

平成28年度建築基準整備促進事業 報告会

S22. 高密配筋を行った鉄筋コンクリート造部材の 部材種別の評価に関する検討

国立大学法人 京都大学工学研究科建築学専攻
谷昌典, 西山峰広

学校法人 福山大学工学部建築学科
都祭弘幸

共同研究: 国立研究開発法人 建築研究所

調査の背景

➤ 日本建築学会「保有水平耐力計算規準(案)」

保有水平耐力計算におけるFA部材の判定条件に関する提案
(みなしFA部材)

- **せん断補強指標**, 内法スパン比, せん断余裕度など
- 条件を満たせば**軸力比0.67**までFA柱とすることが可能に
→ 現在の保有水平耐力計算に及ぼす影響大きい

➤ 問題点・課題

- 学会規準では, **縮小試験体**による統計的な検討方法に基づく提案
- 実大部材では縮小試験体に比べて**変形性能が低下**する可能性

実大試験体を用いた載荷実験により,
提案された判定条件の妥当性を検証する必要がある

調査の概要

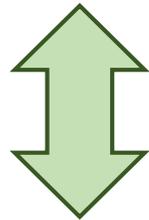
- (I) 学会規準の分析
 - 部材種別の判定に支配的となるパラメータの抽出
 - 実大試験体の実験変数の選定
- (II) 柱, 梁, 壁付き部材の実大試験体に対する静的繰返し載荷実験
 - 実大試験体と縮小試験体を用いた載荷実験による変形性能の違いの検証
 - みなしFA部材の変形性能の検証
- (III) 学会規準を用いた設計への影響度調査と課題抽出
 - 実験データベースを用いたみなしFA部材と現行基準FA部材との変形性能の比較
 - 試設計等に基づく設計への影響の検証, 緩和条件の検討

研究体制

調査検討委員会

事業主体

京都大学
福山大学



共同研究

(国研) 建築研究所

委員 和泉信之(千葉大学)
勅使川原正臣(名古屋大学)
北山和宏(首都大学東京)
石川裕次(芝浦工業大学)
鹿島孝(竹中工務店)
福山洋(国土技術政策総合研究所)
諏訪田晴彦(国土技術政策総合研究所)
(敬称略)

1. 柱部材の実大試験体に対する 静的繰返し載荷実験 (京都大)

試験体設計方針

高軸力により現行基準**FB以下**と判定される**みなしFA**部材

➡ 目標軸力 (軸力比0.45および0.67) および 釣合軸力 において
 下記条件を満たす

略算式 $N_b = 0.22(1 + g_1) b D F_c$

部材	柱						
条件	条件	σ_0/F_c の 数値	せん断 補強指標	h_0/D の 数値	p_g の 数値	τ_u/F_c の 数値	その他 の規定
条件	せん断破壊、付着割裂破壊 及び圧縮破壊その他の構造 耐力上支障のある急激な耐 力の低下のおそれのある破 壊を生じないこと	0.45以下	(19.9) 式を 満足する	2.0以上	—	0.200 以下	—
		0.67以下		3.0以上	1.6% 以上		※1を 満足する

- ※1 ①各方向の副帯筋を2本以上とし、各辺の引張鉄筋を4本以上配筋する
 ②せん断補強筋間隔は100mm以下、かつもっとも小さい主筋径の6倍以下とする

- **せん断余裕度**: 1.1以上であることを確認
- **せん断補強指標**: $p_w \sigma_{we} / (v_0 F_c) \geq 0.30 (\sigma_0 / F_c)^2 + 0.10$ ……規準(19.9)式

(左辺) / (右辺) を **せん断補強指標比** とし、設計時に1.0以上であることを確認

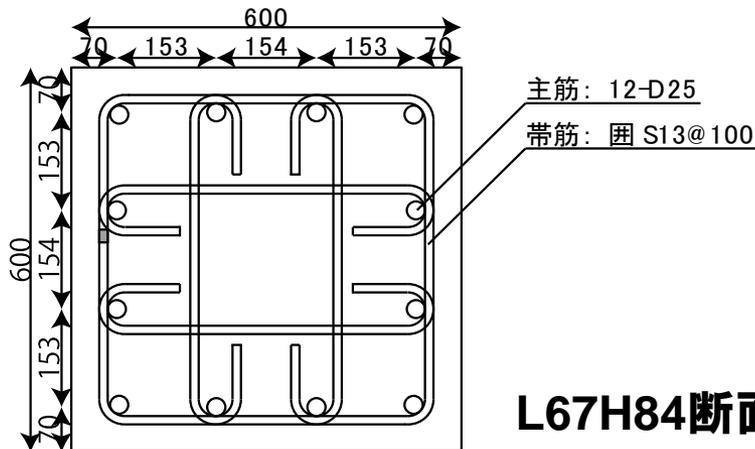
実大試験体(7体)

		L67H84	L67N113	L67H113	LC67H132	L67H132 (pg2.25)	L45H63	L45H97 (Fc45)	
寸法	幅 (mm)	600							
	せい (mm)	600							
	内法高さ (mm)	2400							
主筋	配筋	12-D25				16-D25	12-D25		
	種別	SD345							
	ρ_g (%)	1.69				2.25	1.69		
帯筋	配筋	4-S13@100	4-D13@75	4-S13@75	4-S16@100		3-S13@100	3-S13@65	
	種別	KSS785	SD345	KSS785					
	ρ_w (%)	0.84	1.13	1.13	1.32		0.63	0.97	
F_c (N/mm ²)		30						45	
軸力		変動 ($\eta=0.67$)			一定 ($\eta=0.67$)	変動 ($\eta=0.67$)	変動 ($\eta=0.45$)		

