

27-1 長周期地震動を受ける 鉄筋コンクリート造建築物の 安全性検証方法に関する検討

平成22年4月14日

株式会社大林組

鹿島建設株式会社

株式会社小堀鐸二研究所

清水建設株式会社

株式会社竹中工務店

1. はじめに

【研究目的と項目】

長周期地震動に対する超高層鉄筋コンクリート造建物の安全性検証における，モデル化手法の妥当性を実験的・解析的に検討する．

(イ) 構造実験

平面・立体架構および柱，梁，接合部の部材を対象として，静的載荷実験を行う．

(ロ) 応答評価

応答解析による部材履歴の調査
およびパラメトリックスタディ

(ハ) 建物地震観測

1. はじめに

【研究方針】

(イ) 構造実験

立体架構	} 1/2.5 スケール 既存建物調査を踏まえて、 共通断面，共通材料 (同ロット)の試験体計画
柱梁接合部部材実験	
柱部材実験	
梁部材実験	
平面架構	1/4スケール (20層モデルを想定)

(ロ) 応答評価

実験計画で参照したモデル建物(46層および20層)を対象とした応答解析

2.2 立体部分架構実験



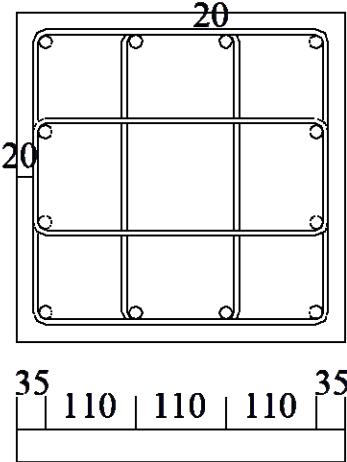
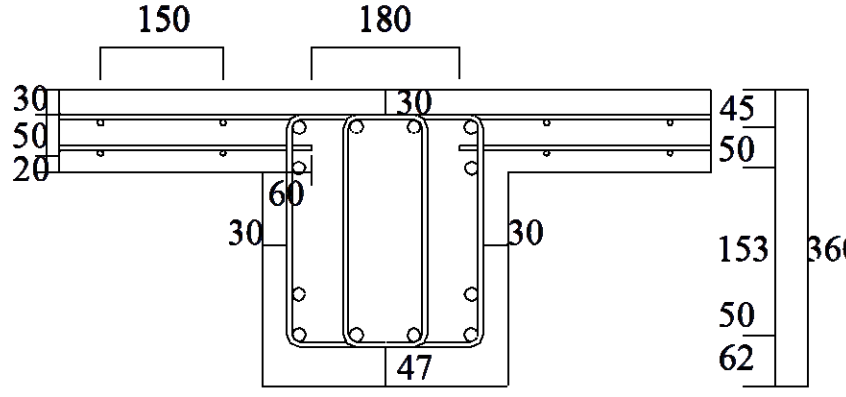
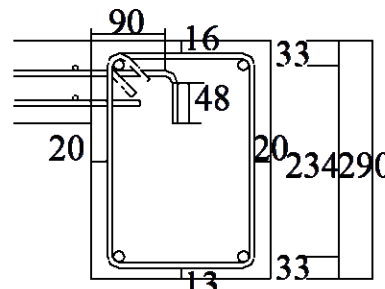
2.2 立体部分架構実験

【概要】

- 超高層RC建物の中間階 内部架構 を想定した 2/5スケール立体部分架構の静的載荷実験
- 全面にスラブ付与，柱脚をピンおよびピンローラー支承とし，架構の応力状態を再現する。
- 非拘束時の梁軸変形，スラブ協力幅の梁降伏型の架構耐力に対する影響を検証する。

2.2 立体部分架構実験

【試験体概要：部材断面】

柱	桁行梁	小梁
 <p>寸法 400×400 主筋 12D16 (SD490) 帯筋 4D6@50 (UHD685)</p>	 <p>寸法 300×360 付帯スラブ (t=100mm) 主筋 12D16 (SD490) 2D6(SD295)@150 帯筋 4D6@75 (UHD685)</p> <p>$P_t = 1.19 (\%)$ $P_w = 0.56 (\%)$</p>	 <p>寸法 220×290 主筋 4D13 (SD295) 帯筋 2D6@75 (SD295)</p>

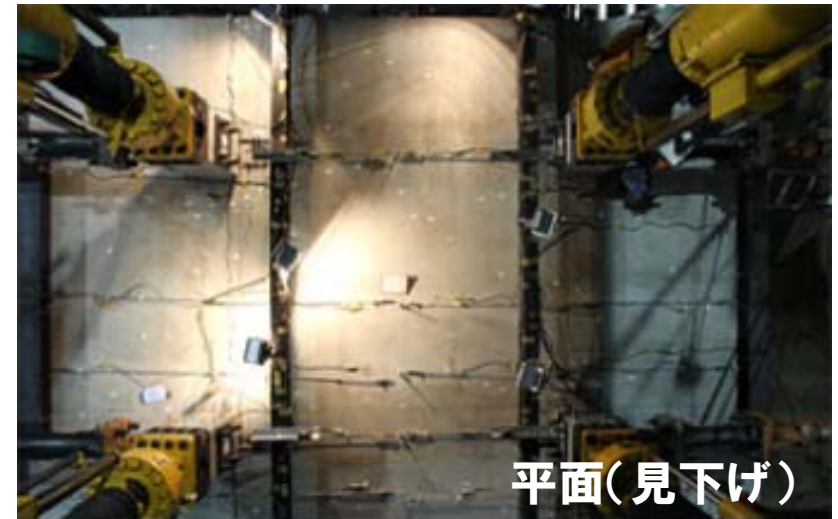
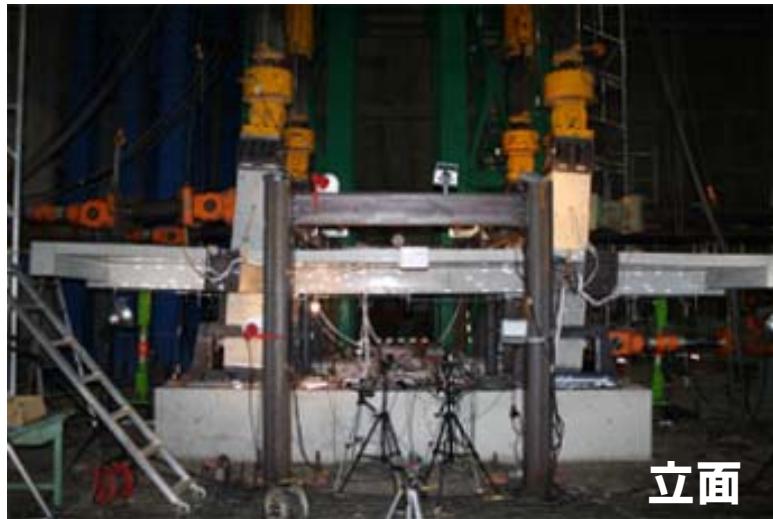
$$P_t = 0.74 (\%)$$

$$P_w = 0.63 (\%)$$

柱・梁断面は他の実験シリーズと共通

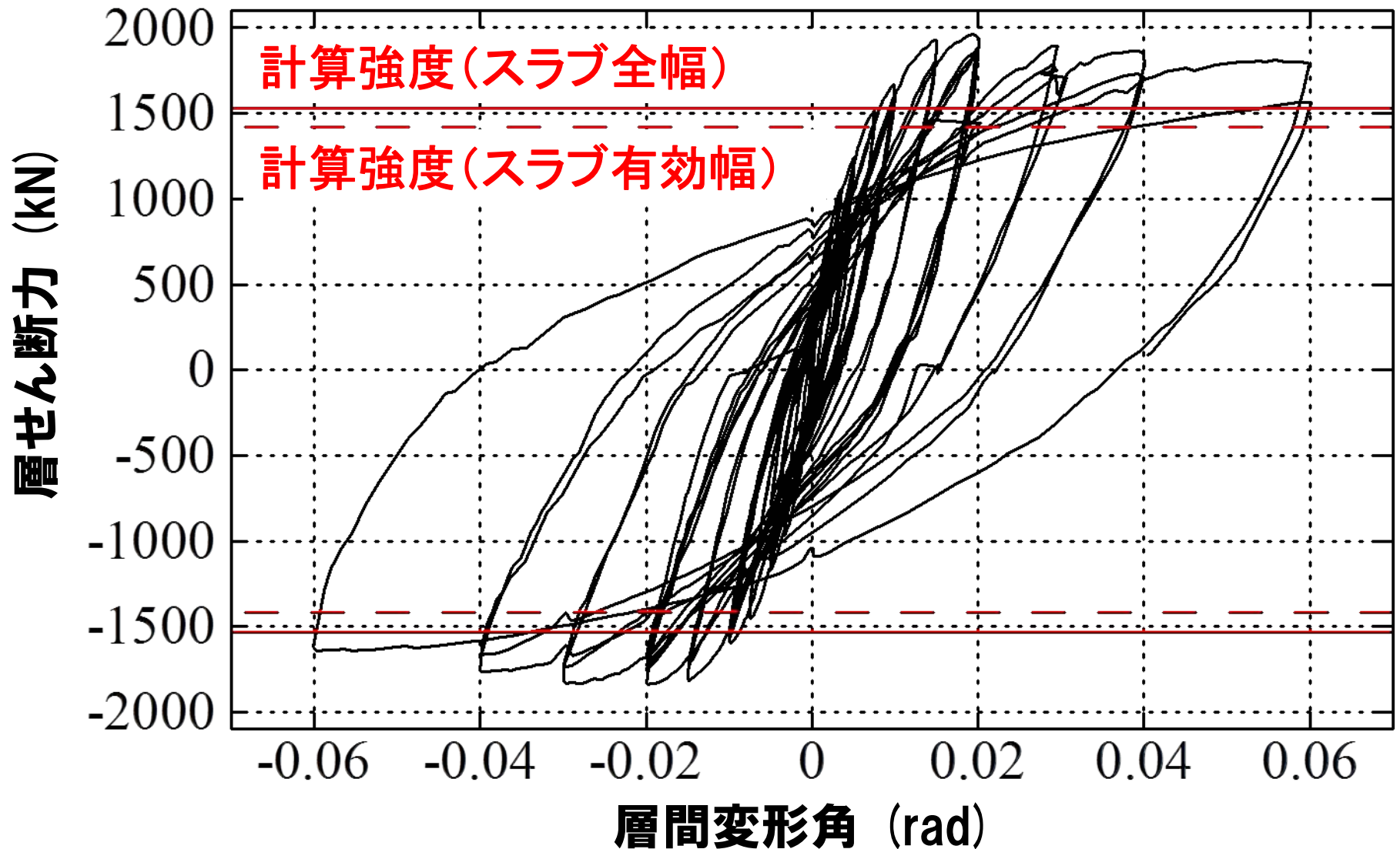
2.2 立体部分架構実験

【加力状況および損傷状況(終局)】



2.2 立体部分架構実験

【実験結果：荷重～変形関係】



2.2 立体部分架構実験

【まとめ】

- **床・梁下端の残留ひび割れ幅が0.2(mm)を超過したのはそれぞれ1/200 (rad), 1/100(rad)であった**
- **最大耐力は変形角1/50(rad)時に1965(kN)であり、これはスラブが全幅寄与する仮定した計算強度1533 (kN)を大幅に上回った**
- **再載荷時の耐力は処女載荷時の約95%であり、繰返し載荷による耐力低下は見られなかった**

