

平成22年度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

事業報告

2011年4月14日

鹿島建設株式会社

株式会社 大林組

清水建設株式会社

大成建設株式会社

株式会社 竹中工務店

株式会社 小堀鐸二研究所

背景と目的

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。

⇒「(イ)多数回繰り返し荷重を受ける鉄骨造建築物の構造実験の実施」により部材および接合部が終局状態に至るまでの挙動を把握。

長周期地震動を受ける鉄骨造(超高層)建築物において、骨組各部に生じる塑性化の程度や頻度を把握することが重要。また、実建物の地震観測も重要。

⇒ (ロ)長周期地震動に対する鉄骨造の応答評価の実施 ⇒構造実験に反映

⇒ (ハ)超高層鉄骨造建築物の地震観測の実施 ⇒入力・応答性状の把握に貢献

リレーションシップ ID:rId2 のイメージ パーツがファイルにありませんでした。

調査体制

【研究委員会】

建築研究所

共同研究

国土技術政策
総合研究所
(協力委員)

事業主体

鹿島 幹事会社

大林

清水

大成

竹中

小堀鐸研

指導
助言

学識経験者
【委員長】
森田耕次教授
(東京電機大学)
【学識委員】
中島正愛教授
(京都大学)
山田哲准教授
(東京工業大学)

実験WG

解析WG

観測WG

梁

梁端

柱

接合部

本委員会

推進委員会

(イ) 多数回繰り返し荷重を受ける鉄骨造建築物の 構造実験の実施

A. 鉄骨造超高層の実態調査

調査概要

- ・部材・接合部実験の条件設定の参考とするため、既存超高層建物の実態をサンプル調査
- ・調査対象：参加各社が設計・施工に関わった既存鉄骨造超高層
- ・年代3区分(①～1985年, ②1986～1995年, ③1996年～)ごとに、代表的な建物を選定(棟数:13)
- ・階数:30階未満～50階以上, 建物高さ:100m未満～200m以上, 固有周期:2～6secの範囲に幅広く分布

調査結果(実験条件に反映した項目)

- ・**梁部材および梁端溶接部**
フランジおよびウェブの幅厚比, 梁せい, シアスパン比, スカラップ形状, ウェブの高力ボルト接合仕様
- ・**柱部材**:断面形状, 幅厚比, 細長比, 軸力比
- ・**柱梁接合部パネル**:柱および梁耐力に対するパネルの耐力比

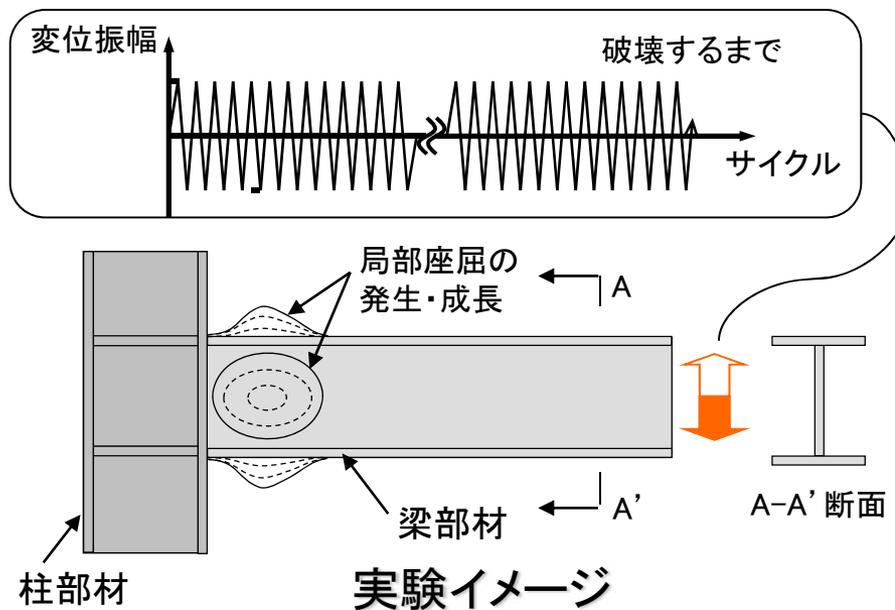
B. 部材・接合部実験(梁部材1)

概要

長周期地震動により多数回繰返し変位を受ける梁部材の保有性能を把握するために、定振幅繰返し変位による載荷実験を行う。

特に梁フランジや梁ウェブの局部座屈により耐力・変形性能が決定すると考えられる幅厚比の梁部材を対象とする。

- ・縮尺: 1/2程度
- ・試験体数: 6体



B. 部材・接合部実験(梁部材2)

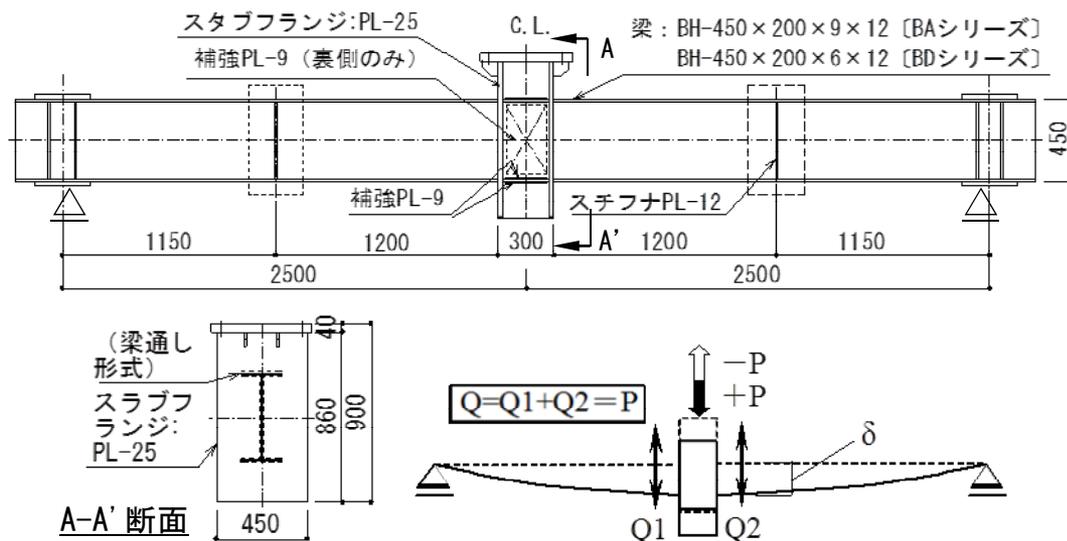
試験体と実験パラメータ

- ・加力用スタブの両側に梁部材を配置 → 単純梁形式(3点曲げ方式)での載荷
- ・鋼種: SM490A、梁内法スパン(片側): 2350mm
- ・実験パラメータ: ①梁断面サイズ、②変位振幅
 - ①梁断面サイズ: BH-450×200×9×12 (フランジFB、ウェブFA) → BAシリーズ
BH-450×200×6×12 (フランジFB、ウェブFD) → BDシリーズ
 - ②変位振幅: BAシリーズ... $2\delta_p$ 、 $2.5\delta_p$ 、 $3\delta_p$ の3水準
BDシリーズ... $1.7\delta_p$ 、 $2\delta_p$ 、 $3\delta_p$ の3水準

試験体一覧

BU-Z	×6×12 (SM490A)	(FB)	(FD)	$\pm 2\delta_p$
BD-3				$\pm 3\delta_p$
BU-Z	×6×12 (SM490A)	(FB)	(FD)	$\pm 2\delta_p$
BD-3				$\pm 3\delta_p$
BU-Z	×6×12 (SM490A)	(FB)	(FD)	$\pm 2\delta_p$
BD-3				$\pm 3\delta_p$
BU-Z	×6×12 (SM490A)	(FB)	(FD)	$\pm 2\delta_p$
BD-3				$\pm 3\delta_p$
BU-Z	×6×12 (SM490A)	(FB)	(FD)	$\pm 2\delta_p$
BD-3				$\pm 3\delta_p$
BU-Z	×6×12 (SM490A)	(FB)	(FD)	$\pm 2\delta_p$
BD-3				$\pm 3\delta_p$

δ_p : 梁の全塑性曲げモーメント (Mp) を弾性剛性で除して得られる変形(計算値)



試験体形状・寸法

B. 部材・接合部実験(梁部材3)

実験結果1(基本特性)

