

**S29「長周期地震動に対する
超高層鉄骨造の安全性検証法
に関する検討」**

**鹿島建設株式会社
株式会社小堀鐸二研究所
公立大学法人北九州市立大学
共同研究：国立研究開発法人建築研究所**

背景・目的

超高層建築物等の性能評価での設計用長周期地震動は、地域や周期によっては、告示波の2倍程度の速度応答スペクトルとなる場合があり、通常のクライテリア（層間変形角 1/100, 塑性率 2）では、設計不能（断面大）となる場合あり。

⇒ 梁部材や柱部材の限界性能に基づいた設計を行うことで、通常のクライテリアを用いない設計方法が要望。

● 通常のクライテリアを用いない設計では、建築物の最大層間変形角が現状に比べてかなり大きくなる可能性あり。

⇒ **大変形時の状況・倒壊までの余力**等も検討しておく必要。

● 過去の基整促における検討では、梁端部の実験を主体的に実施し、**柱部材については一定軸力での耐震性など基本性能を把握**するに止まる。

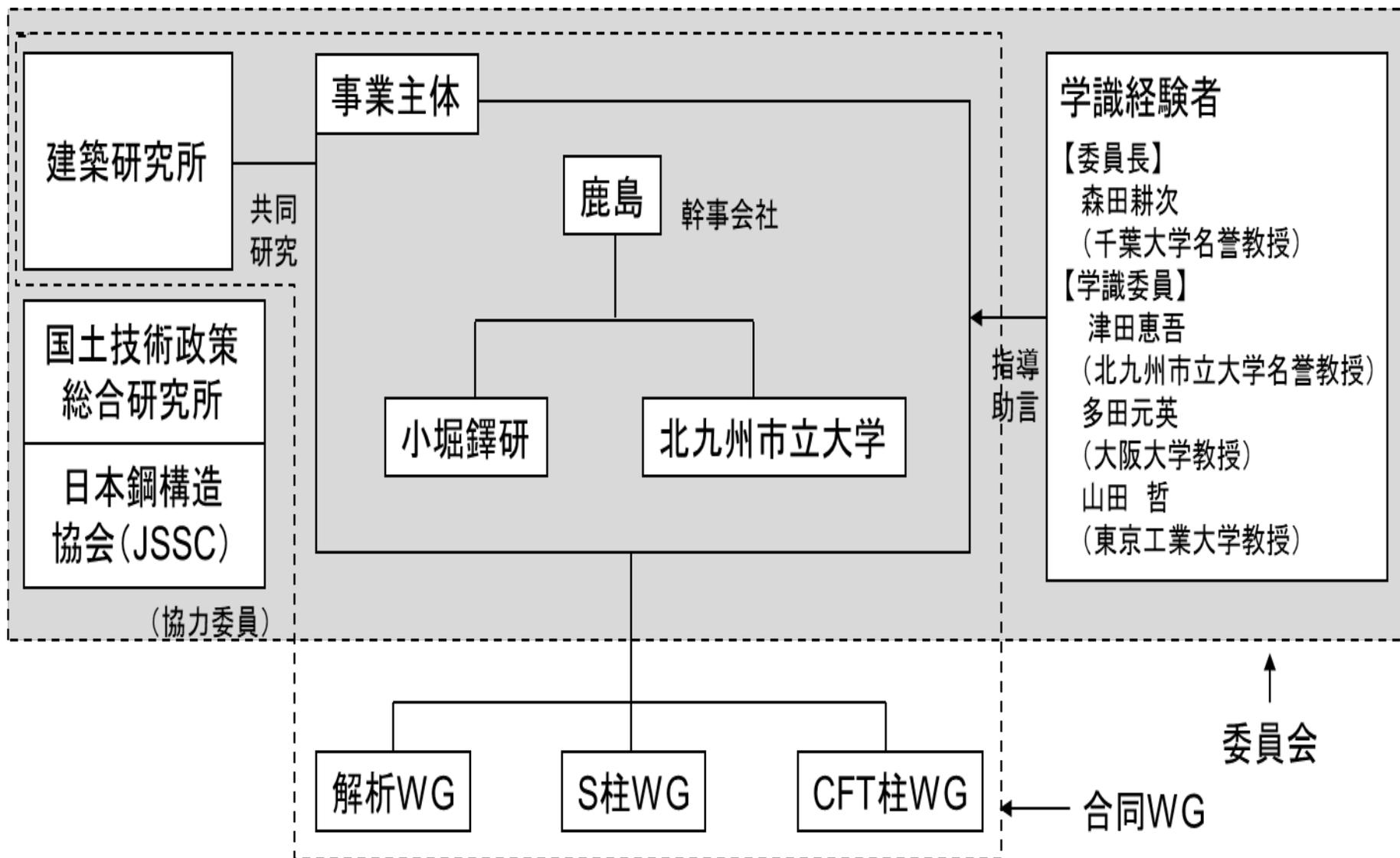
⇒ **鉄骨柱部材や CFT 柱部材**での梁端部の安全性検証に用いているような**設計用疲労曲線式が無い**。

調査概要

S29.長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の安全性検証法に関する検討(新規)

- (イ)長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の**地震応答解析の実施と耐震安全性検証法**に関する検討
- (ロ)**鉄骨柱部材**に対する多数回繰り返し載荷実験の実施と**設計用疲労曲線式**の検討
- (ハ)**CFT柱部材**に対する多数回繰り返し載荷実験の実施と**設計用疲労曲線式**の検討

実施体制



解析WG

■ 検討概要(2018年度)

建物および部材モデルの設定と時刻歴
応答解析の実施

(a-1)超高層建築物のモデル化

①鉄骨柱、②CFT柱

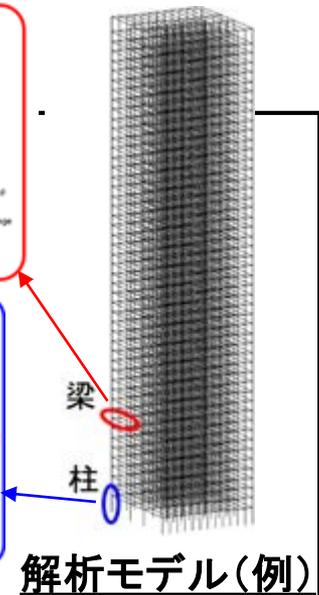
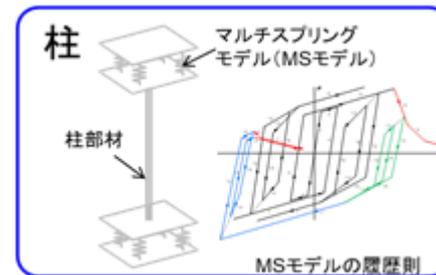
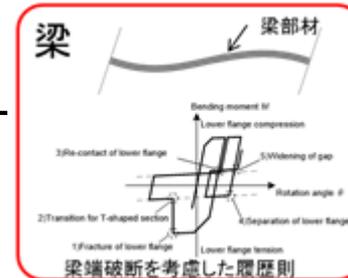
(a-2)部材のモデル化(劣化考慮)

①鉄骨梁—局部座屈、梁端フランジ破断

②鉄骨柱及びCFT柱—鉄骨の局部座屈

(b)上記モデルに基づく時刻歴応答解析

南海トラフ沿いの長周期地震動(SZ1, CH1, OS1)を入力



■ 2019年度計画

仮設定した柱部材の疲労曲線を用いた安全性検証方法の試行

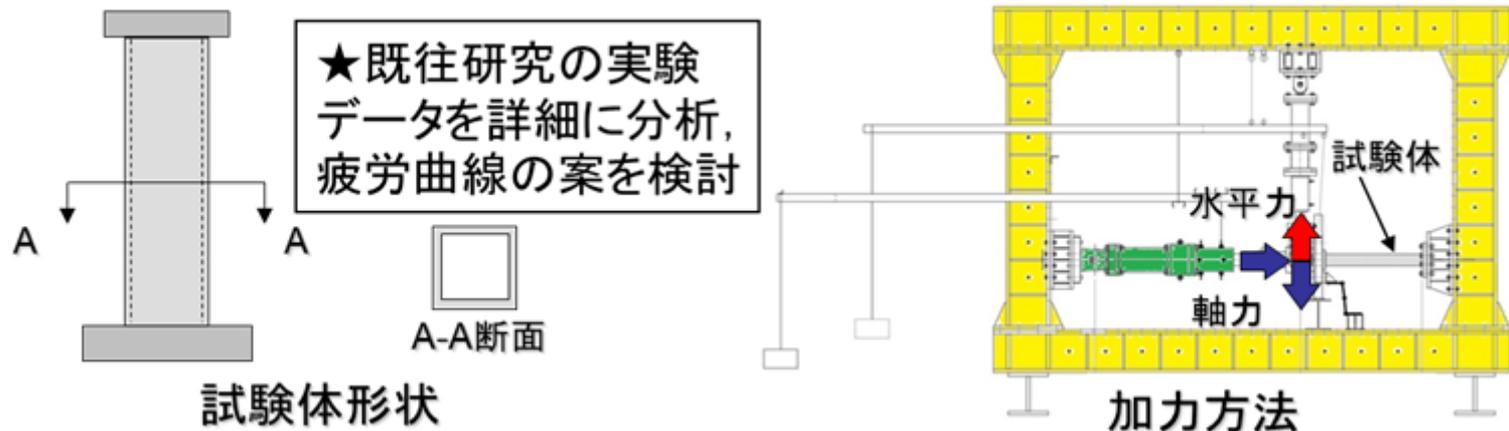
■ 2020年度計画

柱部材の疲労曲線を用いた安全性検証方法および建物倒壊までの余力の検討

CFT柱WG

■研究概要(2018年度)

