

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。

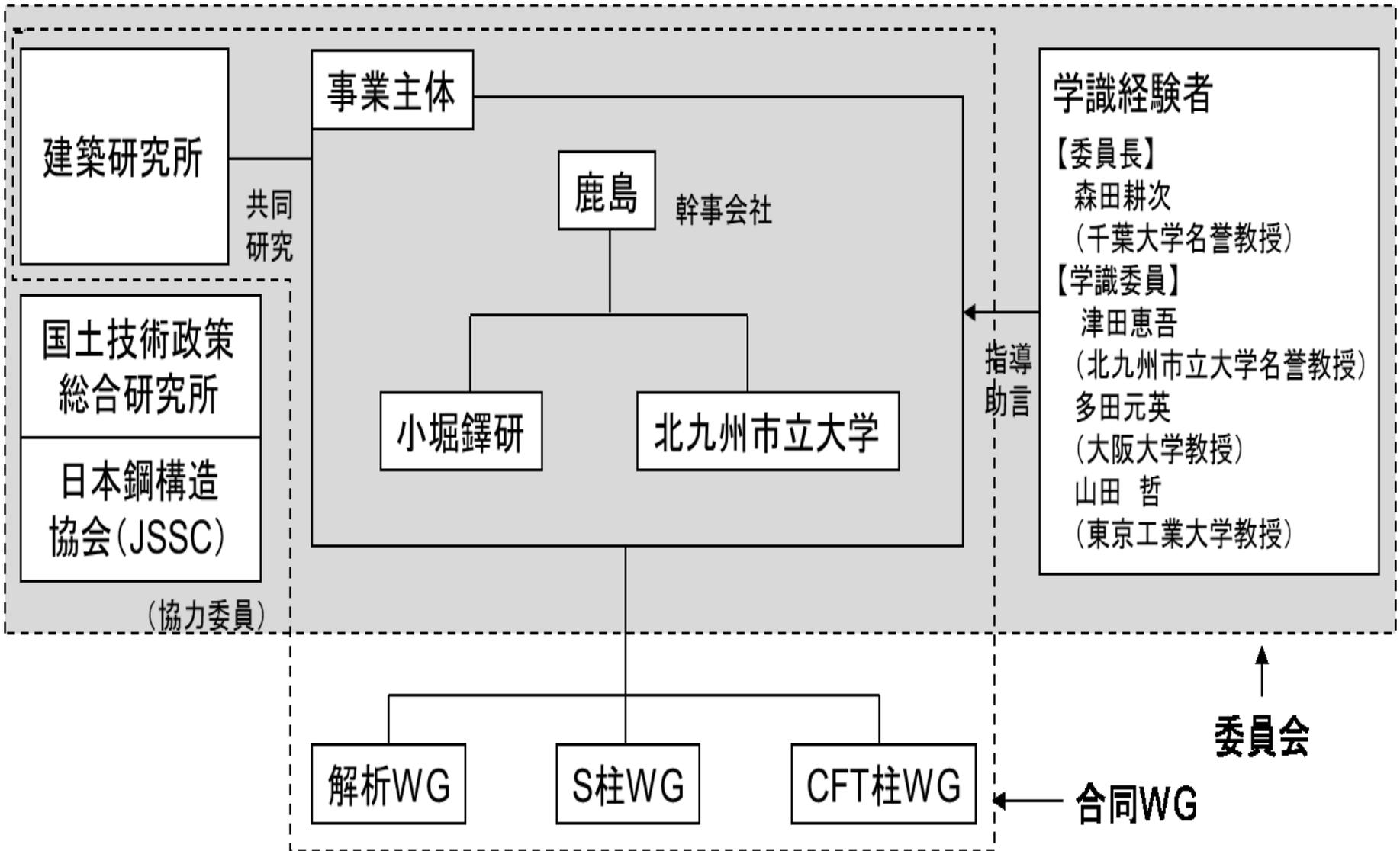
⇒ **鉄骨柱部材や CFT 柱部材**での梁端部の安全性検証に用いているような**設計用疲労曲線式が無い**。

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(H30～R2:3年間)

- (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 (R1年度)



解析WG

■ 検討概要(R1年度)

長周期地震動を受ける超高層鉄骨造建築物について、構造部材の各種劣化挙動を表現可能な部材モデルを用いた時刻歴解析を実施し、以下の3項目を検討。

(a)部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力の検討

【建物モデル】

- ①鉄骨造30階建て(鉄骨柱)、②鉄骨造32階建て(CFT柱)

【部材の劣化挙動】

- 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)柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証の試行

(c)通常的设计で用いられる解析モデルとの比較

■ R2年度計画

柱部材の疲労曲線を用いた建物健全性確認および超高層鉄骨造建築物の耐震安全性検証法の検討

S柱WG

■ 検討概要 (R1年度)

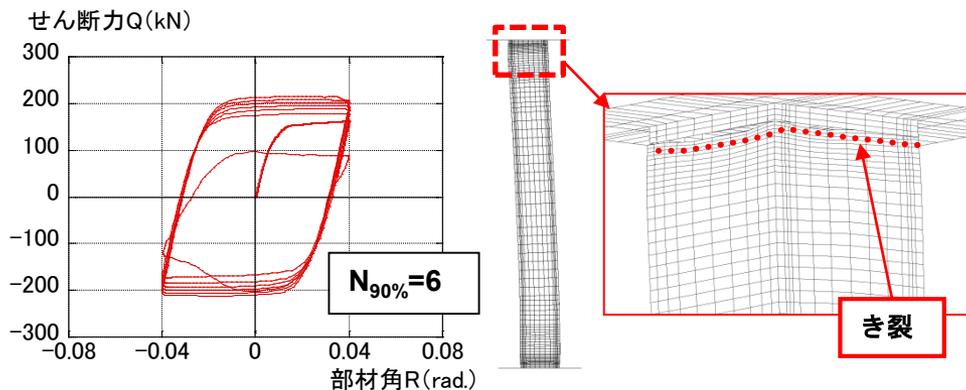
鉄骨柱部材の疲労曲線の提案を目的として、以下の2項目を検討。

(a) 鉄骨柱部材の設計用疲労曲線(案)の検討

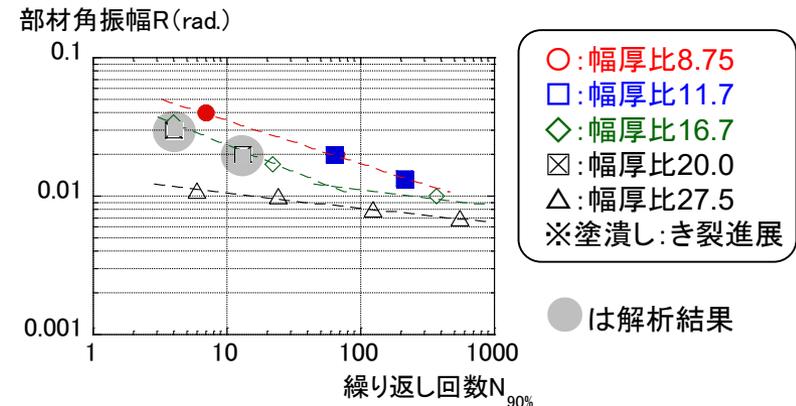
: 既往実験(H30年度実験)の結果を用い、設計用疲労曲線(案)を提案

(b) 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

: 実験で確認された荷重低下要因(局部座屈、き裂発生)についてFEMによりシミュレート可能であることを確認。解析結果も含めた設計用疲労曲線を検討。



解析結果(軸力比0.3、幅厚比8.75)



部材角振幅と繰返し数の関係(軸力比0.3)

■ R2年度計画: 鉄骨柱部材の多数回繰返し実験(変動軸力、変動振幅)およびFEM解析の実施と設計用疲労曲線の提案

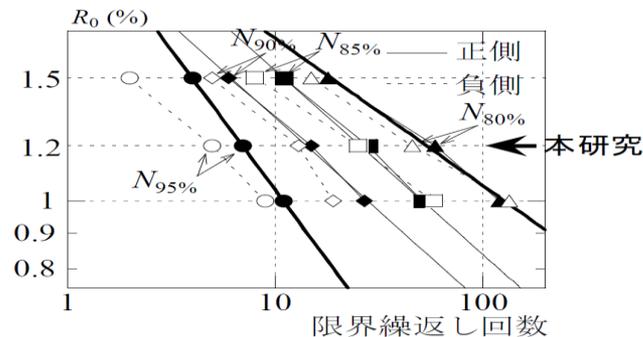
CFT柱WG

■実施概要(R1年度)