標準試験体(軸力比0.67)

保有水平耐力規準FA部材の条件を満たす**下限**の試験体

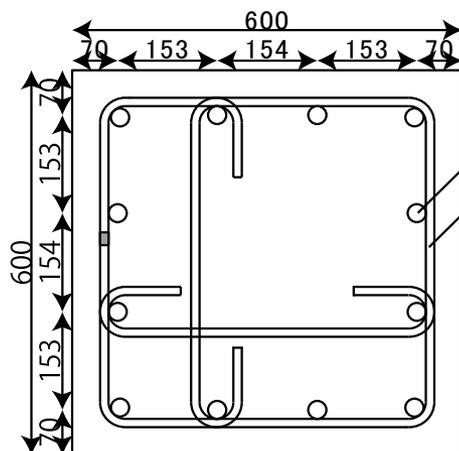
(せん断補強指標比が1をわずかに上回る)



L67H84断面図

実大試験体(7体)

		L67H84	L67N113	L67H113	LC67H132	L67H132 (pg2.25)	L45H63	L45H97 (Fc45)	
寸法	幅 (mm)	600							
	せい (mm)	600							
	内法高さ (mm)	2400							
主筋	配筋	12-D25				16-D25	12-D25		
	種別	SD345							
	ρ_g (%)	1.69				2.25	1.69		
帯筋	配筋	4-S13@100	4-D13@75	4-S13@75	4-S16@100		3-S13@100	3-S13@65	
	種別	KSS785	SD345	KSS785					
	ρ_w (%)	0.84	1.13	1.13	1.32		0.63	0.97	
F_c (N/mm ²)		30							45
軸力		変動 ($\eta=0.67$)			一定 ($\eta=0.67$)	変動 ($\eta=0.67$)	変動 ($\eta=0.45$)		



主筋: 12-D25
帯筋: 田 S13@100

L45H63断面図
(中子筋:千鳥配置)

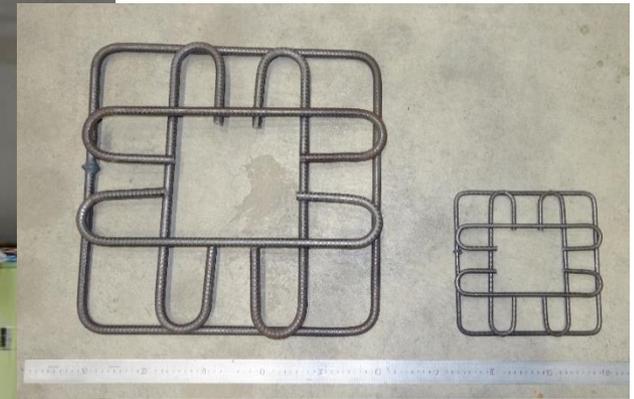
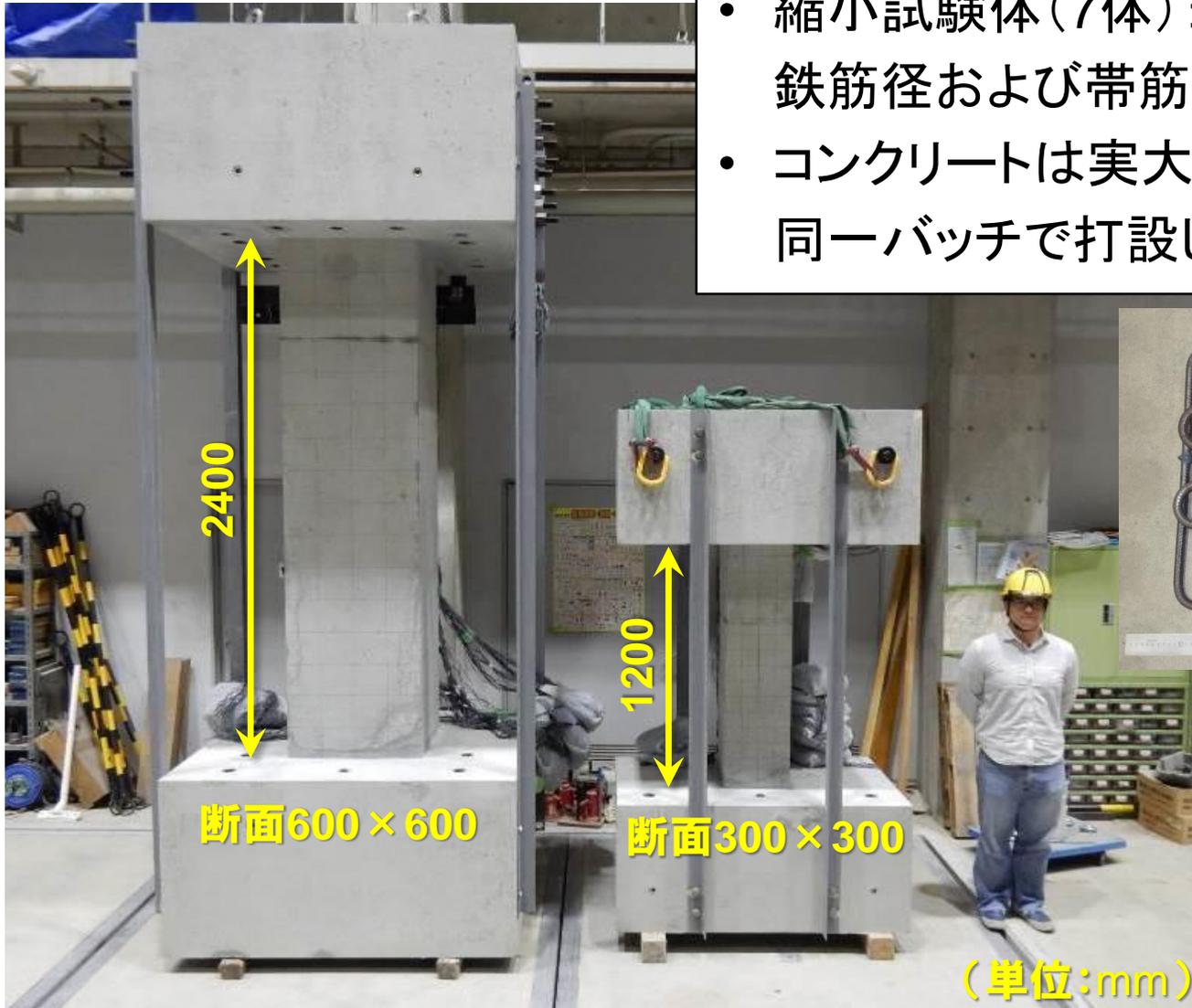
標準試験体(軸力比0.45)