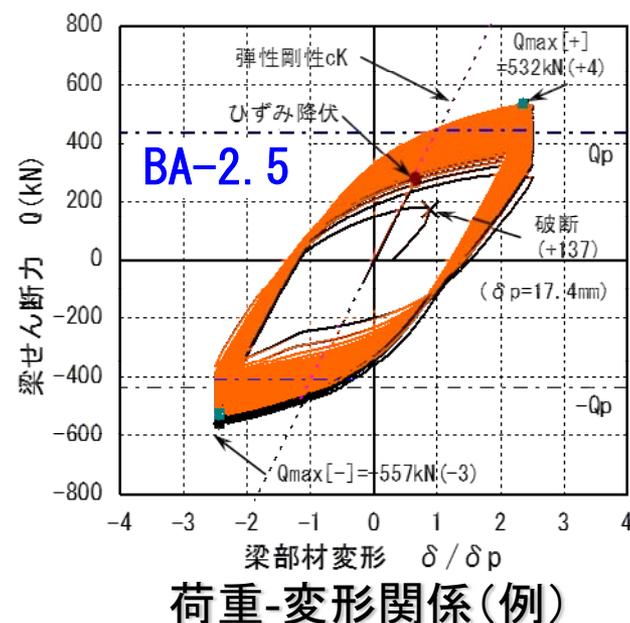
- ・実験経過および破壊性状
 梁フランジ、梁ウェブの局部座屈の発生・成長
 → き裂の発生・進展 (①局部座屈発生域すみ肉溶接部 or ②梁端フランジ溶接部)
 → 梁フランジ全断面破断
- ・荷重変形特性
 安定した紡錘型の履歴。局部座屈により耐力低下。き裂発生・進展によりピンチング

実験結果一覧

BD-3	$\pm 3 \delta_p$ (53.1)	2	2	4	6	31
		1	2	4	6	
BD-3	$\pm 3 \delta_p$ (53.1)	2	2	4	6	31
		1	2	4	6	
BA-2	$\pm 2 \delta_p$ (34.8)	9	51	158	203	217
		4	45	158	204	
BA-2.5	$\pm 2.5 \delta_p$ (43.5)	4	19	24	30	137
		3	16	21	29	
BD-3	$\pm 3 \delta_p$ (53.1)	3	6	6	8	31
		2	2	4	6	
BD-3	$\pm 3 \delta_p$ (53.1)	2	2	4	6	31
		1	2	4	6	
BD-3	$\pm 3 \delta_p$ (53.1)	2	2	4	6	31
		1	2	4	6	
BD-3	$\pm 3 \delta_p$ (53.1)	2	2	4	6	31
		1	2	4	6	



最終破壊状況



・Qmax : 梁最大荷重実験値

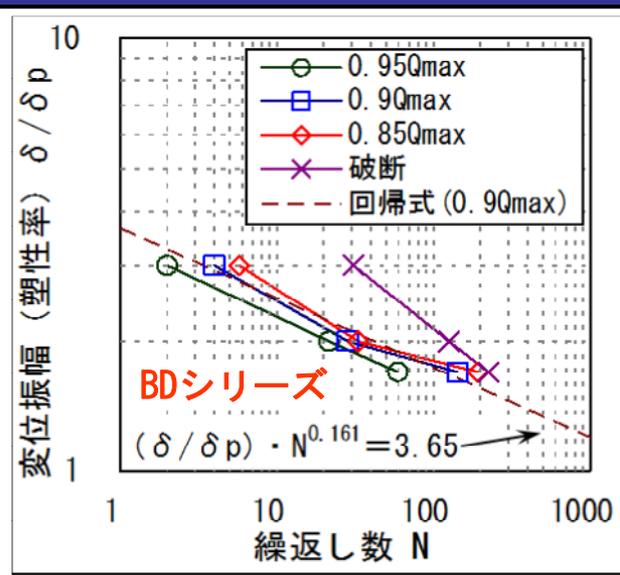
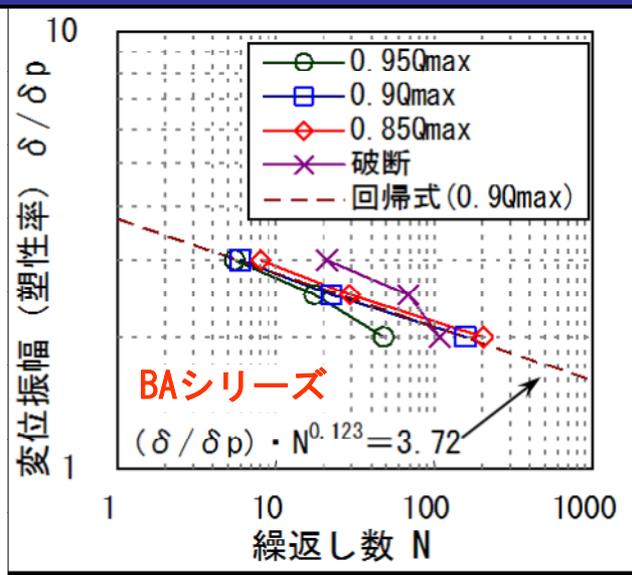
B. 部材・接合部実験(梁部材4)

実験結果2(多数回繰返し特性)

- 変位振幅(塑性率) $\delta / \delta p$ - 繰返し数 N 関係を整理
→ 90%耐力時 ($0.9Q_{max}$) での $\delta / \delta p$ - N 関係には高い相関性 → 回帰式を提案

まとめと今後の課題

- 梁部材を対象とした定振幅繰返し载荷実験を実施
→ 局部座屈が発生・進展する場合の基本特性、多数回繰返し特性を把握
- 今後の課題: 1) 梁シアスパン比の影響評価 2) 変動振幅繰返し変位下での性能 3) 床スラブの影響評価



変位振幅(塑性率) - 繰返し数関係

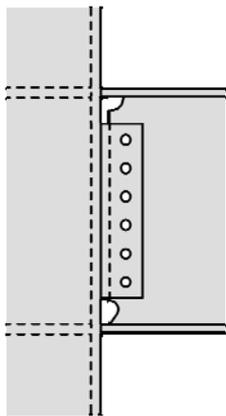
B. 部材・接合部実験（梁端接合部1）

実験概要

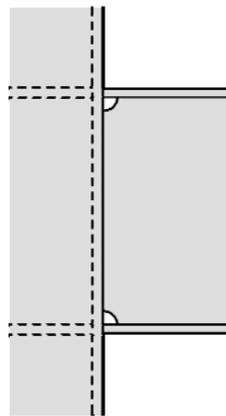
梁端接合形式 および 変位振幅 を実験変数とする構造実験を実施し、多数回繰り返し履歴下における 梁端接合部の保有性能 を把握する。

- ・縮 尺：実大相当
- ・試験体数：6体
- ・実験パラメータ：〔梁端接合形式〕 現場溶接形式, 工場溶接形式
〔载荷パターン〕 一定振幅(塑性率の程度)

★梁端溶接部の変形能力を把握

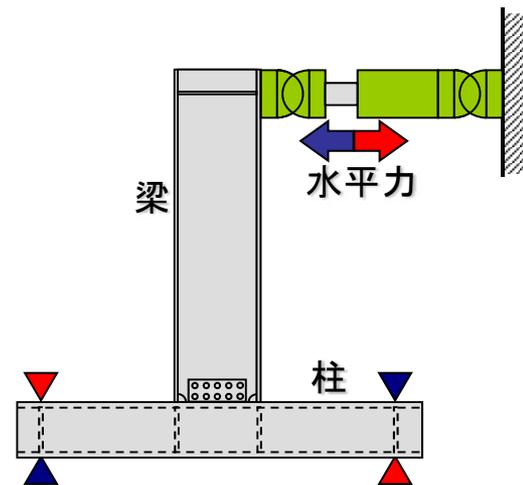


(現場溶接形式)



(工場溶接形式)

梁端接合形式



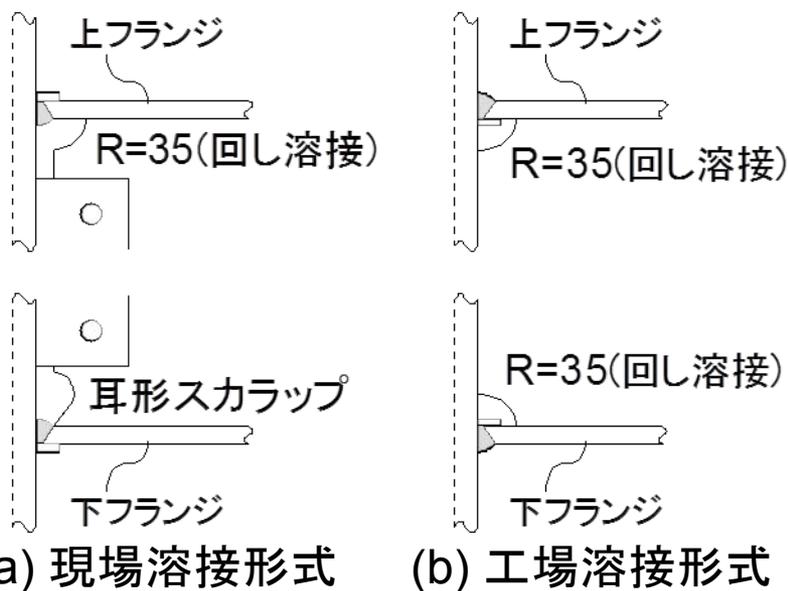
試験体形状・加力方法

B. 部材・接合部実験(梁端接合部2)

試験体と実験パラメータ

試験体名	断面	梁端接合形式	変位振幅
G-1	梁:(SM490A) BH-600×200×12×19	現場溶接	$\pm 1.3 \delta_p$
G-2			$\pm 2.0 \delta_p$
G-3			$\pm 3.0 \delta_p$
K-1	柱:(SN490C) □-500×500×25×25	工場溶接	$\pm 1.3 \delta_p$
K-2			$\pm 2.0 \delta_p$
K-3			$\pm 3.0 \delta_p$

