

平成25年度建築基準整備促進事業

S10 長周期地震動に対するCFT造柱部材等の 安全性検証方法に関する検討

事業報告

2014年4月10日

株式会社 竹中工務店

大成建設株式会社

株式会社 小堀鐸二研究所

株式会社 大林組

鹿島建設株式会社

清水建設株式会社

1. 本検討の背景

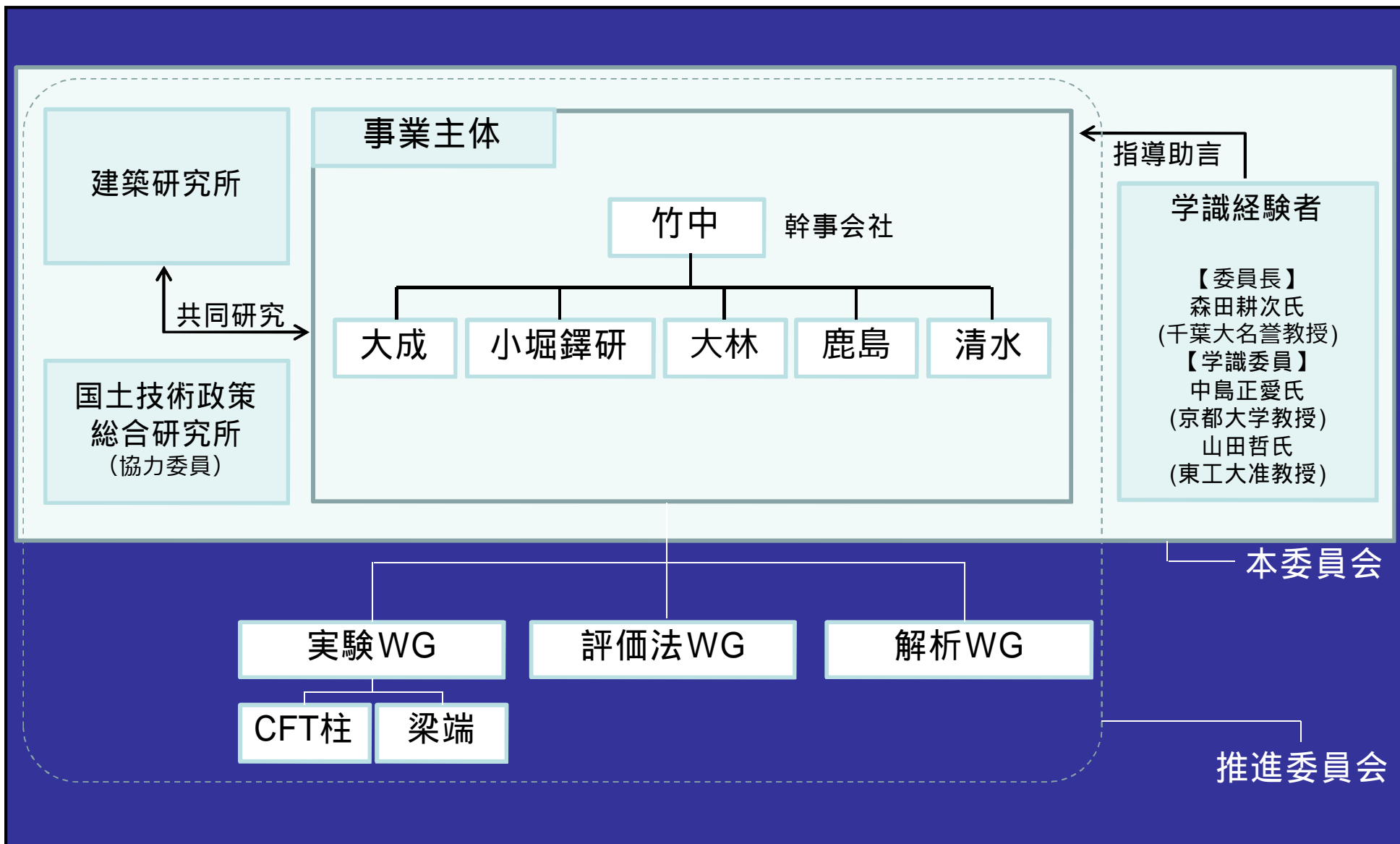
長周期地震動入力時には、骨組を構成する部材は多数回の繰り返し変形を受けるが、繰り返し数が部材および接合部に及ぼす影響については不明な点が多い。

- ・平成22年度～24年度に「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」において、多数回繰り返し荷重を受ける鉄骨造建築物の構造実験を実施した。
部材、接合部、架構の限界性能を把握。
- ・（イ）多数回繰り返し荷重を受けるCFT柱部材、柱梁接合部等の構造実験の実施
CFT柱部材、柱梁接合部等の限界性能を把握。

建物の構造特性は、架構形式による違いが大きいため、応答解析により長周期地震動を受ける場合の耐震性能を検討する必要あり。

- ・平成22年度～24年度に「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」において、長周期地震動に対する鉄骨造の応答評価を実施
- ・（ロ）CFT柱を有する超高層建物の応答評価の実施

2. 実施体制



3.CFT柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (600N級鋼+Fc100試験体)

実験目的 高強度鋼を用いたCFT柱部材について、角形断面とし、幅厚比、径長比、軸力比および変位振幅をパラメータとした載荷実験を実施し、定振幅繰返し変位履歴下における多数回繰返し特性を把握する。試験体数計17体。

表1 試験体一覧

試験体名	材質			形状		加力形式			構造種別			
	鋼管 鋼種	コンクリート		鋼管形状 (幅厚比B/t)	L (径長比L/D)	加力 方向	N/N ₀	q _h (/1000rad)	ANUHT	AIJ		
		強度 (N/mm ²)	ヤング率 (× 10 ⁴ N/mm ²)									
HH-14M-C	CK-BESTEN 590Y	104	4.39	-280x280x14 (20)	2240 (8)	0°	0.3	漸増	A			
HH-14M-C1		104	4.39					10				
HH-14M-C2		109	4.55					15				
HH-14M-C3		109	4.55					20				
HH-14M-CH1		103	4.34				0.6	10	C	B		
HH-14M-V0		111	4.67				0.0~0.6	6	C	B		
HH-14M-V1		111	4.67					10				
HH-14M-V2		110	4.26					15				
HH-14M-VL1		105	4.41				0.15~0.45	10	B	A		
HH-14M-VL2		102	4.34					15				
HH-14MU-V1		105	4.31				3360 (12)	0°	0.0~0.6	10	C	
HH-14MU-V2		105	4.31				4200 (15)	0°	0.0~0.6	15		
HH-14L-V1		105	4.24							10	C	
HH-9M-V0		103	4.38							-280x280x9 (31)	2240 (8)	0°
HH-9M-V1		103	4.05				-280x280x14 (20)	2240 (8)	45°	0.0~0.6	10	
HH-14M-VOD		103	4.38								6	C
LH-9M-V1		SN400B	105				4.41	-280x280x9 (31)	2240 (8)	0°	0.0~0.6	10

表2 鋼材の機械的性質

鋼種	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 (%)	備考
CK- BESTEN 590Y	9	8.9	445	678	65.6	19.6	HH-9M-V0
	9	8.7	445	656	67.9	20.8	HH-9M-V1
	14	13.7	495	679	72.9	20.1	
SN400B	9	8.9	311	440	70.7	31.0	

3.CFT柱部材の多数回繰返し載荷実験 (600N級鋼+Fc100試験体)

載荷計画

軸力を考慮した曲げせん断加力装置, 定変位振幅繰返し載荷 (一部漸増変位振幅) および軸力載荷方法 (定軸力載荷と変動軸力載荷)

