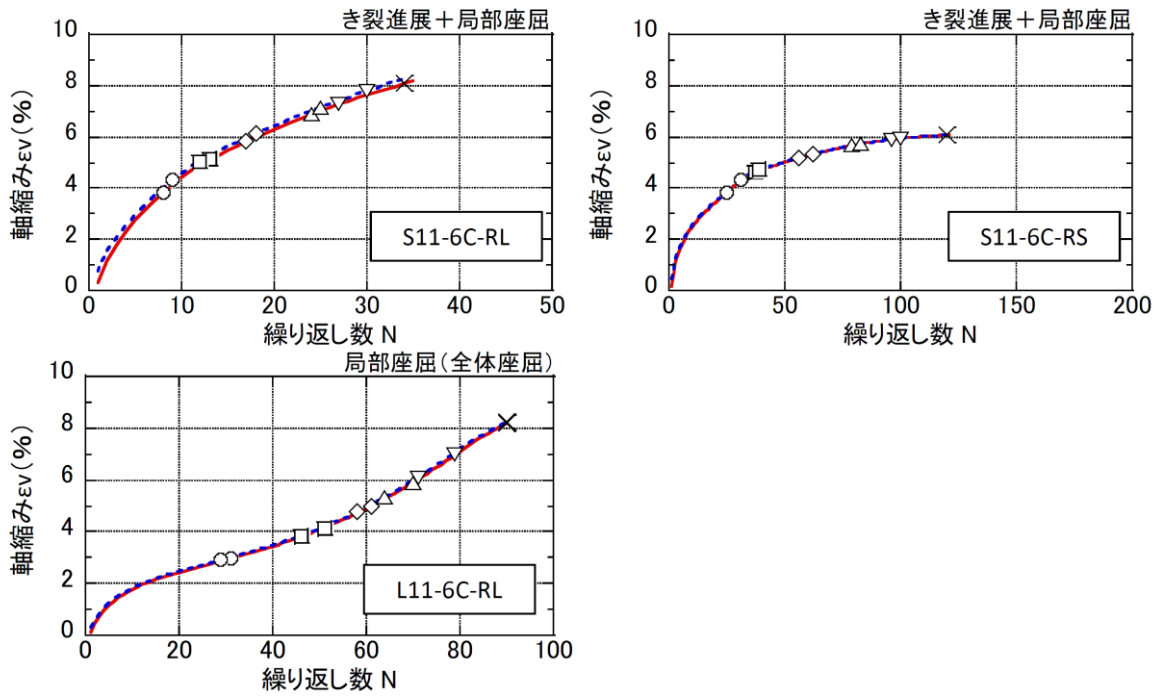


図 2.1-18(b) 各サイクルピークでの軸縮みの推移

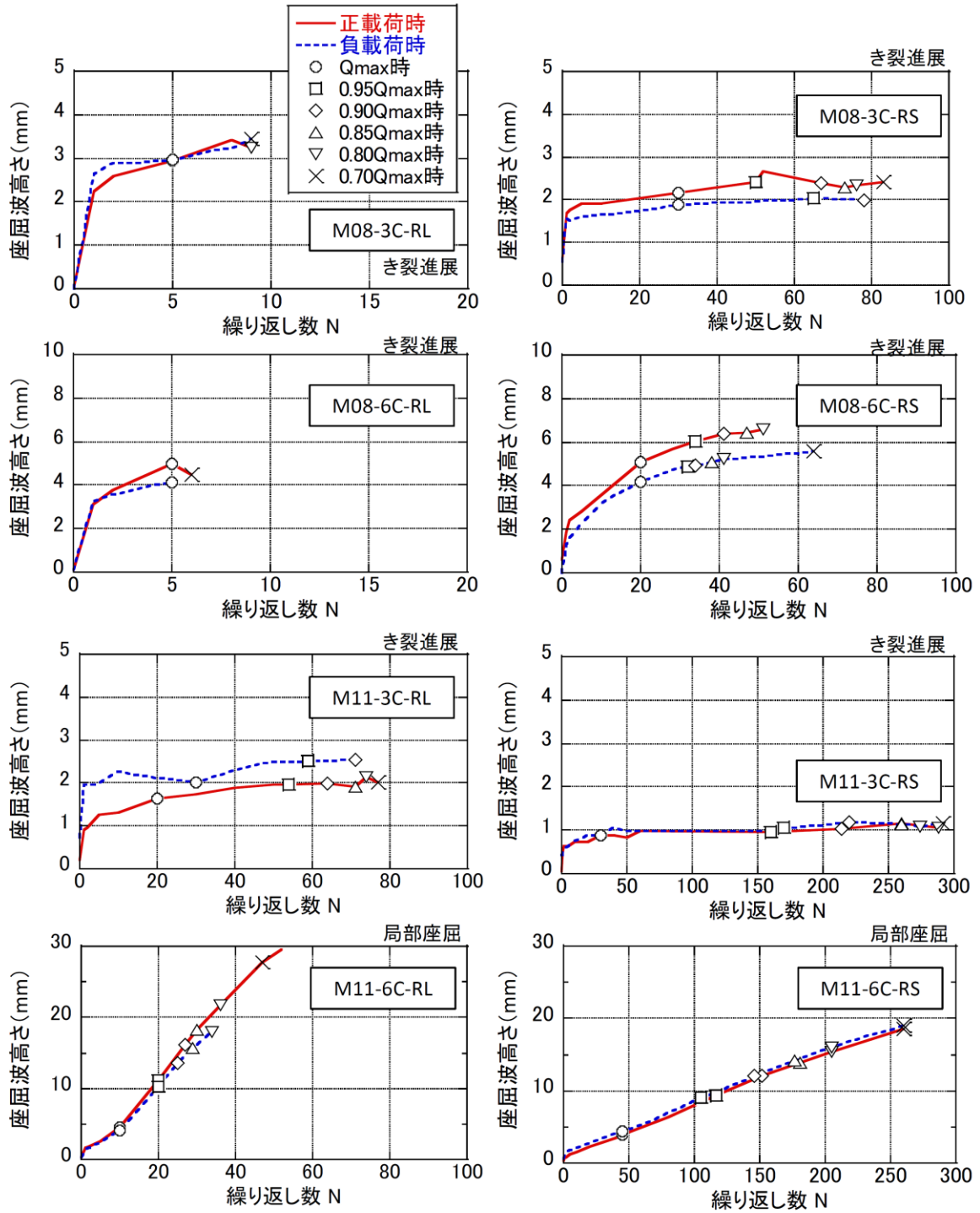


図 2.1-19(a) 各サイクルピークでの座屈波高さの推移

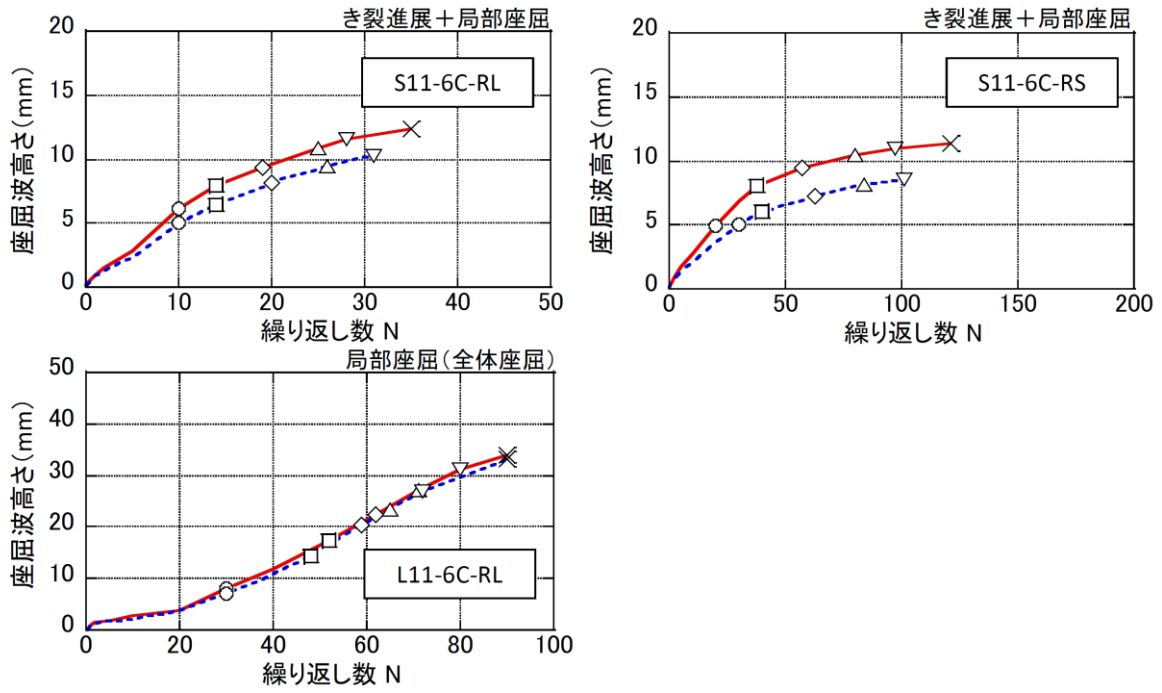


図 2.1-19(b) 各サイクルピークでの座屈波高さの推移

3) 変位振幅と繰り返し数の関係 (表 2.1-10、図 2.1-20～2.1-21)

【軸力比の影響】

軸力比のみ異なる試験体での繰り返し数を比較すると、軸力比が大きくなると繰り返し数は減少する傾向にある。これは、図 2.1-3 (a) で示した傾向と同じである。

【幅厚比の影響】

表 2.1-10 および図 2.1-20(a)を見ると、径高さ比が $L/D=8.0$ の試験体では、同じ振幅 ($R=1/50$) で比較すると、軸力比 0.3 の場合には幅厚比 D/t が小 (8.75) と大 (11.67) で異なっても、ほぼ同じ繰り返し数となる。しかし、軸力比 0.6 の場合には幅厚比 D/t が小さな方 (8.75) が大きな方 (11.67) よりも繰り返し数がやや大きくなる。これは、荷重低下の主要因が異なることが影響していると考えられる。すなわち、軸力比 0.3 の場合には幅厚比に関わらず、荷重低下の主要因はき裂進展であり、軸力比 0.6 の場合には幅厚比小ではき裂進展、幅厚比大では局部座屈となっているためである。

上記と関連して、図 2.1-20(a)より、繰り返し数 $N_{90\%}$ に着目すると、径高さ比が $L/D=8.0$ の軸力比 0.3 の場合には幅厚比は異なっているが、4 体の試験体 (M08-3C-RL、M08-3C-RS、M11-3C-RL、M11-3C-RS) ではき裂進展が荷重低下の主要因となっているため、1 つの性能曲線 (性能曲線の上限) を表現していると考えられる。

また、既往知見では荷重低下の要因が局部座屈で同じ場合には、図 2.1-5 のように幅厚比の小さい方の繰り返し数が大きくなることが示されているが、上記は異なる荷重低下要因での関係であり、新たな知見である。

【径高さ比の影響】

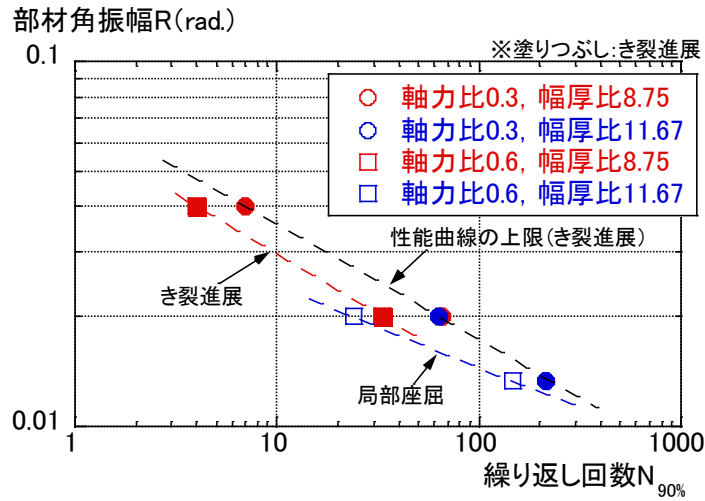
表 2.1-10 および図 2.1-20(b)を見ると、径高さ比 L/D が小さくなると、変形能力が低下する傾向にある。これは、図 2.1-6 で示した傾向と同じである。ただし、図 2.1-6 では荷重低下の主要因が局部座屈であるため、径高さ比の異なる試験体で性能曲線が両対数軸上での傾きはほぼ同じであったが、図 2.1-20(b)では荷重低下の主要因が異なることもあり、傾きは異なっている。また、径高さ比が小 (5.0) と中 (8.0) での軸力比 0.6 では、荷重低下の主要因が異なり、径高さ比が小さな方 (5.0) がき裂進展の影響が大きくなっている。

径高さ比 5.0 と 8.0 との $N_{90\%}$ の比は、部材角振幅 $R=1/50$ で約 0.7、 $R=1/75$ で約 0.4 となっており、既往知見 (図 2.1-6) での径高さ比 6.1 と 9.1 の比、約 0.8 よりも小さくなっている。また、部材角振幅 $R=1/50$ で約 0.7、 $R=1/75$ で約 0.4 と比が異なっているのは、 $R=1/75$ の方が $1/50$ よりもき裂進展の影響が大きかったためであると考えられる。

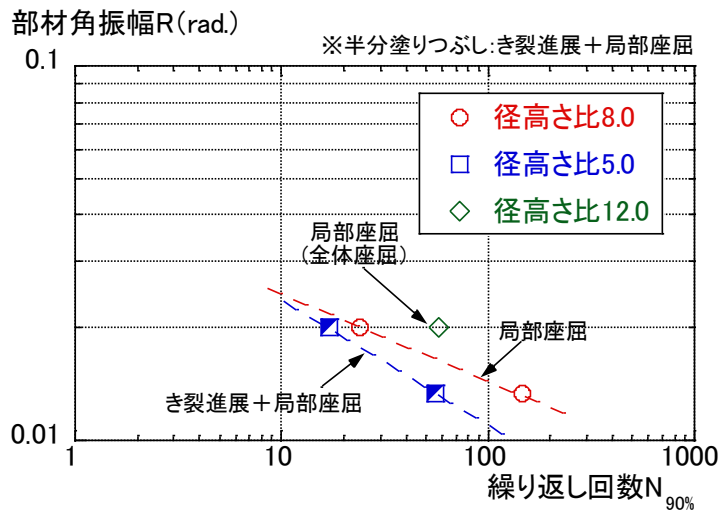
表 2.1-10 実験結果の繰返し数

試験体	幅厚比 D/t	径高さ比 L/D	軸力比 n	部材角 振幅R		実験結果(繰返し数)				
						N _{95%}	N _{90%}	N _{85%}	N _{80%}	N _{70%}
1 M08-3C-RL	8.75 (t=12mm)	8.0	0.3	1/25	0.040	7	7	7	7	8
2 M08-3C-RS				1/50	0.020	51	66	72	75	82
3 M08-6C-RL			0.6	1/25	0.040	4	4	5	5	5
4 M08-6C-RS				1/50	0.020	31	33	37	40	63
5 M11-3C-RL	11.67 (t=9mm)	8.0	0.3	1/50	0.020	53	63	70	73	76
6 M11-3C-RS				1/75	0.013	157	212	257	272	290
7 M11-6C-RL			0.6	1/50	0.020	21	24	28	33	46
8 M11-6C-RS				1/75	0.013	105	146	177	205	(254)
9 S11-6C-RL		5.0	0.6	1/50	0.020	12	17	24	27	34
10 S11-6C-RS				1/75	0.013	37	56	79	96	120
11 L11-6C-RL				12.0	1/50	0.020	46	58	64	71

*1:()は最終的に最大荷重の70%まで荷重低下しなかったため、80%低下以降のデータから外挿して70%低下時を近似した値。



(a) 軸力比 n · 幅厚比 D/t の影響 (L/D=8.0)



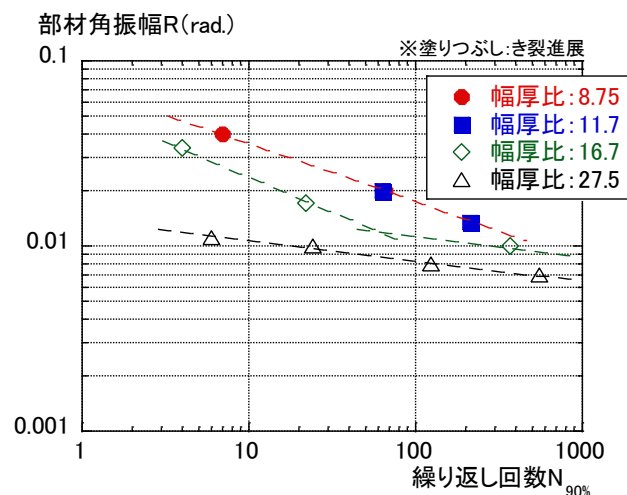
(b) 径高さ比 L/D の影響 (D/t=11.67, n=0.6)

図 2.1-20 変位振幅と繰返し数の関係 (N_{90%})

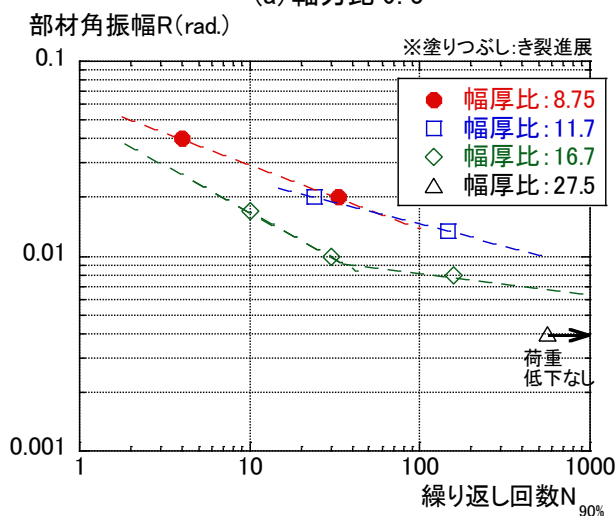
図 2.1-21 に既往知見^{2.1-1) ~2.1-3)}の実験結果(幅厚比 16.7、27.5)と平成 30 年度の実験結果(幅厚比 8.75、11.7)を繰返し数 $N_{90\%}$ について示す。図に示す径高さ比は、幅厚比 8.75、11.7 および 16.7 では $L/D=8.0$ 、幅厚比 27.5 では $L/D=9.1$ であるが、径高さ比 L/D の繰返し数に与える影響は小さいとして図 2.1-5 と同様に図 2.1-21 に併記する。

軸力比 0.3 では図 2.1-21 (a) より、幅厚比 8.75 および 11.7 のき裂進展により決定づけられる性能曲線を上限とし、幅厚比 27.5 の局部座屈進展により決定づけられる性能曲線を下限とする領域に中間の幅厚比の場合(例えば、幅厚比 16.7)が位置していることがわかる。また、軸力比 0.6 では図 2.1-21 (b) より、幅厚比 8.75 のき裂進展により決定づけられる性能曲線と幅厚比 11.7 の局部座屈進展により決定づけられる性能曲線が近い位置で、ほぼ上限となっており、幅厚比 16.7 や 27.5 よりも大きくなっている。なお、幅厚比 27.5 の試験体は 1 体のみで、563 回繰返しした後荷重低下は見られていないが、軸力比 0.3 と同様に局部座屈進展の性能曲線による下限となっていると予想される。

以上より、軸力比および径高さ比にも依存するが、最小幅厚比(幅厚比 8.75 または 11.7)の性能曲線を上限とし、最大幅厚比(幅厚比 27.5 : FA ランクぎりぎりの値)の性能曲線を下限とするように構成されると考えられる。



(a) 軸力比 0.3



(b) 軸力比 0.6

図 2.1-21 変位振幅と繰返し回数との関係(既往実験との比較 : $N_{90\%}$)

(4) その他

材軸方向の曲率分布を図 2.1-22 に示す。図は正載荷時の曲率分布で、曲げ降伏時、+1 サイクルピーク時および最大荷重 Q_{max} 時を示す。なお、柱頭・柱脚部の軸縮みが大きく曲率計測用の変位計が計測限界に到達した場合には、変位計を取り外し、該当区間の計測を終了している。

図 2.1-22 より、曲率分布の反曲点位置は、おおよそ試験体高さの中央に位置していることがわかる。また、 $L/D=12.0$ の試験体 (L11-6C-RL) では、反曲点は最大荷重 Q_{max} 時に於いても試験体高さの中央に位置しているが、柱脚部の曲率は反転している。これは、柱脚部の塑性化（局部座屈）が進展しているため、残留変形が次の逆方向の载荷で戻らないためであると考えられる。この蓄積が影響し、変形モードが全体座屈的なモードに変化していくと考えられる。

次に、塑性化領域についての検討を行う。+1 サイクルピーク時 ($L/D=5.0$ の試験体のみ曲げ降伏時) の曲率データから直線回帰した曲率線（赤点線）を求め、柱頭・柱脚部の塑性化領域を全長の比で算出すると（図 2.1-22 の赤文字で示す数値）、 $L/D=8.0$ の試験体の塑性化領域は、32%（8 体の平均値）、 $L/D=5.0$ では 20%（2 体の平均値）、 $L/D=12.0$ では 31%（1 体の上下平均値）であり、 L/D が大きくなるにつれ塑性化領域が広がり、最大 30%程度となっていることがわかる。 $L/D=5.0$ の試験体では上記の塑性化領域が、 $L/D=8.0$ の試験体よりも狭いことより、き裂進展の影響が表れて、き裂進展と局部座屈が荷重低下の主要因となったと考えられる。

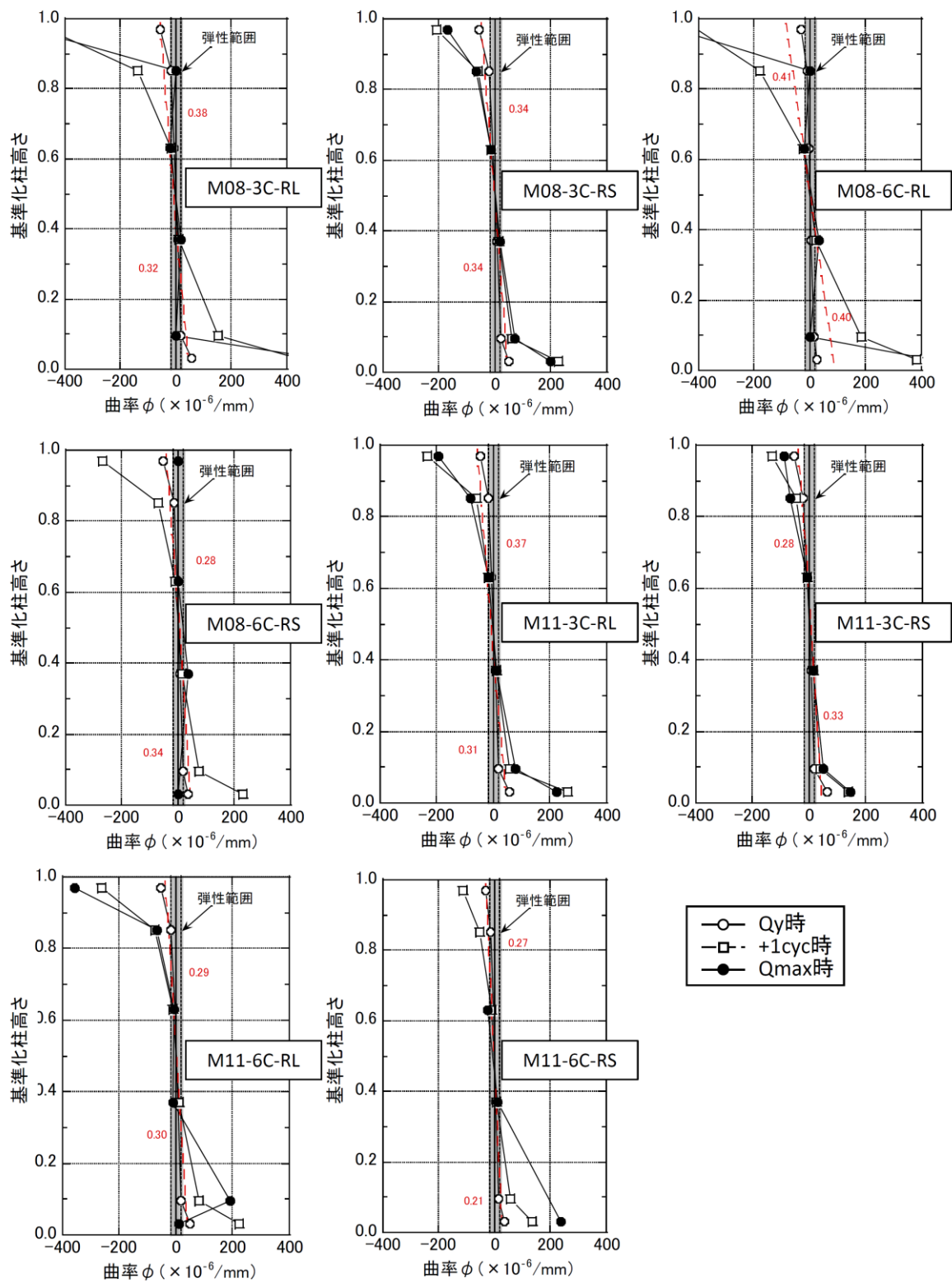


図 2.1-22(a) 材軸方向の曲率分布 (L/D=8.0)

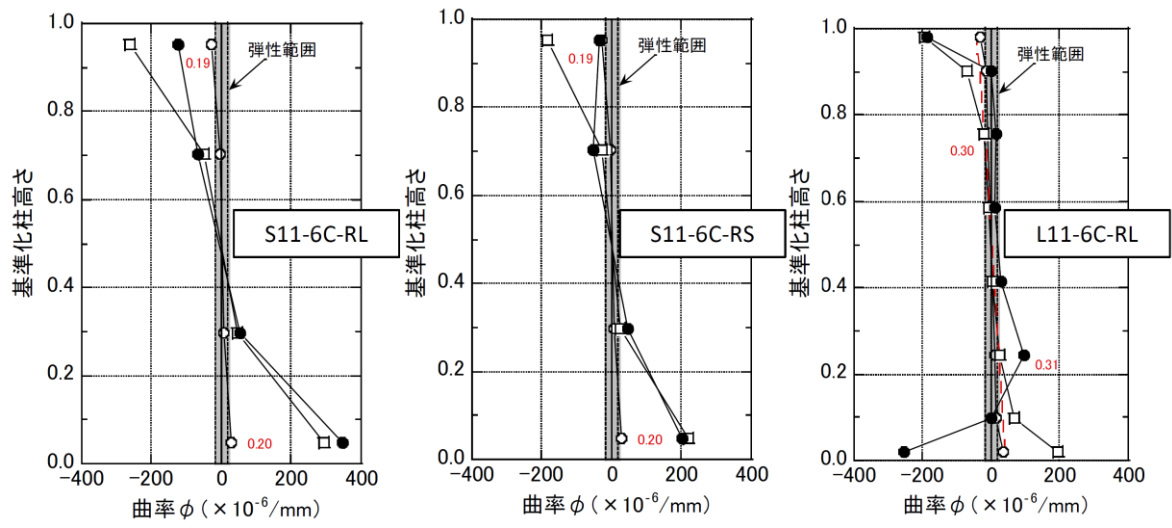


図 2.1-22(b) 材軸方向の曲率分布 (L/D=5.0, 12.0)

2.1.5 まとめと今後の課題

鉄骨柱部材に対する設計用疲労曲線式を提案することを目的として、既往知見（既存超高層、既往実験）の調査結果を反映した実験パラメータ（幅厚比、径高さ比、軸力比および変位振幅）を設定して、鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を実施した。平成30年度の調査および実験にて得られた知見を以下に示す。

(1) まとめ

【既往知見の調査】

1) 1960年代から1990年代に建設された鉄骨超高層建物について、柱諸元（幅厚比、径高さ比等）の実態調査を行った結果、最下層の柱について、以下の点がわかった。

- ・幅厚比はFAランクであり、10前後に多く分布している。
- ・径高さ比は5～8程度に多く分布し、最大で12程度である。

2) 柱部材を用いた多数回繰り返し実験（一定振幅、軸力（一定、変動））について、調査を行った結果、既往実験では幅厚比：16.7～27.5程度、径高さ比：8.0～9.1程度、軸力比：0.3～0.6を中心に実験が実施されていることがわかった。

以上の調査結果より、実験パラメータとして、幅厚比を8.75と11.67（FAランク）の2水準、径高さ比5.0、8.0、12.0の3水準（8.0を中心）、軸力比を0.3と0.6の2水準を選定して、変位振幅（部材角振幅）を2水準とした多数回繰り返し実験を実施した。

【実験結果】

3) 最大荷重以降の荷重低下の主要因としては、①：柱頭・柱脚の局部座屈、②：柱頭・柱脚の溶接熱影響部のき裂進展、③：①と②の併発の3種類があり、軸力比、部材角振幅、幅厚比および径高さ比の関係で主要因が異なる。

4) 軸縮みと局部座屈の進展は関連しており、荷重低下の主要因が局部座屈の場合には、局部座屈の進展とともに軸縮みが大きくなる。また、荷重低下の主要因がき裂進展の場合には、最大荷重以降ではき裂進展が進むため、軸縮みや局部座屈はほとんど進展しなくなる。

5) 軸力比については、既往知見と同様に軸力比が大きくなると同じ部材角での繰り返し数は減少する傾向にある。

6) 幅厚比については、軸力比0.3の場合には幅厚比が小（8.75）と大（11.67）で異なっても、ほぼ同じ繰り返し数となっている。しかし、軸力比0.6の場合には幅厚比が小さな方（8.75）が大きな方（11.67）よりも繰り返し数が大きくなる。これは、荷重低下の主要因が異なることが影響しており、軸力比0.3の場合には幅厚比に関わらず、荷重低下の主要因はき裂進展であり、軸力比0.6の場合には幅厚比小ではき裂進展、幅厚比大では局部座屈となっているためである。

7) 径高さ比については、既往知見と同様に径高さ比が大きくなると同じ部材角での繰り返し数は増加する。また、径高さ比が小（5.0）と中（8.0）での軸力比0.6では、荷重低下の主要因が異なり、径高さ比が小さな方（5.0）がき裂進展の影響が大きくなる。

8) 鉄骨柱部材の性能曲線は荷重低下の主要因が、「き裂進展（最小幅厚比）」を上限とし、「局部座屈（最大幅厚比）」を下限とするように、各部材因子（幅厚比、径高さ比）と外部因子（軸力比）により決定される。なお、最小幅厚比は8.75～11.67、最大は27.5である。

(2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に示す。

1) 一定軸力での多数回繰り返し特性の把握

- ・ 軸力比 0.6 に於ける異なる荷重低下の主要因での性能曲線の把握

平成 30 年度の実験結果では、軸力比 0.3 では幅厚比が小 (8.75) と大 (11.67) で異なっても、荷重低下の主要因がき裂進展で同じであったが、軸力比 0.6 では局部座屈とき裂進展で異なる結果となり、繰り返し数は「き裂進展>局部座屈」であった。上記の試験体は各 2 体と少ないため、各幅厚比に応じて、部材角振幅の異なる実験データを増やすことにより、上記の関係を再度把握することが必要と考えられる。

軸力比 0.6 での考えられる実験パラメータ (案) は以下である。

幅厚比：小 (8.75) → 部材角振幅：1/75 程度

幅厚比：大 (11.67) → 部材角振幅：1/33 程度

- ・ 部材因子 (幅厚比、径高さ比) と外部因子 (軸力比) により決定づけられる性能曲線の評価

平成 30 年度の実験結果および既往実験結果から、鉄骨柱部材の性能曲線は荷重低下の主要因が、「き裂進展 (最小幅厚比)」を上限とし、「局部座屈 (最大幅厚比)」を下限とするように、各部材因子 (幅厚比、径高さ比) と外部因子 (軸力比) により決定されることがわかった。今後は、部材因子と外部因子の組み合わせにより、上限と下限の性能曲線の間での性能曲線をどのように評価するのが課題となる。

2) 変動軸力での多数回繰り返し特性の把握

平成 30 年度の既存超高層の実態調査から設定した幅厚比に対して、変動軸力下での多数回繰り返し実験は存在せず、既存超高層の隅柱に於ける多数回繰り返し特性を把握する上からも実験データを取得することが必要と考えられる。

3) 変動振幅に対する多数回繰り返し特性の把握

建物モデルでの応答解析により部材の多数回繰り返し特性を評価する際には、線形累積損傷則 (Miner 則) を用いる必要がある。既往の梁部材での実験に於いても変動振幅の多数回繰り返し実験を実施し、その精度の確認を実施しており、鉄骨柱部材に関しても実験データを取得することが必要と考えられる。

また、平成 30 年度は「部材角」と「繰り返し数 $N_{90\%}$ 」での整理を主として実施しているが、他の因子「塑性率」「繰り返し数 $N_{85\%}$ or $N_{80\%}$ 」等での整理・検討も必要と考えられる。

【参考文献】

- 2.1-1) 建築研究所：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する資料、建築研究資料 第 160 号、2014. 6
- 2.1-2) 文部科学省、京都大学：都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ② 都市機能の維持・回復のための調査・研究 成果報告書 (H25、27)
- 2.1-3) 澤本佳和、久保田淳、鈴木芳隆：多数回繰り返し荷重下の鉄骨柱部材の変形能力評価に関する考察、日本建築学会学術講演梗概集、2018. 9
- 2.1-4) 八幡製鐵カラム刊行委員会：カラム、No. 54 (1973)、No. 56 (1975)

2.2 設計用疲労曲線と有限要素法を用いた解析可能性の検討 (R1 年度実施)

2.2.1 既往実験結果を考慮した設計用疲労曲線 (案) の検討

(1) 多数回繰り返し特性の検討

ここでは、設計用疲労曲線を提案するに当たって、鉄骨柱部材の基本的な多数回繰り返し特性について検討を行う。

1) 一定軸力と変動軸力での多数回繰り返し特性の関係

平成 30 年度は一定軸力下での溶接組立角形鋼管柱の多数回繰り返し実験を実施しており、令和 1 年度は後述のように既往の実験結果も含め、一定軸力下での多数回繰り返し特性を中心に検討を進めている。また、将来的には一定軸力下での設計用疲労曲線を基にして、変動軸力下の多数回繰り返し性能を評価することになると考えられる。

しかしながら、同じ試験体諸元で一定軸力と変動軸力の両方の実験データが揃っている実験例はほとんどなく、両者の多数回繰り返し特性がどのように関連しているのかは不明である。

ここでは、既往実験データを参考として、一定軸力と変動軸力での多数回繰り返し特性の関連性について検討を行う。

同じ試験体諸元で一定軸力と変動軸力の実験データが揃っているのは、既往の基整促 27-2^{2.2-1)} の場合、文献 2.2-2) の場合の 2 例である。ただし、2.2-2) の変動軸力下での多数回繰り返し実験結果は公開文献には掲載されていない。

基整促 27-2 の場合^{2.2-1)} 幅厚比 27.5、径高さ比 9.1

鹿島・京大の場合^{2.2-2) 2.2-3)} 幅厚比 16.7、径高さ比 8.0

図 2.2-1 に比較可能な一定軸力と変動軸力の実験結果を示す。

図 2.2-1 より、 $R=1/100$ 程度では、基整促 27-2 のように幅厚比の大きな場合には、変動軸力のデータは一定軸力 (長期相当) のデータよりも小さくなり、鹿島・京大のような幅厚比の小さな場合には、変動軸力のデータは一定軸力 (長期相当) のデータとほぼ同じとなる傾向にあると予測される。

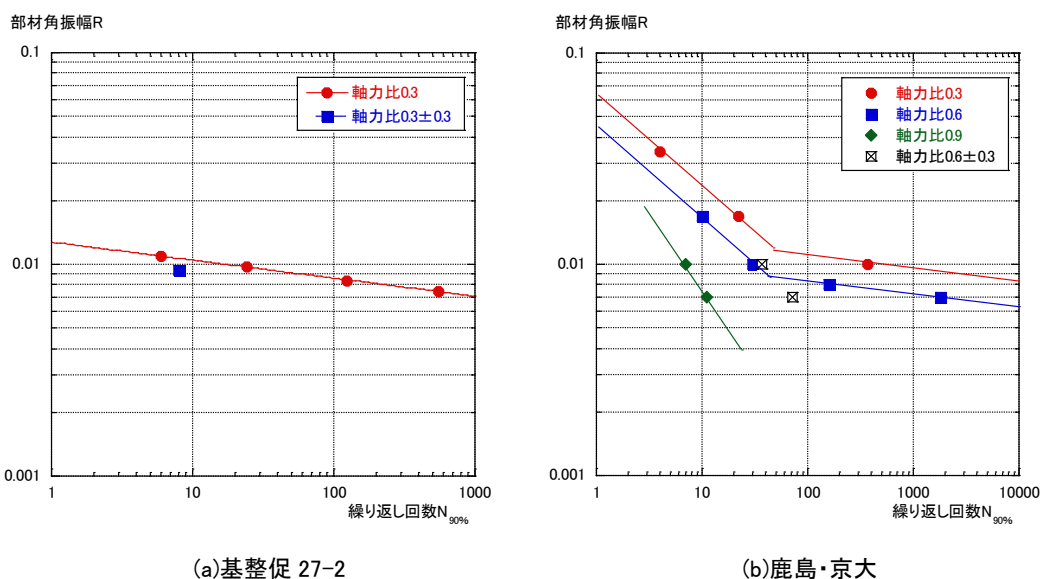


図 2.2-1 一定軸力と変動軸力データの比較

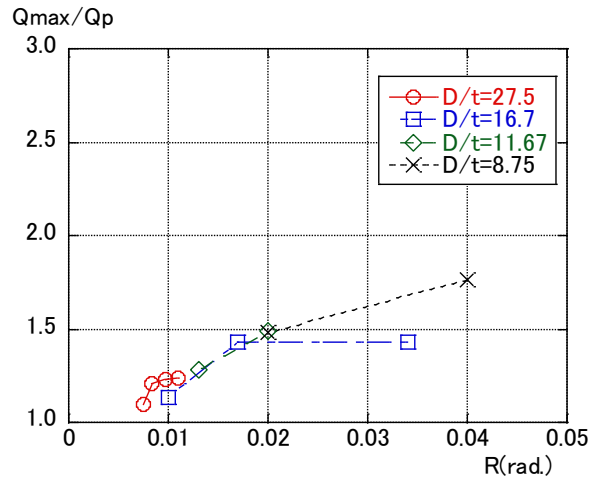
2) 柱部材の耐力上昇

柱部材の多数回繰り返し実験^{2.2-1) ~2.2-3)}では、軸力が大きくなるほど、降伏後のひずみ硬化により耐力上昇が顕著に見られる。径高さ比が 8.0 (9.1) のもので、一定軸力と一定振幅の試験体について、縦軸を Q_{max}/Q_p 、横軸を部材角振幅 R として整理したものを図 2.2-2 に示す。図は軸力比 n が異なる場合ごとについて示す。 Q_p は軸力比 n による全塑性耐力である。

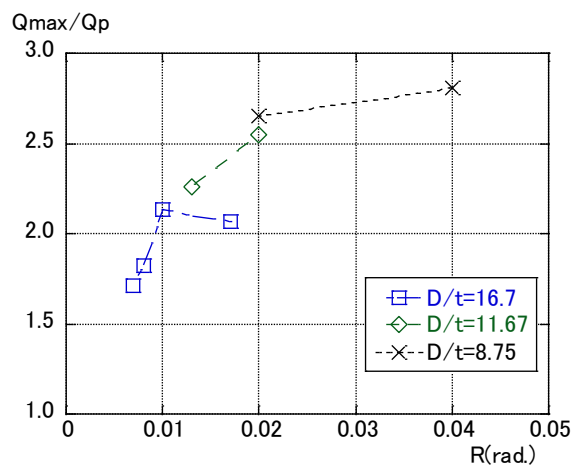
局部座屈発生等により部材角振幅が大きな領域では、幅厚比との関連により耐力増加が頭打ちとなる傾向はあるが、基本的には、部材角振幅が大きくなると Q_{max}/Q_p は大きくなる傾向にあり、軸力比 n が 0.3 の場合には最大 1.8 倍、 $n=0.6$ の場合には最大 2.8 倍、 $n=0.9$ の場合には最大 5.6 倍となっている。

ちなみに、上記の逆数 Q_{max}/Q_p をとると、 $n=0.3$ で 0.57、 $n=0.6$ で 0.36、 $n=0.9$ で 0.18 となり、繰り返しの振幅に依存するが、最大荷重からこのような割合まで下がらないと全塑性耐力を下回らないことになる。

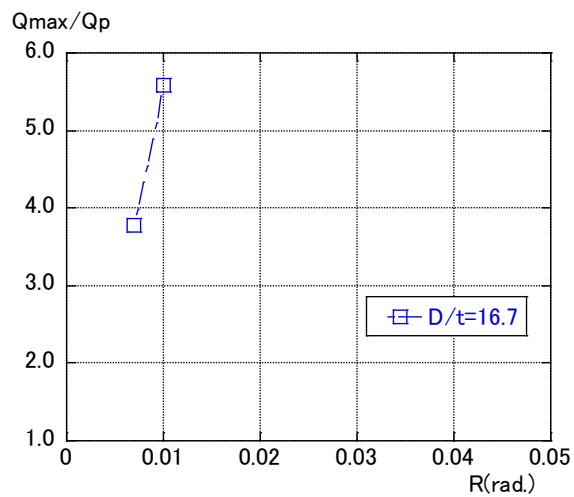
ただし、実験に於いては、最大荷重の 0.7~0.8 倍程度までに荷重低下する領域までしか実施していないため、全塑性耐力保持での繰り返し回数の値は取得されていない。以上のように、多数回繰り返しでのひずみ効果による耐力上昇については、骨組の応答解析等の全塑性耐力からの大きな耐力上昇を評価しない場合に対して余裕量となる。この余裕量の評価を直接することは困難であるため、例えば、繰り返し回数として、最大荷重の 90% となるまでの繰り返し回数 $N_{90\%}$ を基本とし、 $N_{80\%}$ や $N_{70\%}$ についても別途評価することが考えられる。なお、上記に関しては応答解析時の柱部材の履歴モデルとの関連もあるので、総合的に判断する必要がある。



(a) 軸力比 0.3



(b) 軸力比 0.6



(c) 軸力比 0.9

図 2.2-2 Q_{max}/Q_p - R 関係

(2) 設計用疲労曲線（案）の検討

ここでは、既往の実験結果から応答解析モデル S30 の S 柱部材の性能曲線（設計用疲労曲線）の検討を行うとともに、今後必要なデータについての検討を行う。

1) 応答解析モデル S30 の S 柱部材の性能曲線について

応答解析を行っている S 柱の S30 モデルについて、現状の実験データを用いて性能曲線を与えることができるのかを検討する。

応答解析モデル S30 の代表的な柱（C2, C3）の幅厚比および径高さ比を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 S30 モデルの代表柱 (C2, C3) の幅厚比と径高さ比