2.5 梁部材の静的載荷実験

【実験目的】

主筋の付着劣化の現象を把握

多数回繰り返し載荷による影響の確認

【試験体・実験変数】

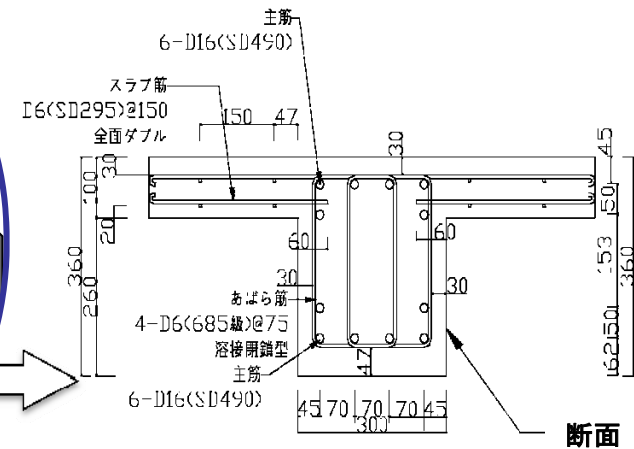
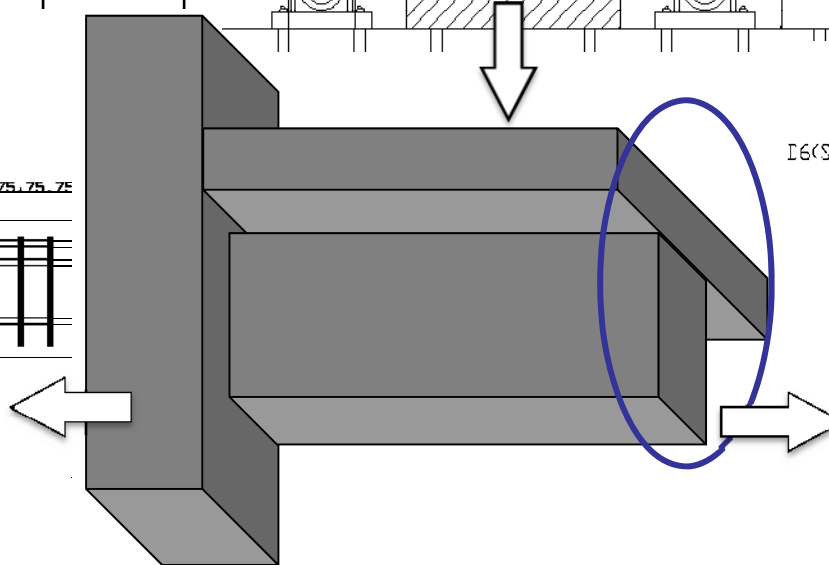
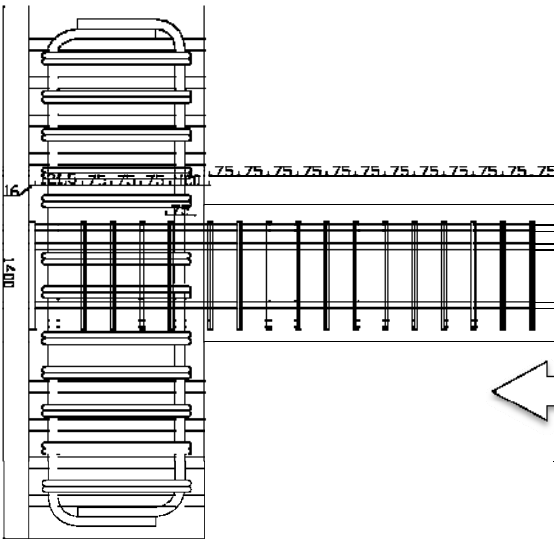
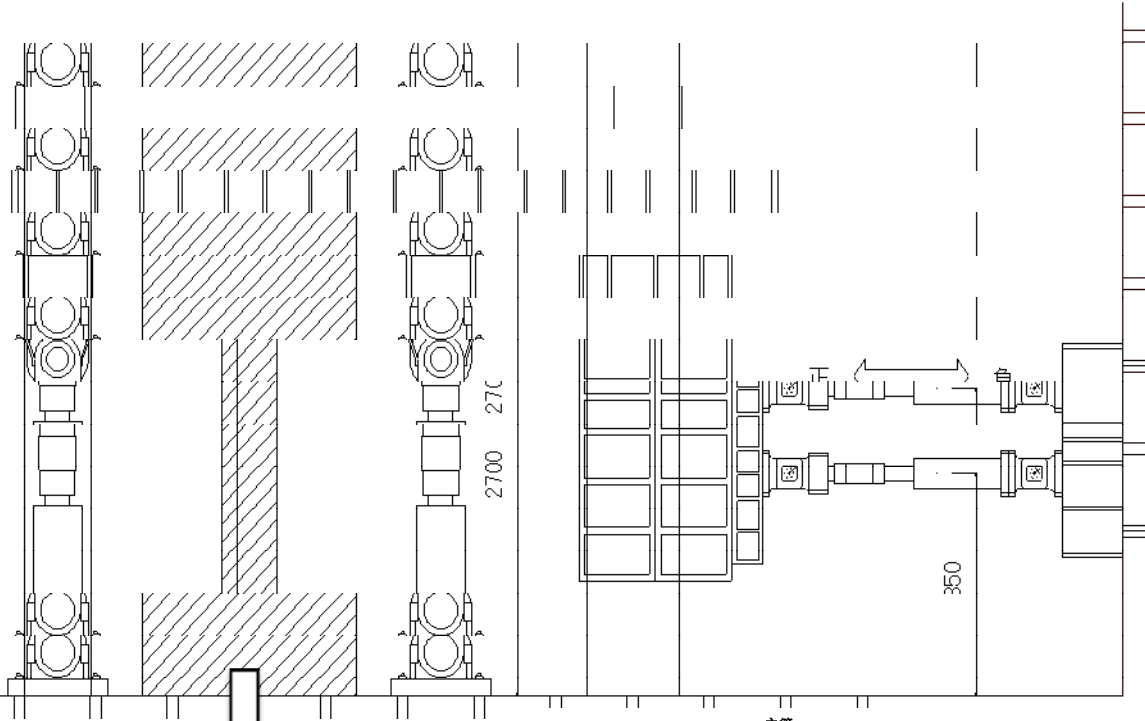
部材スパン(1800mm, 1400mm, 1000mm)

載荷履歴(多数回／標準各2回)

2.5 梁部材の静的載荷実験

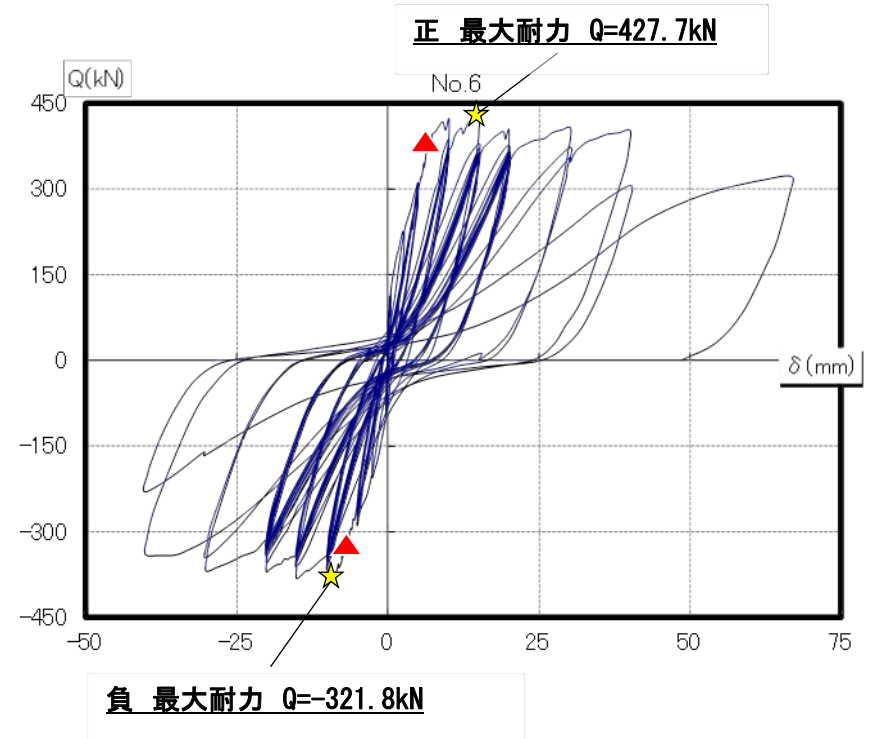
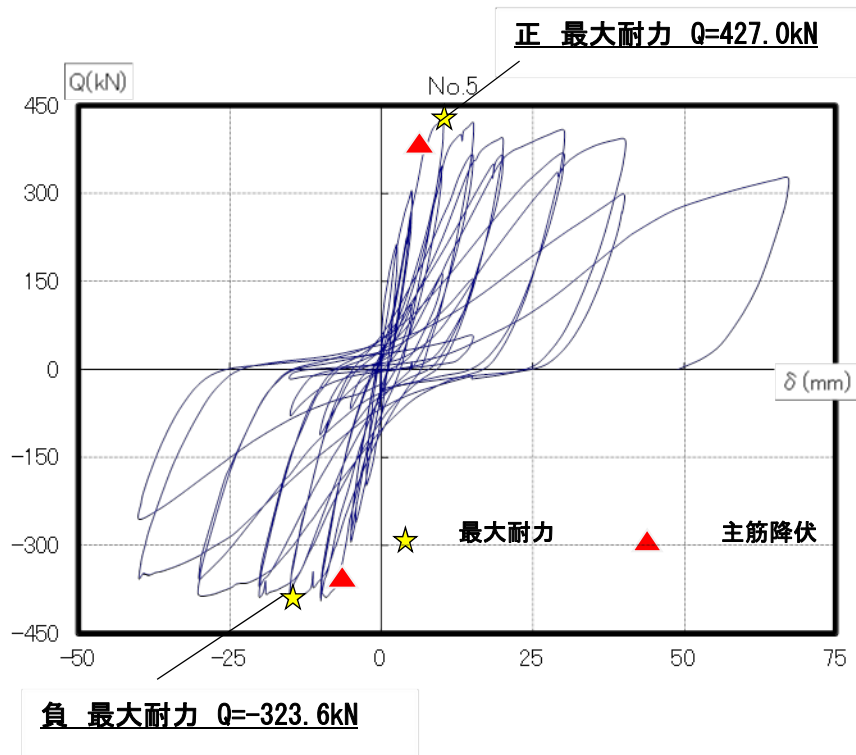
試験体諸元

実験体	TB I		TB II		TB III	
	1	2	3	4	5	6
コンクリート強度 F_c (N/mm ²)	48					
梁幅 b (mm)	300					
梁せい D (mm)	360					
部材スパン L_c (mm)	1800		1400		1000	
主筋 (SD490)	6-D16					
引張鉄筋比 P_t	1.34(%)					
あばら筋 (SHD685)	4-D6@75					
あばら筋比 P_w	0.57(%)					
スラブ筋 (SD295)	全面ダブルD6@150					
加力履歴	標準	長周期	標準	長周期	標準	長周期
付着強度/曲げ強度 V_{bu}/Q_v	1.88		1.46		1.04	



断面

2.5 梁部材の静的載荷実験



【実験結果の総括】

- ・試験体BLは，試験体BNと同等の性能→多数回繰返しの影響無し
- ・同一振幅における最初4サイクルまでは耐力低下を見られたが，5サイクル以降，最終10サイクルまではほぼ同じの耐力を維持