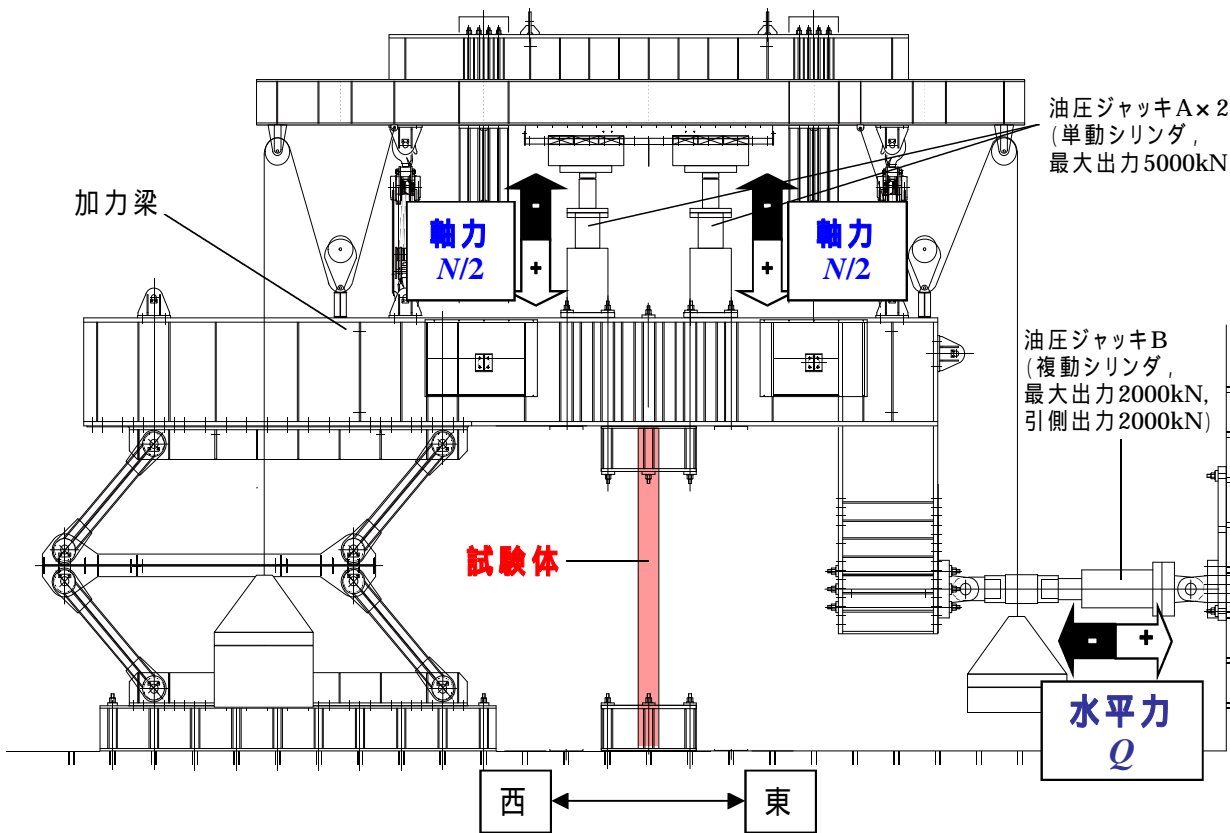


図1 載荷装置

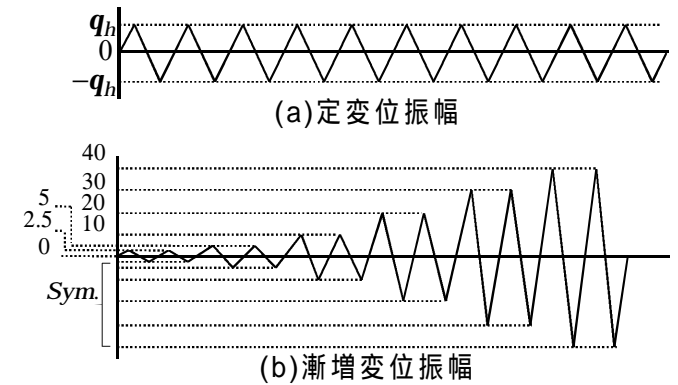


図2 載荷履歴

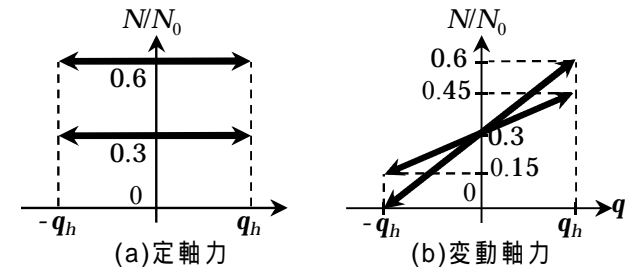


図3 軸力載荷方法

3.CFT柱部材の多数回繰り返し载荷実験 (600N級鋼+Fc100試験体)

実験結果 荷重変形関係, ピーク荷重推移および軸縮み量推移。

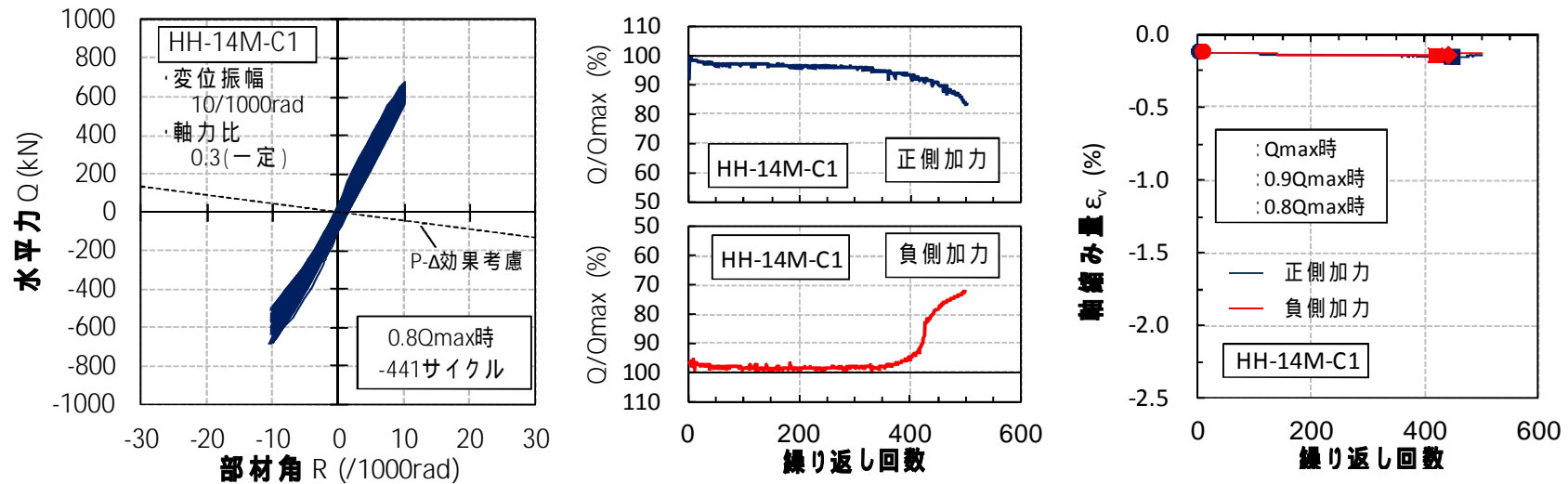


図1 試験体HH-14M-C1の結果

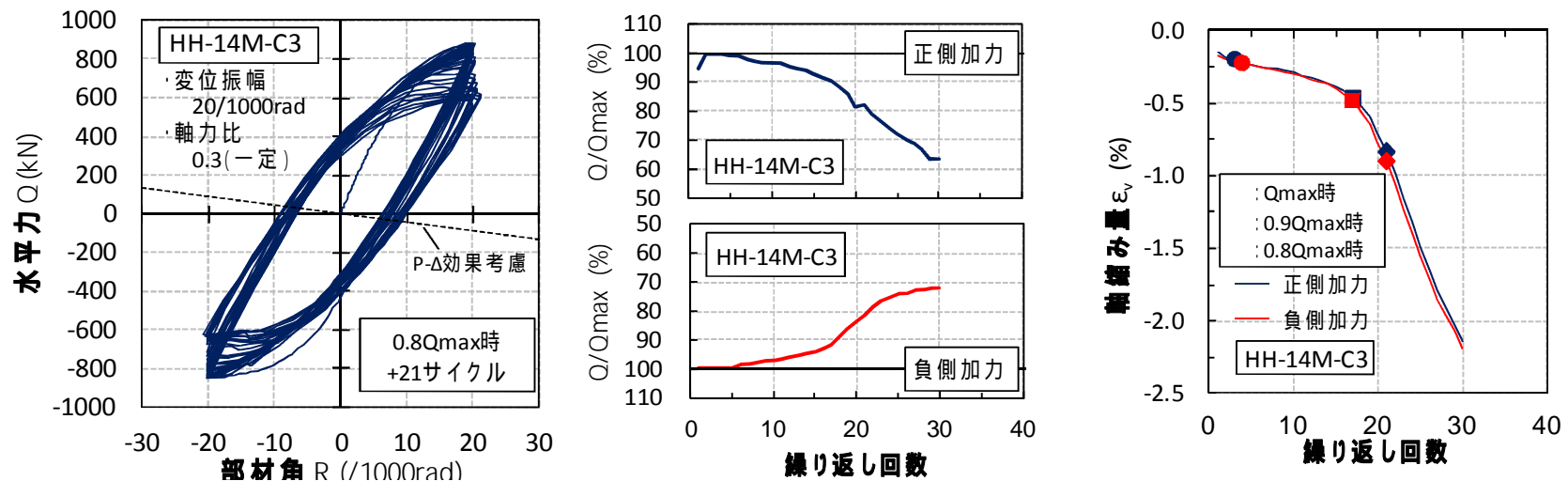


図2 試験体HH-14M-C3の結果

3.CFT柱部材の多数回繰返し载荷実験 (600N級鋼+Fc100試験体)