既往の研究(JSSC委員会等)による実験データの分析を行い、CFT柱部材の設計用疲労曲線式を検討



■2019年度計画:不足している実験データの補充

- ・縮尺: 1/5~1/8程度
- ・試験体数: 10体(角形断面を対象)
- ・実験パラメータ: [载荷パターン] 一定振幅(塑性率の程度)、
変動振幅、45度方向 载荷 等
[軸力] 軸力比(一定、変動)

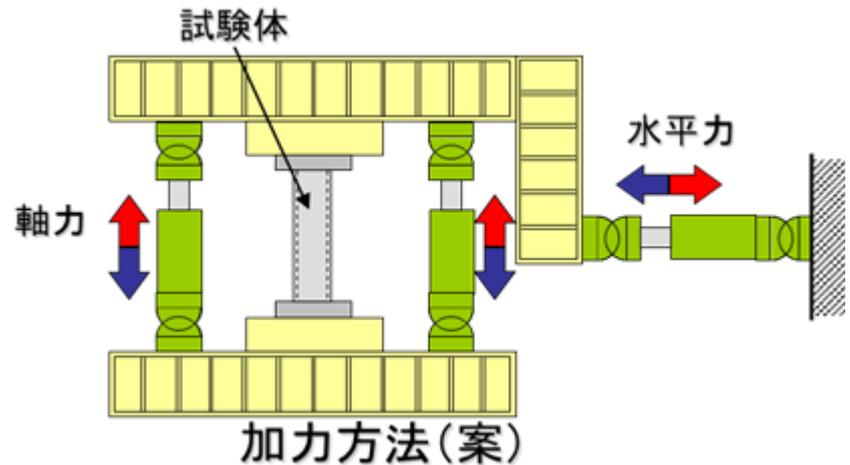
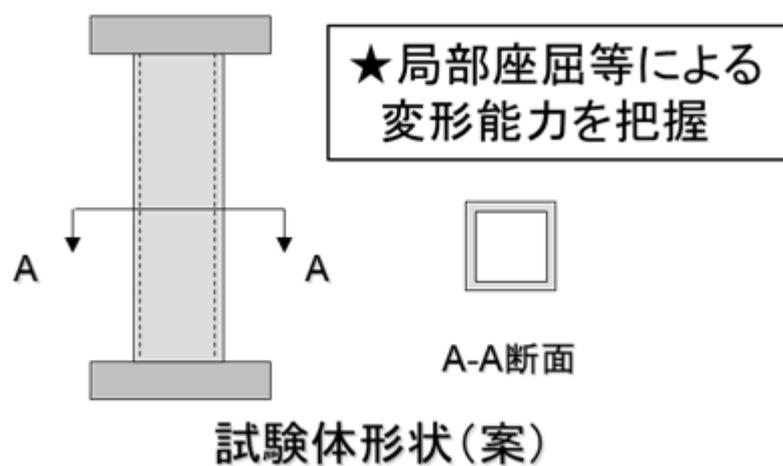
■2020年度計画: CFT柱部材の設計用疲労曲線式の検討、提案

S柱WG

■研究概要(2018年度)

既往知見の調査を行い、幅厚比、軸力比、載荷パターン等を変化させた多数回繰り返し実験を計画・実施、鉄骨柱部材の変形能力を把握

- ・縮 尺: 1/5程度
- ・試験体数: 11体(角形断面を対象)
- ・実験パラメータ: [部材因子]幅厚比、径高さ比
[外力因子]振幅、軸力比



■2019年度計画: 変動軸力、変動振幅等での実験データの補充

■2020年度計画: 鉄骨柱部材の設計用疲労曲線式の検討、提案

【 解析WG 】

長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の地震応答解析の実施と耐震安全性検証法に関する検討

目的・今年度の実施項目(解析WG)

■目的

- ・ **長周期地震動**を用いた応答解析により**超高層建築物**の柱部材の最大応答を把握、**柱部材の載荷履歴に反映**
- ・ **部材耐力劣化**を考慮した応答解析により長周期地震動下の**耐震安全性検証方法及び建物倒壊までの余力**を把握

■今年度実施項目

- ・ **超高層鉄骨造建築物**を想定した建物モデル（S柱，CFT柱モデル）を**試設計**
 - ・ 地震応答解析により長周期地震時の応答を算定、**層間変形角**や**柱部材の応答**を**整理**
- ⇒ 既往超高層鉄骨造建築物の**長周期地震時挙動**を把握し、**層間変形角、柱部材角、繰り返し回数**等を**実験に反映**

超高層鉄骨造建築物の試設計(1)

【S30】 S柱建物：30層モデル

- ・ **1990年代**までの設計を想定
- ・ 設計用入力地震動：**既往3波**
- ・ 柱梁耐力比：最小1程度
- ・ 梁諸元：梁端ストレート、スカ
ラップ付（**従来型**）

代表柱(C2,C3)

7階 □- 600 x 28

4階 □- 600 x 32

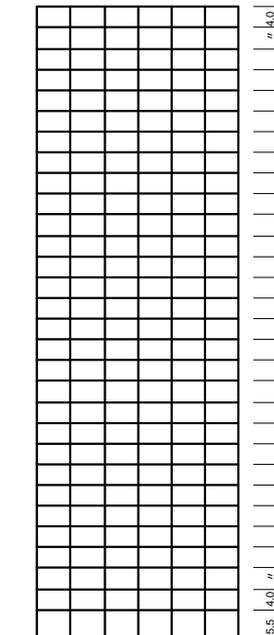
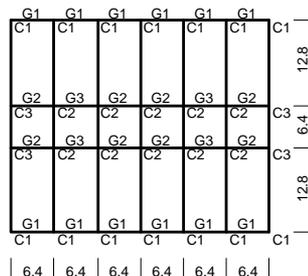
1階 □- 600 x 40

代表梁(G2,G3)

8FL BH- 850 x 200 x 16 x 25

5FL BH- 850 x 200 x 16 x 25

2FL BH- 850 x 200 x 16 x 28



【CFT32】 CFT柱建物：32層モデル

- ・ **2000年代**の設計を想定
- ・ 設計用入力地震動：**既往3波**
に加え**告示3波**
- ・ 柱梁耐力比：最小1.5程度
- ・ 梁諸元：梁端水平ハンチ付、曲げ降
伏位置はハンチ端（**従来型の2倍
の性能を想定**）

代表柱(C1)

7階 □- 1000 x 32 (Fc90)

4階 □- 1000 x 36 (Fc90)

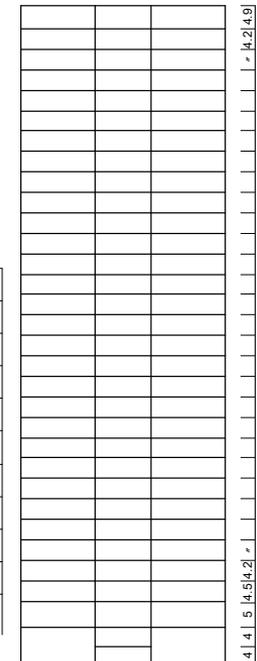
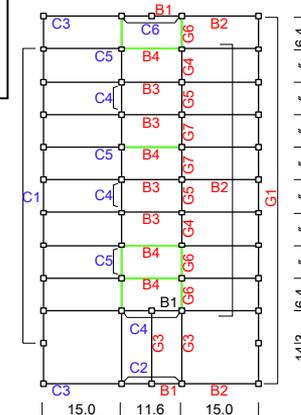
1階 □- 1000 x 40 (Fc90)

代表梁(B3)

8FL BH- 900 x 450 x 16 x 40

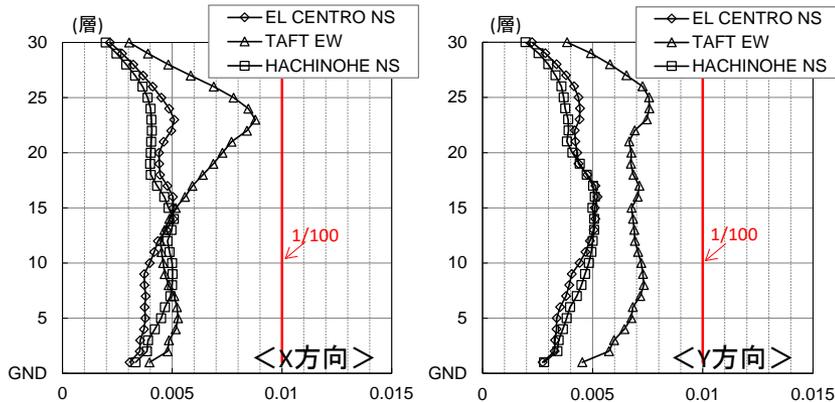
5FL BH- 800 x 300 x 14 x 36

2FL BH- 900 x 300 x 16 x 28

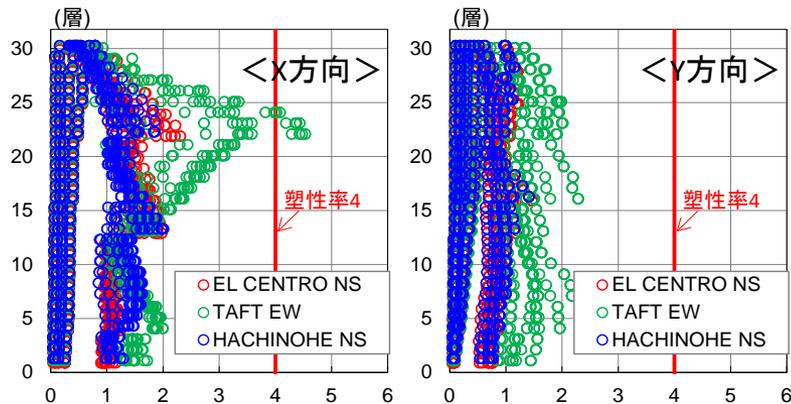


超高層鉄骨造建築物の試設計(2)