2.6 平面架構の静的載荷実験

【実験目的】

多数回繰り返し載荷による影響の確認

柱・梁部材の和として性状を得ることの確認

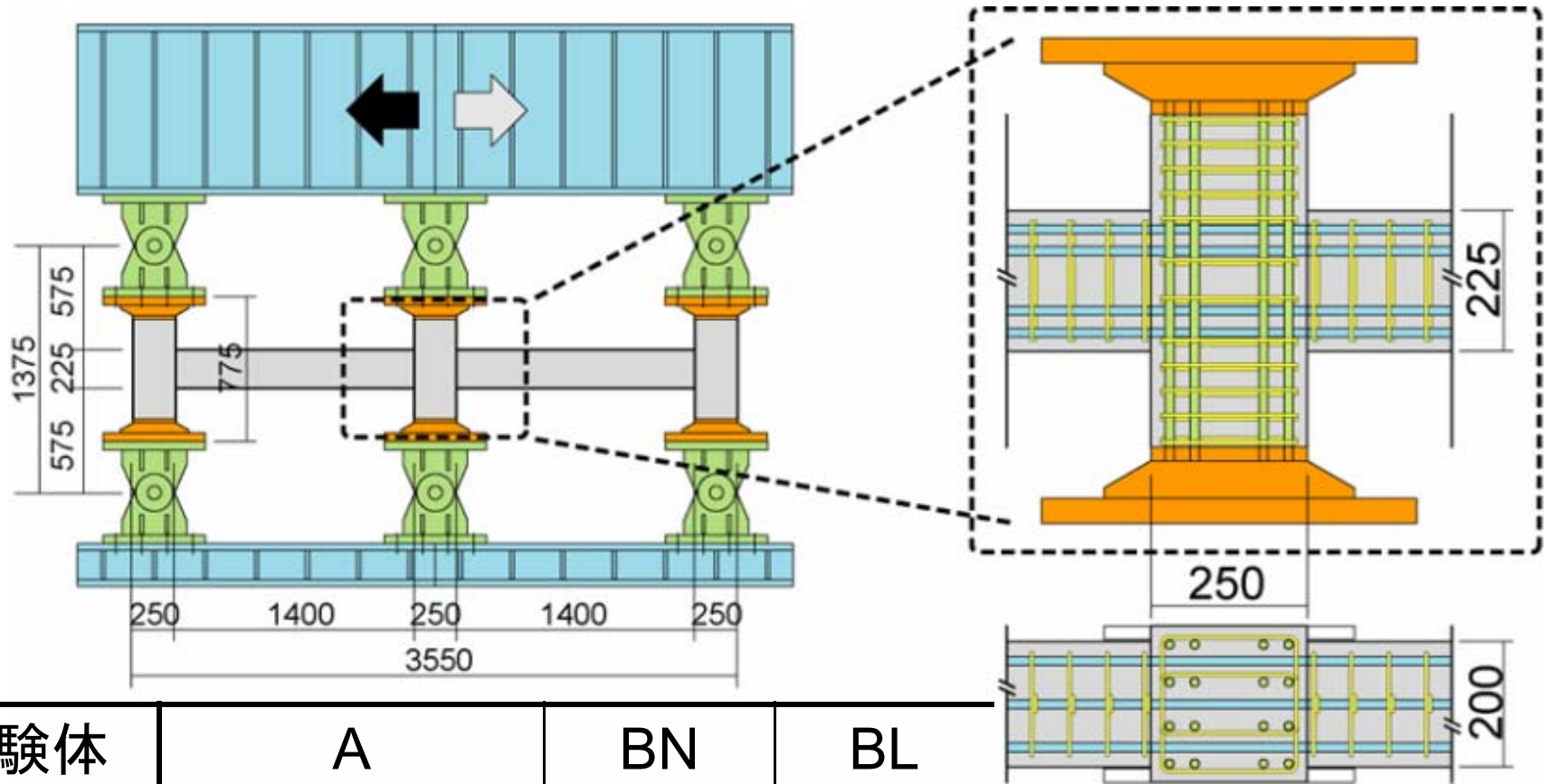
【試験体・実験変数】

1層2スパン架構(2階梁を含む上下階半分)

載荷履歴(多数回／標準各2回)

配筋量(多／少:靱性能向上効果の確認)

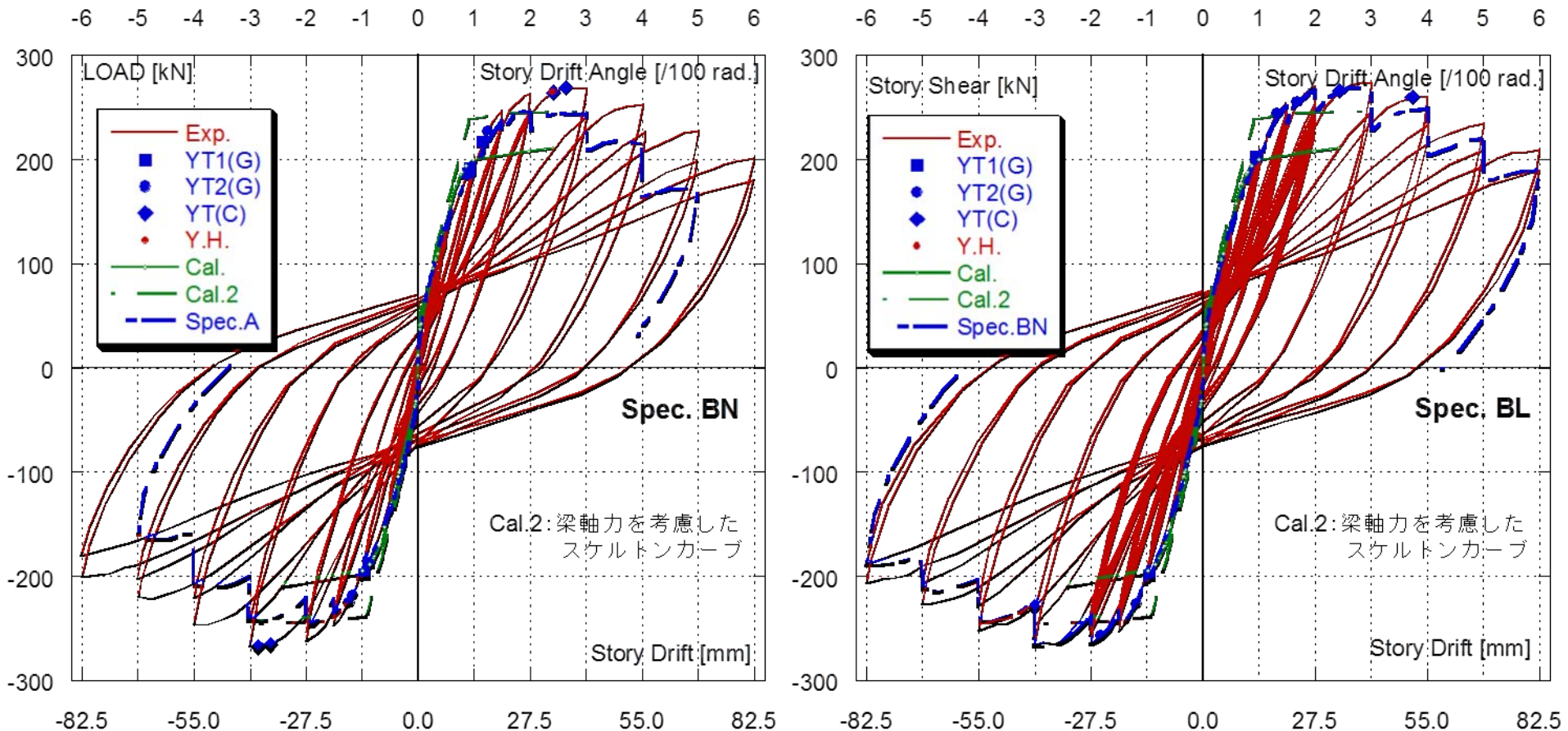
2.6 平面架構の静的載荷実験



試験体	A	BN	BL
柱主筋	8-D13	16-D13	
梁補強筋	2-D6@100	3-D6@60	
載荷履歴	標準各2回繰り返し		多数回

共通・柱: 250 × 250
 補強筋 4-D6@50
 ・梁: 200 × 225
 主筋: 5-D13 上下

2.6 平面架構の静的載荷実験



【実験結果の総括】

- ・試験体BN, BLは, 試験体Aよりも耐力・靱性向上→配筋の効果
- ・試験体BLは, 試験体BNと同等の性能→多数回繰返しの影響無し
- ・スケルトンカーブは, 柱・梁部材の和として評価可能

2.4 柱部材の実験

2.4.1 下層階柱の実験 シリーズ1

2.4.2 中高層階柱の実験 シリーズ2

2.4.1 下層階柱の実験 シリーズ1

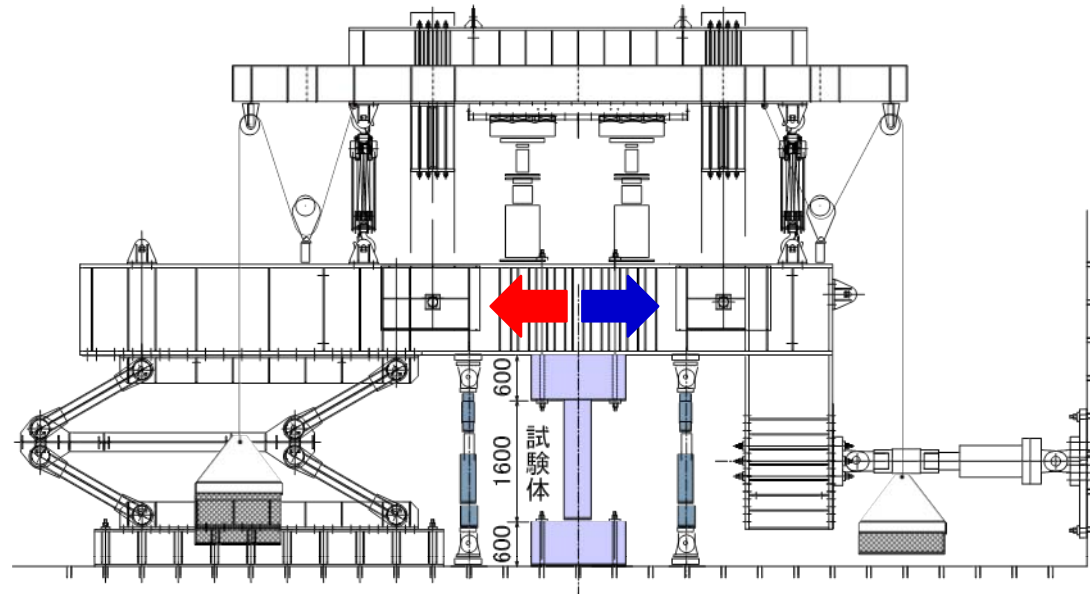
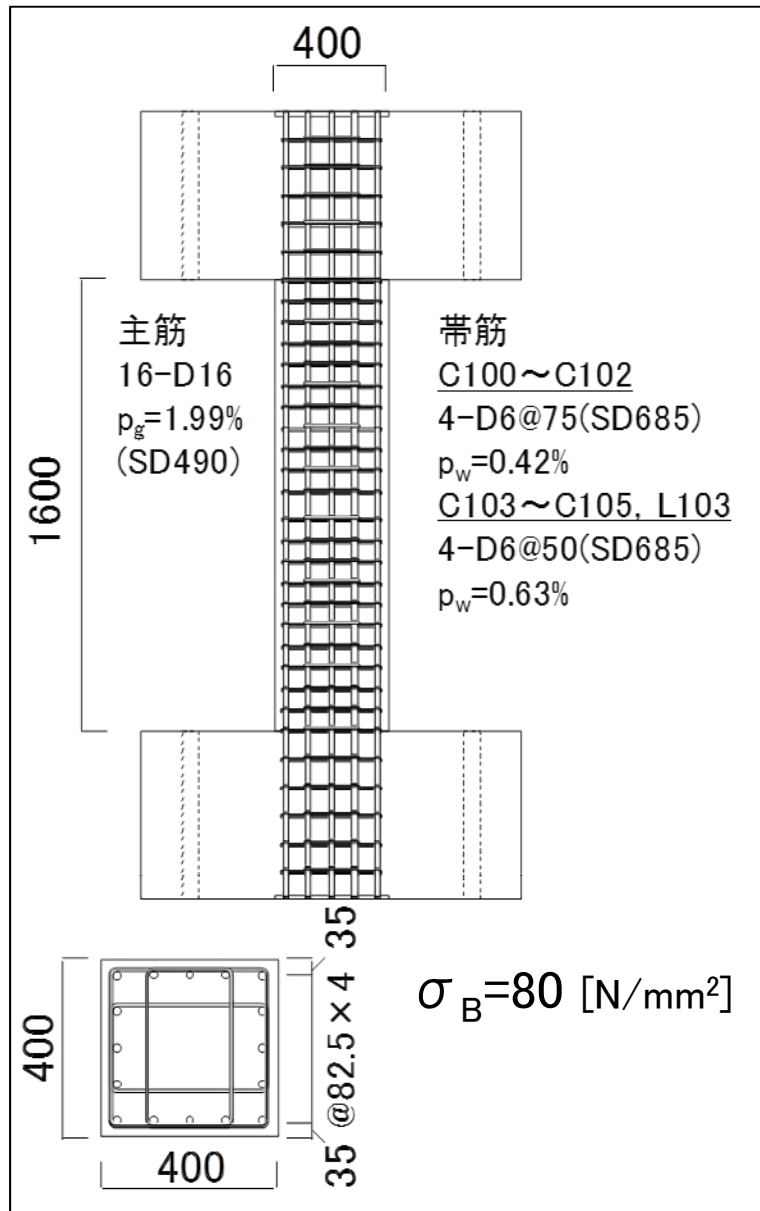
【実験目的】

- 高軸力・変動軸力による影響の確認
- 多数回繰り返し載荷による影響の確認

【試験体・主な実験変数】

- 1/2スケール, $B \times D = 400 \times 400\text{mm}$, $L = 1600\text{mm}$
- ・軸力比 ($\eta: 0.33 / 0.55 / 0.67$)
- ・載荷履歴 (多数回 / 標準各2回)
- ・配筋量 (多 / 少: 靱性能向上効果の確認)