実験結果 (多数回繰返し特性) および実験1のまとめ

- ・部材角Rと0.8Qmax時繰返し数 $N_{80\%}$ の関係を作成
- ・部材角が大きいほど繰返し回数が低下
- ・異なる破壊形式: 仕口破断, 局部座屈, 充填コンクリート損傷
- ・仕口部破断 60回 ~ 450回程度
- ・局部座屈または充填コンクリート損傷 200回以下

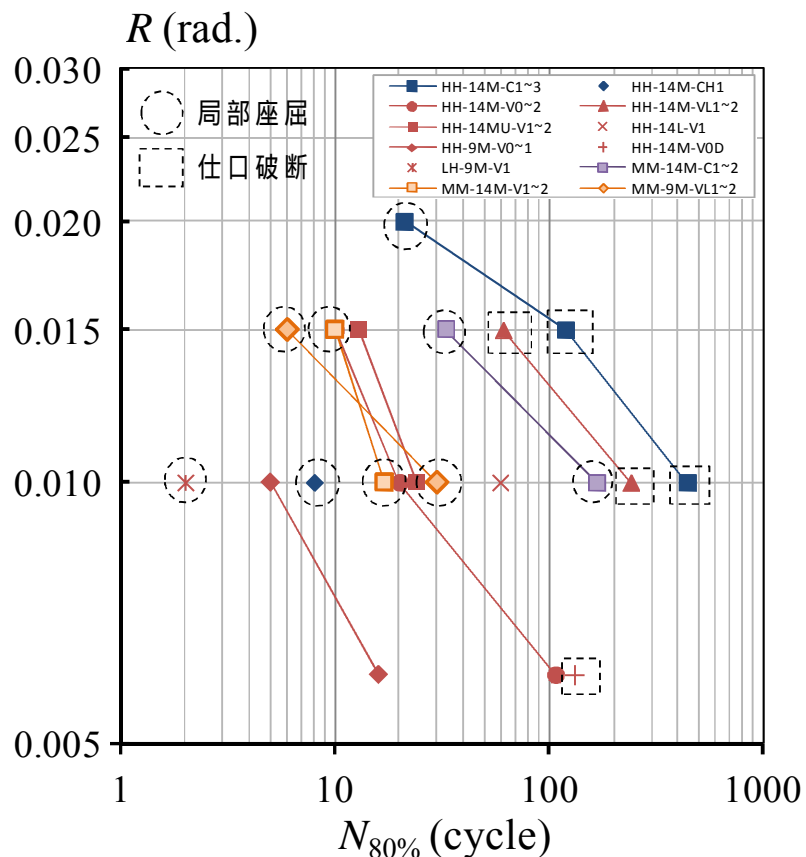


写真1 仕口破断 (HH-14M-C1)



写真1 局部座屈 (HH-14M-C3)

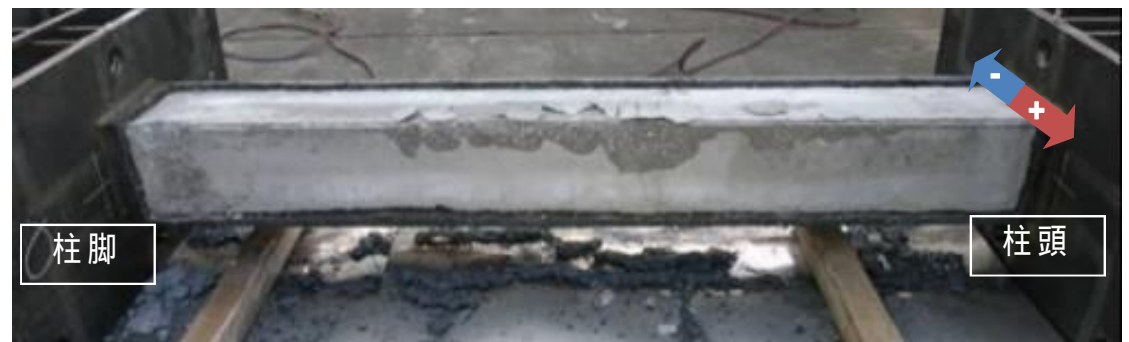


写真3 充填コンクリート損傷 (HH-14M-V1)

4. CFT柱部材の多数回繰り返し载荷実験 (490N級鋼+Fc60試験体)

実験概要

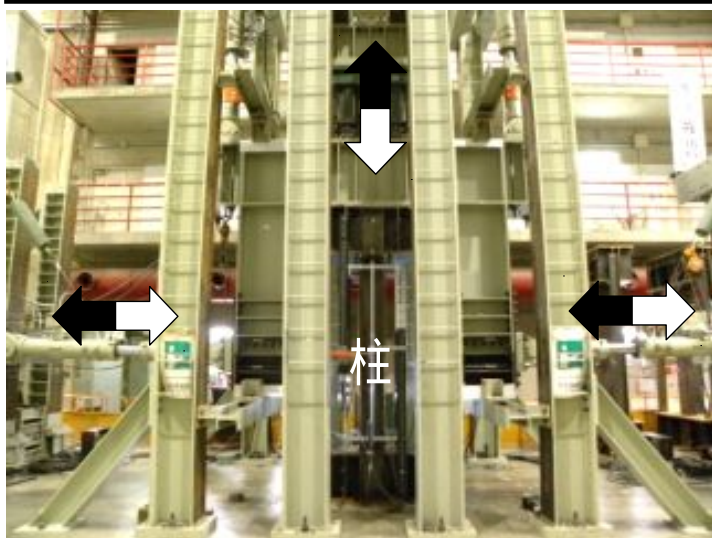
- ・SN490BとFc60を用いたCFT柱の繰り返し载荷
- ・柱断面 -280×280×14or9 (B/t=20 or 31)
- ・柱長さ 2240mm (L/D=8)
- ・試験体数 7体
- ・実験方法

定常振幅正負交番载荷 :

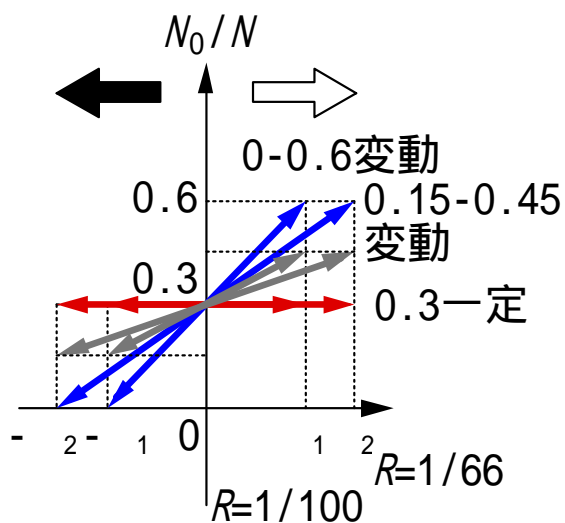
層間変形角 (R= 1/100, 1/66の2種)

導入軸力 :