【S30】

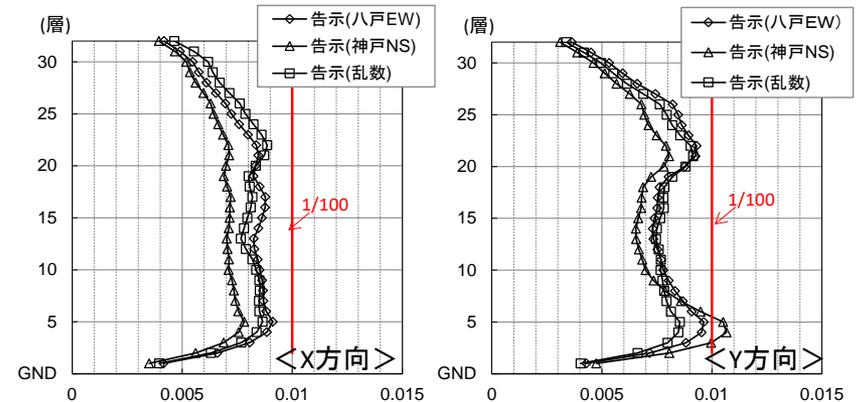


層間変形角

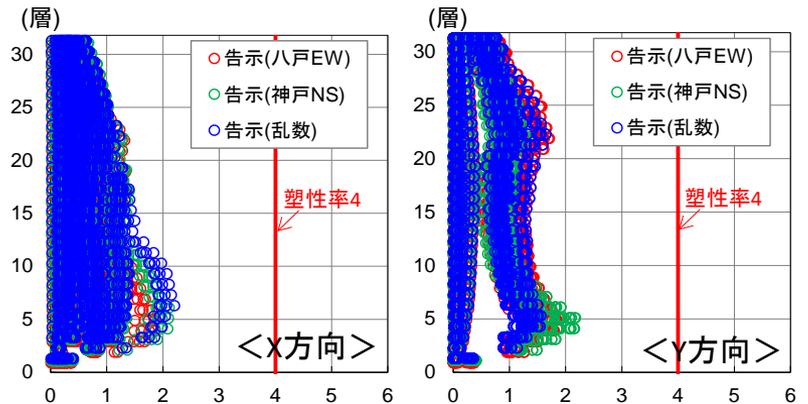


部材塑性率

【CFT32】



層間変形角

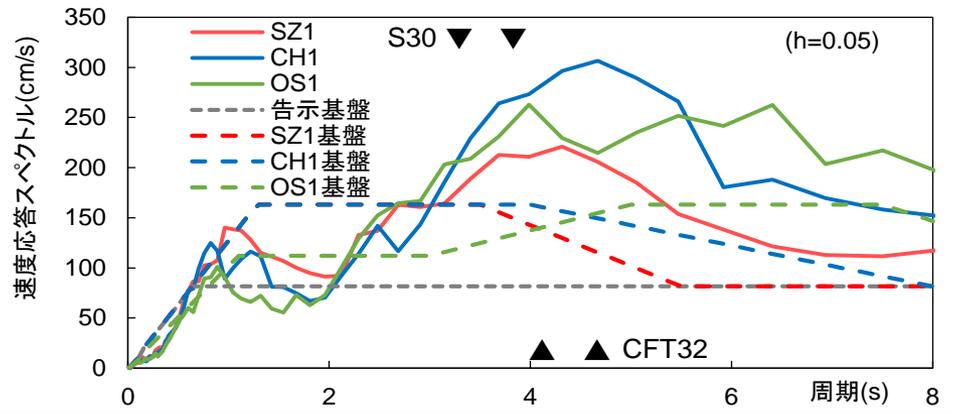


部材塑性率

⇒設計想定当時の入力地震動に対し適切に耐震設計

部材劣化考慮・長周期地震動に対する応答解析

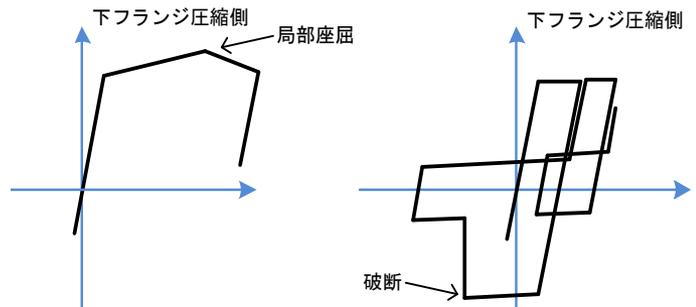
■長周期地震動
告示波に対し
応答2倍も想定
⇒SZ1, CH1, OS1を入力



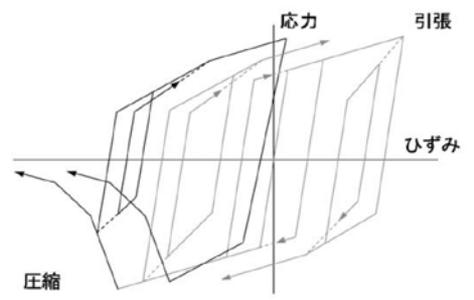
■部材の復元力履歴特性（劣化考慮）

【梁部材】 局部座屈, 下フランジ破断
→材端ヒンジモデル

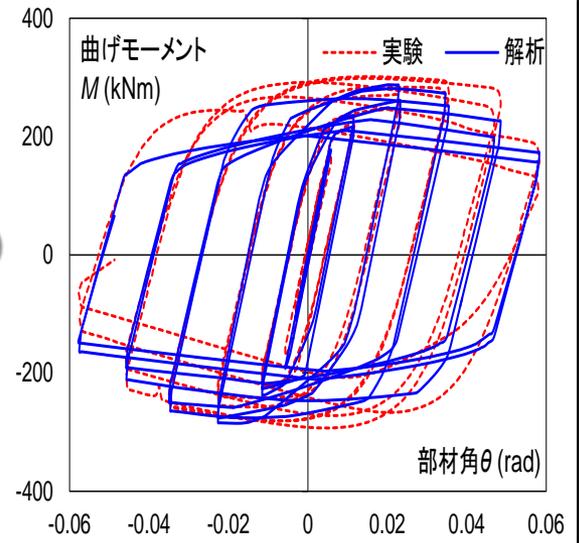
【柱部材】 局部座屈
→マルチスプリングモデル (MSモデル)



材端ヒンジモデル(梁)



MSモデル(柱:鋼管)



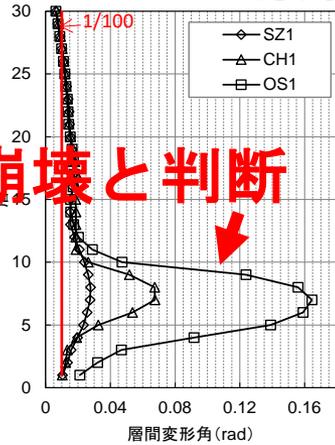
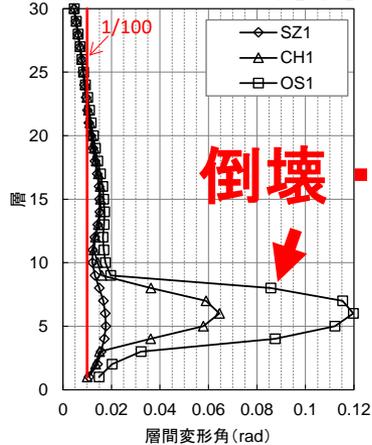
実験シミュレーション

部材劣化を考慮した応答解析結果(層間変形角)