※ δ_p : 全塑性耐力に対応する梁弾性変位計算値(21.5mm)

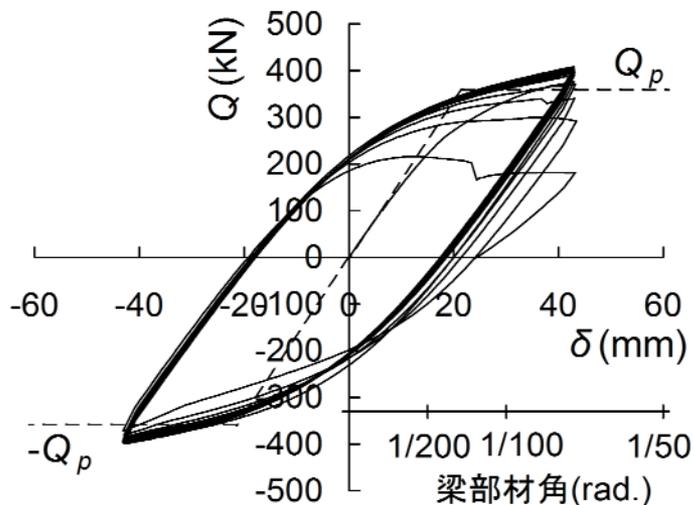


加力装置

B. 部材・接合部実験(梁端接合部3)

実験結果1(基本特性)

- ・ 破壊は、いずれも35Rスカラップ底(回し溶接)を起点とした梁フランジ母材の破断。
- ・ 35Rスカラップ側よりも耳形スカラップ側の方が、亀裂の進展は遅い。
- ・ ピーク荷重が最大荷重から10%低下するまでは、安定した履歴ループが得られた。



荷重－変形関係(G-2)



最終破壊状況
(G-2)

B. 部材・接合部実験(柱部材1)

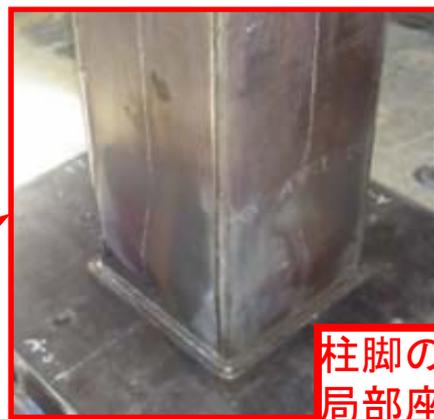
実験概要

細長比, 軸力比および変位振幅を実験因子とした定振幅多数回繰返し載荷時の柱の保有性能の把握を行った。

- ・縮 尺: 1/2程度
- ・試験体数: 6体
- ・柱断面形状:
溶接組立箱形断面 (SM490A)

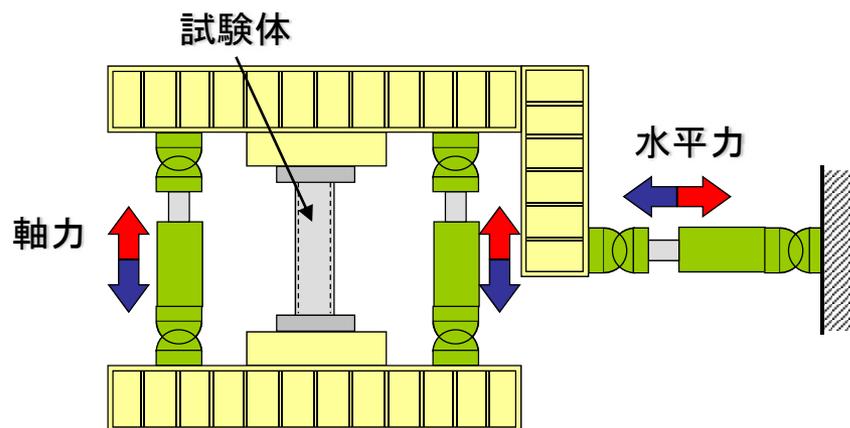
実験パラメータ

試験体	細長比	軸力比	変位振幅
L-3C-S	23.1 (大)	0.3	1.5 δ_p (小)
L-3C-M			1.7 δ_p (中)
L-3C-L			2.0 δ_p (大)
L-06V-M	15.4 (中)	0~0.6	1.7 δ_p (中)
M-3C-S		0.3	1.5 δ_p (小)
M-3C-M			1.7 δ_p (中)



柱脚の
局部座屈

試験体最終状況

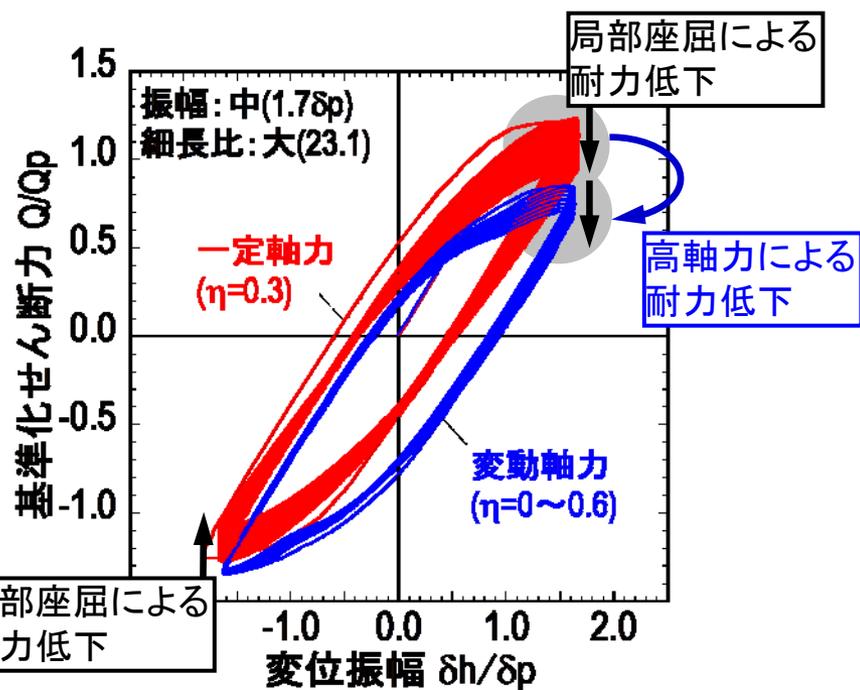


加力方法(建研式)

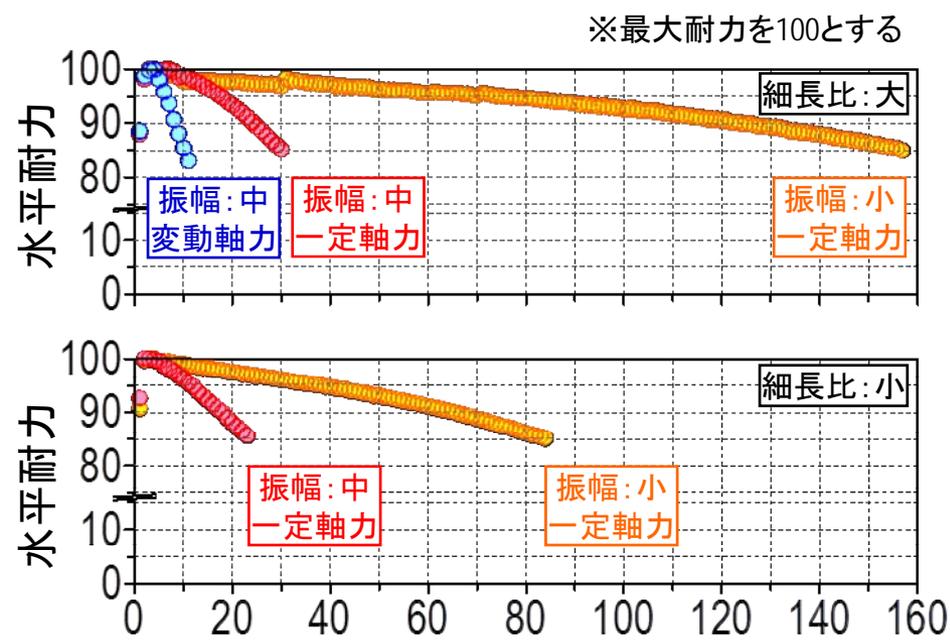
B. 部材・接合部実験(柱部材2)

実験結果1(基本特性)

- ・いずれも耐力低下の要因は柱頭・柱脚部に生じた**局部座屈**の進展
- ・細長比が小さい場合、柱頭・柱脚部の塑性化領域が狭く、**局部的な座屈**の進行により**早期に耐力低下**
- ・**変動軸力下(高軸力下)**や**振幅が大きい**場合は、**早期に耐力低下**