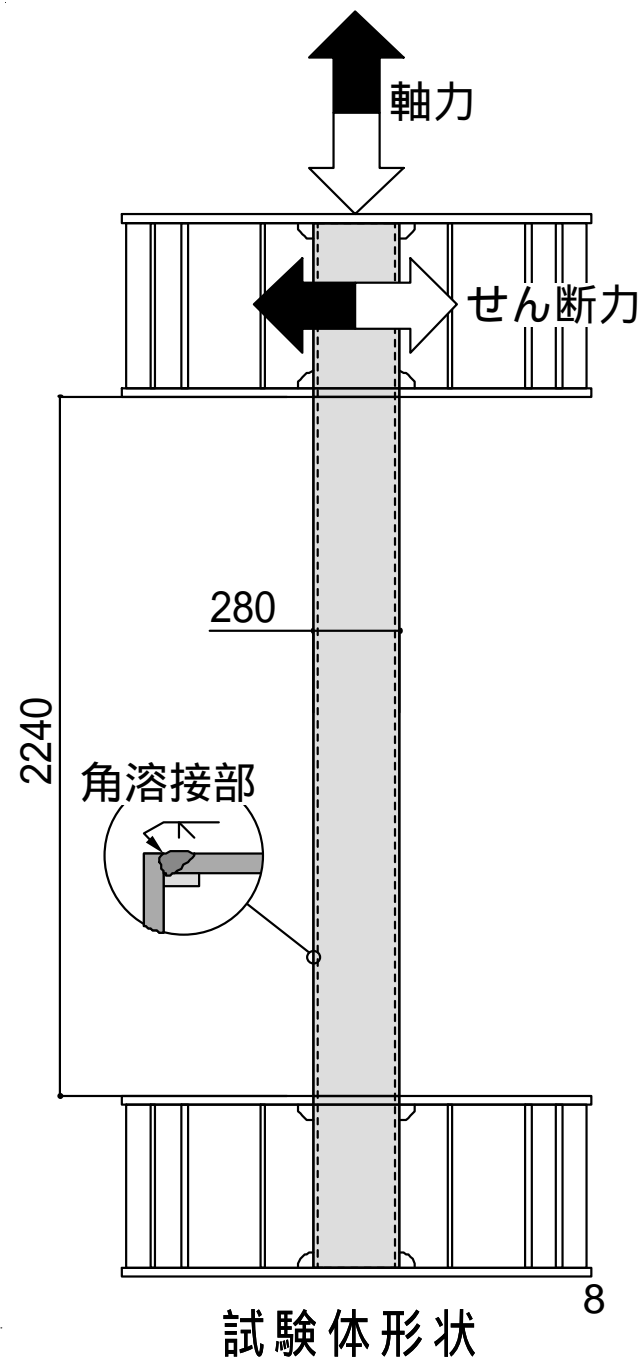
0.3一定, 0-0.6変動, 0.15-0.45変動



加力状況



変動軸力



試験体形状

4. CFT柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (490N級鋼+Fc60試験体)

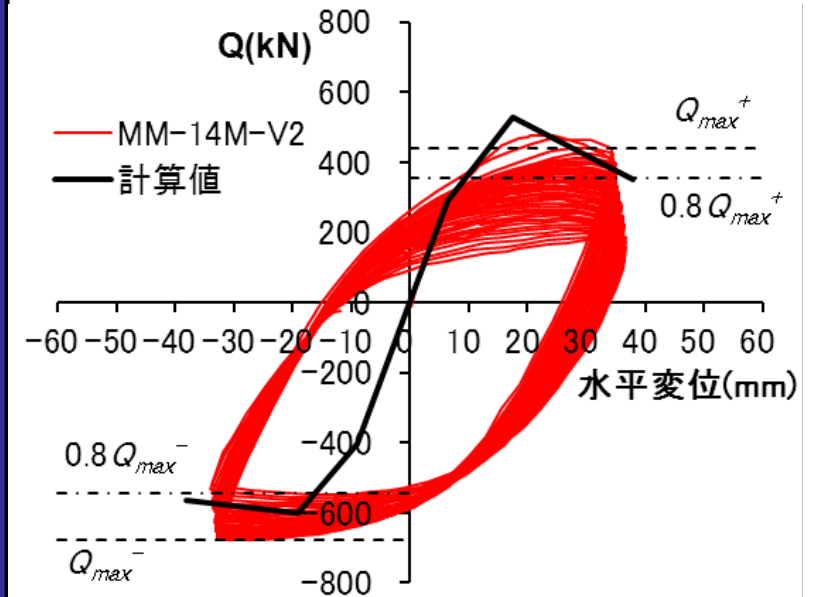
実験結果

(1) 最終破壊状況 :

- ・鋼材の局部座屈による面外変形
- ・充填コンクリートの圧縮破壊
- ・引張側フランジの亀裂

(2) 荷重 変位関係

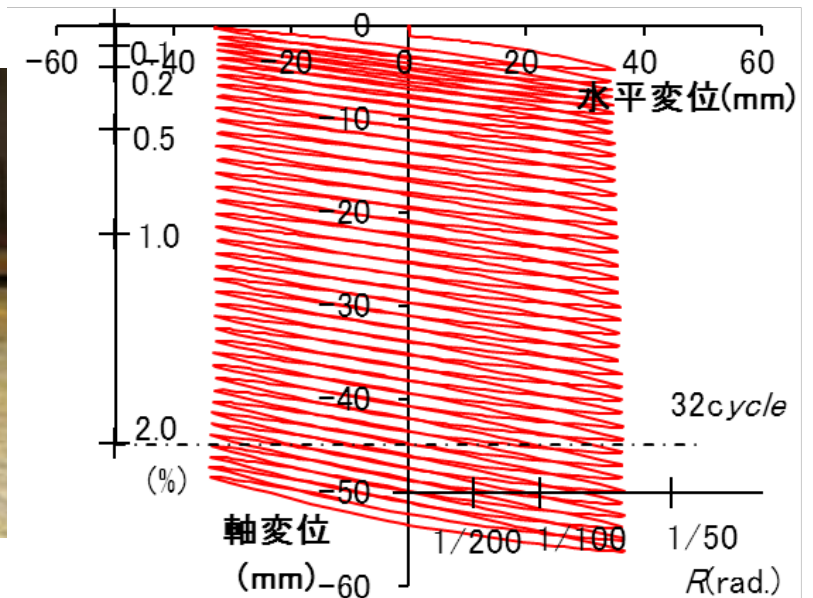
- ・安定した紡錘形の履歴性状
- ・局部座屈の進行とともに荷重が低下



荷重 - 変位関係



最終破壊状況 (B/t=20, 0-0.6変動軸力の試験体)