【S30】

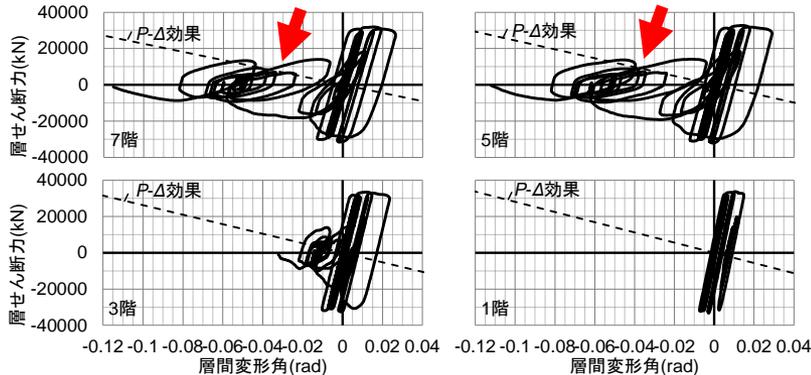
X方向

Y方向



倒壊・崩壊と判断

最大層間変形角



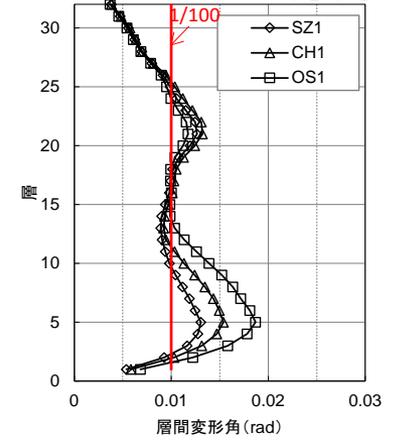
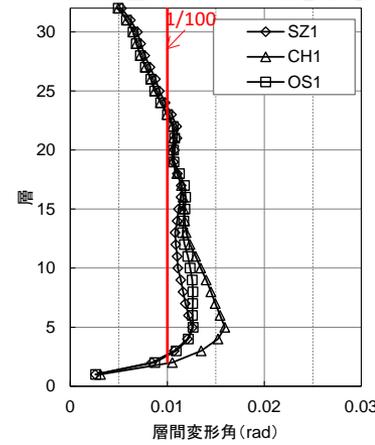
層せん断力・層間変形角関係(OS1-X方向)

- OS1で地震中に倒壊・崩壊と判断、CH1で最大層間変形角1/15

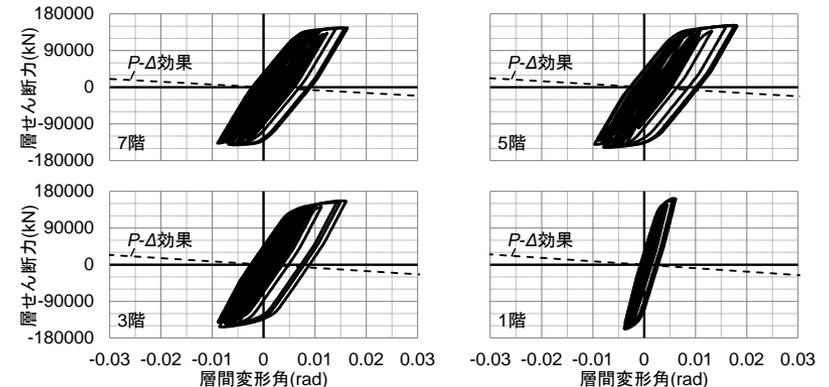
【CFT32】

X方向

Y方向



最大層間変形角



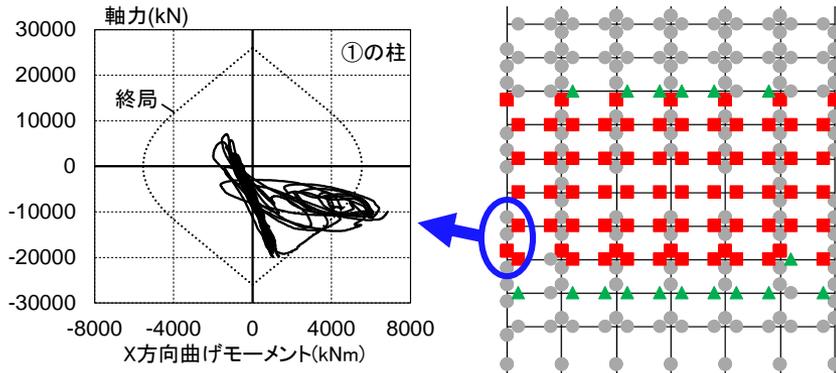
層せん断力・層間変形角関係(OS1-Y方向)

- 最大層間変形角1/50以下、層全体特性に劣化なし

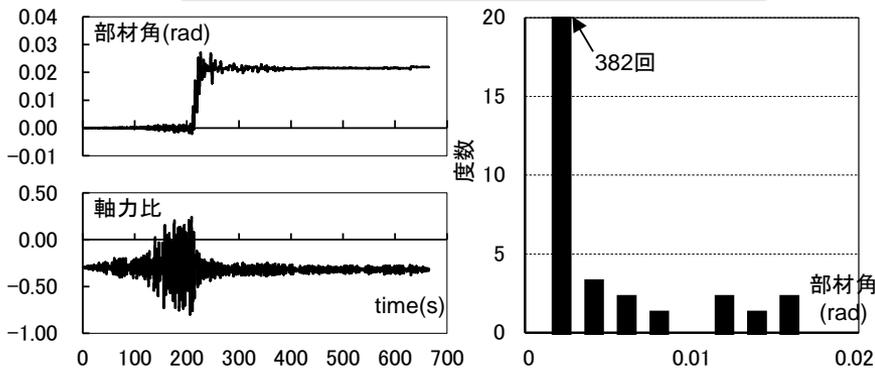
部材劣化を考慮した応答解析結果(柱部材の応答)

【S30】

【柱】●降伏 ■局部座屈



4階隅柱の応答(OS1入力時)

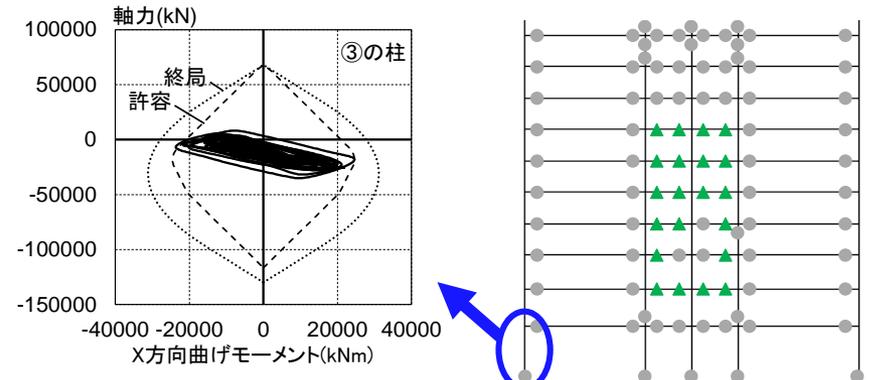


4階隅柱の応答(CH1入力時)

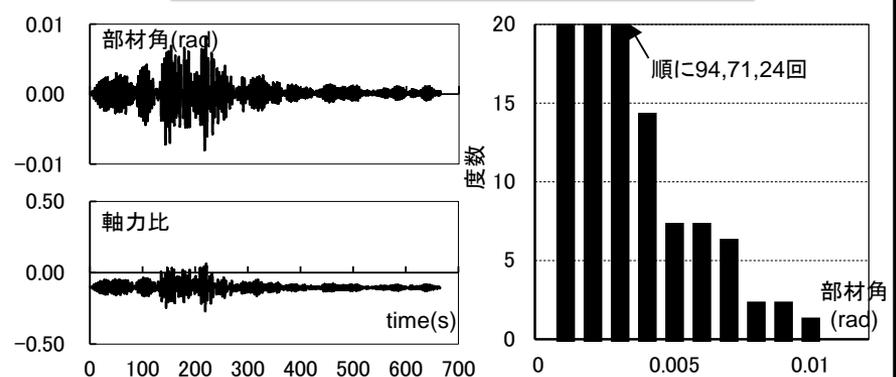
- ・ 大振幅応答は約100秒間
- ・ 最大軸力比1.0超
- ・ 部材角1/100rad超5回

【CFT32】

【柱】●降伏 ■局部座屈



1階隅柱の応答(OS1入力時)



1階隅柱の応答(OS1入力時)

- ・ 大振幅応答は約100秒間
- ・ 最大軸力比0.8超
- ・ 部材角1/200rad超25回

今年度のまとめ(解析WG)

長周期地震動下の超高層鉄骨造建物の地震応答解析を実施し、応答性状の実態を把握することを目的として、下記を実施した。

- ① 想定した超高層鉄骨造建築物(S柱、CFT柱)が設計想定当時の入力地震動に対し適切に耐震設計されていることを確認。
- ② 柱や梁の劣化を考慮した復元力履歴特性を用い、長周期地震動に対し地震応答解析を実施。
- ③ 長周期地震動(SZ1, CH1, OS1)の入力時の挙動を把握するとともに層間変形角や柱部材角とその繰り返し回数を把握。