荷重-変形関係

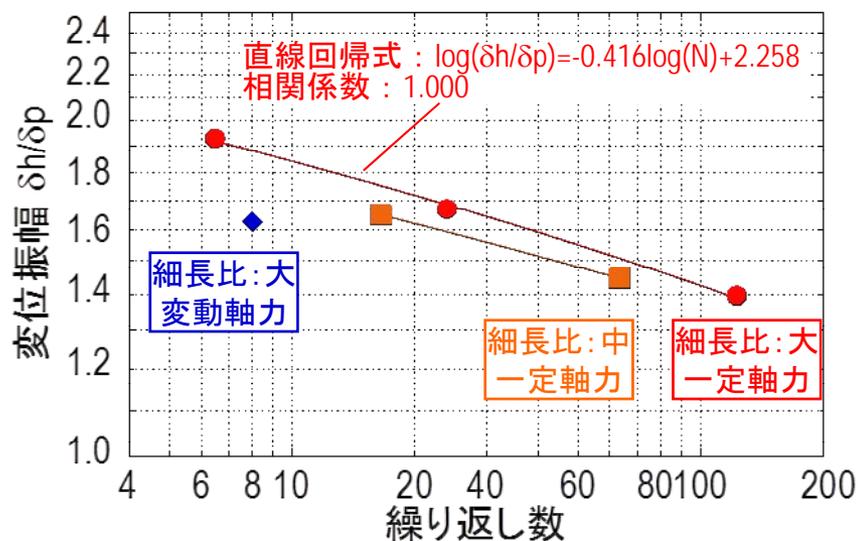


水平耐力-繰返し数関係

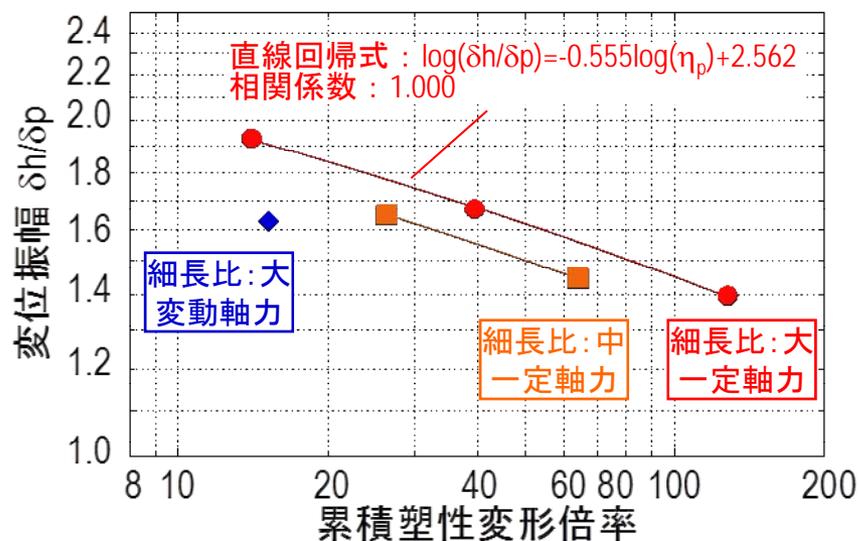
B. 部材・接合部実験(柱部材3)

実験結果2(多数回繰り返し特性)

- 変位振幅と繰り返し数や累積塑性変形倍率の関係は、両対数軸上で概ね直線に分布
- 細長比が小さい場合や変動軸力下(高軸力下)では、繰り返し数, 累積塑性変形倍率は小さい。



変位振幅-繰り返し数関係



変位振幅-累積塑性変形倍率関係

B. 部材・接合部実験(柱部材4)

まとめ

定振幅多数回繰り返し荷重下での鋼管柱部材の構造保有性能を把握

- ・全ての試験体で柱頭・柱脚部の**局部座屈により耐力低下**
- ・**変位振幅と繰り返し数や累積塑性変形倍率の関係は、両対数軸上で直線分布**, 各指標に高い相関性があることを確認
- ・細長比や軸力状態などの与条件の違いによる多数回繰り返し特性の違いを確認

今後の課題

高軸力柱, 小変位振幅, 長柱(2層吹抜), CFT柱などの多数回繰り返し特性の把握

B. 部材・接合部実験(柱梁接合パネル1)

実験目的

柱梁接合部パネル部について、柱を箱形断面とし、パネル幅厚比、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。

表 試験体一覧(鋼種 SM490A 材)

試験体名	柱断面	梁断面	柱幅厚比 ()はランクと 閾値*1	軸力比	ハ° 耐 力比	変位 振幅
B-AA-5	□-350×350×19	BH-350×250×14×22	18 (FA、25)	0.5 N_y	0.67 (柱) 0.60 (梁)	5%
B-A-8	□-425×425×16	BH-425×275×12×19	27 (FB、28)	0.3 N_y	0.48 (柱) 0.63 (梁)	8%
B-C-3 B-C-6 B-C-8	□-500×500×12	BH-500×300×12×16	41 (FC、38)	0.0 N_y	0.67 (柱) 0.50 (梁)	3% 6% 8%

*1 実強度で換算(公称値による幅厚比に $\sqrt{\sigma_y/F}$ を乗じた値で評価 σ_y : 実降伏応力度、 F : 基準強度)

B. 部材・接合部実験(柱梁接合パネル2)

試験体と実験パラメータ

計5体

柱幅厚比: FA/1.5、FA、FC(実強度ではFA、FB、FD)

変位振幅: $3\gamma_y \sim 8\gamma_y$ (90%耐力または100回まで繰返し)

軸力比: $0.0 \sim 0.5N_y$

表 素材の機械的性質およびシャルピー試験結果(0°C)

板厚 (mm)	鋼種	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	降伏比 Y.R.	伸び ϵ (%)	吸収エネルギー (J)
12	SM490A	373	1820	550	0.68	25.3	151
14	SM490A	366	1785	542	0.68	27.1	-
16	SM490A	418	2039	576	0.73	26.4	250
19	SM490A	404	1971	562	0.72	27.2	178
22	SM490A	381	1859	532	0.72	29.8	-
25	SM490A	379	1849	551	0.69	29.7	-