角形CFT柱部材が変動変位振幅繰返し载荷を受ける場合の構造特性を把握し、Miner則の成立性を検討することを目的として、角形CFT柱部材の曲げせん断実験を実施。

- ・縮尺: 1/5~1/8程度
- ・試験体数: 11体(角形断面を対象、1体は角形中空鋼管柱)
- ・実験パラメータ:

〔载荷パターン〕	一定振幅、変動振幅
〔軸力〕	軸力比(一定: 0.3、0.6)
〔座屈長さ・断面せい比〕	10、20



限界繰返し回数(実験値/計算値)

試験体		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
LD10n30Rv1	+	2.7	1.8	1.8	1.5
	-	2.7	1.9	1.4	1.5
LD10n30Rv2	+	1.5	1.4	1.5	1.4
	-	2.2	1.8	1.4	1.2
LD10n60Rv1	+	3.9	1.3	1.2	1.1
	-	1.2	1.3	1.2	1.1
LD10n60Rv2	+	1.5	0.60	0.70	-
	-	1.0	-	0.70	-
LD20n30Rv1	+	1.2	0.85	0.67	0.43
	-	1.1	0.87	0.85	0.62
LD20n30Rv2	+	1.1	0.89	0.66	0.59
	-	0.95	0.77	0.87	0.60

振幅・限界繰返し回数関係(一定振幅)

■R2年度計画: CFT柱部材の多数回繰返し実験(変動軸力)の実施と設計用疲労曲線の提案

【 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)

解析WGでは、長周期地震動を受ける超高層鉄骨造建築物について、最終的には、現行の層間変形角1/100、塑性率2(部材は4)という耐震安全性判定基準ではない**新たな判定基準の設定を目的**とし以下の3項目を検討

(a)部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力の検討

【建物モデル】

- ①鉄骨造30階建て(鉄骨柱)、②鉄骨造32階建て(CFT柱)

【部材の劣化挙動】

- 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)柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証の試行

(c)通常的设计で用いられる解析モデルとの比較

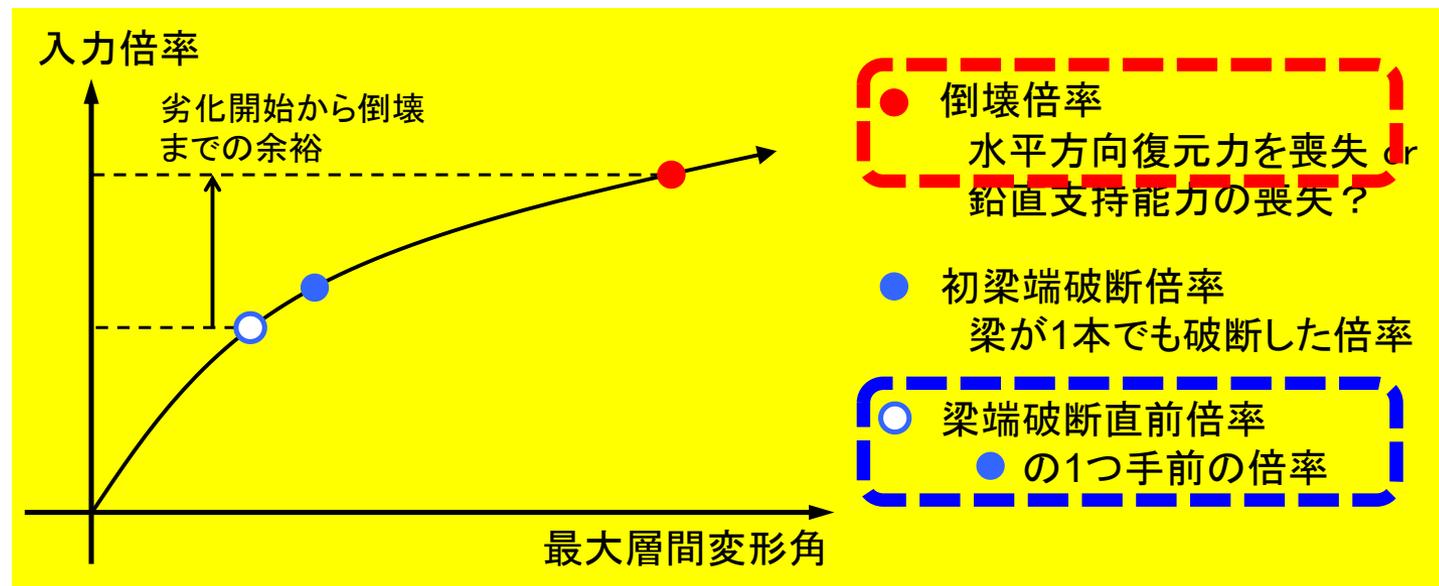
部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力の検討

■部材劣化と倒壊に対する入力レベルの整理

倒壊・崩壊の定義：

梁端の劣化を伴う損傷（破断、局部座屈）が層内で進展、層の復元力が劣化、それに伴う層の大変形、**P- Δ** 効果で層の復元力喪失

⇒その状態を解析上の「倒壊」と定義し、**入力倍率を変えた応答解析により「倒壊」を確認**



部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力の検討

■ 鉄骨柱を有する30階建モデル(S30)と入力地震動

解析モデル概要

代表柱(C2,C3)

7階 □- 600 x 28

4階 □- 600 x 32

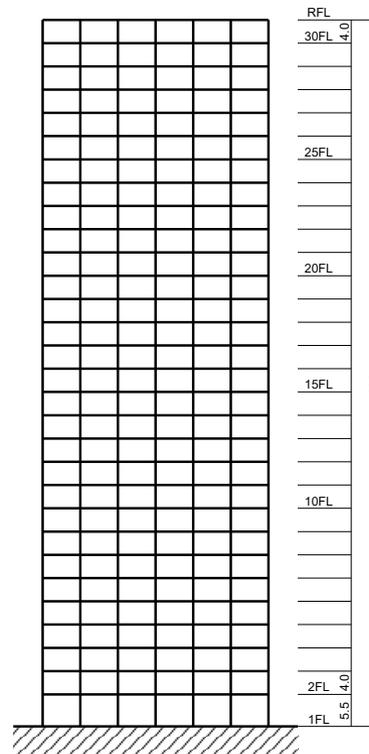
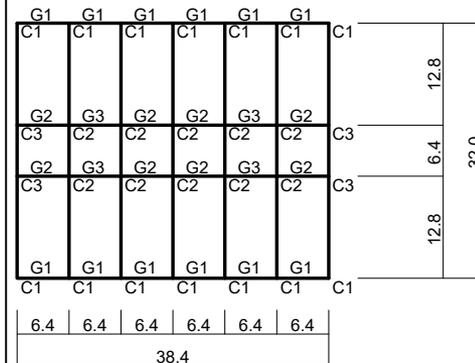
1階 □- 600 x 40

代表梁(G2,G3)