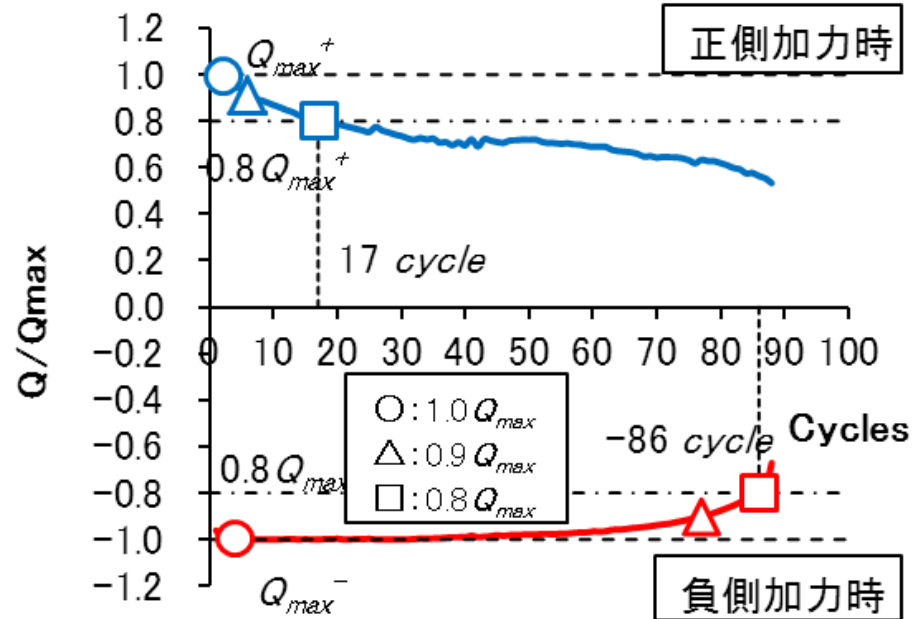
水平変位 - 軸縮関係

4. CFT柱部材の多数回繰り返し载荷実験 (490N級鋼+Fc60試験体)

変位振幅と繰り返し回数との関係

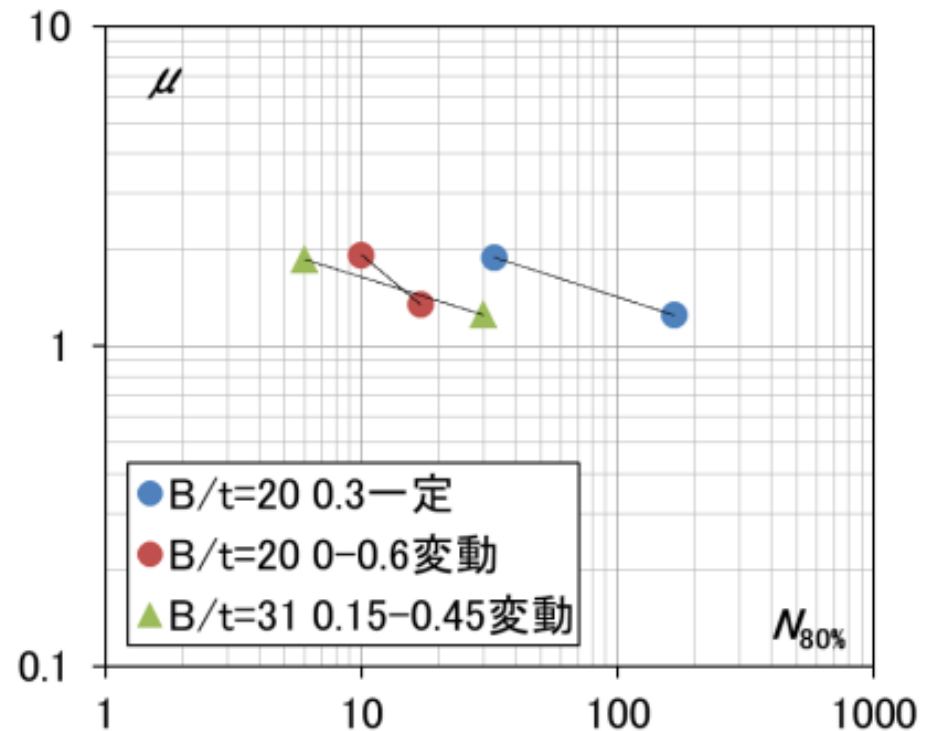
変位振幅と最大ピーク荷重に対し90%,80%到達時の繰り返し回数の関係を確認

- ・軸力比が高いほど荷重低下の進行が大きい
- ・変位振幅が大きいほど荷重低下の進行が大きい
- ・鋼管幅厚比が大きいほど荷重低下の進行が大きい



ピーク荷重の推移

($B/t=20$, $0-0.6$ 変動軸力の試験体)

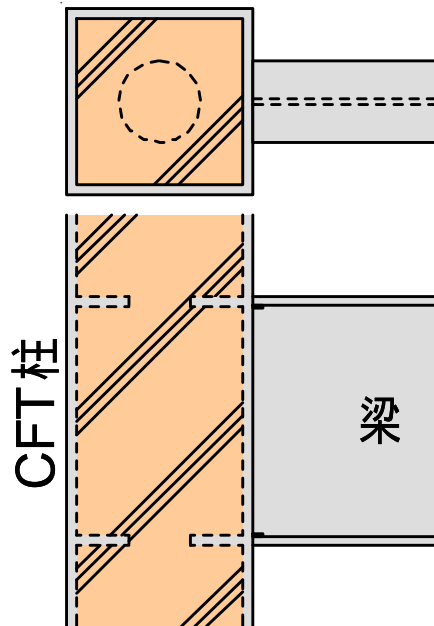


変位振幅 - 繰り返し回数関係

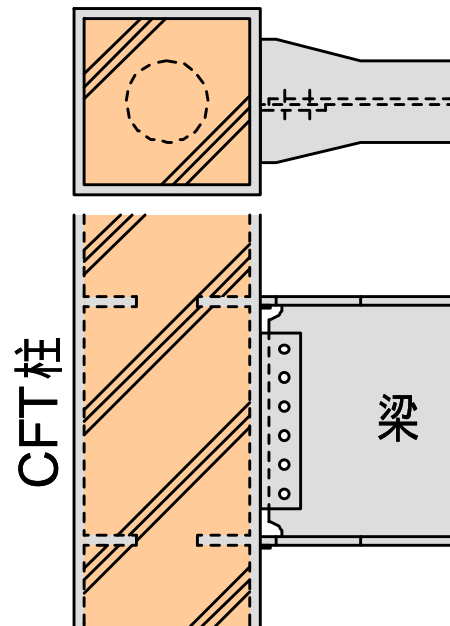
5. CFT柱・梁接合部梁端溶接部の構造実験

実験概要

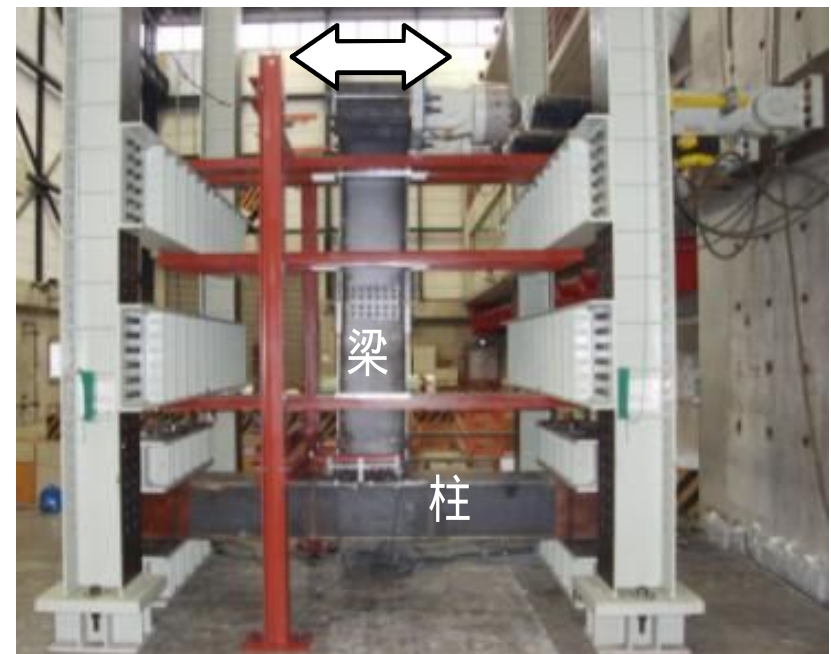
- ・ 現行のCFT柱・梁仕口における梁端溶接部を対象
変形性能(疲労寿命)と変位振幅の関係把握
【柱CFT】柱スキンプレートが比較的薄い場合の性能検討
- ・ 試験体(4体) : 梁 BH-600×200×12×19 (SN490B)
柱 -500×500×16×16 (SN490C+Fc60)
- ・ 仕口形状 : ノンスカラップ梁(工場溶接形式), 水平ハンチ梁(現場溶接形式)
- ・ 実験方法 : 定常振幅正負交番载荷, 梁の塑性率振幅 ($\mu = 2, 4$)



ノンスカラップ梁



水平ハンチ梁



実験状況

5. CFT柱・梁接合部梁端溶接部の構造実験

(1) 破壊性状

- ・いずれの試験体も、梁フランジが破断して破壊に至った
- ・起点は、フランジ端側面の溶接止端 あるいは スカラップ底
- ・振幅レベルの大きい試験体の梁端部には局部座屈発生

(2) 荷重 - 変形関係

- ・ピーク荷重は亀裂の進展にともない緩やかに低下。
- ・ピーク荷重が最大荷重から10%低下するまで、安定した履歴ループ。



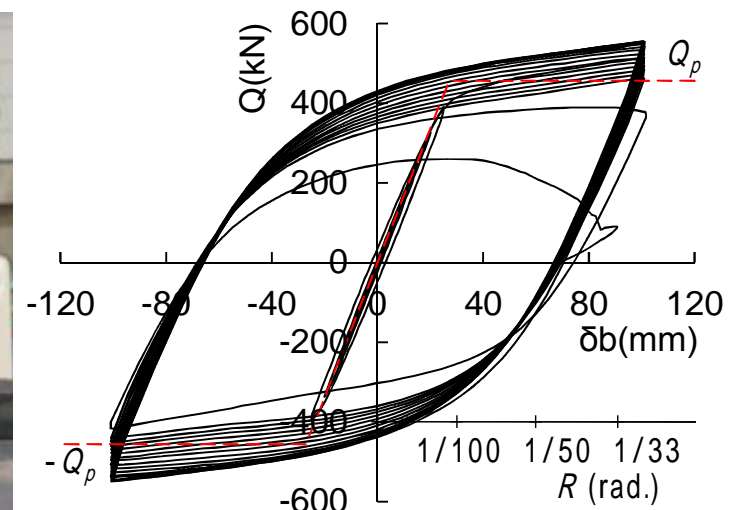
ノンスカラップ梁

最終破壊状況 (塑性率4)



水平ハンチ梁

最終破壊状況 (塑性率4)