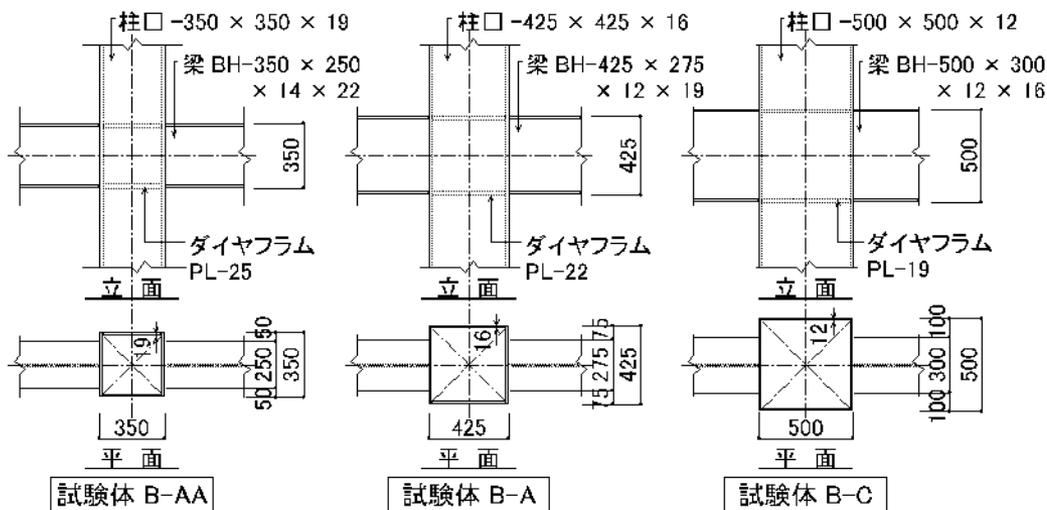


図 試験体柱梁接合部パネル詳細

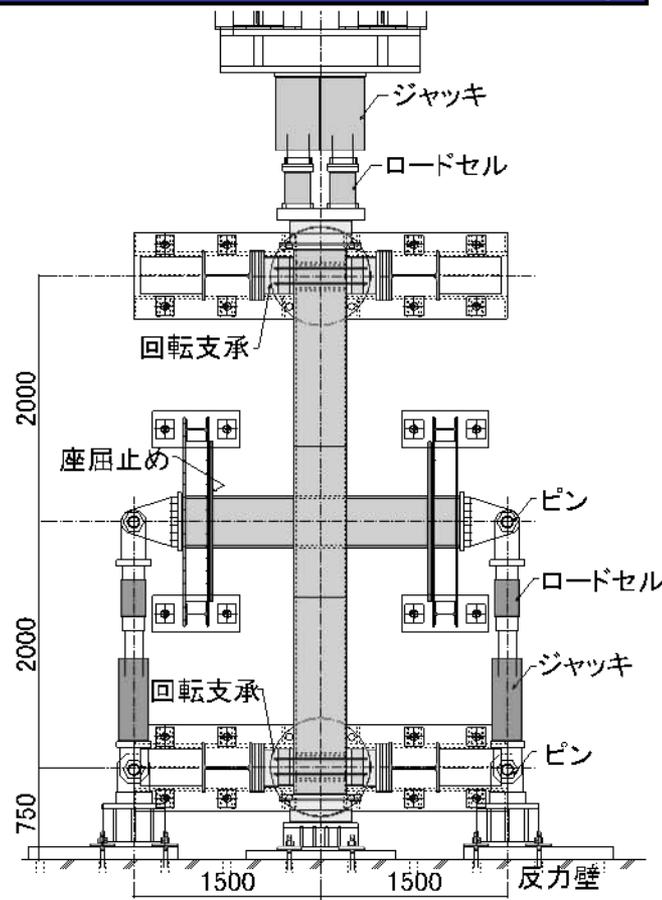
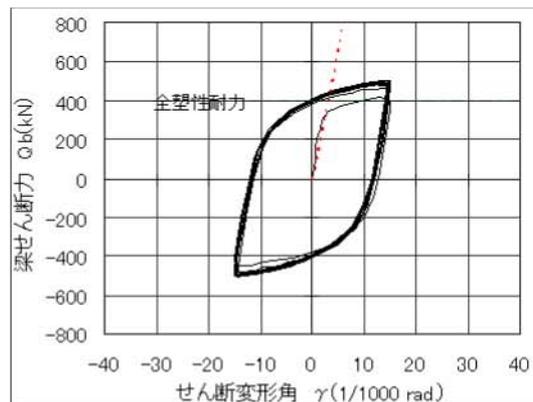


図 試験体全容および加力装置概要

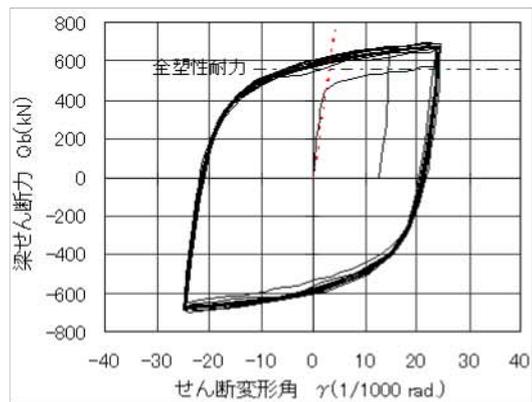
B. 部材・接合部実験(柱梁接合パネル3)

実験結果1(梁せん断力-パネルせん断変形角関係)

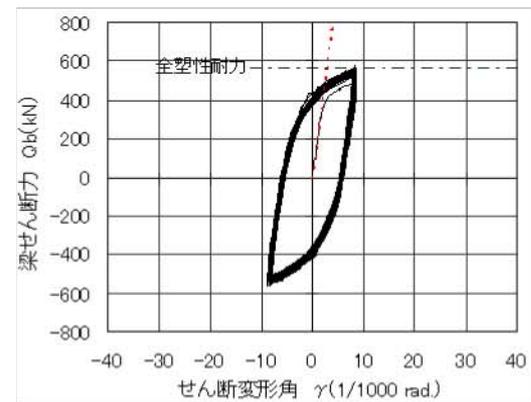
縦軸は梁のせん断力、横軸はパネルのせん断変形角



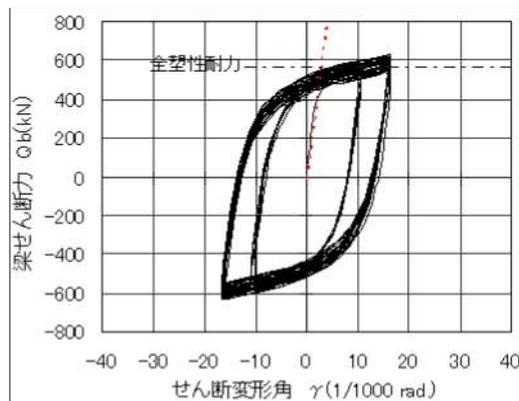
試験体 B-AA-5 (110回で柱崩壊)



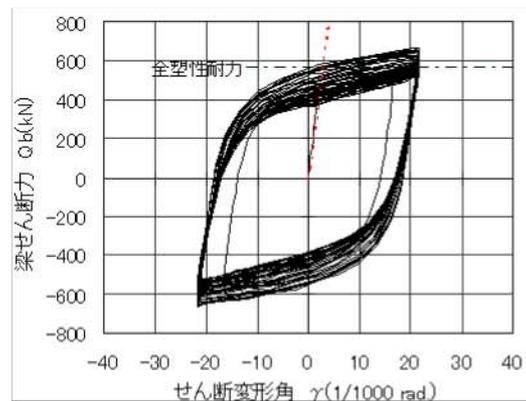
試験体 B-A-8 (18回で梁破断)



試験体 B-C-3 (200回以上)



試験体 B-C-6 (36回で90%耐力)



試験体 B-C-8 (17回で90%耐力)



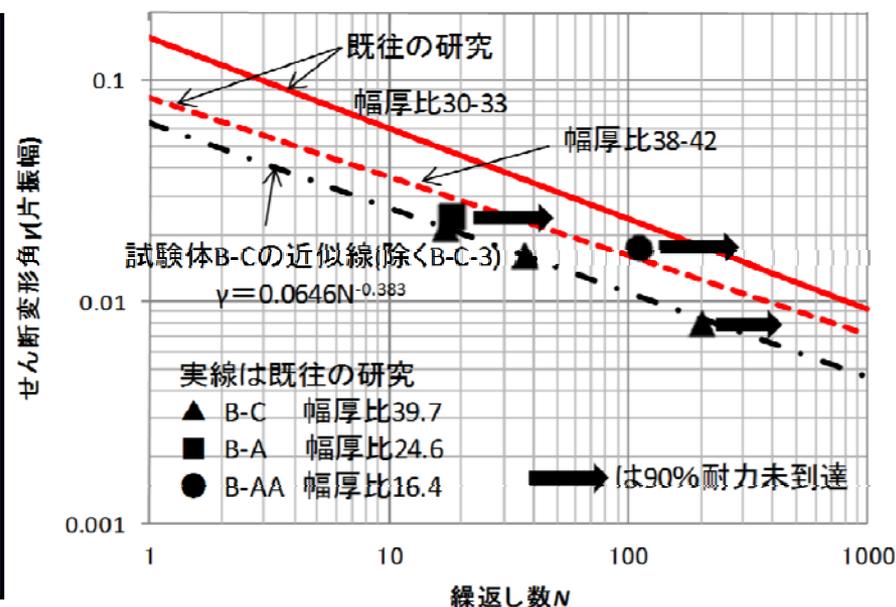
最終破壊状況(試験体 B-C-6)

B. 部材・接合部実験(柱梁接合パネル4)

実験結果2

(多数回繰返し特性)

幅厚比が小さくなるにつれ柱梁接合部パネルの多数回繰返し特性は良くなる傾向にあり、せん断パネルの疲労試験に関する既往の研究と同様の傾向



まとめと今後の課題

まとめ: 幅厚比がFDランク相当の試験体に、実用上では過大となるせん断変形角 $1/122(3\gamma_y)$ の変形を与えたが、200回以上の繰返し载荷に対しても耐力低下が見られず、耐震上十分な多数回繰返し特性が確認できた。