S30(S柱) : OS1入力で部材角 $1/100\text{rad}$ 超が5回

CFT32(CFT柱): OS1入力で部材角 $1/200\text{rad}$ 超が25回

【 CFT柱WG 】

**CFT柱部材に対する多数回繰り返し載荷
実験の実施と設計用疲労曲線式の検討**

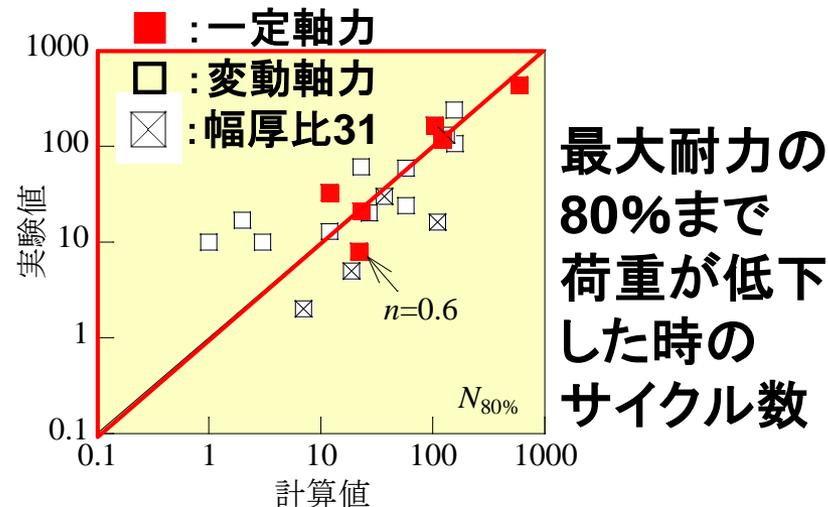
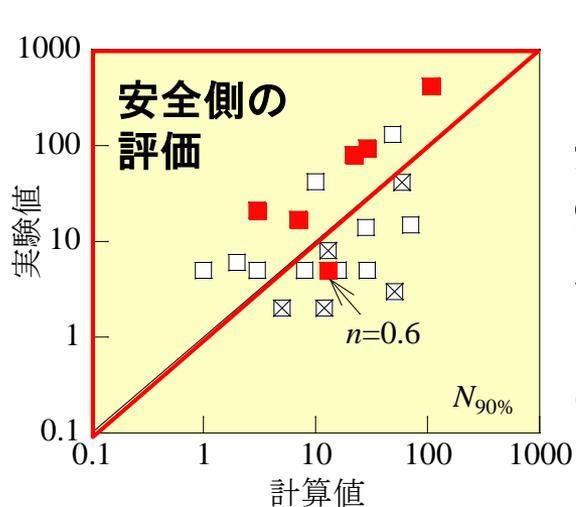
目的・実施項目（CFT柱WG）

CFT柱WGでは、一定変位振幅繰返し载荷を受けるCFT柱材に関して発表されている論文を元に実験データの分析を行い、技術知見の取得を目的とし、下記を実施する。

- 既往の実験資料の分析
- 疲労性能曲線式の検討

本年度は、既往の実験資料として、系統的に実験が行われている**基準整備促進事業S10**、**日本鋼構造協会「長周期地震動に対する柱部材の保有性能に関する調査研究小委員会」による実験結果を分析**する。疲労性能曲線式の検討として、上記の実験データを用い、重回帰分析により疲労曲線式を導出し、**実験結果と限界繰返し回数**の関係について検討する。

今年度の検討結果とまとめ(CFT柱WG)



既往実験の検討から下記知見を得た。

- ①一定軸力による実験資料を用い、限界繰返し回数評価式を重回帰分析により導いた。
- ②基準整備促進事業S10で得られた限界繰返し回数と上記評価式を比較したところ、一定軸力の場合で幅厚比が20の場合はおおむね安全側の評価ができる。

【 S柱WG 】

鉄骨柱部材に対する多数回繰り返し載荷
実験の実施と設計用疲労曲線式の検討

目的・今年度の実施項目(S柱WG)

S柱WGでは、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、下記を実施する。

- 既往知見(既存超高層、既往実験)の調査
- 鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験の実施

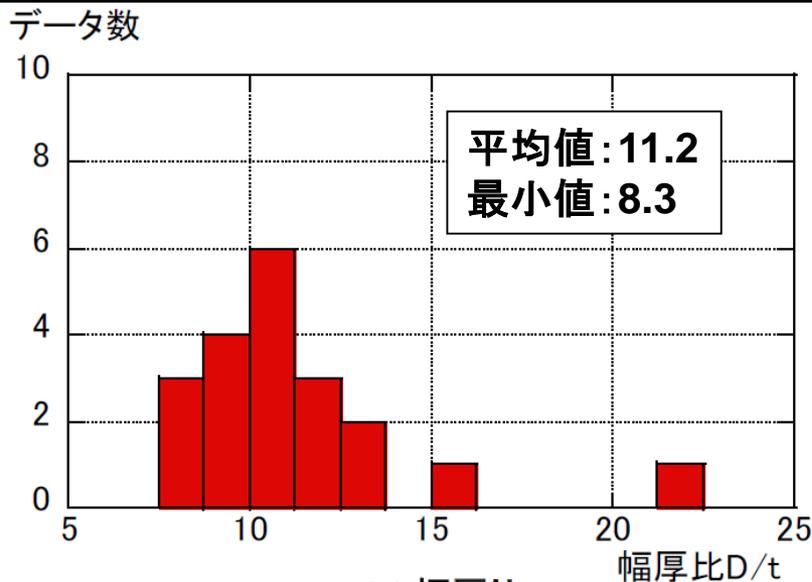
本年度の実験では、**既往知見を反映**させた試験体を設定し、鉄骨柱部材の**一定軸力および一定振幅に於ける基本的な多数回繰り返し特性を把握**することを目的として、多数回繰り返し特性に影響を与えると考えられるパラメータを変化させた実験を実施し、多数回繰り返し載荷時の鉄骨柱部材の変形能力を把握する。

既往知見の調査(1)

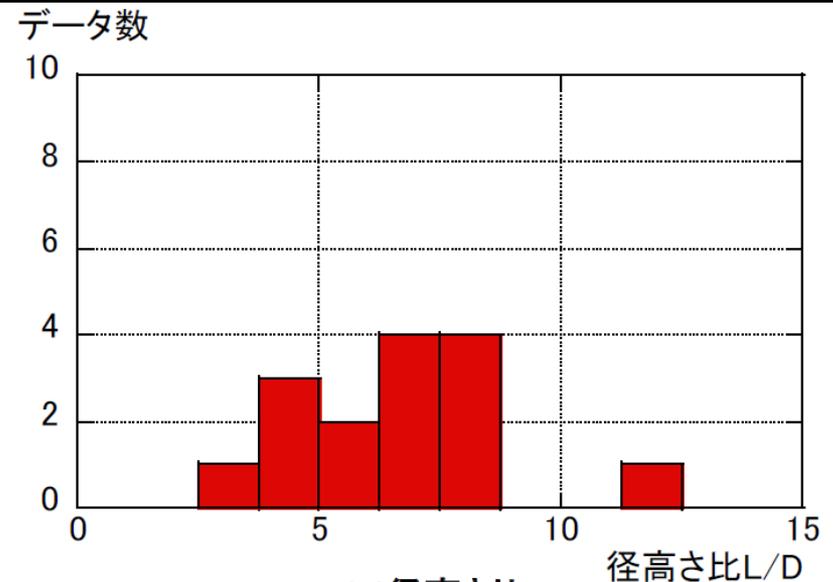
■ 既往鉄骨建物の実態調査

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。

- ⇒ ・『幅厚比』はFAランク, 10前後に多く分布
 ・『径高さ比』は5~8程度に多く分布, 最大で12程度



(a) 幅厚比



(b) 径高さ比

幅厚比・径高さ比の分布(最下層の柱)

既往知見の調査(2)

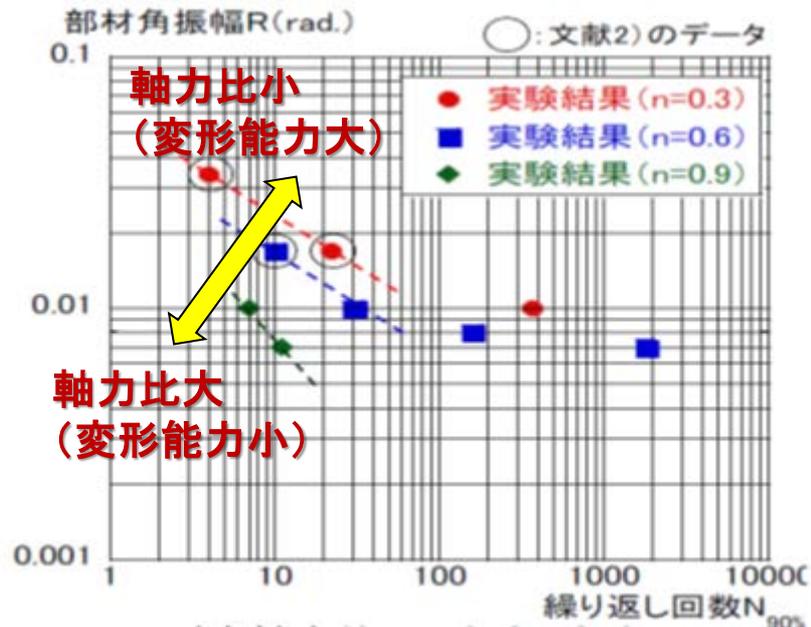
■ 既往実験の調査

多数回繰り返し実験を調査し、軸力比・幅厚比の影響把握。
⇒幅厚比が小さな範囲での実験データはなし。

【軸力比の影響】

軸力比0.3~0.9

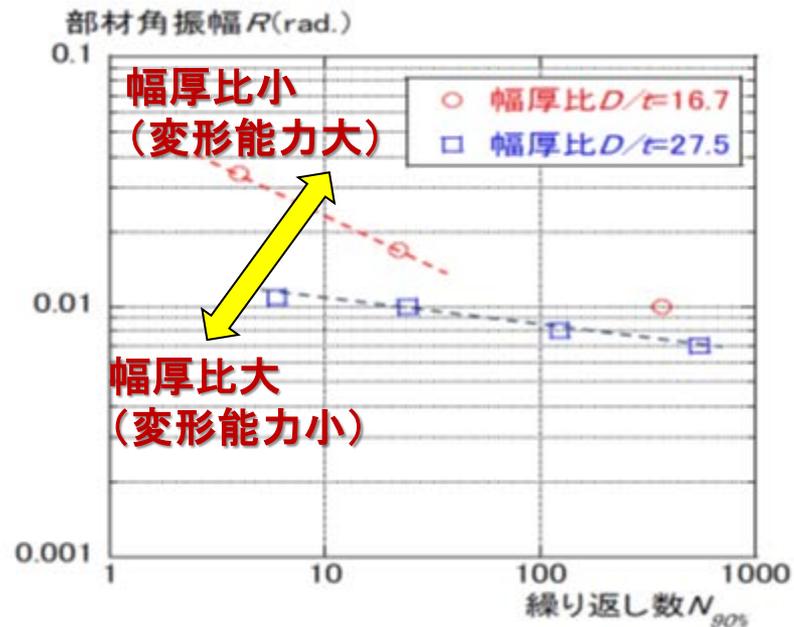
(幅厚比16.7, 径高さ比8.0)



