

# 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。

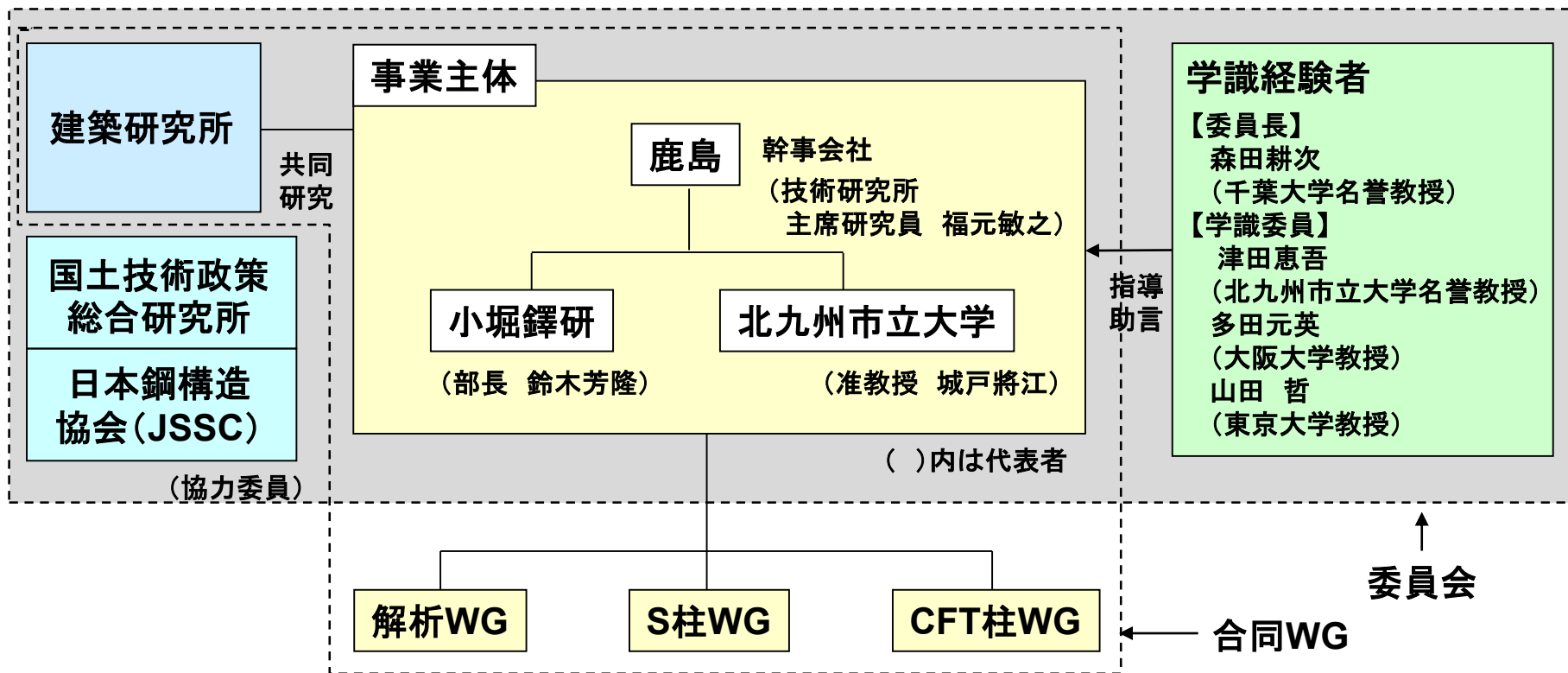
⇒ **鉄骨柱部材や CFT 柱部材**での梁端部の安全性検証に用いているような**設計用疲労曲線式が無い**。

## 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(R2年度)



# 解析WG

## ■ 検討概要(R2年度)

超高層鉄骨造建築物の地震応答解析に基づく耐震安全性検証法の検討を行う。

### (a)柱部材の性能曲線に基づく健全性確認

:2年間の検討を通じて設定される柱部材の性能曲線に基づき、建物モデル(S30、CFT32)に於ける柱部材の健全性を確認。

### (b)柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証方法の試行と提案

:超高層鉄骨造建築物を構成する構造部材の内、大入力に対して劣化を考慮すべきと考えられる梁および柱について性能曲線を設定し、それに基づき、建物全体としての耐震安全性検証法を検討する。

# S柱WG

## ■ 検討概要 (R2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項目を実施。

### (a) 鉄骨柱部材の多数回繰り返し载荷実験

: 変動軸力, 変動振幅等に関する鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を平成30年度と同様の装置にて実施。変動振幅载荷では, 線形累積損傷則 (Miner則) の成立性を検討。

- ・縮 尺: 1/5程度
- ・試験体数: 7体 (角形鋼管柱を対象)
- ・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0.3~0.8, 変動)

### (b) 鉄骨柱部材の疲労評価

: 一定軸力下での多数回繰り返し特性の評価を行い, この評価結果を基にして, 変動軸力下の多数回繰り返し特性の評価を実施し, 角形鋼管柱の疲労評価式を提案。

# CFT柱WG

## ■実施概要(R2年度)

角形CFT柱部材の疲労曲線の提案を目的として、以下の2項目を実施。

### (a)CFT柱部材の多数回繰り返し載荷実験

: 変動軸力下における角形 CFT 柱部材の多数回繰り返し特性を把握することを目的として、軸力比・振幅をパラメータとして変化させた一定変位振幅繰り返し実験を実施。

- ・縮 尺: 1/5～1/8程度
- ・試験体数: 5体(角形鋼管柱を対象)
- ・実験パラメータ: [載荷パターン] 一定振幅(振幅: 大、小)  
[軸力] 軸力比(変動: 3種類)

### (b)CFT柱部材の疲労評価

: 本実験の結果と既往の一定軸力・変動軸力の実験結果から、一定および変動軸力を受ける角形CFT 柱部材の疲労評価式を提案。

## 【 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



## 昨年度までの成果(解析WG)

### ●表層地盤増幅考慮した長周期地震動に対する応答性状確認

- ・柱には鉄骨及びコンクリートの応力歪関係を与える**マルチスプリングモデル**、**梁端**には**局部座屈及び破断**を考慮できるマクロモデルを適用して応答解析を実施。

### ●長周期地震動を係数倍入力漸増させた時刻歴応答解析

- ・梁端破断が生じる入力倍率と建物が倒壊する時の入力倍率を確認し、**梁端破断から倒壊※に至る余力(余裕度)が小さい場合がある**ことを確認。

※「倒壊」:解析上水平方向復元力喪失or解析不能と定義

- ・通常の設計で用いられる柱部材モデル(軸と曲げの連成を考慮した降伏曲面を有するマクロモデル)による**設計モデルの応答**と、マルチスプリングモデルを用いた**詳細モデルの応答**は**設計レベルにおいては概ね同一**であることを確認。

## 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**新たな判定基準による耐震安全性検証法**の提案を目的とし以下の3項目を検討。

### 【検討項目】

- ①余力を確保するための層間変形角クライテリア
- ②柱の損傷評価法
- ③耐震安全性評価フロー

以下の建物モデル①～⑥を例題として採用、応答解析を実施。

- ①鉄骨造30階建て(鉄骨柱)標準
- ②梁性能高
- ③柱断面大
- ④鉄骨造32階建て(CFT柱) 座屈拘束ブレースあり
- ⑤なし
- ⑥鉄骨造15階建て

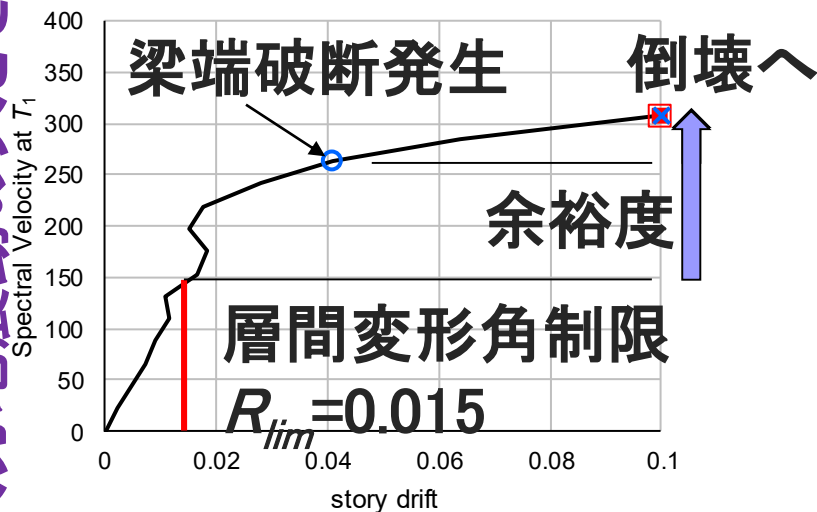
# ①余力を確保するための層間変形角クライテリア

建物全体の倒壊性能を表す量として、『層間変形角』による判定  
 (限界変形角  $R_{lim}$ ) を提案

⇒部材劣化しないことを満足した状態では、入力を少し大きくしただけで倒壊に至る場合がある。

⇒この場合でも倒壊までの余力を確保したい。

入力地震動の大きさ



最大層間変形角

IDAカーブ(入力と応答の大きさ)