	D	t	D/t	L/D
7階	600	28	21.4	5.25
4階	600	32	18.8	5.25
1階	600	40	15.0	8.46

ここで、1階柱に着目すると、 D/t は 15.0 で、 L/D は 8.46である。既往の S 柱実験（鹿島・京大）^{2.2-2) 2.2-3)} との対応を考えると、 $D/t=16.7$ 、 $L/D=8.0$ が 1階柱に近い値となる。

なお、FEM による解析結果を用いて D/t 等に対するデータの補間を行う必要がある。

また、上記の応答解析での軸力比は、入力 OS1（X 方向入力）、地盤 4 の条件で下記のような値となる。ただし、引張軸力はもう少し大きい値となっている。

1階柱脚：長期で 0.3 程度、地震時で 0.3 ± 0.3 程度（max0.6）

4階柱脚：長期で 0.35 程度、地震時で 0.35 ± 0.42 程度（max0.77）

上記の $D/t=16.7$ 、 $L/D=8.0$ の柱部材に関しては、AIJ 大会梗概 2018（文献 2.2-3）に於いて、軸力比 0.3、0.6、0.9 での一定振幅の多数回繰り返し実験（図 2.2-1(b)）が行われており、軸力比 0.3 および 0.6 では性能曲線がモデル化されている。また、変動軸力については、公開文献に掲載されていないが、前述のように軸力比 0.6 ± 0.3 の多数回繰り返し実験（図 2.2-1(b)に☒で表示）が実施されている。

図 2.2-1(b)より、 $R = 1/100$ では変動軸力 0.6 ± 0.3 での繰り返し回数 $N_{90\%}$ は、一定軸力 0.6 での $N_{90\%}$ とほぼ一致している。また、 $R=1/150$ では変動軸力 0.6 ± 0.3 での繰り返し回数 $N_{90\%}$ は、一定軸力 0.6 の $N_{90\%}$ よりもかなり小さな値となっており、必ずしも、長期軸力 0.6 と変動軸力の繰り返し回数 $N_{90\%}$ は一致していない。

ただし、少ない実験結果ではあるが、幅厚比 16.7 付近では領域 1（図 2.2-1(b)の左側）での一定軸力 0.6 の性能曲線を用いれば、変動軸力 0.6 ± 0.3 の性能曲線を安全側に評価できそうなことから、変動軸力 0.6 ± 0.3 の性能曲線については、領域 1 での一定軸力 0.6 の性能曲線を使用することも考えられる。

令和 1 年度の実験結果を用いた案としては下記が考えられる。

【案 1】 1階の隅柱・中柱とも一定軸力 0.6 の性能曲線を用いる。

【案 2】 1階の隅柱は変動軸力 0.6 ± 0.3 の性能曲線を、1階の中柱は一定軸力 0.3 の性能曲線を用いる。

2) 今後必要なデータについて

前述のように、既往の実験データのみでは、設計用疲労曲線の提案には限界がある。現状での主な実験データは、AIJ 大会 2019 の梗概^{2.2-3)}の図(図 2.2-3)に示すことができる。なお、図 2.2-3 のデータは、径高さ比 $L/D=8.0$ (幅厚比 27.5 は $L/D=9.1$) のデータである。

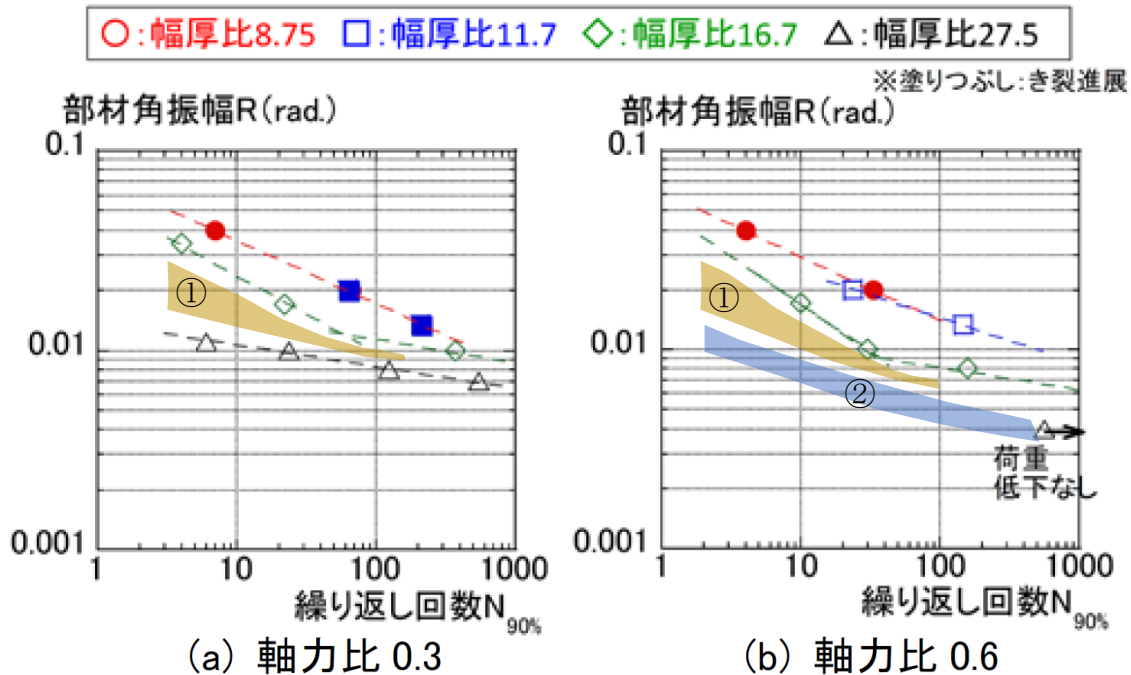


図 2.2-3 平成 30 年度実験と既往実験結果による R- $N_{90\%}$ 関係

この結果から設計用疲労曲線を検討するに当たっては、構造実験または FEM 解析により下記に示すデータを補充する必要があると考えられる。なお、下記の①②は図 2.2-3 の中の番号と関連している。

【今後補充が必要なデータ】

(a) 幅厚比が 20 程度のデータ

既往実験では、幅厚比 8.75、11.7、16.7、27.5 での実験が実施されているが、16.7 と 27.5 の間が離れているため、この間のデータが必要である。

(b) 幅厚比 27.5 での軸力比 0.6 のデータ

基整促 27-2 では、軸力比 0.6 での多数回繰返し実験を実施しているが、1 体のみであり、更に荷重低下をしていないデータのため、局部座屈発生による荷重低下を示すデータが必要である。

(c) 軸力比 0.6 を超えるデータ

平成 30 年度実施した S30 での解析結果でも変動軸力に於いて、軸力比 0.6 を超える場合の結果が確認されている。このため、軸力比 0.6 を超えた場合、例えば 0.7 や 0.8 ではどのような破壊性状か、どの程度変形能力が悪くなるのか等を確認しておく必要がある。

上記の補充が必要なデータを加えて、一定軸力下での設計用疲労曲線（案）を検討する必要がある。設計用疲労曲線（案）は、径高さ比が 8.0 を基本としているため、径高さ比の大きなものおよび小さなものについては、上記提案式に係数を乗じて評価することとなる。また、前述の変動軸力についても一定軸力下での提案式（長期軸力）に、例えば低減係数を乗じることにより評価する必要がある。

提案式の精度については、来年度実施予定の多数回繰り返し実験（変動軸力、変動振幅）に於いて検証を行い、更に、安全率等を検討していく。

2.2.2 有限要素法（FEM）を用いた解析可能性の検討

(1) 検討の概要

柱部材の性能曲線を評価するためには、前述のように図 2.2-4 に示す領域①②を含め、データが不足している。ここでは、平成 30 年度の報告書に記載があるき裂進展と局部座屈が併発した状態での解析可能性の検討、および領域①②のデータの補充を目的として、有限要素法（FEM）を用いて平成 30 年度実施した柱部材実験のシミュレーションを行い、FEM による解析可能性についての検討を行う。また、上記の解析可能性の検討ができた段階で、領域①②に関するパラメータスタディを実施する。

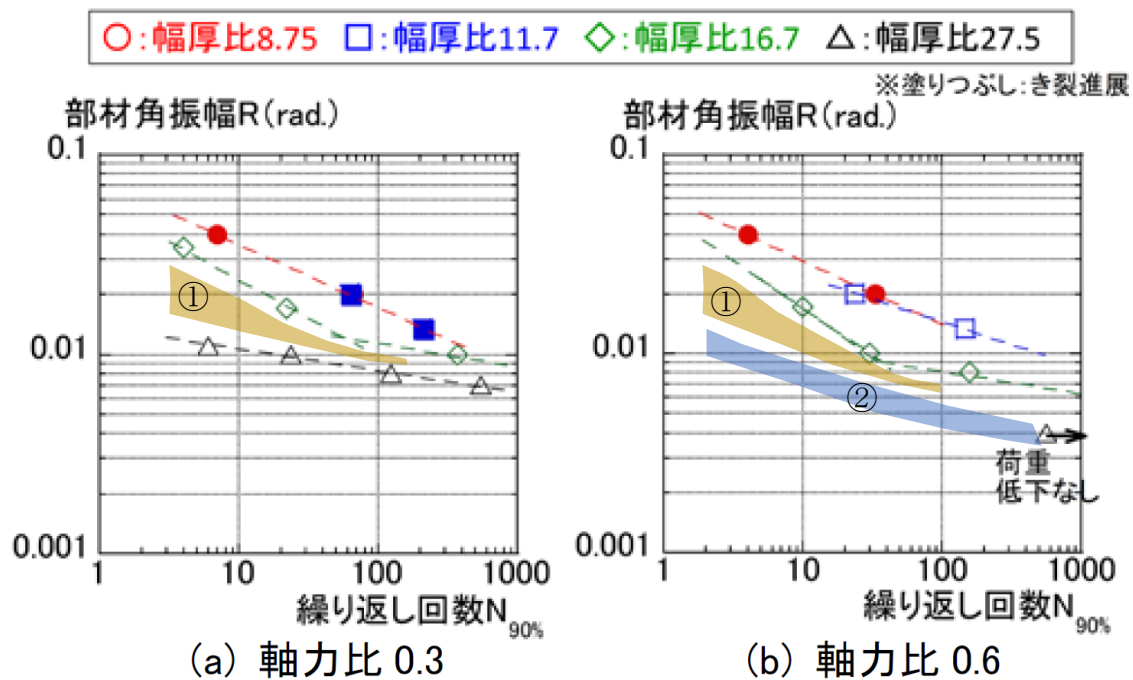


図 2.2-4 平成 30 年度実験と既往実験結果による R- $N_{90\%}$ 関係(図 2.2-3 再掲載)

まず、FEM を用いて下記に示す 1) ～ 3) を表現することが可能かを確かめる。

- 1) 短柱圧縮試験に於ける荷重上昇
- 2) 多数回繰返し実験に於ける荷重上昇
- 3) 多数回繰返し実験に於ける溶接熱影響部のき裂進展と柱端部の局部座屈の発生による荷重低下

上記が確認できた段階で、前述の今後必要なデータについてのパラメータスタディを実施する。

(2) 使用鋼材および溶接部の特性

平成 30 年度の試験体に用いた□-105×105×t (t=9, 12mm : SM490A) について、使用鋼材の機械的性質および成分分析結果、柱端溶接部の硬さ試験結果を以下に示す。なお、鋼材の機械的性質は平成 30 年度報告書からの再掲載である。

1) 使用鋼材の特性

試験体に用いた鋼材 (PL-9、12 : SM490A) について JIS Z 2241 に従い引張試験を実施した。参考として、裏当て金 (PL-3.2) の引張試験についても実施し、基本的な機械的性質を把握した。また、JIS Z 2242 に従いシャルピー試験 (0°C) を実施した。また、炭素当量 (Ceq)^{2.2-8)}、溶接割れ感受性組成 (Pcm)^{2.2-8)}、fHAZ 式^{2.2-9)} の値を評価するために、13 元素 (C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, Cu, V, B, P, S, N, Ti) について化学成分分析を実施した。各値の評価式を以下に示す。

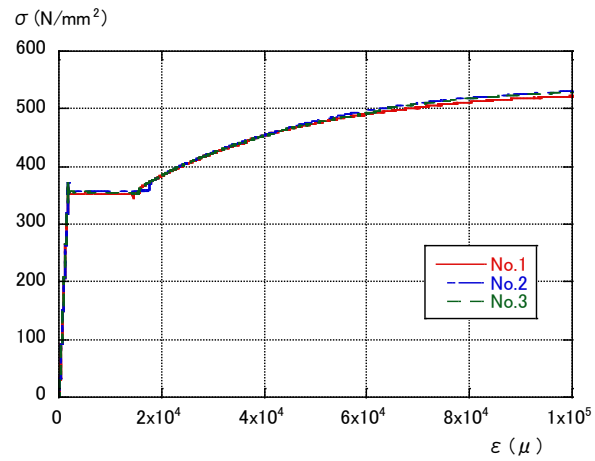
- ・炭素当量 $Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$
- ・溶接割れ感受性組成 $Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$
- ・HAZ 靱性評価式 $fHAZ=C+Mn/8+6\times(P+S)+12N-4Ti$

使用した鋼材の機械的性質を表 2.2-2 に、応力・ひずみ関係を図 2.2-5 に示す。また、シャルピー衝撃試験結果 (0°C) を表 2.2-3 に、化学成分分析結果を表 2.2-4 に、溶接性能指標を表 2.2-5 に示す。

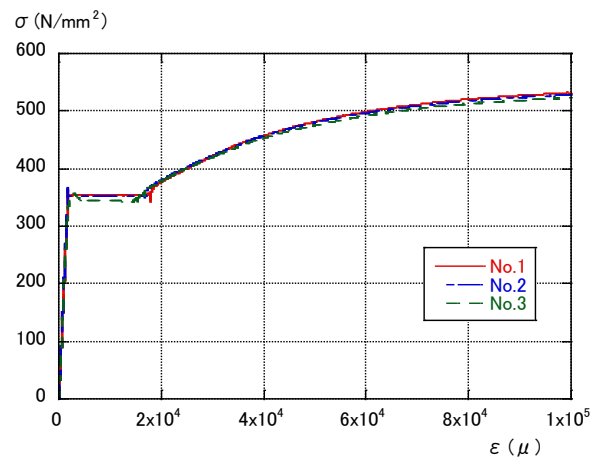
表 2.2-2 鋼材の機械的性質

	使用部位	公称板厚 (mm)	実測板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)
PL-9	柱	9	8.8	355	531	67	26
PL-12	柱	12	11.7	350	532	66	28
PL-3.2	裏当て金	3.2	3.1	311	437	71	21

*3本の平均値。PL-3.2は幅15mmのフラットバーによる試験値。



(a) PL-9



(b) PL-12

図 2.2-5 応力・ひずみ関係

表 2.2-3 シャルピー吸収エネルギー (0°C)

	試験値 (J)	平均 (J)
PL-9	50.8	63.6
	90.3	
	49.6	
PL-12	87.5	80.7
	101.4	
	53.3	

※PL-9はサブサイズ試験片による値。

表 2.2-4 化学成分分析結果

部位	化学成分												
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	Ti (%)	B (%)	N (%)
PL-9	0.16	0.34	1.48	0.024	0.0035	0.019	0.005	0.038	0.005	0.002	0.002	0.0001	0.0035
PL-12	0.18	0.37	1.35	0.020	0.0053	0.014	0.005	0.025	0.005	0.002	0.002	0.0001	0.0022
490 N/mm ² 鋼	0.2 以下	0.55 以下	1.65 以下	0.035 以下	0.035 以下	-	-	-	-	-	-	-	-
SN490B 規定	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.030 以下	0.015 以下	-	-	-	-	-	-	-	-

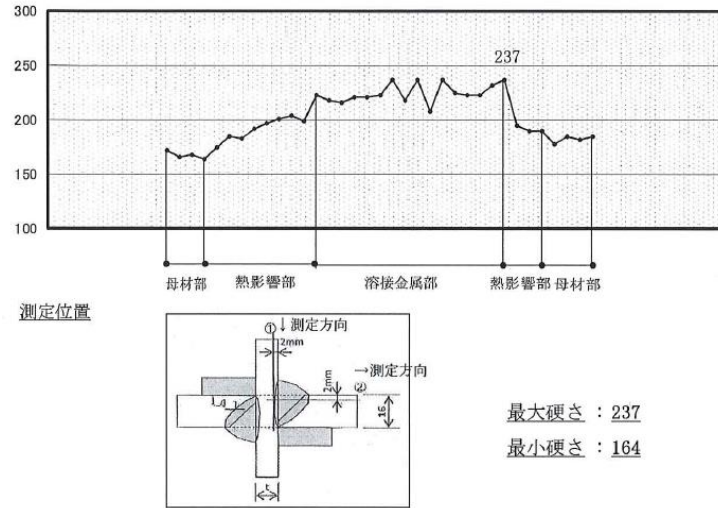
表 2.2-5 溶接性指標

部位	C _{eq} (%)	P _{CM} (%)	f _{HAZ} (%)
PL-9	0.43	0.25	0.54
PL-12	0.43	0.26	0.52
490 N/mm ² 鋼	0.44 以下	0.29 以下	0.58 以下

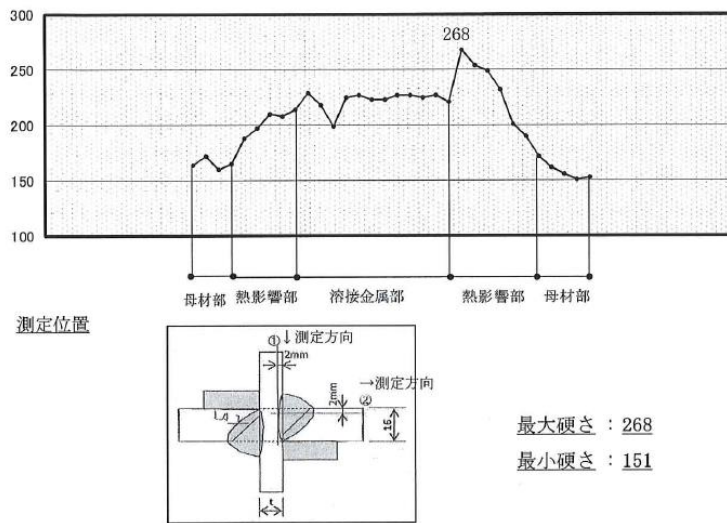
2) 溶接部の特性

柱端溶接部を取り出した試験体を製作し、JIS Z 2244 によるビッカース硬さ試験を実施した。

硬さ試験では、母材部 2 mm、熱影響部 0.5 mm、溶接部 1 mm の測定ピッチにて計測を行った。計測結果を図 2.2-6 に示す。また、溶接部試験体のマクロ写真を写真 2.2-1 に示す。なお、写真 2.2-1 では余盛を成形していないが、平成 30 年度の柱試験体では余盛を成形して実験を実施している。

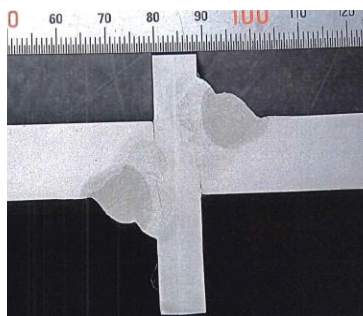


(a) PL-9

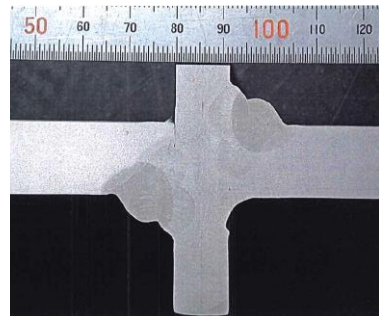


(b) PL-12

図 2.2-6 硬さ分布



(a) PL-9



(b) PL-12

写真 2.2-1 マクロ写真

(3) 短柱圧縮試験の解析

平成 30 年度実施した□-105×105×t (t=9, 12mm) の短柱圧縮試験のシミュレーションを実施する。解析モデルは鋼管と裏当金をシェル要素にてモデル化する。なお、裏当て金は文献 2.2-4) と同様にコーナー部の斜材とし、溶接線に沿うように材軸方向の溶接金属を配置する。また、圧縮試験では大変形領域で溶接部と母材との間で延性き裂が発生したことから、延性的に破壊する部分を溶接部と母材との間に溶接熱影響部として配置する。

解析モデルを図 2.2-7 に示す。なお、実験時には、上下の載荷プレートに試験体上下端部のめり込みが見られたことから、上下端の境界条件に回転拘束も加えた。材料特性（熱影響部を除く）は降伏点を折れ点として第二勾配を $E/100$ 程度としたバイリニアとした。また、熱影響部の材料特性は文献 2.2-7) に示す応力・ひずみ関係とし、硬化則は混合硬化則とした。母材の降伏点は表 2.2-2 に示す値とし、前述の溶接金属および熱影響部の降伏点は、図 2.2-7 の硬さ分布を各部分で平均したものを参考に、文献 2.2-6) の手法を用いて、母材降伏点を PL-9 では 1.46 倍および 1.28 倍とし、PL-12 では 1.57 倍および 1.43 倍とした。また、熱影響部の疲労特性は文献 2.2-5) 2.2-7) を参考にして設定した。以下に損傷モデルの概要を示す。

【損傷モデルの概要】

損傷モデルとしては、文献 2.2-5) 2.2-7) による繰り返し損傷則および単調損傷則を用いる。

繰り返し損傷則は、損傷度変化率 \dot{D} を表現する式 (2.2-1) のように、応力三軸度に基づき場合分けしたものを使用する。

$$\dot{D} = \begin{cases} \left[\frac{Y}{S} \right]^\lambda \dot{\epsilon}_{pi} & \frac{p}{\sigma_{eq}} < -\frac{1}{3} \text{ のとき} \\ 0 & \frac{p}{\sigma_{eq}} \geq -\frac{1}{3} \text{ のとき} \end{cases} \quad (1) \quad (2.2-1)$$

ここで、 \dot{D} は損傷度変化率、 $Y = \frac{1}{2} \times \epsilon^{el} : K^{el} : \epsilon^{el}$ である。また、 ϵ^{el} は弾性ひずみテンソル、

K^{el} は弾性テンソル、 S は疲労に関する材料定数 1、 λ は疲労に関する材料定数 2、 $\dot{\epsilon}_{pi}$ は相当塑性ひずみ速度、 p/σ_{eq} は応力三軸度 (p : 静水圧、 σ_{eq} : Mises の相当応力) である。繰り返し損傷則では、式 (2.2-2) での損傷度変化率 \dot{D} を各ステップで足し合わせて算定した損傷度 D が、式 (2.2-3) での閾値 D_c に到達した FEM 要素は破壊に至ったとみなされ、削除されることとする。

$$D = \int \dot{D} dt \quad (2) \quad (2.2-2)$$

$$D \geq D_c \quad (3) \quad (2.2-3)$$

ここで、 D は損傷度、 D_c は閾値である。また、ステップ毎に算定される応力は、ボイドの発生・成長を考慮することで低減され、 $(1-D^c)$ 倍されるものとする。また、単調載荷に相当する大きな塑性率に対しても破断現象を迫えるために、繰り返し損傷則に加えて、単調載荷を含む一方方向の大きな振幅による破壊を考慮できる単調損傷則のモデルも適用する。

単調損傷則では、累積塑性ひずみ ($\Delta\epsilon_p$) が要素に連続して引張応力が作用している場合の相当

塑性ひずみ速度を式(2.2-4)により足し合わせる。

$$\Delta \varepsilon_p = \int \dot{\varepsilon}_{pl} dt \quad \frac{p}{\sigma_{eq}} < -\frac{1}{3} \text{のとき} \quad (4) \quad (2.2-4)$$

また、この累積ひずみが式(2.2-5)に示すように FEM 要素の損傷も考慮した単調載荷時の破断真ひずみ $(1-D^\zeta) \varepsilon_f$ に到達すると破壊に至るとする。

$$\Delta \varepsilon_p \geq (1 - D^\zeta) \varepsilon_f \quad (5) \quad (2.2-5)$$

ここで、 ε_f は単調載荷時の破断真ひずみ（対数ひずみ）である。

損傷度 D は式(2.2-2)での損傷度変化率 \dot{D} を各ステップで足し合わせて算定し、式(2.2-5)の破壊条件を満たした FEM 要素は破壊に至ったとみなされ、削除される。また、損傷モデルに於いて、材料毎に与える定数は S 、 λ 、 ε_f 、 ζ の 4 つであり、素材試験結果および構造実験結果（多数回繰り返し実験）を基に文献 2.2-7）と同様に熱影響部の値を設定した。繰り返し損傷則と単調損傷則の関係は損傷度 D によって関連しており、独立した関係とはなっていないため、多数回繰り返し荷重を受けた後に一方向に引張力を受ける場合には、初期状態に於いて引張力を受ける場合と比較して早期に破断に至ることになる。

解析結果を図 2.2-8 に示す。図 2.2-8 には実験結果（2 体分）も比較のために示す。図 2.2-8 によると、解析結果では実験結果と同様に、降伏荷重から最大荷重への荷重上昇が確認される。ただし、解析結果の最大値は実験結果よりもやや小さくなっている。また、最終状況での大きな局部座屈が発生している位置は、実験結果は上側のみであるが、解析結果では PL-9 では上下逆転しており、PL-12 では実験と同じ箇所が局部座屈している。また、PL-12 の解析結果では $\delta = 60\text{mm}$ で熱影響部が裂けることで急激な荷重低下が発生しているが、 $\delta = 60\text{mm}$ でまでは実験と解析は良く一定している。以上より、図 2.2-7 の解析モデルにより圧縮時の荷重上昇を表現できることが分かった。今後の柱部材実験の解析では同様な手法でモデル化を行う。

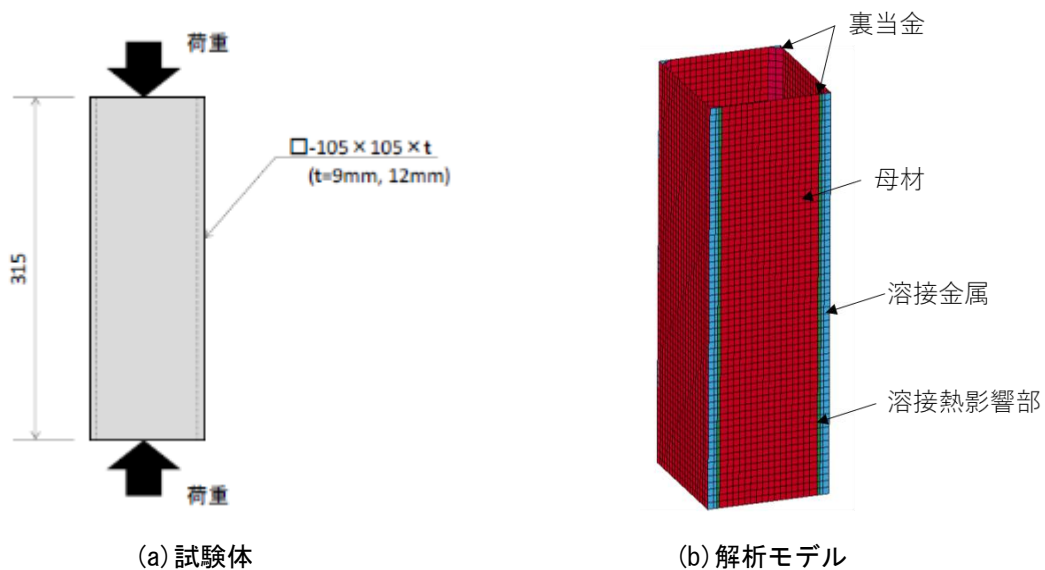
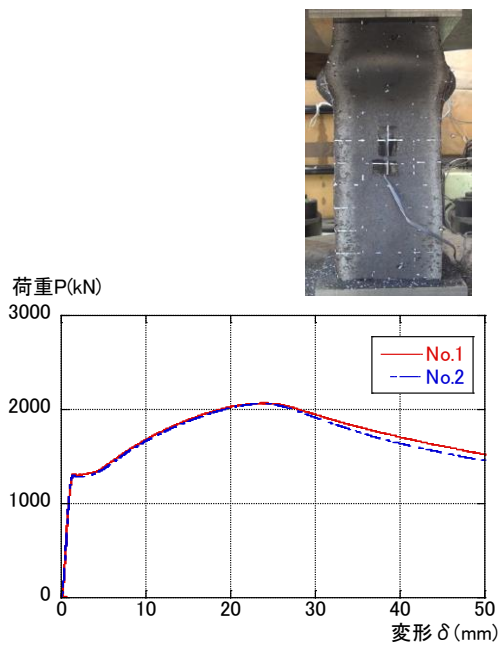
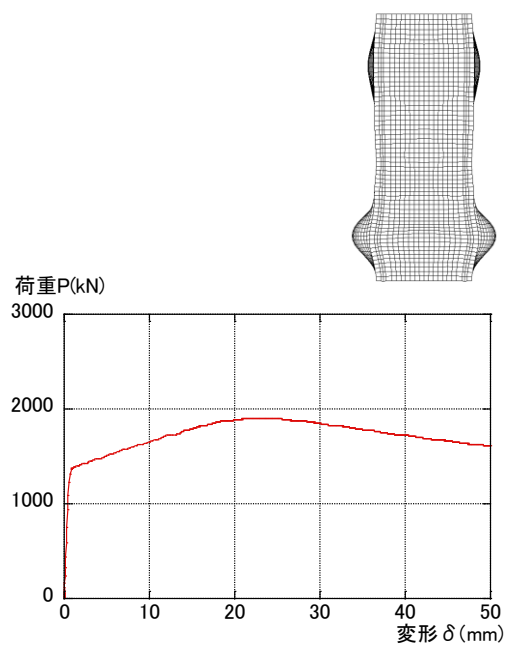


図 2.2-7 解析モデル

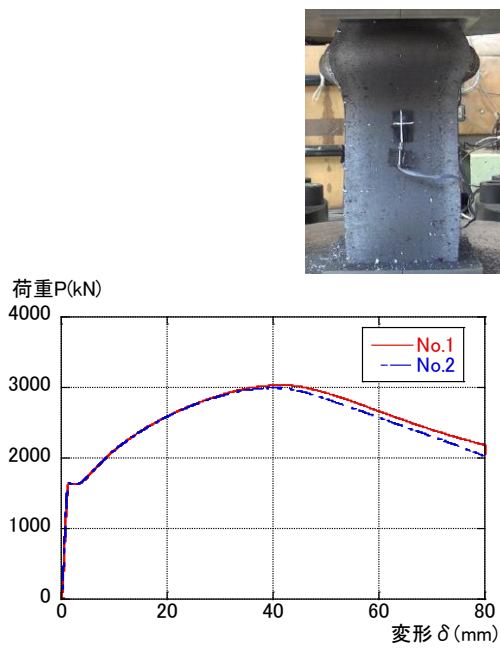


実験結果

(a) PL-9

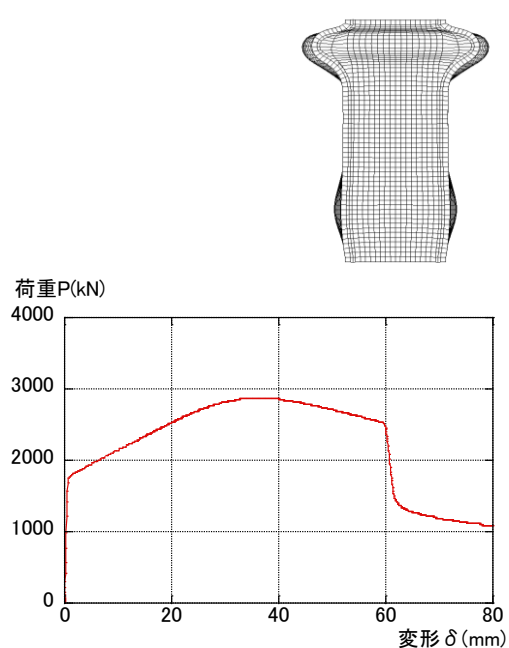


解析結果



実験結果

(b) PL-12



解析結果

図 2.2-8 荷重・変形関係

(4) 柱部材実験の解析

ここでは、柱断面□-105×105×12を対象として、平成30年度に実験を実施した径高さ比 $D/t=8$ の一部の試験体について有限要素法(FEM)を用いたシミュレーションを実施した。

シミュレーション対象の試験体は、荷重低下の主要因がき裂進展の場合と局部座屈の場合の4体とした。繰り返し回数については、基本となる最大荷重の90%低下までの繰り返し回数 $N_{90\%}$ を用いて解析データの整理を行った。

1) 解析モデル

解析モデルはシェル要素を用いて柱試験体と同様な形状によりモデル化した。また、裏当金は文献2.2-4)と同様にコーナー部の斜材とし、脚部の余盛はシェル要素の板厚を変化させることによりモデル化した。また、令和1年度の解析では熱影響部のき裂進展を取り扱うので、文献2.2-5)2.2-7)を参考にして柱頭・柱脚部の溶接部のメッシュサイズ(材軸方向)を2.0~2.5mm程度とした。また、短柱圧縮試験のシミュレーションと同様に、材軸方向の溶接金属と熱影響部を配置した。解析モデルを図2.2-9に示す。

解析では、柱軸力を载荷した後、上側プレートを水平に保持し、下側プレートのボルト位置の変位を拘束した状態で、上側プレートに水平方向の強制変位を加えた。

材料特性(熱影響部を除く)は降伏点を折れ点として第二勾配を $E/100$ 程度としたバイリニアとし、硬化則は混合硬化則を用いた。また、熱影響部の材料特性は文献2.2-7)に示す応力・ひずみ関係とし、硬化則は混合硬化則とした。短柱圧縮試験のシミュレーションと同様に、図2.2.2-3の硬さ分布を各部分で平均したものを参考に、文献2.2-6)の手法を用いて、母材降伏点をPL-9では1.46倍および1.28倍とし、PL-12では1.57倍および1.43倍とした。

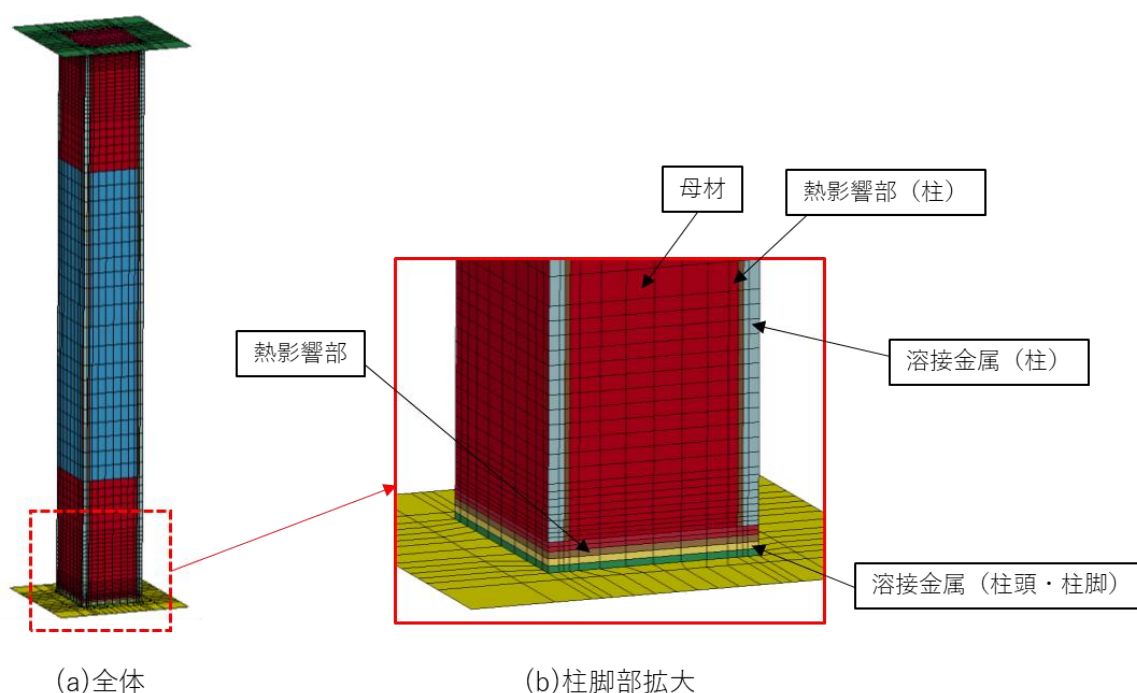


図 2.2-9 解析モデル

2) 一定振幅载荷のシミュレーション

前述の解析モデルを用いて、荷重低下の主要因がき裂進展の場合と局部座屈の場合の4体とした。対象とした試験体を以下に示す。

- ①M08-3C-RL 試験体 ($D/t=8.75$, $L/D=8.0$, $n=0.3$, $R=1/25$) ※き裂進展 : $N_{90\%}=7$
- ②M08-6C-RL 試験体 ($D/t=8.75$, $L/D=8.0$, $n=0.6$, $R=1/25$) ※き裂進展 : $N_{90\%}=4$
- ③M08-6C-RS 試験体 ($D/t=8.75$, $L/D=8.0$, $n=0.6$, $R=1/50$) ※き裂進展 : $N_{90\%}=33$
- ④M11-6C-RS 試験体 ($D/t=11.7$, $L/D=8.0$, $n=0.6$, $R=1/50$) ※局部座屈 : $N_{90\%}=24$

解析結果の荷重・変形関係を図 2.2-10 と図 2.2-11 に示す。図中には実験結果と最終の変形状況と $N_{90\%}$ の値も示す。図 2.2-10 は①と②の比較で軸力比の差異の影響を、図 2.2-11 は③と④の比較で幅厚比の差異の影響を示す。

図より、解析結果のループ形状は実験結果と比較して折れ曲がり位置でやや角ばっているが、初期载荷からの荷重上昇は良く追えている。

図 2.2-10 より、実験結果と同様に解析結果の荷重低下の主要因も柱頭・柱脚部の溶接熱影響部に於けるき裂進展であり、解析結果の $N_{90\%}$ も実験結果とほぼ一致した値（軸力比 0.3 : 実験 7、解析 6、軸力比 0.6 : 実験 4、解析 5）となっている。

図 2.2-11 より、実験結果と同様に解析結果の荷重低下の主要因は、幅厚比 8.75 では柱頭・柱脚部の溶接熱影響部に於けるき裂進展、幅厚比 11.7 では局部座屈（コーナー部のき裂進展も伴う）である。また、解析結果の $N_{90\%}$ については、幅厚比 8.75 では実験結果 ($N_{90\%}=33$) より少ない 17 であり、幅厚比 11.7 ではほぼ一致した値（実験 24、解析 26）となっている。幅厚比 8.75 で解析での $N_{90\%}$ が実験値よりも小さくなっているのは、解析ではき裂進展後に急激な荷重低下が見られるが、実験では徐々に荷重低下している点が異なっているためと考えられる。また、解析では幅厚比 11.7 のように局部座屈による荷重低下は良くシミュレートできていると言える。

以上より、FEM 解析により、実験で見られた初期サイクルからの荷重上昇、およびき裂進展と局部座屈が併発することによる荷重低下現象を表現可能であることがわかった。

令和 1 年度の解析では、有限要素法 (FEM) を用いて下記に示す 1) ~ 3) の確認を実施し、軸力比や幅厚比の異なる試験体の解析により 1) 2) をシミュレート可能であること、3) では解析結果は実験結果よりも小さな変形能力を与える場合もあるが、全体的な傾向を有限要素法 (FEM) により把握できることがわかった。

- 1) 短柱圧縮試験に於ける荷重上昇
- 2) 多数回繰り返し実験に於ける荷重上昇
- 3) 多数回繰り返し実験に於ける溶接熱影響部のき裂進展と柱端部の局部座屈の発生による荷重低下