8FL BH- 850 x 200 x 16 x 25

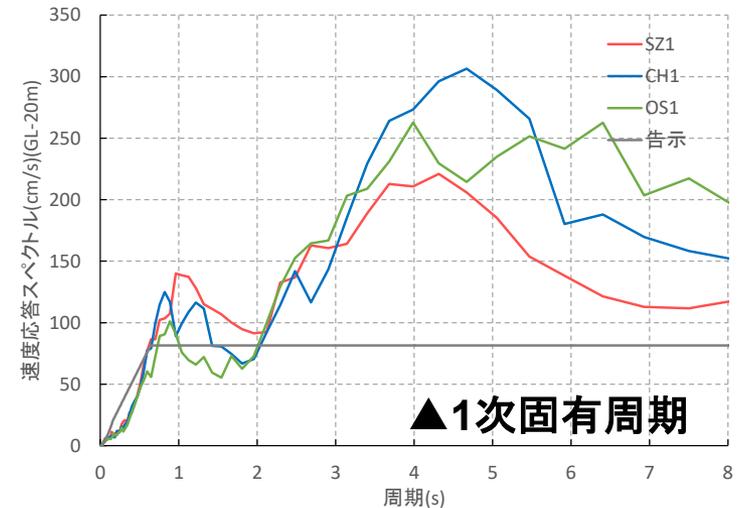
5FL BH- 850 x 200 x 16 x 25

2FL BH- 850 x 200 x 16 x 28



S30

入力地震波概要

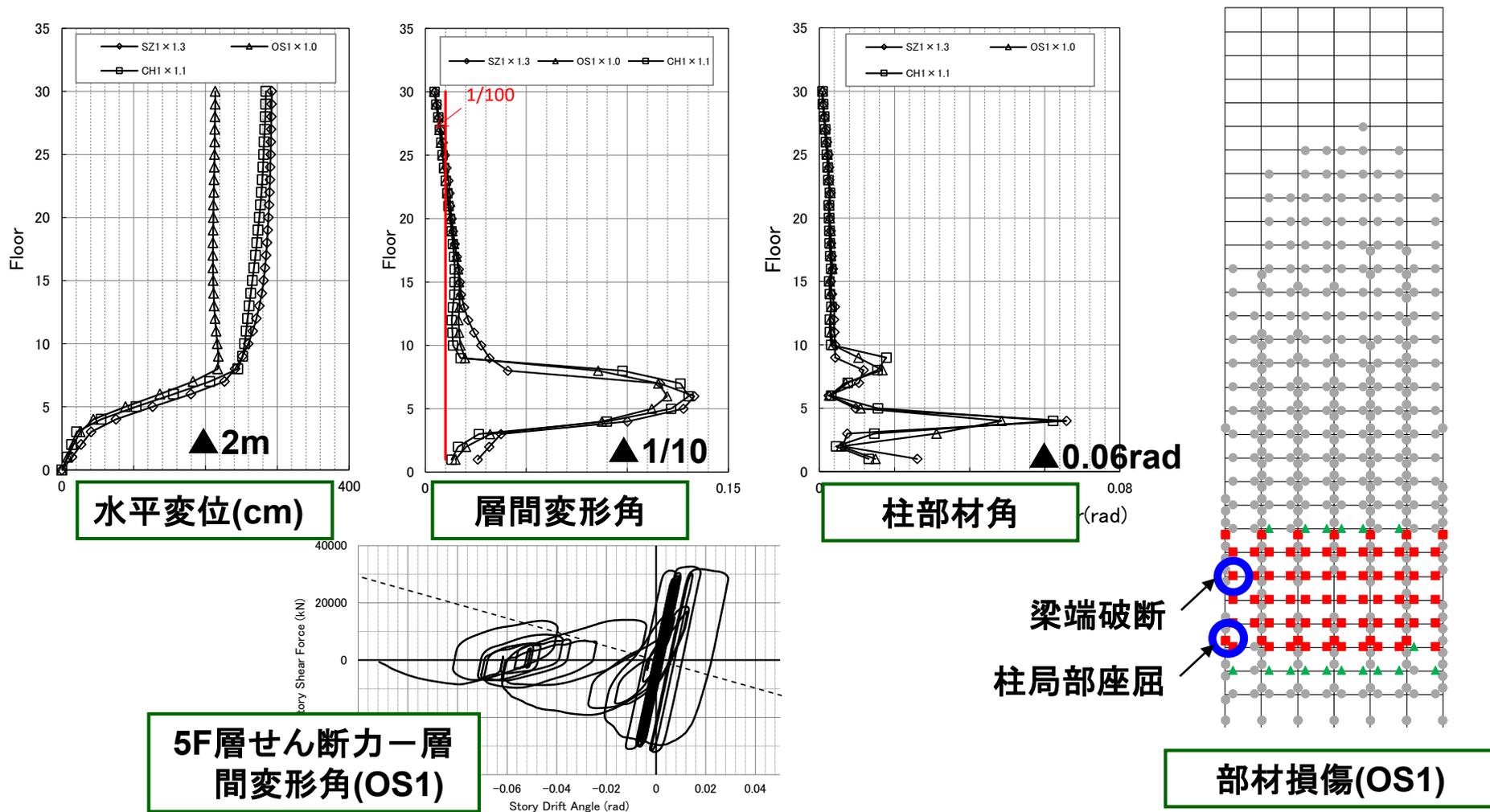


Sv(h=0.05)、入力倍率1.0倍

部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力の検討

■ 鉄骨柱を有する30階建モデル(S30)

「倒壊」の状況確認: **倒壊倍率**時の応答を下図に示す。



部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力の検討

■鉄骨柱を有する30階建モデル(S30)

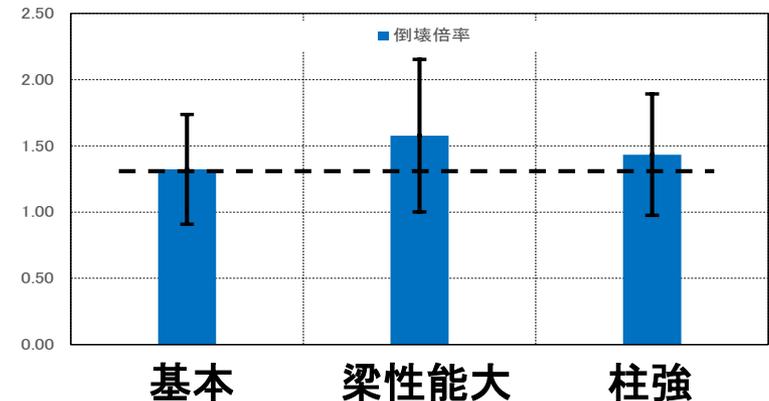
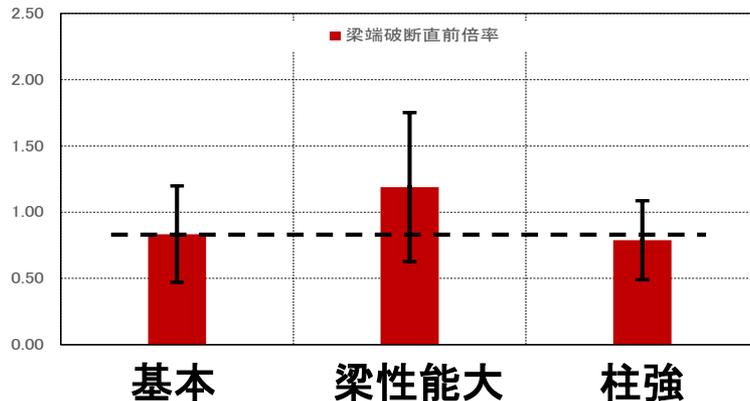
梁端破断直前倍率、倒壊倍率の比較(入力地震動、入力方向を変動)

⇒基本モデルに対する比較を実施。

(a)基本モデル(昨年度の検討モデル)

(b)梁端の塑性変形能力大(梁変形性能大モデル)

(c)柱断面(柱梁耐力比)大(柱強モデル)



梁端破断倍率

梁性能大: 倍率大

柱強 : 変わらず

倒壊倍率

梁性能大: 倍率大

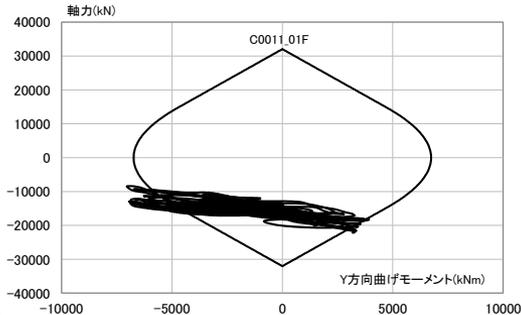
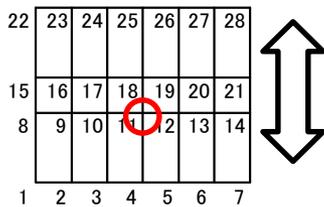
柱強 : 倍率やや大

柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証の試行

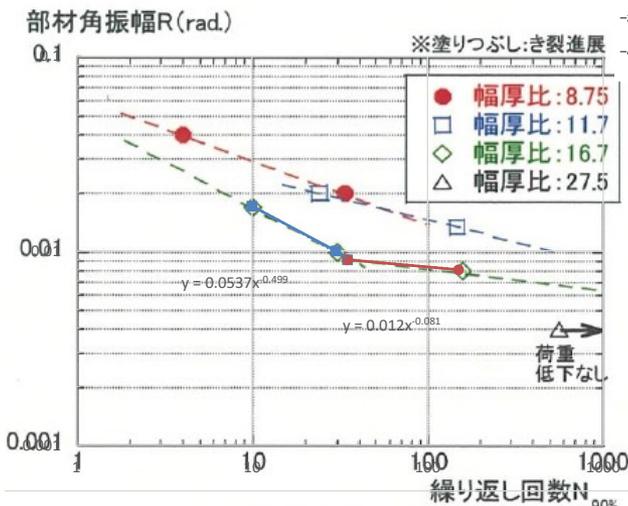
■鉄骨柱を有する30階建モデル(S30)

梁端破断直前倍率における柱の耐震安全性評価

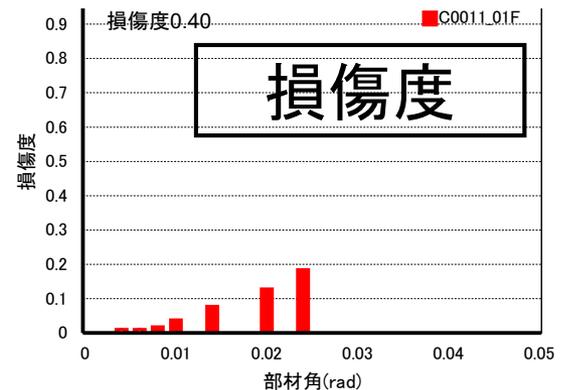
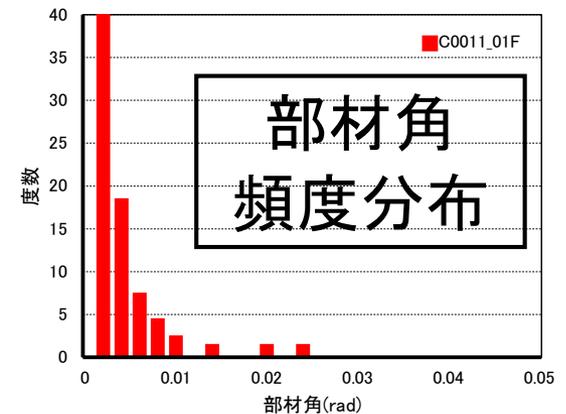
⇒ Miner 則を仮定して加算 → 損傷度0.4程度 ←



柱M-N応答



軸力比0.6時疲労曲線



通常的设计で用いられる解析モデルとの比較

■ 鉄骨柱を有する30階建モデル(S30)

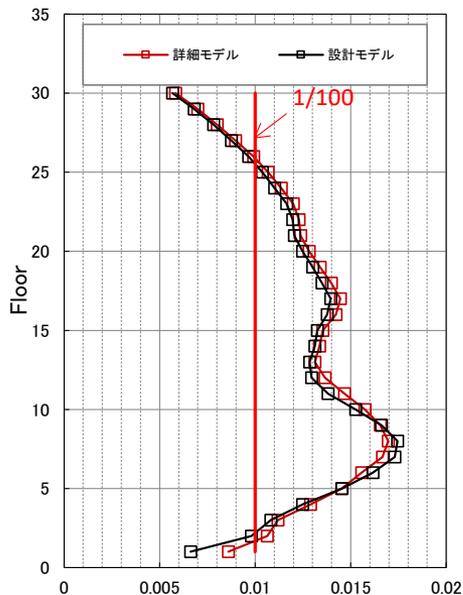
ここまでの検討モデル

梁: 梁端破断及び局部座屈考慮

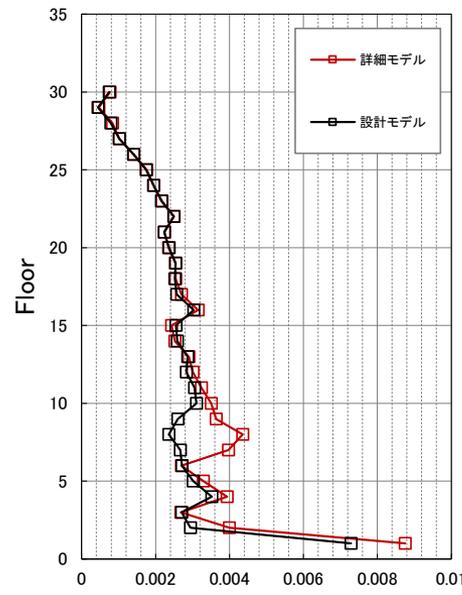
柱: 局部座屈考慮マルチスプリングモデル (←詳細モデル)

↓ 梁端破断直前倍率にて比較

通常的设计モデル(劣化しないBi-Linear型) (←設計モデル)



層間変形角



柱部材角

梁端破断直前倍率では、
詳細モデルと
設計モデルの
応答結果は概ね一致

今年度のまとめ(解析WG)

超高層鉄骨造建物モデルを用い、長周期地震動の入力倍率を変動させた応答解析を行い、下記知見を得た。

- ① 梁には局部座屈及び梁端フランジ破断を、柱には局部座屈を考慮した劣化考慮モデルを用い、部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力を検討した。梁性能、柱性能を向上させると、基本モデルに比較して倒壊倍率が大きくなる(倒壊しにくくなる)傾向を確認した。
- ② 仮設定した柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証を試行した。今回検討では損傷度は最大0.4程度となった。
- ③ 劣化考慮モデルと通常の設計で用いられる解析モデルとを比較した。設計で想定する応答範囲である梁端破断直前倍率では、応答結果は概ね一致することを確認した。

【 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。

- 鉄骨柱部材の設計用疲労曲線(案)の検討
- 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

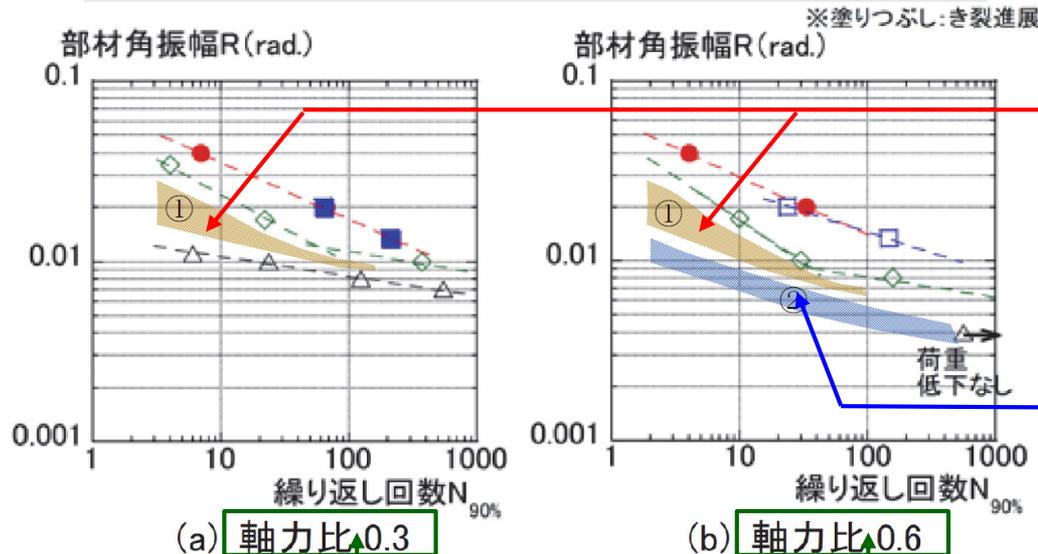
今年度は、H30年度の実験結果および既往実験結果を用い、**設計用疲労曲線(案)**を検討し、H30年度の実験で確認された荷重低下要因(局部座屈、き裂発生)を**FEMを用いてシミュレート可能かの検討**を実施。また、今後補充が必要なデータの一部に関して、**FEMを用いたパラメータスタディ**を実施し、FEM解析結果も考慮した設計用疲労曲線を検討。

既往実験による設計用疲労曲線(案)の検討

■設計用疲労曲線(案)と今後必要なデータの検討

既往実験の結果から、一定軸力と変動軸力での多数回繰返し特性の関係を予測し、建物モデルS30に与える鉄骨柱部材の性能曲線(案)を提案した。また、今後補充が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のデータを抽出した。