梁端の塑性変形性能が高いほど  
 梁端破断発生時の層間変形角大



入力を少し大きくすると  
 P-Δの影響で倒壊に至るため  
 倒壊までの余裕度が小さい

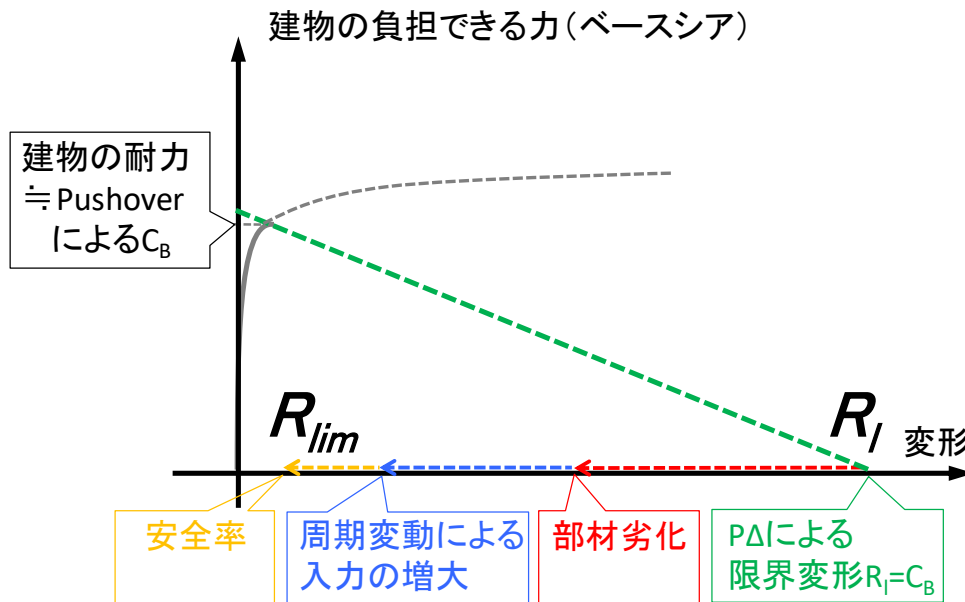


部材劣化に加え層間変形角制限  
 建物耐力・入力特性・安全率考慮

# ①余力を確保するための層間変形角クライテリア

建物全体の倒壊性能を表す量として、『層間変形角』による判定  
 (限界変形角  $R_{lim}$ ) を提案

$R_{lim}$  はP- $\Delta$ により水平方向の復元力を喪失する変形角  $R_l^*$  を基に設定



$R_{lim}$  は、 $R_l$  に

- ・ 梁部材劣化を仮定した低減
- ・ 周期変動に伴う入力の増大
- ・ 安全率

を考慮して設定

「 $R_l$ 」\*: ある層の層間変形角が1/100rad に達した時点のベースシア (復元力) と、P- $\Delta$  効果による付加せん断力が釣り合う変形角

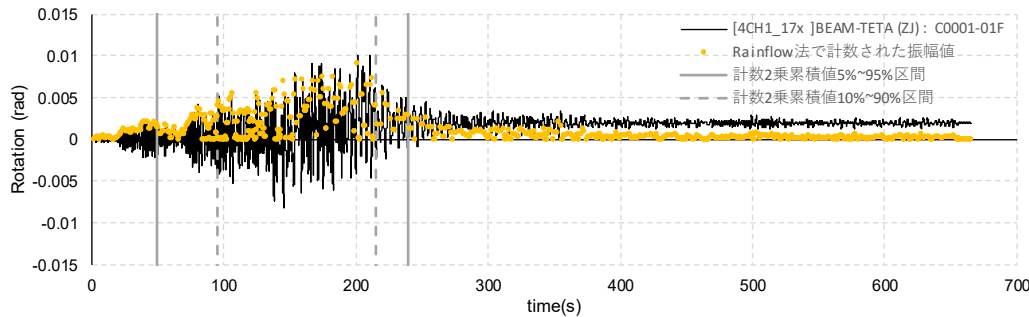
## ②柱の損傷評価法

柱の部材角  $\theta$  時刻歴と最大軸力比  $N/N_y$  に基づく評価

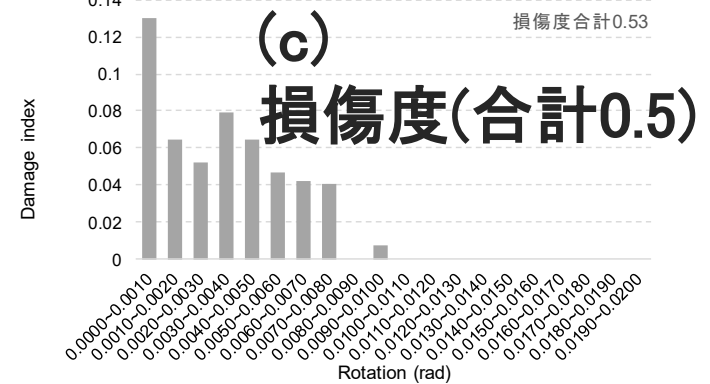
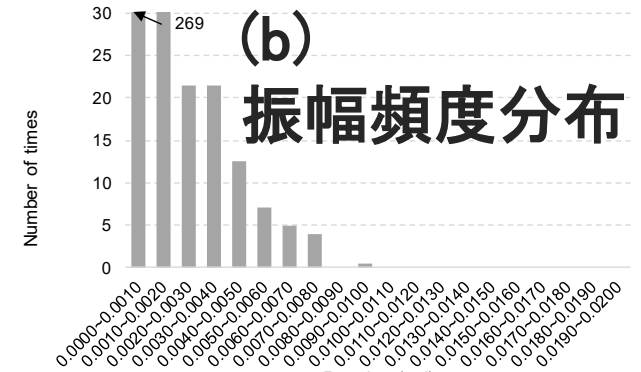
柱の繰り返し性能曲線(鉄骨柱、CFT柱)に基づき損傷評価

- ・レインフロー法により部材角振幅をカウント((b)図)
- ・Miner則を仮定して累積損傷評価((c)図)

鉄骨柱の繰り返し性能曲線(S柱WG)  
CFT柱の繰り返し性能曲線(CFT柱WG)



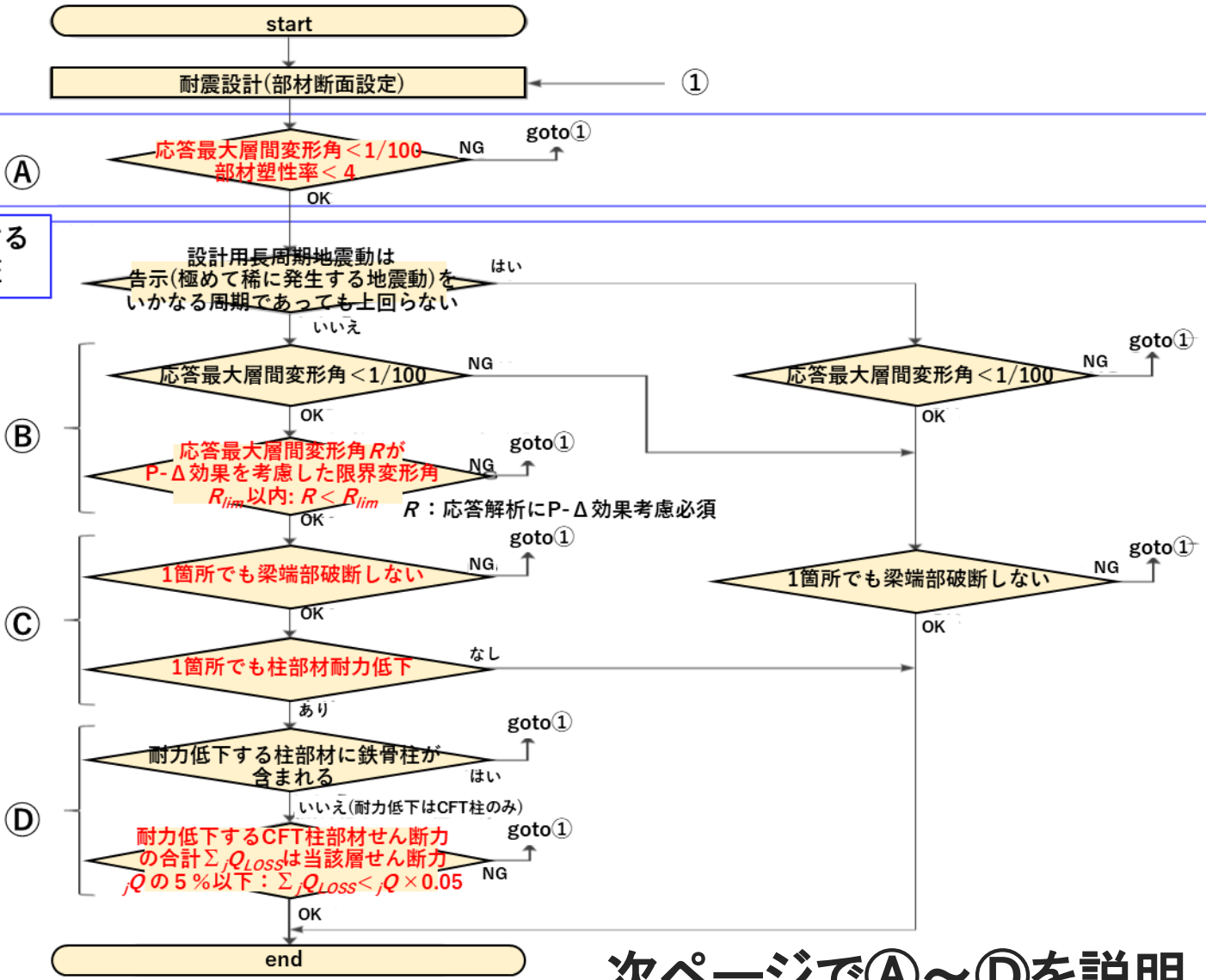
(a)部材角振幅時刻歴  
S30(鉄骨柱)の算定例



# ③耐震安全性評価フロー

告示波・既往波に対する時刻歴応答解析による検証

設計用長周期地震動に対する時刻歴応答解析による検証



次ページで①～④を説明

## ③耐震安全性評価フロー

告示波を超える速度応答スペクトルとなる設計用長周期地震動に対する『評価フロー』と『耐震安全性判定基準』を提案。

①設計用告示波・既往波に対する従来通りの耐震安全性判定  
 (層間変形角1/100、部材塑性率4(層塑性率2))