保有水平耐力規準FA部材の条件を満たす**下限**の試験体

(釣合軸力時のせん断余裕度が1.1をわずかに上回る)

縮小試験体

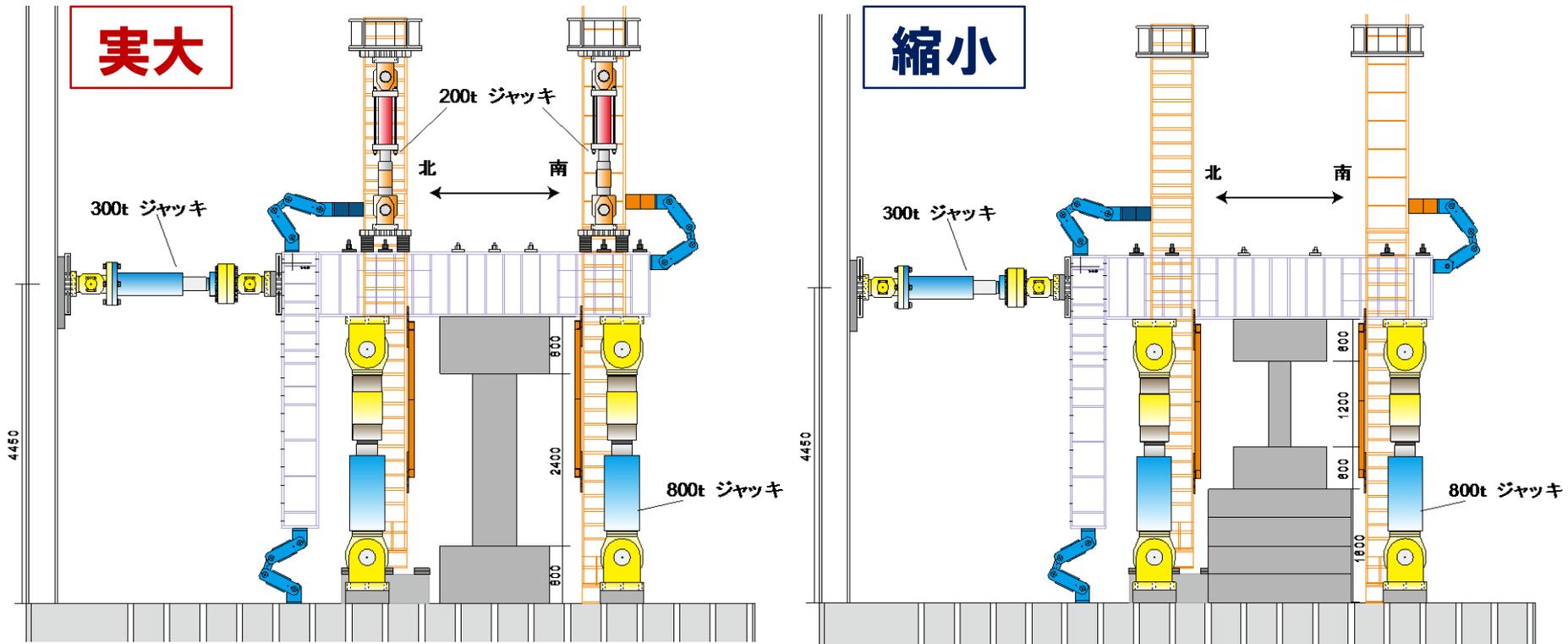
- 縮小試験体(7体): 試験区間の寸法, 鉄筋径および帯筋間隔を**50%**に縮小
- コンクリートは実大・縮小のセットを同一バッチで打設し, 連続して載荷