ただし、3) の荷重低下状況をシミュレートするためには、今後更なる解析精度向上が必要と考えられる。

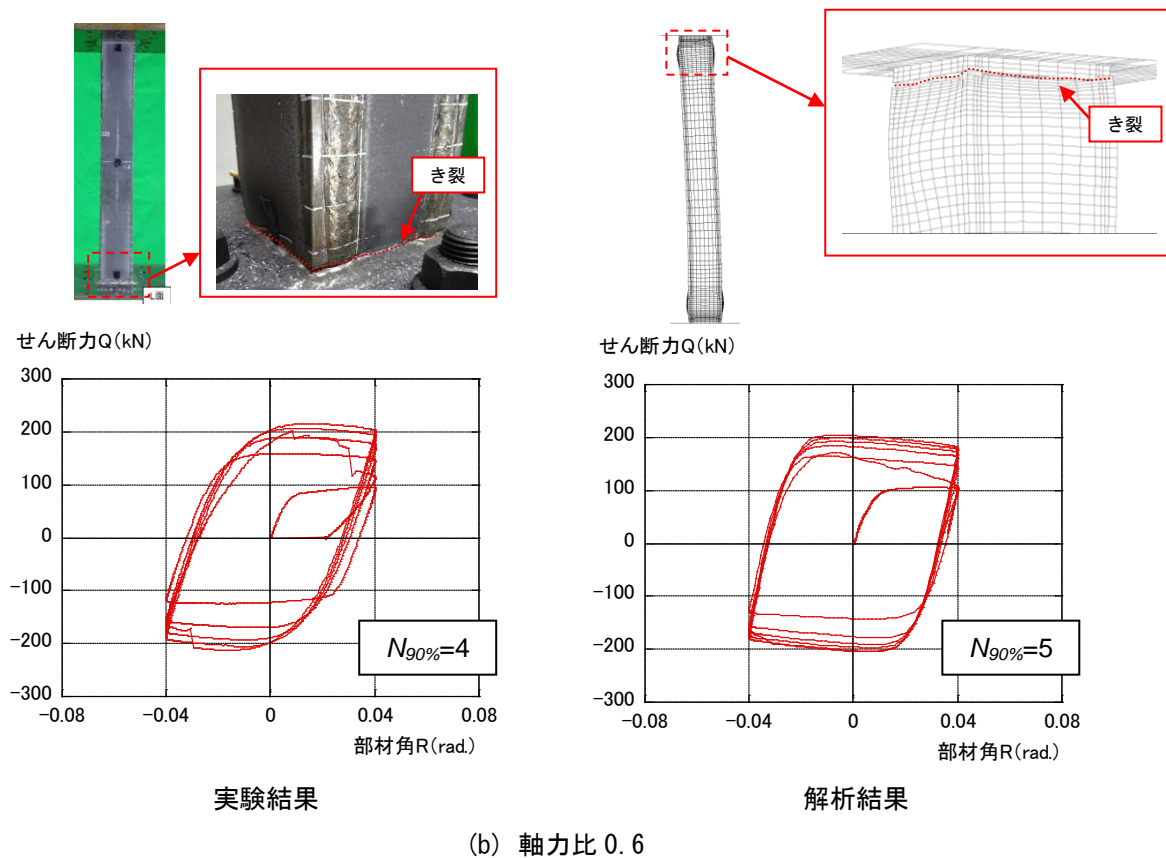
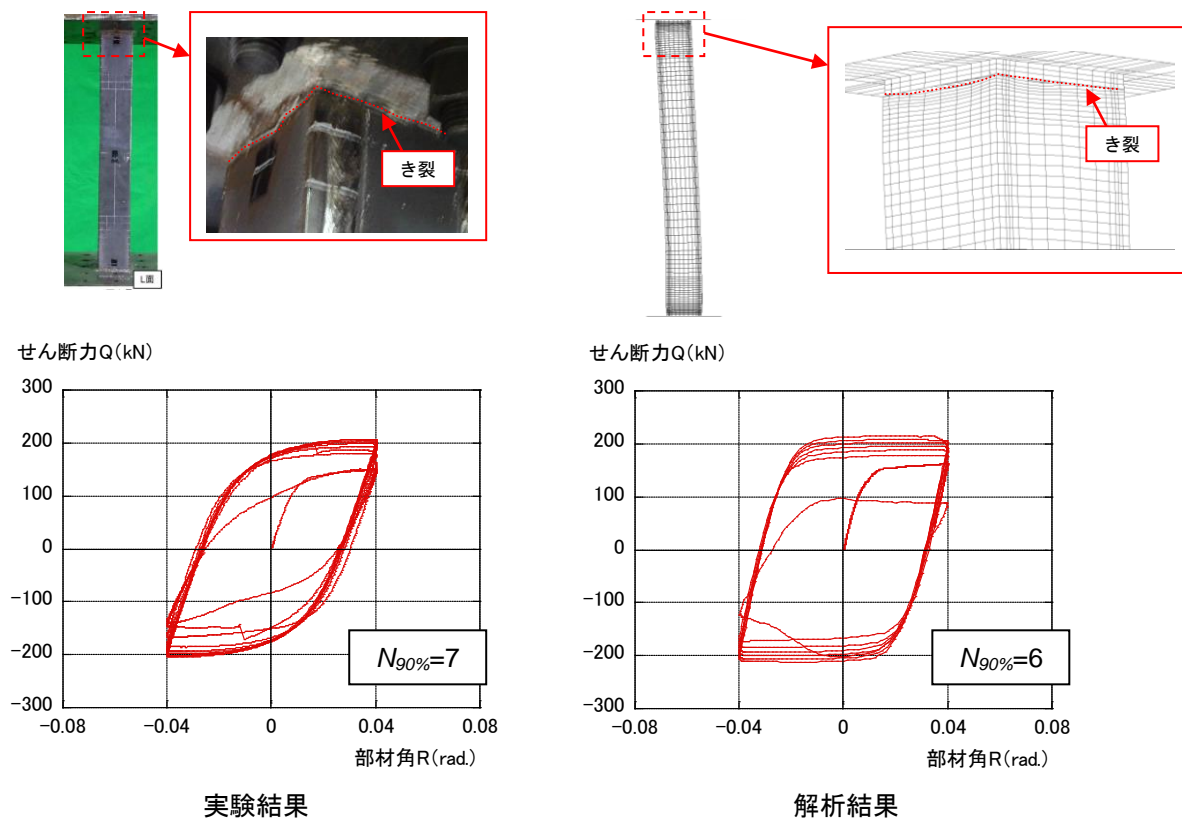
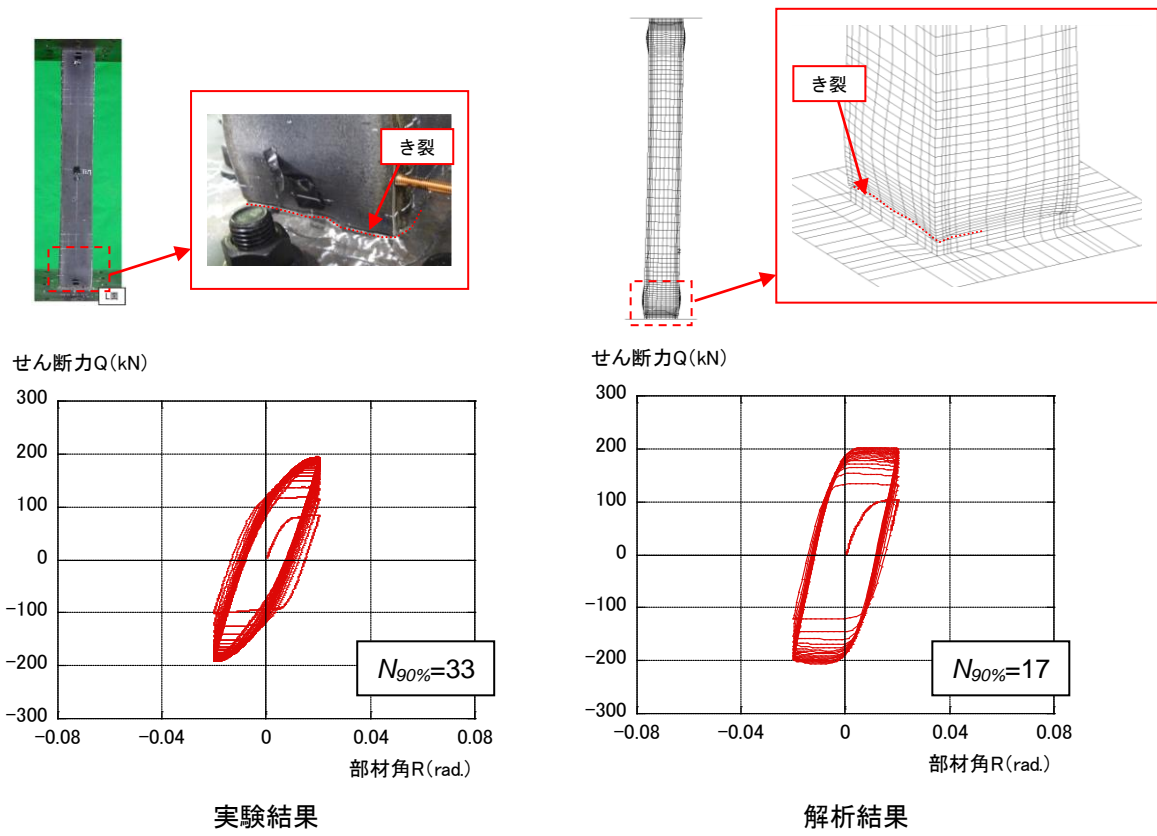
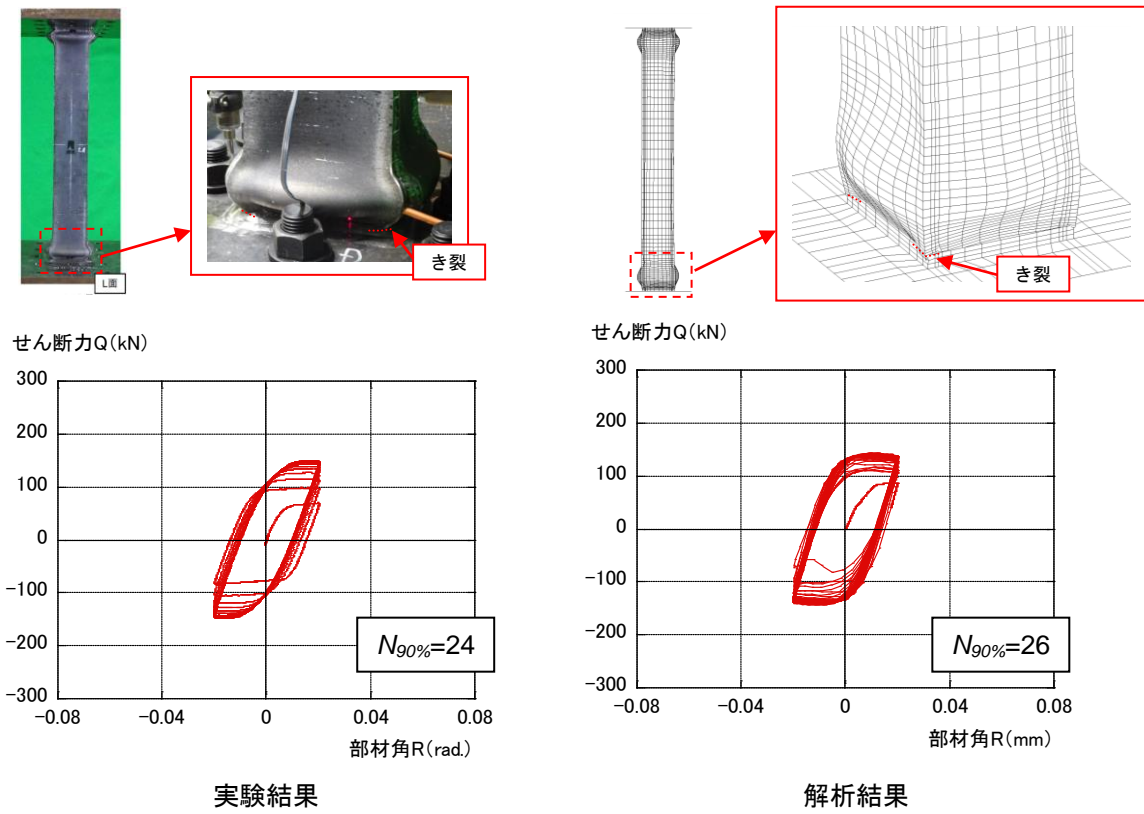


図 2.2-10 荷重・変形関係 (軸力比の影響比較)



(a) 幅厚比 8.75



(b) 幅厚比 11.7

図 2.2-11 荷重・変形関係（幅厚比の影響比較）

(5) パラメータスタディ

前述の解析モデルを修正して、2.2.1(2)で検討した今後補充が必要なデータである、「軸力比 0.6 を超えるデータ」、「幅厚比が 20 程度のデータ」「幅厚比 27.5 での軸力比 0.6 のデータ」に関して、解析を実施する。材料定数は幅厚比 11.7 (PL-9) の試験体と同じ値を使用する。

1) 軸力比 0.6 を超えるデータ

軸力比 0.6 を超えるデータとして、幅厚比 8.75 で軸力比 0.8 の解析を実施する。また、部材角振幅は 1/25 と 1/50 とする。図 2.2-12 に解析結果の荷重・変形関係を示す。図中には軸力比 0.3 および 0.6 の結果、および $N_{90\%}$ の値も示す。

図 2.2-12 によると、軸力比の増減により $N_{90\%}$ の値は大きく変化していない。しかしながら、軸力比が 0.3、0.6 から 0.8 へと大きくなると、柱頭・柱脚の局部座屈の程度が大きくなっており、軸力比 0.8 ではコーナー部にき裂が見られるが、荷重低下の主要因がき裂進展から局部座屈へと変化している。

2) 幅厚比が 20 程度のデータ

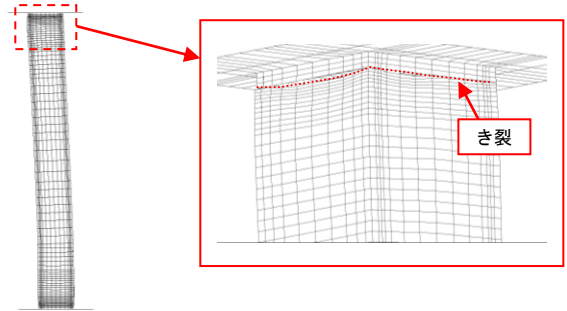
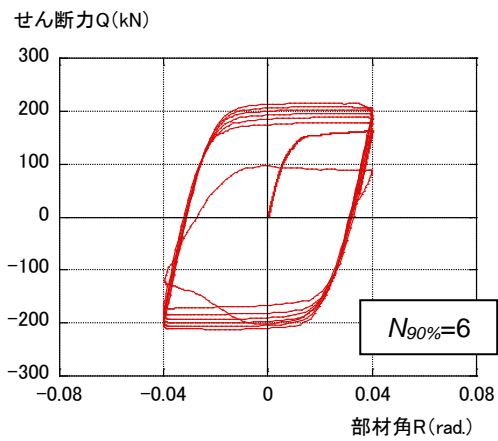
図 2.2-9 の解析モデルを修正し、幅厚比 20 (板厚 5.25 mm) の解析を実施する。解析では、軸力比 0.3 で部材角振幅 1/33、1/50、軸力比 0.6 で部材角振幅 1/75、1/100 の 4 ケースを実施する。図 2.2-13 に解析結果の荷重・変形関係を示す。図中には $N_{90\%}$ の値も示す。

解析の結果、幅厚比 20.0 の解析結果から、全ての解析ケースで荷重低下の主要因は柱頭・柱脚の局部座屈であることがわかった。また、幅厚比 16.7 の実験結果と比較して、軸力比 0.3 では変形能力 ($N_{90\%}$) がほぼ同じであること、軸力比 0.6 では小さくなっていることがわかった。

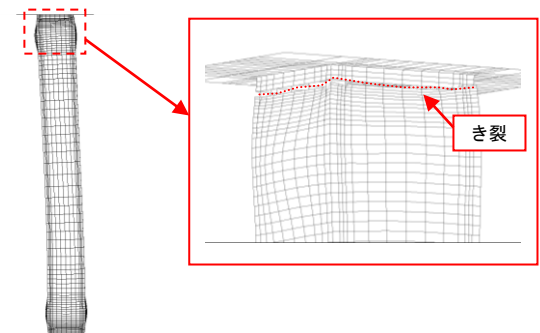
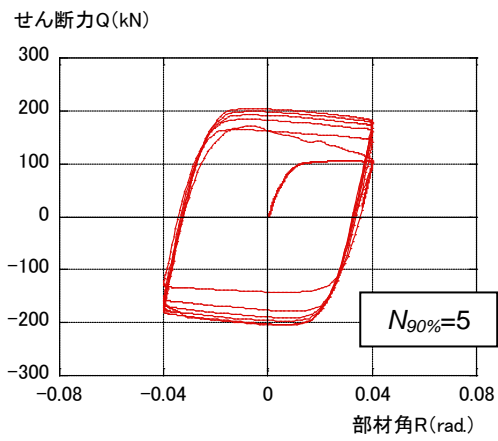
3) 幅厚比 27.5 での軸力比 0.6 のデータ

図 2.2-9 の解析モデルを、文献 2.2-1) と同様な径高さ比 9.1 と幅厚比 27.5 (板厚 3.82mm) に修正して解析を実施する。解析では、部材角振幅 1/125、1/167 の 2 ケースを実施する。図 2.2-11 に解析結果の荷重・変形関係を示す。図中には $N_{90\%}$ の値も示す。

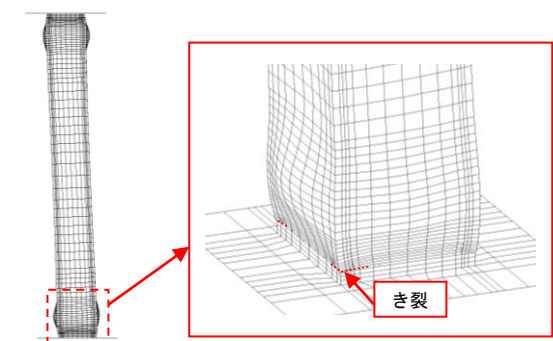
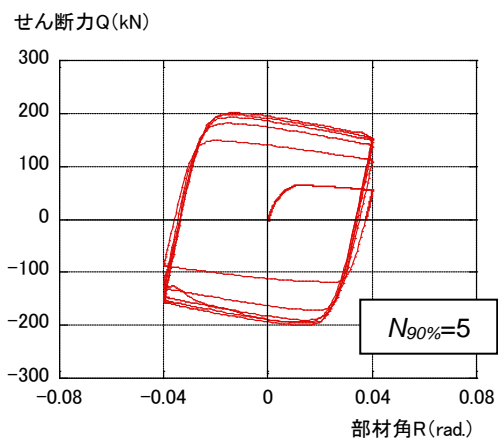
解析の結果、幅厚比 27.5 で軸力比 0.6 の場合の荷重低下の主要因は柱頭・柱脚の局部座屈であることがわかった。



(a) 軸力比 0.3



(b) 軸力比 0.6



(c) 軸力比 0.8

図 2.2-12 荷重・変形関係 (軸力比 0.8)

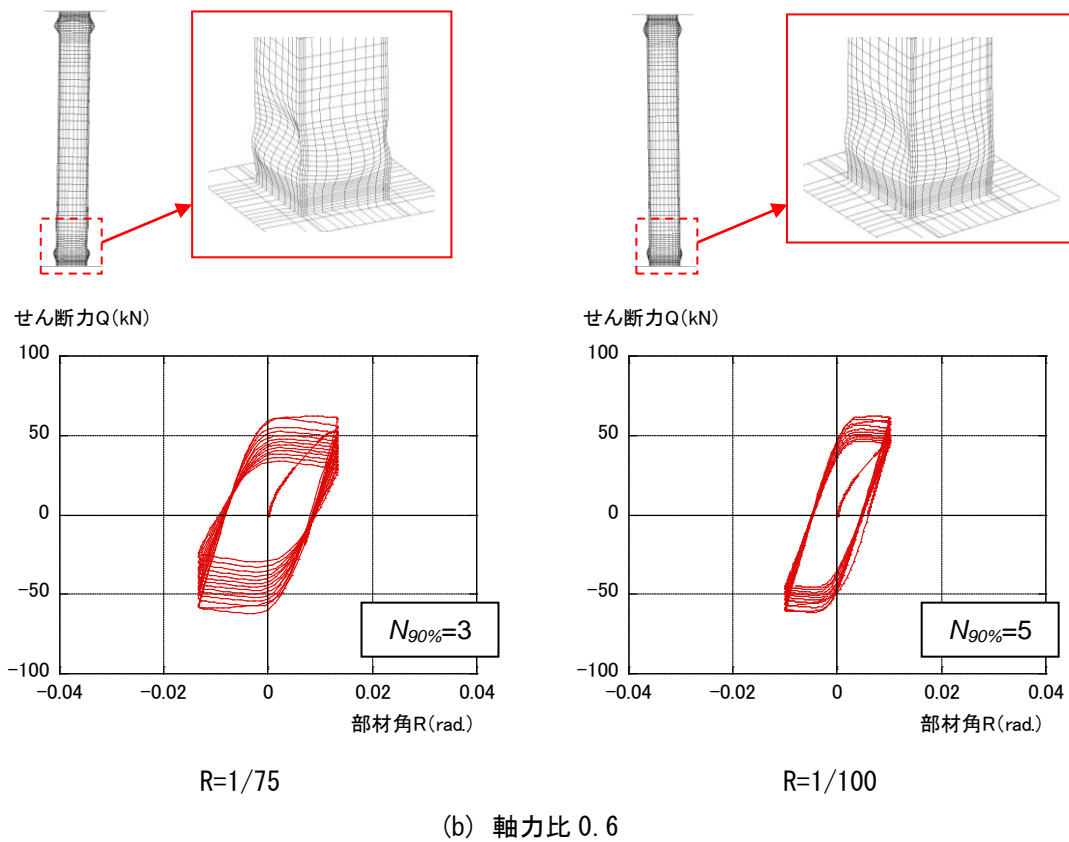
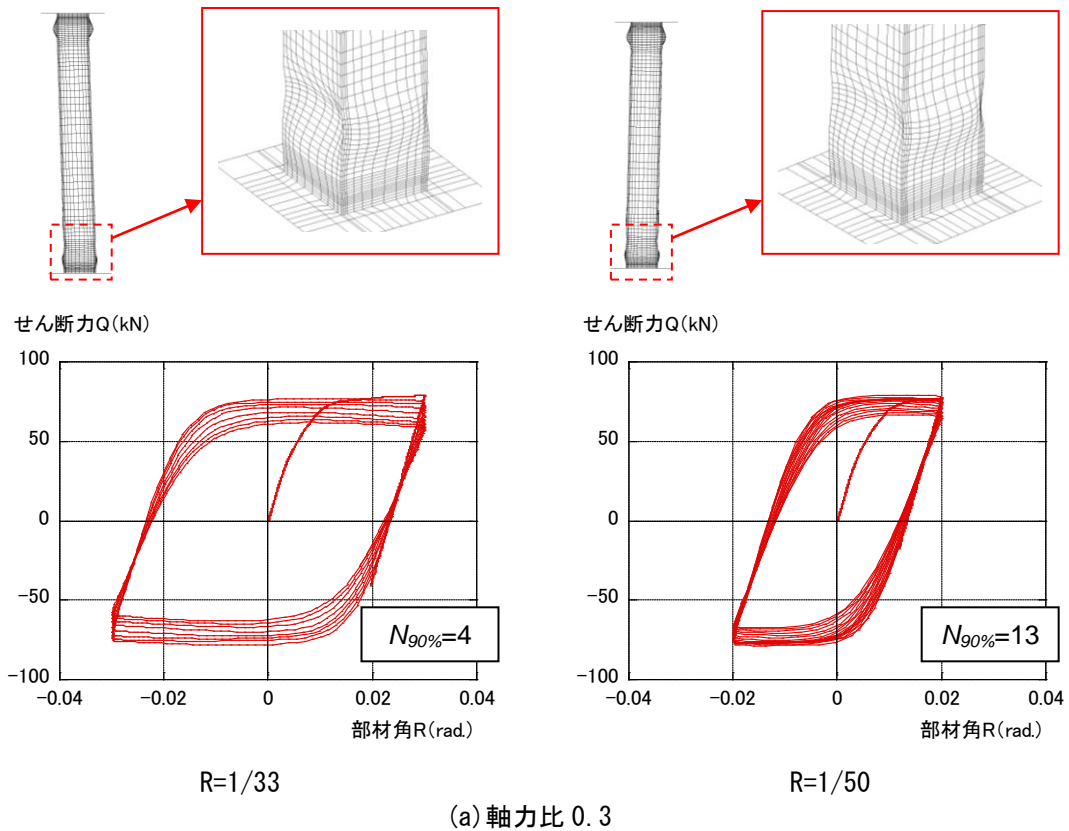


図 2.2-13 荷重・変形関係（幅厚比 20.0）

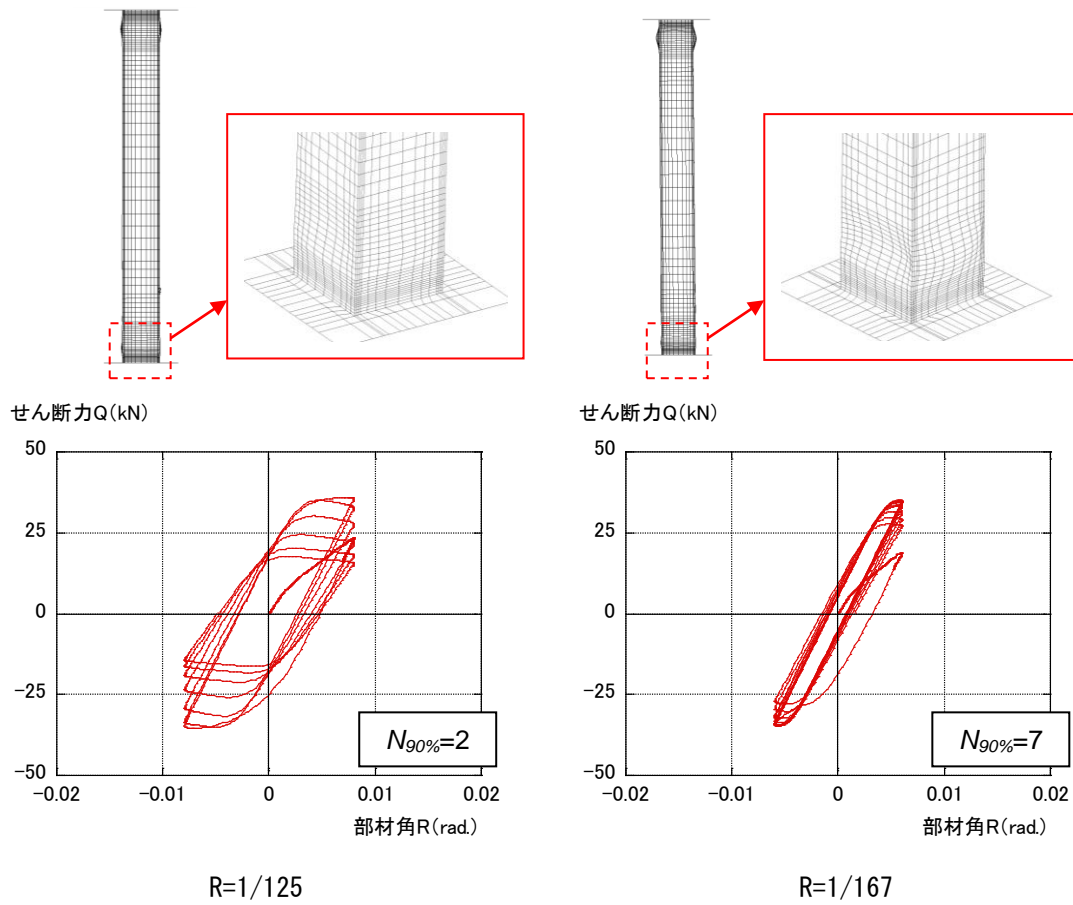


図 2.2-14 荷重・変形関係（幅厚比 27.5、軸力比 0.6）

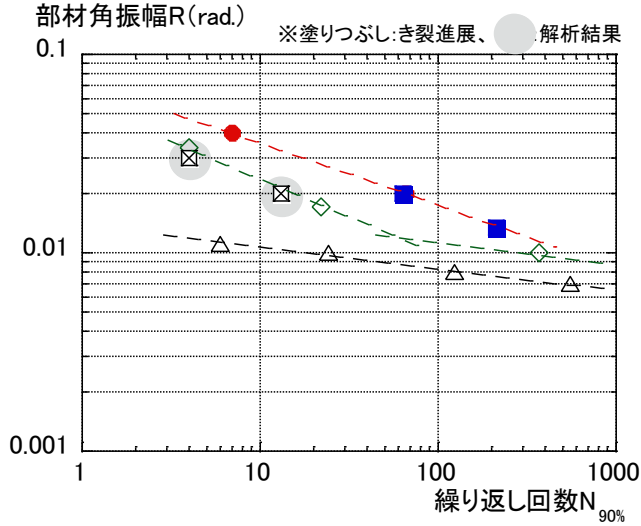
(6) 解析結果を加えた変位振幅と繰返し数の関係

H30 年度の報告書の実験結果による変位振幅と繰返し回数関係 ($N_{90\%}$: 図 2.1-20) に前述の解析結果 (軸力比 0.3、0.6) を加えたものを図 2.2-15 に示す。図中の幅厚比 20.0 (軸力比 0.3、0.6) および幅厚比 27.5 (軸力比 0.6) のデータが解析結果であり、ハッチで示している。また、プロットを塗りつぶしたものがき裂進展により荷重低下したものである。

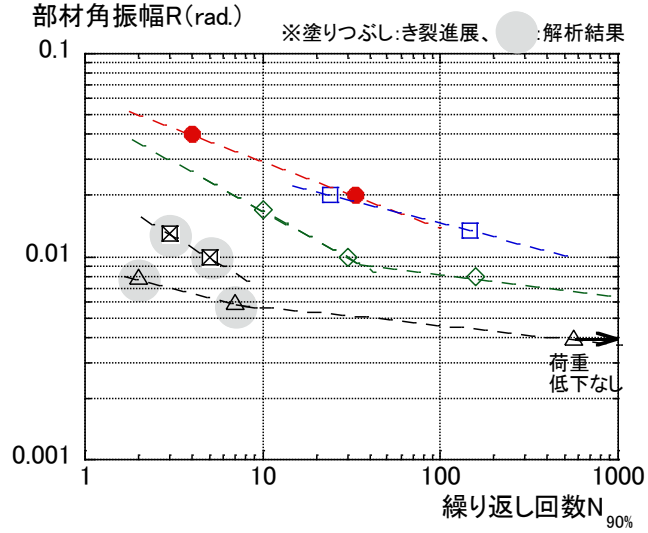
軸力比 0.3 では図 2.2-15 (a) より、幅厚比 8.75 および 11.7 のき裂進展により決定づけられる性能曲線を上限とし、幅厚比 27.5 の局部座屈進展により決定づけられる性能曲線を下限とする領域に中間の幅厚比の場合 (幅厚比 16.7、20.0) が位置している。また、軸力比 0.3 では幅厚比 20.0 の値は幅厚比 16.7 の性能曲線付近に位置しており、幅厚比 20.0 と 16.7 の性能曲線がほぼ一致していることがわかる。

軸力比 0.6 では図 2.2-15 (b) より、幅厚比 8.75 のき裂進展により決定づけられる性能曲線と幅厚比 11.7 の局部座屈進展により決定づけられる性能曲線が近い位置でほぼ上限とし、幅厚比 27.5 の局部座屈進展により決定づけられる性能曲線を下限とする領域に中間の幅厚比 (幅厚比 16.7、20.0) が位置している。また、軸力比 0.6 では幅厚比 20.0 の性能曲線は幅厚比 16.7 と 27.5 の間に位置しており、軸力比 0.3 とは異なり幅厚比 20.0 の値は 27.5 に近い位置にある。

以上より、軸力比 0.3 と 0.6 で幅厚比により性能曲線の相対位置が多少異なるものの、性能曲線の上下限については同様な傾向があることがわかった。



(a) 軸力比 0.3



(b) 軸力比 0.6

図 2.2-15 変位振幅と繰り返し数の関係 ($N_{90\%}$)

2.2.3 まとめと今後の課題

鉄骨柱部材の疲労性能曲線式を提案することを目的とし、平成30年度の実験結果および既往の実験結果を用い、鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討を実施した。また、平成30年度の実験結果を対象に有限要素法（FEM）を用いて、実験で確認された荷重低下要因（局部座屈、き裂発生）をシミュレート可能かの検討を行った。また、今後補充が必要なデータの一部に関して、有限要素法（FEM）を用いたパラメータスタディを実施し、FEMの解析結果も考慮して設計用疲労曲線の検討を行った。以下に令和1年度の得られた知見を示す。

(1) まとめ

【設計用疲労曲線（案）の検討】

- 1) 一定軸力と変動軸力では、幅厚比の大きな場合（幅厚比：27.5）には、変動軸力のデータは一定軸力（長期相当）よりも小さくなり、幅厚比の小さな場合（幅厚比：16.7）には、変動軸力のデータは一定軸力（長期相当）のデータとほぼ同じとなる傾向にある。
- 2) 柱部材の多数回繰り返し実験での降伏後のひずみ硬化による耐力上昇（ Q_{max}/Q_p ）は、全塑性耐力と比較して、軸力比 $n=0.3$ で最大 1.8 倍、 $n=0.6$ で最大 2.8 倍、 $n=0.9$ で最大 5.6 倍となり、軸力比が大きくなると耐力上昇は大きくなる。また、上記の耐力上昇は応答解析における余裕量となるが、直接に評価することは困難であるため、例えば、繰り返し回数として、最大荷重の 90% となるまでの繰り返し回数 $N_{90\%}$ を基本とし、 $N_{80\%}$ や $N_{70\%}$ についても別途評価することが考えられる。なお、上記に関しては応答解析時の柱部材の履歴モデルとの関連もあるので、総合的に判断する必要がある。
- 3) 既往の実験結果から応答解析モデル S30 の S 柱部材（1 階：幅厚比 15.0）の性能曲線（設計用疲労曲線）を検討した結果、「案 1：1 階の隅柱・中柱とも一定軸力 0.6 の性能曲線を用いる」「案 2：1 階の隅柱は変動軸力 0.6 ± 0.3 の性能曲線を、1 階の中柱は一定軸力 0.3 の性能曲線を用いる」を提案した。
- 4) 今後、設計用疲労曲線を提案するための必要なデータとして、①幅厚比が 20 程度のデータ、②幅厚比 27.5 での軸力比 0.6 のデータ、③軸力比 0.6 を超えるデータを抽出した。

【有限要素法（FEM）を用いた解析可能性の検討とパラメータスタディ】

- 5) 有限要素法（FEM）を用いて、平成30年度実施した柱部材実験のシミュレーションを実施した結果、「短柱圧縮試験に於ける荷重上昇」「多数回繰り返し実験に於ける荷重上昇」については、シミュレート可能なこと、「多数回繰り返し実験に於ける溶接熱影響部のき裂進展と柱端部の局部座屈発生による荷重低下」については、解析結果が実験結果よりも小さな変形能力を与える場合もあるが、全体的な傾向を表現できることがわかった。
- 6) 上記解析モデルを用いて、幅厚比等を変化させたパラメータスタディを行った結果、軸力比 0.3 と 0.6 で幅厚比の差異による性能曲線の相対位置は多少異なるが、平成30年度の報告書に記載した性能曲線の上下限と同様に、上限が幅厚比小のき裂進展、下限が幅厚比大の局部座屈により決定づけられる性能曲線であることがわかった。

(2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に示す。

1) 一定軸力での多数回繰返し特性の把握

有限要素法（FEM）による解析に関して、柱頭・柱脚部に局部座屈を伴い、溶接熱影響部のき裂進展により徐々に荷重低下する場合の解析については、解析結果の繰返し回数が実験結果よりも少なくなる傾向にあるため、この点に関して、解析精度の向上に努める必要がある。

また、令和1年度実施の解析結果では、設計用疲労曲線を評価するためには十分では無く、幅厚比等をパラメータとした解析を更に実施する必要がある。

2) 変動軸力での多数回繰返し特性の把握

平成30年度の既存超高層の実態調査から設定した幅厚比に対して、変動軸力下での多数回繰返し実験はほとんど存在せず、既存超高層の隅柱に於ける多数回繰返し特性を把握する上からも実験データを取得することが必要と考えられる。

3) 変動振幅に対する多数回繰返し特性の把握

建物モデルでの応答解析により部材の多数回繰返し特性を評価する際には、線形累積損傷則（Miner 則）を用いる必要がある。既往の梁部材での実験に於いても変動振幅の多数回くり返し実験を実施し、その精度の確認を実施しており、鉄骨柱部材に関しても実験データを取得することが必要と考えられる。

【参考文献】

- 2.2-1) 建築研究所：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する資料、建築研究資料 第 160 号、2014.6
- 2.2-2) 文部科学省，京都大学：都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ② 都市機能の維持・回復のための調査・研究 成果報告書（H25、27）
- 2.2-3) 澤本佳和，久保田淳，鈴木芳隆：多数回繰り返し荷重下の鉄骨柱部材の変形能力評価に関する考察，日本建築学会学術講演梗概集，2018.9
- 2.2-4) 文部科学省，京都大学：都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ② 都市機能の維持・回復のための調査・研究 成果報告書（H26）
- 2.2-5) 澤本佳和，大崎純：繰り返し変位履歴を受ける梁端溶接部の塑性変形能力評価，日本建築学会構造系論文集，第 84 巻 第 759 号，pp.695-704, 2019.5
- 2.2-6) 周志光，桑村仁：鉄骨柱－梁溶接接合部の形状ノッチおよび材質ノッチ（鉄骨接合部の応力・ひずみ状態 その 4），日本建築学会構造系論文集，第 74 巻 第 637 号，pp.551-559, 2009.3
- 2.2-7) 澤本佳和，久保田淳，大崎純：繰り返し変位履歴を受ける梁端の局部座屈と破断を伴う鉄骨梁の塑性変形能力評価，日本建築学会構造系論文集，第 85 巻 第 767 号，pp.105-115, 2020.1
- 2.2-8) 日本建築学会：鉄骨工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事
- 2.2-9) 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説

2.3 鉄骨柱部材の多数回繰り返し载荷実験と疲労評価の検討（R2 年度実施）

2.3.1 鉄骨柱部材の多数回繰り返し载荷実験

(1) 実験計画

1) 試験体

試験体柱は、平成 30 年度と同様に□-105×105（SM490A；1/5 縮尺程度）で、試験体の径高さ比 L/D および幅厚比 D/t は、平成 30 年度に中心に実施した $L/D=8.0$ 、 $D/t=11.67$ ($t=9\text{mm}$) とする。図 2.3-1 に試験体形状を示す。

鉄骨柱部材の多数回繰り返し特性を把握する上で、実験データがほとんど無い载荷条件である変動軸力および変動振幅を考慮した実験を実施し、試験体数は 7 体とする。

また、試験体は図 2.3-1 に示すように柱上下にベースプレートを有する形式（ベースプレート形式）であるが、通常ベースプレート形式のように、柱をベースプレートにすみ肉溶接するのではなく、柱通しの溶接形式で柱内部にダイアフラムを有するようにしている。これは、幅厚比の小さな試験体では、変位振幅を大きくしても、局部座屈で終局とは成らず、柱頭・柱脚の溶接部でのき裂進展からの破断であることが予想されるため、通常柱梁接合部パネルに柱が取り付けディテールと同様な柱通しの溶接形式を模擬したためである。

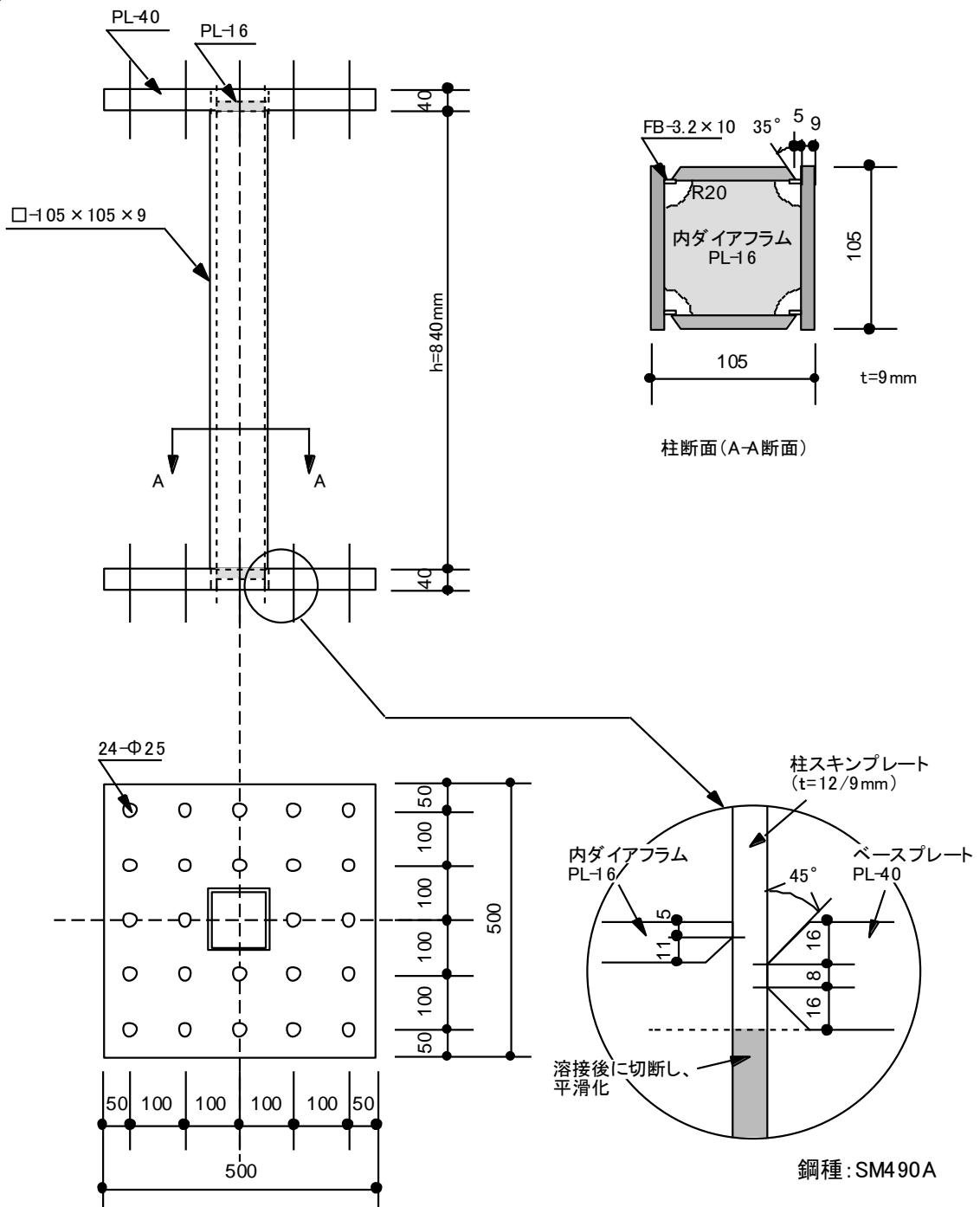


図 2.3-1 試験体形状

2) 実験パラメータ

実験パラメータとしては、部材因子と外力因子がある。部材因子については建物の実態調査結果より決定し、外力因子については試設計建物に於ける時刻歴応答解析結果等から判断する。

部材因子は、平成 30 年度に中心に実施した $L/D=8.0$ 、 $D/t=11.67$ ($t=9\text{mm}$) とする。

図 2.3-2 に平成 30 年度報告書に於ける既往鉄骨建物（1960～90 年代）の実態調査での最下層柱の幅厚比および径高さ比の分布を示す。 $L/D=8.0$ 、 $D/t=11.67$ ($t=9\text{mm}$) は図 2.3-2 の矢印（↓）に相当し、幅厚比では平均的な値で、径高さ比では分布の上限的な値である。

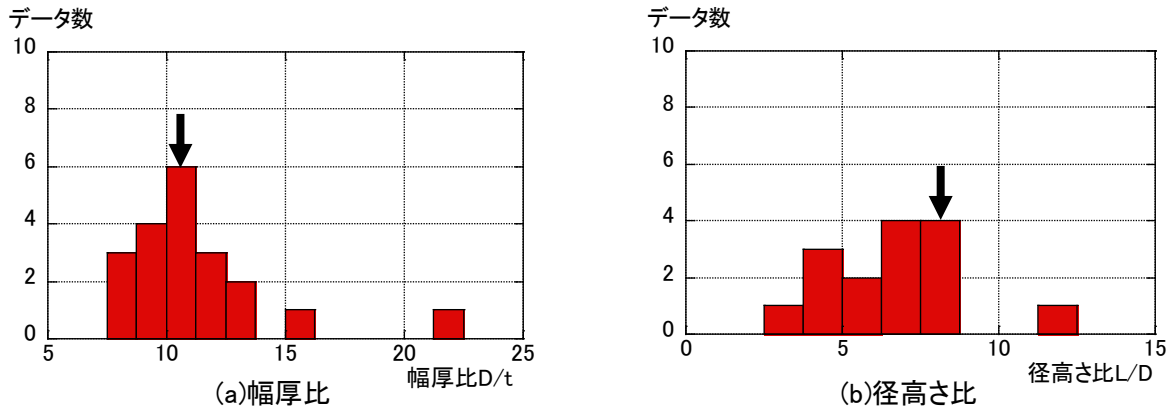


図 2.3-2 既往鉄骨造建物の柱の幅厚比・径高さ比分布

外力因子は、実験データがほとんど無い荷重条件である変動軸力および変動変位振幅（変動振幅）を中心に考える。表 2.3-1 に試験体一覧を、表 2.3-2 に試験体の諸耐力一覧を、図 2.3-3 に平成 30 年度実験結果（一定振幅： $L/D=8.0$ 、 $D/t=11.67$ ）を、図 2.3-4 に $M-N$ 関係を示す。

以下に、試験体の実験目的について示す。

【変動軸力下での多数回繰り返し特性の把握】

No.4 と No.5 試験体の変動軸力下での構造特性把握のための試験体である。変動軸力は、平成 30 年度での応答解析モデル S30 の代表的な柱（C2、C3）の変動軸力（軸力比 $n=0.35\pm 0.42$ ）を参考にして、 $n=0.3\pm 0.5$ とする。また、平成 30 年度の実験では最大の軸力比（一定）が 0.6 であったため、No.3 試験体で $n=0.8$ （一定）を実施して高軸力下での基本性能を確認する。なお、変動軸力は変形角が 1/100 に到達した時点で最大（最小）軸力となり、その後は一定になるようにして与える（図 2.3-5）。