2.4.1 下層階柱の実験 シリーズ1



試験体

C102

C100

C101

小

大

軸力比

0.33

0.55

0.67

試験体

C103

L103

小

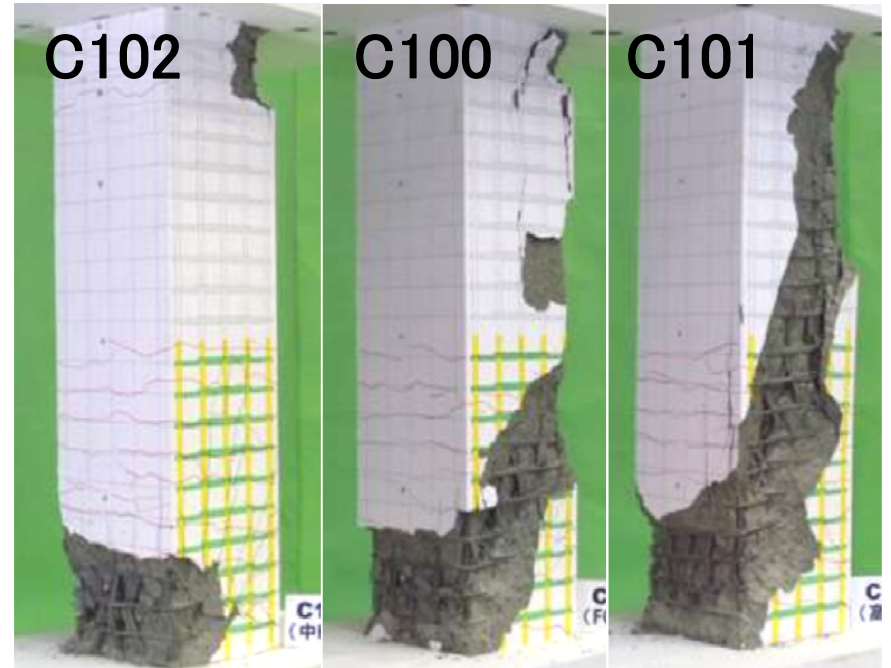
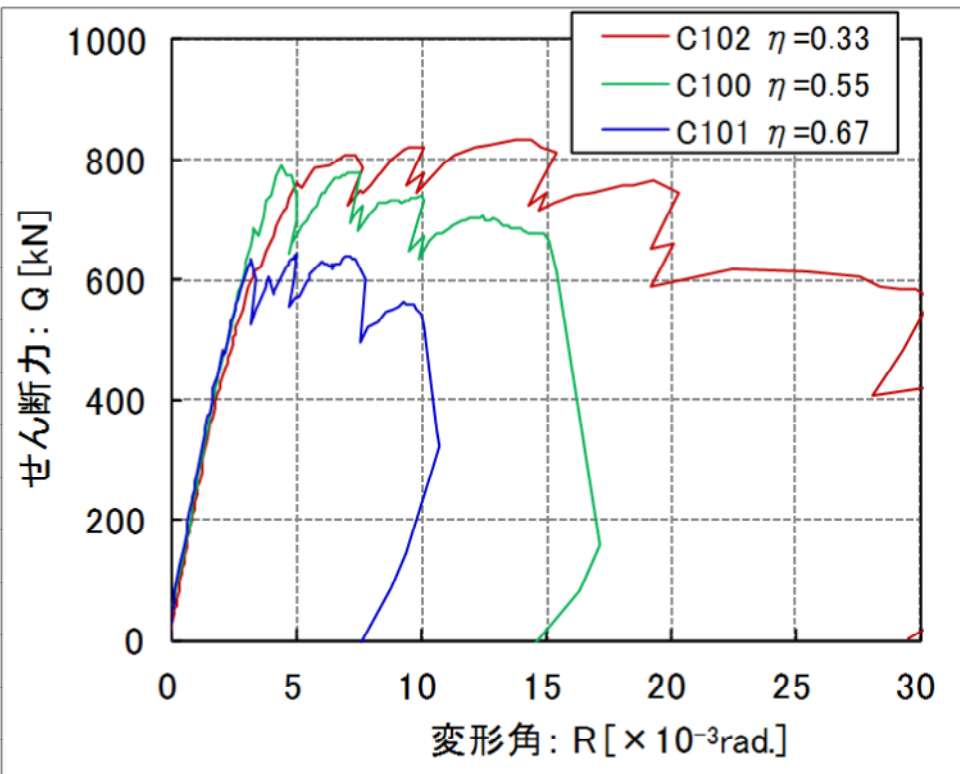
大