【幅厚比の影響】

幅厚比16.7と27.5

(径高さ比8.0と9.1, 軸力比0.3)



実験概要

■試験体

□-105 × 105 × t (SM490A) : 1 1 体

■実験パラメータ

【部材因子】

○幅厚比 : 2水準

○径高さ比 : 3水準

【外力因子】

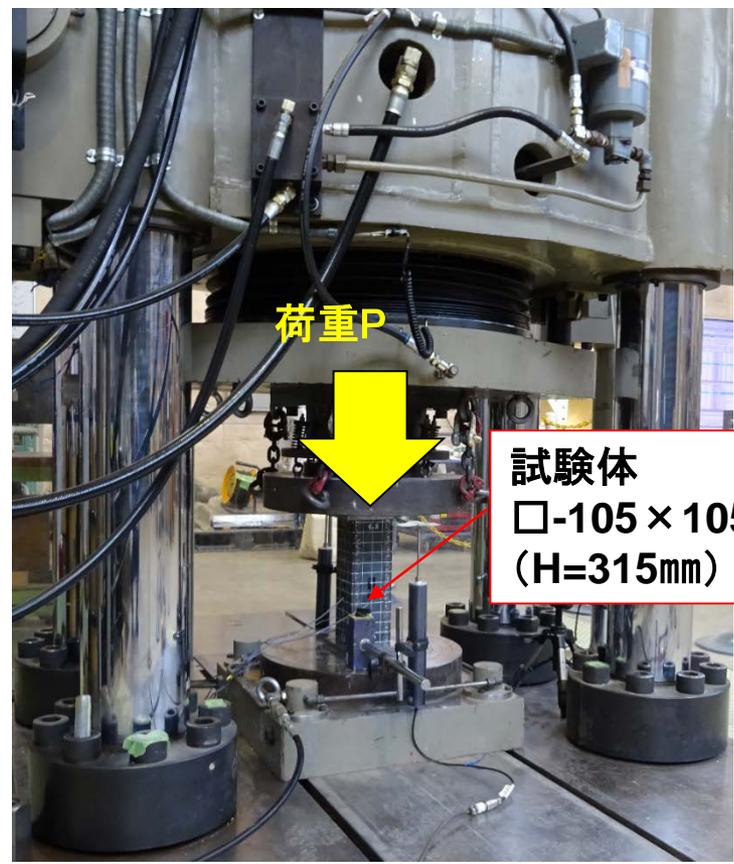
○振幅(一定振幅) : 2水準

○軸力比(一定軸力) : 2水準

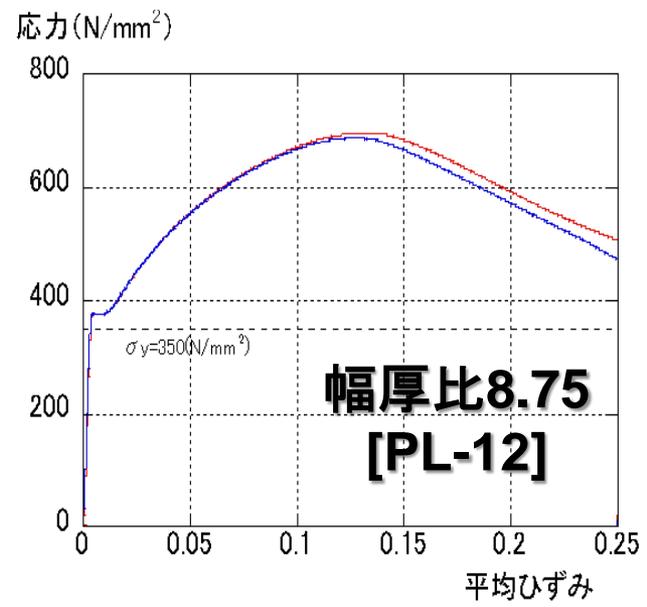
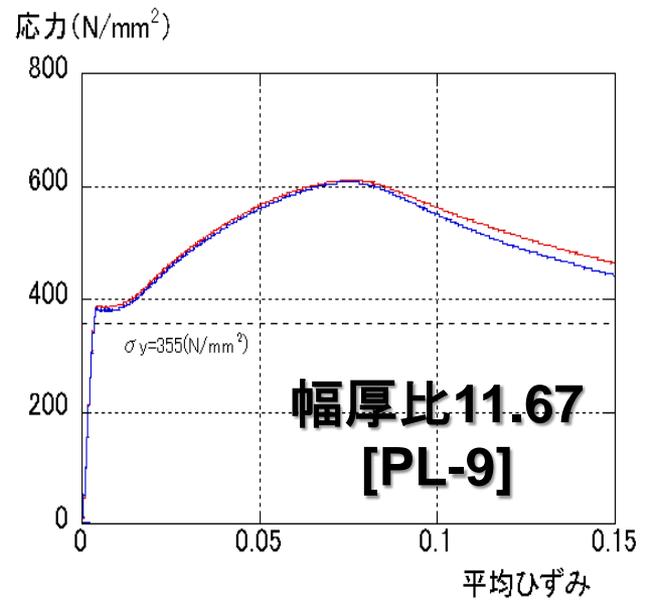
幅厚比 D/t	軸力比 n	径高さ比 L/D	振幅 レベル	部材角振幅 R	
8.75 ($t=12\text{mm}$)	0.3	8.0	大	1/25	0.040
			小	1/50	0.020
	0.6		大	1/25	0.040
			小	1/50	0.020
11.67 ($t=9\text{mm}$)	0.3	8.0	大	1/50	0.020
			小	1/75	0.013
	0.6		大	1/50	0.020
			小	1/75	0.013
	5.0	大	1/50	0.020	
		小	1/75	0.013	
	12.0	大	1/50	0.020	

短柱圧縮試験

- ・局部座屈耐力の確認。
- ・裏当て金の影響把握。



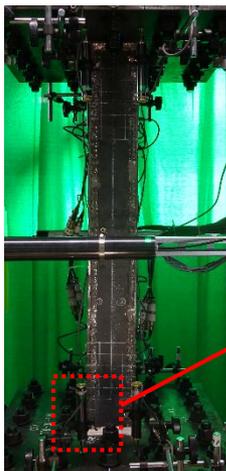
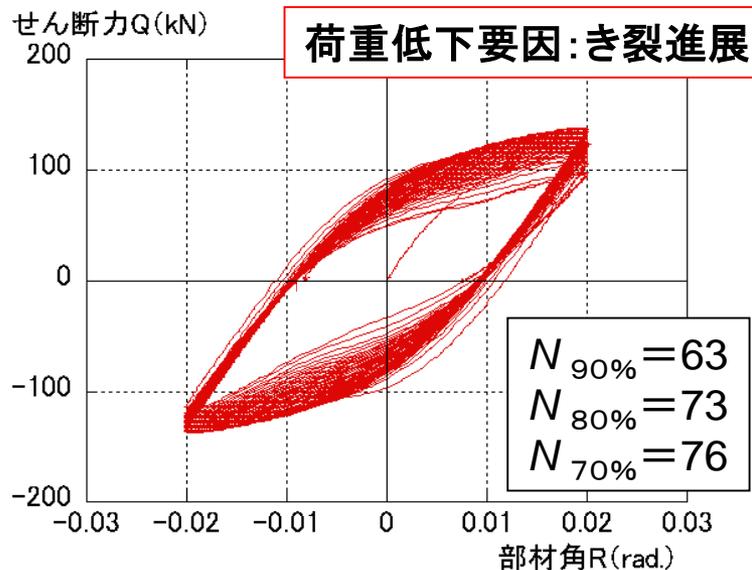
実験状況