【変動振幅下に対する多数回繰り返し特性の把握】

No.6 と No.7 試験体の変動振幅下での線形累積損傷則（Miner 則）の検証のための試験体である。変動振幅の最大値は $R=1/33$ 、最小値は $R=1/100$ とし、令和 1 年度に実施した CFT 試験体での変動振幅スケジュールを参考として、 $R=1/100\rightarrow 1/75\rightarrow 1/50\rightarrow 1/33\rightarrow 1/50\rightarrow 1/75\rightarrow 1/100$ を 1 つの大振幅ブロックとする。また、平成 30 年度では、 $L/D=8.0$ 、 $D/t=11.67$ ($t=9\text{mm}$) の試験体に於いて、一定軸力（軸力比 $n=0.3$ 、0.6）で部材角振幅 $R=1/75$ 、 $1/50$ の 2 水準を実施している。Miner 則の検証のためには、実験結果に於いて、変動振幅の最大および最小を抑えておく方が良い。このため、No.1 と No.2 試験体を一定軸力（軸力比 $n=0.3$ 、0.6）で実施することにより、変動振幅の最大値での実験結果を得るものとする。また、最小振幅 $R=1/100$ の実験結果は得られていないので、各一定軸力での実験結果から外挿した値を用いるものとする。

また、大振幅ブロックの载荷の前に $R=1/400 \rightarrow 1/400 \rightarrow 1/200 \rightarrow 1/200 \rightarrow 1/200 \rightarrow 1/400 \rightarrow 1/400$ の小振幅ブロックを実施し、小振幅ブロックと大振幅ブロックを合わせた载荷履歴を 1 ブロックとする (図 2.3-6)。

表 2.3-1 実験パラメータ

	試験体	幅厚比 D/t	径高さ比 L/D	軸力比 n		振幅(レベル) R		
1	M11-3C-RLL	11.67 ($t=9\text{mm}$)	8.0	一定	0.3	一定	極大 1/33	
2	M11-6C-RLL				0.6		極大 1/33	
3	M11-8C-RS				0.8		小 1/75	
4	M11-3V-RL			変動	0.3±0.5		大 1/50	
5	M11-3V-RS						小 1/75	
6	M11-6C-V			一定		0.6	変動	1/100~1/33
7	M11-3C-V					0.3		

※試験体名称

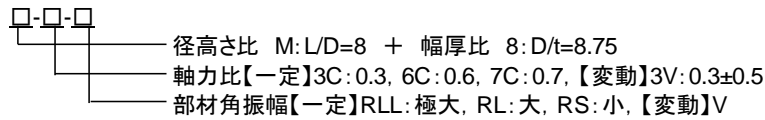


表 2.3-2 諸耐力一覧

	試験体	幅厚比 D/t	径高さ比 L/D	軸力 ^{*1}		全塑性耐力 ^{*2}	
				導入軸力 N_a (kN)	軸力比 n	曲げモーメント $M_p(n)$ (kNm)	せん断力 $Q_p(n)$ (kN)
1	M11-3C-RLL	11.67 ($t=9\text{mm}$)	8.0	394	0.3	41.8	99.4
2	M11-6C-RLL			788	0.6	25.9	61.6
3	M11-8C-RS			1051	0.8	13.4	31.8
4	M11-3V-RL					41.8	99.4
5	M11-3V-RS			788	0.6	25.9	61.6
6	M11-6C-V						
7	M11-3C-V			394	0.3	41.8	99.4

*1: 最大軸力の値。

*2: 導入軸力での値。

部材角振幅 R [rad]

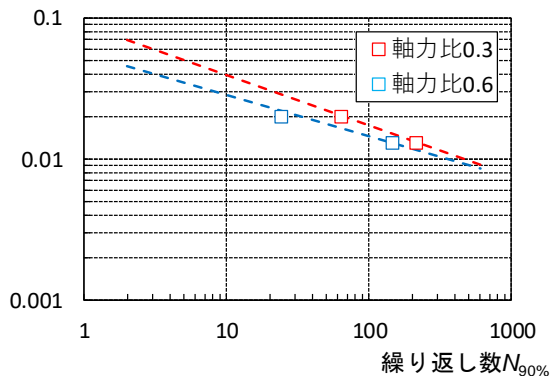


図 2.3-3 H30 年度の実験結果

N [kN]

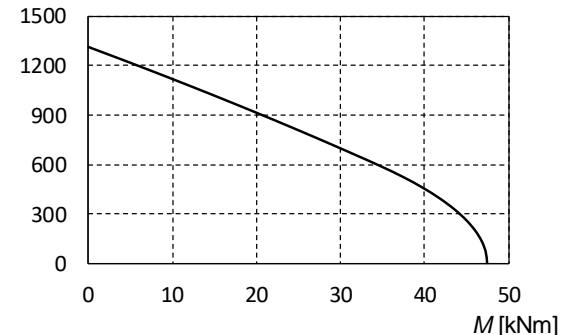


図 2.3-4 M-N 関係

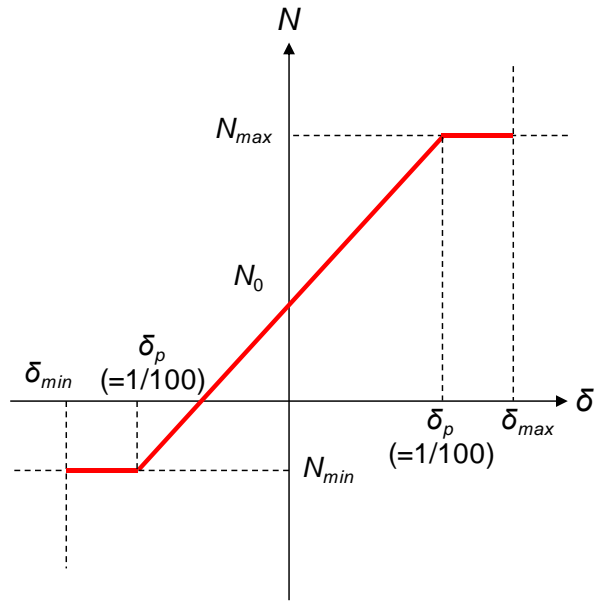


図 2.3-5 変動軸力の作用方法

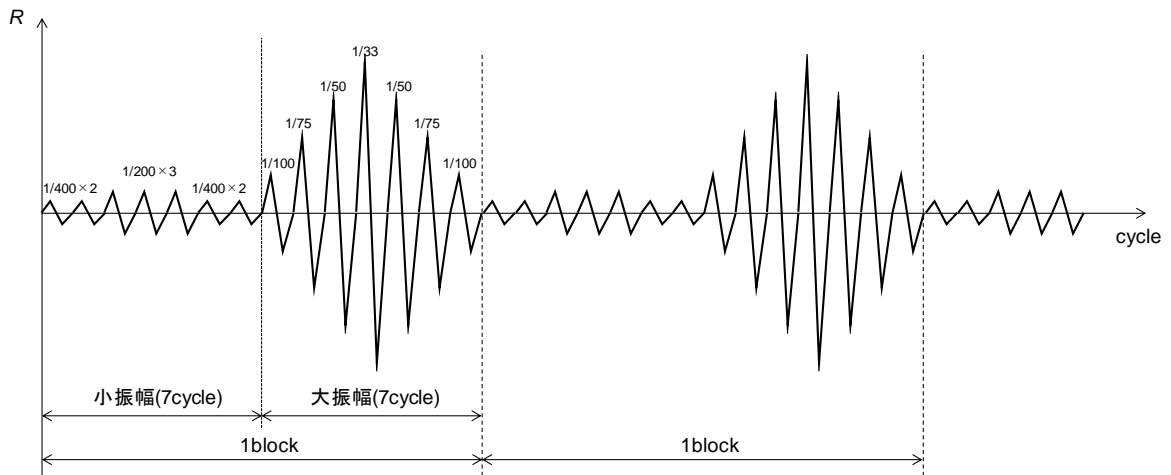


図 2.3-6 変動振幅の载荷履歴

3) 使用材料

(a) 鋼素材の材料試験

試験体に用いる鋼材について JIS Z 2241 に従い引張試験を実施した。

表 2.3-3 に使用材料の機械的性質、図 2.3-7 に応力-ひずみ関係を示す。

表 2.3-3 鋼材の機械的性質

	使用部位	実測板厚 mm	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %
PL9	柱	8.78	380	528	72	26

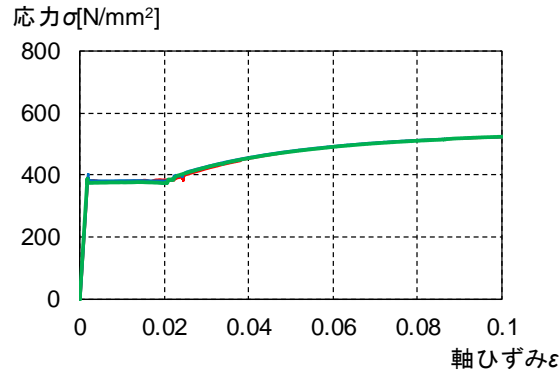


図 2.3-7 応力-ひずみ関係

(b) 柱鋼管の短柱圧縮試験

柱試験部分の圧縮特性把握のため、アムスラーによる短柱圧縮試験を実施する。試験体の高さは柱せいの3倍とし、2体の圧縮試験を実施した。図 2.3-8 に圧縮試験の概要、写真 2.3-1 に圧縮試験状況を示す。

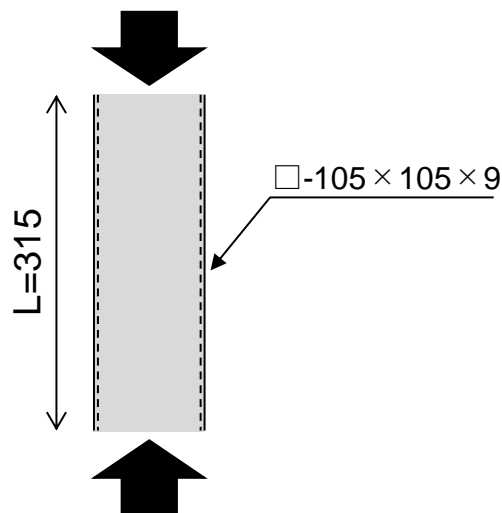


図 2.3-8 短柱圧縮試験概要

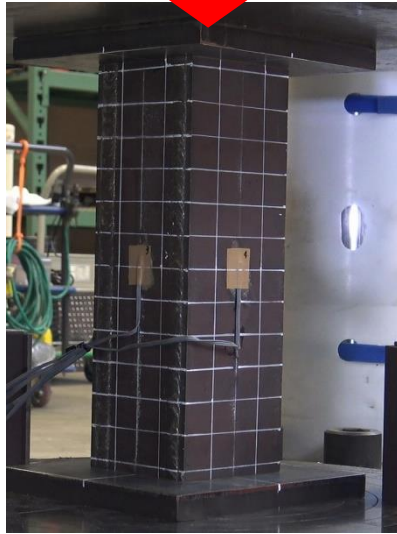


写真 2.3-1 短柱圧縮試験の状況

図 2.3-9 に短柱圧縮試験での圧縮応力と軸ひずみの関係、写真 2.3-2 に最終破壊状況を示す。図 2.3-9 には参考として素材試験で得られた降伏点の値を示す。なお、圧縮応力は実板厚を用いて計算した柱断面を用いて評価をした。また、軸ひずみは試験体の軸縮みを柱高さ(315mm)で除した値である。

図 2.3-9 より、素材試験より得られた降伏点よりもやや大きな荷重で短柱が降伏していることがわかる。その後は、ひずみ硬化の影響により荷重が上昇するが、局部座屈が生じることで素材試験よりも小さな軸ひずみ 0.07 程度から荷重の低下が始まっている。

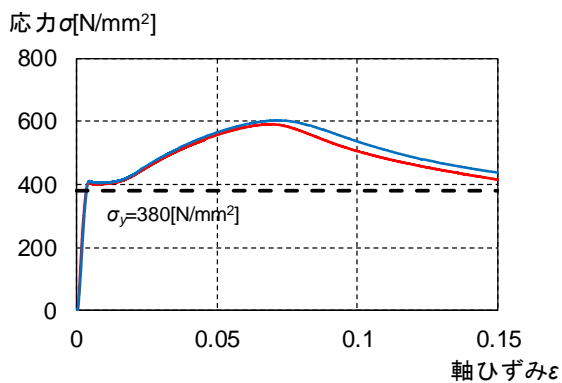


図 2.3-9 応力-軸ひずみ関係



写真 2.3-2 最終破壊状況

4) 実験方法

(a) 加力方法

加力装置を図 2.3-10 に、加力状況を写真 2.3-3 に示す。加力は、建研式加力方法を採用し、反力床上に敷設した加力フレームの上に試験体を設置し、上下の加力フレームとベースプレートを緊結することで試験体を固定し、上部に取り付いた加力装置を介して、鉛直方向の 2000kN ジャッキにより軸力を導入した状態で、下部に取り付いた 500kN アクチュエーターにより水平方向の一定振幅載荷を行う。また、実験終了時は原則として試験体耐力が最大耐力に対して、70%に低下した時点までとする。

なお、変動振幅の試験体(M11-6C-V、M11-3C-V)については、破壊形式が異なったため(後述)、最大荷重からの低下率の評価方法が異なる。局部座屈の進展により荷重が低下した M11-6C-V 試験体は、大振幅ブロックの振幅ごと(1/100、1/75、1/50、1/33)に荷重を比較し、最大耐力からの低下率を確認した。き裂の進展により荷重が低下した M11-3C-V 試験体は、振幅が大きい領域ではき裂が閉じることによる荷重上昇が見られるが、振幅が小さい領域では荷重上昇が生じず、低下率がばらついたため、最大振幅時(1/33)の荷重のみで低下率を確認した。

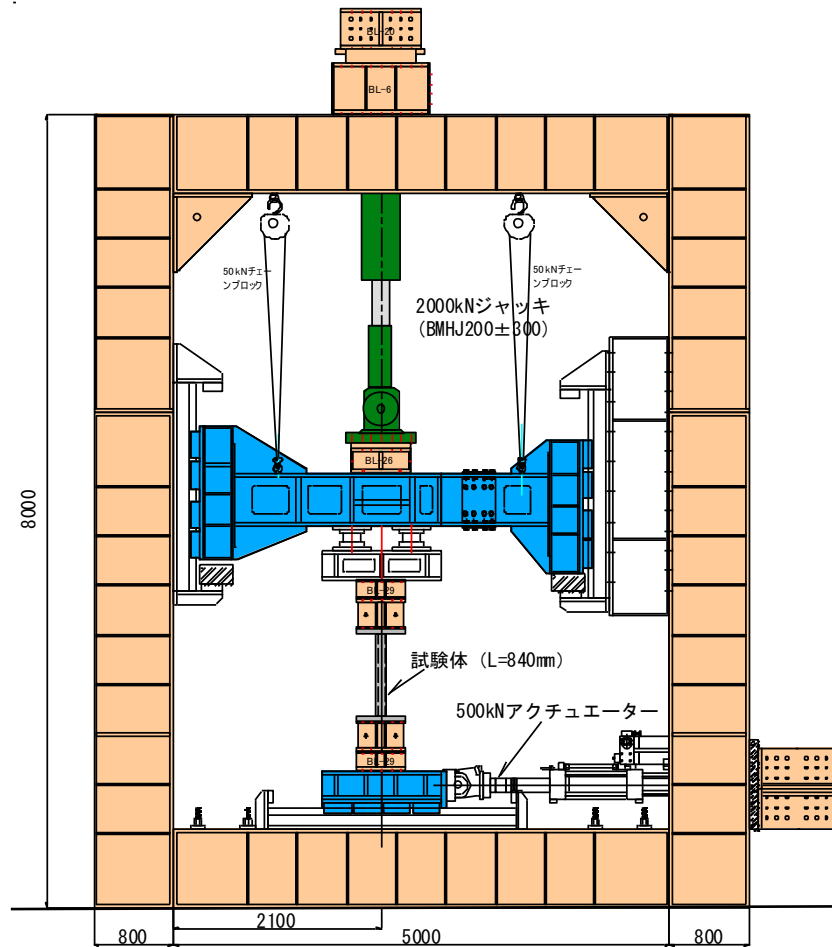
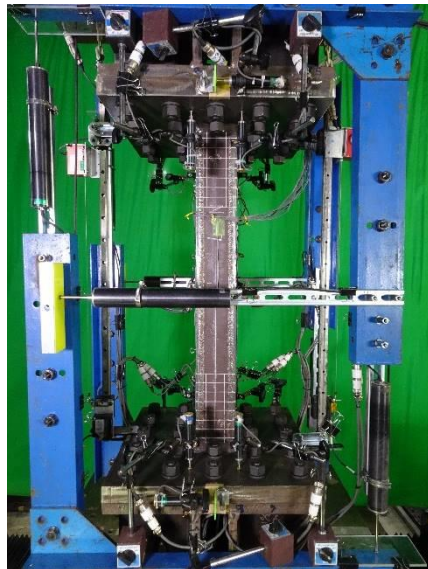


図 2.3-10 加力装置



(a)実験状況全景



(b)実験状況拡大

写真 2.3-3 実験状況

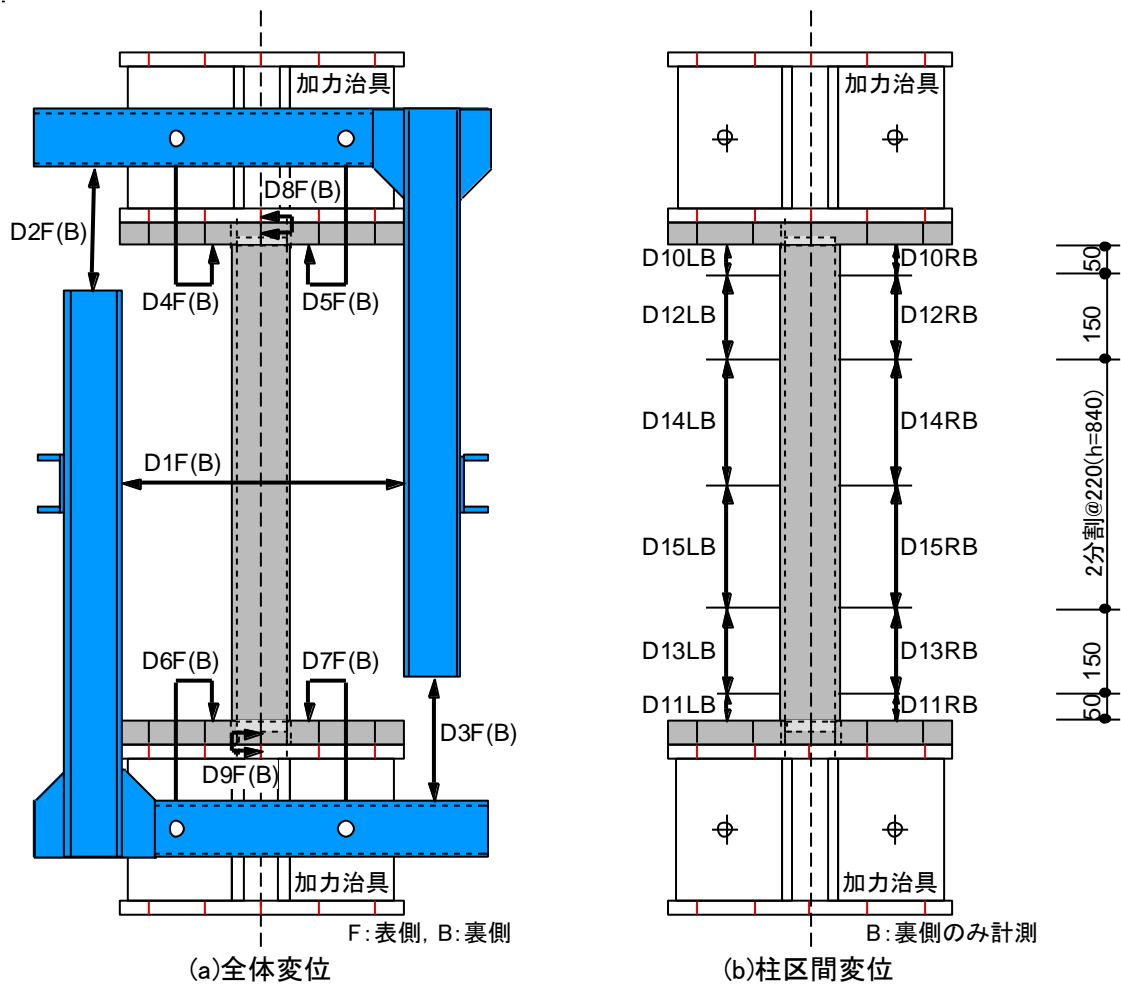
(b) 計測方法

表 2.3-4 に計測項目一覧、図 2.3-11 に変位計測位置、図 2.3-12 に局部座屈変形計測概要、図 2.3-13 にひずみ計測位置を示す。

計測は、試験体の作用荷重、柱部材の水平、鉛直、局部変形、区間伸び変形、鋼管フランジおよびウェブのひずみ等について行う。また、柱材端部の局部座屈高さについても計測を行う。実験時の変位振幅は、図 2.3-11 の図に従い、全体変形から回転変形を除くことにより求める。局部座屈高さについては、試験体の下半分についてのみ計測を行った。

表 2.3-4 計測項目一覧

計測項目	計測点数	計測点名称	備考	
荷重	柱せん断力	1	P	
	柱軸力	2	NL, NR	
	分力計	8	L1-X, L2-X, L3-X, L4-X L1-Z, L2-Z, L3-Z, L4-Z	分力計は計4台 (水平・鉛直方向)
	小計	11		
変形	柱水平方向変形	2	D1F, D1B	
	柱軸方向変形	4	D2F, D3F D2B, D3B	
	局部浮き上がり変形	8	D4F, D5F, D6F, D7F D4B, D5B, D6B, D7B	
	試験体と加力治具のずれ変形	4	D8F, D9F D8B, D9B	
	柱区間変形	12	D10LB, D11LB, D12LB, D13LB, D14LB, D15LB D10RB, D11RB, D12RB, D13RB, D14RB, D15RB	
	局部座屈変形	2	LB-L, LB-R	
小計	32			
ひずみ	柱フランジ	6	SF1L, SF2L, SF3L SF1R, SF2R, SF3R	
	柱ウェブ	2	SW1F, SW1B	
	小計	8		
計測点数合計	51			



$\delta = \delta_t - \delta_r$

$\delta_t = D1(F, R) - (D8(F, R) + D9(F, R))$

$\delta_r = \theta \times h$

$\theta = (\theta_1 + \theta_2) / 2$

$\theta_1 = (D4(F, B) - D5(F, B)) / d$

$\theta_2 = (D6(F, B) - D7(F, B)) / d$

*: $D0(F, B)$ は表裏の平均値を示す。

変位振幅 全体変形 回転変形

図 2.3-11 変位計測位置

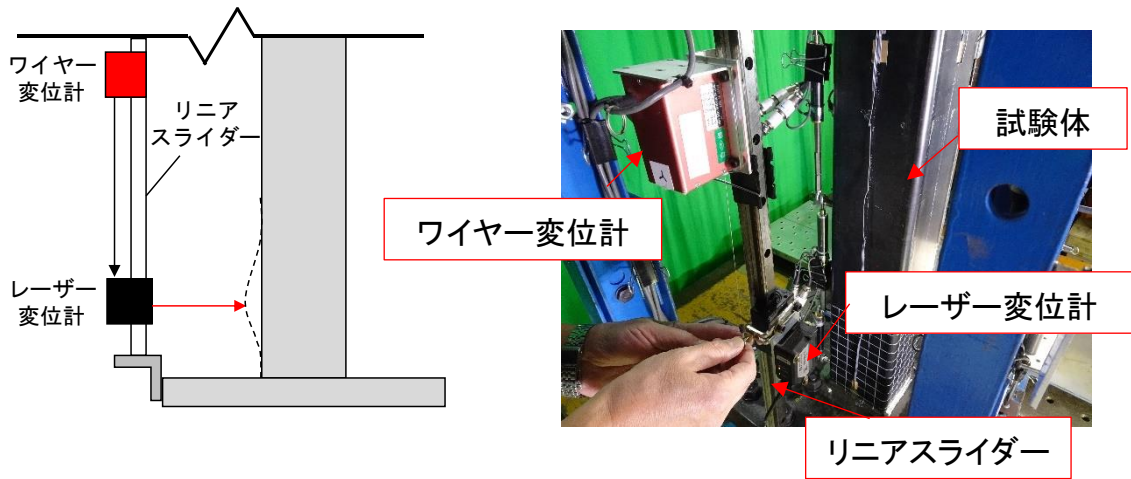


図 2.3-12 局部座屈変形計測概要

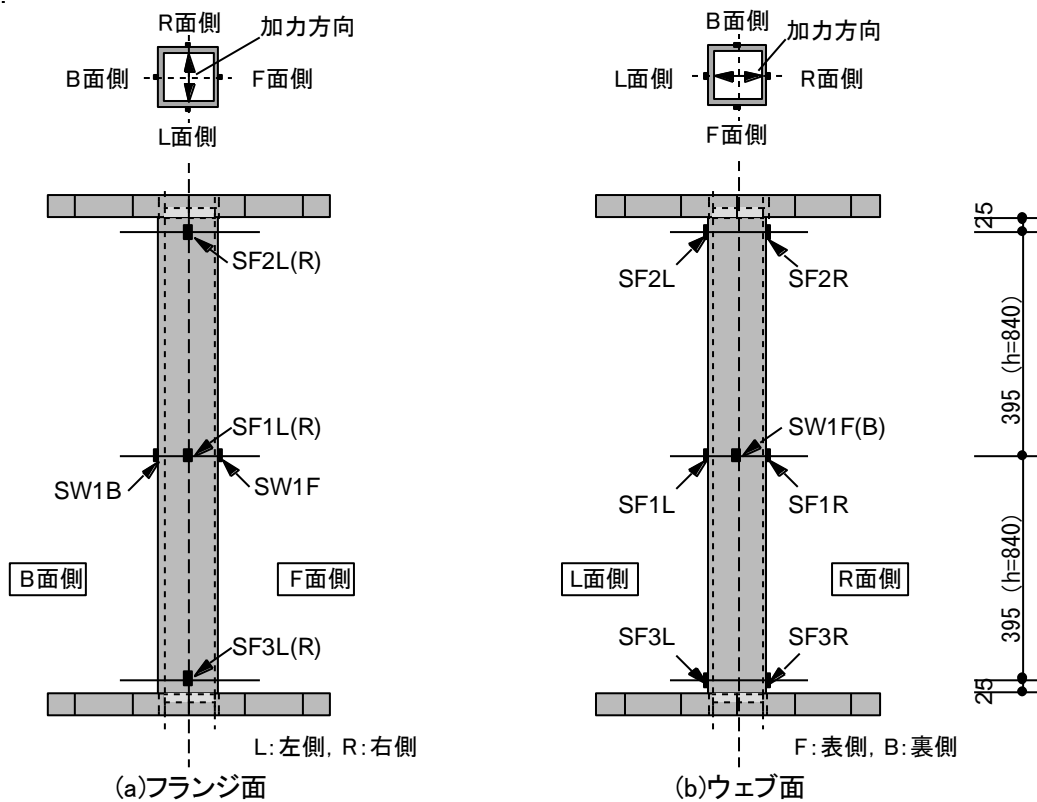


図 2.3-13 ひずみ計測位置

(2) 実験結果

1) 実験経過および破壊性状

以下に、各試験体の実験経過を示す。

M11-3C-RLL 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.3$, $R=1/33$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、 ± 12 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 4mm 程度であり、柱頭・柱脚の引張側コーナー付近の溶接熱影響部（以下、熱影響部）に長さ 15mm 程度のき裂（ヘアクラック）が見られた。その後、き裂の進展により荷重が低下し、+21 サイクルおよび -22 サイクルで荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的には、き裂が柱の全幅に進展し、幅は 3mm 程度であった。

M11-6C-RLL 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.6$, $R=1/33$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、 ± 6 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 10mm 程度であり、熱影響部にき裂は見られなかった。その後、局部座屈の進展により荷重が低下し、 ± 10 サイクルで荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的に、熱影響部にき裂は生じなかったが、荷重が最大荷重の 70%を下回った+14 サイクルでは局部座屈の進展により、柱フランジとウェブの溶接部にき裂が生じた。最終的な座屈波の高さは 25mm 程度となった。

M11-8C-RS 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.8$, $R=1/75$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、-14 サイクルおよび+16 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 10mm 程度であり、熱影響部にき裂は見られなかった。また、最大荷重時には、試験体全体が「く」の字型に曲がる全体座屈のような変形が見られ始めた。その後、局部座屈の進展および全体座屈の進展により荷重が低下し、-22 サイクルおよび+23 サイクルで荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的に、+31 サイクルで荷重が最大荷重の 70%を下回った。最終的な局部座屈波の高さは 22mm 程度となった。

M11-3V-RL 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.3\pm 0.5$, $R=1/50$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+19 サイクルおよび-22 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時は、正載荷時（ピーク時圧縮軸力）は局部座屈、負載荷時（ピーク時引張軸力）は熱影響部のき裂が確認された。正載荷時の座屈波高さは 4mm 程度であり、負載荷時の熱影響部のき裂は長さ 15mm 程度（ヘアクラック）であった。その後、正載荷時にも熱影響部のき裂が見られはじめ、特に負側のき裂の進展により荷重が低下し、-33 サイクルおよび+34 サイクルで荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的には、負載荷時にき裂が柱の全幅に進展し、幅は 5mm 程度であった。

M11-3V-RS 試験体 ($D/t=11.67$, $L/D=8.0$, $n=0.3\pm 0.5$, $R=1/75$) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、+11 サイクルおよび-21 サイクルで最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 1mm 程度であり、正載荷時（ピーク時圧縮軸力）、負載荷時（ピーク時引張軸力）ともに最大荷重時には目に見える損傷は確認されなかった。正載荷時は、荷重が最大荷重の 85%まで低下した+47 サイクルでも目に見える損傷は確認されず、荷重が最大荷重の 80%まで低下した+54 サイクルで熱影響部に長さ 40mm 程度のき裂（ヘアクラック）が確認された。負載荷時は、荷重が最大荷重の 95%を下回った-49 サイクルで熱影響部に長さ 15mm 程度のき裂（ヘアクラック）が確認され、-55 サイクルで荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的には、負載荷時にき裂が柱の全幅に進展し、幅は 4mm 程度であった。

M11-6C-V 試験体 ($D/t=11.67$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.3\pm 0.5$ 、 $R=$ 変動変位振幅) では、3 サイクル(1 ブロック目、振幅 1/200)で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、-39 サイクル(3 ブロック目、振幅 1/33)および+40 サイクル(3 ブロック目、振幅 1/50)で最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 10mm 程度であり、熱影響部にき裂は見られなかった。その後、局部座屈の進展により荷重が低下し、-67 サイクル(5 ブロック目、振幅 1/33)および+68 サイクル(5 ブロック目、振幅 1/50)で荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的に、+108 サイクル(8 ブロック目、振幅 1/50)で荷重が最大荷重の 70%を下回った。最終的な局部座屈波の高さは 24mm 程度となった。

M11-3C-V 試験体 ($D/t=11.67$ 、 $L/D=8.0$ 、 $n=0.3\pm 0.5$ 、 $R=$ 変動変位振幅) では、8 サイクル(1 ブロック目、振幅 1/100)で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、 ± 67 サイクル(5 ブロック目、振幅 1/33)で最大荷重に到達した。最大荷重時の座屈波高さは 2mm 程度であり、熱影響部に長さ 30mm 程度のき裂(ヘアクラック)が見られた。その後、き裂の進展により荷重が低下し、+151 サイクル(11 ブロック目、振幅 1/33)で荷重が最大荷重の 90%を下回った。最終的に、+179 サイクル(13 ブロック目、振幅 1/33)で荷重が最大荷重の 70%を下回った。最終的には、正載荷時にき裂が柱の全幅に進展し、幅は 4mm 程度であった。

以上より、荷重低下要因(破壊モード)としては、①柱頭・柱脚部の局部座屈、②溶接部のき裂進展、③全体座屈の 3 種類に分類でき、M11-8C-RS 試験体(①、③の併発)のように複数の荷重低下要因が併発しているものもある。写真 2.3-4~2.3-10 に実験終了後の各試験体の写真、写真 2.3-11 に上記破壊モードの代表的な試験体の柱脚部の拡大写真を示す。



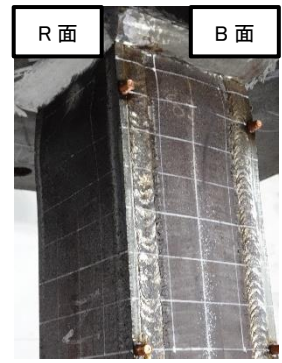
(a) B-L 面柱頭部詳細



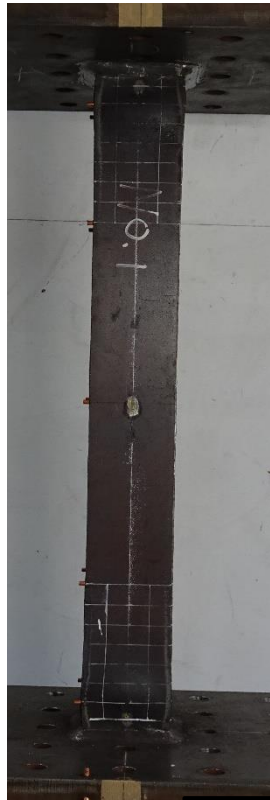
(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



L 面

(e) L 面全景



F 面

(f) F 面全景



R 面

(g) R 面全景



B 面

(h) B 面全景



(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

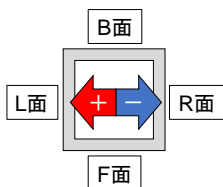


写真 2.3-4 M11-3C-RLL の最終状況(軸力比 0.3、振幅 1/33)



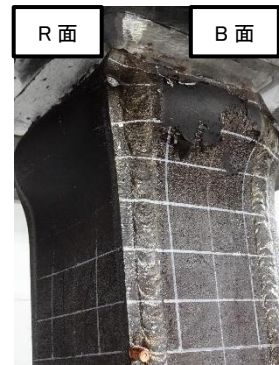
(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L面全景



(f) F面全景



(g) R面全景



(h) B面全景



(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

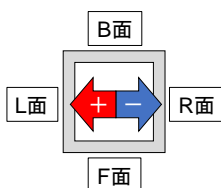


写真 2.3-5 M11-6C-RLL の最終状況(軸力比 0.6、振幅 1/33)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



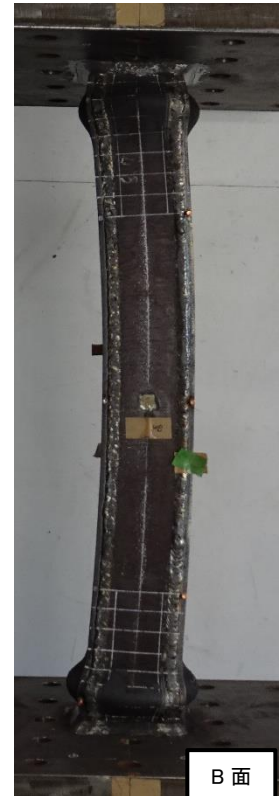
(e) L 面全景



(f) F 面全景



(g) R 面全景



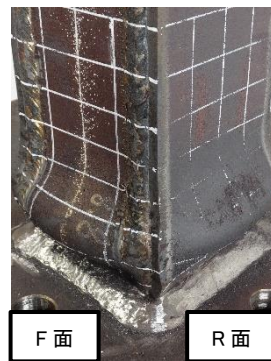
(h) B 面全景



(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

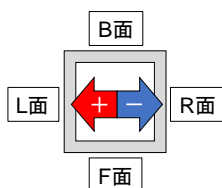


写真 2.3-6 M11-8C-RS の最終状況 (軸力比 0.8、振幅 1/75)



(a) B-L 面柱頭部詳細



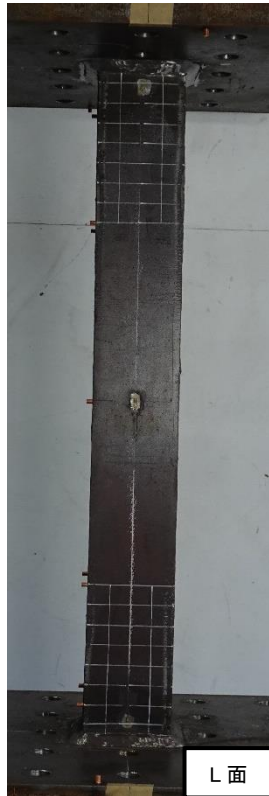
(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



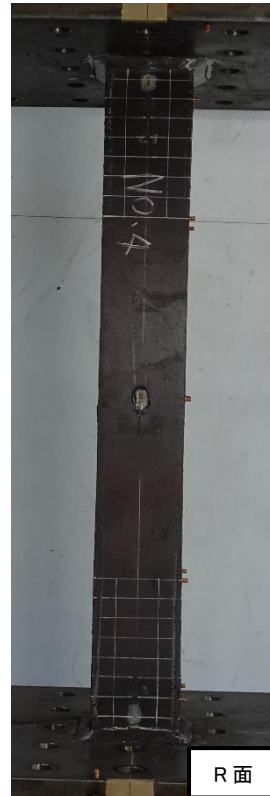
(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L 面全景



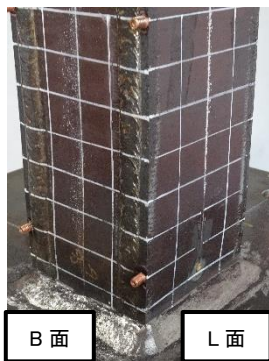
(f) F 面全景



(g) R 面全景



(h) B 面全景



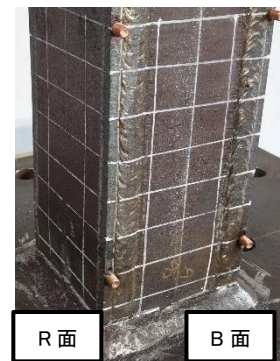
(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

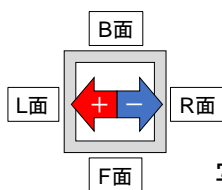
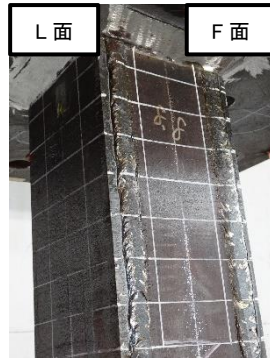


写真 2.3-7 M11-3V-RL の最終状況 (軸力比 0.3 ± 0.5 、振幅 $1/50$)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L 面全景



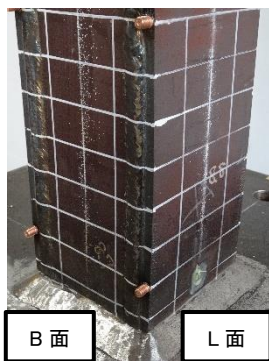
(f) F 面全景



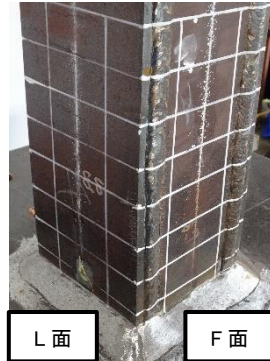
(g) R 面全景



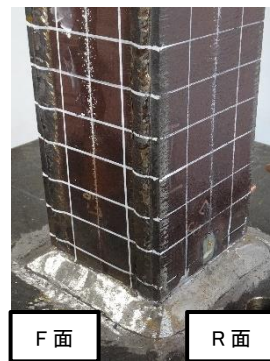
(h) B 面全景



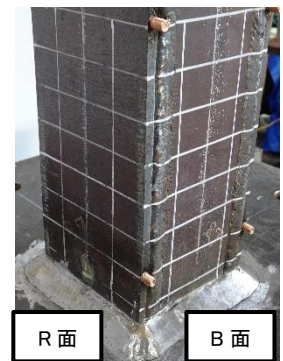
(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

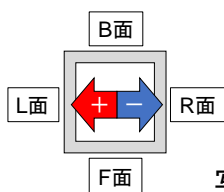
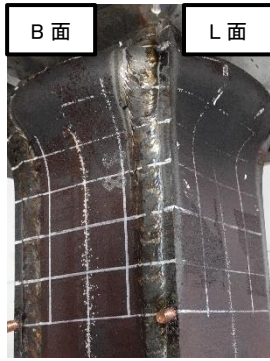
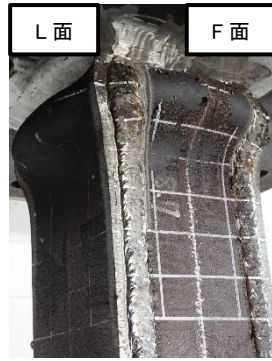


写真 2.3-8 M11-3V-RS の最終状況 (軸力比 0.3 ± 0.5 、振幅 $1/75$)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L面全景



(f) F面全景



(g) R面全景



(h) B面全景



(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

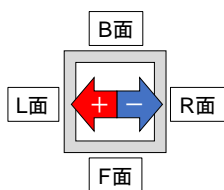


写真 2.3-9 M11-6C-V の最終状況(軸力比 0.6、変動振幅)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L 面全景



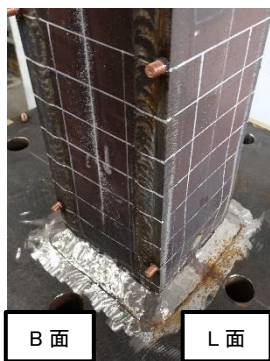
(f) F 面全景



(g) R 面全景



(h) B 面全景



(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

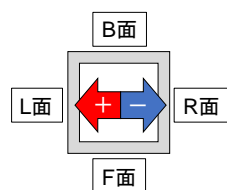


写真 2.3-10 M11-3C-V の最終状況(軸力比 0.3、変動振幅)