載荷回数

2回

10回

2.4.1 下層階柱の実験 シリーズ1



圧壊の損傷が端部から全面に広がる

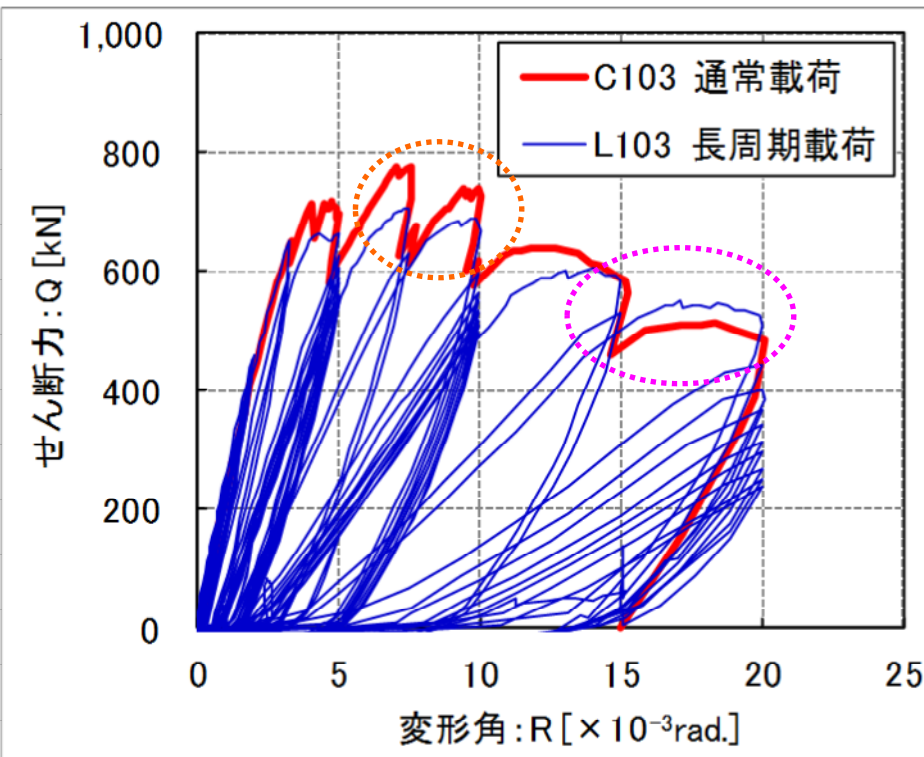
【実験結果の総括】

軸力比が高くなると
→限界変形角が小さくなる

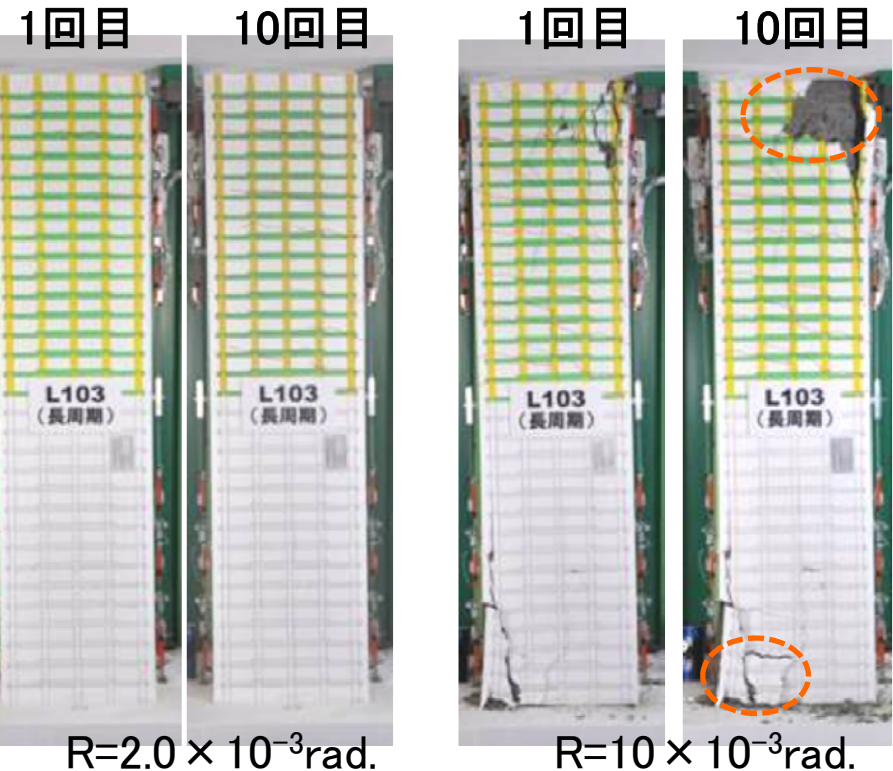
試験体	C102	C100	C101
軸力比	0.33	0.55	0.67

小 大

2.4.1 下層階柱の実験 シリーズ1



L103の繰り返し载荷による損傷状況



【実験結果の総括】

多数回繰り返し载荷により

→ 弾性範囲では損傷に影響なし

→ **最大耐力**に影響, かぶりコンクリートの損傷

→ **限界変形角**に影響を与えない

2.4.2 中高層階柱の実験 シリーズ2

【実験目的】

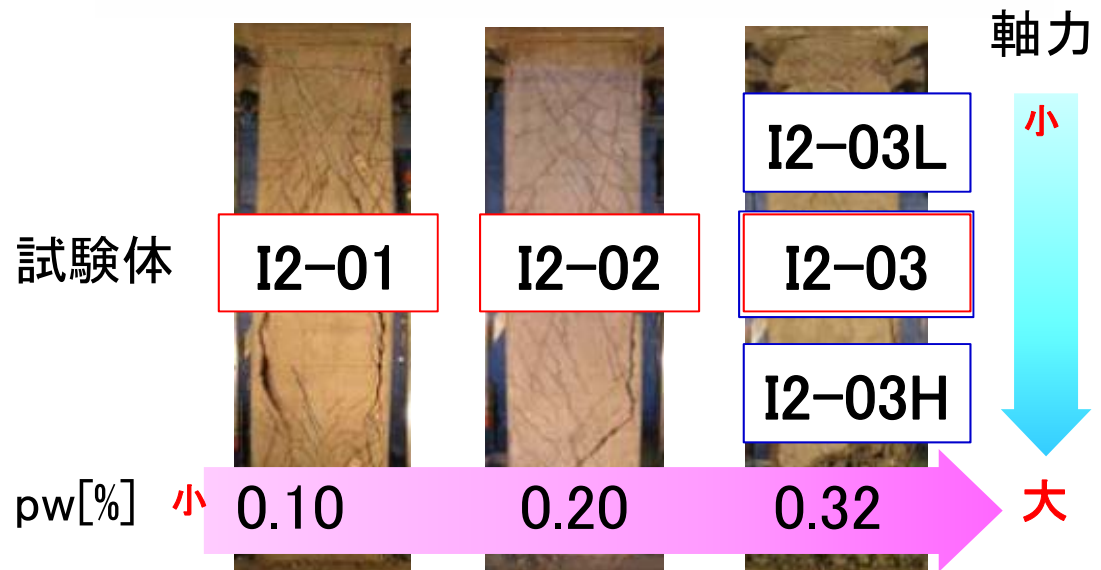
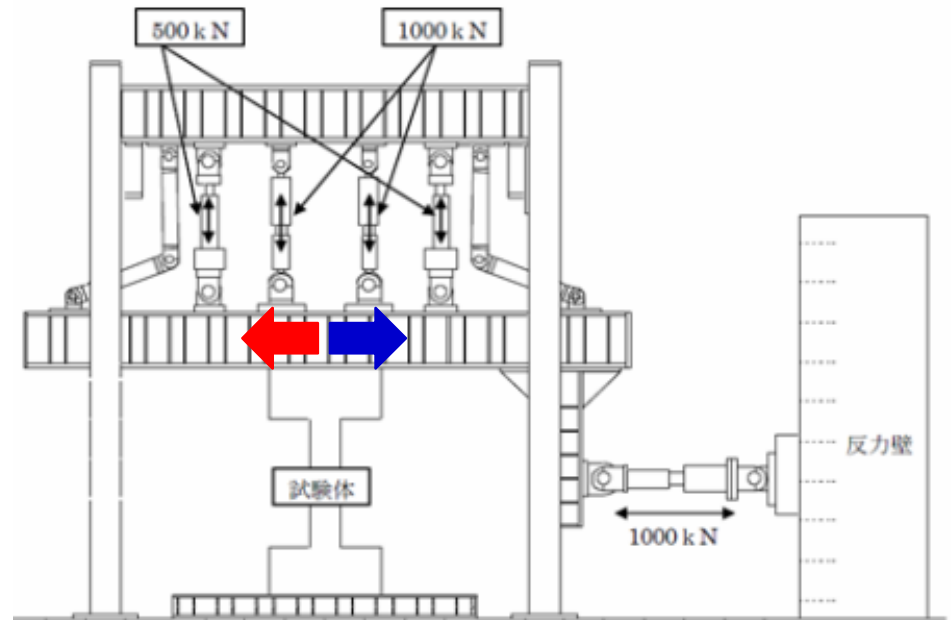
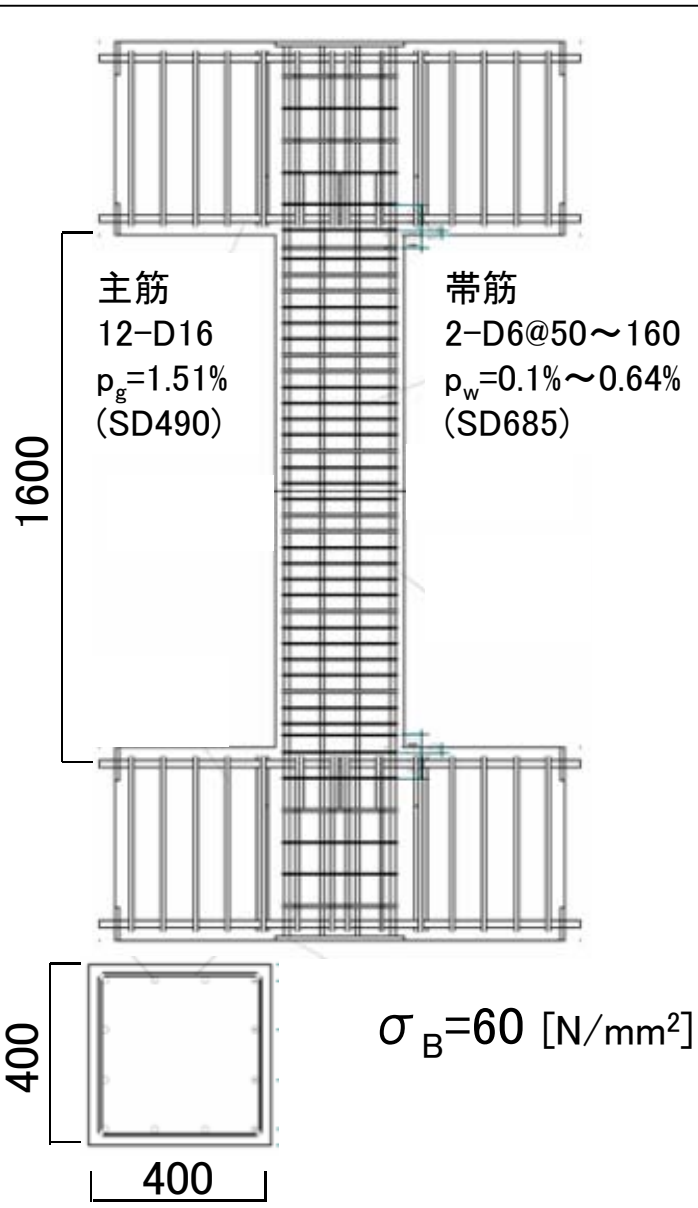
既往の耐震性能評価手法の適合性の確認
損傷量評価手法の提案

【試験体・主な実験変数】

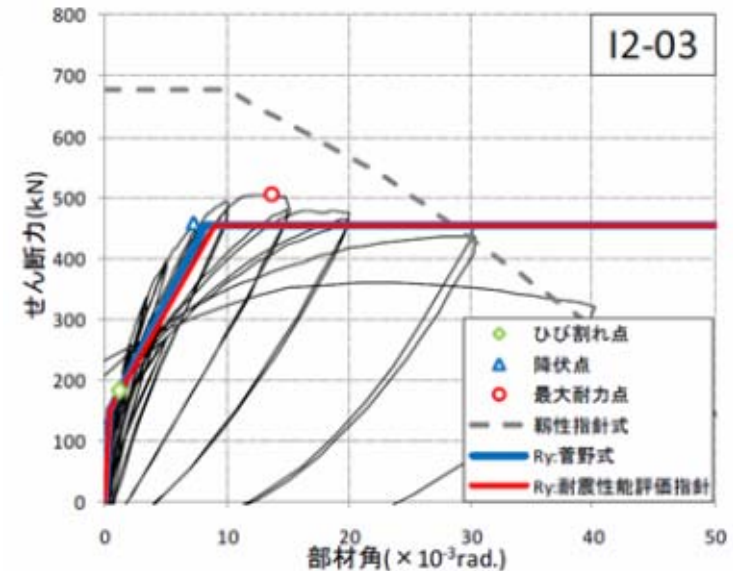
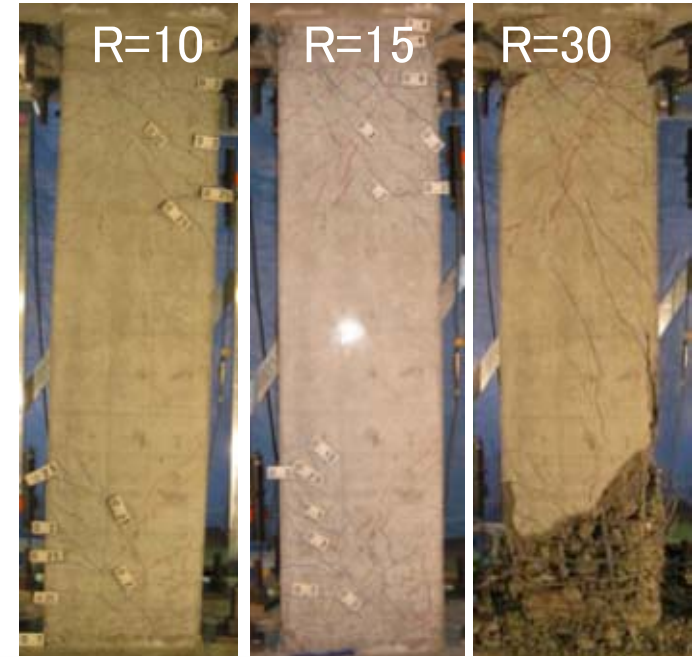
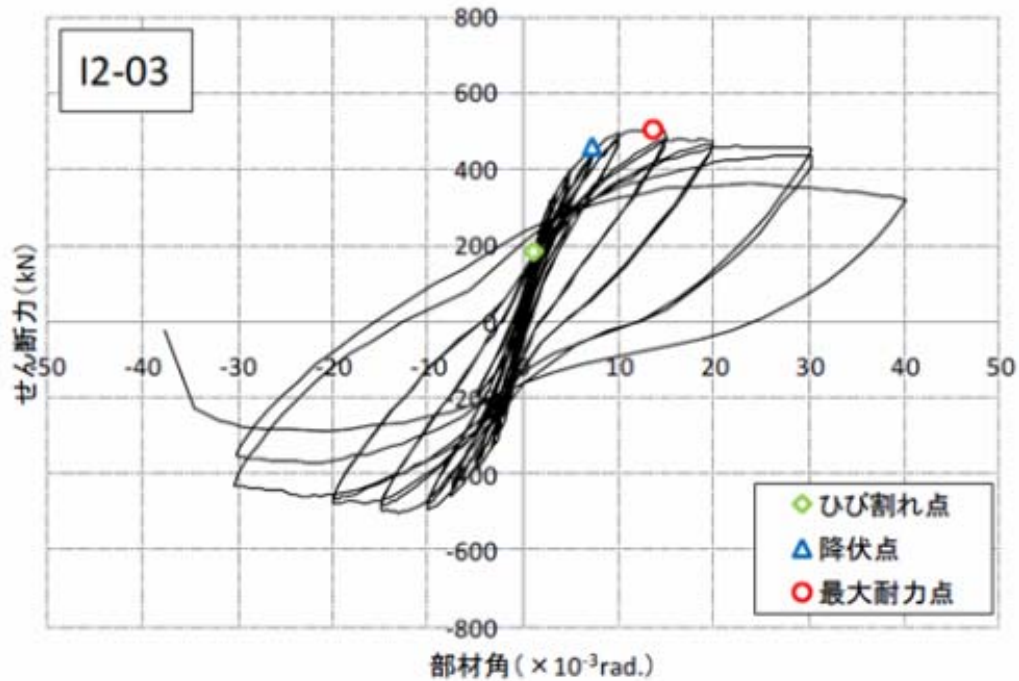
1/2スケール, $B \times D = 400 \times 400\text{mm}$, $L = 1600\text{mm}$

- ・軸力比 (η : 0 / 0.125 / 0.25)
- ・シアスパン比 (2.0 / 1.25)
- ・配筋量 p_w (p_w [%]: 0.1 ~ 0.64)

2.4.2 中高層階柱の実験 シリーズ2



2.4.2 中高層階柱の実験 シリーズ2



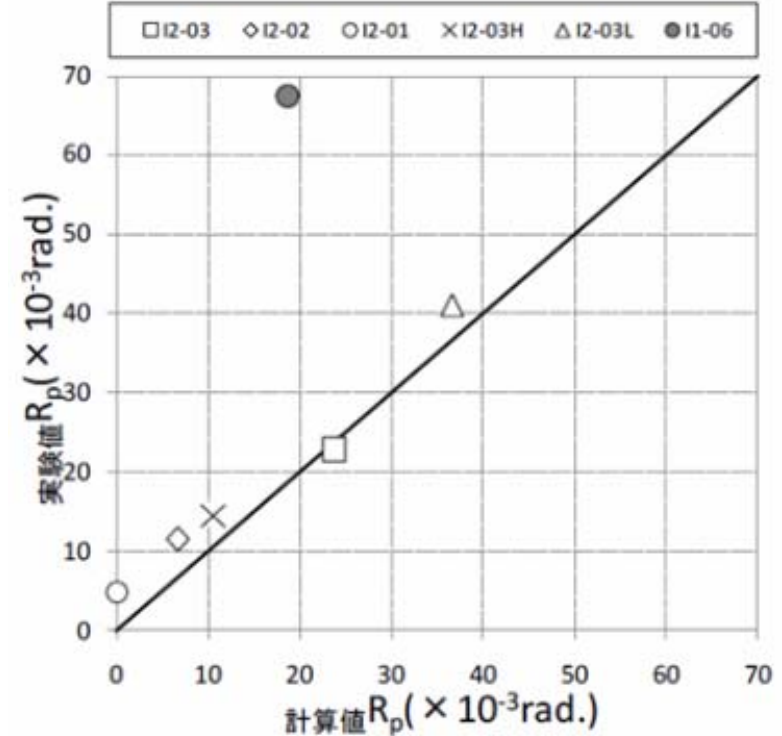
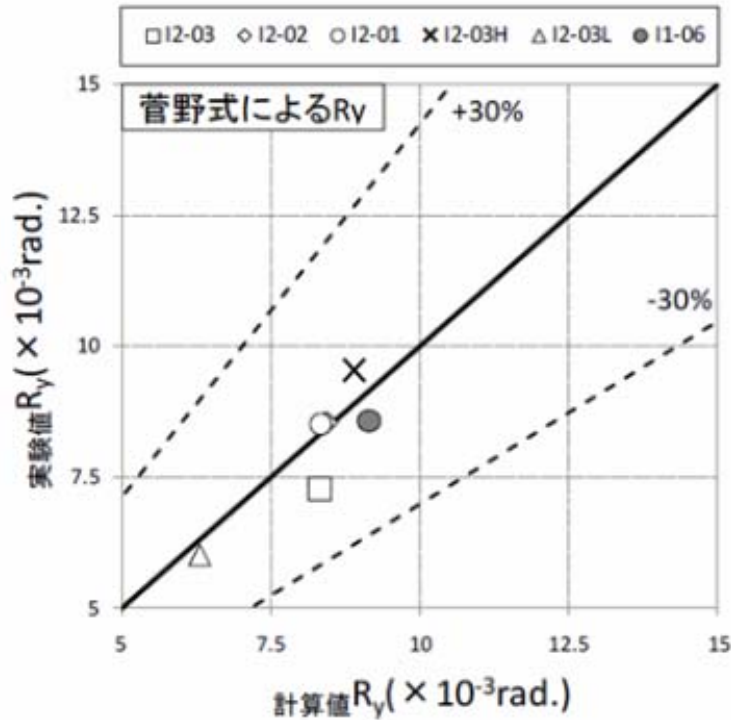
【実験結果の総括】