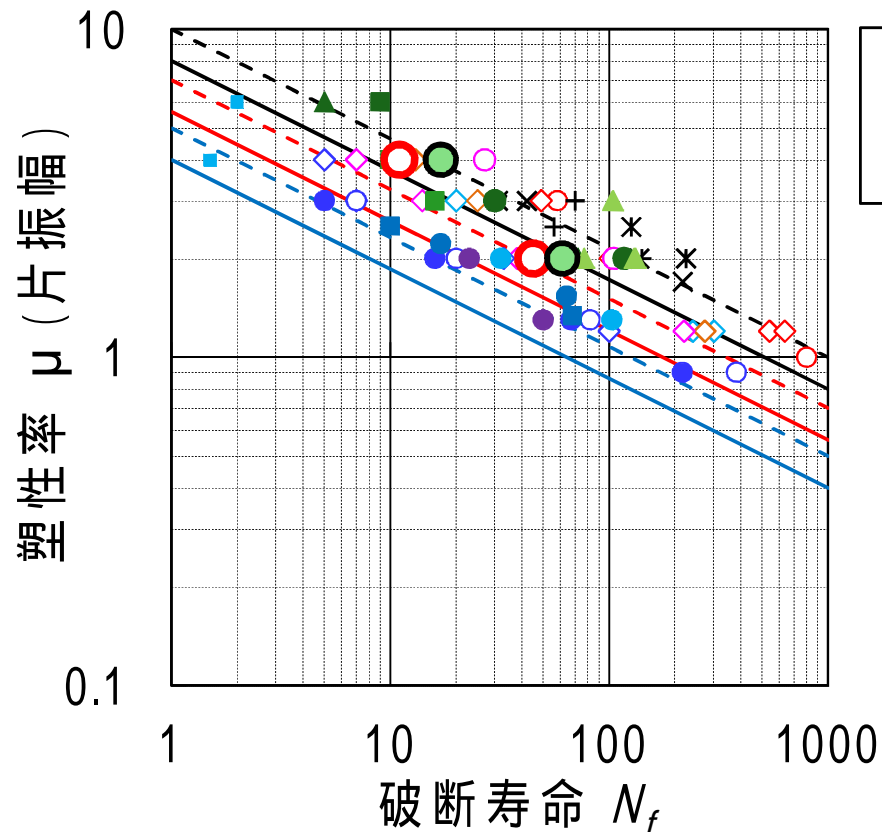
荷重 - 変形関係

(水平ハンチ梁, 塑性率4) 12

5. CFT柱・梁接合部梁端溶接部の構造実験

破断寿命の評価

- 1) 現場溶接形式の梁を水平ハンチで補強することで、その破断寿命は工場溶接形式におけるノスカラップ梁と同等以上に改善された。
- 2) 本実験の範囲において、CFT柱に接合する水平ハンチ梁・ノスカラップ梁の破断寿命は、基整促27-2で提案している疲労曲線のうち、【スカラップ無】に対応する実験式で安全側に評価できる。



● 水平ハンチ梁
○ ノスカラップ梁

$$\text{評価式 } \mu = C \cdot N_f^{-1/3}$$

— $C=4$ (スカラップ付 設計式)
 - - - $C=5$ (スカラップ付 実験式)
 — $C=5.6$ (スカラップ無 設計式)
 - - - $C=7$ (スカラップ無 実験式)
 — $C=8$ (高性能仕口 設計式)
 - - - $C=10$ (高性能仕口 実験式)

6. 長周期地震動に対するCFT柱を有する超高層建物の応答評価

目的 CFT柱を有する超高層建物の長周期地震動に対する地震応答解析により、部材の塑性化状況、変形繰返し頻度等を把握する。また、実験結果より得られた性能曲線を適用し、柱梁部材の損傷評価を試行する。

【使用材料】

充填コンクリート: $F_c48 \sim 60$

鉄骨: SN490 ~ HBL385

【部材断面】

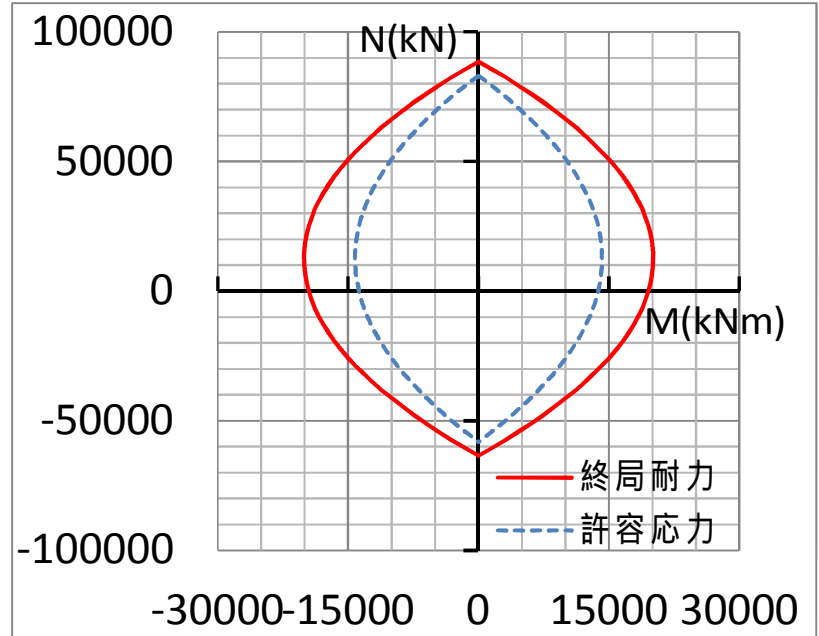
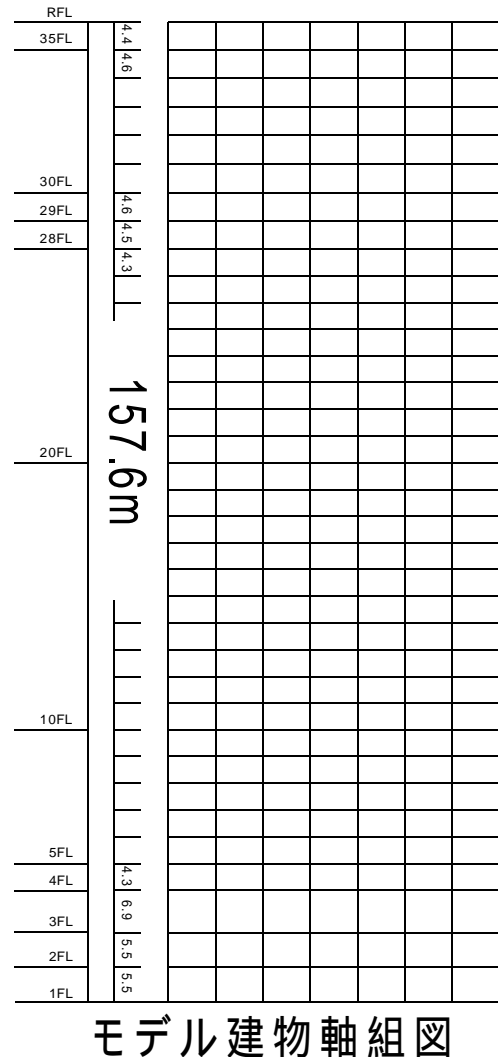
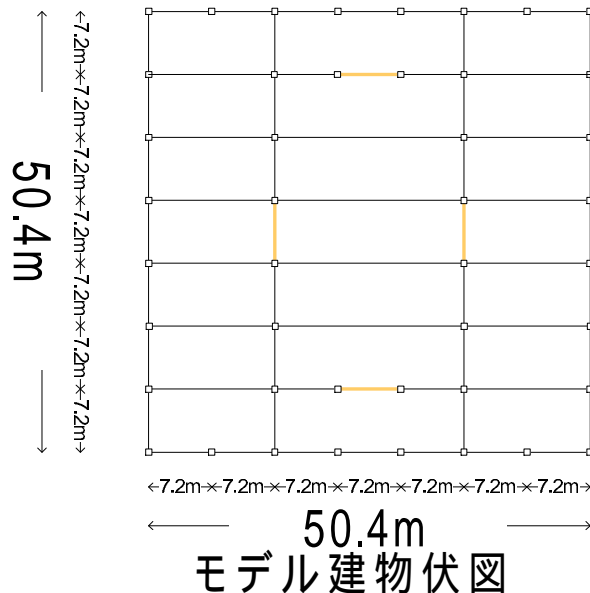
柱: $-600 \times 22 \sim -800 \times 50$

梁: H- $900 \times 250 \sim 400$ (一般階)

BH- $1200 \times 300 \sim 350$ (低層階)