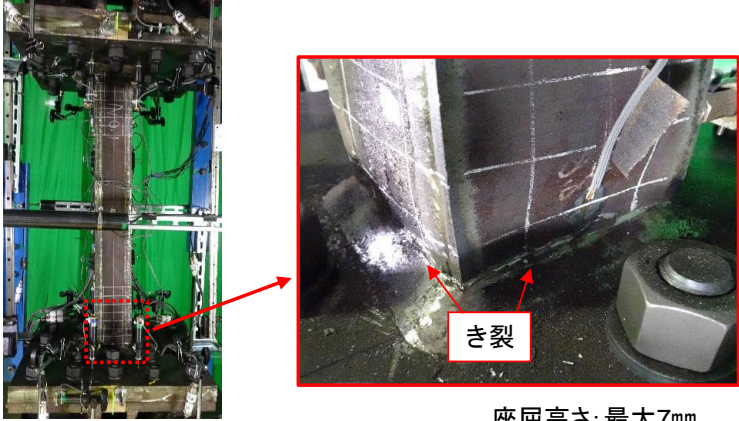
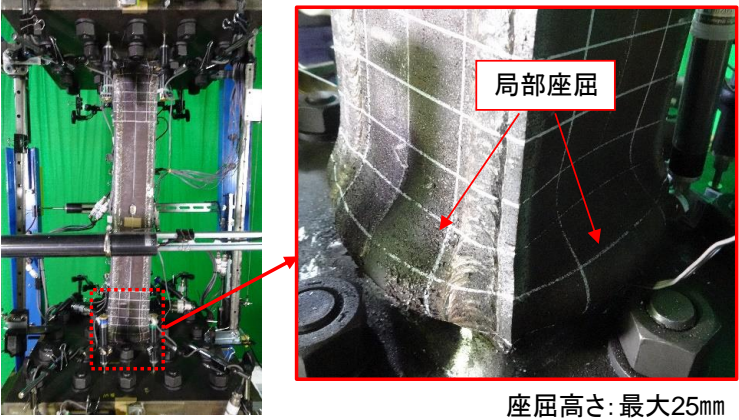
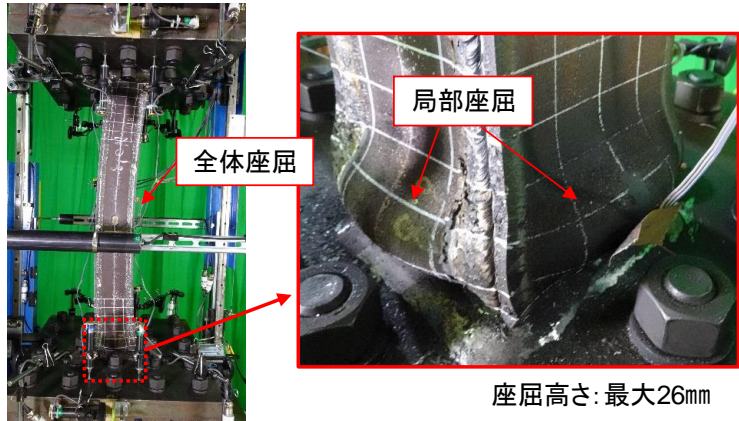
①荷重低下要因:き裂進展	
<p><u>M11-3C-RLL</u></p> <p>L/D=8.0 D/t=11.67 n=0.3 R=1/33</p>	 <p>座屈高さ: 最大7mm</p>
②荷重低下要因:局部座屈	
<p><u>M11-6C-RLL</u></p> <p>L/D=8.0 D/t=11.67 n=0.6 R=1/33</p>	 <p>座屈高さ: 最大25mm</p>
③荷重低下要因:全体座屈(+局部座屈)	
<p><u>M11-8C-RS</u></p> <p>L/D=8.0 D/t=11.67 n=0.8 R=1/75</p>	 <p>座屈高さ: 最大26mm</p>

写真 2.3-11 代表的な荷重低下要因

2) 一定振幅繰り返し載荷の実験結果

(a) 実験結果一覧

表 2.3-5~2.3-7 に一定振幅繰り返し載荷の実験結果一覧を示す。表 2.3-6 および 2.3-7 の計測値は観察を行ったサイクルでの値であり、表 2.3-5 の各荷重レベルのサイクルと近いサイクルでの値を示している。

表 2.3-5 一定振幅繰り返し載荷の実験結果一覧(荷重低下サイクル)

		最大荷重 Q_{max}	0.95 Q_{max}	0.9 Q_{max}	0.85 Q_{max}	0.8 Q_{max}	0.7 Q_{max}	
M11-3C-RLL D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.3 R=1/33	正	cycle	+12	+17	+20	+23	+25	-
		せん断力 Q[kN]	159.6	153.4	146.2	137.4	130.1	-
		軸ひずみ ϵ_v [%]	1.95	2.29	2.42	2.52	2.57	-
	負	cycle	-13	-17	-21	-23	-25	-27
		せん断力 Q[kN]	-152.8	-147.7	-137.9	-131.5	-123	-110
		軸ひずみ ϵ_v [%]	2.12	2.38	2.53	2.59	2.64	2.67
M11-6C-RLL D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.6 R=1/33	正	cycle	+6	+8	+9	+10	+11	+13
		せん断力 Q[kN]	139.4	134.6	129.3	122.7	115.9	101.0
		軸ひずみ ϵ_v [%]	4.17	5.34	6.01	6.81	7.63	9.49
	負	cycle	-6	-8	-9	-10	-11	-
		せん断力 Q[kN]	-136.1	-129.9	-124.3	-118.2	-111	-
		軸ひずみ ϵ_v [%]	4.45	5.66	6.42	7.20	8.06	-
M11-8C-RS D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.8 R=1/75	正	cycle	+16	+19	+22	+24	+27	+30
		せん断力 Q[kN]	117.3	112.5	106.6	101.9	93.9	84.2
		軸ひずみ ϵ_v [%]	4.71	5.39	6.17	6.76	7.74	8.83
	負	cycle	-14	-18	-21	-23	-25	-
		せん断力 Q[kN]	-113.3	-108.5	-102	-97.7	-93	-
		軸ひずみ ϵ_v [%]	4.40	5.27	6.04	6.62	7.24	-
M11-3V-RL D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.3±0.5 R=1/50	正	cycle	+19	+29	+33	-	-	-
		せん断力 Q[kN]	56.3	54.0	51.1	-	-	-
		軸ひずみ ϵ_v [%]	1.83	2.08	2.15	-	-	-
	負	cycle	-22	-30	-32	-33	-34	-35 ^{※1}
		せん断力 Q[kN]	-145.9	-138.9	-132.6	-127.1	-117.9	-97.0
		軸ひずみ ϵ_v [%]	1.40	1.57	1.60	1.61	1.63	1.62
M11-3V-RS D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.3±0.5 R=1/75	正	cycle	+11	+25	+35	+46	+53	+61
		せん断力 Q[kN]	42.4	40.5	38.4	36.2	34.4	30.7
		軸ひずみ ϵ_v [%]	0.67	0.79	0.83	0.86	0.88	0.90
	負	cycle	-21	-48	-54	-57	-59	-61
		せん断力 Q[kN]	-125.3	-119.3	-113.6	-107.7	-102.6	-87.9
		軸ひずみ ϵ_v [%]	0.37	0.46	0.47	0.47	0.47	0.46

※1: 0.7 Q_{max} 以下の値(66.5%)であるが参考値として示す

表 2.3-6 一定振幅繰り返し载荷の実験結果一覧(座屈波高さ)

		軸力 導入時	1 cycle	最大荷重 Q _{max}	0.95Q _{max}	0.9Q _{max}	0.85Q _{max}	0.8Q _{max}	0.7Q _{max}	破壊モード	
M11-3C-RLL	正	cycle	0	+1	+13	+18	+21	+24	+26	-	き裂進展
		R [mm]	0.6	0.8	3.1	4.5	5.1	5.6	5.8	-	
	負	cycle	-	-1	-13	-18	-22	-24	-26	-28	
		L [mm]	-	0.3	4.0	5.3	6.2	6.4	6.8	7.0	
M11-6C-RLL	正	cycle	0	+1	+7	+9	+10	+11	+12	+14	局部座屈
		R [mm]	0.3	0.1	9.7	13.9	16.3	18.6	20.8	25.2	
	負	cycle	-	-1	-7	-9	-10	-11	-12	-	
		L [mm]	-	0.3	10.0	14.4	16.7	18.6	20.9	-	
M11-8C-RS	正	cycle	0	+1	+15	+20	+23	+25	+28	+31	局部座屈 + 全体座屈
		R [mm]	0.5	0.4	5.0	8.3	11.4	13.5	16.4	19.3	
	負	cycle	-	-1	-15	-19	-22	-24	-26	-	
		L [mm]	-	0.2	9.9	14.1	17.3	19.6	21.9	-	
M11-3V-RL	正	cycle	0	+1	+23	+30	+34	-	-	-	き裂進展
		R [mm]	0.6	0.6	3.7	4.3	4.6	-	-	-	
	負	cycle	-	-1	-24	-31	-33	-34	-	-35 ^{*1}	
		L [mm]	-	0.6	2.0	2.9	3.3	3.7	-	4.3	
M11-3V-RS	正	cycle	0	+1	+15	+26	+36	+47	+54	+62	き裂進展
		R [mm]	0.5	0.5	1.0	1.1	1.2	1.5	1.5	1.3	
	負	cycle	-	-1	-28	-49	-55	-58	-60	-62	
		L [mm]	-	0.7	0.7	1.2	1.5	1.5	1.7	2.2	

※1:0.7Q_{max}以下の値(66.5%)であるが参考値として示す

表 2.3-7 一定振幅繰り返し荷の実験結果一覧(き裂長さ・幅)

		最大荷重 Q _{max}	0.95Q _{max}	0.9Q _{max}	0.85Q _{max}	0.8Q _{max}	0.7Q _{max}	破壊モード	
M11-3C-RLL	正	cycle	+13	+18	+21	+24	+26	-	き裂進展
		長さ(幅)[mm]	-	30(1.0)	30(2.0)	50(2.0)	50(2.0)	-	
	負	cycle	-13	-18	-22	-24	-26	-28	
		長さ(幅)[mm]	15(HC)	40(0.5)	45(0.5)	105(2.0)	105(2.5)	105(3.0)	
M11-6C-RLL	正	cycle	+7	+9	+10	+11	+12	+14	局部座屈
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	-	-	
	負	cycle	-7	-9	-10	-11	-12	-	
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	-	-	
M11-8C-RS	正	cycle	+15	+20	+23	+25	+28	+31	局部座屈 + 全体座屈
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	-	-	
	負	cycle	-15	-19	-22	-24	-26	-	
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	-	-	
M11-3V-RL	正	cycle	+23	+30	+34	-	-	-	き裂進展
		長さ(幅)[mm]	-	-	10(HC)	-	-	-	
	負	cycle	-24	-31	-33	-34	-	-35 ^{※3}	
		長さ(幅)[mm]	15(HC)	20(2.0)	50(4.0)	50(5.0)	-	105(5.0)	
M11-3V-RS	正	cycle	+15	+26	+36	+47	+54	+62	き裂進展
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	40(HC)	40(HC)	
	負	cycle	-28	-49	-55	-58	-60	-62	
		長さ(幅)[mm]	-	25(HC)	50(3.0)	50(3.0)	60(3.0)	105(4.0)	

※1: HCはヘアクラックを示す。

※2: 「-」はき裂発生なしを示す。

※3: 0.7Q_{max}以下の値(66.5%)であるが参考値として示す

(b) 荷重変形特性(一定振幅)

図 2.3-14 に各試験体の荷重・変形関係、図 2.3-15 に部材角・軸縮み関係を示す。荷重・変形関係の縦軸は柱せん断力 Q 、横軸は柱部材角 R である。なお、図中の黒点線は $P\Delta$ 効果を考慮した全塑性耐力を示している。また、荷重・軸縮み関係の縦軸は柱の軸縮み変形を柱高さで除した軸縮み ε_v 、横軸は柱せん断力 Q である。

(b-1) 荷重・変形関係(図 2.3-14)

全ての試験体で、1 サイクル目に於ける柱頭・柱脚での曲げ降伏に伴い剛性が低下し、その後の載荷では鋼材のひずみ硬化により荷重が増加して、最大荷重に到達している。最大荷重以降では、荷重低下要因が①柱頭・柱脚部の局部座屈、②溶接部のき裂進展、③全体座屈の3種類となり(併発している試験体あり)、荷重低下要因を試験体毎にまとめると次のようになる(写真 2.3-11 を参照)。

また、全試験体ともに、荷重が最大荷重の 70% に低下したサイクルにおいても、全塑性耐力を上回っており、ほとんどの試験体において 1 サイクル目の荷重も上回っていた。

【①：柱頭・柱脚部の局部座屈】

○軸力比：0.6、0.8

(試験体名称) M11-6C-RLL、M11-8C-RS(③と併発)

【②：溶接部のき裂進展】

○軸力比：0.3、0.3±0.5

(試験体名称) M11-3C-RLL、M11-3V-RL、M11-3V-RS

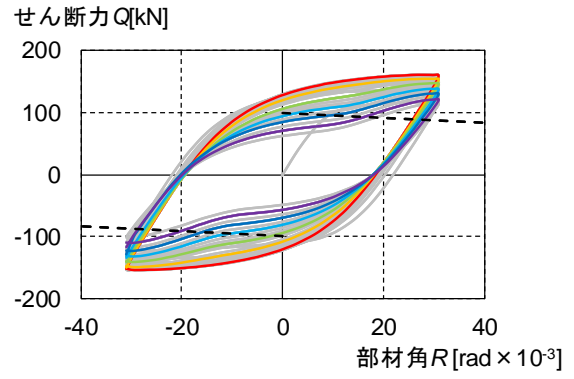
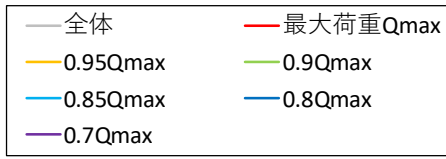
【③：全体座屈】

○軸力比：0.8

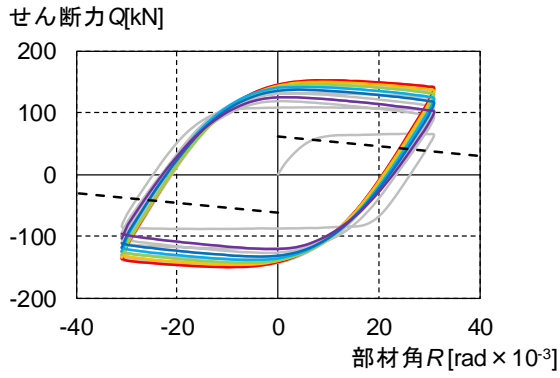
(試験体名称) M11-8C-RS(①と併発)

(b-2) 荷重・軸縮み関係(図 2.3-15)

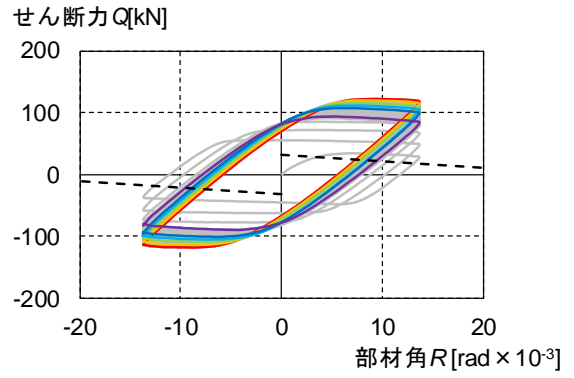
荷重・軸縮み関係では、前述の荷重低下要因により異なる性状を示す。①柱頭・柱脚部の局部座屈および③全体座屈では、最大荷重以降も軸縮み量が増加して終局となるが、②溶接部のき裂進展では、最大荷重近傍までは軸縮み量が増加するが、それ以降はき裂が進展するため、軸縮み量の増加は止まる傾向にある。



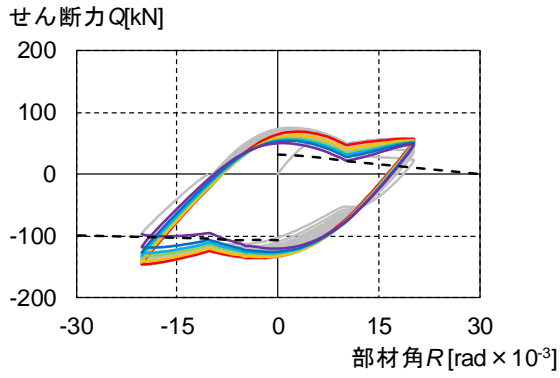
(a)M11-3C-RLL



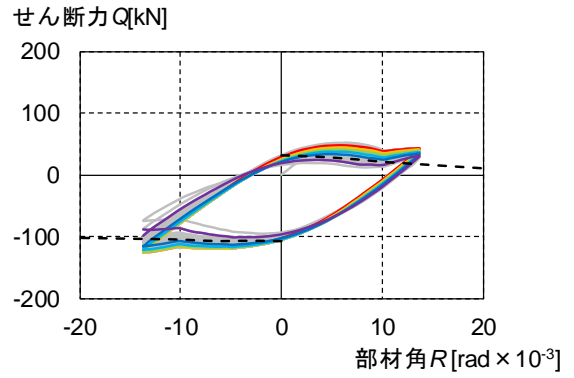
(b)M11-6C-RLL



(c)M11-8C-RS

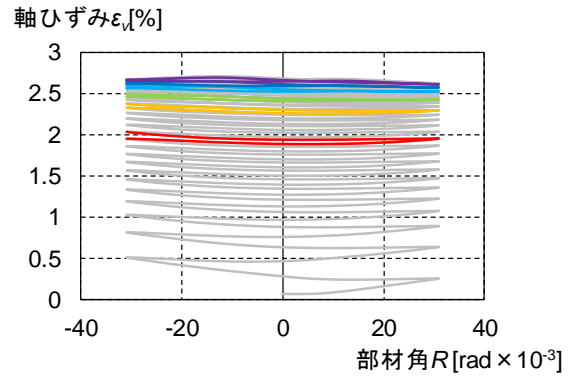
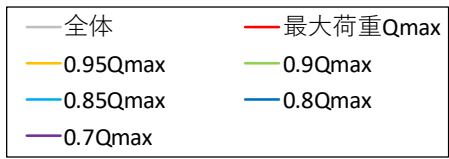


(d)M11-3V-RL

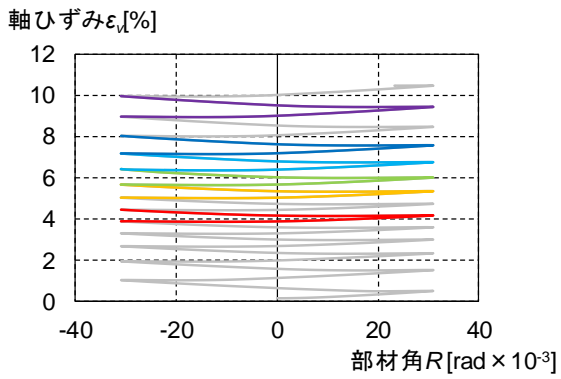


(e)M11-3V-RS

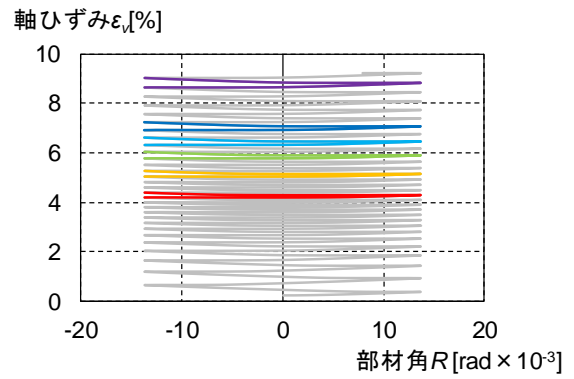
図 2.3-14 荷重・変形関係



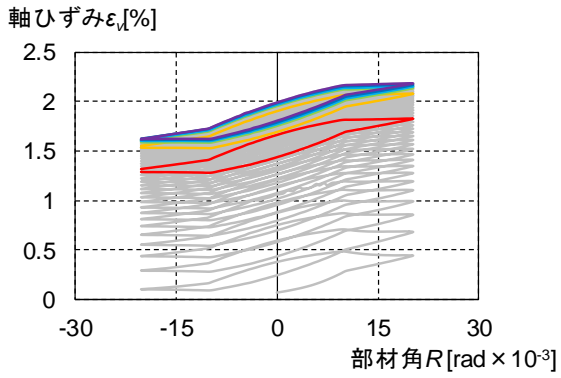
(a)M11-3C-RLL



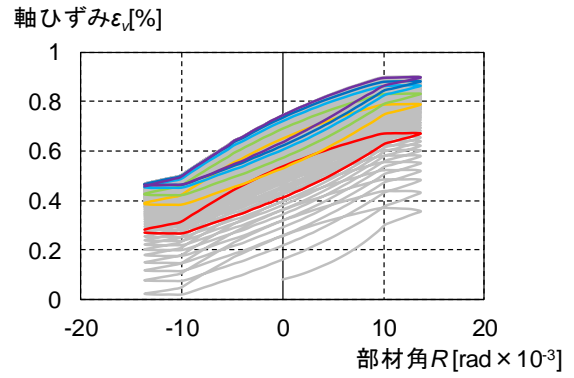
(b)M11-6C-RLL



(c)M11-8C-RS



(d)M11-3V-RL



(e)M11-3V-RS

図 2.3-15 部材角・軸ひずみ関係

(c) 多数回繰り返し特性(一定振幅)

各サイクルピーク変位での荷重（以下、ピーク荷重）の推移を図 2.3-16 に、軸縮みおよび座屈波高さの推移を図 2.3-17、2.3-18 に示す。また、図中には荷重低下の主要因（き裂進展、座屈）を併記した。図 2.3-16 中の赤、青の点線はそれぞれ正載荷、負載荷時の全塑性耐力を示している。なお、座屈波高さは正載荷・負載荷それぞれにおいて圧縮曲げが作用する面の最大値を示している。

(c-1) 各サイクルピークでの荷重の推移(図 2.3-16)

荷重低下の要因がき裂進展となる試験体では、き裂進展が徐々に大きくなるため、荷重の低下割合が増加し、最終的には急激に荷重が低下している。

荷重低下の要因が局部座屈および全体座屈となる試験体は、最大荷重以降は一定の傾きで荷重が低下する傾向にある。

(c-2) 各サイクルピークでの軸縮みおよび座屈波高さの推移(図 2.3-17、図 2.3-18)

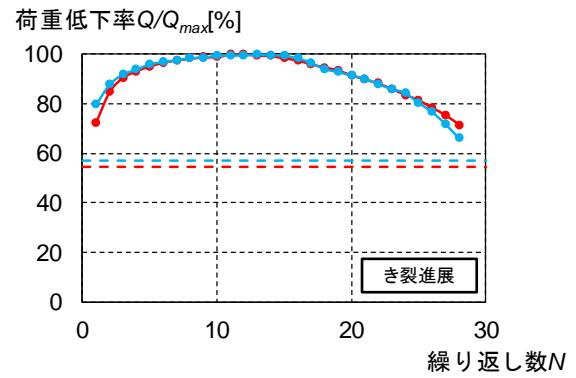
軸縮みに関して、荷重低下の主要因がき裂進展となる試験体は、最大荷重以降にはほぼ一定となり、軸縮みが進まない傾向にある。

荷重低下の主要因が局部座屈となる試験体は、最大荷重付近で軸縮みの進展が小さくなり、荷重が 90%低下以降で進展が再び大きくなる傾向にある。

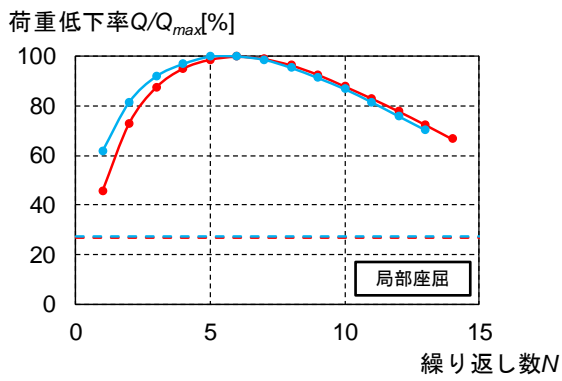
座屈波高さに関しては、計測時のばらつきはあるが、一定軸力の試験体においては軸縮みと同様な傾向にあり、荷重低下の主要因がき裂進展となる試験体では、最大荷重以降に座屈波高さの増加は小さくなった後に一定となり、座屈波高さが増大しない傾向にある。また、荷重低下の主要因が局部座屈となる試験体では、最大荷重以降も座屈波高さが大きくなる傾向にある。

変動軸力の試験体については、圧縮軸力を受ける際（正載荷）は一定軸力と同様であるが、引張軸力を受ける際（負載荷）はき裂の進展により荷重が低下していても、最大荷重以降に局部座屈が進展していることがわかる。

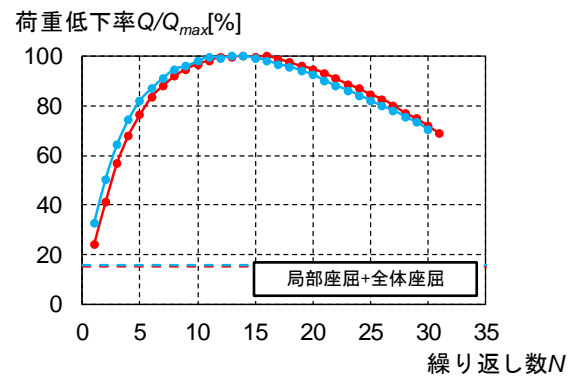
以上より、基本的に軸縮みと座屈波高さは連動しており、軸縮みの進展は局部座屈の進展による影響が大きいが、柱が引張軸力を受ける際は傾向が異なることがわかる。



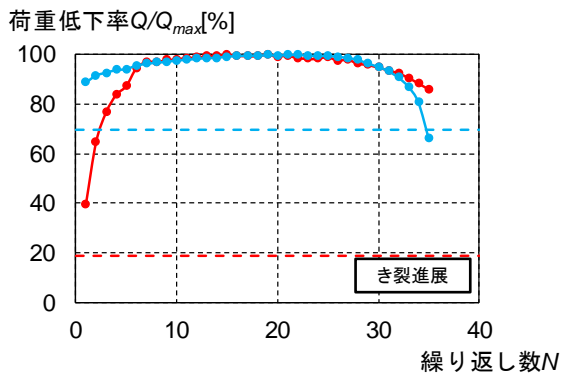
(a)M11-3C-RLL



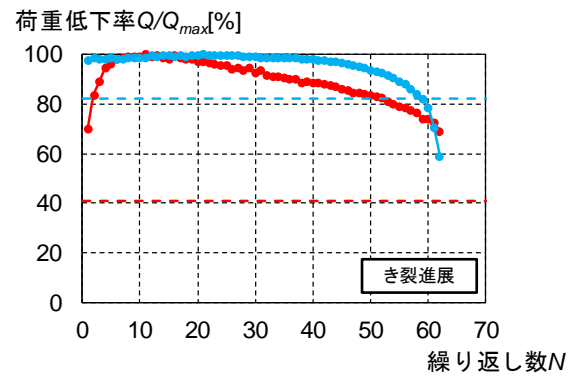
(b)M11-6C-RLL



(c)M11-8C-RS

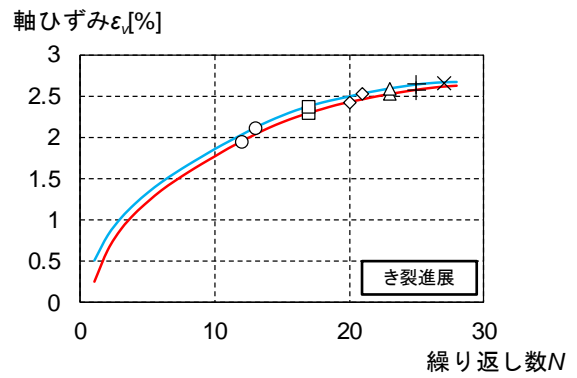
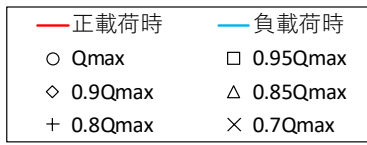


(d)M11-3V-RL

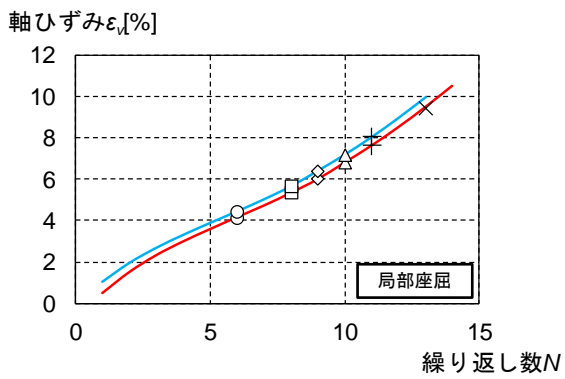


(e)M11-3V-RS

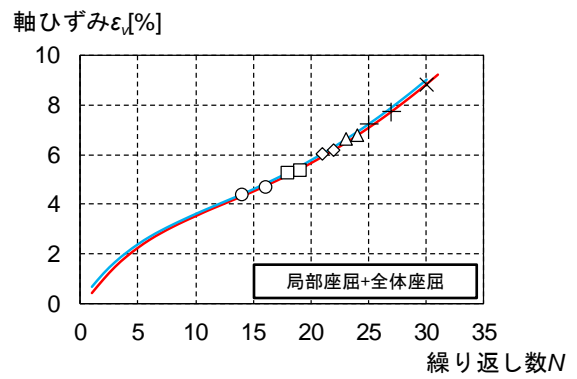
図 2.3-16 最大荷重の推移(一定振幅)



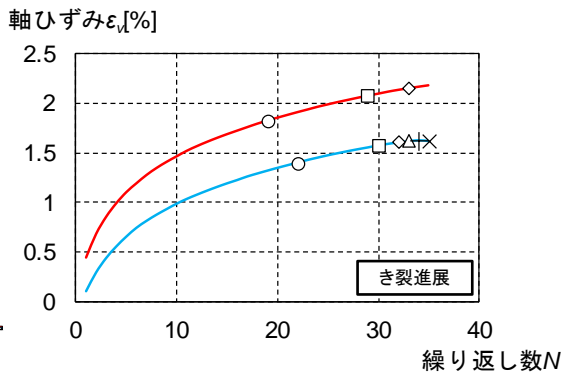
(a)M11-3C-RLL



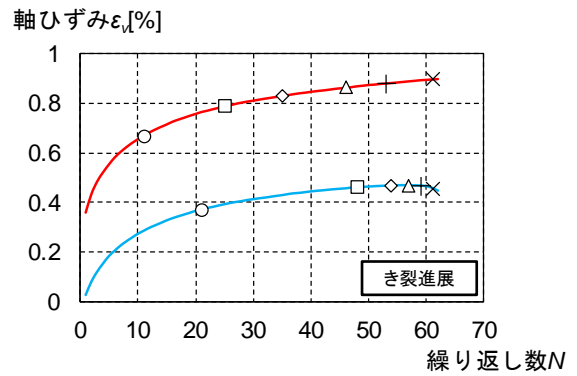
(b)M11-6C-RLL



(c)M11-8C-RS

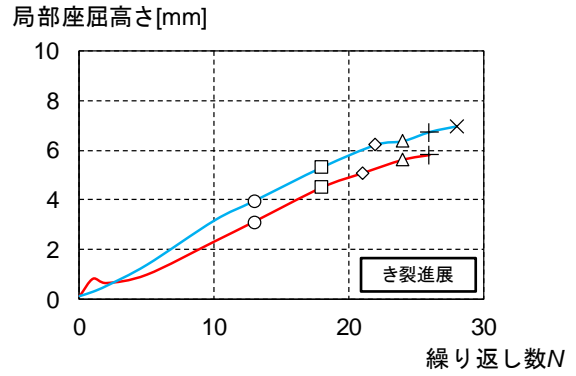
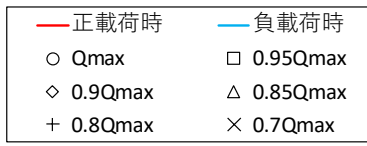


(d)M11-3V-RL

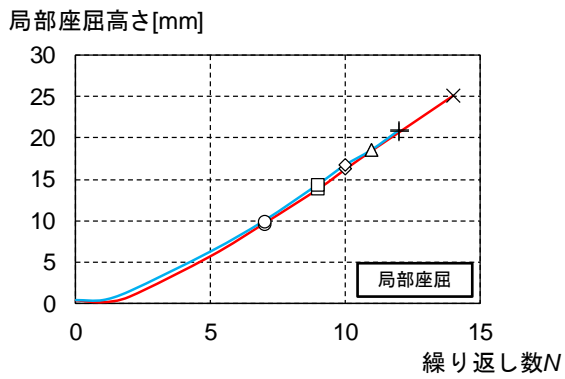


(e)M11-3V-RS

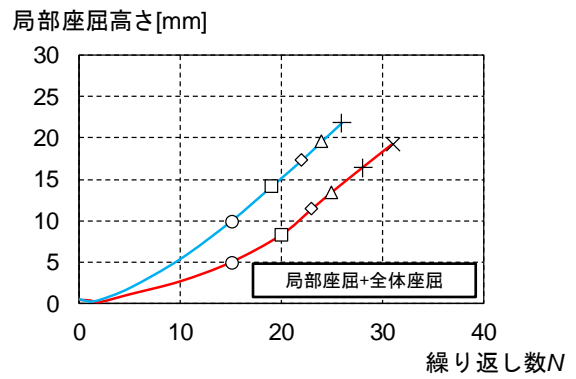
図 2.3-17 軸ひずみの推移(一定振幅)



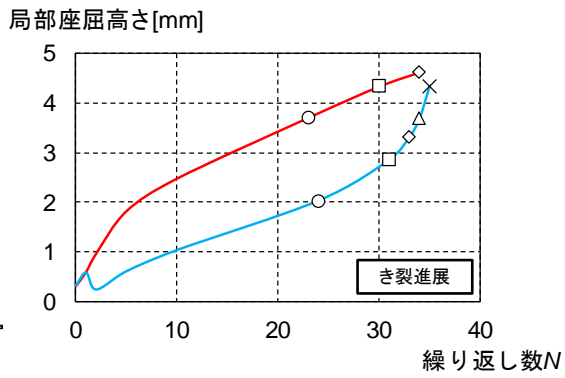
(a)M11-3C-RLL



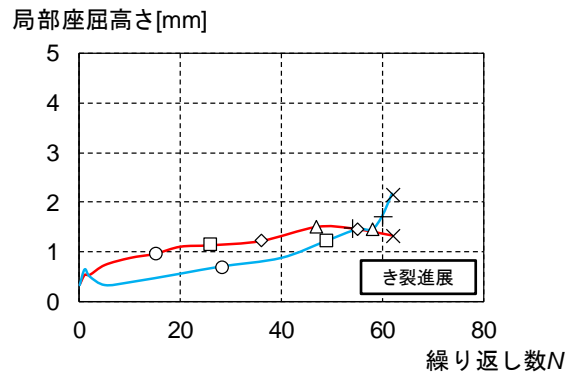
(b)M11-6C-RLL



(c)M11-8C-RS



(d)M11-3V-RL



(e)M11-3V-RS

図 2.3-18 局部座屈高さの推移(一定振幅)

(d) 曲率の分布

材軸方向の曲率分布を図 2.3-19 に示す。図は正載荷時の曲率分布で、曲げ降伏時、+1 サイクルピーク時および最大荷重 Q_{max} 時を示す。なお、柱頭・柱脚部の軸縮みが大きく曲率計測用の変位計が計測限界に到達した場合には、変位計を取り外し、該当区間の計測を終了している。

曲率分布の反曲点位置は、おおよそ試験体高さの中央に位置していることがわかる。また、全体座屈性状が見られた試験体 (M11-8C-RS) では、最大荷重時に曲率分布が試験体と同様に、「く」の字形の形状を示している。

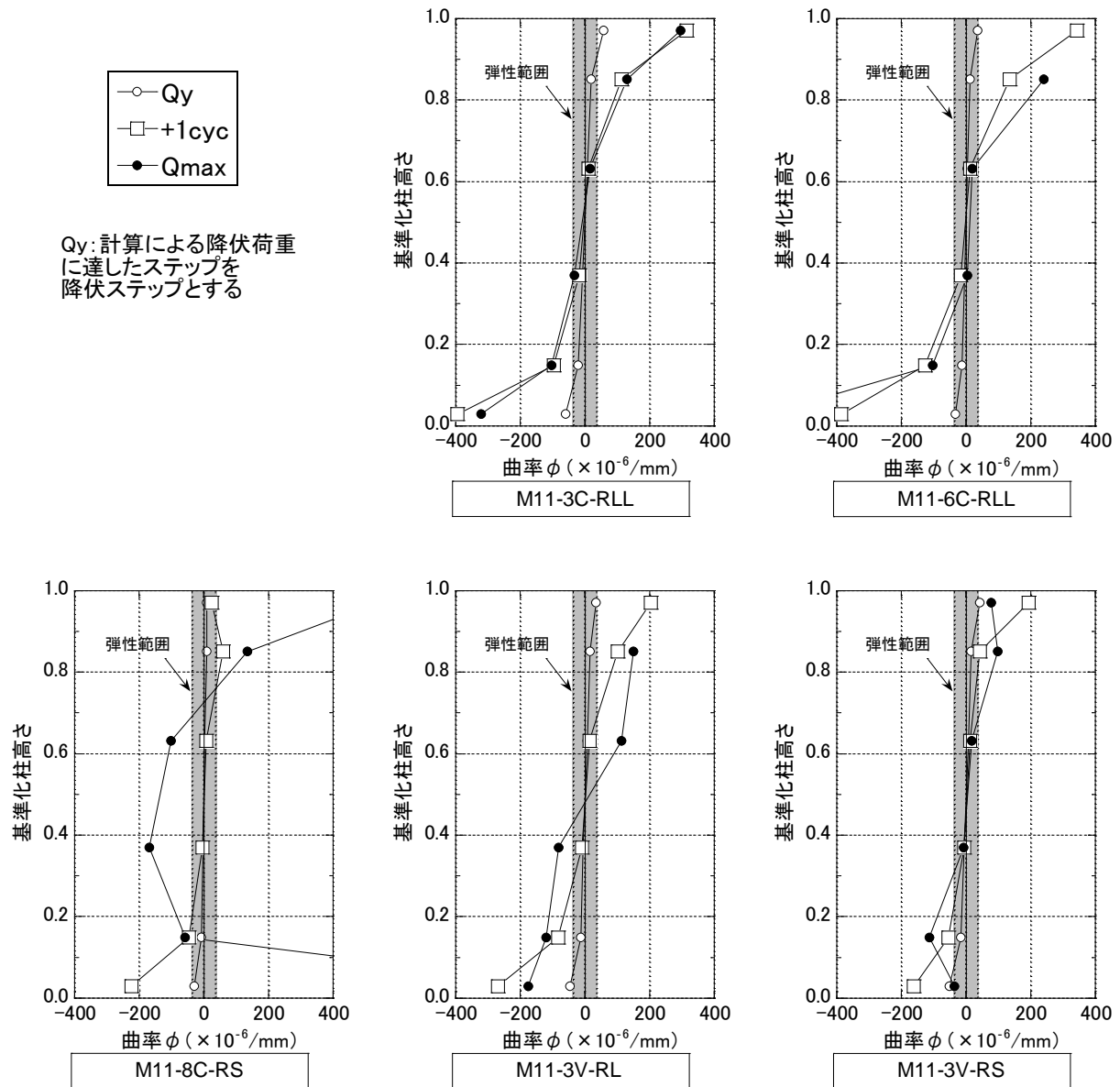


図 2.3-19 材軸方向の曲率分布

(e) 変位振幅と繰返し数の関係

表 2.3-8 に 2018 年度の実験結果^{2.3-1)}および令和 2 年度の実験結果より得られた繰返し数、図 2.3-20 に部材角振幅 R と荷重が最大荷重の 90%を維持した繰返し数($N_{90\%}$)の関係を示す。図中の点線は、2018 年度の実験結果より得られた性能曲線である。また、図中では令和 2 年度の実験結果のプロットを塗りつぶして示している。

令和 2 年度の軸力比 0.3、0.6 の試験体の実験結果(M11-3C-RLL:■、M11-6C-RLL:■)は、2018 年度の実験より得られた性能曲線と良い対応を示していることがわかる。

また、軸力比が 0.8 の試験体(M11-8C-RS:■)については、軸力比 0.3、0.6 の試験体における振幅が同じ点と比較すると繰返し数が大きく減少しており、局部座屈だけでなく全体座屈が生じたことにより荷重低下が早まったと考えられる。

変動振幅の試験体(M11-3V-RL、M11-3V-RS:◆)については、振幅 1/50 では軸力比 0.3 と 0.6 の間の性能、振幅 1/75 では軸力比 0.6 と 0.8 の間の性能とばらつきはあるが、基準軸力比である軸力比 0.3 と比較すると大きく変形性能が低下しており、最大軸力比である軸力比 0.8 よりも変形性能が高い。そのため、軸力変動の大きい側柱については基準軸力の評価に低減係数を設ける、最大軸力比で評価するなどが必要であると考えられる。

表 2.3-8 繰返し回数

試験体	軸力比 n	部材角 振幅 R		実験結果(繰返し数)				
				$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$	$N_{70\%}$
M11-3C-RLL	0.3	1/33	0.030	17	20	23	25	27
M11-3C-RL ^{2.2-1)}		1/50	0.020	53	63	70	73	76
M11-3C-RS ^{2.2-1)}		1/75	0.013	157	212	257	272	290
M11-6C-RLL	0.6	1/33	0.030	8	9	10	11	13
M11-6C-RL ^{2.2-1)}		1/50	0.020	21	24	28	33	46
M11-6C-RS ^{2.2-1)}		1/75	0.013	105	146	177	205	(254)
M11-8C-RS	0.8	1/75	0.013	18	21	23	25	13
M11-3V-RL	0.3±0.5	1/50	0.020	29	32	33	34	34
M11-3V-RS		1/75	0.013	25	35	46	53	61

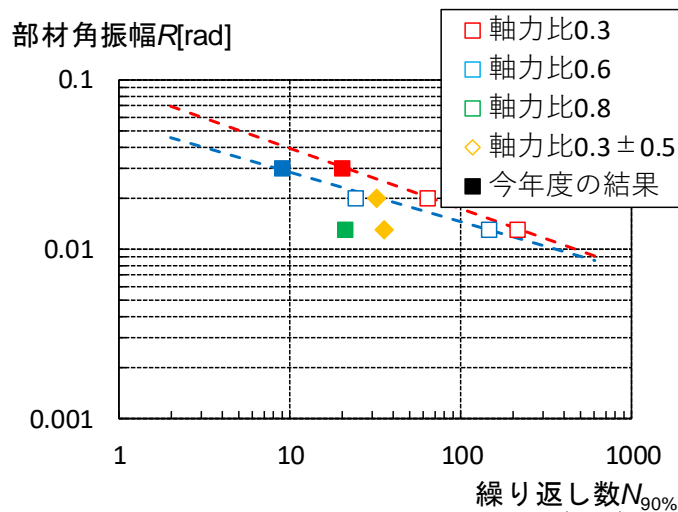


図 2.3-20 部材角振幅と繰返し数の関係($N_{90\%}$)

3) 変動振幅の実験結果

(a) 実験結果一覧

表 2.3-9~2.3-11 に変動振幅の実験結果一覧を示す。表 2.3-10 および 2.3-11 の計測値は観察を行ったサイクルでの値であり、表 2.3-9 の各荷重レベルのサイクルと近いサイクルでの値を示している。

また、局部座屈の進展により荷重が低下した M11-6C-V 試験体は、大振幅ブロックの振幅ごと (1/100、1/75、1/50、1/33) に荷重を比較し、最大耐力からの低下率を確認した。き裂の進展により荷重が低下した M11-3C-V 試験体は、振幅が大きい領域ではき裂が閉じることによる荷重上昇が見られるが、振幅が小さい領域では荷重上昇が生じず、低下率がばらついたため、最大振幅時 (1/33) の荷重のみで低下率を確認した。

表 2.3-9 変動振幅の実験結果一覧(荷重低下サイクル)