今後の課題: 実建物の柱、梁、柱梁接合部パネルのプロポーシオンを考慮した中で、柱梁接合部パネルと柱や梁の不安定問題について検討することが考えられる。

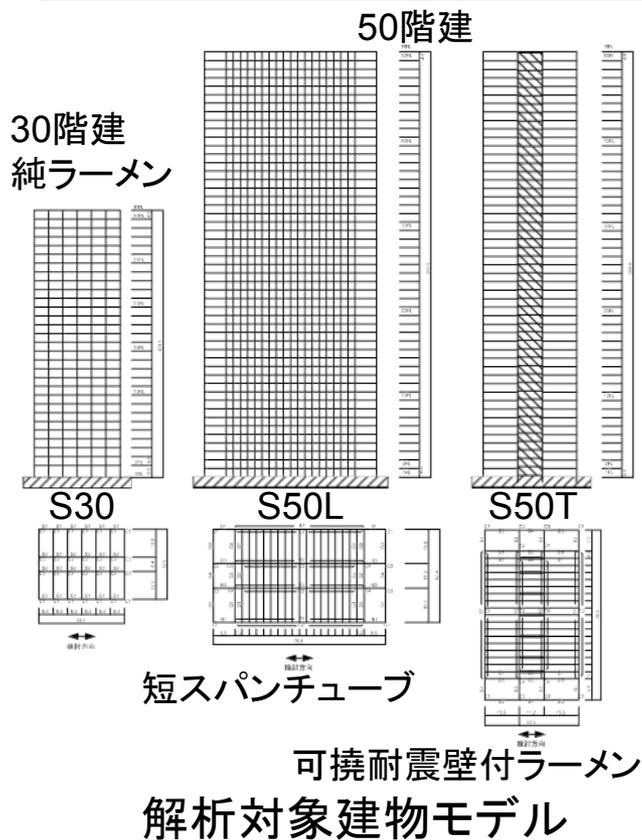
(口)長周期地震動に対する鉄骨造の応答評価1

解析対象・モデル

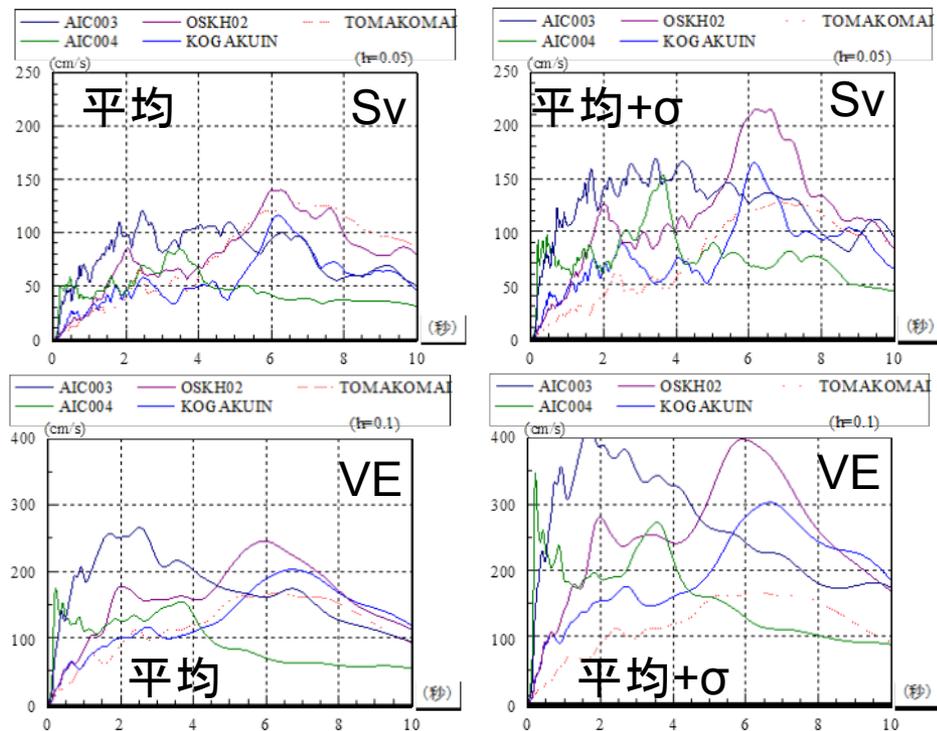
- ・30～50階程度の鉄骨造超高層モデル建物を対象
- ・構造形式の異なるものを2棟程度選定

目的・解析条件等

- ・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波から数波程度(基準整備1番の昨年度の成果)を入力として応答解析
- ・結果の各部の荷重パターンを実験に反映



愛知 —
津島 —
愛知 —
名古屋 —
大阪 —
此花 —
東京 —
新宿 —
観測波 —
苫小牧 —



入力地震動の特性

(口)長周期地震動に対する鉄骨造の応答評価2

(1)各建物モデルに関する応答解析

3種の建物モデルに関して、平均レベル及び観測波について応答解析を実施

○架構形式により建物応答の特徴は異なるが、層間変形角及び部材塑性率・累積塑性変形倍率が共に比較的大きいのはS30

○これ以後の検討はS30を用いて実施

(2)梁の耐力比(梁・柱梁接合部パネル耐力比)を変更した場合の応答解析

梁耐力

a)梁フランジのみ有効、b)梁フランジ+ウェブ全断面有効、c)完全合成梁

梁耐力が大きくなれば柱梁接合部パネルが塑性化進展

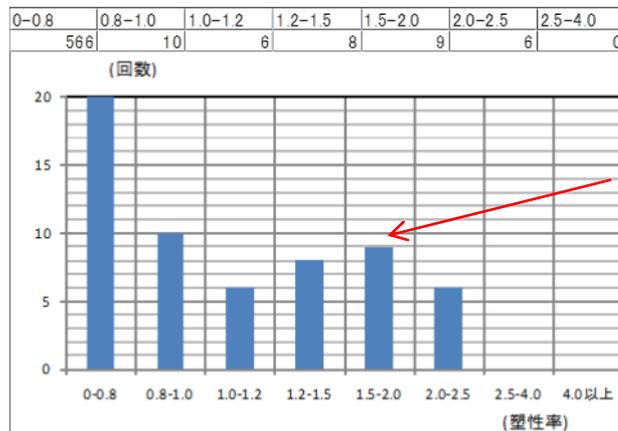
○最大層間変形角はa)~c)で変わらない

○塑性化部位は異なるが、建物内どこかの部材で塑性化してエネルギー吸収と想定

(口)長周期地震動に対する鉄骨造の応答評価3

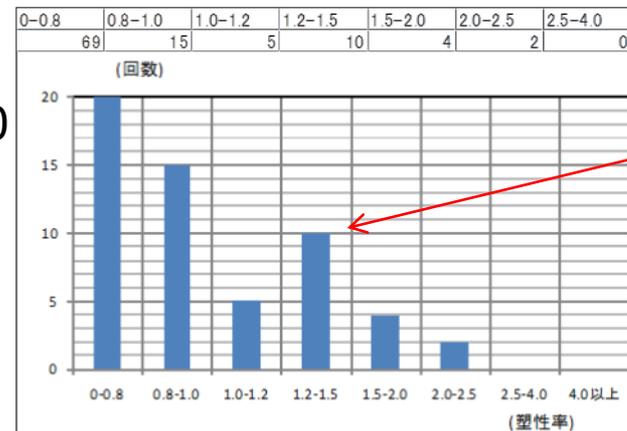
(3)共振時梁部材塑性率頻度分布

- 共振状態を実現するように、入力地震動の時間刻み(及び振幅)を調整
→共振解析用検討波
- 共振時累積塑性変形倍率が最大となるケースを抽出(70程度)
- 地震中の塑性化繰返し回数は最大でも25回程度、梁部材最大塑性率は4程度



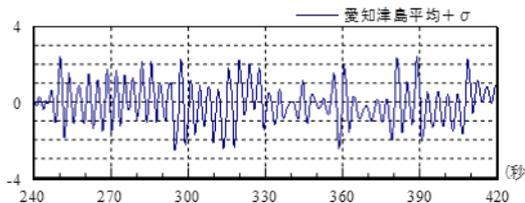
1.5~2.0
の範囲
9回

梁塑性率頻度分布(愛知津島平均+ σ)

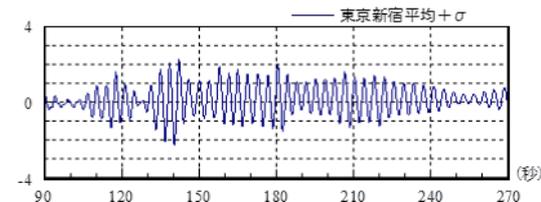


1.2~1.5
の範囲
10回

梁塑性率頻度分布(東京新宿平均+ σ)



梁塑性率時刻歴(愛知津島平均+ σ)



梁塑性率時刻歴(東京新宿平均+ σ)

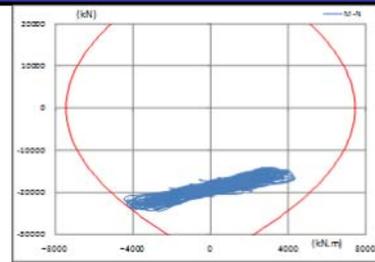
(口)長周期地震動に対する鉄骨造の応答評価4

(4)共振時柱部材時刻歴

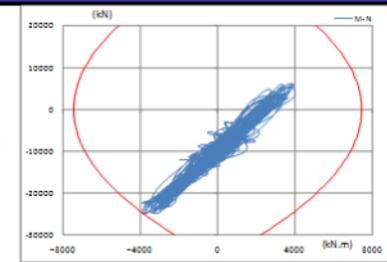
○柱部材の塑性率は小さい

○柱が塑性化する回数は多くても数回程度(平均+ σ レベル)

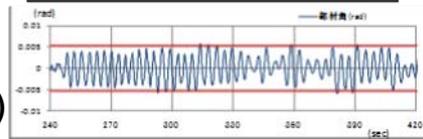
内柱N-M履歴
(愛知津島平均+ σ)



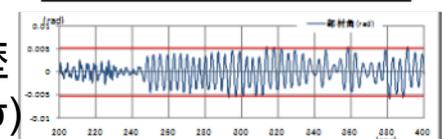
外柱N-M履歴
(愛知津島平均+ σ)



内柱部材角時刻歴
(愛知津島平均+ σ)



外柱部材角時刻歴
(愛知津島平均+ σ)



まとめと今後の課題

- ①3種の超高層建物モデルを作成
- ②長周期地震動を入力として応答解析、最大塑性率や累積塑性変形倍率等を把握
- ③純ラーメン架構(S30)について、梁耐力を変動させても**最大層間変形は概ね同じ**
- ④純ラーメン架構(S30)について、共振時の**梁部材塑性化回数は25回程度、最大塑性率は4程度、柱塑性化はわずか**でその回数は**数回程度(平均+ σ レベルまで考慮)**