【固有周期】

$T_1 = 4.27$ 秒

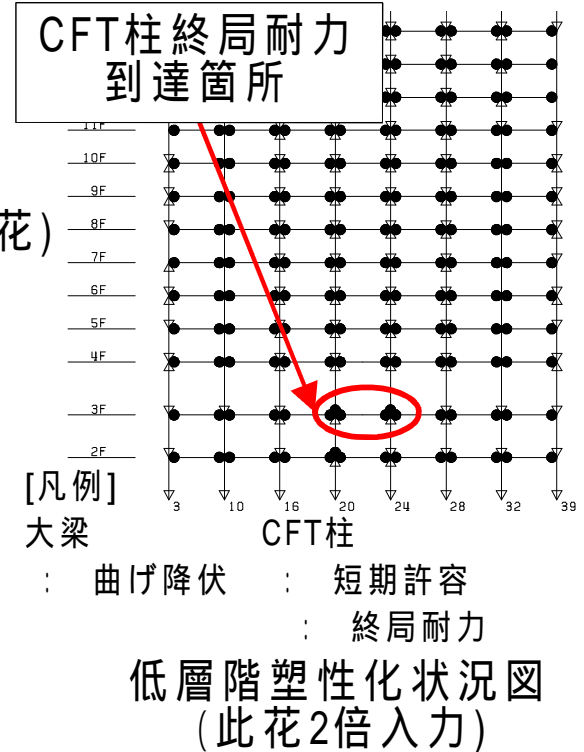
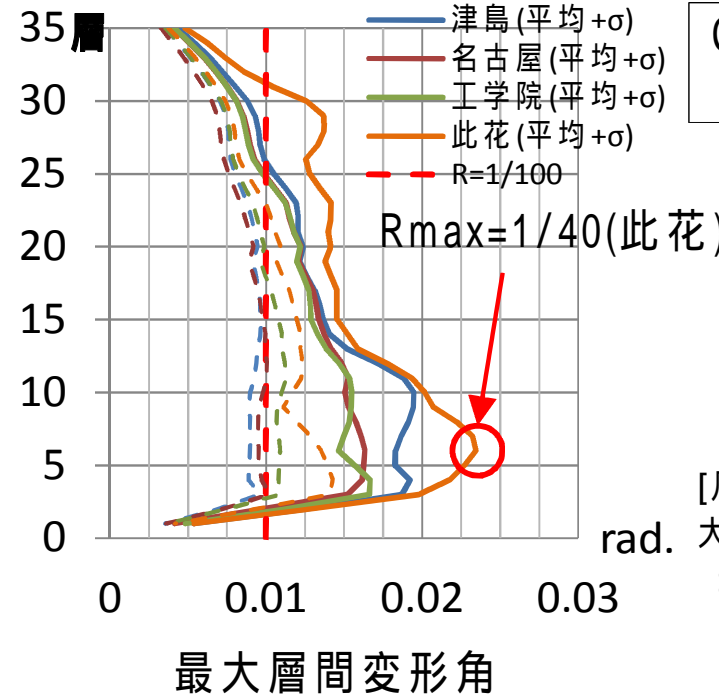
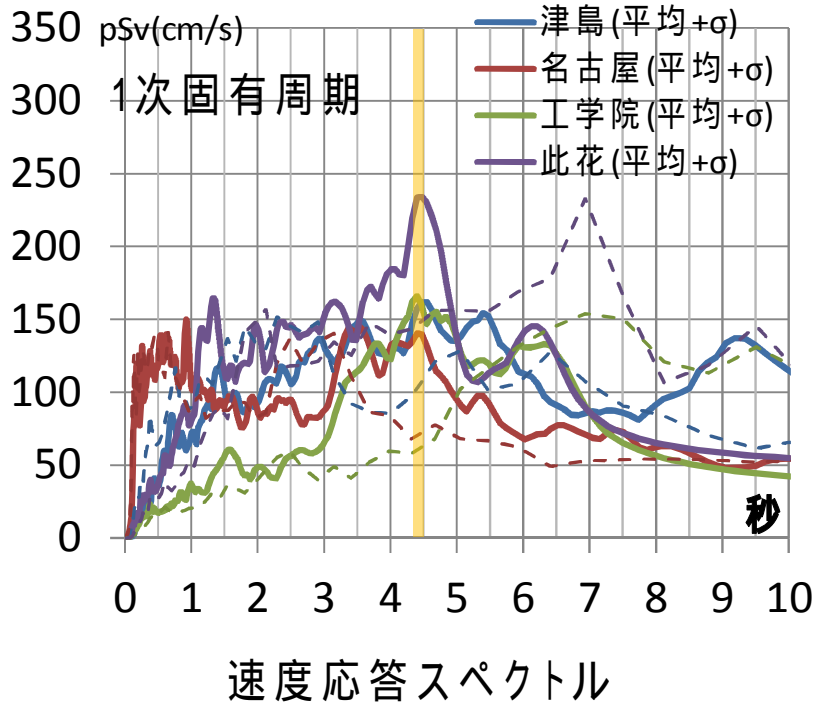


CFT柱 降伏曲面

- CFT柱**
- ・第一折れ点: 短期許容
 - ・第二折れ点: 終局耐力
- (各耐力は学会CFT指針により算出)
- ・M-N連成を考慮した降伏曲面

6. 長周期地震動に対するCFT柱を有する超高層建物の応答評価

地震応答解析



入力地震動

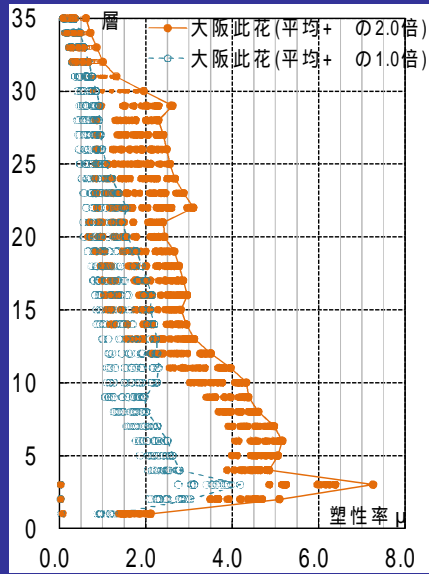
- 最悪の状態を想定し, 共振状態を再現
- 入力振幅 1.0倍, 2.0倍とする

部材の塑性化状況

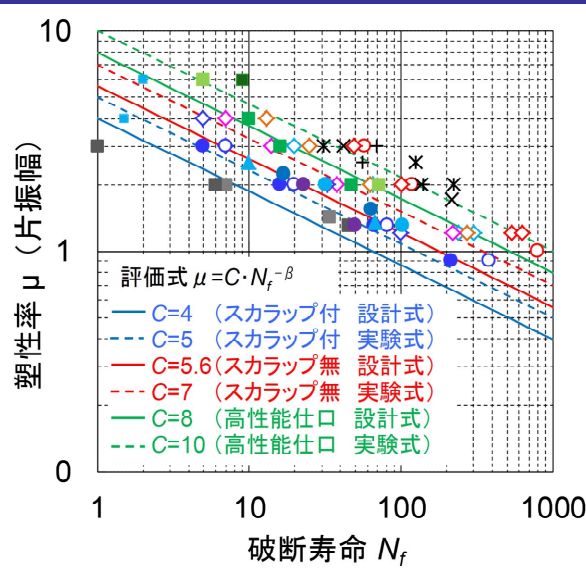
- 大梁... 上層数層以外ほぼ全梁端曲げ降伏
- CFT柱...
 - [1倍入力] 短期許容応力度超過のみ
 - [2倍入力] 3F柱脚一部 終局耐力に至る
- 大多数短期許容応力度超過