	実大	縮小
主筋	D25	→ D13
帯筋	S13	→ S6
	D13	→ D6
	S16	→ S8

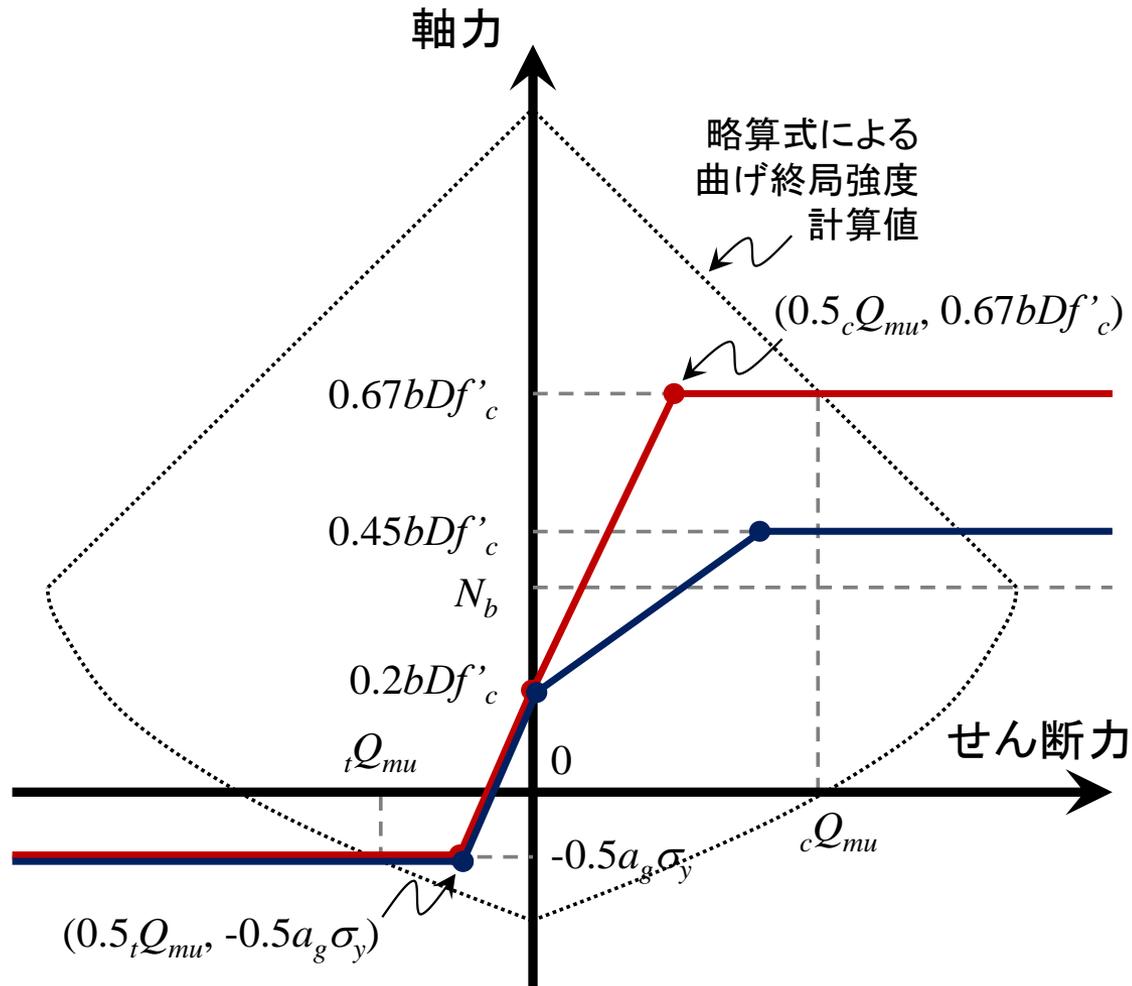
載荷概要

- 柱頭・柱脚スタブの平行維持して水平力を載荷
- 部材角 R 制御による静的繰返し漸増振幅載荷
 $R=1/1600\text{rad}$ (1回), $1/800\text{rad}$, $1/400\text{rad}$, $1/200\text{rad}$, $1/133\text{rad}$,
 $1/100\text{rad}$, $1/67\text{rad}$, $1/50\text{rad}$, $1/33\text{rad}$, $1/25\text{rad}$ (各2回)