以下、設計用長周期地震動に対して

②層間変形角による耐震安全性判定

- ・最大1/100以下を基本とするが、1/100を超えたとしてもP- $\Delta$ を考慮した解析により限界変形角 $R_{lim}$ 以下を確認。  
 ※ $R_{lim}$ はP- $\Delta$ の影響を考慮し建物耐力等に基づき算定。

③部材が劣化しないことを判定基準とする耐震安全性判定

- ・梁端破断を生じない，柱部材の耐力劣化はしない。

④CFT柱は耐力(水平抵抗力)劣化しても影響小であれば許容

- ・CFT柱は水平抵抗力が劣化するが鉛直荷重支持能力保持
- ・劣化部材が層5%以下であれば全体特性に及ぼす影響小

## 今年度のまとめ(解析WG)

超高層鉄骨造建物に対する耐震安全性検証方法を検討し、以下①②③を実施、提案した。

- ①層間変形角クライテリアの提案**: 倒壊に影響を及ぼす因子としてP- $\Delta$ の影響を考慮できる建物ベースシア係数 $C_B$ を用いて限界変形角を評価。入力地震動のスペクトルにより調整。
- ②部材劣化クライテリア(柱の損傷評価法の提案)**: 鉄骨柱およびCFT柱WGによる疲労曲線を参照し、柱応答を基にMiner則を仮定して損傷度を算定。
- ③耐震安全性評価フローの提案**: 適切な倒壊余裕度を確保する目的で、建物全体の性能を反映している建物耐力と関連する**①層間変形角クライテリア**と、**②部材劣化クライテリア**の両方を満たすことを求める評価フローを提案。



## 【 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。

- 鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験の実施  
: 変動軸力, 変動振幅における構造的性状確認
- 鉄骨柱部材の疲労評価

本年度は、**変動軸力・変動振幅に関する鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験**を平成30年度と同様な装置にて実施し、

- ・**変動軸力下での多数回繰り返し特性**
- ・**変動振幅下に対する多数回繰り返し特性**

を把握する。また、本基整促S29および既往の実験データを基にして、**鉄骨柱部材の疲労評価**を行う。

# 実験概要

## ■試験体

□-105 × 105 × t(SM490A) : 7体

## ■実験パラメータ

【部材因子】 幅厚比、径高さ比(細長比)は固定

【外力因子】 軸力比(一定、変動), 振幅(一定、変動)

	試験体	幅厚比 <i>D/t</i>	径高さ比 <i>L/D</i>	軸力比 <i>n</i>		振幅(レベル) <i>R</i>			
				一定	変動	一定	変動		
1	M11-3C-RLL	11.67 (t=9mm)	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-RS			変動	0.3 ± 0.5		小	1/75	
5	M11-3V-RL						大	1/50	
6	M11-3C-V			一定			変動	1/100 ~ 1/33	
7	M11-6C-V							0.6	

※試験体名称

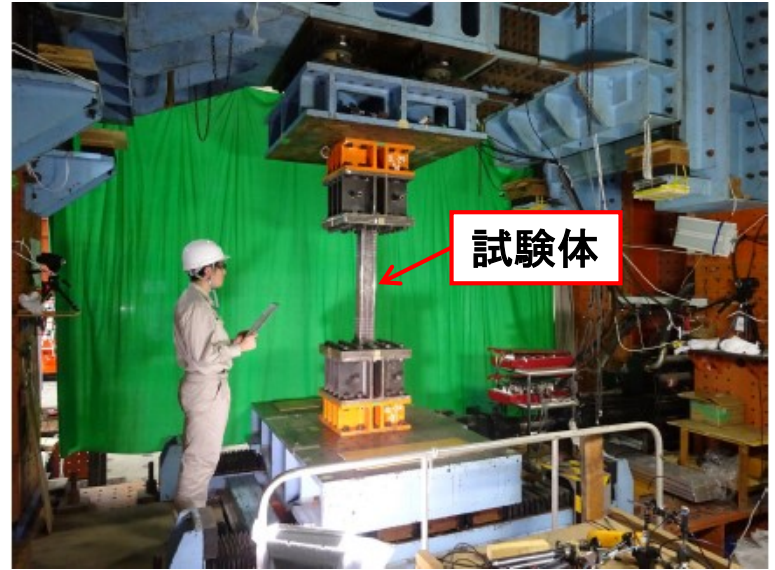
□-□-□

径高さ比 M: L/D=8 + 幅厚比 8: D/t=8.75

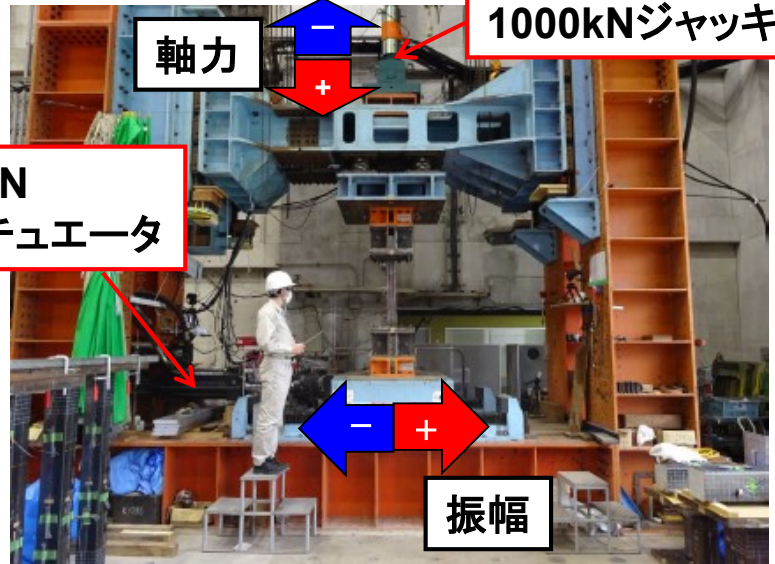
軸力比【一定】3C:0.3, 6C:0.6, 7C:0.7, 【変動】3V:0.3 ± 0.5

部材角振幅【一定】RLL: 極大, RL: 大, RS: 小, 【変動】V

# 試験体形状と加力状況



試験体



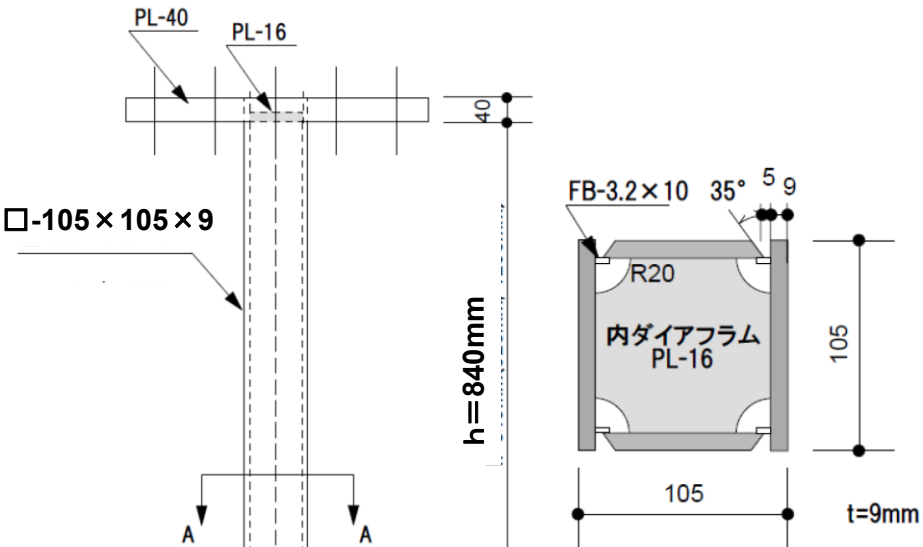
軸力

1000kNジャッキ

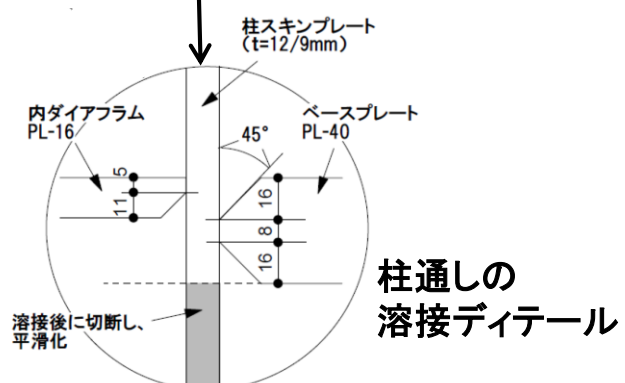
500kN  
アクチュエータ

振幅

加力状況



柱断面(A-A断面)