荷重・軸ひずみ関係

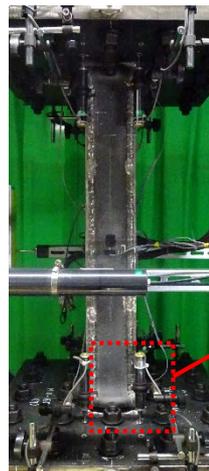
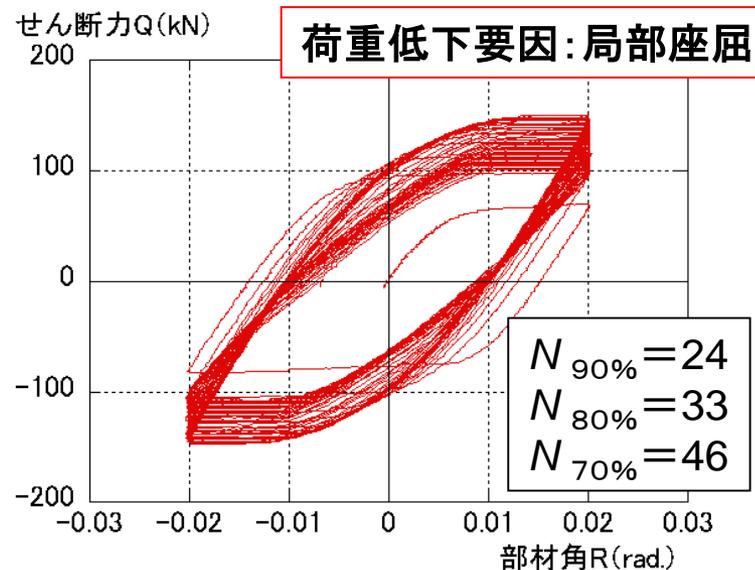
実験結果 (幅厚比11.67 [PL-9], $R=1/50$)

軸力比0.3



座屈高さ: 最大2.0mm

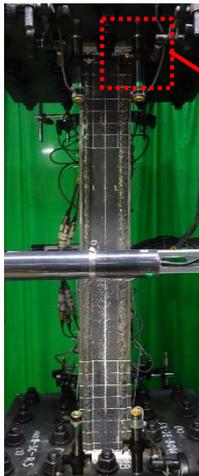
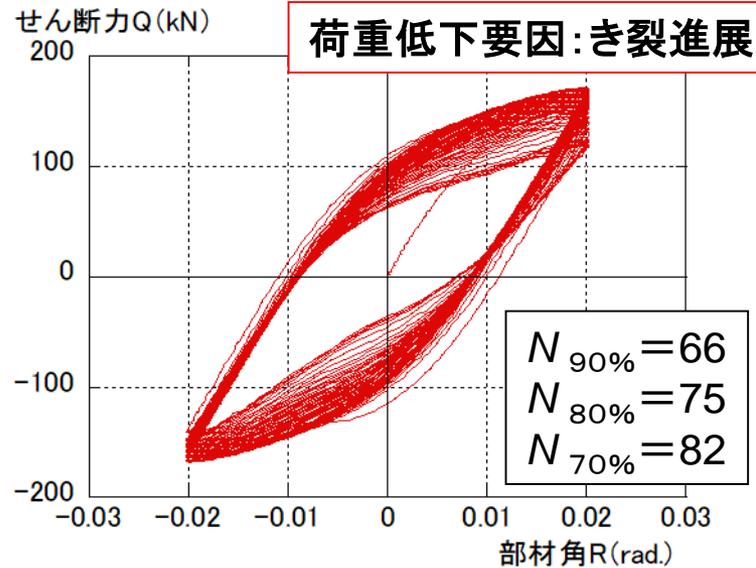
軸力比0.6



座屈高さ: 最大22mm

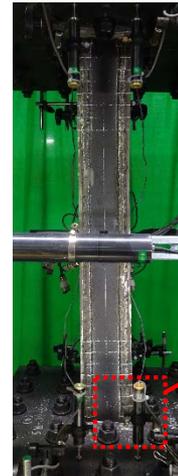
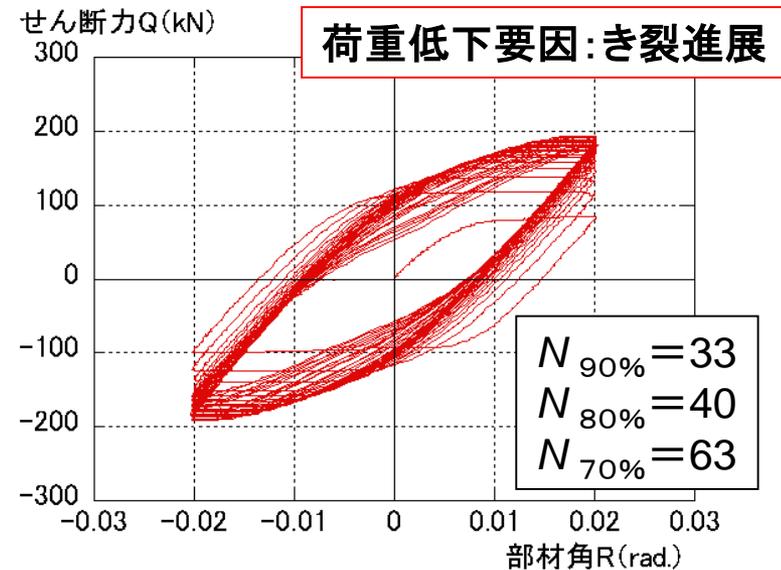
実験結果 (幅厚比8.75 [PL-12], R=1/50)