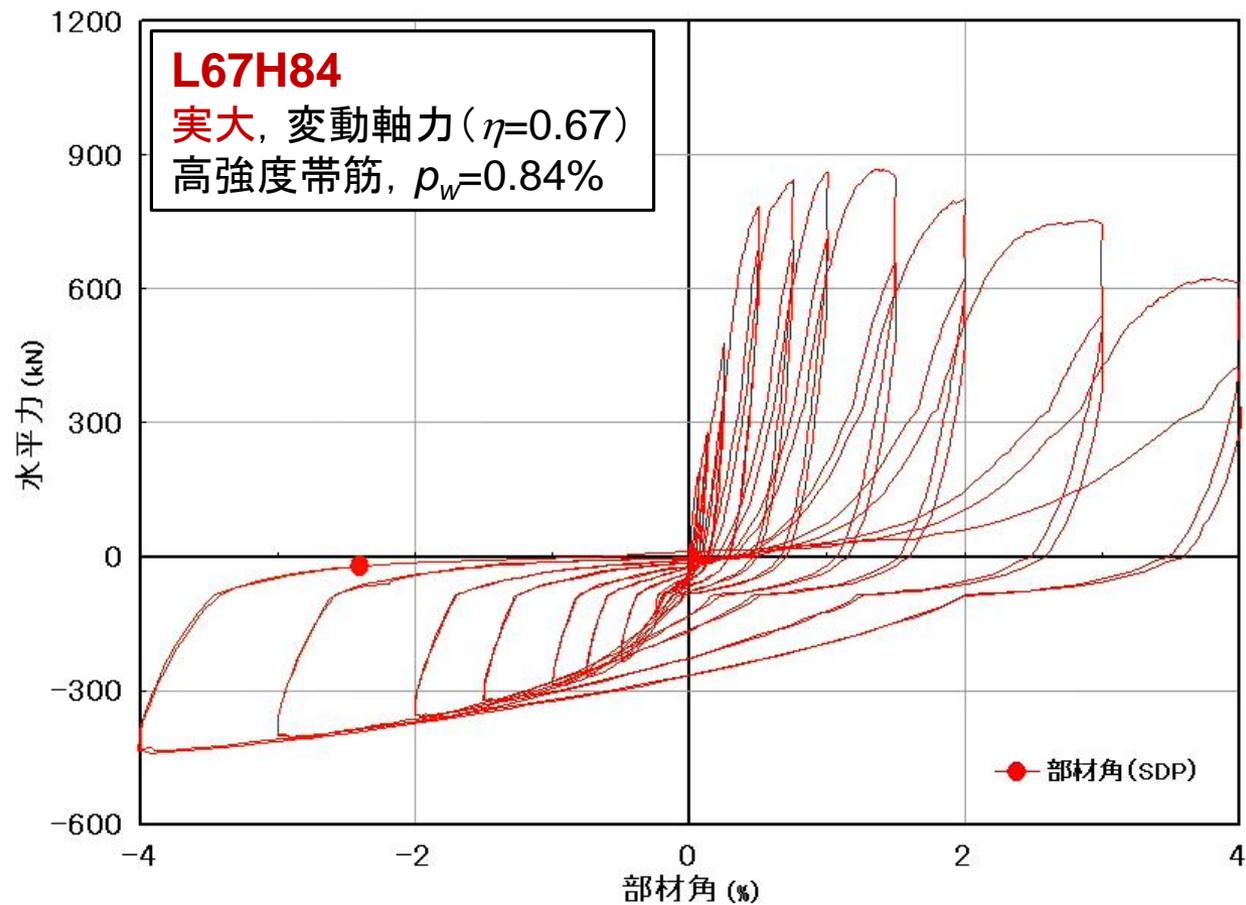
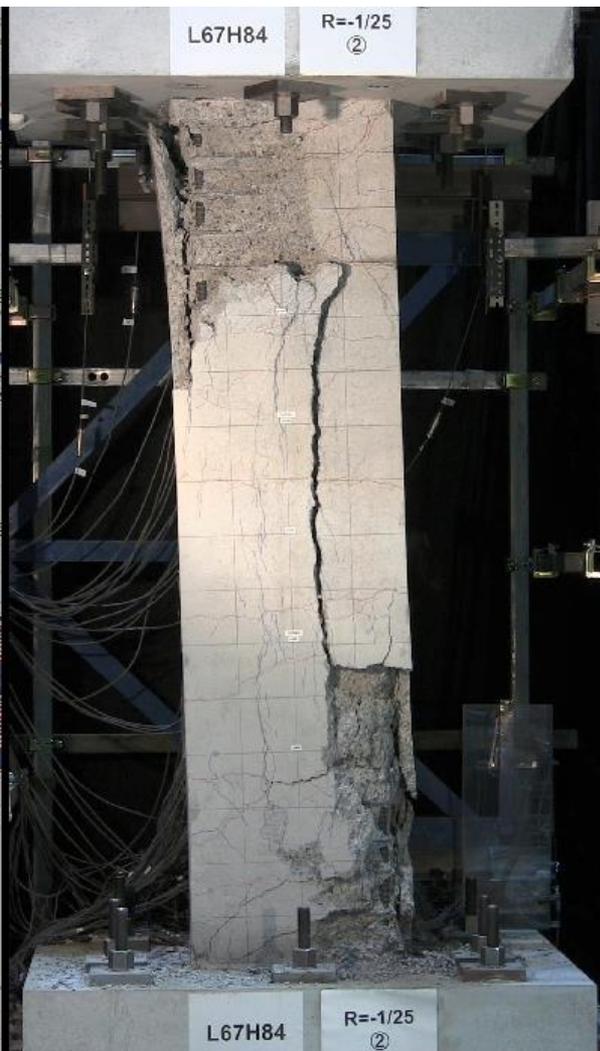