柱通しの  
溶接ディテール

試験体形状

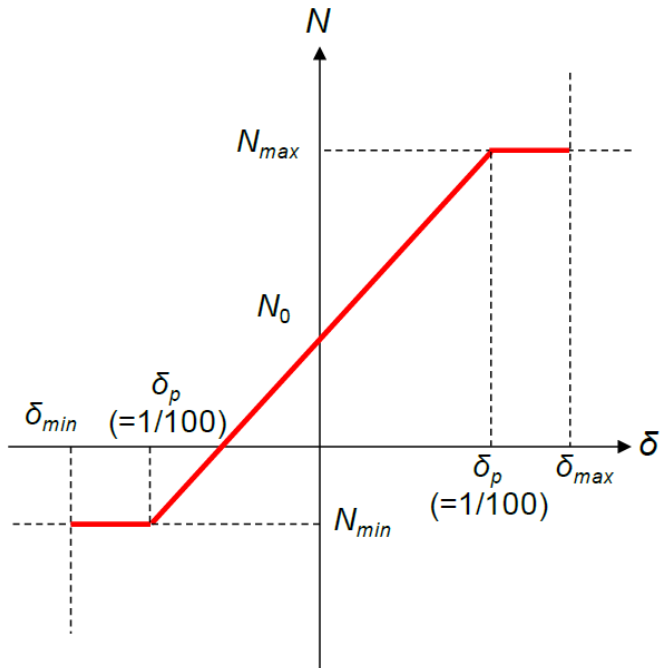
# 加力方法(変動軸力・変動振幅)

【小振幅(7cycle)】

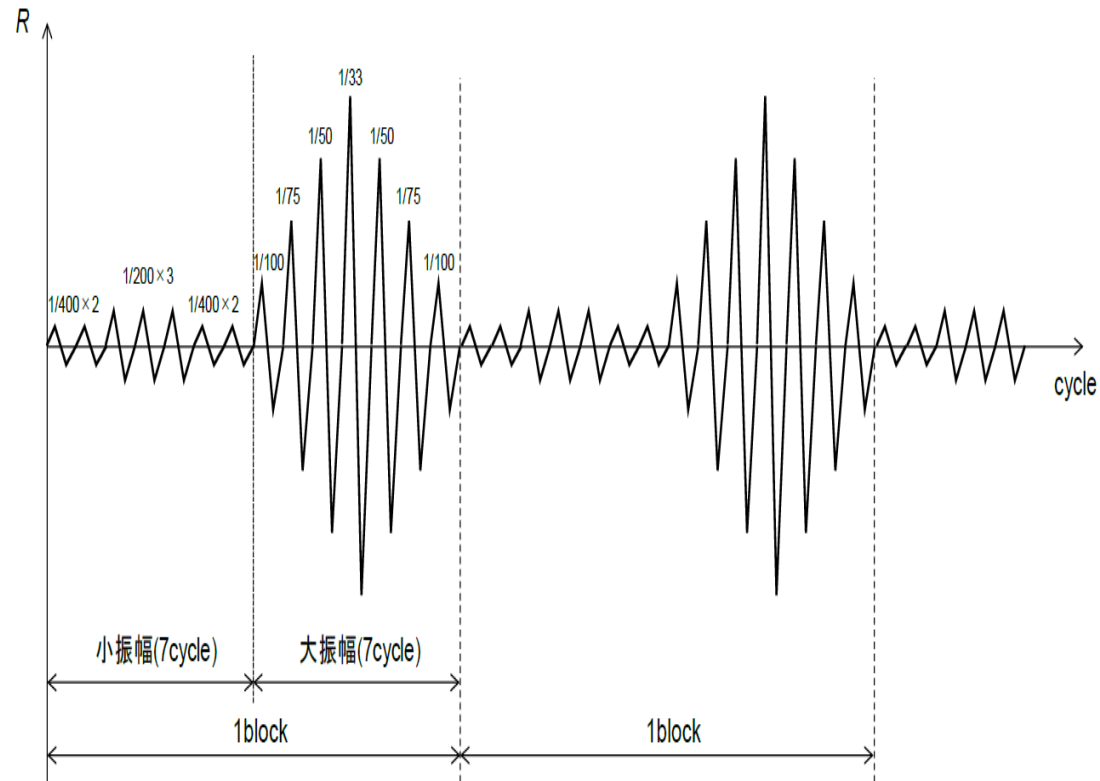
1/400(2) ⇒ 1/200(3) ⇒ 1/400(2)

【大振幅(7cycle)】

1/100 ⇒ 1/75 ⇒ 1/50 ⇒ 1/33 ⇒ 1/50 ⇒ 1/75 ⇒ 1/100



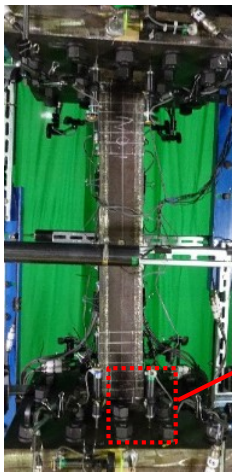
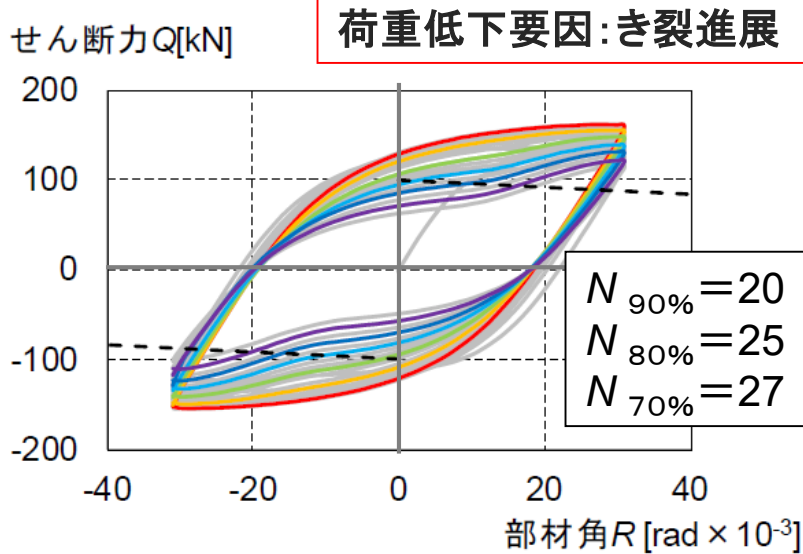
変動軸力



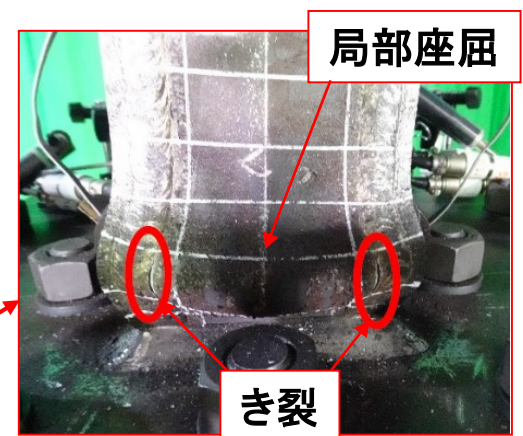
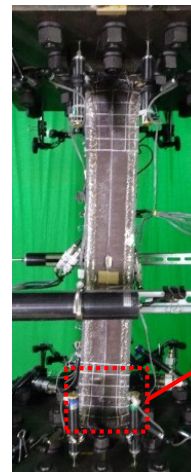
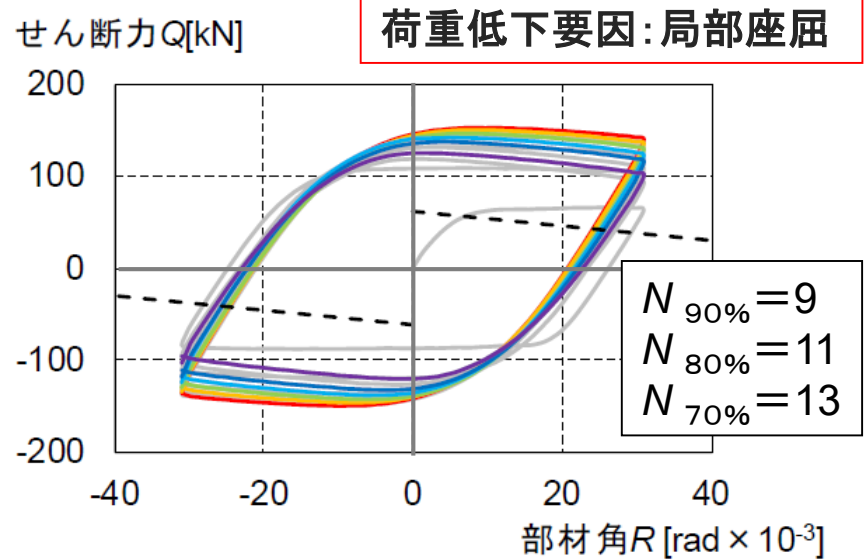
変動変位振幅