横補強筋量を因子とした実験の実施

→ 靱性能の向上を確認

→ 評価手法の妥当性を確認

2.4.2 中高層階柱の実験 シリーズ2



【実験結果の総括】

既往の評価法で降伏変形，塑性変形能力を評価できることを確認
 (菅野式, AIJ性能評価指針式, AIJ靱性指針式)

2.3 柱梁接合部を含む部分架構実験

【実験目的】

- 柱梁曲げ耐力比がRC造柱梁接合部の性能に与える影響
- 繰り返し载荷下の接合部材の損傷状況（限界性能）の検討

【試験体・実験変数】

- 柱梁接合部（十字形・ト字形）を含む**10体**の部分架構試験体
- 実験変数

柱梁曲げ耐力比 (2.4/1.9/1.5/2.5)

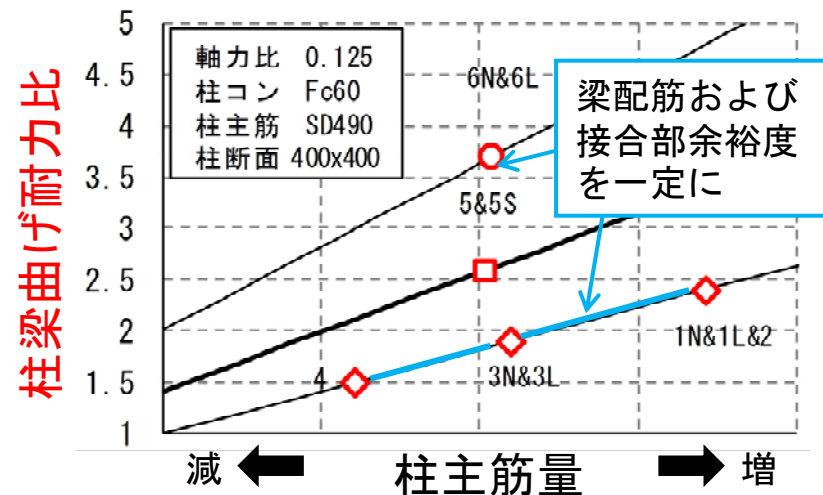
载荷履歴 (多数回/通常2回)

軸力と試験体形状 (十字形/ト字形)

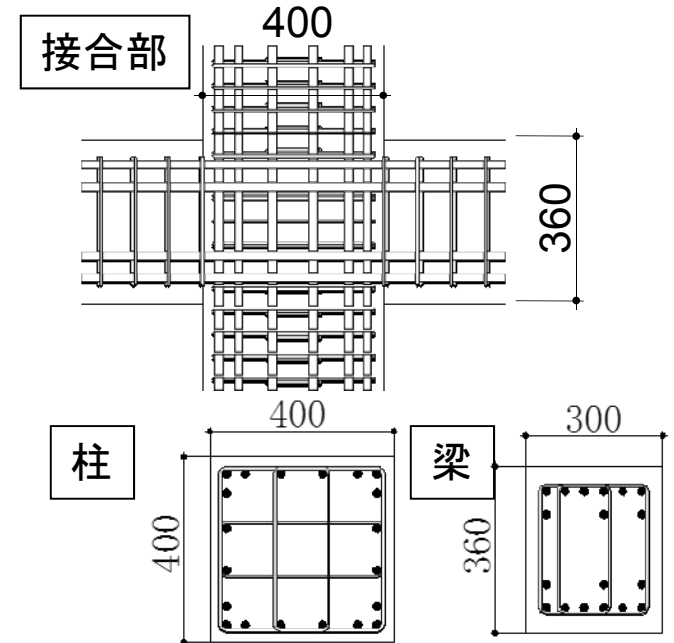
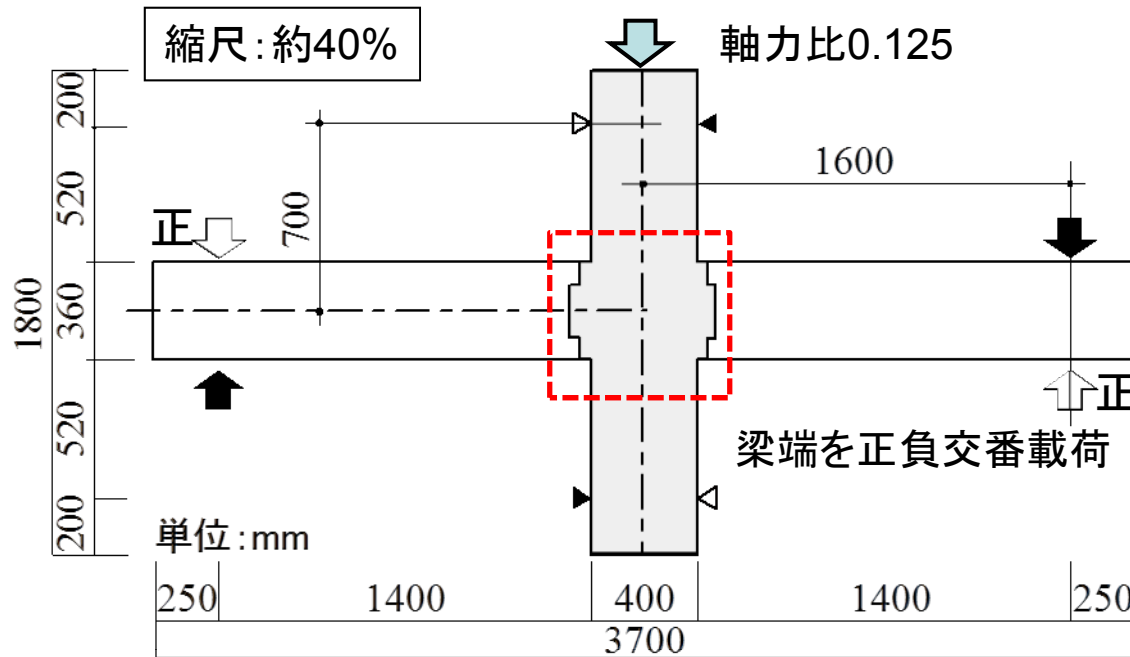
梁の上下配筋量 (均等/不均等)

接合部せん断余裕度 (1.5/2.5)

スラブ・直交梁 (あり/なし)



2.3 柱梁接合部を含む部分架構実験



試験体	十字形			ト字形	十字形
	1N/1L* ¹	3N/3L* ¹	4	6N/6L* ¹	5/5S* ²
梁主筋	9-D16				6-D16
柱主筋	20-D16	12-D16	6-D16	12-D16	12-D16
軸力比	0.125			0~0.3	0.125
接合部余裕度	1.5			1.6	2.5
柱梁耐力比	2.4	1.9	1.5	2.2~5.0	約2.5

※1 多数回加力
 ※2 直交梁・スラブ付

共通

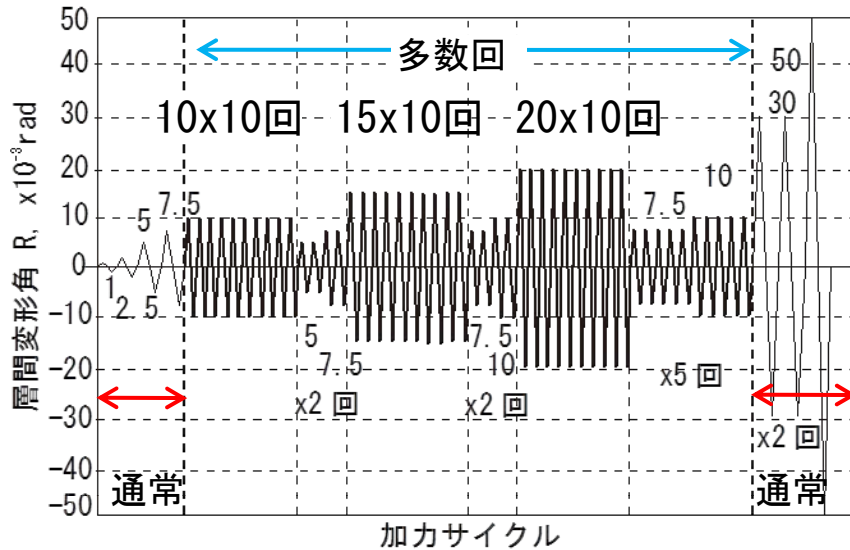
・柱断面: 400 × 400

・梁断面: 300 × 360

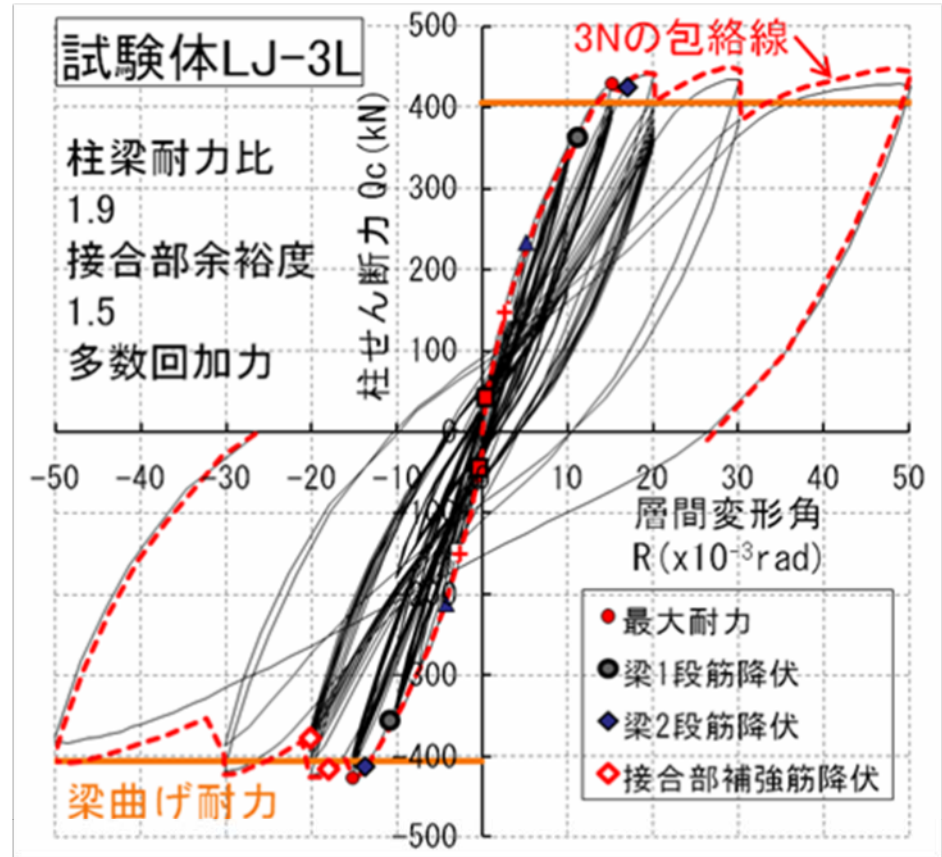
・接合部補強筋:

5組-2-S6($p_w=0.36\%$)