今後:異なる架構形式の柱部材の履歴等確認必要

:異なる耐力を有する建物モデル設定、挙動確認必要

(ハ) 超高層鉄骨造建築物の地震観測1 (観測概要)

NHSKビル 東京都千代田区

・高層棟(S造)

地上33階 地下2階 塔屋1階

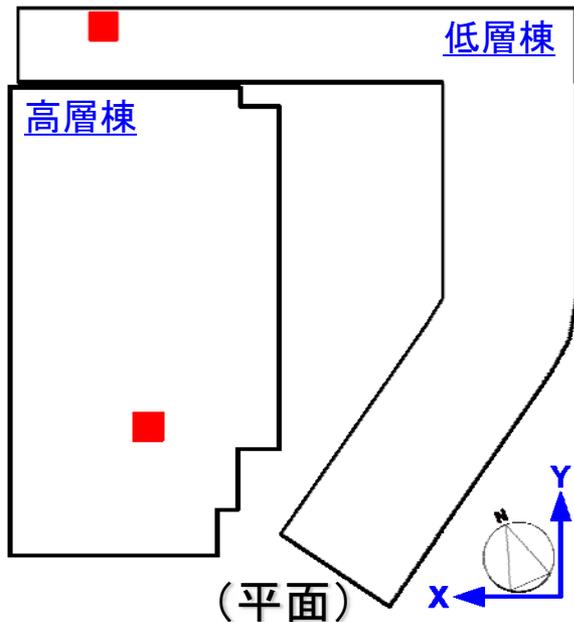
最高部の高さ: 156.67m

微動計測による固有周期

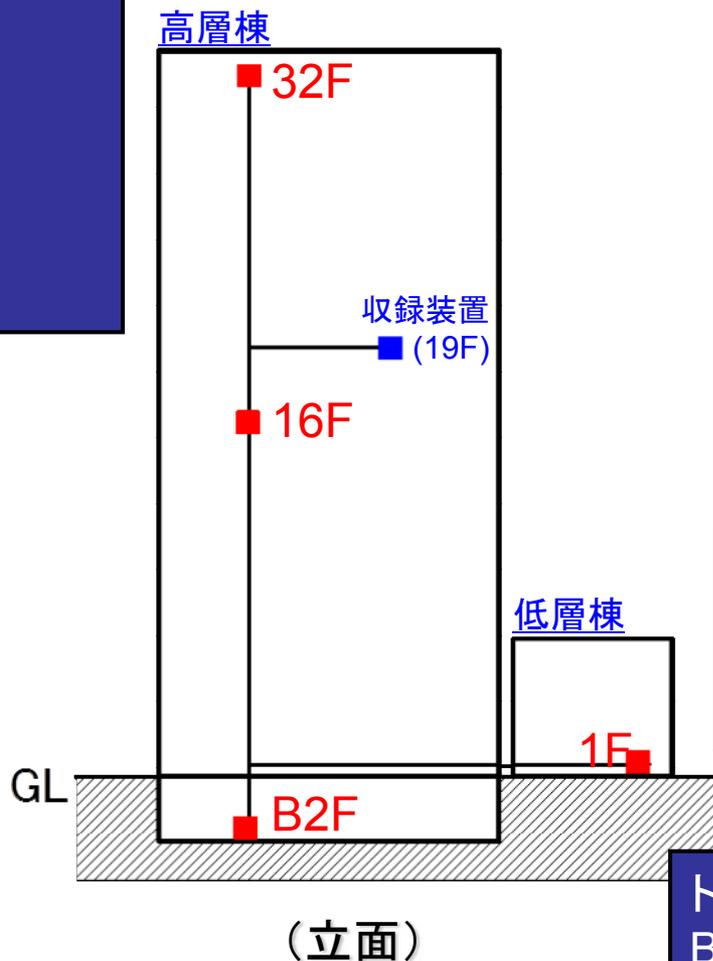
X: 3.15秒 Y: 2.81秒

・低層棟(SRC造、杭基礎)

地上6階



加速度計配置



トリガ条件
 $B2F(XY) \geq 0.5Gal$

(ハ) 超高層鉄骨造建築物の地震観測2 (観測記録)

観測期間 2011.1.17~2011.3.30

合計 84回の観測記録(うち3/11以降が79回)

震度4: 2回

震度3: 0回

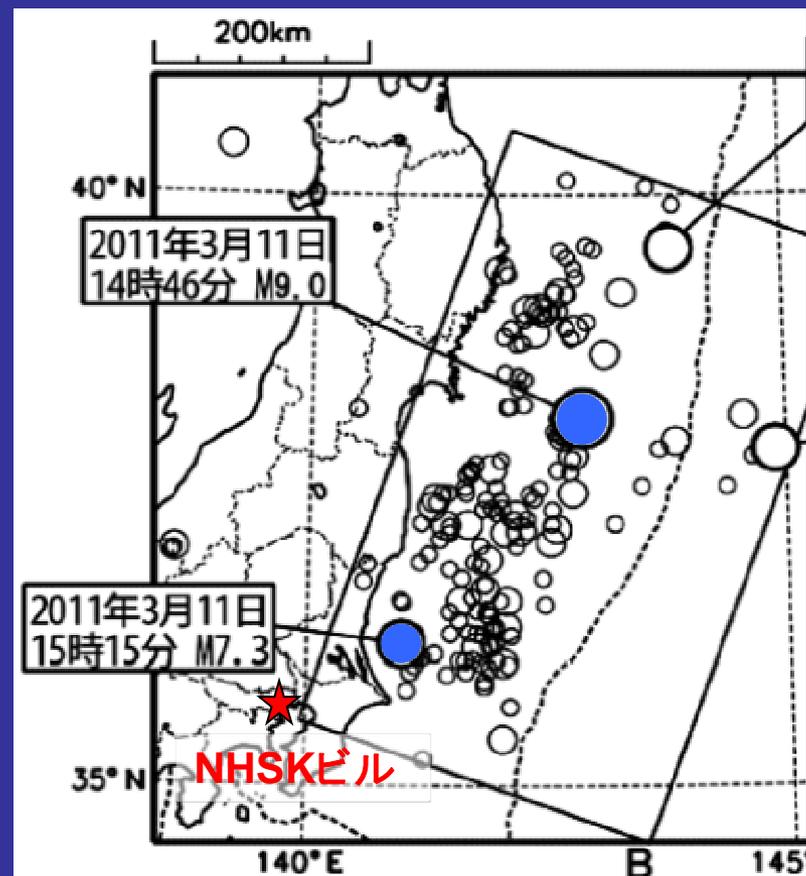
震度2: 22回

震度1: 45回

震度0: 15回

震度4を観測した地震

- ・2011年3月11日14:46頃発生 M9.0
震源: 三陸沖 深さ約24km
- ・2011年3月11日15:15頃発生 M7.3
震源: 茨城県沖 深さ約43km