# 実験結果(一定軸力, $R=1/33$ )

軸力比0.3

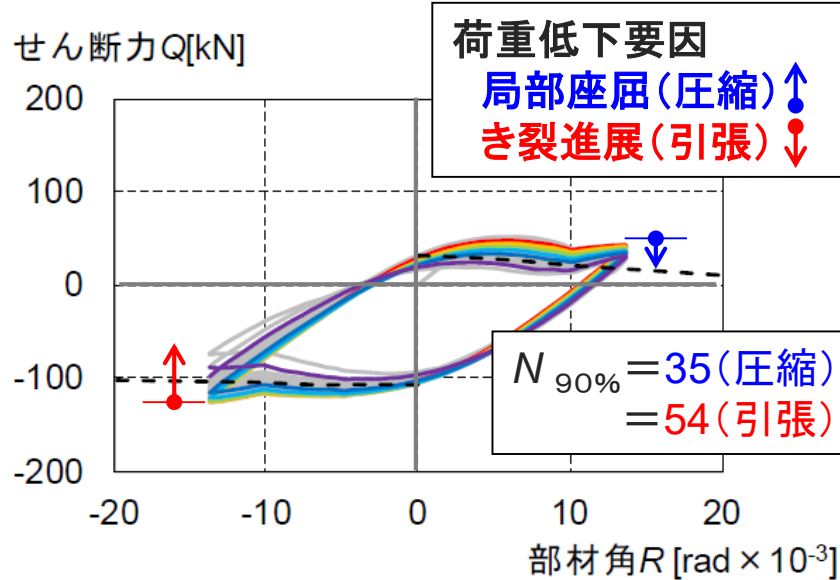


軸力比0.6

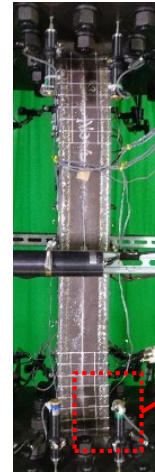
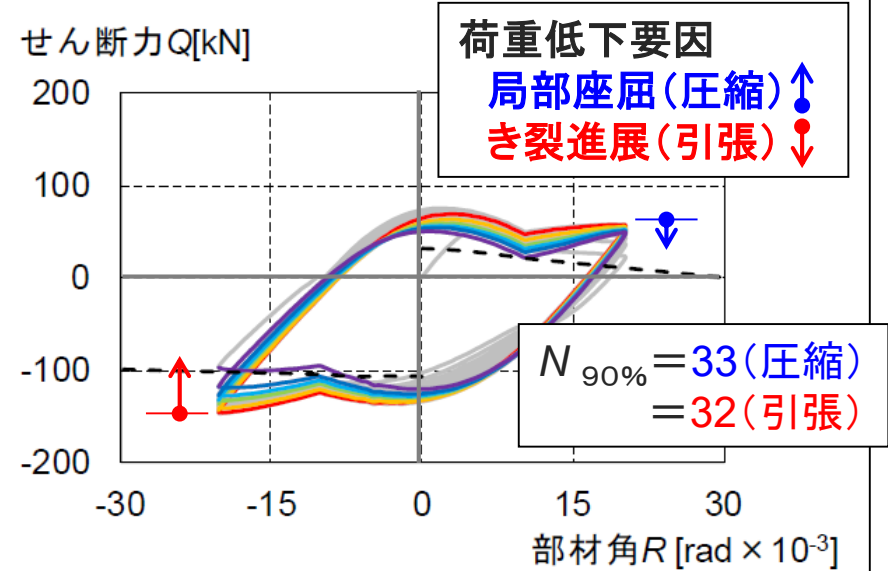


# 実験結果(変動軸力 $n=0.3 \pm 0.5$ )

振幅  $R=1/75$



振幅  $R=1/50$

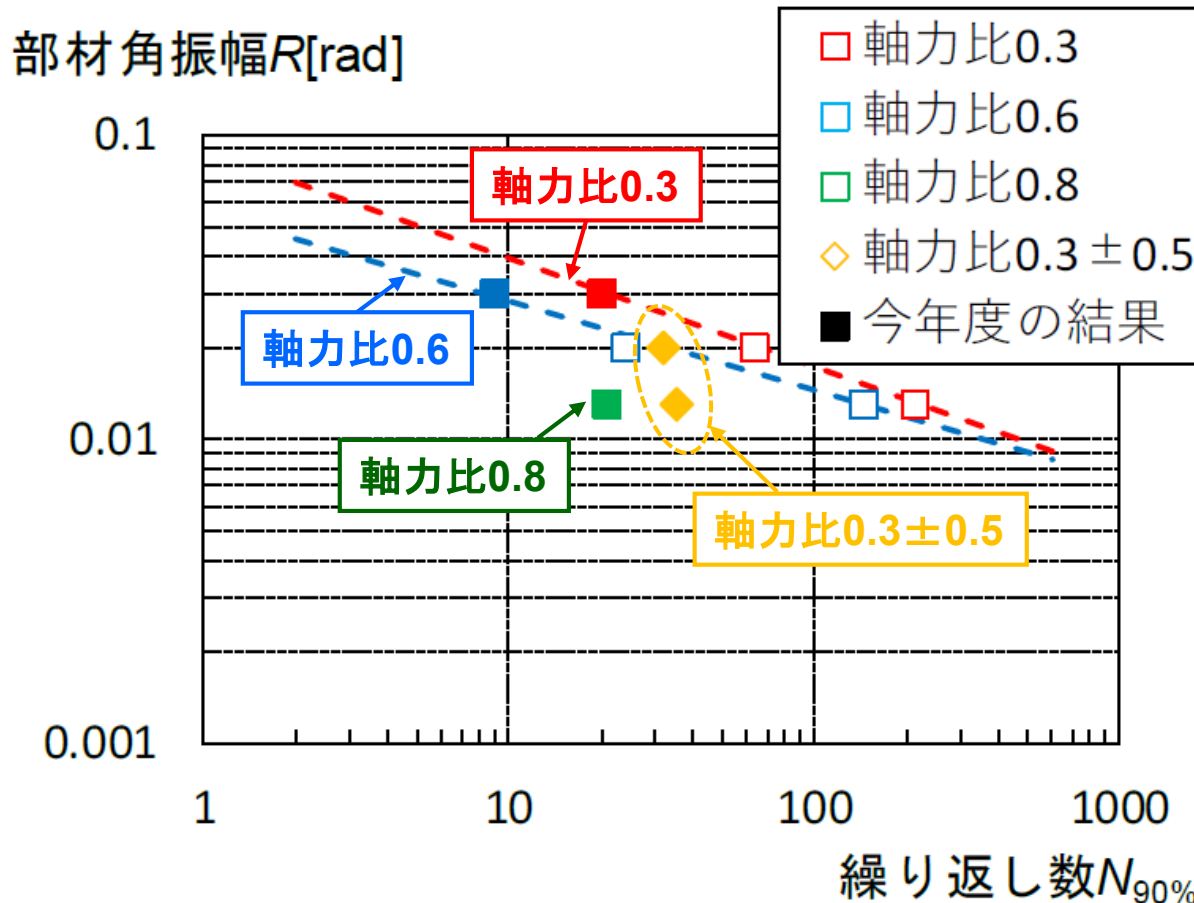


## 実験結果(性能曲線の比較)

一定軸力 ( $n=0.3$ 、 $0.6$ ) : 前回実験データとほぼ同一曲線上

一定軸力 ( $n=0.8$ ) :  $n=0.3$ 、 $0.6$ より繰り返し性能「小」

変動軸力 ( $n=0.3 \pm 0.5$ ) :  $n=0.8$ より性能「大」、 $n=0.3$ より性能「小」

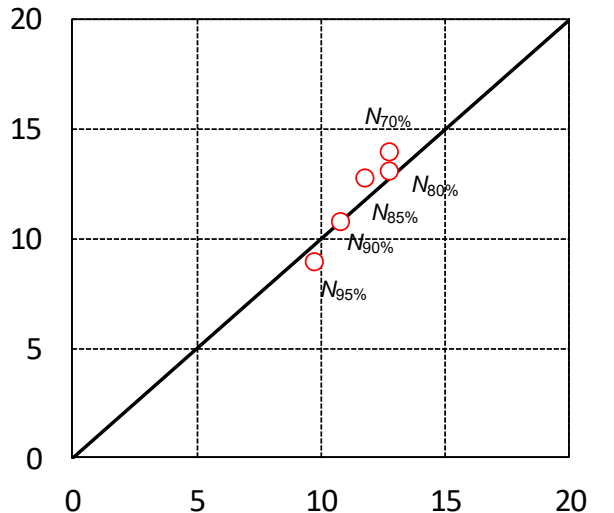




# 実験値とMiner則による評価値の比較 (荷重低下ブロック数)

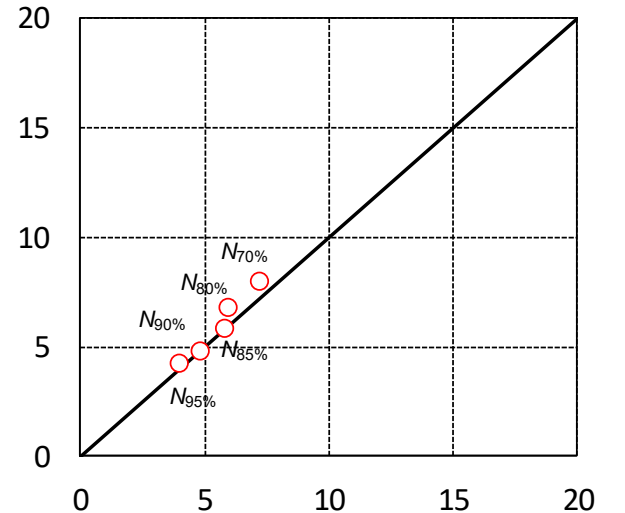
	M11-3C-V(軸力比0.3)		M11-6C-V(軸力比0.6)	
	実験値	Miner則による評価値 (実験値に対する割合)	実験値	Miner則による評価値 (実験値に対する割合)
$N_{95\%}$	9.75	8.92 (0.91)	3.98	4.22 (1.06)
$N_{90\%}$	10.76	10.76 (1.00)	4.80	4.80 (1.00)
$N_{85\%}$	11.77	12.77 (1.08)	5.81	5.81 (1.00)
$N_{80\%}$	12.77	13.08 (1.02)	5.95	6.81 (1.14)
$N_{70\%}$	12.77	13.93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