		最大荷重 Q_{max}	0.95 Q_{max}	0.9 Q_{max}	0.85 Q_{max}	0.8 Q_{max}	0.7 Q_{max}	
M11-6C-V ^{※1} D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.6 R=変動振幅	正	block (cycle)	3 (+40)	4 (+54)	5 (+67)	6 (+80)	6 (+81)	8 (+107)
		振幅[rad]	1/50	1/50	1/33	1/50	1/33	1/75
		せん断力 Q [kN]	145.4	138.7	123.6	118	110.9	96.2
		軸ひずみ ϵ_v [%]	4.33	5.31	6.07	7.15	7.65	10.95
	負	block (cycle)	3 (-39)	5 (-65)	5 (-66)	-	6 (-80)	-
		振幅[rad]	1/33	1/75	1/75	-	1/50	-
		せん断力 Q [kN]	-139.6	-129.4	-131.4	-	-120.5	-
		軸ひずみ ϵ_v [%]	4.17	5.56	5.79	-	7.31	-
M11-3C-V ^{※2} D/t=11.67 D/Lk=8 n=0.3 R=変動振幅	正	block (cycle)	6 (+81)	9 (+123)	10 (+137)	11 (+151)	-	12 (+165)
		振幅[rad]	1/33	1/33	1/33	1/33	-	1/33
		せん断力 Q [kN]	140.7	136.2	132	126.4	-	117.6
		軸ひずみ ϵ_v [%]	1.56	1.81	1.87	1.92	-	1.96
	負	block (cycle)	6 (-82)	10 (-137)	-	-	-	-
		振幅[rad]	1/33	1/33	-	-	-	-
		せん断力 Q [kN]	-132.0	-141.1	-	-	-	-
		軸ひずみ ϵ_v [%]	1.64	1.95	-	-	-	-

※1: 局部座屈の進展により荷重が低下したため、各振幅の最大荷重に対する割合で評価

※2: き裂の進展により荷重が低下したため、最大振幅の最大荷重に対する割合で評価

表 2.3-10 変動振幅の実験結果一覧(局部座屈高さ)

		軸力 導入時	1 block ピーク	最大荷重 Q _{max}	0.95Q _{max}	0.9Q _{max}	0.85Q _{max}	0.8Q _{max}	0.7Q _{max}	破壊モード	
M11-6C-V	正	block (cycle)	0	1 (+11)	4 (+53)	5 (+67)	-	6 (+81)	-	8 (+108)	局部座屈
		振幅 [rad]	0	1/33	1/33	1/33	-	1/33	-	1/50	
		R [mm]	0.5	1.3	8.3	11.4	-	19.4	-	24.2	
	負	block (cycle)	-	1 (-11)	4 (-53)	5 (-67)	-	6 (-81)	-	-	
		振幅 [rad]	-	1/33	1/33	1/33	-	1/33	-	-	
		L [mm]	-	0.8	10.3	14.0	-	14.0	-	-	
M11-3C-V	正	block (cycle)	0	1 (+11)	7 (+95)	10 (+137)	11 (+151)	12 (+165)	-	13 (+179)	き裂進展
		振幅 [rad]	0	1/33	1/33	1/33	1/33	1/33	-	1/33	
		R [mm]	0.3	1.5	1.8	2.4	2.6	3.1	-	3.9	
	負	block (cycle)	-	1 (-11)	7 (-95)	11 (-151)	-	-	-	-	
		振幅 [rad]	-	1/33	1/33	1/33	-	-	-	-	
		L [mm]	-	1.3	0.6	2.3	-	-	-	-	

表 2.3-11 変動振幅の実験結果一覧(き裂長さ・幅)

		最大荷重 Q _{max}	0.95Q _{max}	0.9Q _{max}	0.85Q _{max}	0.8Q _{max}	0.7Q _{max}	破壊モード	
M11-6C-V	正	block (cycle)	4 (+53)	5 (+67)	-	6 (+81)	-	8 (+108)	局部座屈
		振幅 [rad]	1/33	1/33	-	1/33	-	1/50	
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	-	-	
	負	block (cycle)	4 (-53)	5 (-67)	-	6 (-81)	-	-	
		振幅 [rad]	1/33	1/33	-	1/33	-	-	
		長さ(幅)[mm]	-	-	-	-	-	-	
M11-3C-V	正	block (cycle)	7 (+95)	10 (+137)	11 (+151)	12 (+165)	-	13 (+179)	き裂進展
		振幅 [rad]	1/33	1/33	1/33	1/33	-	1/33	
		長さ(幅)[mm]	30(HC)	30(2.0)	45(2.0)	65(2.5)	-	105(4.0)	
	負	block (cycle)	7 (-95)	11 (-151)	-	-	-	-	
		振幅 [rad]	1/33	1/33	-	-	-	-	
		長さ(幅)[mm]	20(HC)	35(2.0)	-	-	-	-	

※1: HCはヘアクラックを示す。

※2: 「-」はき裂発生なしを示す。

(b) 荷重変形特性

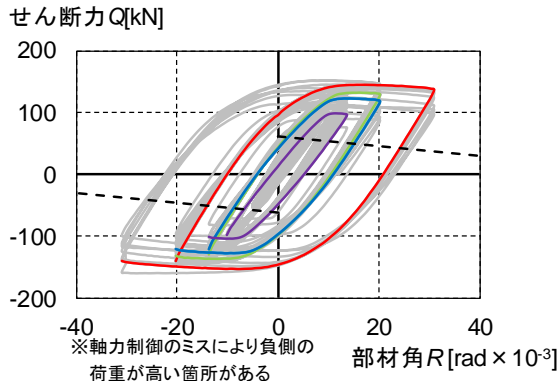
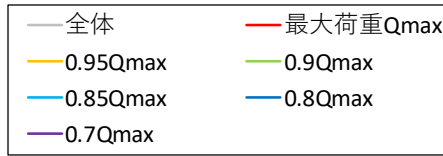
図 2.3-21 に各試験体の荷重・変形関係、図 2.3-22 に部材角・軸縮み関係を示す。荷重・変形関係の縦軸は柱せん断力 Q 、横軸は柱部材角 R である。なお、図中の黒点線は $P\Delta$ 効果を考慮した全塑性耐力を示している。また、荷重・軸縮み関係の縦軸は柱の軸縮み変形を柱高さで除した軸縮み ϵ_v 、横軸は柱せん断力 Q である。

(b-1) 荷重・変形関係(図 2.3-21)

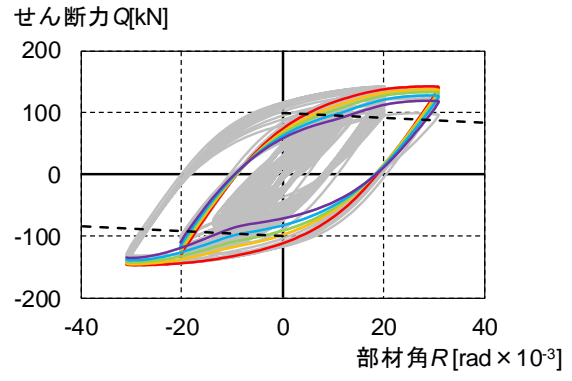
軸力比が 0.6 の試験体(11M-6C-V)は、局部座屈により荷重が低下したことから、荷重低下後も安定した履歴を示している。一方、軸力比が 0.3 の試験体(M11-3C-V)はき裂の進展により荷重が低下したため、変形の大きな領域ではき裂が閉じることによる荷重の上昇が生じ、逆 S 型の履歴となっている。

(b-2) 荷重・軸縮み関係(図 2.3-22)

一定振幅の試験体と同様に、局部座屈により荷重が低下した M11-6C-V 試験体は、荷重低下に伴い軸縮みが増加している。き裂の進展により荷重が低下した M11-3C-V 試験体は、軸縮みの進展が小さくなってから荷重が低下していることがわかる。

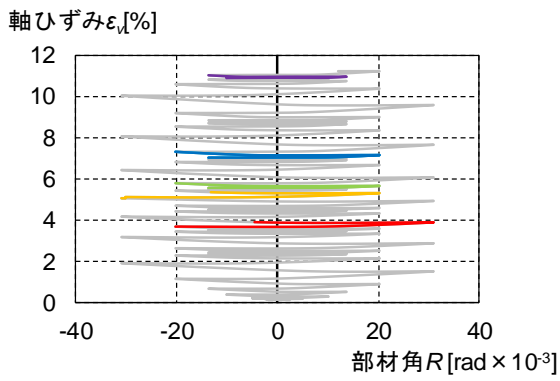


(a)M11-6C-V

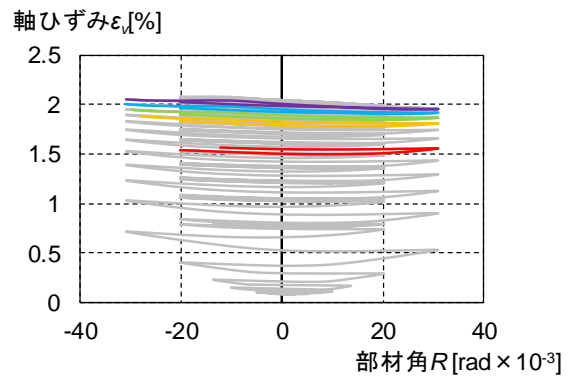


(b)M11-3C-V

図 2.3-21 荷重・変形関係



(a)M11-6C-V



(b)M11-3C-V

図 2.3-22 部材角・軸ひずみ関係

(c) 多数回繰り返し特性

図 2.3-23 に各試験体における大振幅ブロックの振幅ごと(1/100、1/75、1/50、1/33)のピーク荷重の推移、図 2.3-24~2.3-25 にピーク荷重での軸縮みおよび座屈波高さの推移を示す。図 2.3-23 中の赤、青の点線はそれぞれ正載荷、負載荷時の全塑性耐力を示している。

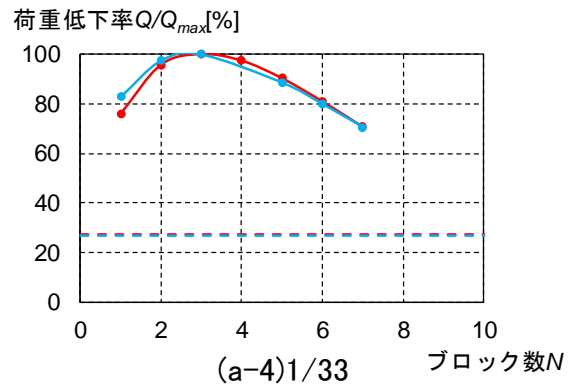
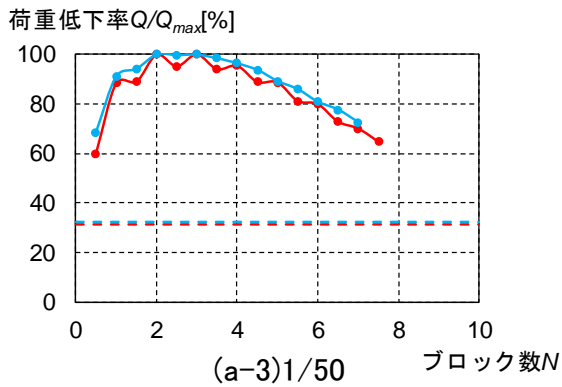
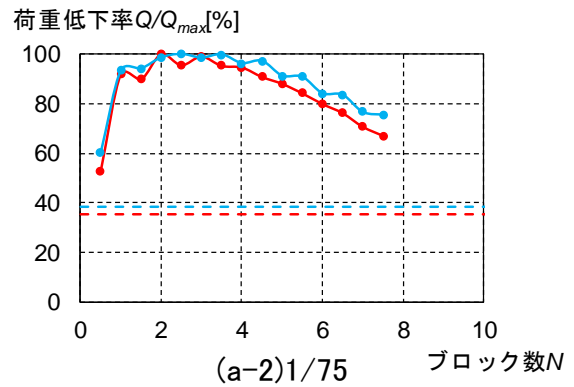
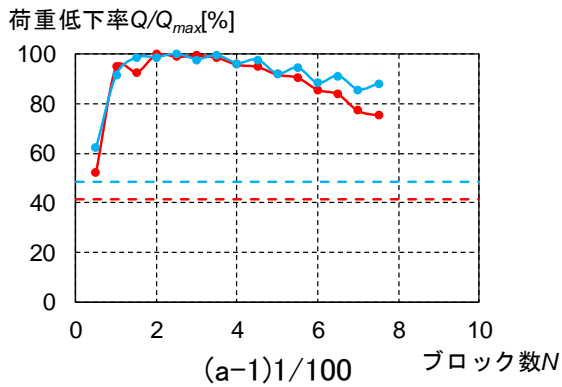
(c-1) 各サイクルピークでの荷重の推移(図 2.3-23)

局部座屈により荷重が低下した M11-6C-V 試験体は、全ての振幅で同じように荷重が低下している。一方、き裂の進展により荷重が低下した M11-3C-V 試験体は、振幅の小さな領域ではき裂が閉じることによる荷重上昇がみられないため、小振幅領域の方が大振幅領域と比べて荷重の低下が早くなっている。

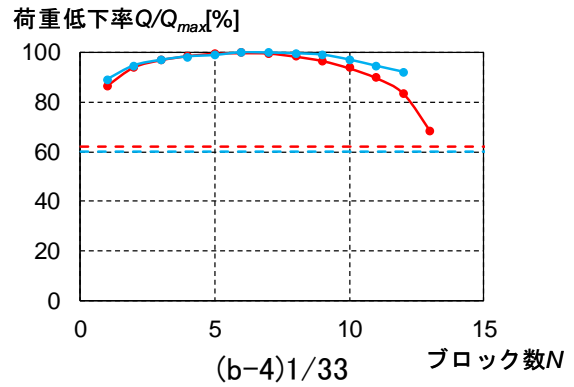
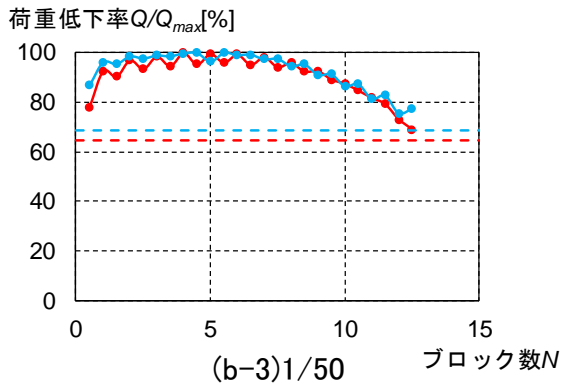
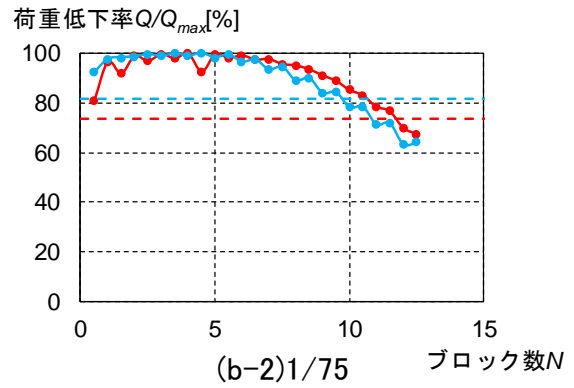
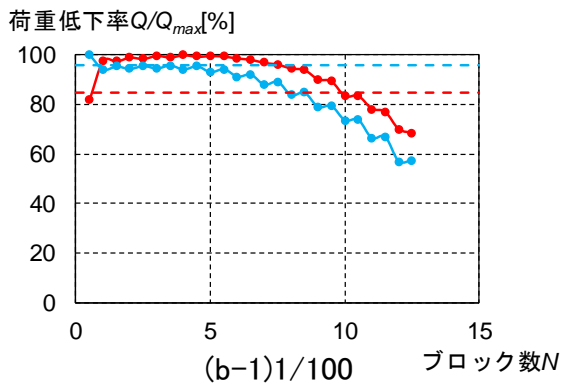
(c-2) 各サイクルピークでの軸縮みおよび座屈波高さの推移(図 2.3-24、図 2.3-25)

両試験体ともに、振幅の小さな領域ではほとんど軸ひずみが進展せず、振幅の大きな領域で軸ひずみが大きく進展していることがわかる。また、局部座屈の進展により荷重が低下した M11-6C-V 試験体は、最後まで同様のペースで軸ひずみが進展しているが、き裂の進展により荷重が低下した M11-3C-V 試験体は、軸縮みの進展が小さくなっていることがわかる。

局部座屈波高さについても、一定軸力の試験体と同様に、局部座屈の進展により荷重が低下した M11-6C-V 試験体は大きく局部座屈が進展しており、き裂の進展により荷重が低下した M11-3C-V 試験体はあまり局部座屈が進展していないことがわかる。



(a)M11-6C-V



(b)M11-3C-V

図 2.3-23 最大荷重の推移(変動振幅)

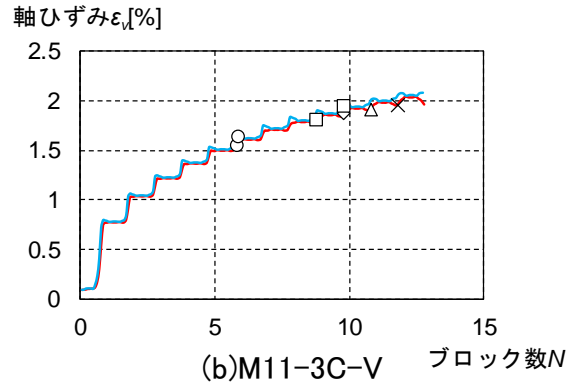
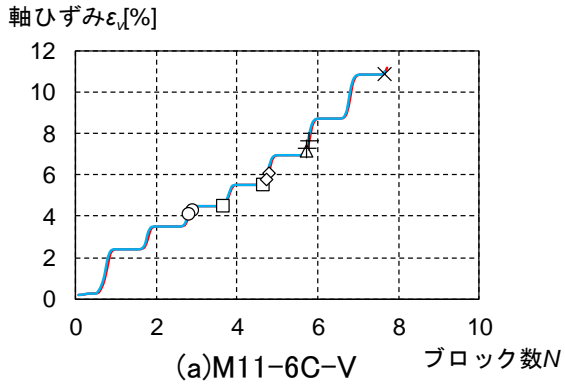
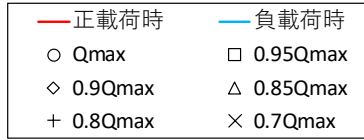


図 2.3-24 軸ひずみの推移(変動振幅)

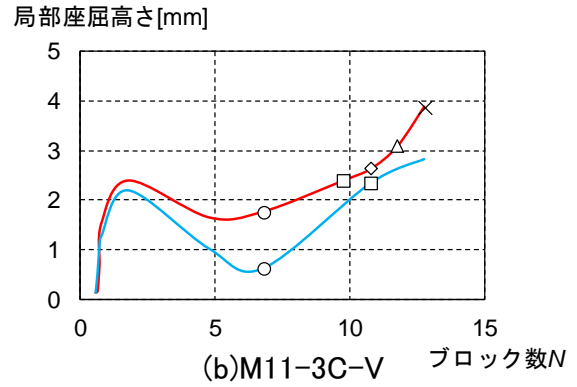
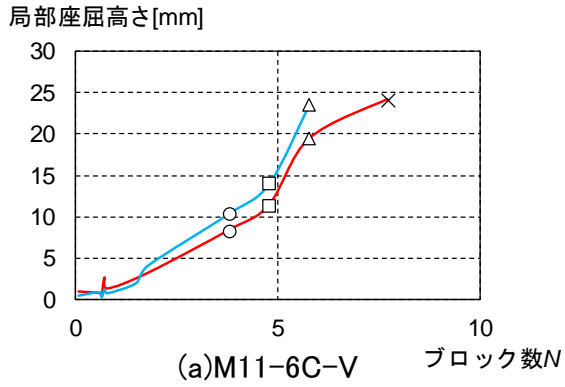


図 2.3-25 局部座屈高さの推移(変動振幅)

(d) 曲率の分布

材軸方向の曲率分布を図 2.3-26 に示す。図は正載荷時の曲率分布で、曲げ降伏時、1 ブロック最大変形 ($R=1/33$) ピーク時および最大荷重 Q_{max} 時を示す。なお、柱頭・柱脚部の軸縮みが大きく曲率計測用の変位計が計測限界に到達した場合には、変位計を取り外し、該当区間の計測を終了している。

一定軸力の試験体と同様に、曲率分布の反曲点位置は、おおよそ試験体高さの中央に位置していることがわかる。局部座屈の生じていない M11-3C-V 試験体は、1 サイクルと Q_{max} 時においてほとんど曲率分布が変わらないが、局部座屈の生じた M11-6C-V 試験体は、1 サイクルに比べ Q_{max} 時では端部に变形が集中していることがわかる。

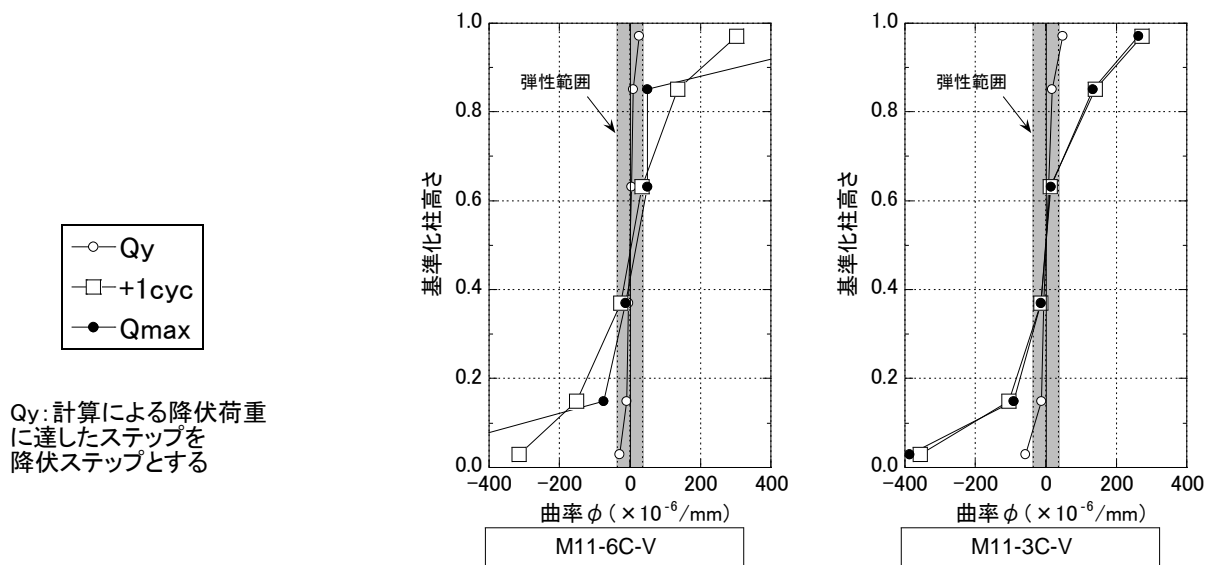


図 2.3-26 材軸方向の曲率分布(変動振幅)

(e) 線形累積損傷則の成立性の検討

荷重が最大荷重の 95%、90%、85%、80%、70%まで低下したブロック数と線形累積損傷則 (Miner 則) により計算したブロック数を比較することで、Miner 則の成立性について検討する。

一定振幅繰り返し載荷実験より得られた性能曲線から累積損傷度 D を式(2.3-1)より計算し、低下率ごとに $D \geq 1$ となったブロックを荷重低下ブロックの評価値とする。

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{R_i}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.3-1)$$

ここで、 R_i :各サイクルの振幅(rad)、 α 、 β :Manson-Coffin 型の性能曲線における係数($R = \alpha \cdot N^\beta$)

表 2.3-12 に、一定振幅繰り返し載荷実験より得られた幅厚比 11.67、径高さ比 8 の性能曲線における低下率ごとの係数を示す。

表 2.3-12 性能曲線における係数

繰り返し数	軸力比n=0.3		軸力比n=0.6	
	α	β	α	β
$N_{95\%}$	0.0904	0.379	0.0573	0.319
$N_{90\%}$	0.0890	0.356	0.0555	0.293
$N_{85\%}$	0.0906	0.348	0.0563	0.284
$N_{80\%}$	0.0938	0.351	0.0578	0.281
$N_{70\%}$	0.0963	0.352	0.0617	0.281

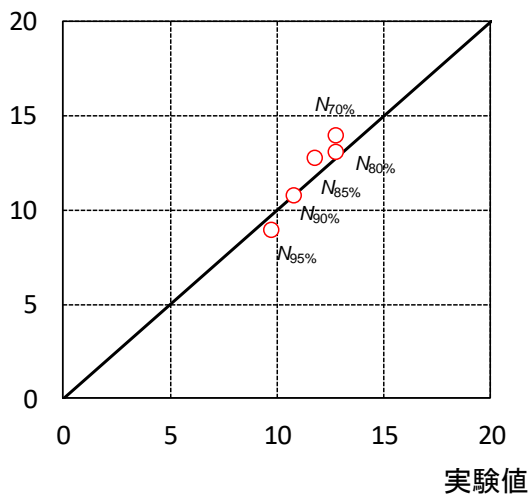
表 2.3-13 および図 2.3-27 に実験時の荷重低下ブロック数と Miner 則により評価した荷重低下ブロック数の比較を示す。なお、ブロック数は 1 サイクルごとに、1 ブロックで受ける累積損傷度に対するそのサイクルの振幅で受ける損傷度の割合を加えて計算した。表中には、括弧内に実験値に対する Miner 則による評価値の割合を示している。

Miner 則による評価値と実験値を比較すると、き裂により荷重が低下した M11-3C-V 試験体、局部座屈により荷重が低下した M11-6C-V 試験体ともに、少し危険側に評価してしまうものもあるが、誤差は 10%程度となっており、おおむね良い対応を示していることがわかる。

表 2.3-13 実験値と Miner 則による評価値の比較

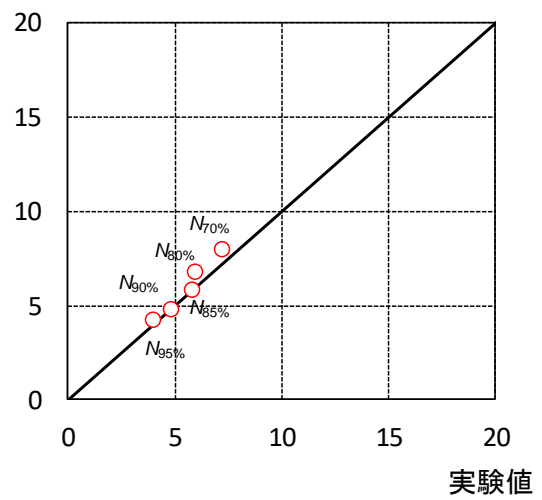
	M11-3C-V(軸力比0.3)			M11-6C-V(軸力比0.6)		
	実験値	Miner則による評価値 (実験値に対する割合)		実験値	Miner則による評価値 (実験値に対する割合)	
$N_{95\%}$	9.75	8.92	(0.91)	3.98	4.22	(1.06)
$N_{90\%}$	10.76	10.76	(1.00)	4.80	4.80	(1.00)
$N_{85\%}$	11.77	12.77	(1.08)	5.81	5.81	(1.00)
$N_{80\%}$	12.77	13.08	(1.02)	5.95	6.81	(1.14)
$N_{70\%}$	12.77	13.93	(1.09)	7.19	7.95	(1.11)

Miner則による評価値



(a)軸力比 0.3

Miner則による評価値



(b)軸力比 0.6

図 2.3-27 実験値と Miner 則による評価値の比較

2.3.2 鉄骨柱部材の疲労評価

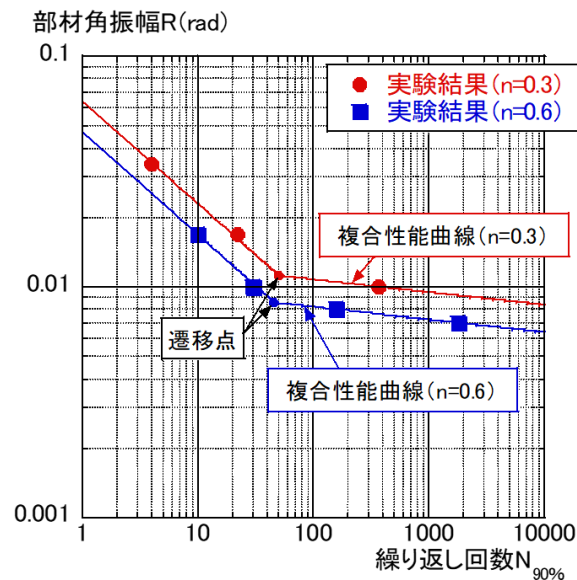
(1) 一定軸力下での多数回繰返し特性

1) 概要

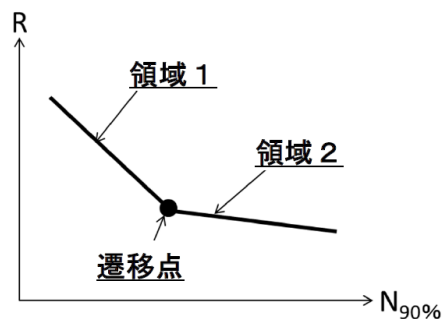
平成30年度報告書(図2.3-3)にも示したが、角形鋼管柱の一定軸力下での多数回繰返し特性は、文献2.3-4)によると図2.3-28(a)のように、領域1と領域2からなる複合遷移曲線の形状をとっている(図2.3-28(b))。図2.3-28(a)に於ける遷移点は、軸力比、幅厚比等により決定される値と考えられ、遷移点の左右で性能曲線の勾配が異なっている。なお、図2.3-28(a)は幅厚比 $D/t=16.7$ で径高さ比 $L/D=8.0$ (細長比 $\lambda=20.8$)の場合である。

ここでは、最初に大変形領域に対応する領域1についての多数回繰返し特性の検討を行い、次に、領域2についての検討を行う。なお、後述するが領域2での実験データは少なく、この領域での性能曲線の評価は難しいが、建物モデル(S30)の事前の応答解析結果から、幅厚比と軸力比が大きな場合には、領域2のモデル化を行わないと柱部材の損傷度をかなり大きく算定することがわかっているため、損傷度を評価する部材角の範囲を設定する等が必要となる。

次項に、2.3.3での変形性能評価の概要を示す。



(a) 実験結果

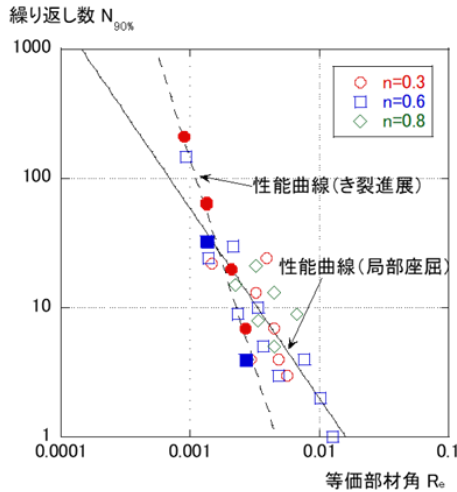


(b) 複合遷移曲線

図 2.3-28 一定軸力下での多数回繰返し特性^{2.3-4)}

領域 1 での検討 (2.2.3 (A) 2)、4)

①繰り返し数 $N_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係評価 [(b)等価部材角の評価]



径高さ比8.0の柱部材に対して、等価部材角 R_e を設定し、荷重低下要因がき裂進展と局部座屈について繰り返し数 $N_{90\%}$ との関係を近似。

(き裂進展にて荷重低下した場合)

$$N_{90\%} = 3.037 \times 10^{-8} \times R_e^{-3.220} \quad (2.2-7-1)$$

(局部座屈にて荷重低下した場合)

$$N_{90\%} = 2.308 \times 10^{-3} \times R_e^{-1.466} \quad (2.2-7-2)$$

②径高さ比による補正と簡略化 [(d)径高さ比が変化する場合の検討、4) 変形性能の評価式 (案)]

径高さ比8.0の細長比 λ_0 に対する対象柱の細長比 λ の比の2乗により、径高さ比(細長比)の差異を評価し、右式のように簡略化。

$$cN_{90\%} = C_0 \times R_e^{-1.466} \leq N_{90\%_{max}} \quad (R_e \geq R_{e_{lim}}) \quad (2.2-11)$$

ここで、 C_0 : 疲労係数 ($= 2.308 \times 10^{-3} \times \alpha \times (\lambda/\lambda_0)^2$)、
 α : 安全係数 (平均評価式: $\alpha=1.0$ 、下限評価式: $\alpha=0.5$)

領域 2 での検討 (2.2.3 (A) 3)、4)

①遷移点での等価部材角 $R_{e_{tr}}$ の評価

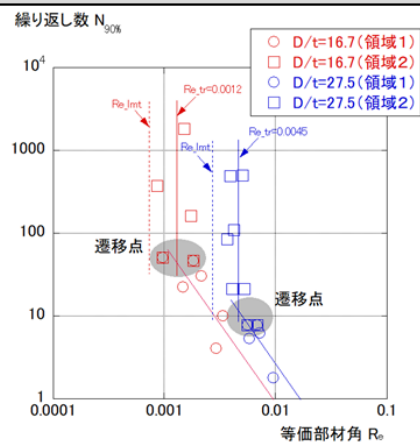
領域1から領域2に渡って実験および解析データが取得されていると考えられる幅厚比 $D/t=16.7$ と 27.5 のデータを用いて遷移点の等価部材角 $R_{e_{tr}}$ を右図の関係をj用いて評価。

$$R_{e_{tr}} = -3.786 \times 10^{-3} + 3.027 \times 10^{-4} \times (D/t) \geq 0.001 \quad (2.2-14)$$

②疲労評価をしなくても良い部材角 $R_{lim}(=R_{e_{lim}} \times \mu_e)$ の評価

等価部材角 $R_{e_{tr}}$ を0.6倍することにより、 $R_{e_{lim}}$ を評価。

$$R_{e_{lim}} = 0.6 \times R_{e_{tr}} \quad (2.2-13)$$



変形性能の評価式 (案)

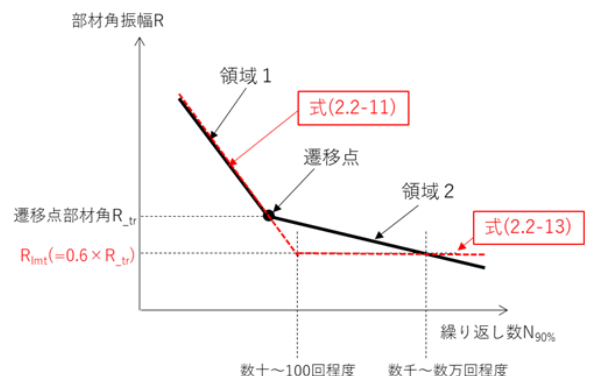
【一定軸力】

右図の式(2.2-11)と式(2.2-13)による評価式を提案。なお、上記評価式では領域1の式(2.2-11)を R_{lim} まで延伸させ、領域2は式(2.2-13)で一定としており、実際の領域1と2の性能曲線に比べて安全側の評価となっている。

【変動軸力】

2.2.3 (B) で変動軸力下での評価法を提示。変動軸力時の最大軸力($n=n_1$)の一定軸力での評価式(式(2.2-8))に変動軸力による割増係数 γ を乗ずることjで変形性能を評価。

$$\gamma N_{90\%} = \gamma \times N_{90\%}(n=n_1) \leq N_{90\%}(n=n_0) \quad (2.2-22)$$



2) 領域 1 での検討

(a) 概要

溶接組立箱形断面柱を対象として、これまでに実施した実験および解析の結果（既往実験^{2.3-2)~2.3-4)}を含む)を基に、一定軸力下で一定振幅荷重を受ける場合の鉄骨柱部材の多数回繰り返し性能を検討する。また、検討に用いたデータは表 2.3-14 に示す範囲で、全 40 データ（実験；23、解析：17）である。また、ここでの評価対象とした範囲は、文献 2.3-4) に示す遷移点よりも繰り返し回数が少ない領域（領域 1）である。

まず、基本特性評価では、径高さ比（細長比）が 8.0（20.3~21.9）のデータ（全 30 データ）を用いて多数回繰り返し特性の検討を行う。次に、径高さ比（細長比）による影響評価に示すデータ（全 10 データ）を用いて、基本特性評価から得られた評価式を修正することにより径高さ比（細長比）による影響評価を行う。

検討に用いたデータを図 2.3-29 に示す。なお、図 2.3-29(c)には、参考として幅厚比 11.7 の変動軸力 0.3 ± 0.5 （最大軸力比 0.8）の実験データを示す。

なお、軸力比 0.8 の実験データは、令和 2 年度実施した 1 体のみであるため、令和 1 年度実施した FEM による解析と同様な条件で解析を行い、4 ケースの解析結果を追加する。また、幅厚比 28.0 の実験データについては、既往基整促 27-2^{2.3-2)}で実施した幅厚比 27.5 の実験データはあるが、径高さ比が 9.1 と 8.0 とは若干異なるため、軸力比を 0.3 および 0.6 とした幅厚比 28.0 の 6 ケースの解析結果を追加する。

以上より、令和 2 年度は上記の 10 ケースの FEM による解析を追加して、疲労特性の検討を行うためのデータとする。また、既往基整促 27-2 の実験データについては、径高さ比（細長比）による影響評価の検討で用いることとする。

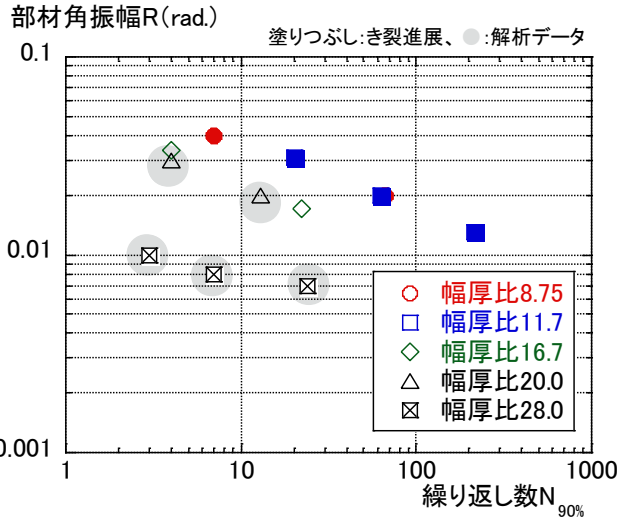
以下では、「軸力」「幅厚比」を考慮した等価部材角 R_e を定義して、繰り返し数 $N_{90\%}$ との関係の評価することを検討する。

表 2.3-14 検討に用いた実験・解析データの諸元

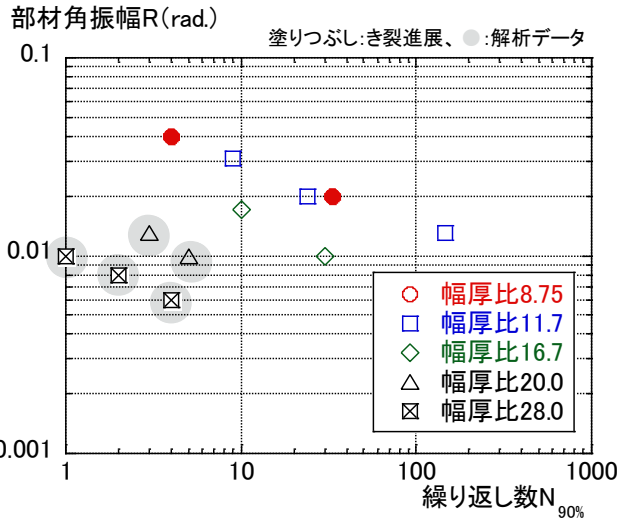
因子	基本特性評価 に用いたデータ	径高さ比による影響評価 に用いたデータ
径高さ比 L/D (細長比 λ)	8.0 (20.3~21.9)	5.0~12.0 ^{*2} (13.3~32.0)
軸力比 n	0.3~0.8	0.3~0.6
部材角 R	0.006~0.04	0.006~0.02
幅厚比 D/t	8.75~28.0	11.67~27.5
降伏点 σ_y	350~380	350~355
データ数	30[15] ^{*1}	10[2] ^{*1}

*1:[]内は解析によるデータ数

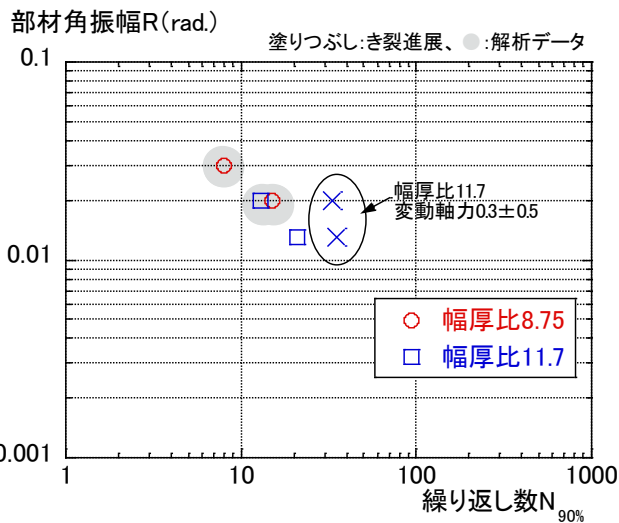
*2: $L/D=8.0$ 以外のデータ



(a)軸力比 0.3



(b)軸力比 0.6



(c)軸力比 0.8

図 2.3-29 検討に用いた実験・解析データの諸元

(b) 等価部材角の評価

等価部材角を評価するに当たり、文献 2.3-5) に示す基準化幅厚比 α_0 を考慮する。また、文献 2.3-5) では基準化幅厚比により、短柱の圧縮試験時のひずみ塑性率 μ_0 は製造法が異なる柱毎（溶接組立、ロール成形、プレス成形）に評価されているため、溶接組立による評価式を使用している。なお、文献 2.3-5) では式 (2.3-2) の適用範囲の上限を*印で示す 3.01 としているが、令和 2 年度の検討では適用範囲外を外挿した。

$$\alpha_0 = \varepsilon_y \times (D/t)^2 \quad (2.3-2)$$

$$\mu_0 = 16.0/\alpha_0 - 12.7 \quad (2.3-3-1)$$

$$(3.01^* \geq 1/\alpha_0 \geq 1.09)$$

$$\mu_0 = 4.8/\alpha_0 - 0.52 \quad (2.3-3-2)$$

$$(1.09 \geq 1/\alpha_0 \geq 0.23)$$

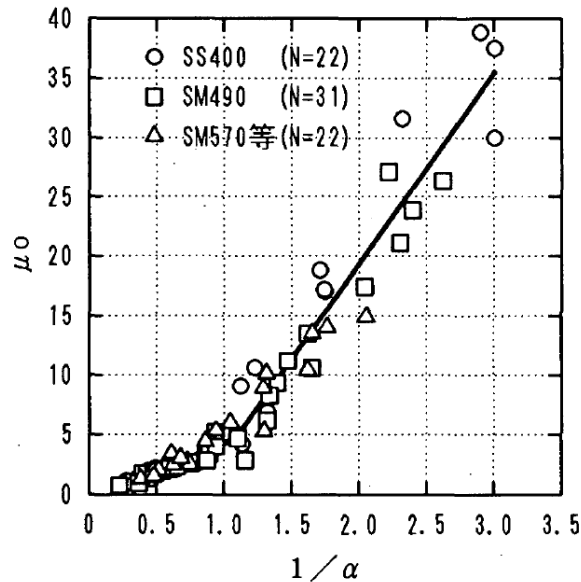


図 2.3-30 μ_0 と $1/\alpha$ の関係(溶接組立部材)^{2.3-5)}

ここで、文献 2.3-5) には軸力を受ける場合の幅厚比（基準化等価幅厚比）が定義されているが、本検討では、FEM による鉄骨柱の単調載荷解析の結果を基にして、軸力比 0 の時の最大荷重時の変形量を基準として、軸力比 ($n=0\sim 0.8$) による変形性能の低減率 $f(n)$ を式 (2.3-4) のように近似する。なお、式 (2.3-4) は $D/t=11.67$ の時（既存建物調査で一階柱の平均的な値）の解析結果を基にして近似した。

$$f(n) = 1.0 - 1.48 \times n + 0.414 \times n^2 \quad (2.3-4)$$

$$(0 \leq n \leq 0.8)$$

式(2.3-3)、(2.3-4) を用いて、軸力を考慮した鉄骨柱の塑性率 μ_e は式 (2.3-5) のように定義する。

$$\mu_e = f(n) \times \mu_0 \quad (2.3-5)$$

ここで、式 (2.3-5) により塑性率を計算すると、き裂進展で荷重低下する場合には、 μ_e の値が 15.0 以上であることがわかる（表 2.3-15）。ここで、FEM による鉄骨柱の単調載荷解析での軸力 0 の際の塑性率は約 15.0 であることから、式 (2.3-5) の上限を 15.0 とする。