○:幅厚比8.75 □:幅厚比11.7 ◇:幅厚比16.7 △:幅厚比27.5



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

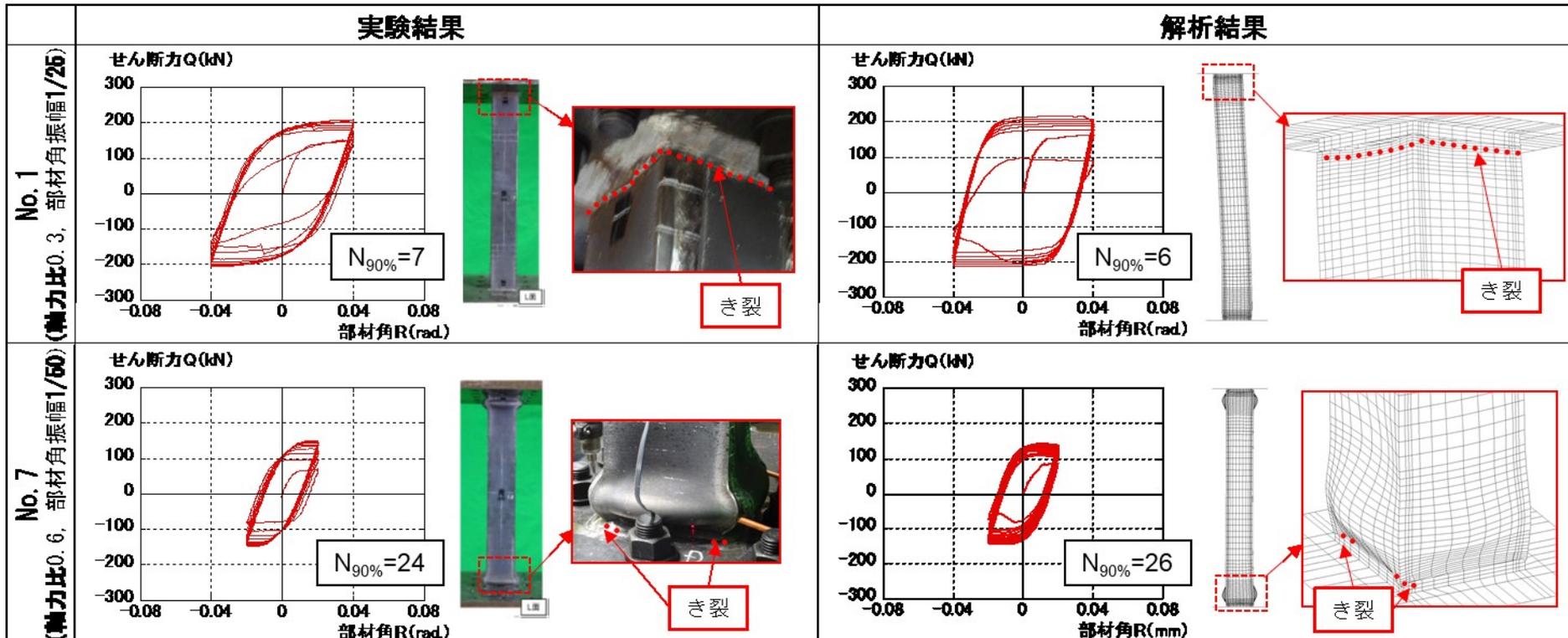
③軸力比0.6を超えるデータ

今後補充が必要なデータ

有限要素法(FEM)を用いた解析可能性の検討

■FEMによる実験シミュレーション

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体の試験結果についてシミュレーションを行い、FEMにより解析可能であることを確認。



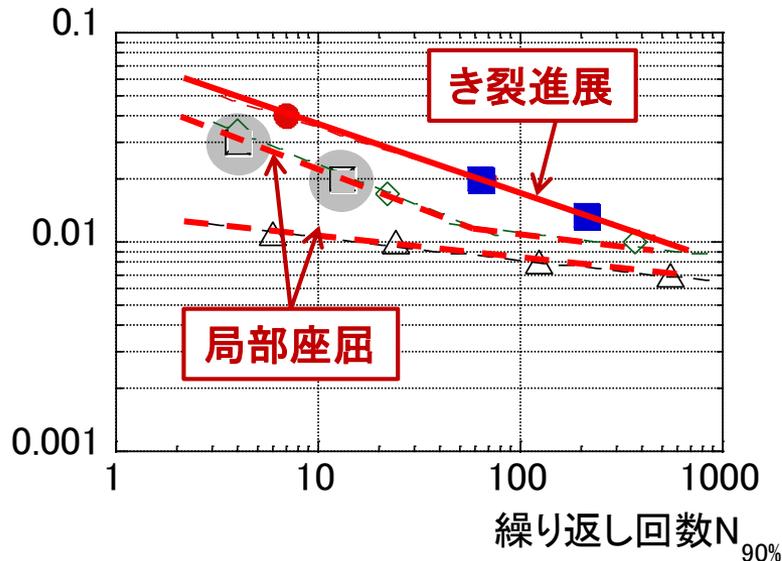
FEMによるパラメータスタディと疲労曲線の検討

今後検討が必要なデータ①②について、FEMによるパラメータスタディを実施し、既往実験結果と併せて性能曲線を検討。

⇒ 上限: 荷重低下要因がき裂進展、下限: 局部座屈

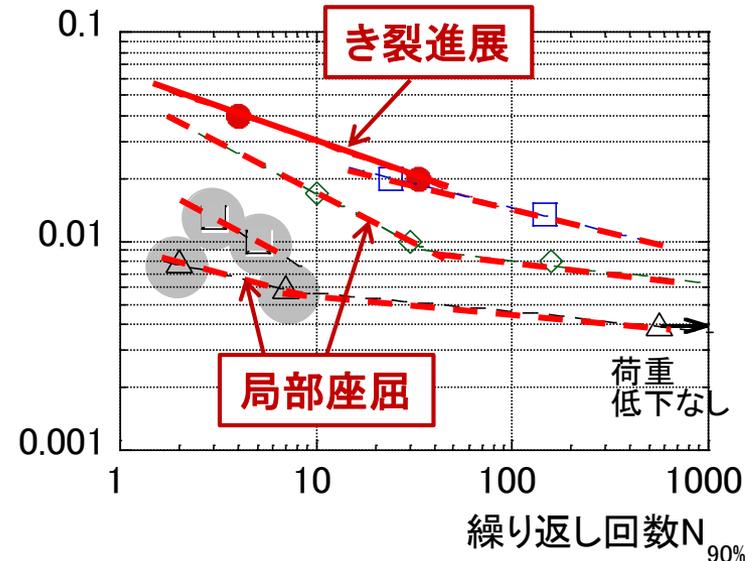
- 幅厚比: 8.75 ◇ 幅厚比: 16.7 △ 幅厚比: 27.5
 ■ 幅厚比: 11.7 ⊠ 幅厚比: 20.0 塗りつぶしはき裂進展
 ● は解析結果

部材角振幅R(rad.)



軸力比0.3

部材角振幅R(rad.)



軸力比0.6

今年度のまとめ(S柱WG)

既往実験結果による設計用疲労曲線(案)の検討を行い、FEMによる実験シミュレーションを行った結果、下記知見を得た。

- ① 既往実験による設計用疲労曲線(案)を検討することで、今後必要なデータを抽出した。
- ② FEMを用いた解析により、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。
- 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。

【 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・今年度の実施項目(CFT柱WG)

CFT柱WGでは、角形CFT柱部材が変動変位振幅繰返し載荷を受ける場合の構造特性を把握し、**Miner則の成立性**を検討することを目的として、下記を実施する。

○CFT柱部材の一定変位振幅ならびに変動変位振幅繰返し
曲げせん断実験

今年度は、**角形CFT柱部材が変動変位振幅繰返し載荷を受ける場合の構造特性を把握し、既往の一定変位振幅繰返し載荷実験結果と合わせて、部材角一限界繰返し回数**の定式化を行う。次に、得られた式を用い、**限界繰返し回数**を計算し、**変動変位振幅繰返し載荷を受ける場合の限界繰返し回数**を予測し、その予測した値と、**実験により得られた限界繰返し回数**を比較し、**Miner則が成立するかどうかの検討**を行う。

実験概要

■試験体

□-150 × 150 × 6 (BCR295)