軸力比0.3



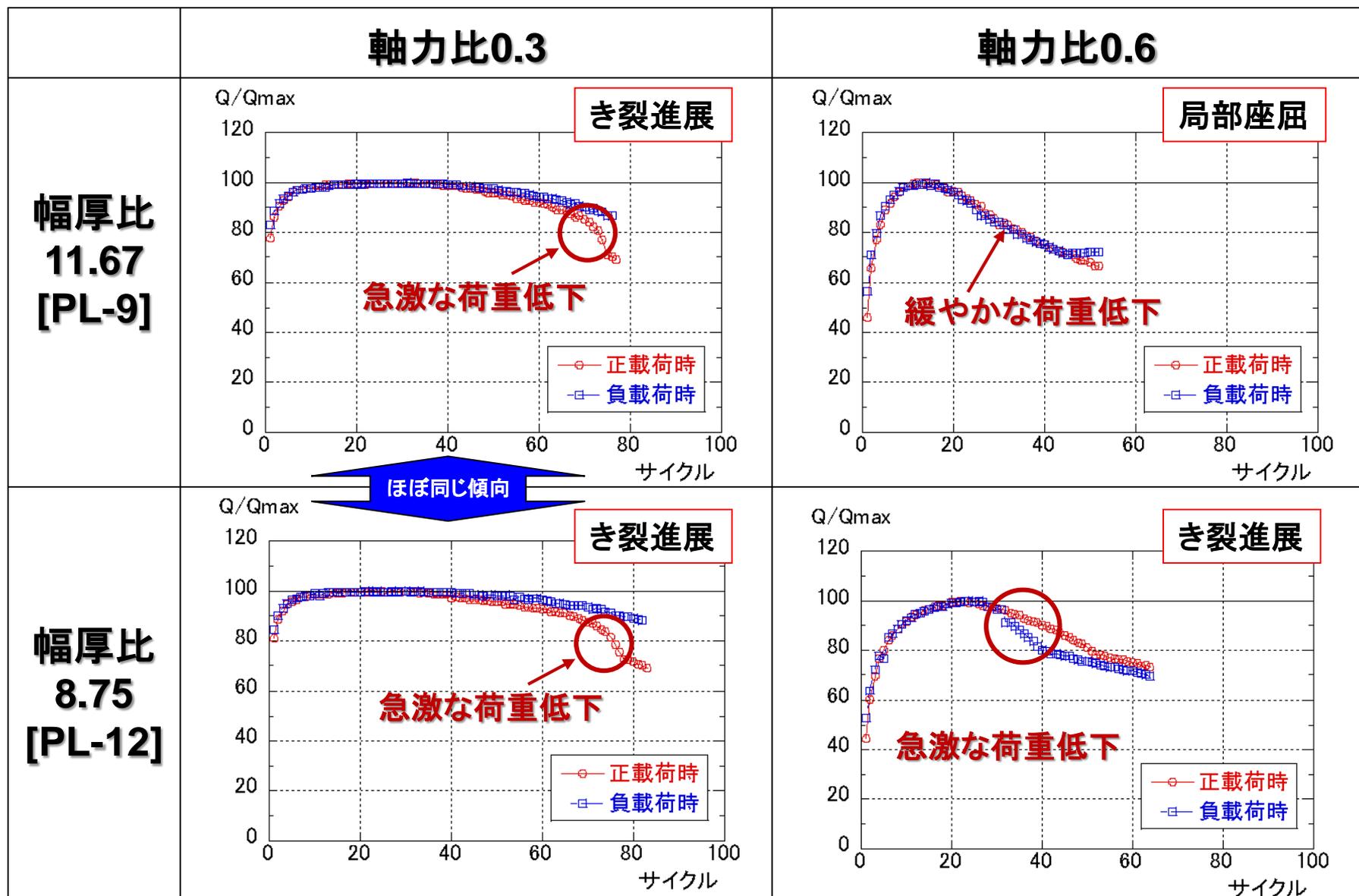
座屈高さ: 最大2.4mm

軸力比0.6



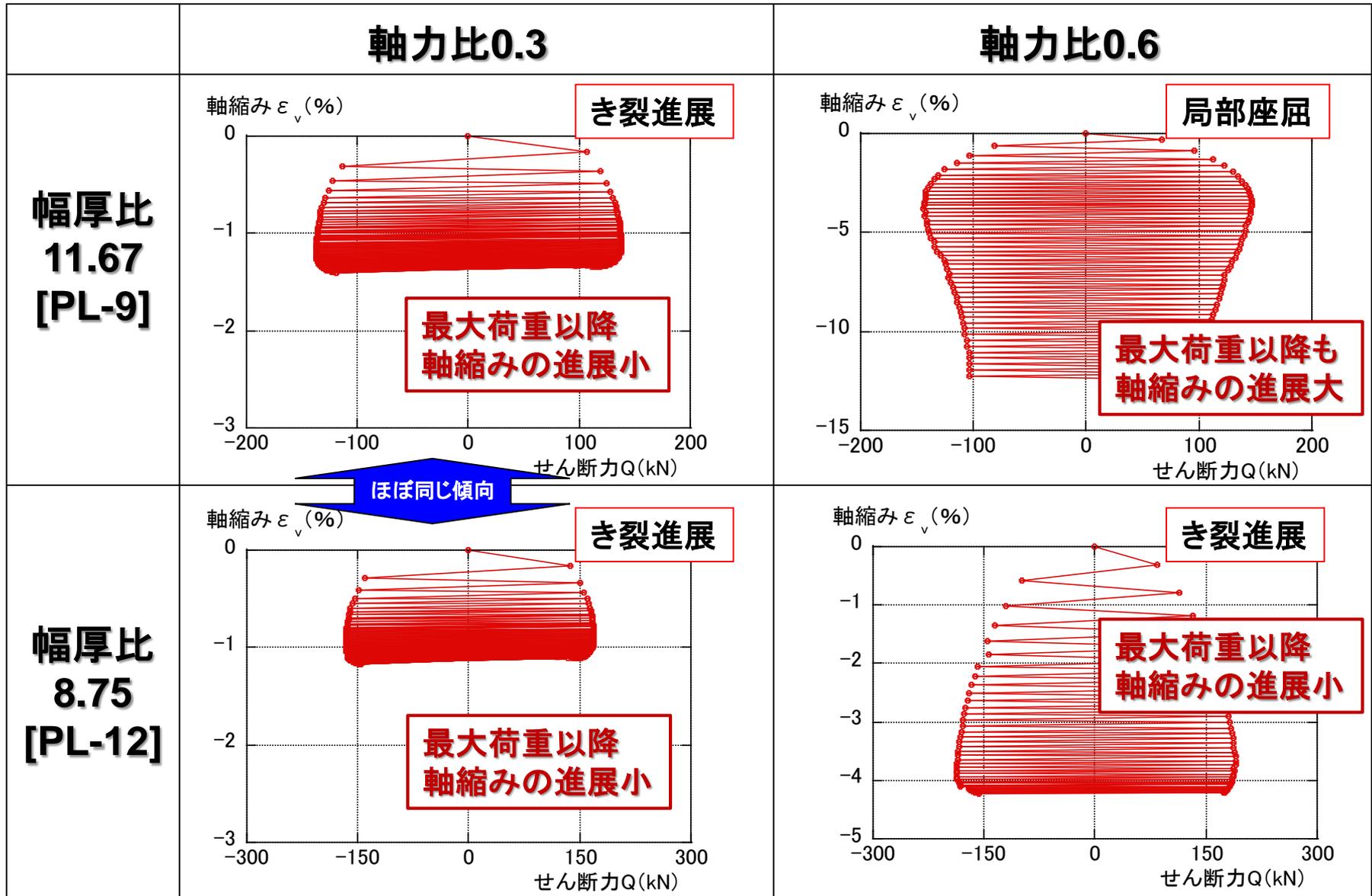
座屈高さ: 最大5.6mm

実験結果(荷重低下曲線の比較: $R=1/50$)



実験結果(軸縮みの比較: $R=1/50$)

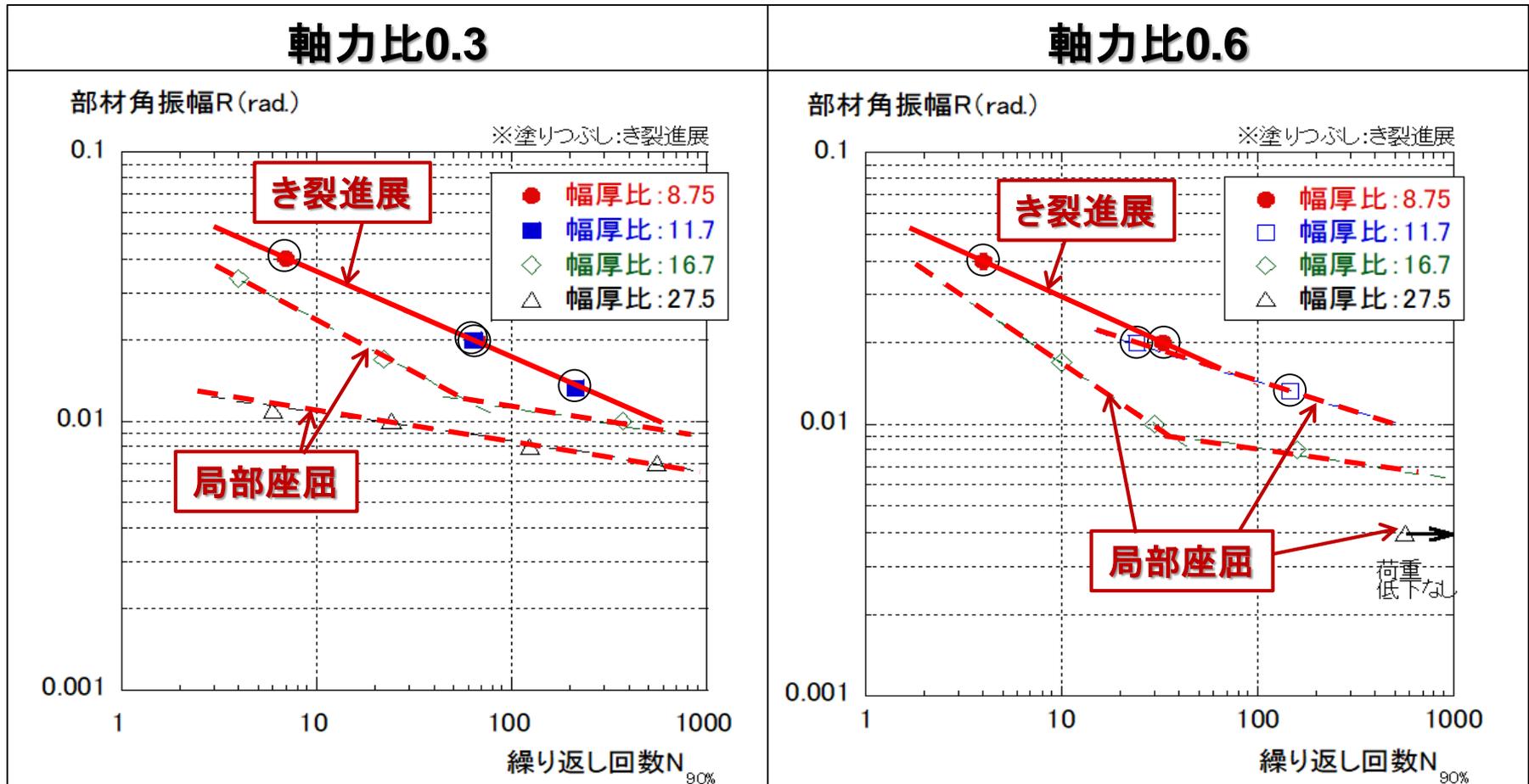
※各サイクルピーク時をつなげたグラフ



多数回繰り返し性能(既往実験との比較: $N_{90\%}$)

性能曲線は部材因子(幅厚比等)と外力因子(軸力比)により決定
 ⇒ 上限: 荷重低下要因がき裂進展、下限: 局部座屈

○: 今回実施



今年度のまとめ(S柱WG)

軸力比および部材角振幅を変化させた**鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験**により、下記知見を得た。

- ① 軸力比が大きくなると、同じ部材角での繰り返し回数は減。
- ② 軸力比、部材角振幅、幅厚比、径高さ比の関係で、荷重低下を引き起こす主要因(局部座屈、き裂進展)が異なる。
- ③ 性能曲線は部材因子(幅厚比、径高さ比)と外力因子(軸力比)により決定づけられ、荷重低下の主要因が、「き裂進展(幅厚比:小)」を上限とし、「局部座屈(幅厚比:大)」を下限となっている。

今年度のまとめ(全体)

長周期地震動に対する超高層建築物の①大変形時の状況および倒壊までの余力の検討、②柱部材(鉄骨、CFT)についての設計用疲労曲線式の提案を行うことを最終目的として、今年度は下記を実施した。

【解析WG】 建物モデルを試設計し、柱や梁の劣化を考慮した復元力特性を用い、長周期地震動に対して地震応答解析を実施。長周期地震動(SZ1, CH1, OS1)の入力時の建物挙動を把握。

【CFT柱WG】 既往実験資料を分析し、実験結果と限界繰り返し回数の関係について検討。

【鉄骨柱WG】 比較的幅厚比の小さな鉄骨柱部材の一定軸力下での多数回繰り返し実験を実施。性能曲線の上限は荷重低下要因が「き裂進展」で、下限は「局部座屈」となっていることを把握。

おわり