次に、繰り返しの部材角 R を μ_e で基準化したものを等価部材角 R_e とすると、式 (2.3-6) で示すことができる。

$$R_e = R / \mu_e \quad (2.3-6)$$

繰り返し数 $N_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係を図 2.3-31 に示す。

図 2.3-31 より、き裂進展にて荷重低下したデータ（塗りつぶし）と局部座屈にて荷重低下したデータ（白ぬき）で、傾向が異なることがわかる。

よって、それぞれの場合で繰り返し数 $N_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係を近似すると、式 (2.3-7-1) および式 (2.3-7-2) のようになる。式 (2.3-7-1) がき裂進展にて荷重低下した場合、式 (2.3-7-2) が局部座屈により荷重低下した場合である。

（き裂進展にて荷重低下した場合）

$$N_{90\%} = 3.037 \times 10^{-8} \times R_e^{-3.220} \quad (2.3-7-1)$$

（局部座屈にて荷重低下した場合）

$$N_{90\%} = 2.308 \times 10^{-3} \times R_e^{-1.466} \quad (2.3-7-2)$$

それぞれの相関係数は、式 (2.3-7-1) で $r=0.988$ 、式 (2.3-7-2) で $r=0.874$ であった。

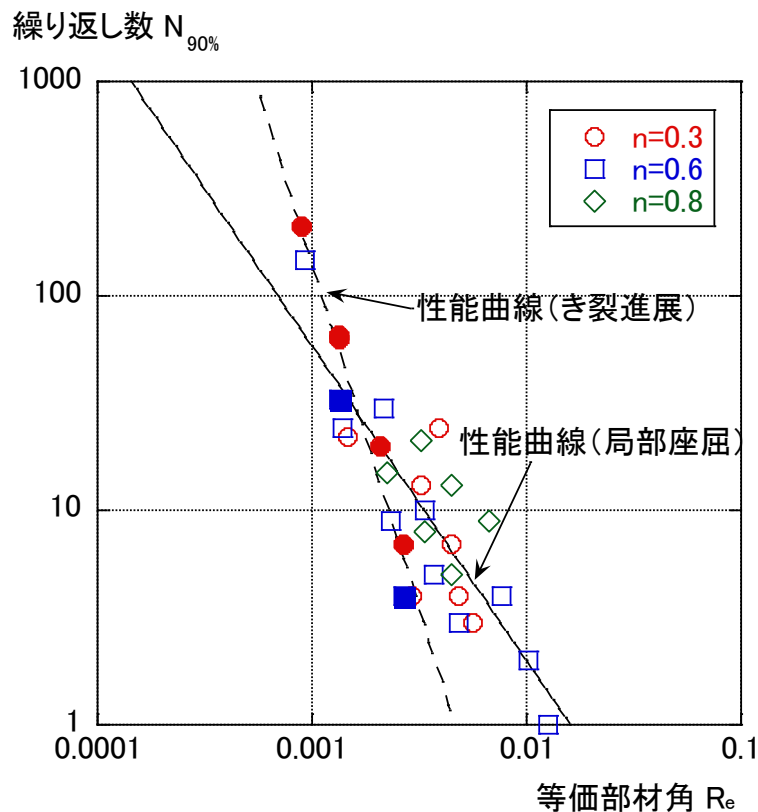


図 2.3-31 繰り返し数 $N_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係

(c) 実験結果との比較（径高さ比 8.0）

式 (2.3-7-1) および式 (2.3-7-2) を用いて、繰り返し数 $N_{90\%}$ を求め、実験および解析結果との比較を図 2.3-32 に示す。また、評価結果を表 2.3-15 に示す。表 2.3-15 には細長比 λ と一般化細長比 λ_c も示す。また、緑色で示したデータは令和 2 年度実施した実験および解析のデータである。表 2.3-15 より評価結果と実験および解析結果との比は、0.33~2.97 である。

評価対象のデータの範囲では、ばらつきはあるが、評価結果の繰り返し数 $N_{90\%}$ は実験結果を良く捉えていることがわかる。ただし、式 (2.3-7-1) および式 (2.3-7-2) は平均評価式のため、安全率を乗じる必要がある。

また、荷重低下要因の分別については、式 (2.3-5) を用いて、下記のように分別することが可能である。

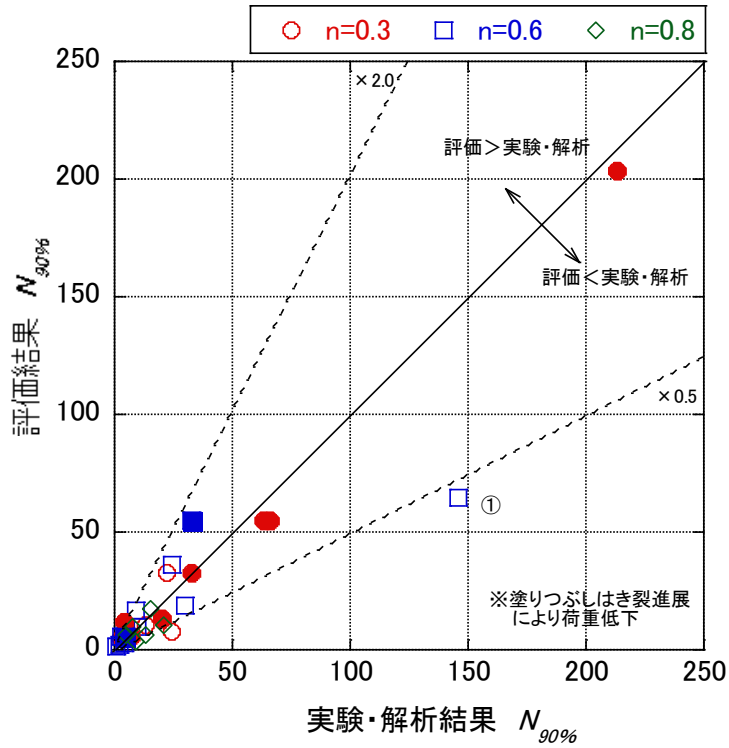
$\mu_e \geq 15.0$ の場合：き裂進展にて荷重低下

$\mu_e < 15.0$ の場合：局部座屈にて荷重低下

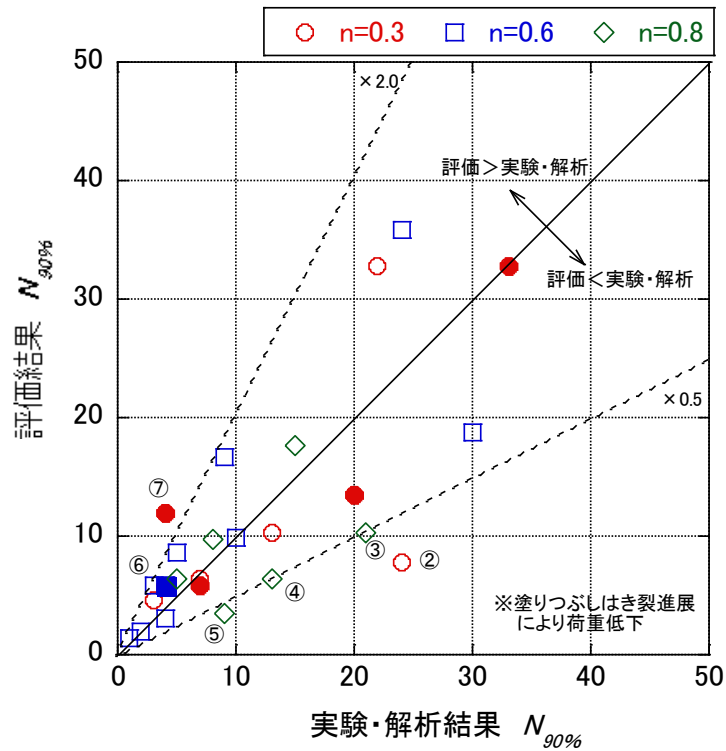
図 2.3-32 に示すばらつきの大きなデータ①~⑦について、表 2.3-15 に示しているが、特に、軸力比が 0.8 と大きなデータ③~⑤については、ばらつきが大きな評価となっている。

表 2.3-15 評価結果(径高さ比 8.0)

	条件および結果 (実験・解析)								評価結果					評価結果 実験・解析	備考	
	軸力比 n	幅厚比 D/t	L/D	λ	λ_c	部材角 R	繰り返し数 $N_{90\%}$	荷重低下 要因	f(n)	μ_0	μ_e	$\mu_e \leq 15.0$	等価部材角 R_e			繰り返し数 $N_{90\%}$
実験	0.3	8.75	8.0	21.9	0.29	0.020	66	き裂進展	0.593	109.77	65.12	15.00	0.00133	55.1	0.84	S29(H30)
			8.0	21.9	0.29	0.040	7	き裂進展	0.593	109.77	65.12	15.00	0.00267	5.9	0.84	S29(H30)
		11.67	8.0	21.3	0.28	0.013	213	き裂進展	0.593	55.13	32.70	15.00	0.00089	203.5	0.96	S29(H30)
			8.0	21.3	0.28	0.020	63	き裂進展	0.593	55.13	32.70	15.00	0.00133	55.1	0.88	S29(H30)
		16.70	8.0	21.3	0.29	0.031	20	き裂進展	0.593	50.67	30.06	15.00	0.00206	13.5	0.68	S29(R02)
			8.0	20.8	0.28	0.017	22	局部座屈	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00147	32.8	1.49	京大 ^{2,2-3)}
解析	0.3	20.00	8.0	20.8	0.28	0.034	4	局部座屈	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00295	11.9	2.97	京大 ^{2,2-3)} ⑦
			8.0	20.6	0.27	0.020	13	局部座屈	0.593	10.39	6.17	6.17	0.00324	10.3	0.79	S29(R01)
		28.00	8.0	20.6	0.27	0.030	4	局部座屈	0.593	10.39	6.17	6.17	0.00487	5.7	1.42	S29(R01)
			8.0	20.3	0.27	0.007	24	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00391	7.8	0.33	S29(R02) ②
		28.00	8.0	20.3	0.27	0.008	7	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00447	6.4	0.92	S29(R02)
			8.0	20.3	0.27	0.010	3	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00559	4.6	1.55	S29(R02)
実験	0.6	8.75	8.0	21.9	0.29	0.020	33	き裂進展	0.261	109.77	28.65	15.00	0.00133	55.1	1.67	S29(H30)
			8.0	21.9	0.29	0.040	4	き裂進展	0.261	109.77	28.65	15.00	0.00267	5.9	1.48	S29(H30)
		11.67	8.0	21.3	0.28	0.013	146	局部座屈	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00093	64.8	0.44	S29(H30) ①
			8.0	21.3	0.28	0.020	24	局部座屈	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00139	35.8	1.49	S29(H30)
		16.70	8.0	21.3	0.29	0.031	9	局部座屈	0.261	50.67	13.23	13.23	0.00234	16.7	1.85	S29(R02)
			8.0	20.8	0.29	0.010	30	局部座屈	0.261	17.69	4.62	4.62	0.00217	18.7	0.62	鹿島 ^{2,2-4)}
解析	0.6	20.00	8.0	20.8	0.28	0.017	10	局部座屈	0.261	19.43	5.07	5.07	0.00335	9.8	0.98	京大 ^{2,2-3)}
			8.0	20.6	0.27	0.010	5	局部座屈	0.261	10.39	2.71	2.71	0.00369	8.6	1.71	S29(R01)
		28.00	8.0	20.6	0.27	0.013	3	局部座屈	0.261	10.39	2.71	2.71	0.00479	5.8	1.94	S29(R01) ⑥
			8.0	20.3	0.27	0.006	4	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.00761	3.0	0.74	S29(R02)
		28.00	8.0	20.3	0.27	0.008	2	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.01017	1.9	0.97	S29(R02)
			8.0	20.3	0.27	0.010	1	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.01271	1.4	1.39	S29(R02)
解析	0.8	8.75	8.0	21.9	0.29	0.020	15	局部座屈	0.081	109.77	8.89	8.89	0.00225	17.6	1.18	S29(R02)
			8.0	21.9	0.29	0.030	8	局部座屈	0.081	109.77	8.89	8.89	0.00338	9.7	1.22	S29(R02)
		11.67	8.0	21.9	0.29	0.040	5	局部座屈	0.081	109.77	8.89	8.89	0.00450	6.4	1.28	S29(R01)
			8.0	21.3	0.29	0.013	21	局部座屈	0.081	50.67	4.10	4.10	0.00325	10.3	0.49	S29(R02) ③
		11.67	8.0	21.3	0.28	0.020	13	局部座屈	0.081	55.13	4.46	4.46	0.00448	6.4	0.49	S29(R02) ④
			8.0	21.3	0.28	0.030	9	局部座屈	0.081	55.13	4.46	4.46	0.00672	3.5	0.39	S29(R02) ⑤



(a) $N_{90\%} \leq 250$ の範囲



(b) $N_{90\%} \leq 50$ の範囲

図 2.3-32 評価結果と実験結果の繰返し数の関係

(d) 径高さ比が変化する場合の検討

既往の基整促 27-2 および令和 2 年度の基整促 S29 での径高さ比（細長比）を変化させて、多数回繰り返し実験を行った結果では、径高さ比（細長比）が大きい方が変形性能が大きく、径高さ比（細長比）が小さい方が変形性能が小さくなる傾向にある。

前項(b)(c)では、径高さ比（細長比）が 8.0 と一定の場合の繰り返し数の評価式の検討を行ったが、この評価式には軸力が変形性能に与える影響が含まれているので、ここでは、軸力条件が同じ状態で、径高さ比（細長比）が変形性能に与える影響を考える必要がある。

軸力を考慮しない場合には、上記の状態は梁部材の状態と類似している。例えば、スラブ付き H 形梁の場合には、一般化横座屈細長比 λ_b を用いて、塑性率が $1/\lambda_b^2$ で表されることが知られている^{2.3-6)}。

ここでは、細長比 λ と一般化細長比 λ_0 が比例することから、設計に用いられている細長比 λ を用いることとし、その比の 2 乗を式 (2.3-7-1) または式 (2.3-7-2) に乗じた式 (2.3-8) を用いることにより、径高さ比（細長比）の影響を取り入れるものとする。

$$cN_{90\%} = (\lambda / \lambda_0)^2 \times N_{90\%} \quad (2.3-8)$$

ここで、 λ_0 は径高さ比 8.0 の場合の細長比である。

表 2.3-14 の径高さ比（細長比）による影響評価を行う 10 データに関して、繰り返し数を評価した結果を、表 2.3-16 に示す。なお、前述の表 2.3-15 の評価結果は $\lambda/\lambda_0=1.0$ の場合となっている。

表 2.3-16 より、幅厚比の大きな場合 ($D/t=27.5$) に評価結果は過小評価となっている。これは、軸力比 ($n=0\sim 0.8$) による変形性能の低減率を幅厚比 11.67 の解析結果を基に近似しているように、評価式では幅厚比 11.67 付近の精度を向上させようと試みている点が一因と考えられる。また、後述の 3) に於いても上記の原因について考察を行う。

表 2.3-16 評価結果(径高さ比変化)

	条件および結果 (実験・解析)							評価結果						評価結果 実験・解析	備考	
	軸力比 n	幅厚比 D/t	L/D	λ	λ_c	部材角 R	繰返し数 N _{90%}	荷重低下 要因	f(n)	μ_0	μ_e	$\mu_e \leq 15.0$	等価部材角 R _e			繰返し数 N _{90%}
実験	0.3	27.5	9.1	23.1	0.30	0.008	123	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00422	9.1	0.07	27_2 ²⁻²⁻²⁾
			9.1	23.1	0.30	0.010	24	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00527	6.5	0.27	27_2 ²⁻²⁻²⁾
			9.1	23.1	0.30	0.011	6	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00580	5.7	0.95	27_2 ²⁻²⁻²⁾
			6.1	15.4	0.20	0.007	63	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00369	4.9	0.08	27_2 ²⁻²⁻²⁾
			6.1	15.4	0.20	0.008	16	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00407	4.2	0.27	27_2 ²⁻²⁻²⁾
実験	0.6	11.67	12.0	32.0	0.42	0.020	58	局部座屈	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00139	80.5	1.39	S29(H30)
			5.0	13.3	0.18	0.013	56	併発	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00093	25.3	0.45	S29(H30)
			5.0	13.3	0.18	0.020	17	併発	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00139	14.0	0.82	S29(H30)
解析	27.5	9.1	23.1	0.30	0.006	7	局部座屈	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00719	4.1	0.59	S29(R01)	
		9.1	23.1	0.30	0.008	2	局部座屈	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00958	2.7	1.36	S29(R01)	

3) 領域 2 での検討

領域 1 から領域 2 に渡って実験および解析データが取得されている場合として、幅厚比 $D/t=16.7$ と 27.5 のデータ ($D/t=16.7$: 9 データ、 $D/t=27.5$: 10 データ (解析 : 3 データ)) が挙げられる。このデータを図 2.3-31 と同様に繰返し数と等価部材角の関係で示すと図 2.3-33 のようになる。この時、 $D/t=27.5$ の場合には、式(2.3-8)を考慮して、径高さ比 8.0 の繰返し数のデータに変換している。また、領域 1 での勾配は図 2.3-31 の局部座屈の時の勾配としている。

図 2.3-33 より、領域 1 の領域では局部座屈の勾配とほぼ同じとなるが、ある等価部材角から等価部材角の値が変化しなくても繰返し数が増加していることがわかる。この境界が遷移点と考えられ、等価部材角に関わらず、繰返し数が増加している領域が領域 2 と考えられる。

ここで、文献 2.3-4) に従って図 2.3-28(a)と同様な方法で、 $D/t=27.5$ の場合の部材角と繰返し数の関係を図 2.3-34(b)に示す。また、図 2.3-34 には遷移点も示す。使用したデータについては表 2.3-17 に示す。

図 2.3-34 での遷移点は図 2.3-33 に示されているが、等価部材角の値が変化しなくても繰返し数が増加する点とほぼ一致している。また、前述の表 2.3-16 で評価結果が過小評価となっている場合の多くは、データが領域 2 に存在しているためであったことがわかる。

この結果から、幅厚比により遷移点での等価部材角 R_{e_tr} が異なり、幅厚比が大きいと R_{e_tr} は大きくなると考えられる。ここで、領域 2 のデータの平均値を遷移点での等価部材角 R_{e_tr} とすると幅厚比 $D/t=16.7$ で 0.0012、 $D/t=27.5$ で 0.0045 となるので、データ数は少ないが、このデータを用いて、遷移点での等価部材角 R_{e_tr} と幅厚比 D/t の関係が線形であると仮定して、その関係を求めると、式(2.3-9)となる。図 2.3-33 には遷移点での等価部材角および後述する疲労特性を評価しなくとも良い部材角 (図 2.3-33 では等価部材角) も示す。

$$R_{e_tr} = -3.786 \times 10^{-3} + 3.027 \times 10^{-4} \times (D/t) \geq 0.001 \quad (2.3-9)$$

また、遷移点での等価部材角 R_{e_tr} の下限については、遷移点の等価部材角 R_e は幅厚比および軸力比により異なるが、表 2.3-17 を見ると 0.00097~0.00691 であるので、最小値を概ね $R_e=0.001$ と考えた。 $R_e=0.001$ は図 2.3-31 の実験データの範囲の最小値付近である。

しかしながら、領域 2 での実験データが少ないため、領域 2 での性能曲線の評価は難しい。ここでは、領域 2 での性能曲線の評価するのでは無く、遷移点での等価部材角から疲労特性を評価しなくとも良い部材角 R_{lim} ($=R_{e_lim} \times \mu_e$) を設定する。図 2.3-34 を見ると、領域 2 での勾配は幅厚比が大きくなると大きくなっているため、疲労特性を評価しなくとも良い部材角 R_{lim} の設定は、幅厚比 27.5 の場合で評価する方が安全側となる。図 2.3-34 (b)により幅厚比の大きな場合 ($D/t=27.5$) での遷移点の部材角を 0.6 倍すると、繰返し数は数千回となることを考慮して、疲労特性を評価しなくとも良い部材角 R_{lim} は遷移点での等価部材角 R_{e_tr} を用いて、式 (2.3-10) のように表現されるとした。また、幅厚比の小さな場合 ($D/t=16.7$) の場合には、繰返し数は数万回となっている。

$$R_{lim} = 0.6 \times R_{e_tr} \times \mu_e \quad (2.3-10)$$

なお、 $R_{e_lim}=0.6 \times R_{e_tr}$ 、 $R_{tr}=R_{e_tr} \times \mu_e$ である。ここでは、図 2.3-35 に示すように式(2.3-8)と式(2.3-10)による評価式を提案している。上記評価式では領域 1 の式(2.3-8)を R_{lim} まで延伸させ、領域 2 は式(2.3-10)で一定としており、領域 1 と領域 2 に於いて図 2.3-35 のように部材角 R に対し

て繰返し数 $N_{90\%}$ を正確に評価した場合（実際の性能曲線の場合）よりも、長周期地震動での柱部材の繰返し数の現実的な範囲では安全側の評価となっている。

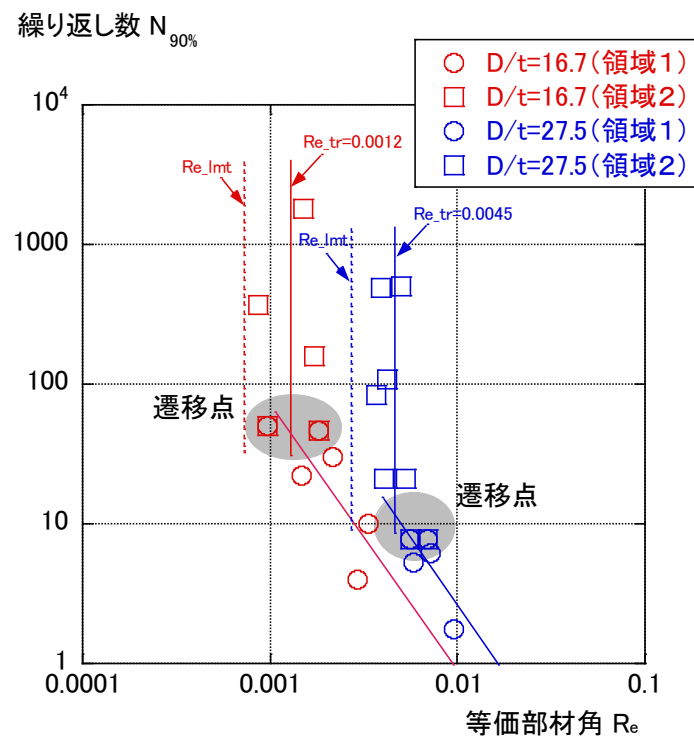
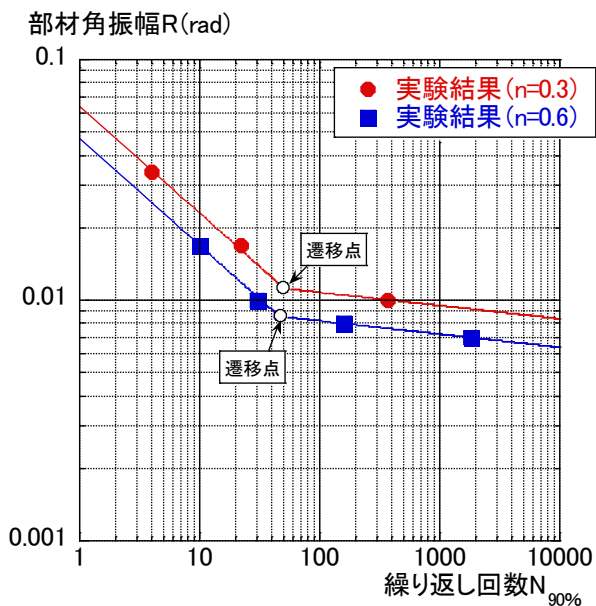
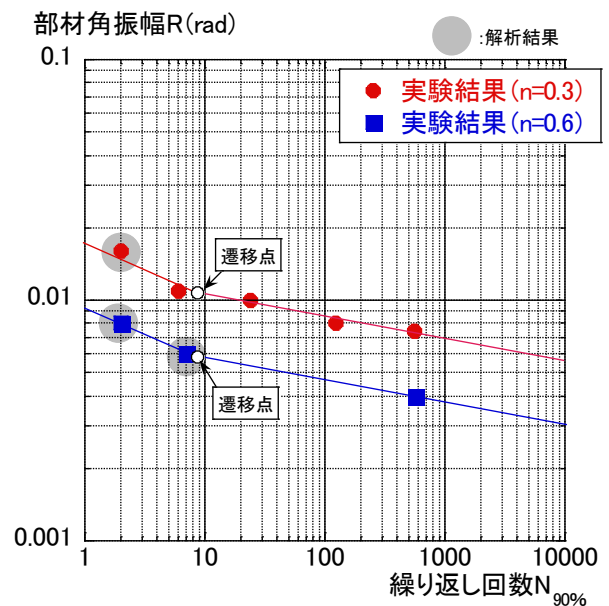


図 2.3-33 繰返し数 $N_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係 (遷移点の評価)



(a) $D/t=16.7 (L/D=8.0)$



(b) $D/t=27.5 (L/D=9.1)$

図 2.3-34 部材角と繰返し数の関係 (遷移点の表示)

表 2.3-17 検討に用いた実験および解析結果

	条件および結果									評価結果					備考	
	軸力比 n	幅厚比 D/t	L/D	λ	λ_c	部材角 R	繰り返し数*1 $N_{90\%}$	荷重低下 要因	領域	f(n)	μ_0	μ_e	$\mu_e \leq 15.0$	等価部材角 R_e		
実験	0.3	16.70	8.0	20.8	0.28	0.010	372	局部座屈	領域2	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00087	鹿島 ^{2.2-4)}	
評価*2			8.0	20.8	0.28	0.011	50	局部座屈	遷移点	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00097		
実験	0.6		8.0	20.8	0.28	0.017	22	局部座屈	領域1	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00147	京大 ^{2.2-3)}	
			8.0	20.8	0.28	0.034	4	局部座屈	領域1	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00295		
実験	0.6		16.70	8.0	20.8	0.29	0.008	159	局部座屈	領域2	0.261	17.69	4.62	4.62	0.00173	鹿島 ^{2.2-4)}
				8.0	20.8	0.29	0.007	1800	局部座屈	領域2	0.261	17.69	4.62	4.62	0.00152	
評価*2	8.0			20.8	0.29	0.008	46	局部座屈	遷移点	0.261	17.69	4.62	4.62	0.00183		
実験	0.6			8.0	20.8	0.29	0.010	30	局部座屈	領域1	0.261	17.69	4.62	4.62	0.00217	京大 ^{2.2-3)}
		8.0		20.8	0.28	0.017	10	局部座屈	領域1	0.261	19.43	5.07	5.07	0.00335		
実験	0.3	27.5		9.1	20.6	0.27	0.007	484	局部座屈	領域2	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00394	27_2 ^{2.2-2)}
				評価*2	9.1	20.3	0.27	0.008	108	局部座屈	領域2	0.593	3.20	1.90	1.90	
実験	0.3			9.1	20.3	0.27	0.010	21	局部座屈	領域1	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00527	27_2 ^{2.2-2)}
			9.1	20.3	0.27	0.011	5	局部座屈	領域1	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00580		
解析	0.6		9.1	21.9	0.29	0.016	2	局部座屈	領域1	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00843	S29 (R01)	
実験			6.1	15.4	0.20	0.007	83	局部座屈	領域2	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00369	27_2 ^{2.2-2)}	
実験	0.6		6.1	15.4	0.20	0.008	21	局部座屈	領域1	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00407		27_2 ^{2.2-2)}
			9.1	21.9	0.29	0.004	495	局部座屈	領域2	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00504	27_2 ^{2.2-2)}	
評価*2	9.1		21.3	0.29	0.006	8	局部座屈	遷移点	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00691			
解析	0.6		9.1	21.3	0.29	0.006	6	局部座屈	領域1	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00719	S29 (R01)	
			9.1	21.3	0.28	0.008	2	局部座屈	領域1	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00958		

*1: 繰り返し数は、径高さ比8.0の場合に置換した値。

*2: 遷移点の値は、実験および解析結果を基にして評価した値。

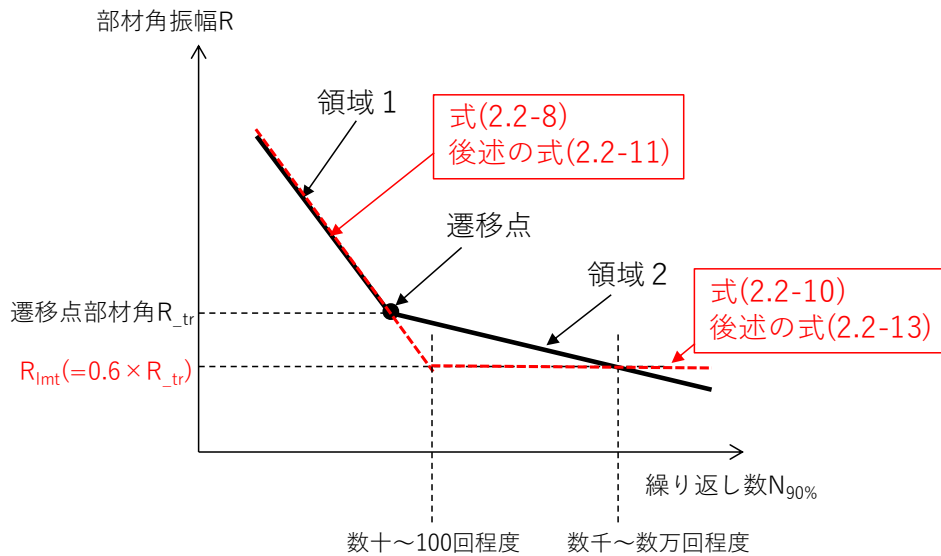


図 2.3-35 部材角 R_{lim} を用いた評価

4) 変形性能の評価式 (案)

前述の式 (2.3-2) ～式 (2.3-10) を用いることにより、一定軸力下の繰返し数 $cN_{90\%}$ の評価が可能であることがわかった。しかしながら、 μ_e の場合分けを行わなければならない等、繰返し数 $N_{90\%}$ を求める上で煩雑となる。また、図 2.3-29 に見られるように、荷重低下要因がき裂進展と局部座屈が存在する場合に、き裂進展に比べて局部座屈の方の勾配が急となっており、両者の性能曲線 (外挿部) が繰返し数の小さな領域で交わり、両者の関係が逆転することが考えられる (例えば、軸力比 0.3 で幅厚比 16.7 と幅厚比 8.75・11.67 の関係)。

ここで、荷重低下要因がき裂進展となる場合が最大の変形性能を与えると仮定すると、前述の式 (2.3-2) ～式 (2.3-8) に於いて、 $\mu_e=15$ となる場合が繰返し数 $N_{90\%}$ の最大値となる。

以上を考慮して、 μ_e の場合分けを行わずに、一定軸力下の繰返し数 $cN_{90\%}$ の評価を行うと、式 (2.3-11) ～式 (2.3-18) を用いることが考えられる。また、式 (2.3-10) に示す有効な等価部材角の範囲を式 (2.3-11) に加える。

$$cN_{90\%} = C_0 \times R_e^{-1.466} \leq N_{90\%_{max}} \quad (R_e \geq R_{e_{lim}}) \quad (2.3-11)$$

ここで、

C_0 : 疲労係数

$$C_0 = 2.308 \times 10^{-3} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \quad (2.3-12)$$

α : 安全係数 (平均評価式 : $\alpha = 1.0$ 、下限評価式 : $\alpha = 0.5$)

λ : 細長比

λ_0 : 径高さ比 8.0 の場合の細長比

R_e : 等価部材角 ($= R / \mu_e$)

$R_{e_{lim}}$: 損傷度評価に有効な R_e の範囲 ($= R_{lim} / \mu_e$)

$$R_{e_{lim}} = 0.6 \times R_{e_{tr}} \quad (2.3-13)$$

$$R_{e_{tr}} = -3.786 \times 10^{-3} + 3.027 \times 10^{-4} \times (D/t) \geq 0.001 \quad (D/t \leq 28) \quad (2.3-14)$$

$$\mu_e = f(n) \times \mu_0 \leq 15.0 \quad (2.3-15)$$

$$f(n) = 1.0 - 1.48 \times n + 0.414 \times n^2 \quad (0 \leq n \leq 0.8) \quad (2.3-16)$$

また、 μ_0 は $1/\alpha_0$ ($\alpha_0 = \varepsilon_y \times (D/t)^2$) の範囲に応じて下式により与える。

$$1/\alpha_0 \geq 1.09 \text{ の時} \quad \mu_0 = 16.0/\alpha_0 - 12.7 \quad (2.3-17-1)$$

$$1.09 \geq 1/\alpha_0 \geq 0.23 \text{ の時} \quad \mu_0 = 4.8/\alpha_0 - 0.52 \quad (2.3-17-2)$$

$N_{90\%_{max}}$: 繰返し数の最大値

$$N_{90\%_{max}} = 3.037 \times 10^{-8} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \times (R/15.0)^{3.220} \quad (2.3-18)$$

ここで、式 (2.3-2) ～式 (2.3-8) での評価結果を「繰返し数-1」、式 (2.3-11) ～式 (2.3-18) での評価を「繰返し数-2」として、表 2.3-15 と表 2.3-16 と同じ形式で、表 2.3-18 と表 2.3-19 に示す。この時の安全係数は $\alpha = 1.0$ とした。なお、下限式を $\alpha = 0.5$ としたのは、図 2.3-31 に於いて、安全率を 2 とすることにより、ほとんどのデータが安全側に評価できると考えたためである。

表 2.3-18、2.3-19 より、異なっているのは、幅厚比が小さく荷重低下要因がき裂進展となっている場合であることがわかる (青色で示した部分)。この部分に於いて、「繰返し数-2」の評価は式

「繰返し数-1」の評価よりも小さな繰返し数を与える。

また、式 (2.3-11) ～式 (2.3-18) での評価した性能曲線（繰返し数-2）を代表的な軸力比および幅厚比に応じて例示すると図 2.3-34 となる。軸力比は 0.3、0.6、0.8 の 3 水準とし、幅厚比は既往鉄骨建物の実態調査での 1 階柱の平均的な値 11 を基準にして、16、21 の 3 水準とした。

また、各例示に対しての R_{lim} の値を表 2.3-20 に示す。図 2.3-36 では $R=R_{lim}$ の値を図 2.3-35 のように示している。表 2.3-20 より、 R_{lim} は幅厚比 D/t および軸力比 n により異なる値となり、幅厚比 D/t および軸力比 n が大きくなると、 R_{lim} は小さくなることがわかる。

表 2.3-18 評価結果(繰り返し数の比較:軸力比・幅厚比変化)

	条件および結果 (実験・解析)							評価結果							
	軸力比 n	幅厚比 D/t	L/D	λ	λ_c	部材角 R	繰り返し数 $N_{90\%}$	荷重低下 要因	f(n)	μ_0	μ_e	$\mu_e \leq 15.0$	等価部材角 R_e	繰り返し数1 $N_{90\%}(1)$	繰り返し数2 $N_{90\%}(2)$
実験	0.3	8.75	8.0	21.9	0.29	0.020	66	き裂進展	0.593	109.77	65.12	15.00	0.00133	55.1 (0.84)	19.9 (0.30)
			8.0	21.9	0.29	0.040	7	き裂進展	0.593	109.77	65.12	15.00	0.00267	5.9 (0.84)	5.9 (0.84)
		11.67	8.0	21.3	0.28	0.013	213	き裂進展	0.593	55.13	32.70	15.00	0.00089	203.5 (0.96)	36.1 (0.17)
			8.0	21.3	0.28	0.020	63	き裂進展	0.593	55.13	32.70	15.00	0.00133	55.1 (0.88)	19.9 (0.32)
		16.70	8.0	21.3	0.29	0.031	20	き裂進展	0.593	50.67	30.06	15.00	0.00206	13.5 (0.68)	10.5 (0.52)
			8.0	20.8	0.28	0.017	22	局部座屈	0.593	19.43	11.53	11.53	0.00147	17.2 (0.78)	17.2 (0.78)
解析	0.3	20.00	8.0	20.6	0.27	0.020	13	局部座屈	0.593	10.39	6.17	6.17	0.00324	5.4 (0.42)	5.4 (0.42)
			8.0	20.6	0.27	0.030	4	局部座屈	0.593	10.39	6.17	6.17	0.00487	3.0 (0.75)	3.0 (0.75)
		28.00	8.0	20.3	0.27	0.007	24	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00391	4.1 (0.17)	4.1 (0.17)
			8.0	20.3	0.27	0.008	7	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00447	3.4 (0.48)	3.4 (0.48)
		8.0	20.3	0.27	0.010	3	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00559	2.4 (0.81)	2.4 (0.81)	
			8.0	20.3	0.27	0.010	3	局部座屈	0.593	3.01	1.79	1.79	0.00559	2.4 (0.81)	2.4 (0.81)
実験	0.6	8.75	8.0	21.9	0.29	0.020	33	き裂進展	0.261	109.77	28.65	15.00	0.00133	55.1 (1.67)	19.9 (0.60)
			8.0	21.9	0.29	0.040	4	き裂進展	0.261	109.77	28.65	15.00	0.00267	5.9 (1.48)	5.9 (1.48)
		11.67	8.0	21.3	0.28	0.013	146	局部座屈	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00093	33.9 (0.23)	33.9 (0.23)
			8.0	21.3	0.28	0.020	24	局部座屈	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00139	18.7 (0.78)	18.7 (0.78)
		16.70	8.0	21.3	0.29	0.031	9	局部座屈	0.261	50.67	13.23	13.23	0.00234	8.7 (0.97)	8.7 (0.97)
			8.0	20.8	0.29	0.010	30	局部座屈	0.261	17.69	4.62	4.62	0.00217	9.8 (0.33)	9.8 (0.33)
解析	0.6	20.00	8.0	20.6	0.27	0.010	5	局部座屈	0.261	10.39	2.71	2.71	0.00369	4.5 (0.90)	4.5 (0.90)
			8.0	20.6	0.27	0.013	3	局部座屈	0.261	10.39	2.71	2.71	0.00479	3.0 (1.02)	3.0 (1.02)
		28.00	8.0	20.3	0.27	0.006	4	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.00761	1.5 (0.39)	1.5 (0.39)
			8.0	20.3	0.27	0.008	2	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.01017	1.0 (0.51)	1.0 (0.51)
		8.0	20.3	0.27	0.010	1	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.01271	0.7 (0.73)	0.7 (0.73)	
			8.0	20.3	0.27	0.010	1	局部座屈	0.261	3.01	0.79	0.79	0.01271	0.7 (0.73)	0.7 (0.73)
解析	0.8	8.75	8.0	21.9	0.29	0.020	15	局部座屈	0.081	109.77	8.89	8.89	0.00225	9.2 (0.62)	9.2 (0.62)
			8.0	21.9	0.29	0.030	8	局部座屈	0.081	109.77	8.89	8.89	0.00338	5.1 (0.64)	5.1 (0.64)
		11.67	8.0	21.9	0.29	0.040	5	局部座屈	0.081	109.77	8.89	8.89	0.00450	3.3 (0.67)	3.3 (0.67)
			8.0	21.3	0.29	0.013	21	局部座屈	0.081	50.67	4.10	4.10	0.00325	5.4 (0.26)	5.4 (0.26)
		8.0	21.3	0.28	0.020	13	局部座屈	0.081	55.13	4.46	4.46	0.00448	3.4 (0.26)	3.4 (0.26)	
			8.0	21.3	0.28	0.030	9	局部座屈	0.081	55.13	4.46	4.46	0.00672	1.9 (0.21)	1.9 (0.21)

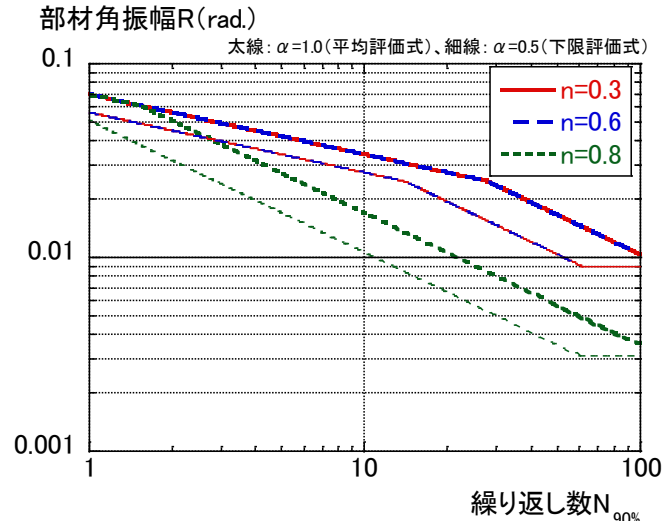
表 2.3-19 評価結果(繰り返し数の比較:径高さ比変化)