: 11体

■実験パラメータ

【部材因子】

○径高さ比 l_k/D : 2水準

【外力因子】

○振幅: 2水準

○軸力比 n (一定軸力): 2水準

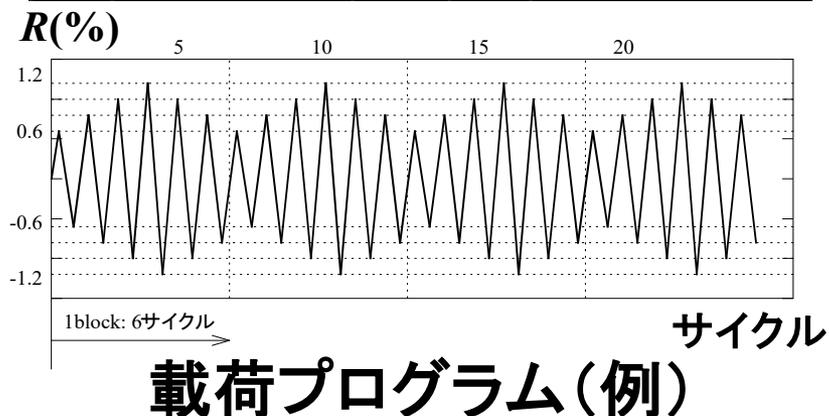
■载荷プログラム

○振幅: 4水準

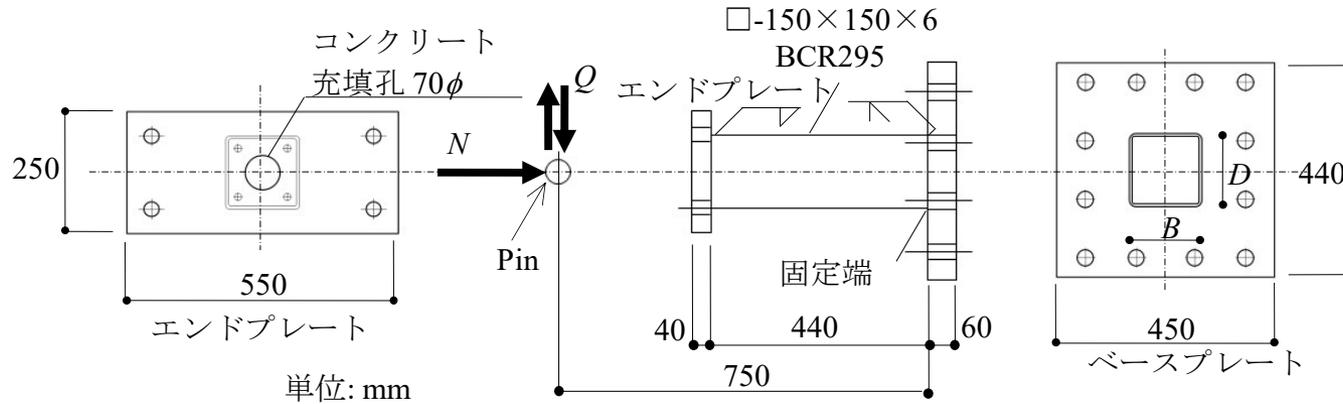
○同一振幅繰り返し回数: 1

試験体リスト

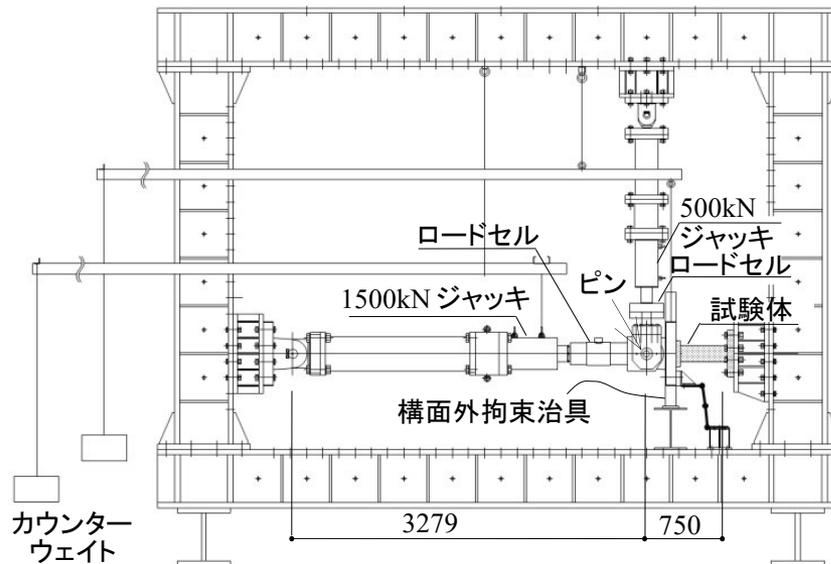
No.	試験体	l_k/D	n	部材角 R (%)
1	S-LD10n30Rv1	10	0.3	0.6, 0.8, 1, 1.2
2	LD10n30Rv1			0.6, 0.8, 1, 1.2
3	LD10n30Rv2			1, 1.1, 1.2, 1.25
4	LD10n30R12			1.2
5	LD10n60Rv1	10	0.6	0.5, 0.6, 0.7, 0.8
6	LD10n60Rv2			0.6, 0.7, 0.8, 0.85
7	LD10n60R06			0.6
8	LD10n60R08			0.75
9	LD20n30R15	20	0.3	1.5
10	LD20n30Rv1			1.25, 0.5, 0.75, 2
11	LD20n30Rv2			1.1, 1.4, 1.7, 2