Miner則による評価値



軸力比0.3

Miner則による評価値



軸力比0.6

実験値

実験値

# 鉄骨柱部材の疲労評価

実験結果(既往基整促の実験等)および解析結果を基にして、一定軸力時および変動軸力時の疲労評価式を提案。

## 【一定軸力が作用する柱の繰返し数 $cN_{90\%}$ 】

$${}_cN_{90\%} = C_0 \times R_e^{-1.466} \leq N_{90\%\_max} \quad (R_e \geq R_{e\_lim}) \quad (2.2-11)$$

ここで、

$C_0$ : 疲労係数

$$C_0 = 2.308 \times 10^{-3} \times \alpha \times (\lambda / \lambda_0)^2 \quad (2.2-12)$$

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

$\lambda$ : 細長比

$\lambda_0$ : 径高さ比 8.0 の場合の細長比

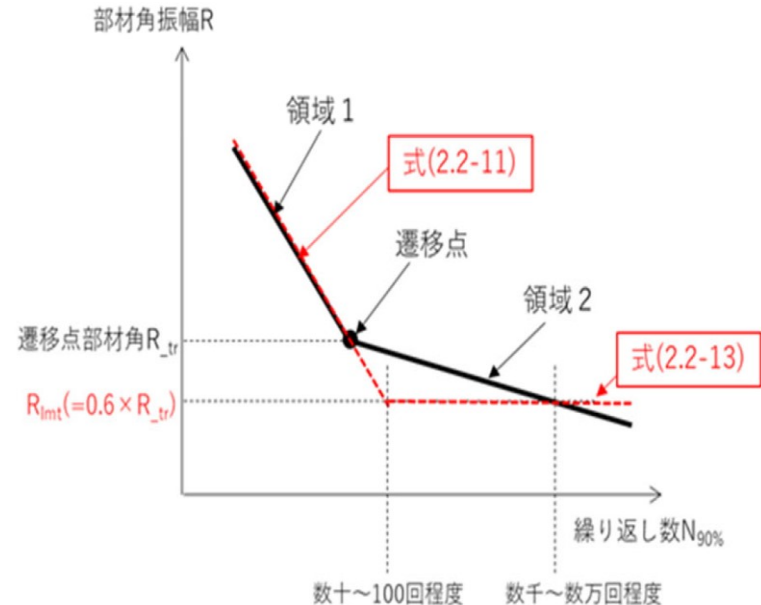
$R_e$ : 等価部材角 ( $= R / \mu_e$ )

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

$$R_{e\_lim} = 0.6 \times R_{e\_tr} \quad (2.2-13)$$

## 【変動軸力が作用する柱の繰返し数 ${}_vN_{90\%}$ 】

$${}_vN_{90\%} = \gamma \times {}_cN_{90\%}(n=n_1) \leq {}_cN_{90\%}(n=n_0) \quad (2.2-24)$$



## 評価式の概要(一定軸力)

## 実験結果のまとめ(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。

- ①一定軸力では、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。
- ②変動軸力での変形性能は、最大軸力を一定軸力とする場合の変形性能よりも大きく、長期軸力を一定軸力とする場合の変形性能よりも小さくなる。
- ③一定軸力下の変動変位振幅での変形性能は、一定軸力で得られた性能曲線を基にして、Miner則により評価できる。
- ④実験および解析結果を基に、一定軸力時および変動軸力時の疲労評価式を提案。

## 【 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、CFT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。

- CFT柱部材の多数回繰り返し実験の実施  
: 変動軸力における構造型状確認
- CFT柱部材の疲労評価

本年度は、**変動軸力に関するCFT柱部材の多数回繰り返し実験**を鉄骨柱実験と同様な装置にて実施し、

### ・**変動軸力下での多数回繰り返し特性**

を把握する。更に、JSSC委員会および本基整促S29で得られた実験データを基に**CFT柱部材の疲労評価**を行う。

# 実験概要

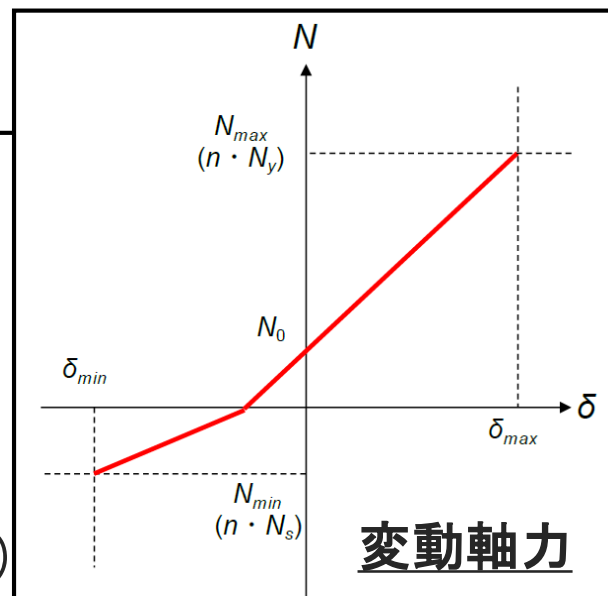
## ■試験体

□-150 × 150 (BCR295、Fc60) : 5体

## ■実験パラメータ

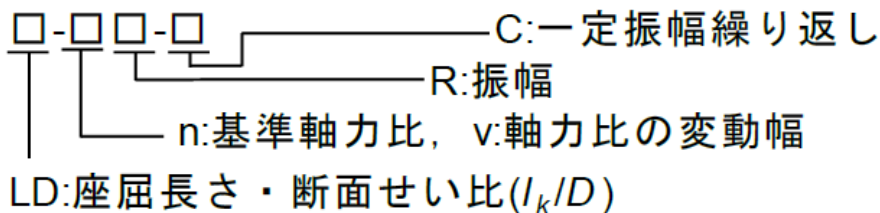
【部材因子】 幅厚比，径高さ比は固定

【外力因子】 軸力比(変動)，振幅(一定)

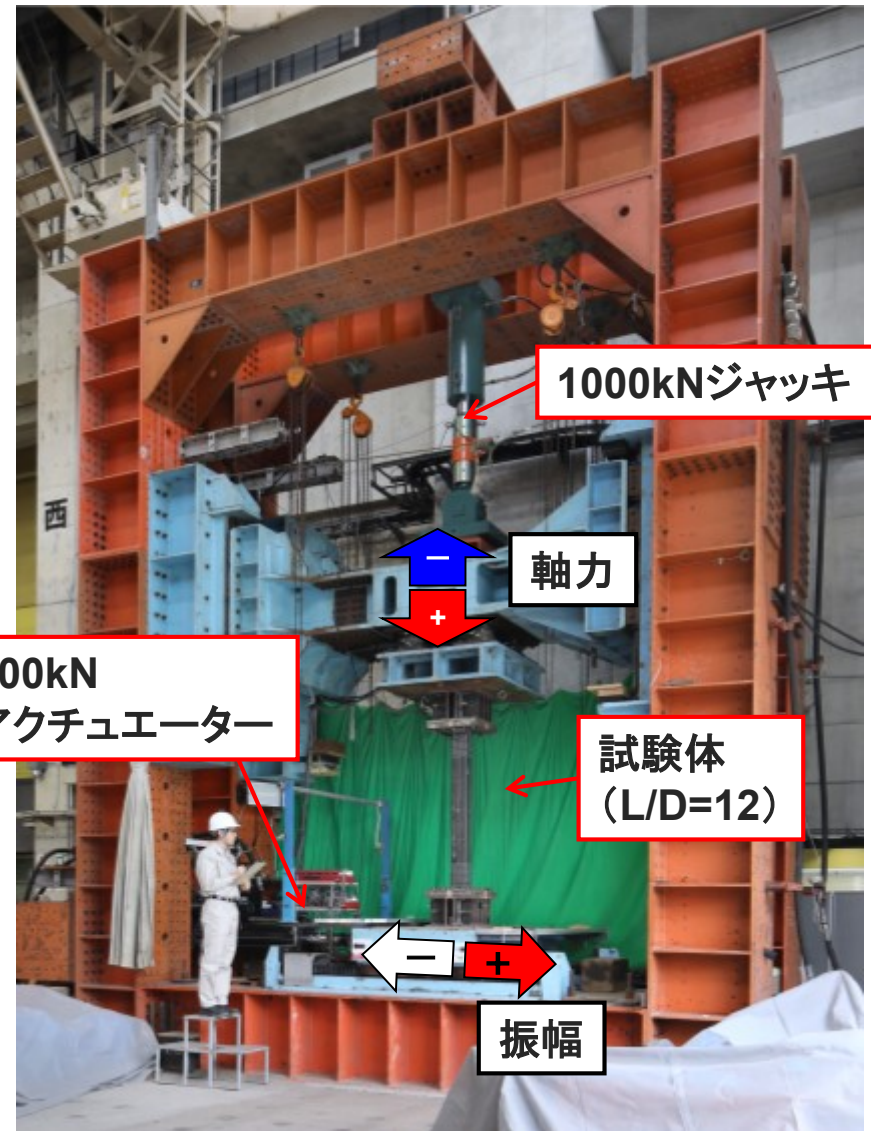
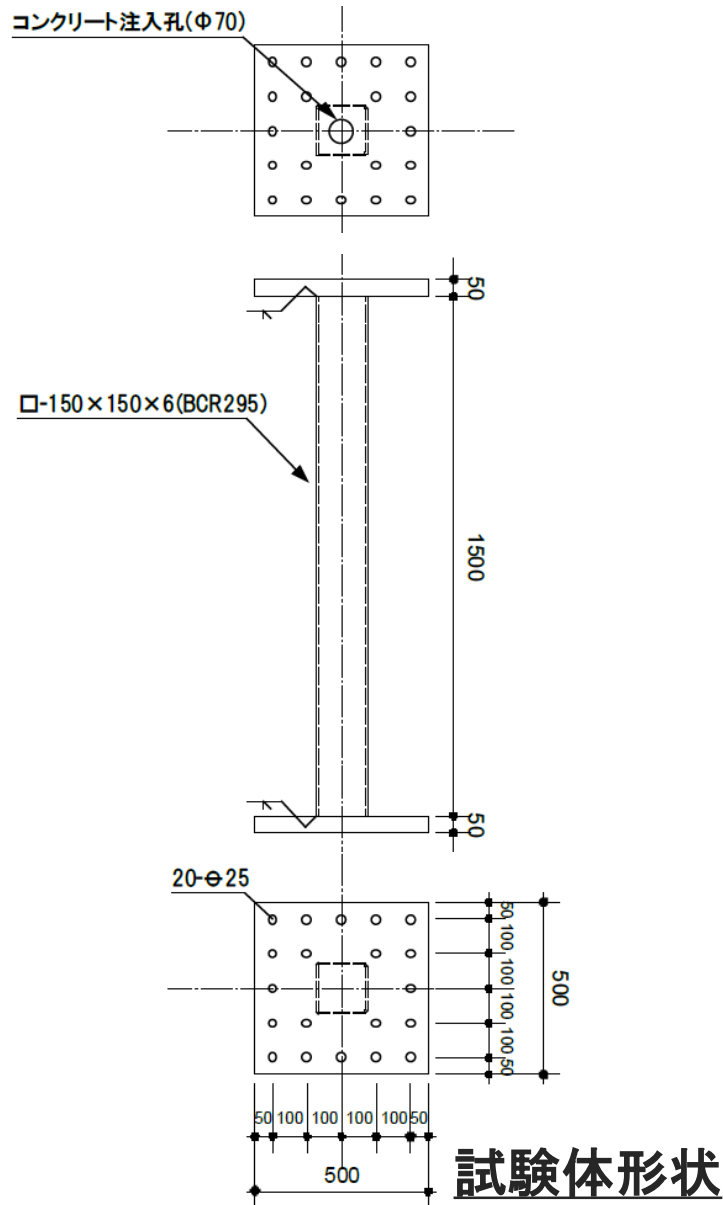