変動軸力概要

- 曲げ終局強度時せん断力の半分で目標軸力に到達
- 目標引張軸力: 主筋引張降伏耐力の半分



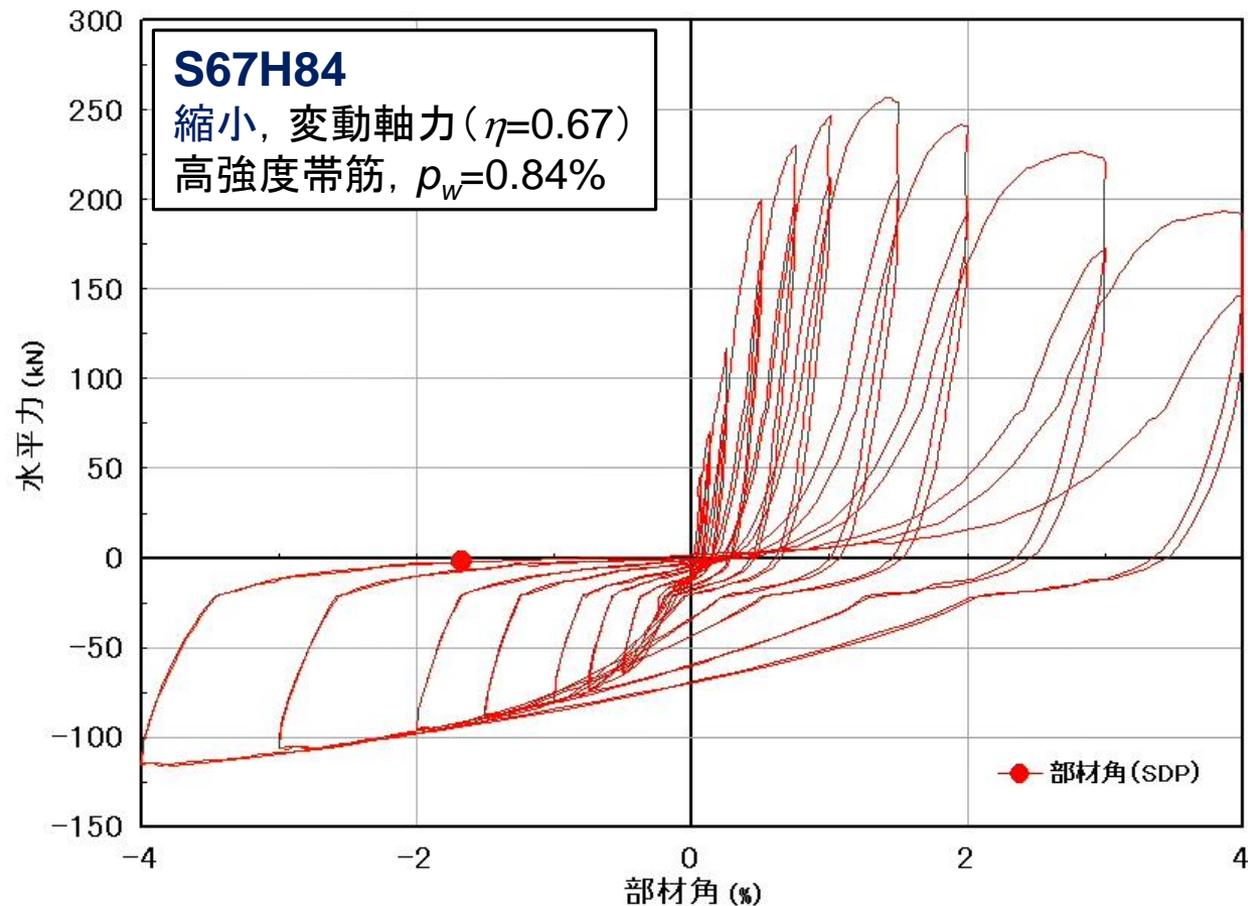
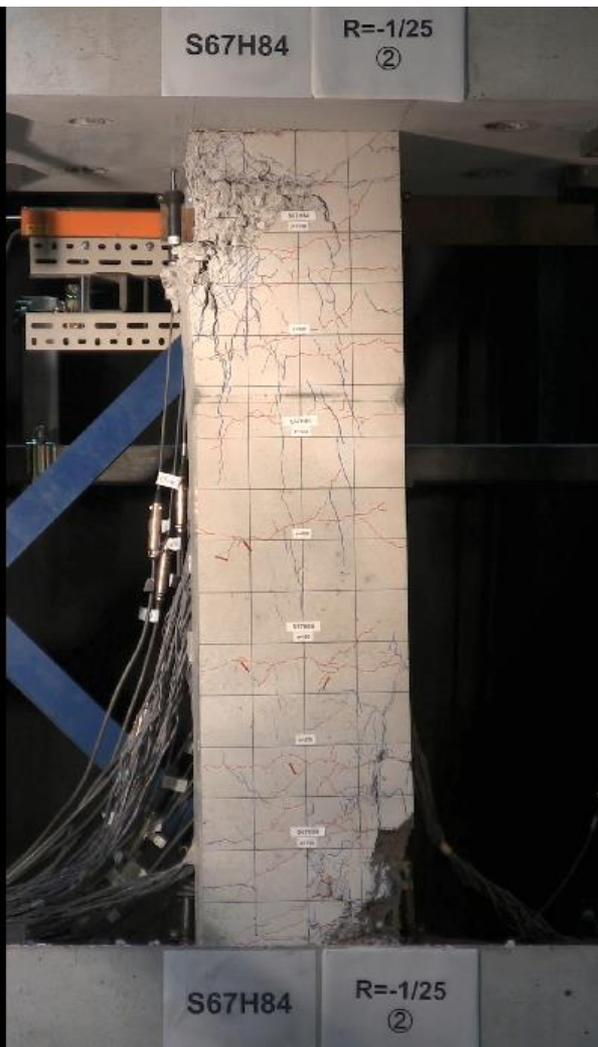
水平荷重一部材角関係(L67H84)



Kyoto Univ. Nishiyama&Tani Lab.