2.3 柱梁接合部を含む部分架構実験



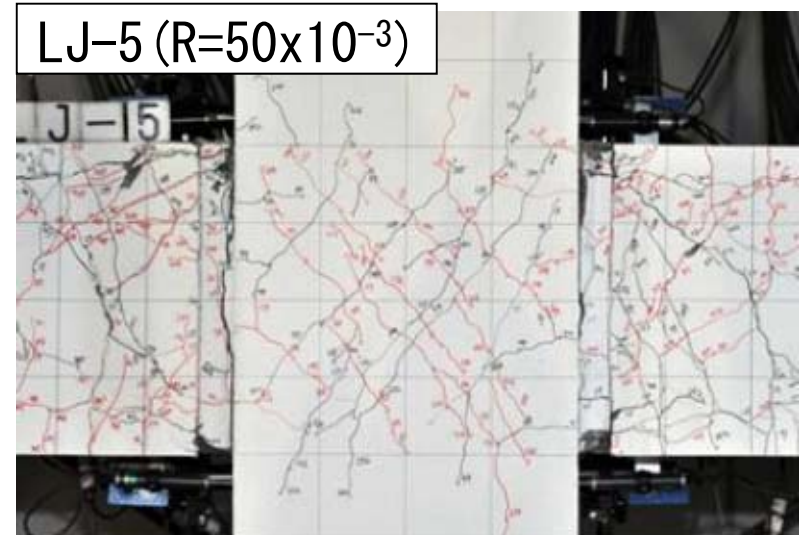
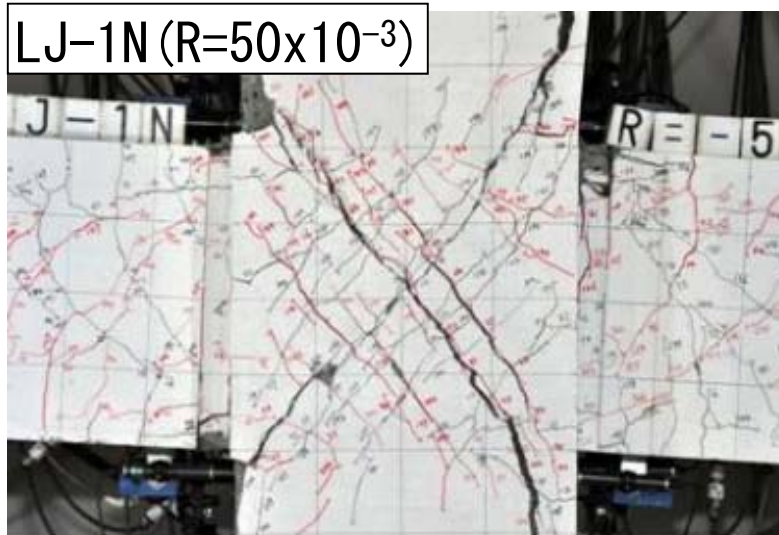
多数回加力の载荷履歴



【荷重－変形関係 まとめ】

- ・ 柱梁曲げ耐力比 1.5以上, 接合部せん断余裕度 1.5以上
 ➡ 梁降伏が先行, 最大荷重は梁曲げ降伏耐力を上回る
- ・ 柱梁曲げ耐力比 2.2以上 ➡ 多数回加力の影響なし
 1.9程度 ➡ $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時は影響あり

2.3 柱梁接合部を含む部分架構実験



柱梁曲げ耐力比 2.4
接合部余裕度 1.5

柱梁曲げ耐力比 2.7
接合部余裕度 2.5

【接合部の損傷状況 まとめ】

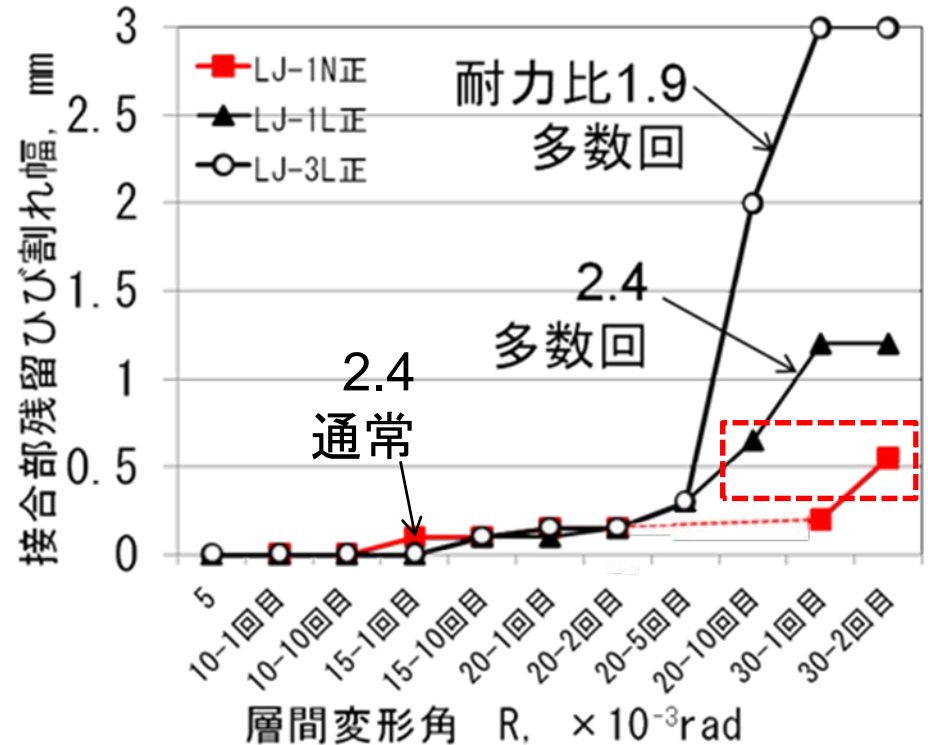
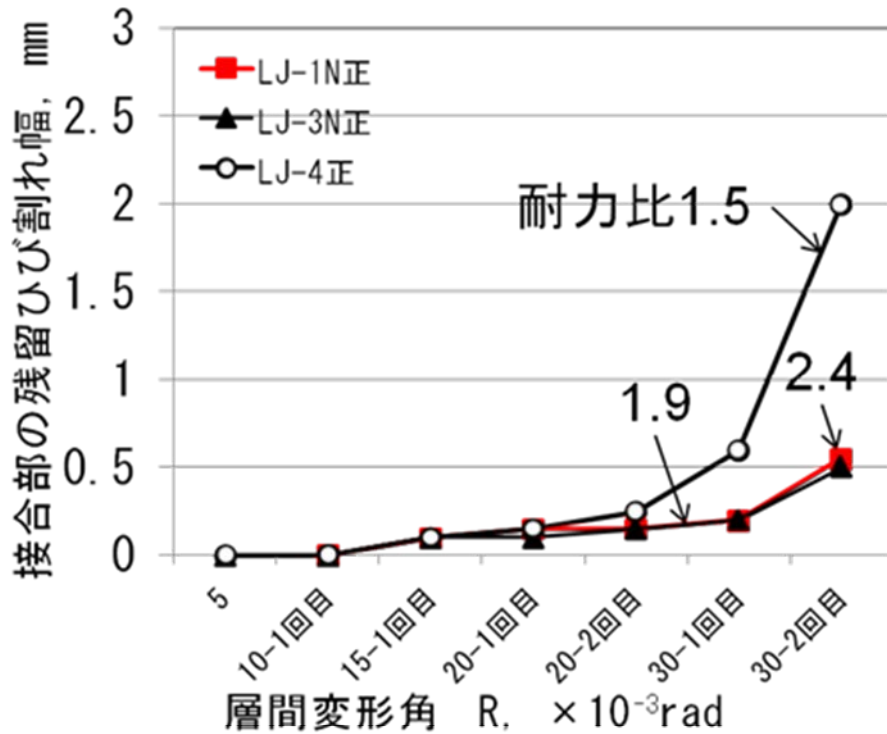
- ・十字形かつ柱梁曲げ耐力比 1.5以上

接合部せん断余裕度 約1.5 ➡ 接合部の損傷が進行

約2.5 ➡ 接合部は最終加力まで健全

- ・ト字形かつ柱梁曲げ耐力比 2.2(低軸力側) ➡ 接合部の損傷が進行
5.0(高軸力側) ➡ 最終加力まで健全

2.3 柱梁接合部を含む部分架構実験



【接合部の残留ひび割れ幅 まとめ】

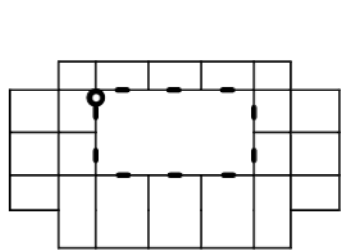
- ・十字形かつ接合部せん断余裕度 1.5程度
- 通常加力 : 柱梁曲げ耐力比 約1.5 > 1.9, 2.4
- 多数回加力 : 柱梁曲げ耐力比 約1.9 > 2.4
- ・多数回の $R=20 \times 10^{-3}$ 10回目 \doteq 通常の $R=30 \times 10^{-3}$ 2回目

3. RC造超高層建物の地震応答解析

【内容と目的】

- 3.1長周期地震動を受けるRC超高層建物の構造部材の部材角レベルと繰返し回数の評価
→多数回繰返し実験の載荷パターンの参考とする
- 3.2解析モデルに用いるパラメータが応答に及ぼす影響度の検討
→技術資料として取り纏め、構造設計者の工学的な判断および指定性能評価機関の審査に資する

3.1 長周期地震動に対する超高層RC建物の応答解析



平面 28 × 46m

高さ 163m

階数 46階

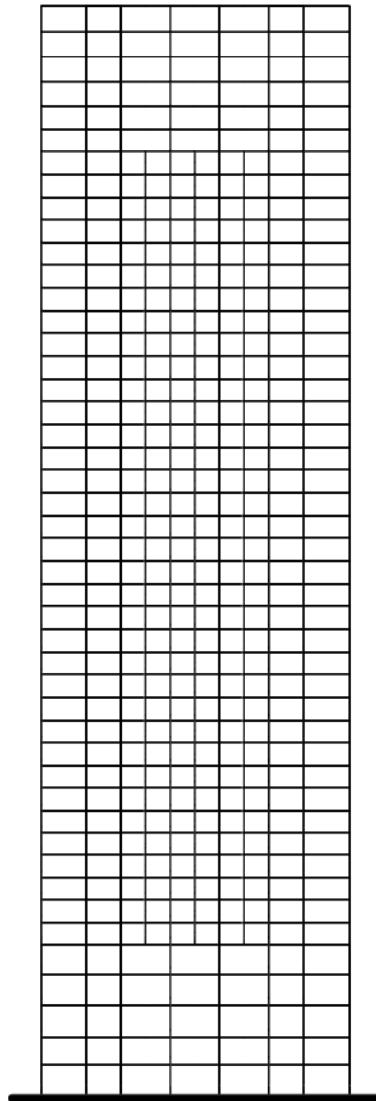
制震 間柱型せ

ん断パネル

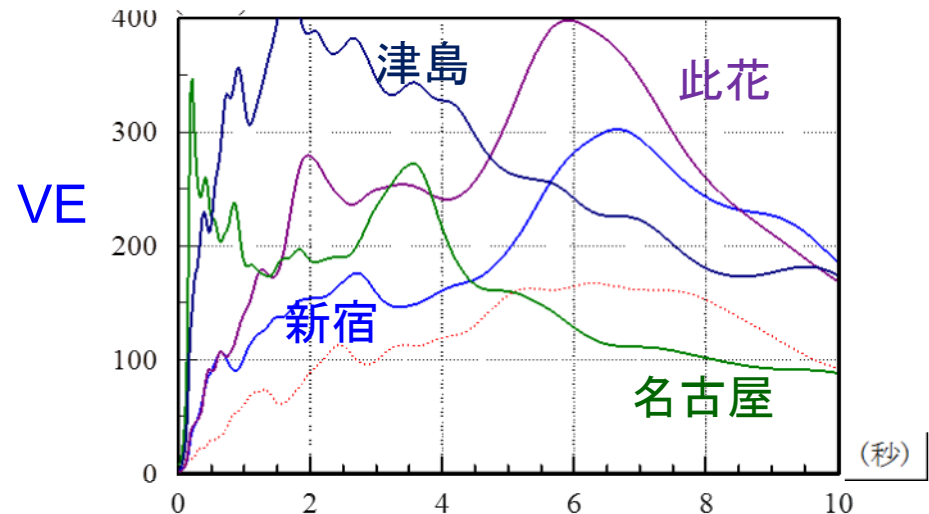
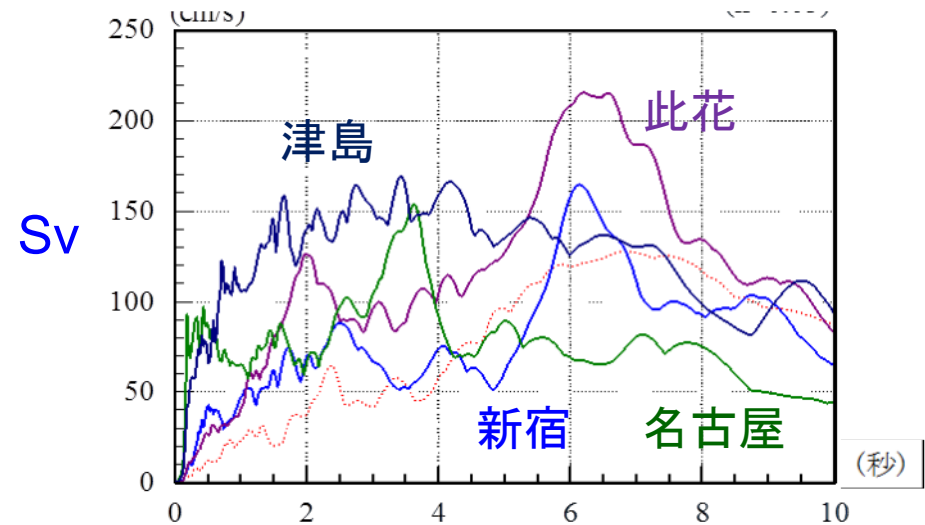
1次固有周期