試験体形状と載荷装置



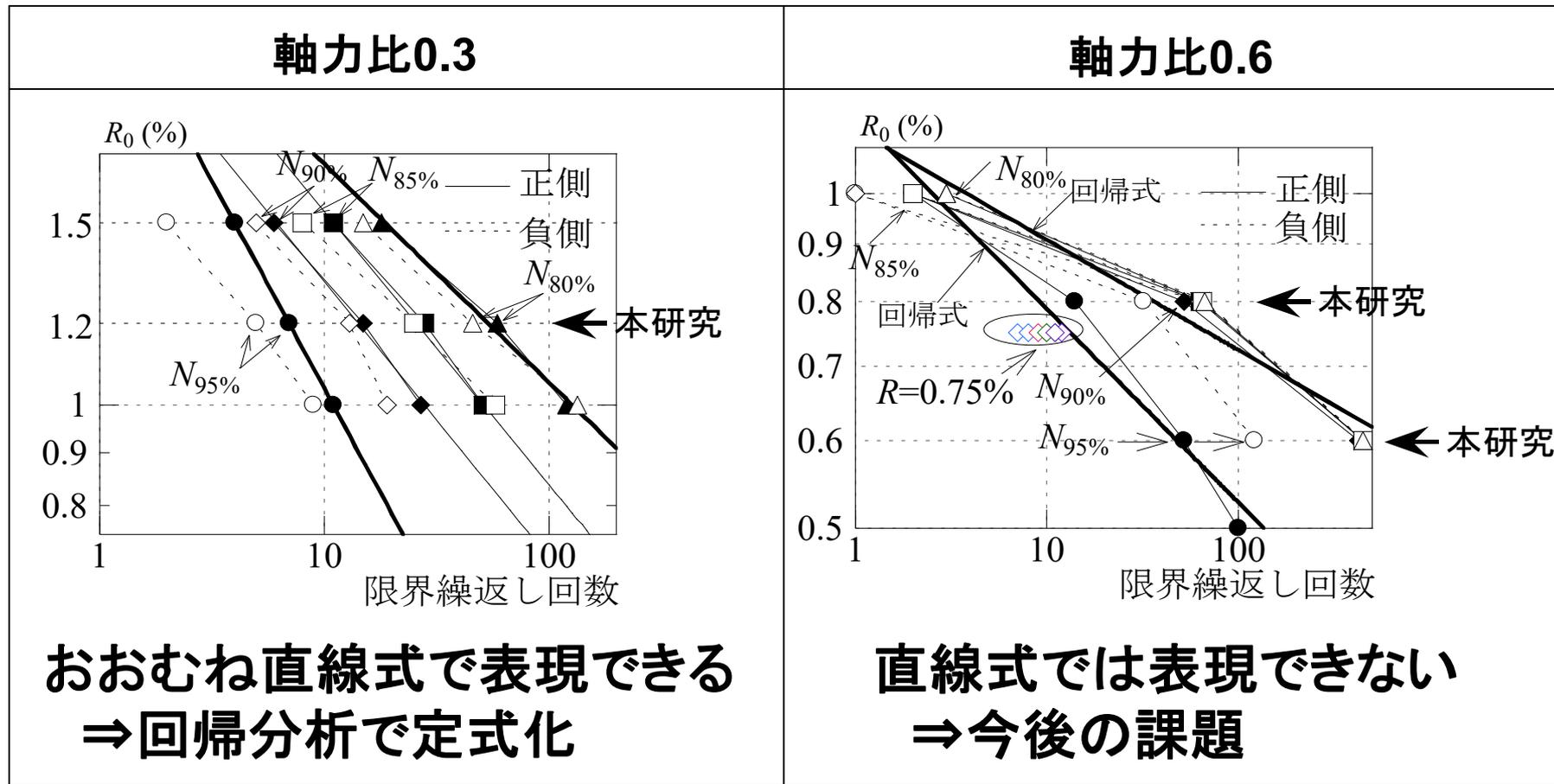
試験体形状



載荷装置

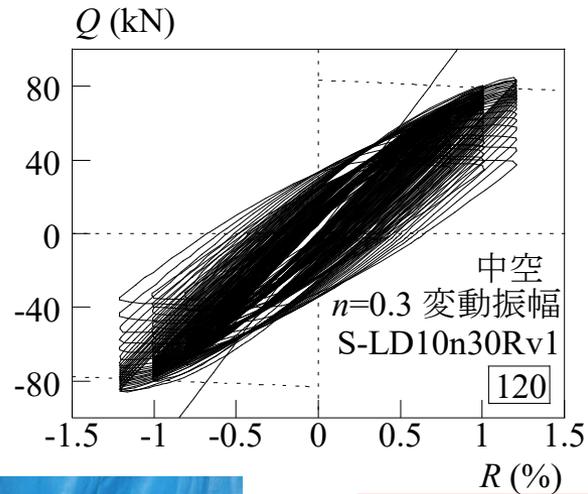
限界繰返し回数一部材角 R_0 関係 (一定変位振幅, $l_k/D=10$)

限界繰返し回数: 最大荷重の95%, 90%, 85%, 80%となったときのサイクル数で $N_{95\%}$, $N_{90\%}$, $N_{85\%}$, $N_{80\%}$ であらわす。

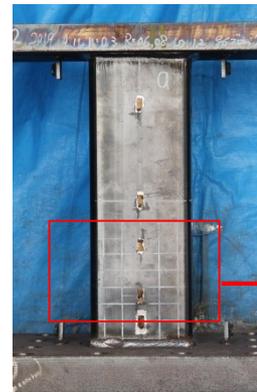
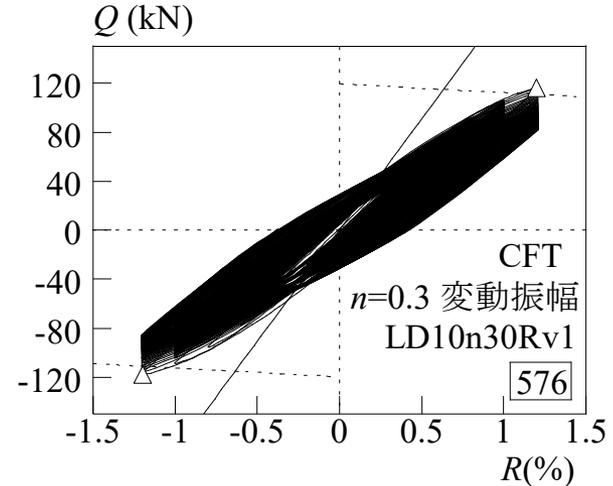


実験結果(変動振幅, 軸力比 $n=0.3$, 中空 vs CFT)

中空試験体



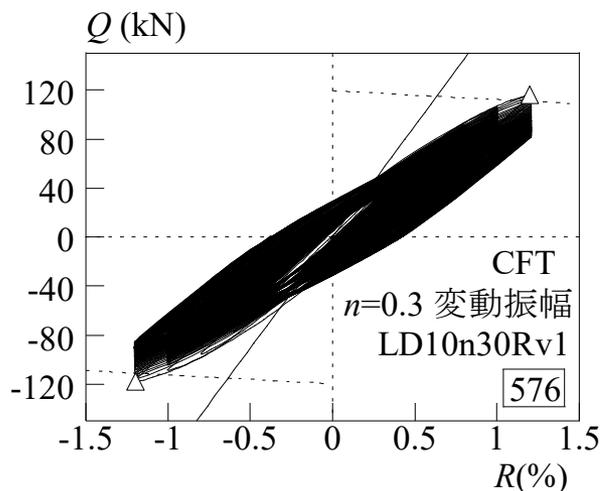
CFT試験体



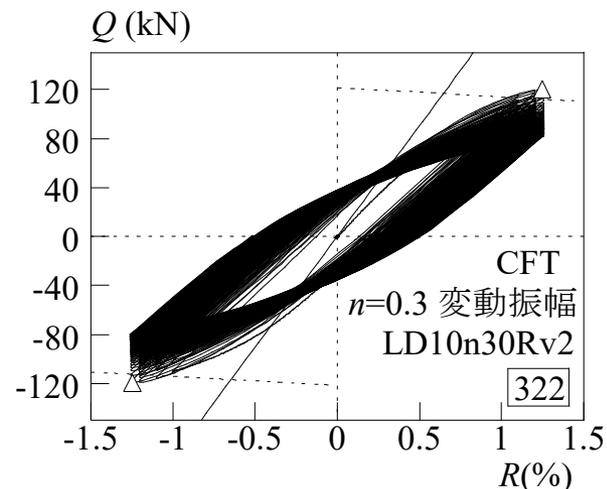
中空試験体の方が、同じ振幅の組み合わせの場合、
局部座屈変形が大きく、耐力の低下が大きい。

実験結果 (軸力比 $n=0.3$, 振幅の違い)

$R_0 = 0.6, 0.8, 1, 1.2\%$



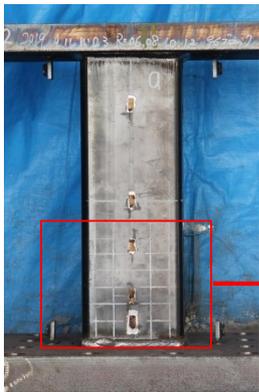
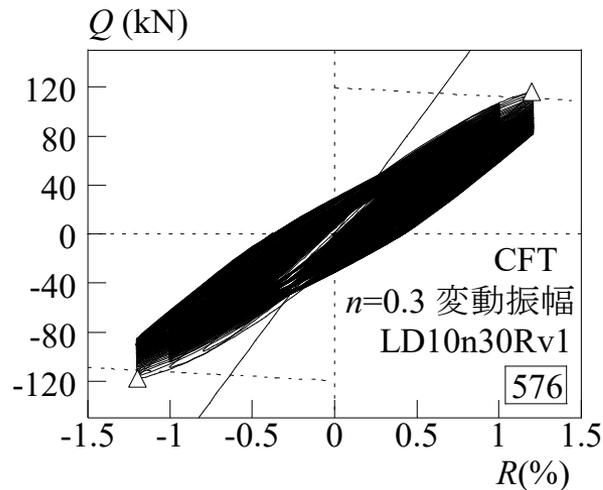
$R_0 = 1, 1.1, 1.2, 1.25\%$



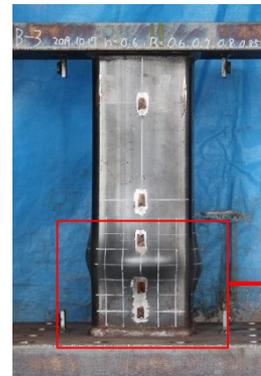
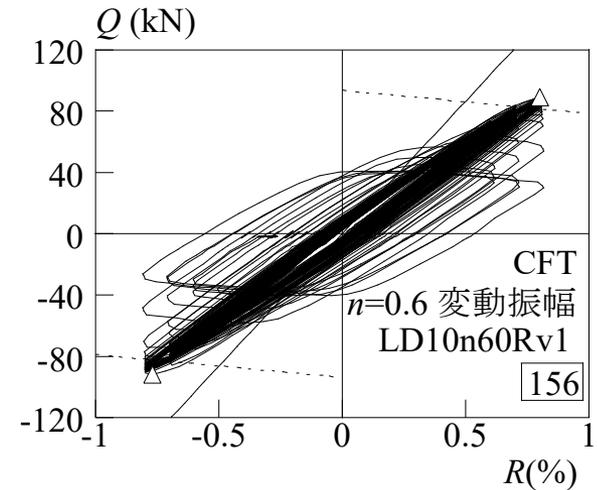
振幅が大きいほうが、同じサイクル数における耐力低下が大きく、局部座屈変形も大きい。