6. 長周期地震動に対するCFT柱を有する超高層建物の応答評価

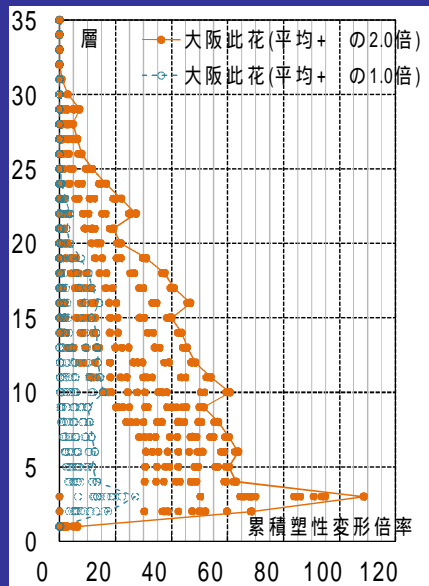
鉄骨大梁 損傷評価



塑性率分布



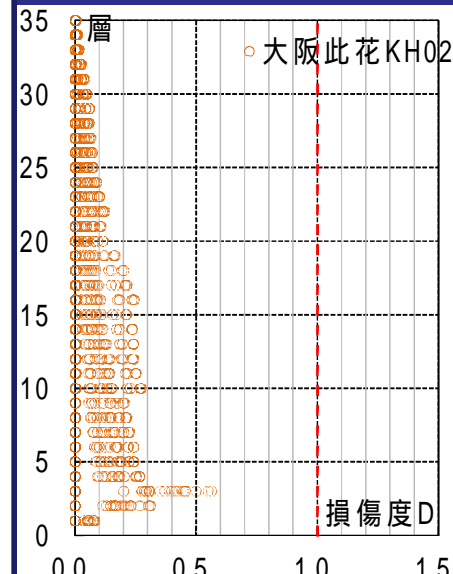
性能曲線



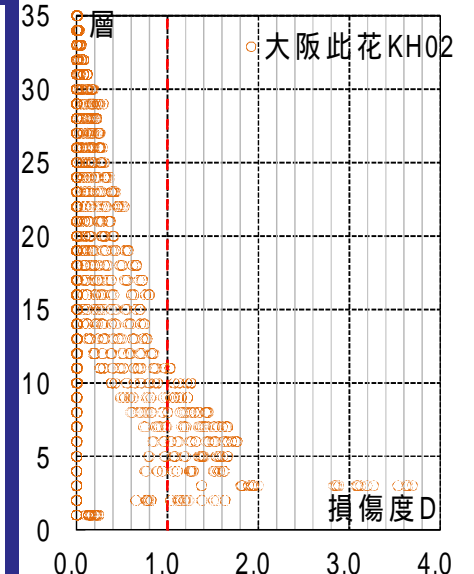
累積塑性変形倍率分布

評価手法

- 各部材変形時刻歴を用い, Miner則を仮定して損傷評価
- $\mu = C \cdot N_f^{-\beta}$
C=5.6 (スカラップ無)
 $\beta=1/3$



損傷度D(1.0倍入力)



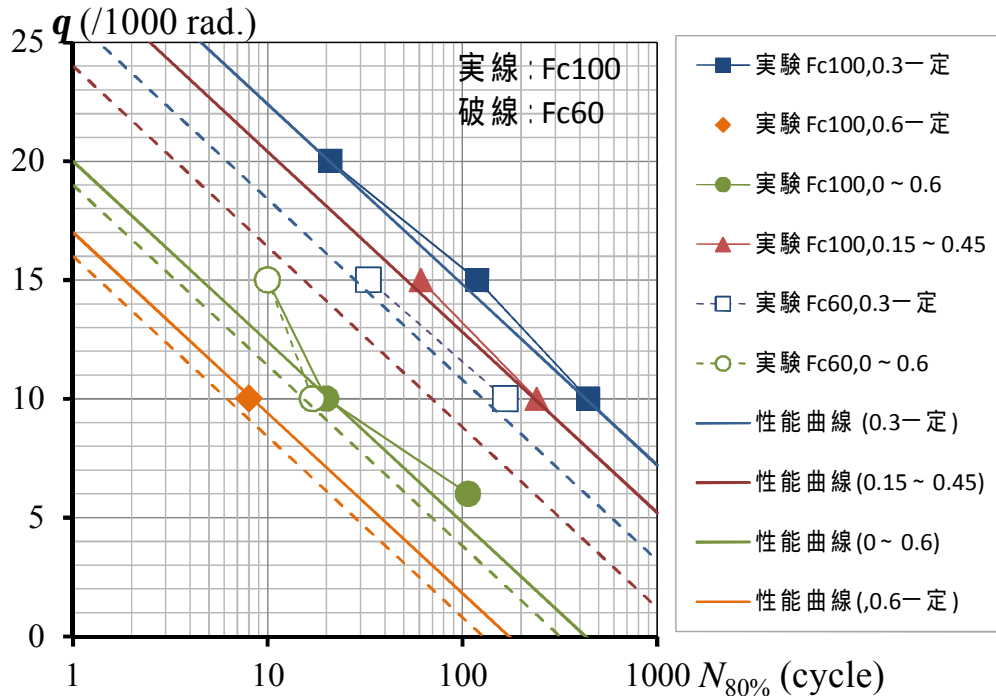
損傷度D(2.0倍入力)

評価結果

- 1.0倍入力時は全梁端にて $D < 1.0$ 破断しないと判定
- 2.0倍入力時は2~11層梁端にて $D > 1.0$ 破断すると判定

6. 長周期地震動に対するCFT柱を有する超高層建物の応答評価

CFT柱 損傷評価の試行



実験結果と性能曲線(幅厚比B/t=20)

性能曲線の設定

- ・ $\theta \times 1000 = -3.3 \times \ln(N80\%) + N1$
- ・ N1: 性能曲線切片
コンクリート強度及び軸圧比から設定

評価手法

- ・ 各部材変形時刻歴を用い, Miner則を仮定して損傷評価
- ・ 各柱を実験の柱パラメータ毎に分類して, その性能曲線を適用
- ・ パラメータ
長期軸圧比, 最大軸圧比, コンクリート強度
幅厚比

評価結果

- ・ 軸圧比の大きい中柱で $D > 1.0$

評価結果一覧(Fc60)

柱位置	長期軸圧比	最大軸圧比	軸圧区分	損傷度D
隅柱	0.05	0.46	0~0.6	0.12
中柱	0.52	0.65	0.6一定	1.29
内側構面隅柱	0.24	0.38	0.15~0.45	0.06

課題

- ・ Miner則の成立性
- ・ 小振幅時及び引張り時の性能曲線の評価
- ・ 幅厚比毎の性能曲線の評価

7. 今年度の成果と今後の課題

今年度の成果

- (1) 590N級鋼および400N級鋼を使用した鋼管にFc100コンクリートを充填したCFT柱試験体において最大荷重以降の荷重低下の主な要因は、柱頭、柱脚における圧縮フランジの局部座屈の進展およびそれとともなう充填コンクリートの損傷、局部座屈をとみなわない柱頭、柱脚における充填コンクリートの損傷、柱頭、柱脚における引張フランジの亀裂の進展および引張フランジの破断のいずれかであった。
- (2) SN490Bを使用した鋼管にFc60コンクリートを充填したCFT柱試験体において最大荷重以降の荷重低下の主な要因は柱頭、柱脚における圧縮フランジの局部座屈の進展および充填コンクリートの損傷であった。
- (3) 590N級鋼を使用した鋼管にFc100コンクリートを充填したCFT柱試験体、400N級鋼を使用した鋼管にFc100コンクリートを充填したCFT柱試験体および490N級鋼を使用した鋼管にFc60コンクリートを充填したCFT柱試験体において、変位振幅と0.9Qmax時および0.8Qmax時の繰り返し数等との関係を確認した。

7. 今年度の成果と今後の課題

- (4) 実大規模の試験体を用いた梁端溶接部の多数回繰り返し载荷実験における最終破壊は、水平ハンチ梁およびノンスカラップ梁ともにフランジの破断であった。また、現場溶接形式の梁のフランジ端部を水平ハンチで補強することで、破断寿命はノンスカラップ梁と同等以上に改善された。
- (5) 柱スキンプレートの比較的薄いCFT柱に接合する水平ハンチ梁・ノンスカラップ梁の塑性率振幅と破断寿命の関係は、建築基準整備促進事業「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」で提案している疲労曲線のうち【スカラップ無】に対応する実験式で評価できることを確認した。
- (6) 想定東海・東南海・南海地震発生時の3大都市圏における模擬地震動(基準整備促進事業42番の成果)を入力として、CFT柱を有する超高層建物2棟(33階モデル及び35階モデル)の地震応答解析を行い、建物全体の応答性状や、部材の降伏状況、部材応力及び変形の繰り返し頻度等を確認した。
- (7) 上記2棟の建物モデルを構成するCFT柱のうち、応力の大きい下層階柱の柱部材角の繰り返し回数を計数し、CFT柱部材実験より得られた保有性能に照らし合わせることで、地震時のCFT柱部材の損傷評価を試行した。長期軸圧比及び最大軸圧比の大きい柱ほど、損傷度Dが大きい傾向がみられた。

8. 今年度の成果と今後の課題

今後の課題

CFT 柱の損傷評価では、限られた実験結果より設定した性能曲線を用いて安全側に評価している。さらに多くの実験等によるデータの蓄積によって、不足データの補完、汎用的な評価法の構築および評価法精度の向上等が必要である。特に、以下が挙げられる。

Miner 則の成立性の確認のための部材実験

小振幅での $0.8Q_{max}$ 時の性能曲線取得のための部材実験

引張力が生じる場合の性能曲線取得のための部材実験

2方向加力を受ける場合の疲労損傷の評価方法を構築するための部材実験

また、本調査において定義した疲労限界について、学会指針等における変形性能限界と比較しつつ、建物の安全性との対応を定量的に評価することが望まれる。