- 主筋圧縮降伏先行, **端部曲げ圧壊**により最大耐力到達(主筋座屈あり)
- 正載荷2回目サイクルの**剛性, 耐力低下**が顕著

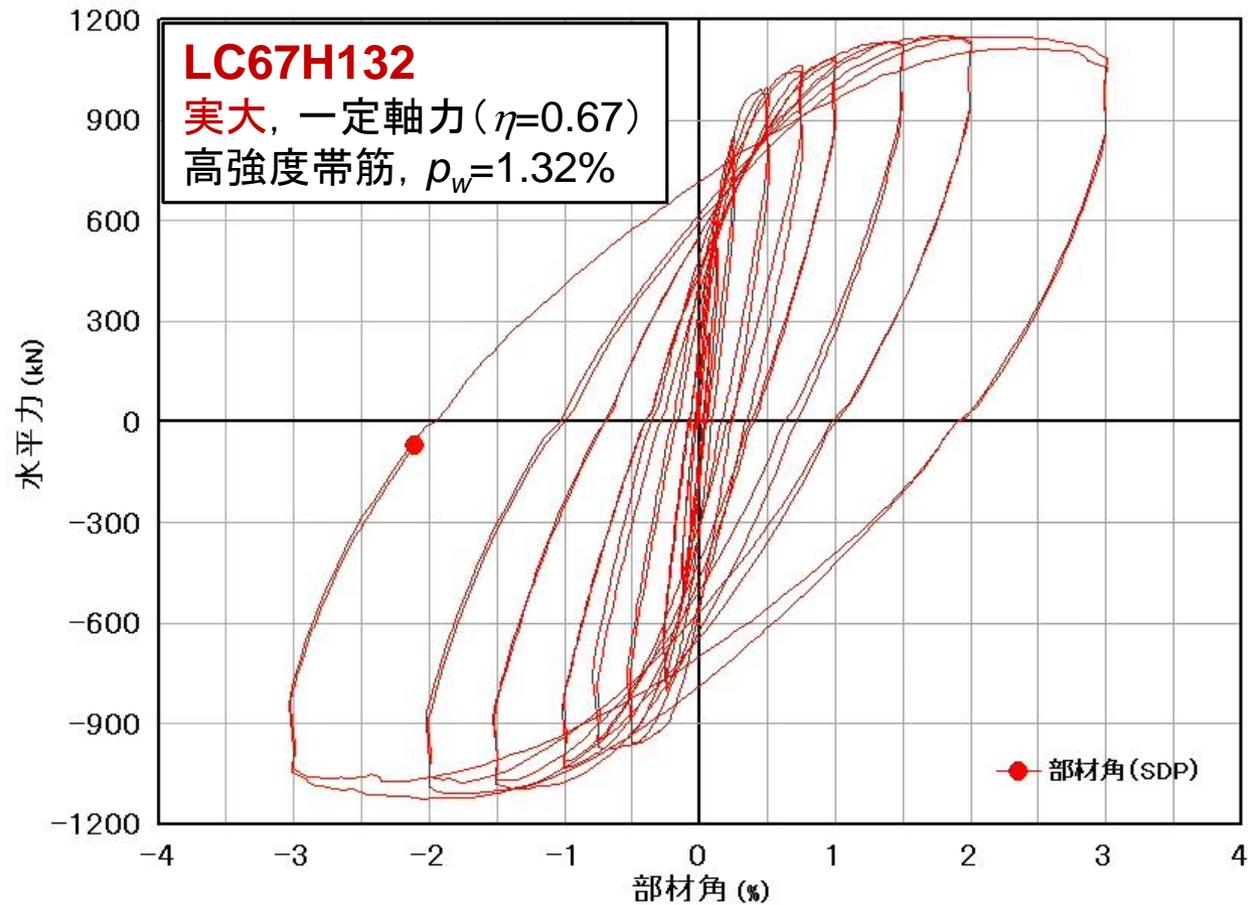
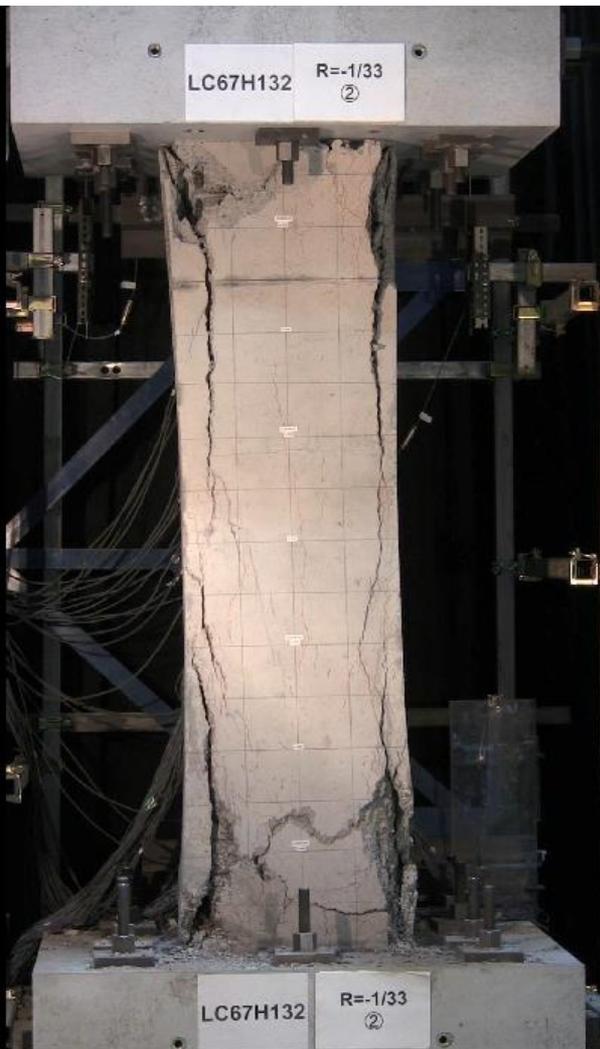
水平荷重一部材角関係(S67H84)



Kyoto Univ. Nishiyama&Tani Lab.