No.	試験体名	幅厚比 $D/t$	径高さ比 $L_k/D$	軸力比 $n$		振幅 $R$ [rad]	
1	LD10-n15v35R1-C	25	10	変動	$0.15 \pm 0.35$	一定	0.01
2	LD10-n15v35R15-C						0.015
3	LD10-n30v30R05-C						0.005
4	LD10-n30v30R08-C						0.008
5	LD10-n30v40R05-C						0.005

※試験体名称



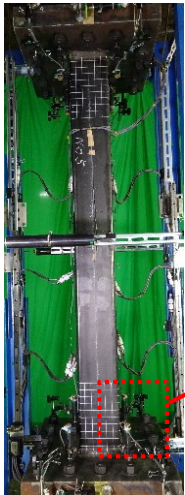
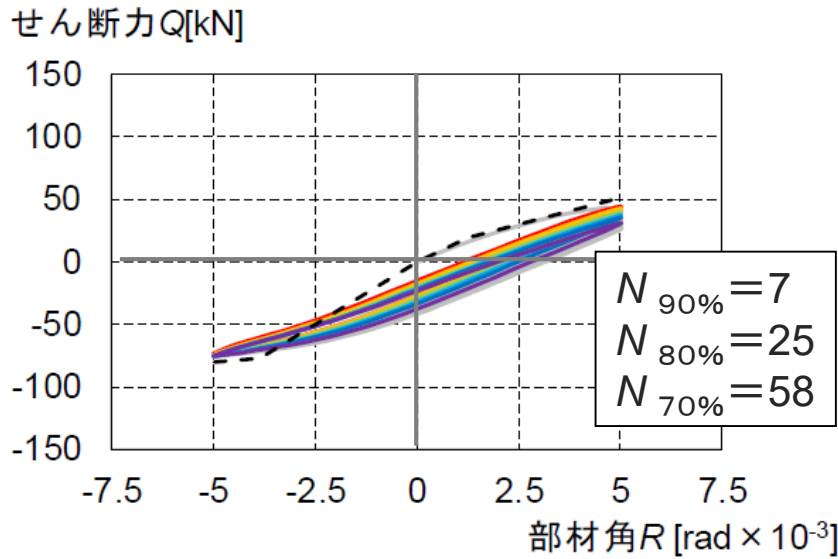
# 試験体形状と加力状況



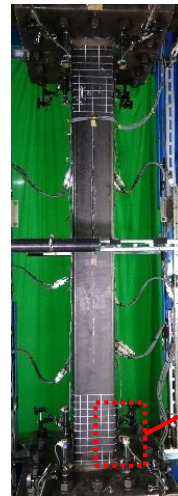
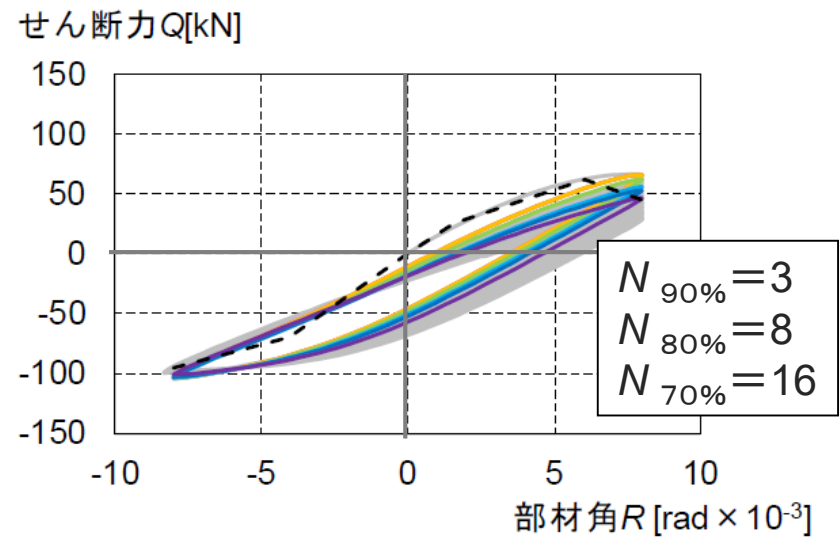
加力状況