長辺 3.0秒

短辺 3.9秒

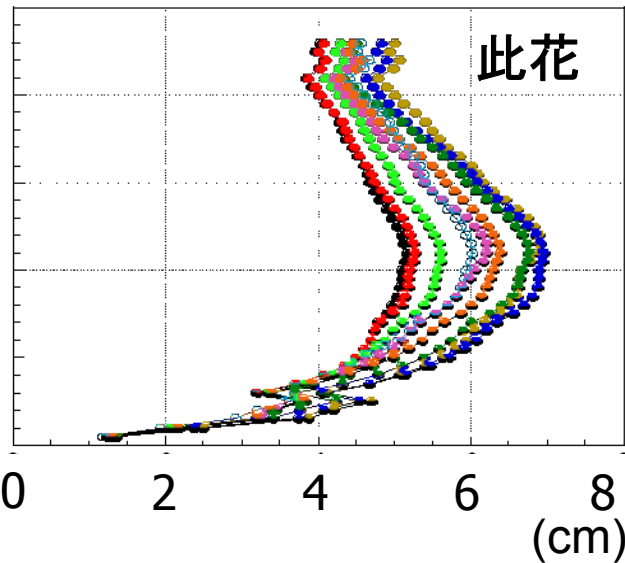
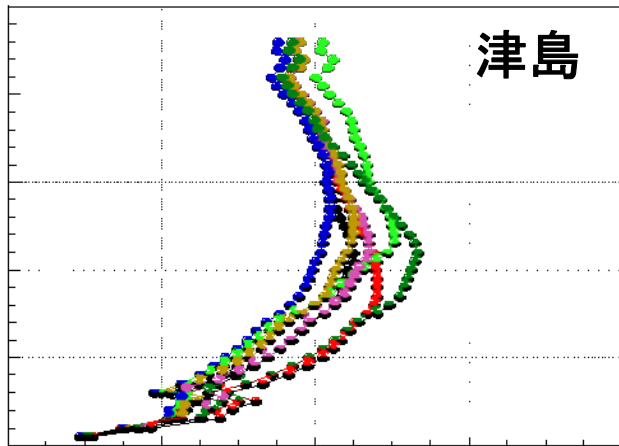


解析対象建物モデル

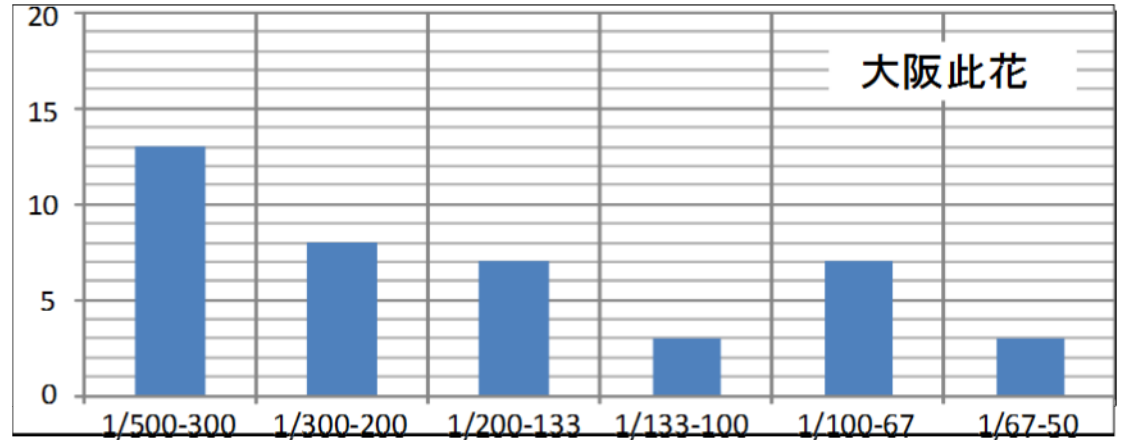


東海・東南海連動入力波(平均+ σ レベル)
(国交省基準整備促進事業2009年度成果)

応答解析結果



最大層間変位の例
(時間刻みを変えてパラスタ)



梁部材端部回転角の頻度分布図の例

	1/50- 1/67	1/67- 1/100	1/100- 1/133	1/133- 1/200	1/200- 1/300
模擬波 平均	0	0~3	0~6	2~10	2~10
模擬波 平均+ σ	0~3	2~10	2~11	4~15	2~16

梁部材端部回転角の頻度分布(単位:回)

3.2 モデル化が応答に及ぼす影響の検討

◆解析対象モデル建物: 20階建てRC純ラーメン

◆パラメータの設定

□設定方針

評価式の根拠となっている実験結果の分布が正規分布に従うと仮定し

±σの変動幅を考慮

□パラメータの設定値

①部材の復元力特性

初期剛性	平均 $E \pm \sigma = (1 \pm 0.1) E$
曲げひび割れ	平均 $c\sigma_t \pm \sigma = (1 \pm 0.5) c\sigma_t$
曲げ降伏	平均 $M_y \pm \sigma = (1 \pm 0.15) M_y$
剛性低下率	平均 $\alpha_y \pm \sigma = (1 \pm 0.2) \alpha_y$

②履歴特性

武田モデル、武藤モデル、剛性劣化モデル2種の計4種類

③減衰 瞬間剛性比例型、レーリー減衰の2種類

◆入力地震動 告示波3波原波、および振幅1.5倍

応答解析結果(告示波原波入力時)

パラメータ		頂部最大 加速度(Gal)	最大 層間変形角	部材塑性率
基本モデル		515	1/127	1.21
①復元力特性 a)ヤング係数 b)第一折点強度	- σ	502 (0.98)	1/111 (1.14)	1.25 (1.04)
	+ σ	491 (0.95)	1/148 (0.85)	1.04 (0.86)
c)第二折点強度	- σ	445 (0.86)	1/110 (1.15)	1.39 (1.15)
	+ σ	525 (1.02)	1/133 (0.95)	1.12 (0.93)
d)剛性低下率	- σ	440 (0.85)	1/106 (1.20)	1.14 (0.84)
	+ σ	526 (1.02)	1/132 (0.96)	1.42 (1.18)
②履歴特性	建研モデル	527 (1.02)	1/95 (1.34)	1.62 (1.35)
	鹿島モデル	517 (1.00)	1/121 (1.05)	1.23 (1.02)
	武藤モデル	519 (1.01)	1/99 (1.29)	1.66 (1.38)
③減衰	Rayleigh減衰	679 (1.32)	1/132 (0.96)	1.18 (0.98)

()内は基本モデルとの比、**青字**は10%以上、**赤字**は25%以上応答値が変動するもの

まとめ

① 梁部材角の繰返し回数

建物共振時には、**1/100**を超える部材角が**10回以上**繰返される可能性がある

② 解析パラメータの応答への影響度

- ・告示波原波入力時に、**層間変形角**が**10%以上**変動するパラメータは、 **E** と **$c\sigma_t(\pm\sigma)$** 、 **$My(-\sigma)$** 、 **$\alpha y(-\sigma)$**
- ・**塑性率**に影響が大きいのは **My** と **αy** 、これはいずれのパラメータも塑性率の起点となる変位が変わるため

4. 地震観測

【実施目的】

RC造建築物の長周期地震動に対する安全性検証に資する資料を得ることを目的として、既存建物において地震観測を行う。

【観測対象の選定】

建物A: 江東区, SRC造, 地上32階

建物B: 名古屋市, RC造, 地上25階

	7月・8月・9月・10月・11月・12月	1月・2月・3月
	—————→ 建物選定～観測装置設置	●—————→ 観測開始(~3/31) 3/9 三陸沖地震 3/11東北地方太平洋沖地震 3/15 静岡県東部地震

5. 建物実験計画

次年度以降の実施計画を検討

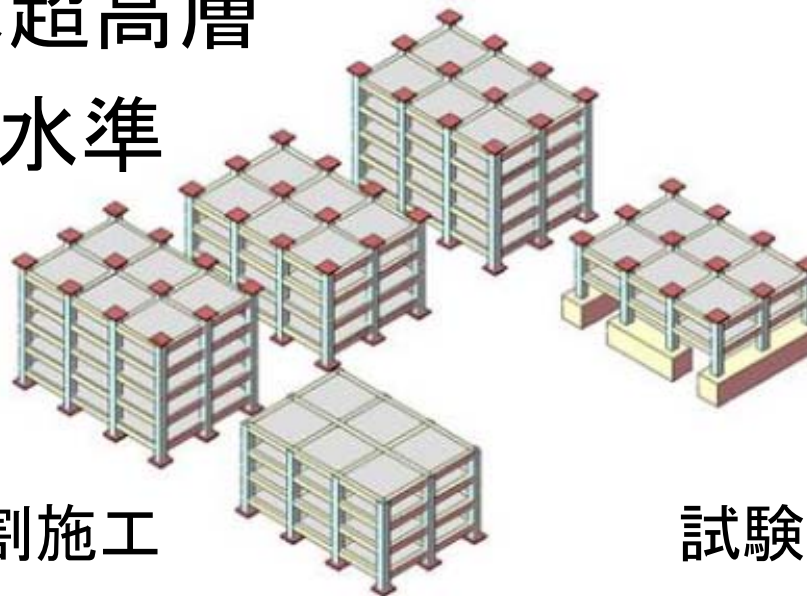
【計画概要】

1/4スケール, 20層(高さ約16m)

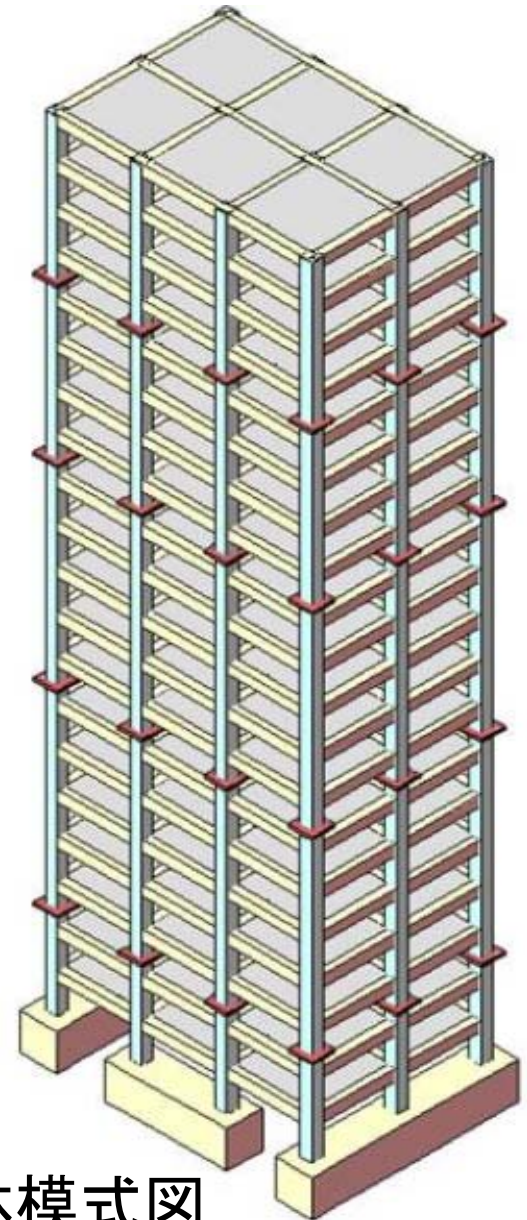
震動実験(E-Defense)

【予備応答解析】

標準的な超高層
建物と同水準



分割施工



試験体模式図

6. まとめ

【本年度事業の成果】

(イ) 構造実験

- ・長周期地震動に対する応答を想定した実験を実施。
多数回繰返し载荷による影響は少ない結果を得た。
- ・建物実験について、1/4スケール20層モデルを計画。

(ロ) 応答評価

- ・既存超高層建物を想定して、応答解析を実施。
大きな地震動を想定し、繰返し回数を実験に反映。

(ハ) 建物地震観測

- ・既存超高層建物2棟を選定し、観測装置を設置。
3月に発生した地震で多数の観測記録を得た。