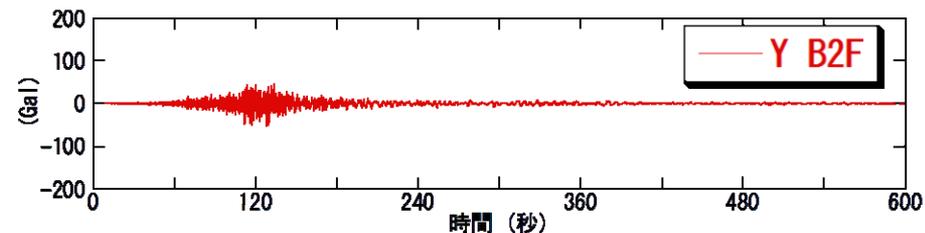
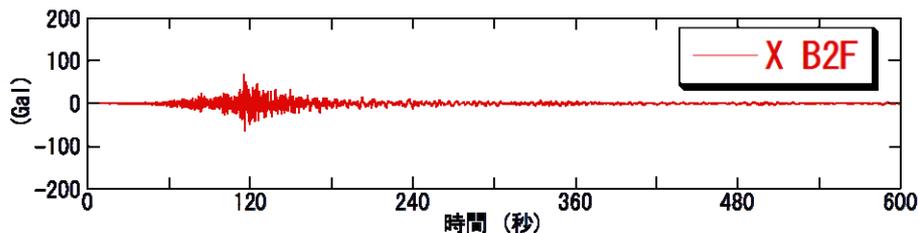
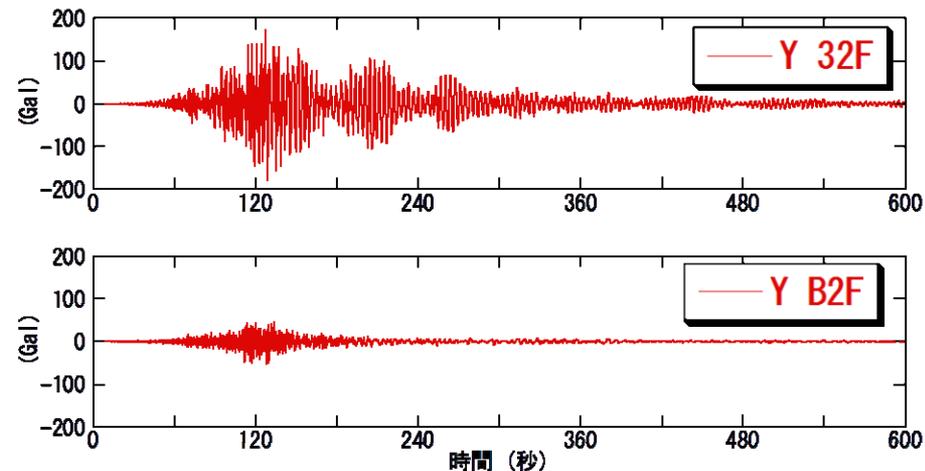
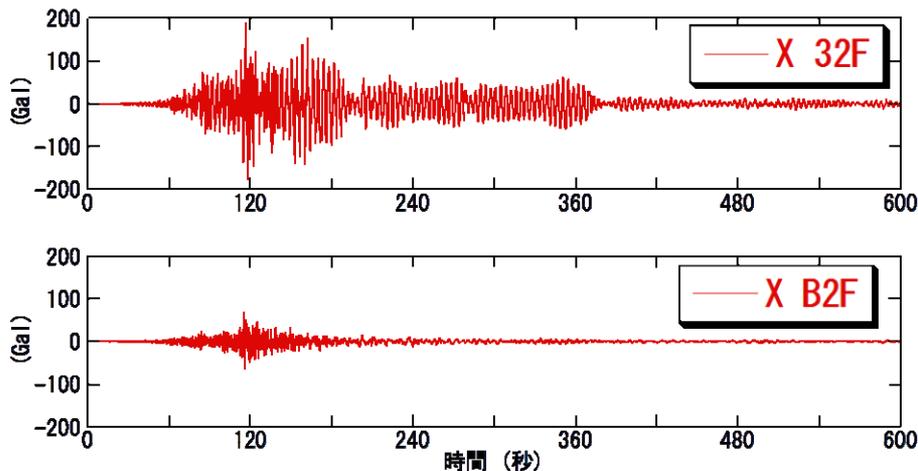
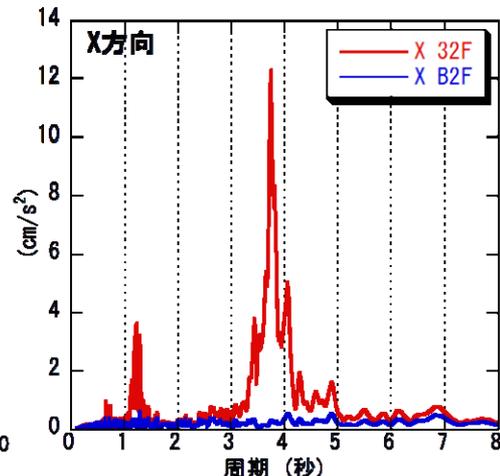
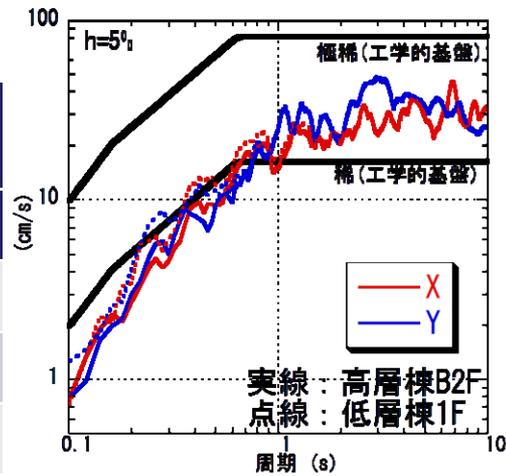
震源位置(気象庁)

(八) 超高層鉄骨造建築物の地震観測3

東北地方太平洋沖地震の記録

最大値

階	最大加速度 (Gal)		最大相対変位 (cm)	
	X	Y	X	Y
32F	190.6	179.0	33.8	32.3
16F	140.9	116.5	17.4	17.2
B2F	66.6	52.2	-	-
低層棟1F	76.3	62.7	-	-



加速度波形

(ハ) 超高層鉄骨造建築物の地震観測4

まとめと今後の課題

- ①東京都千代田区のNHSKビル(S造33階建て)に地震観測装置を設置し、2011年1月17日より観測を開始した。
- ②計84回(2011年1月17日～2011年3月30日)の観測記録が得られた。
- ③東北地方太平洋沖地震では、32Fの最大加速度190Gal、32Fの最大相対変位34cmが記録された。
- ④今後、建物の振動特性(固有周期や減衰定数)の同定や、基礎による入力損失についての検討、応答解析による建物解析モデルの妥当性の検証が必要である。

今年度の成果

多数回繰り返し載荷構造実験

- ・鉄骨造超高層建築物の構造架構を構成する代表的な部材・接合部に関し、既往データの少ない弱塑性率範囲(主に塑性率3以下)における定振幅多数回繰り返し特性データを4種・23サンプル取得
- ・いずれの構造要素にも「変位振幅」と「繰り返し数」の間に密接な関係
⇒ 安全性検証法の骨格を形成する重要な指標の一つとして着目

地震応答評価(解析)

- ・3種の超高層モデルについて、長周期地震動入力時の基本応答特性を把握
- ・30F純ラーメン架構について、共振あるいは入力・モデル条件等の変化の影響を調査し塑性化の状況を詳細把握(最大塑性率, 塑性率ごとの発生回数など)

地震観測

- ・都内に立地する2棟の鉄骨造超高層建物への地震観測装置の設置が完了し、地動入力および主要階応答の観測を開始
- ・3月11日の「東北地方太平洋沖地震」の観測記録を取得・回収。上層階で 200cm/s^2 に迫る大レベルの応答加速度 ⇒ 精査に値する重要なデータ

今後の課題と来年度計画(提案)

構造実験

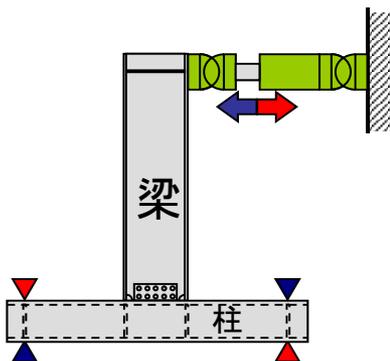
- ・梁: 多様な幅厚比や梁端接合ディテールへの対応
- ・柱: 大きな細長比(2層吹抜), 高軸力比, CFT等への対応
- ・柱梁接合部パネル: 柱・梁・パネルの連成挙動(不安定挙動)の把握

地震応答評価(解析)

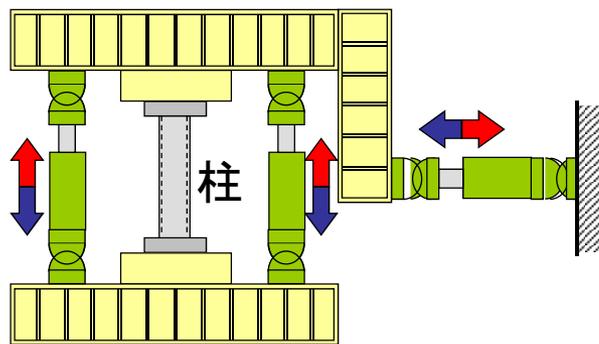
- ・純ラーメン以外の架構形式の応答性状把握

地震観測

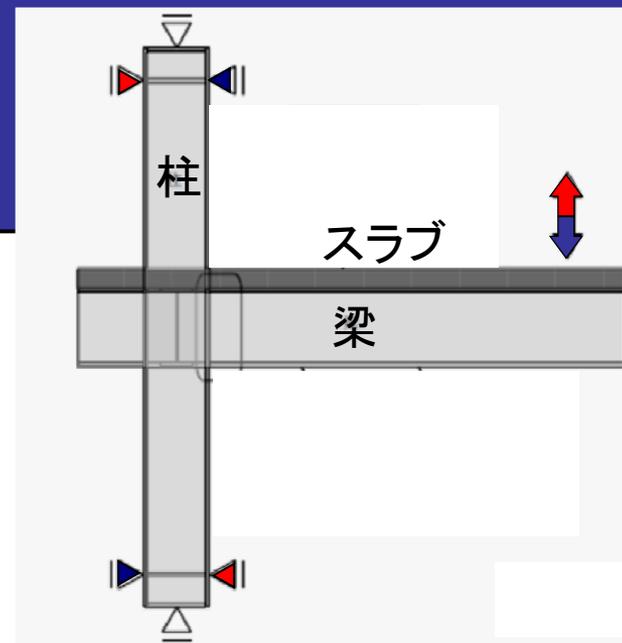
- ・「太平洋沖地震」記録の詳細分析
- ・継続的な地震観測体制の維持



梁の実験



柱の実験



柱梁接合部・部分架構の実験