# 実験結果(変動軸力 $n=0.3 \pm 0.3$ )

振幅  $R=1/200$

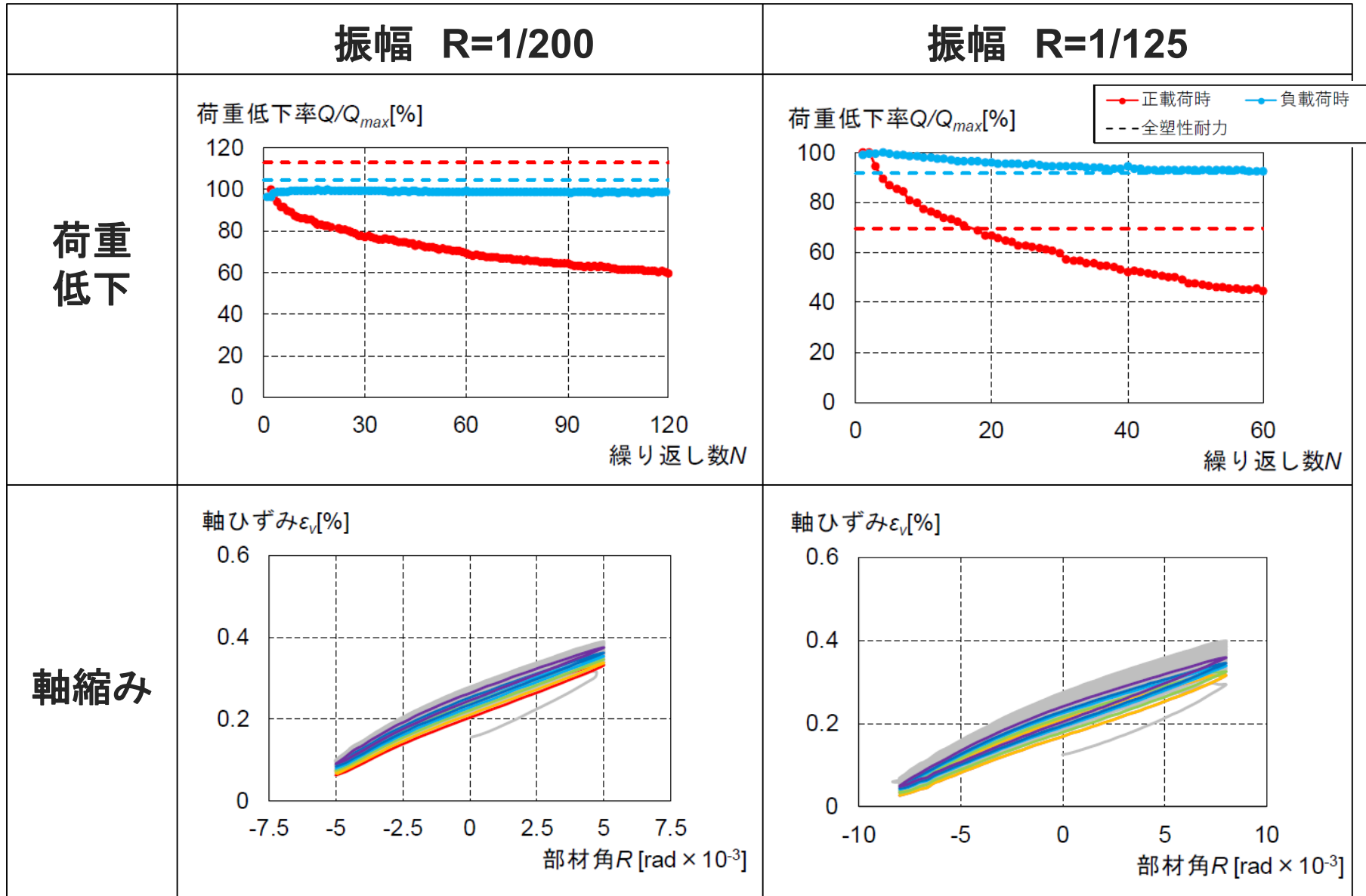


振幅  $R=1/125$



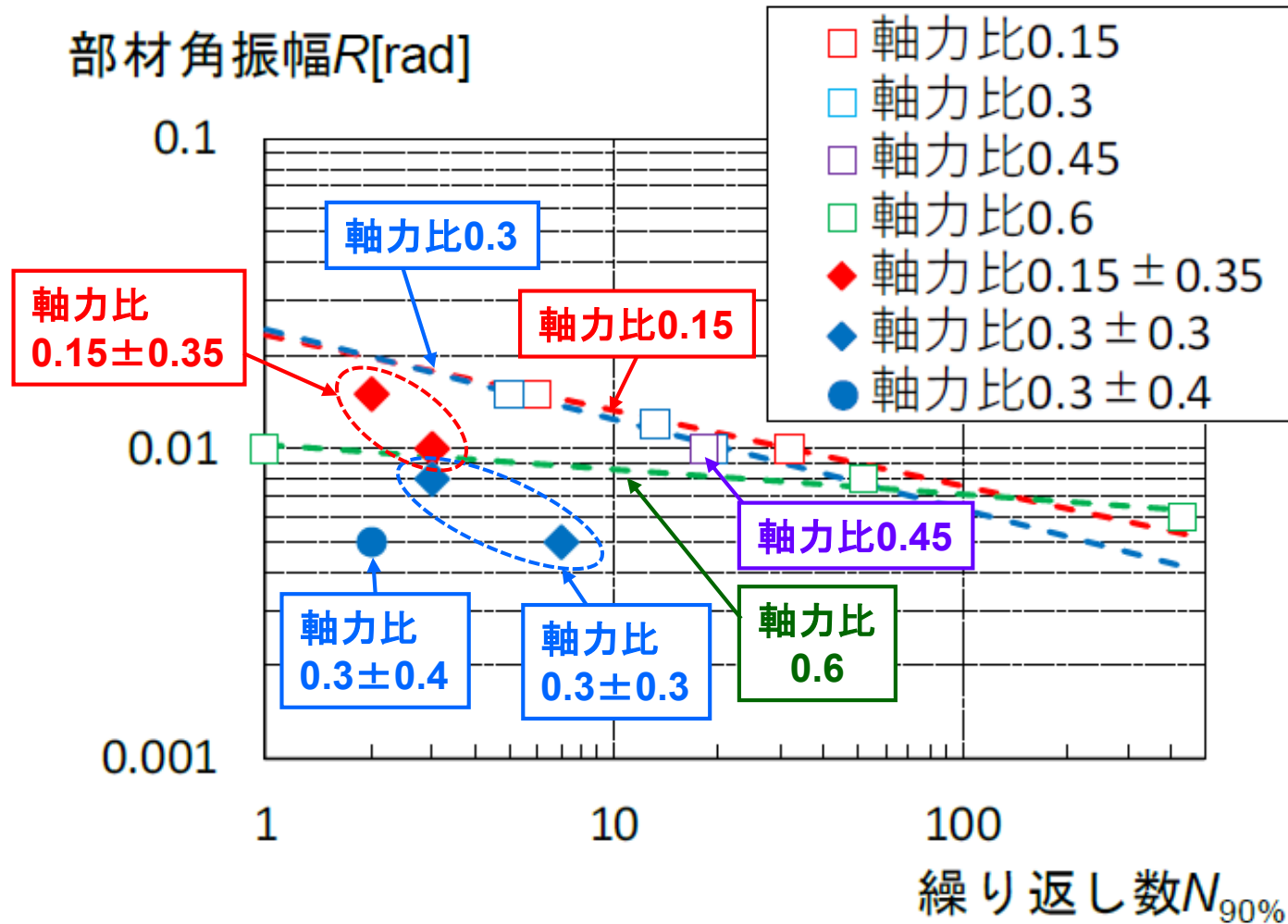


# 実験結果(荷重低下・軸縮み: $n=0.3 \pm 0.3$ )



# 実験結果(性能曲線の比較)

変動軸力の場合には、基準軸力を一定軸力を受ける場合と比較して、変形性能は小さくなる。



# CFT柱部材の疲労評価

実験結果 (JSSC委員会、基整促の実験等) を基にして、一定軸力時および変動軸力時の疲労評価式を提案。

⇒ 変動軸力の場合は、引張・圧縮の両振幅として評価。

[変動軸力変化が小さい場合 (中柱)]

$$N = \alpha \cdot 710.6 R^{-3.152} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (p_{max} \leq 0.3)$$

$$N = \alpha \cdot 3.396 R^{-3.152} \cdot p_{max}^{-4.564} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (0.3 < p_{max}) \quad (2.3-1)$$

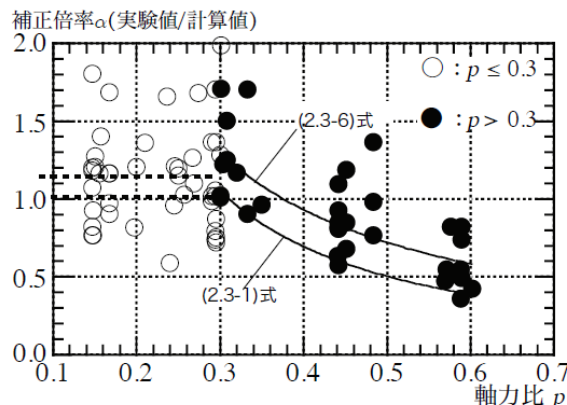
[変動軸力変化が大きい場合 (側柱)]

$$N = \alpha \cdot 1.666 (R \cdot r_p)^{1.696} \cdot \left\{ 710.6 R^{-3.152} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \right\}$$

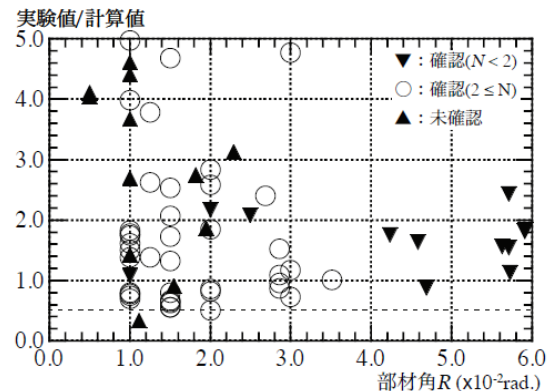
$$= \alpha \cdot 1184 R^{-1.456} \cdot r_p^{1.696} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (p_{max} \leq 0.3)$$

$$N = \alpha \cdot 1.666 (R \cdot r_p)^{1.696} \cdot \left\{ 3.396 R^{-3.152} \cdot p_{max}^{-4.564} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \right\}$$

$$= \alpha \cdot 5.658 R^{-1.456} \cdot p_{max}^{-4.564} \cdot r_p^{1.696} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (0.3 < p_{max}) \quad (2.3-2)$$



補正倍率αと軸力比pの関係



繰返し回数と実験／計算の比較

## 実験結果のまとめ(CFT柱WG)

軸力比を変動させた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 変動軸力の大きさに依らず、最大圧縮軸力側では早期にせん断力が低下するが、最小軸力側(引張軸力を含む)では低下は小さい。
- ② 圧縮側でせん断力が低下した場合でも軸力は保持される。
- ③ 圧縮側のせん断力低下は、内部コンクリートの劣化が要因と考えられる。
- ④ 実験結果を基に、一定軸力時および変動軸力時の疲労評価式を提案。

## 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新たな判定基準による耐震安全性検証法の提案, ②柱部材(鉄骨、CFT)の疲労評価式の提案を行うことを目的として, 下記知見を得た。

**【解析WG】** 入力地震動の大きさを変化させ, 6種類の建物モデルの応答解析を実施し, 余力を確保するための層間変形角クライテリア, 柱の損傷評価法, 耐震安全性評価フローを提案。

**【鉄骨柱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を行い, 多数回繰り返し性能を把握。実験および解析結果を基に, 一定軸力時および変動軸力時の疲労評価式を提案。

**【CFT柱WG】** 軸力比を変動させたCFT柱部材の多数回繰り返し実験を行い, 変動軸力下での多数回繰り返し性能を把握。実験結果を基にして, 一定軸力時および変動軸力時の疲労評価式を提案。

おわり