実験結果(軸力比の違い)

$n=0.3, R_0=0.6, 0.8, 1, 1.2\%$

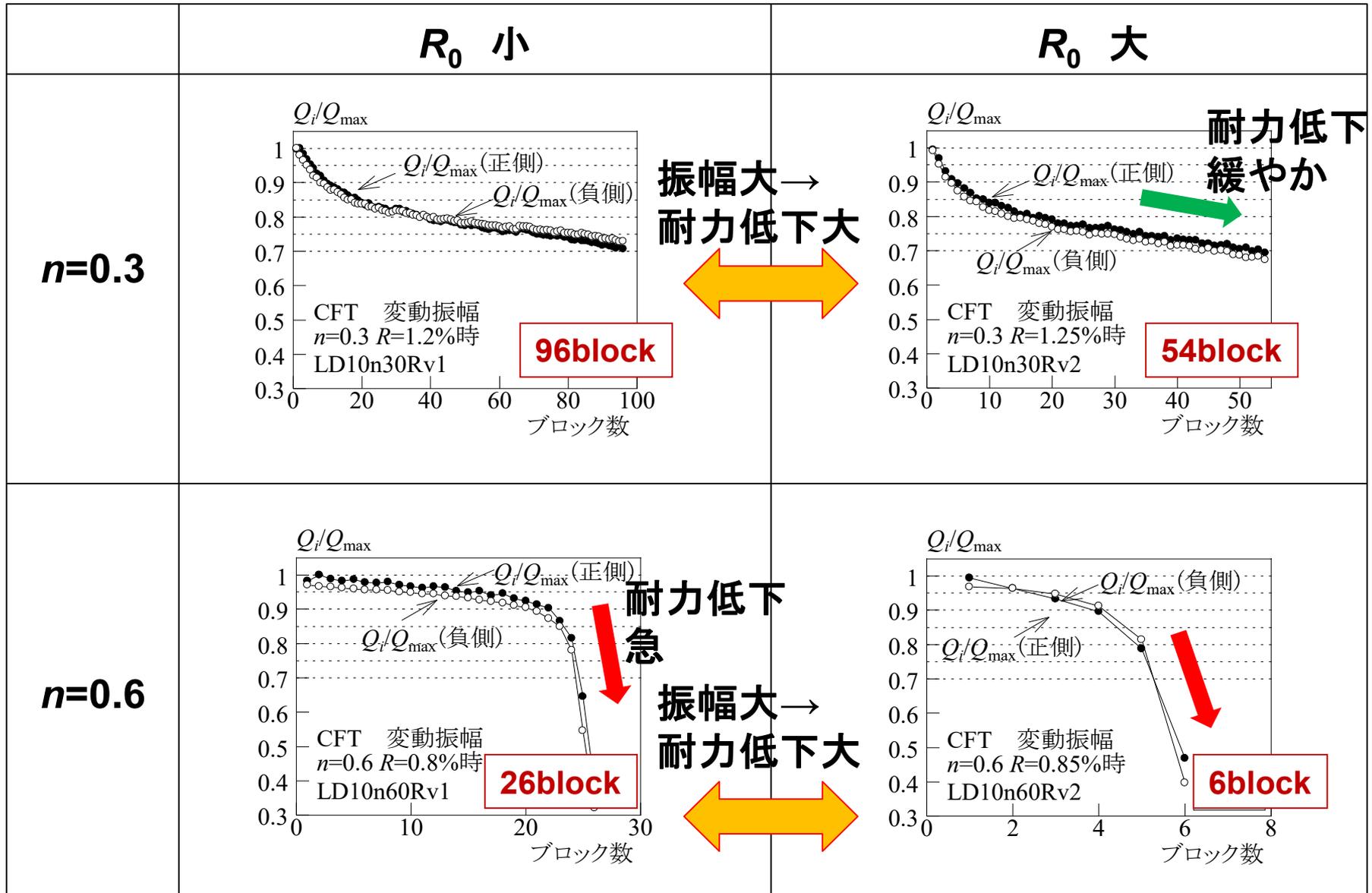


$n=0.6, R_0=0.5, 0.6, 0.7, 0.8\%$



軸力比が大きいと耐力低下が著しい。局部座屈変形も大きい。

実験結果 (荷重低下曲線, $l_k/D=10$)



Miner則の成立性の検討 ($l_k/D=10$)

	R_0 小						R_0 大							
$n=0.3$	実験による 限界ブロック数	1%	+	$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$	実験による 限界ブロック数	1.2%	+	$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
			-	4	9	19	38			-	2	4	7	13
		1.2%	+	2	5	11	24		+	1	3	5	10	
			-	6	10	19	37		-	2	4	8	15	
	$D=1$ となる 限界ブロック数 (計算)		+	2.2	5.6	10.6	25	$D=1$ となる 限界ブロック数 (計算)		+	1.3	2.8	5.2	11
			-	1.9	4.2	11.4	24.6			-	0.92	2.2	4.9	10
実験値/計算値	1%	+	1.8	1.6	1.8	1.5	実験値/計算値	1.2%	+	1.5	1.4	1.4	1.2	
		-	1.1	1.2	1	1			-	1.1	1.4	1	1	
	1.2%	+	2.7	1.8	1.8	1.5		1.25%	+	1.5	1.4	1.5	1.4	
		-	2.7	1.9	1.4	1.5			-	2.2	1.8	1.4	1.2	
実験値/計算値は、いずれも1以上であり、値も1~2.7と概ね対応														
$n=0.6$	実験による 限界ブロック数	0.7%	+	$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$	実験による 限界ブロック数	0.8%	+	$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
			-	5	22	25*	25*			-	3	4	5	5
		0.8%	+	1	17	23	24		+	4	5	-	5	
			-	15	23	24	25*		-	3	4	5	-	
	$D=1$ となる 限界ブロック数 (計算)		+	3.8	18	20	22	$D=1$ となる 限界ブロック数 (計算)		+	2	6.3	6.8	8
			-	7.8	16	19	21			-	2.86	5.1	6.9	8
実験値/計算値	0.7%	+	1.3	1.2	1.3	1.1	実験値/計算値	0.8%	+	1.5	0.6	0.7	0.6	
		-	0.1	1.1	1.2	1.1			-	1.4	1	-	0.6	
	0.8%	+	3.9	1.3	1.2	1.1		0.85%	+	1.5	0.6	0.7	-	
		-	1.2	1.3	1.2	1.1			-	1	-	0.7	-	
実験値/計算値は、1未満のものもある、値は0.1~3.9														

今年度のまとめ(CFT柱WG)

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

- ①一定変位振幅繰返し载荷の部材角—限界繰返し回数関係は、軸力比 $n=0.3$ の場合、部材角—限界繰返し回数関係は直線式で表現できた。このことから、試みとして回帰分析によりこれらの関係を式で示した。軸力比 $n=0.6$ の場合は直線式で表現できず、今後の課題である。
- ②上記で示した部材角—限界繰返し回数関係を用い、Miner則が成り立つかどうかの検討を行った結果、軸力比より傾向は異なるものの、おおむね実験値と計算値は対応していた。

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、今年度は下記の知見を得た。

【解析WG】 部材劣化後に建物が倒壊するまでの余力を検討し、梁性能、柱性能を向上させると、倒壊倍率が大きくなる(倒壊しにくくなる)傾向を確認。

【鉄骨柱WG】 FEMにより実験の破壊現象をシミュレート可能であることを確認し、実験および解析結果により性能曲線の特徴を把握。

【CFT柱WG】 一定変位振幅繰返し載荷の部材角一限界繰返し回数関係は、軸力比0.3では直線式で表現可、軸力比0.6では直線式とはならず今後の課題。Miner則については、軸力比より傾向は異なるが、おおむね実験値と計算値は対応。

おわり