	条件および結果 (実験・解析)							評価結果							
	軸力比 n	幅厚比 D/t	L/D	λ	λ_c	部材角 R	繰り返し数 $N_{90\%}$	荷重低下 要因	f(n)	μ_0	μ_e	$\mu_e \leq 15.0$	等価部材角 R_e	繰り返し数1 $N_{90\%}(1)$	繰り返し数2 $N_{90\%}(2)$
実験	0.3	27.5	9.1	23.1	0.30	0.008	123	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00422	3.7 (0.03)	3.7 (0.03)
			9.1	23.1	0.30	0.010	24	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00527	2.7 (0.11)	2.7 (0.11)
			9.1	23.1	0.30	0.011	6	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00580	2.3 (0.38)	2.3 (0.38)
			6.1	15.4	0.20	0.007	63	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00369	4.5 (0.07)	4.5 (0.07)
			6.1	15.4	0.20	0.008	16	局部座屈	0.593	3.20	1.90	1.90	0.00407	3.9 (0.24)	3.9 (0.24)
実験	0.6	11.67	12.0	32.0	0.42	0.020	58	局部座屈	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00139	18.7 (0.33)	18.7 (0.32)
			5.0	13.3	0.18	0.013	56	併発	0.261	55.13	14.39	14.39	0.00093	33.9 (2.00)	33.9 (0.61)
解析	0.6	27.5	9.1	23.1	0.30	0.006	7	局部座屈	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00719	1.7 (0.24)	1.7 (0.24)
			9.1	23.1	0.30	0.008	2	局部座屈	0.261	3.20	0.83	0.83	0.00958	1.1 (0.55)	1.1 (0.55)

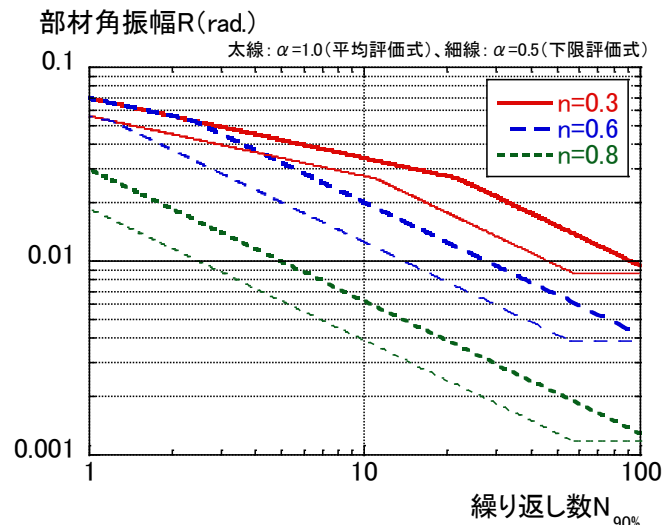
*: 「併発」は局部座屈とき裂進展が同時発生して荷重低下したことを示す。

表 2.3-20 R_{lim} の値

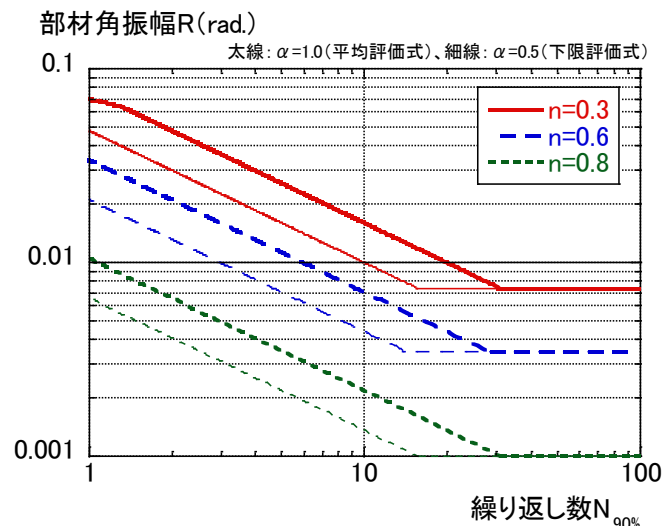
D/t	n	R_{lim}
11	0.3	0.0090 (1/ 111)
	0.6	0.0090 (1/ 111)
	0.8	0.0031 (1/ 326)
16	0.3	0.0087 (1/ 115)
	0.6	0.0038 (1/ 261)
	0.8	0.0012 (1/ 841)
21	0.3	0.0074 (1/ 135)
	0.6	0.0033 (1/ 306)
	0.8	0.0010 (1/ 988)



(a)幅厚比 11.0



(b)幅厚比 16.0



(c)幅厚比 21.0

図 2.3-36 性能曲線の例示(径高さ比 8.0)

(2) 変動軸力下での多数回繰返し特性

1) 概要

変動軸力下で一定振幅荷重を受ける場合の鉄骨柱部材の多数回繰返し性能を基にして、変動軸力下で一定振幅荷重を受ける場合の鉄骨柱部材の多数回繰返し性能を簡易に評価する方法を検討する。

変動軸力を振幅に応じて変化させた場合を考えると、鉄骨柱の場合には、変動軸力の最大軸力での一定振幅荷重の繰返し数と変動軸力時の繰返し数を比較した場合には、変動軸力時の繰返し数の方が大きくなると考えられる。令和2年度実施した軸力比 0.3 ± 0.5 (変動) と軸力比 0.8 (一定) での一定振幅荷重時の繰返し数を図 2.3-29(c) で比較すると、上記のように変動軸力時の繰返し数の方が 1.7 倍大きくなっている。また、令和1年度の報告書の図 2.3-28 (下記に示す参考図に再掲載) では、軸力比 0.6 ± 0.3 (変動) と軸力比 0.9 (一定) での繰返し数 $N_{90\%}$ を比較すると、軸力比 0.6 ± 0.3 (変動) の $N_{90\%}$ の方が軸力比 0.9 (一定) よりも $5.3 \sim 6.5$ 倍程度大きくなっている。上記の軸力は極度に大きい場合であるが、これは変動軸力下では小さな振幅時の軸力が小さいため、この時の損傷度が軽減されるためではないかと考えられる。

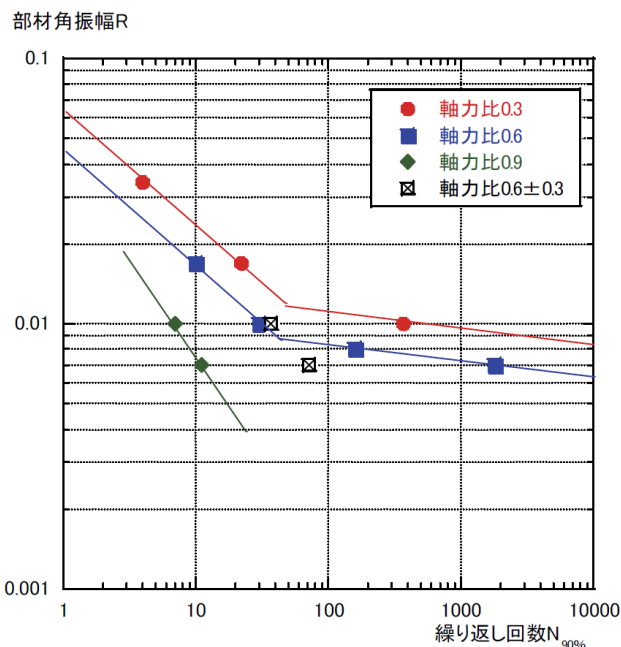
以上より、変動軸力を受ける鉄骨柱の多数回繰返し特性を評価する方法としては、

① 変動軸力時の最大軸力下での一定振幅荷重の疲労曲線で評価

② 変動軸力時の小振幅での損傷が低減されることを考慮した簡易評価

の2つが考えられる。

以下では、②の評価法について検討を行う。



【参考図】 一定軸力と変動軸力での繰返し数の比較

2) 変動軸力下での繰返し数の推定

一定軸力時の繰返し数 ($cN_{90\%}$) を用いて、変動軸力時の繰返し数 ($vN_{90\%}$) を推定する手法を以下に示す。

変動軸力の経路としては、図 2.3-37 のような経路を考える。圧縮軸力側に着目すると、図 2.3-35 の太線側に着目し、 $1/N_{90\%}$ と部材角 R の関係を一定軸力と変動軸力で描くと、図 2.3-38 のようになる。ここで、一定軸力 $f_c(R)$ および変動軸力 $f_v(R)$ とともに式(2.3-8)や式(2.3-11)に軸力比 n および部材角 R を代入し、逆数をとったものである。

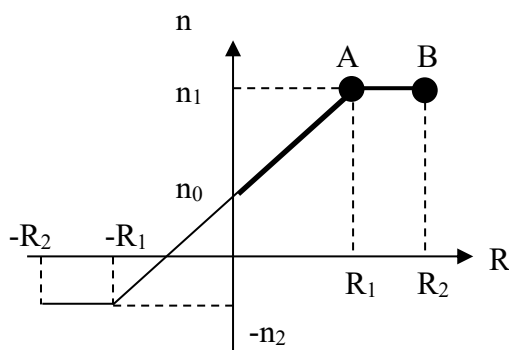


図 2.3-37 変動軸力 N-R 関係

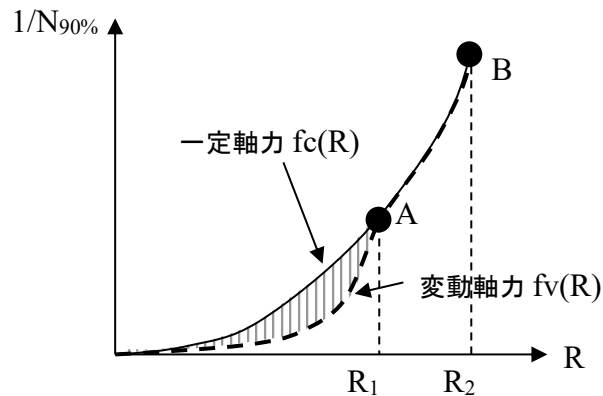


図 2.3-38 $1/N_{90\%}$ -R 関係

ここで、一定軸力と変動軸力での損傷度の差に起因するのは、図 2.3-38 の斜線の領域であると考えられるので、この領域の平均の $1/N_{90\%}$ (Δ_0) を計算する。次に、 Δ_0 は $R=R_1$ での損傷度であるので、最終変形時の損傷度に点 B と点 A の比率を乗じることにより変動軸力による付加分 (Δ) を評価する。

最後に、一定軸力の値 ($cN_{90\%}$) と変動軸力の付加分 ($1/\Delta$) を足し合わせることで、変動軸力時の繰返し回数 ($vN_{90\%}$) とする。

また、令和 2 年度の実験結果および既往の実験結果より、変動軸力下の繰返し数は最大軸力時の繰返し数より大きく、長期軸力時 ($n=n_0$) よりも小さいことため、式 (2.3-19) に示すように繰返し数の上限を設ける。

$$vN_{90\%} = \frac{1}{f_c(R_2)} + \frac{1}{\Delta} \leq cN_{90\%}(n=n_0) \quad (2.3-19)$$

$$\Delta = \frac{f_c(R_2)}{f_c(R_1)} \times \Delta_0 \quad (2.3-20)$$

$$\Delta_0 = \frac{1}{R_1} \int_0^{R_1} (f_c(R) - f_v(R)) dR \quad (2.3-21)$$

3) 実験結果の評価

令和2年度実施した変動軸力の試験体2体（径高さ比 8.0、幅厚比 11.67、軸力比 0.3 ± 0.5 （変動））について、式 (2.3-19) での繰返し数の評価を試みる。試験体の部材角振幅が $R=1/75$ と $1/50$ である。

実験では、圧縮軸力側で局部座屈により、引張軸力側でき裂進展により荷重が低下したが、令和2年度の検討では式 (2.3-4) および式 (2.3-16) の適用範囲の軸力比が $0 \leq n \leq 0.8$ であることから、圧縮軸力側に着目して評価を行う。

軸力比 0.3 ± 0.5 （変動）での図 2.3-38 に相当するグラフを描画すると、図 2.3-39 となる。

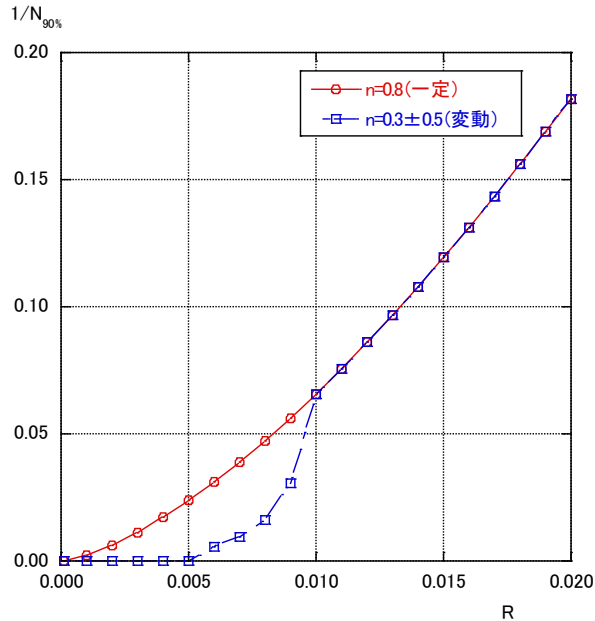


図 2.3-39 1/ N_{90%}-R 関係

ここで、式 (2.3-19) により、変動軸力での繰返し数を求めると、表 2.3-21 となる。なお、表 2.3-21 の評価結果①は一定軸力（軸力比 0.8）、②は式 (2.3-19) によるものである。また、変動軸力の評価では、幅厚比の小さな領域もより正確に評価可能な式 (2.3-2) ~式 (2.3-8) での評価結果の「繰返し数-1」で $\alpha = 1.0$ とした評価式を用いた。表 2.3-21 には、既往の基整促 27-2 で実施した変動軸力 0.3 ± 0.3 の実験結果（3 体）の評価結果も示す。

表 2.3-21 評価結果(変動軸力)

	実験条件						荷重 方向	実験結果		評価結果		γ (=②/①)
	軸力比 n	幅厚比 D/t	L/D	λ	λc	部材角 R		荷重低下 要因	繰返し数 N _{90%}	一定軸力① N _{90%}	変動軸力② N _{90%}	
S29	0.3±0.5	11.67	8.0	21.3	0.28	0.013	正 (圧縮)	局部座屈	35	10.3 (0.29)	49.7 (1.42)	4.82
							負 (引張)	き裂進展	54	-	-	-
						0.020	正 (圧縮)	局部座屈	33	5.7 (0.17)	27.4 (0.83)	4.82
							負 (引張)	き裂進展	32	-	-	-
27-2	0.3±0.3	27.5	9.1	23.1	0.30	0.009	正 (圧縮)	局部座屈	8	1.9 (0.24)	7.1 (0.89)	3.72
			6.1	15.4	0.20	0.006	正 (圧縮)	局部座屈	29	1.8 (0.06)	5.5 (0.19)	3.01
			12.1	30.8	0.40	0.009	正 (圧縮)	局部座屈	56	2.4 (0.04)	11.3 (0.20)	4.62

()内は、評価結果/実験結果の値

表 2.3-21 より、評価結果②の方が①よりも 3.0～4.8 倍程度大きくなっており、実験結果と比較的良好な対応をしていることがわかる。

また、評価結果①ではかなり過小評価となるため、評価結果②と評価結果①の比 γ を評価結果①の値に乗ずることにより、簡易に評価することが考えられる。

以上より、変動軸力下の繰返し数 ${}_vN_{90\%}$ は、 γ と最大軸力時の繰返し数 $N_{90\%}(n=n_I)$ を用いて式 (2.3-22) で表される。また、式 (2.3-20) には式 (2.3-17) と同様に上限を設ける。

$${}_vN_{90\%} = \gamma \times N_{90\%}(n=n_I) \leq N_{90\%}(n=n_0) \quad (2.3-22)$$

ここで、 γ の評価として、 $D/t=11.67$ と $D/t=27.5$ では、同じ変動幅 $\Delta n (=n_I - n_0)$ では $D/t=11.67$ の方が軸力による劣化度合いが小さく、 γ が小さくなることが考えられるので、表 2.3-21 の幅厚比 D/t 、軸力比 $n=0.3 \pm 0.5$ の場合 ($R=0.020$) で、変動幅 Δn を 0.0～0.5 と変化させて γ の値を評価すると、式 (2.3-23) が近似できる。

$$\gamma = 1.0 + 29.35 \times \Delta n^{2.90} \quad (0.0 \leq \Delta n \leq 0.5) \quad (2.3-23)$$

式 (2.3-23) と γ の評価結果との比較を図 2.3-40 に示す。この時の評価結果は表 2.3-21 のデータである。 γ (近似値) はほぼ安全側の評価となっていることがわかる。

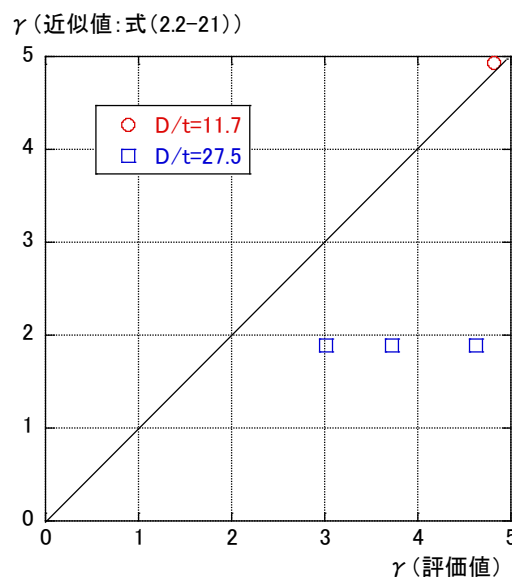


図 2.3-40 γ の近似値と評価値の関係

4) 変形性能の評価式 (案)

前述の式 (2.3-24) ~式 (2.3-25) を用いることにより、変動軸力下の繰返し数 $\sqrt[n]{N_{90\%}}$ が評価可能である。変動軸力下の繰返し数 $\sqrt[n]{N_{90\%}}$ の評価式をまとめて再掲載する。

$$\sqrt[n]{N_{90\%}} = \gamma \times \sqrt[n_1]{cN_{90\%}(n=n_1)} \leq \sqrt[n_0]{cN_{90\%}(n=n_0)} \quad (2.3-24)$$

ここで、

γ : 変動軸力を考慮した割増係数

$$\gamma = 1.0 + 29.35 \times \Delta n^{2.90} \quad (0.0 \leq \Delta n \leq 0.5) \quad (2.3-25)$$

Δn : 軸力比の変動幅 (= $n_1 - n_0$)

$\sqrt[n_1]{cN_{90\%}(n=n_1)}$: 一定軸力での最大軸力時の繰返し数

$\sqrt[n_0]{cN_{90\%}(n=n_0)}$: 一定軸力での長期軸力時の繰返し数

(3) 任意の変位振幅での多数回繰返し特性

2.3.2 (2)でも述べたように、令和2年度実施した実験結果によると、任意の変位振幅での累積損傷度 D を式 (2.3-11) または式 (2.3-22) で得られた性能曲線から、式 (2.3-26) に示す線形累積損傷則 (Miner 則) を用いて評価できる。ただし、小さな振幅の評価をどこまで評価に含めるかについては今後検討が必要である。

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.3-26)$$

ここで、

N_i : 任意の部材角の繰返し数 $N_{90\%}$

(式 (2.3-11) または式 (2.3-22) で評価)

n_i : 任意の部材角に於ける繰返し数

2.3.3 鉄骨柱部材の多数回繰り返し载荷実験と疲労評価の検討のまとめと課題

長周期地震動による繰り返し荷重が作用する角形断面鋼管柱を対象に、変動軸力・変動振幅下の特性に着目し、一定軸力・一定振幅、変動軸力・一定振幅、一定軸力・変動振幅下の繰り返し载荷実験を実施した。また、実験結果及び既往の実験結果に基づき、評価対象のデータは限定的であるが、一定軸力下および変動軸力下での性能曲線（案）を示した。以下に、令和2年度得られた成果及び今後の課題について概括する。

(1) 繰り返し载荷実験

変動軸力および変動振幅を受ける角形断面鋼管柱の変形性能を把握するため、軸力比・振幅をパラメータとした载荷実験を実施した。

変動軸力を受ける鋼管柱の変形性能は、基準軸力比を受ける試験体と（圧縮側）最大軸力比を受ける試験体との性能となることを確認した。

変動振幅を受ける試験体は、実験範囲では一定振幅の試験体の実験結果から線形累積損傷則（Miner 則）を用いて求めた変形性能と変動振幅の実験結果から得られた変形性能が誤差 10%程度となり概ね良い対応となった。

(2) 鉄骨柱部材の疲労評価

・一定軸力での多数回繰り返し特性の把握

一定軸力下での実験および解析の全 40 データ（軸力比 0.3～0.8、幅厚比 8.75～28.0、径高さ比 5.0～12.0（細長比 13.3～32.0）、部材角 0.006～0.04）を用いて、一定振幅の条件で遷移点よりも繰り返し数が少ない領域（領域 1）に於いて軸力比、幅厚比、径高さ比（細長比）を考慮した等価部材角 R_e を定義して、繰り返し数 ${}_cN_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係性を評価した。得られた評価式に関して、代表的な軸力比および幅厚比に応じて、部材角振幅 R と繰り返し数 ${}_cN_{90\%}$ の関係を例示した。ただし、軸力比および幅厚比の大きな範囲では評価式は実験および解析値を過小評価する傾向にあるため、今後は、実験および解析資料を蓄積し、軸力比および幅厚比の大きな範囲での精度向上を行っていくことが必要と考えられる。今後は、実験および解析資料を蓄積して、軸力比および幅厚比の大きな範囲での精度向上を行っていくことが必要と考えられる。

また、遷移点よりも繰り返し数が多い領域（領域 2）では、疲労特性を評価しなくとも良い部材角 R_{lim} を設定し、評価範囲を $R \geq R_{lim}$ とすることで、安全側に評価できるようにした。なお、領域 2 での性能曲線の評価については実験資料が少なく、今後の課題となる。

・変動軸力での多数回繰り返し特性の把握

変動軸力を受ける鉄骨柱の多数回繰り返し特性を評価する方法として、変動軸力時の小振幅での損傷が低減されることを考慮した簡易評価手法により繰り返し数 ${}_vN_{90\%}$ について、変動軸力を考慮した割増係数 γ を最大軸力時の繰り返し数に乗ずることで評価した。なお、変動軸力下での繰り返し数評価の検証試験体が全 5 体と少ないため、今後更なる実験資料の蓄積により精度向上の検討が必要と考えられる。

・任意の変位振幅での多数回繰り返し特性の把握

任意の変位振幅での累積損傷度 D を一定軸力または変動軸力での性能曲線（ ${}_cN_{90\%}$ 、 ${}_vN_{90\%}$ ）により、線形累積損傷則（Miner 則）を用いて評価可能である。ただし、小さな振幅の評価をどこまで評価に含めるかについては今後検討が必要である。

(3) 疲労評価式まとめ

本文中に示した評価式をまとめて以下に示す。

【一定軸力が作用する柱の繰り返し数 $cN_{90\%}$ 】

$$cN_{90\%} = C_0 \times R_e^{-1.466} \leq N_{90\%_{max}} \quad (R_e \geq R_{e_{lim}}) \quad (2.3-11)$$

ここで、

C_0 : 疲労係数

$$C_0 = 2.308 \times 10^{-3} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \quad (2.3-12)$$

α : 安全係数 (平均評価式 : $\alpha = 1.0$ 、下限評価式 : $\alpha = 0.5$)

λ : 細長比

λ_0 : 径高さ比 8.0 の場合の細長比

R_e : 等価部材角 ($= R / \mu_e$)

$R_{e_{lim}}$: 損傷度評価に有効な R_e の範囲 ($= R_{lim} / \mu_e$)

$$R_{e_{lim}} = 0.6 \times R_{e_{tr}} \quad (2.3-13)$$

$$R_{e_{tr}} = -3.786 \times 10^{-3} + 3.027 \times 10^{-4} \times (D/t) \geq 0.001 \quad (D/t \leq 28) \quad (2.3-14)$$

$$\mu_e = f(n) \times \mu_0 \leq 15.0 \quad (2.3-15)$$

$$f(n) = 1.0 - 1.48 \times n + 0.414 \times n^2 \quad (0 \leq n \leq 0.8) \quad (2.3-16)$$

また、 μ_0 は $1/\alpha_0$ ($\alpha_0 = \varepsilon_y \times (D/t)^2$) の範囲に応じて下式により与える。

$$1/\alpha_0 \geq 1.09 \text{ の時} \quad \mu_0 = 16.0/\alpha_0 - 12.7 \quad (2.3-17-1)$$

$$1.09 \geq 1/\alpha_0 \geq 0.23 \text{ の時} \quad \mu_0 = 4.8/\alpha_0 - 0.52 \quad (2.3-17-2)$$

$N_{90\%_{max}}$: 繰り返し数の最大値

$$N_{90\%_{max}} = 3.037 \times 10^{-8} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \times (R/15.0)^{-3.220} \quad (2.3-18)$$

【変動軸力が作用する柱の繰り返し数 $vN_{90\%}$ 】

$$vN_{90\%} = \gamma \times cN_{90\%}(n=n_1) \leq cN_{90\%}(n=n_0) \quad (2.3-24)$$

ここで、

γ : 変動軸力を考慮した割増係数

$$\gamma = 1.0 + 29.35 \times \Delta n^{2.90} \quad (0.0 \leq \Delta n \leq 0.5) \quad (2.3-25)$$

Δn : 軸力比の変動幅 ($= n_1 - n_0$)

$cN_{90\%}(n=n_1)$: 一定軸力での最大軸力時の繰り返し数

$cN_{90\%}(n=n_0)$: 一定軸力での長期軸力時の繰り返し数

【累積損傷の評価 : 線形累積損傷則 (Miner 則)】

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.3-26)$$

ここで、

N_i : 任意の部材角の繰り返し数 $N_{90\%}$ (式 (2.3-10) または式 (2.3-20) で評価)

n_i : 任意の部材角に於ける繰り返し数

【参考文献】

- 2.3-1) 澤本佳和、福元敏之、長谷川隆：多数回繰り返し荷重下の鉄骨柱部材の変形能力評価法に関する検討（その1）幅厚比の影響検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019.7
- 2.3-2) 建築研究所：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する資料、建築研究資料、第160号、2014.6
- 2.3-3) 文部科学省、京都大学：都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ② 都市機能の維持・回復のための調査・研究 成果報告書（H25、27）
- 2.3-4) 澤本佳和、久保田淳、鈴木芳隆：多数回繰り返し荷重下の鉄骨柱部材の変形能力評価に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018.9
- 2.3-5) 山田哲、秋山宏、桑村仁：局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動、日本建築学会構造系論文報告集、第444号、pp.135-143、1993.2
- 2.3-6) 日本建築学会：鋼構造物の座屈に関する諸問題 2013、2013.6

2.4 まとめ

第2章の各節の検討の概要と得られた成果及び課題を以下にまとめて示す。

2.4.1 鉄骨柱部材の多数回繰り返し載荷実験（H30年度実施）

鉄骨柱部材に対する設計用疲労曲線式を提案することを目的として、既往知見（既存超高層、既往実験）の調査結果を反映した実験パラメータ（幅厚比、径高さ比、軸力比および変位振幅）を設定して、鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を実施した。平成30年度の調査および実験にて得られた知見を以下に示す。

(1) まとめ

【既往知見の調査】

- 1) 1960年代から1990年代に建設された鉄骨超高層建物について、柱諸元（幅厚比、径高さ比等）の実態調査を行った結果、最下層の柱について、以下の点がわかった。
 - ・幅厚比はFAランクであり、10前後に多く分布している。
 - ・径高さ比は5～8程度に多く分布し、最大で12程度である。
- 2) 柱部材を用いた多数回繰り返し実験（一定振幅、軸力（一定、変動））について、調査を行った結果、既往実験では幅厚比：16.7～27.5程度、径高さ比：8.0～9.1程度、軸力比：0.3～0.6を中心に実験が実施されていることがわかった。

以上の調査結果より、実験パラメータとして、幅厚比を8.75と11.67（FAランク）の2水準、径高さ比5.0、8.0、12.0の3水準（8.0を中心）、軸力比を0.3と0.6の2水準を選定して、変位振幅（部材角振幅）を2水準とした多数回繰り返し実験を実施した。

【実験結果】

- 3) 最大荷重以降の荷重低下の主要因としては、①：柱頭・柱脚の局部座屈、②：柱頭・柱脚の溶接熱影響部のき裂進展、③：①と②の併発の3種類があり、軸力比、部材角振幅、幅厚比および径高さ比の関係で主要因が異なる。
- 4) 軸縮みと局部座屈の進展は関連しており、荷重低下の主要因が局部座屈の場合には、局部座屈の進展とともに軸縮みが大きくなる。また、荷重低下の主要因がき裂進展の場合には、最大荷重以降ではき裂進展が進むため、軸縮みや局部座屈はほとんど進展しなくなる。
- 5) 軸力比については、既往知見と同様に軸力比が大きくなると同じ部材角での繰り返し数は減少する傾向にある。
- 6) 幅厚比については、軸力比0.3の場合には幅厚比が小（8.75）と大（11.67）で異なっても、ほぼ同じ繰り返し数となっている。しかし、軸力比0.6の場合には幅厚比が小さな方（8.75）が大きな方（11.67）よりも繰り返し数が大きくなる。これは、荷重低下の主要因が異なることが影響しており、軸力比0.3の場合には幅厚比に関わらず、荷重低下の主要因はき裂進展であり、軸力比0.6の場合には幅厚比小ではき裂進展、幅厚比大では局部座屈となっているためである。
- 7) 径高さ比については、既往知見と同様に径高さ比が大きくなると同じ部材角での繰り返し数は増加する。また、径高さ比が小（5.0）と中（8.0）での軸力比0.6では、荷重低下の主要因が異なり、径高さ比が小さな方（5.0）がき裂進展の影響が大きくなる。

8) 鉄骨柱部材の性能曲線は荷重低下の主要因が、「き裂進展（最小幅厚比）」を上限とし、「局部座屈（最大幅厚比）」を下限とするように、各部材因子（幅厚比、径高さ比）と外部因子（軸力比）により決定される。なお、最小幅厚比は 8.75～11.67、最大は 27.5 である。

(2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に示す。

1) 一定軸力での多数回繰り返し特性の把握

・ 軸力比 0.6 に於ける異なる荷重低下の主要因での性能曲線の把握

平成 30 年度の実験結果では、軸力比 0.3 では幅厚比が小 (8.75) と大 (11.67) で異なっても、荷重低下の主要因がき裂進展で同じであったが、軸力比 0.6 では局部座屈とき裂進展で異なる結果となり、繰り返し数は「き裂進展>局部座屈」であった。上記の試験体は各 2 体と少ないため、各幅厚比に応じて、部材角振幅の異なる実験データを増やすことにより、上記の関係を再度把握することが必要と考えられる。

軸力比 0.6 での考えられる実験パラメータ（案）は以下である。

幅厚比：小 (8.75) → 部材角振幅：1/75 程度

幅厚比：大 (11.67) → 部材角振幅：1/33 程度

・ 部材因子（幅厚比、径高さ比）と外部因子（軸力比）により決定づけられる性能曲線の評価

平成 30 年度の実験結果および既往実験結果から、鉄骨柱部材の性能曲線は荷重低下の主要因が、「き裂進展（最小幅厚比）」を上限とし、「局部座屈（最大幅厚比）」を下限とするように、各部材因子（幅厚比、径高さ比）と外部因子（軸力比）により決定されることがわかった。今後は、部材因子と外部因子の組み合わせにより、上限と下限の性能曲線の間での性能曲線をどのように評価するのが課題となる。

2) 変動軸力での多数回繰り返し特性の把握

平成 30 年度の既存超高層の実態調査から設定した幅厚比に対して、変動軸力下での多数回繰り返し実験は存在せず、既存超高層の隅柱に於ける多数回繰り返し特性を把握する上からも実験データを取得することが必要と考えられる。

3) 変動振幅に対する多数回繰り返し特性の把握

建物モデルでの応答解析により部材の多数回繰り返し特性を評価する際には、線形累積損傷則（Miner 則）を用いる必要がある。既往の梁部材での実験に於いても変動振幅の多数回繰り返し実験を実施し、その精度の確認を実施しており、鉄骨柱部材に関しても実験データを取得することが必要と考えられる。

また、平成 30 年度は「部材角」と「繰り返し数 $N_{90\%}$ 」での整理を主として実施しているが、他の因子「塑性率」「繰り返し数 $N_{85\%}$ or $N_{80\%}$ 」等での整理・検討も必要と考えられる。

2.4.2 設計用疲労曲線と有限要素法を用いた解析可能性の検討（R1 年度実施）

鉄骨柱部材の疲労性能曲線式を提案することを目的とし、平成 30 年度の実験結果および既往の実験結果を用い、鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討を実施した。また、平成 30 年度の実験結果を対象に有限要素法（FEM）を用いて、実験で確認された荷重低下要因（局部座屈、き裂発生）

をシミュレート可能かの検討を行った。また、今後補充が必要なデータの一部に関して、有限要素法（FEM）を用いたパラメータスタディを実施し、FEMの解析結果も考慮して設計用疲労曲線の検討を行った。以下に令和1年度の得られた知見を示す。

(1) まとめ

【設計用疲労曲線（案）の検討】

- 1) 一定軸力と変動軸力では、幅厚比の大きな場合（幅厚比：27.5）には、変動軸力のデータは一定軸力（長期相当）よりも小さくなり、幅厚比の小さな場合（幅厚比：16.7）には、変動軸力のデータは一定軸力（長期相当）のデータとほぼ同じとなる傾向にある。
- 2) 柱部材の多数回繰り返し実験での降伏後のひずみ硬化による耐力上昇（ Q_{max}/Q_p ）は、全塑性耐力と比較して、軸力比 $n=0.3$ で最大 1.8 倍、 $n=0.6$ で最大 2.8 倍、 $n=0.9$ で最大 5.6 倍となり、軸力比が大きくなると耐力上昇は大きくなる。また、上記の耐力上昇は応答解析における余裕量となるが、直接に評価することは困難であるため、例えば、繰り返し回数として、最大荷重の 90% となるまでの繰り返し回数 $N_{90\%}$ を基本とし、 $N_{80\%}$ や $N_{70\%}$ についても別途評価することが考えられる。なお、上記に関しては応答解析時の柱部材の履歴モデルとの関連もあるので、総合的に判断する必要がある。
- 3) 既往の実験結果から応答解析モデル S30 の S 柱部材（1 階：幅厚比 15.0）の性能曲線（設計用疲労曲線）を検討した結果、「案 1：1 階の隅柱・中柱とも一定軸力 0.6 の性能曲線を用いる」「案 2：1 階の隅柱は変動軸力 0.6 ± 0.3 の性能曲線を、1 階の中柱は一定軸力 0.3 の性能曲線を用いる」を提案した。
- 4) 今後、設計用疲労曲線を提案するための必要なデータとして、①幅厚比が 20 程度のデータ、②幅厚比 27.5 での軸力比 0.6 のデータ、③軸力比 0.6 を超えるデータを抽出した。

【有限要素法（FEM）を用いた解析可能性の検討とパラメータスタディ】

- 5) 有限要素法（FEM）を用いて、平成 30 年度実施した柱部材実験のシミュレーションを実施した結果、「短柱圧縮試験に於ける荷重上昇」「多数回繰り返し実験に於ける荷重上昇」については、シミュレート可能なこと、「多数回繰り返し実験に於ける溶接熱影響部のき裂進展と柱端部の局部座屈発生による荷重低下」については、解析結果が実験結果よりも小さな変形能力を与える場合もあるが、全体的な傾向を表現できることがわかった。
- 6) 上記解析モデルを用いて、幅厚比等を変化させたパラメータスタディを行った結果、軸力比 0.3 と 0.6 で幅厚比の差異による性能曲線の相対位置は多少異なるが、H30 年度の報告書に記載した性能曲線の上下限と同様に、上限が幅厚比小のき裂進展、下限が幅厚比大の局部座屈により決定づけられる性能曲線であることがわかった。

(2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に示す。

- 1) 一定軸力での多数回繰り返し特性の把握

有限要素法（FEM）による解析に関して、柱頭・柱脚部に局部座屈を伴い、溶接熱影響部のき裂進展により徐々に荷重低下する場合の解析については、解析結果の繰り返し回数が実験結果よりも少なくなる傾向にあるため、この点に関して、解析精度の向上に努める必要がある。

また、令和 1 年度実施の解析結果では、設計用疲労曲線を評価するためには十分では無く、幅厚比等をパラメータとした解析を更に実施する必要がある。

2) 変動軸力での多数回繰返し特性の把握

平成 30 年度の既存超高層の実態調査から設定した幅厚比に対して、変動軸力下での多数回繰返し実験はほとんど存在せず、既存超高層の隅柱に於ける多数回繰返し特性を把握する上からも実験データを取得することが必要と考えられる。

3) 変動振幅に対する多数回繰返し特性の把握

建物モデルでの応答解析により部材の多数回繰返し特性を評価する際には、線形累積損傷則（Miner 則）を用いる必要がある。既往の梁部材での実験に於いても変動振幅の多数回くり返し実験を実施し、その精度の確認を実施しており、鉄骨柱部材に関しても実験データを取得することが必要と考えられる。

2.4.3 鉄骨柱部材の多数回繰返し载荷実験と疲労評価の検討（R2 年度実施）

長周期地震動による繰返し荷重が作用する角形断面鋼管柱を対象に、変動軸力・変動振幅下の特性に着目し、一定軸力・一定振幅、変動軸力・一定振幅、一定軸力・変動振幅下の繰返し载荷実験を実施した。また、実験結果及び既往の実験結果に基づき、評価対象のデータは限定的であるが、一定軸力下および変動軸力下での性能曲線（案）を示した。以下に、令和 2 年度得られた成果及び今後の課題について概括する。

(1) 繰返し载荷実験

変動軸力および変動振幅を受ける角形断面鋼管柱の変形性能を把握するため、軸力比・振幅をパラメータとした载荷実験を実施した。

変動軸力を受ける鋼管柱の変形性能は、基準軸力比を受ける試験体と（圧縮側）最大軸力比を受ける試験体の間の性能となることを確認した。

変動振幅を受ける試験体は、実験範囲では一定振幅の試験体の実験結果から線形累積損傷則（Miner 則）を用いて求めた変形性能と変動振幅の実験結果から得られた変形性能が誤差 10%程度となり概ね良い対応となった。

(2) 鉄骨柱部材の疲労評価

・一定軸力での多数回繰返し特性の把握

一定軸力下での実験および解析の全 40 データ（軸力比 0.3~0.8、幅厚比 8.75~28.0、径高さ比 5.0~12.0（細長比 13.3~32.0）、部材角 0.006~0.04）を用いて、一定振幅の条件で遷移点よりも繰返し数が少ない領域（領域 1）に於いて軸力比、幅厚比、径高さ比（細長比）を考慮した等価部材角 R_e を定義して、繰返し数 $cN_{90\%}$ と等価部材角 R_e の関係性を評価した。得られた評価式に関して、代表的な軸力比および幅厚比に応じて、部材角振幅 R と繰返し数 $cN_{90\%}$ の関係を例示した。ただし、軸力比および幅厚比の大きな範囲では評価式は実験および解析値を過小評価する傾向にあるため、今後は、実験および解析資料を蓄積し、軸力比および幅厚比の大きな範囲での精度向上を行っていくことが必要と考えられる。今後は、実験および解析資料を蓄積して、軸力比および幅厚比の大きな範囲での精度向上を行っていくことが必要と考えられる。

また、遷移点よりも繰返し数が多い領域（領域 2）では、疲労特性を評価しなくとも良い部材角 R_{lim} を設定し、評価範囲を $R \geq R_{lim}$ とすることで、安全側に評価できるようにした。なお、領域 2 での性能曲線の評価については実験資料が少なく、今後の課題となる。

・ 変動軸力での多数回繰返し特性の把握

変動軸力を受ける鉄骨柱の多数回繰返し特性を評価する方法として、変動軸力時の小振幅での損傷が低減されることを考慮した簡易評価手法により繰返し数 ${}_v N_{90\%}$ について、変動軸力を考慮した割増係数 γ を最大軸力時の繰返し数に乗ずることで評価した。なお、変動軸力下での繰返し数評価の検証試験体が全 5 体と少ないため、今後更なる実験資料の蓄積により精度向上の検討が必要と考えられる。

・ 任意の変位振幅での多数回繰返し特性の把握

任意の変位振幅での累積損傷度 D を一定軸力または変動軸力での性能曲線 (${}_c N_{90\%}$ 、 ${}_v N_{90\%}$) により、線形累積損傷則 (Miner 則) を用いて評価可能である。ただし、小さな振幅の評価をどこまで評価に含めるかについては今後検討が必要である。

(3) 疲労評価式まとめ

本文中に示した評価式をまとめて以下に示す。

【一定軸力が作用する柱の繰返し数 ${}_c N_{90\%}$ 】

$${}_c N_{90\%} = C_0 \times R_e^{-1.466} \leq N_{90\%_{max}} \quad (R_e \geq R_{e_lim}) \quad (2.3-11)$$

ここで、

C_0 : 疲労係数

$$C_0 = 2.308 \times 10^{-3} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \quad (2.3-12)$$

α : 安全係数 (平均評価式 : $\alpha = 1.0$ 、下限評価式 : $\alpha = 0.5$)

λ : 細長比

λ_0 : 径高さ比 8.0 の場合の細長比

R_e : 等価部材角 ($= R / \mu_e$)

R_{e_lim} : 損傷度評価に有効な R_e の範囲 ($= R_{lim} / \mu_e$)

$$R_{e_lim} = 0.6 \times R_{e_tr} \quad (2.3-13)$$

$$R_{e_tr} = -3.786 \times 10^{-3} + 3.027 \times 10^{-4} \times (D/t) \geq 0.001 \quad (D/t \leq 28) \quad (2.3-14)$$

$$\mu_e = f(n) \times \mu_0 \leq 15.0 \quad (2.3-15)$$

$$f(n) = 1.0 - 1.48 \times n + 0.414 \times n^2 \quad (0 \leq n \leq 0.8) \quad (2.3-16)$$

また、 μ_0 は $1/\alpha_0$ ($\alpha_0 = \varepsilon_y \times (D/t)^2$) の範囲に応じて下式により与える。

$$1/\alpha_0 \geq 1.09 \text{ の時} \quad \mu_0 = 16.0/\alpha_0 - 12.7 \quad (2.3-17-1)$$

$$1.09 \geq 1/\alpha_0 \geq 0.23 \text{ の時} \quad \mu_0 = 4.8/\alpha_0 - 0.52 \quad (2.3-17-2)$$

$N_{90\%_{max}}$: 繰返し数の最大値

$$N_{90\%_{max}} = 3.037 \times 10^{-8} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \times (R/15.0)^{-3.220} \quad (2.3-18)$$

【変動軸力が作用する柱の繰返し数 ${}_v N_{90\%}$ 】

$${}_v N_{90\%} = \gamma \times {}_c N_{90\%}(n=n_I) \leq {}_c N_{90\%}(n=n_0) \quad (2.3-24)$$

ここで、

γ : 変動軸力を考慮した割増係数

$$\gamma = 1.0 + 29.35 \times \Delta n^{2.90} \quad (0.0 \leq \Delta n \leq 0.5) \quad (2.3-25)$$

Δn : 軸力比の変動幅 ($= n_I - n_0$)

${}_cN_{90\%}(n=n_I)$: 一定軸力での最大軸力時の繰返し数

${}_cN_{90\%}(n=n_0)$: 一定軸力での長期軸力時の繰返し数

【累積損傷の評価：線形累積損傷則（Miner 則）】

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.3-26)$$

ここで、

N_i : 任意の部材角の繰返し数 $N_{90\%}$ (式 (2.3-10) または式 (2.3-20) で評価)

n_i : 任意の部材角に於ける繰返し数