- 主筋圧縮降伏先行, **端部曲げ圧壊**により最大耐力到達(主筋座屈あり)
- 正載荷2回目サイクルの**剛性, 耐力低下**が顕著

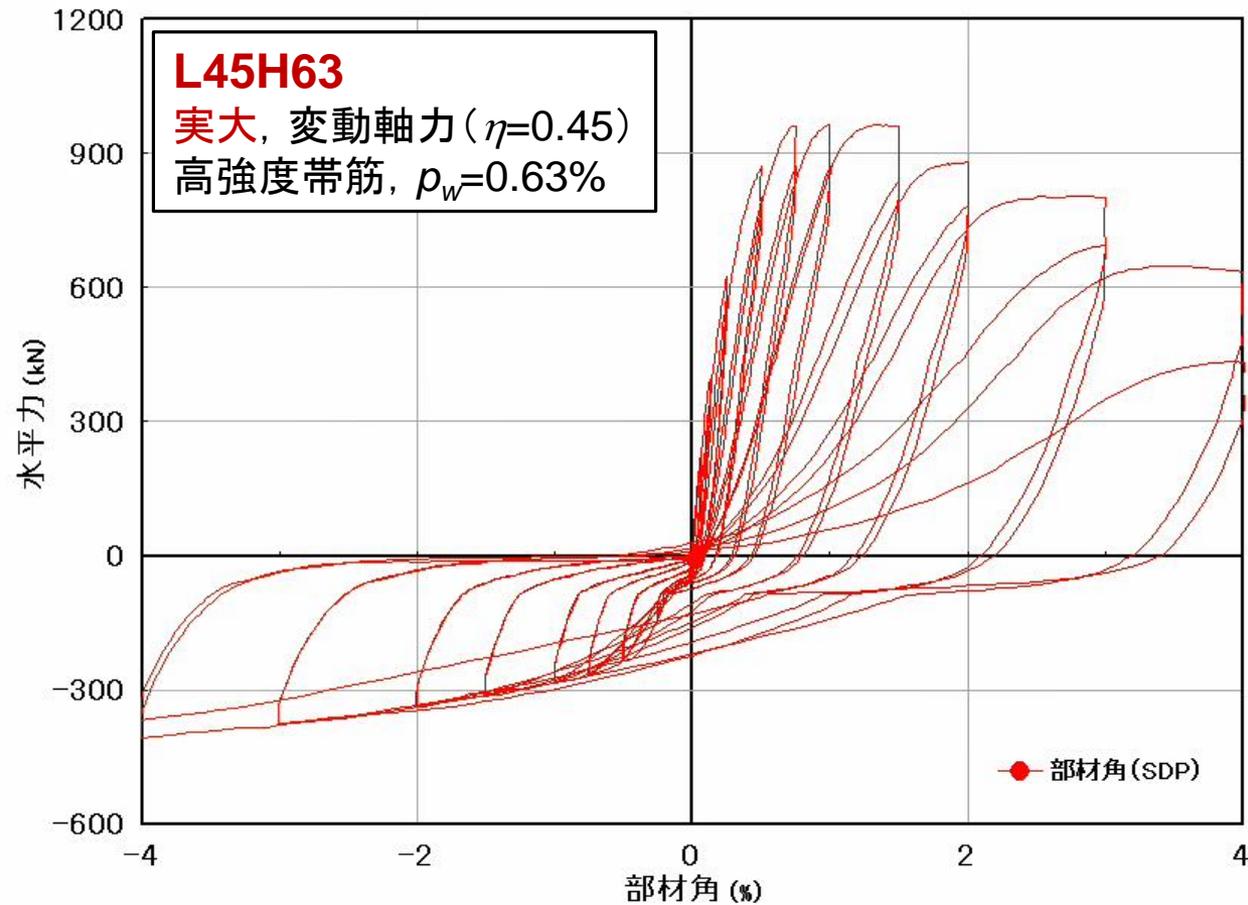
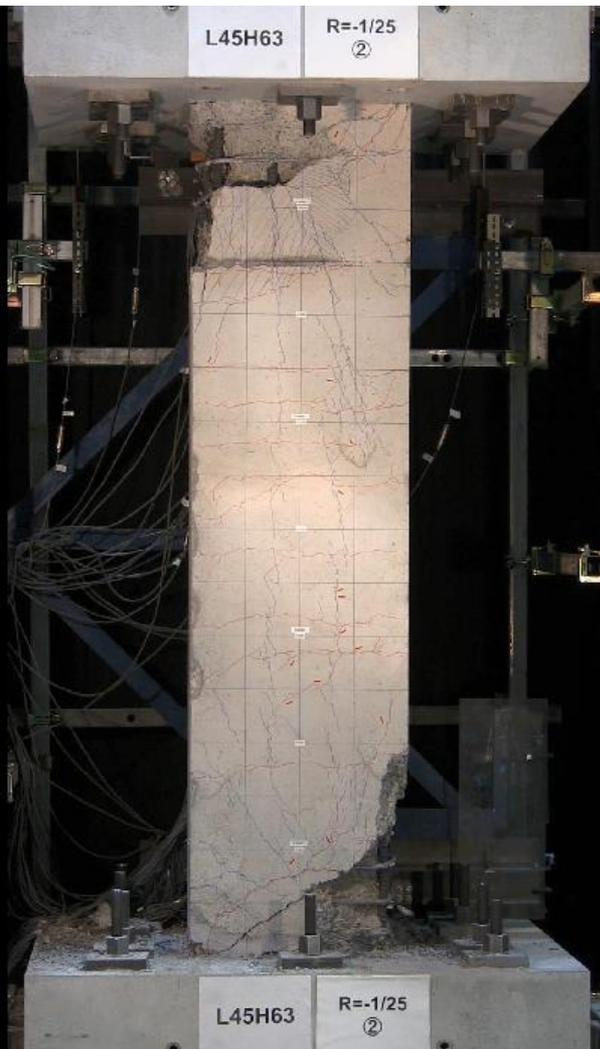
水平荷重一部材角関係(LC67H132)



Kyoto Univ. Nishiyama&Tani Lab.

- 主筋圧縮降伏先行, 端部曲げ圧壊により最大耐力到達
- 正載荷2回目サイクルの顕著な剛性, 耐力低下は確認されず

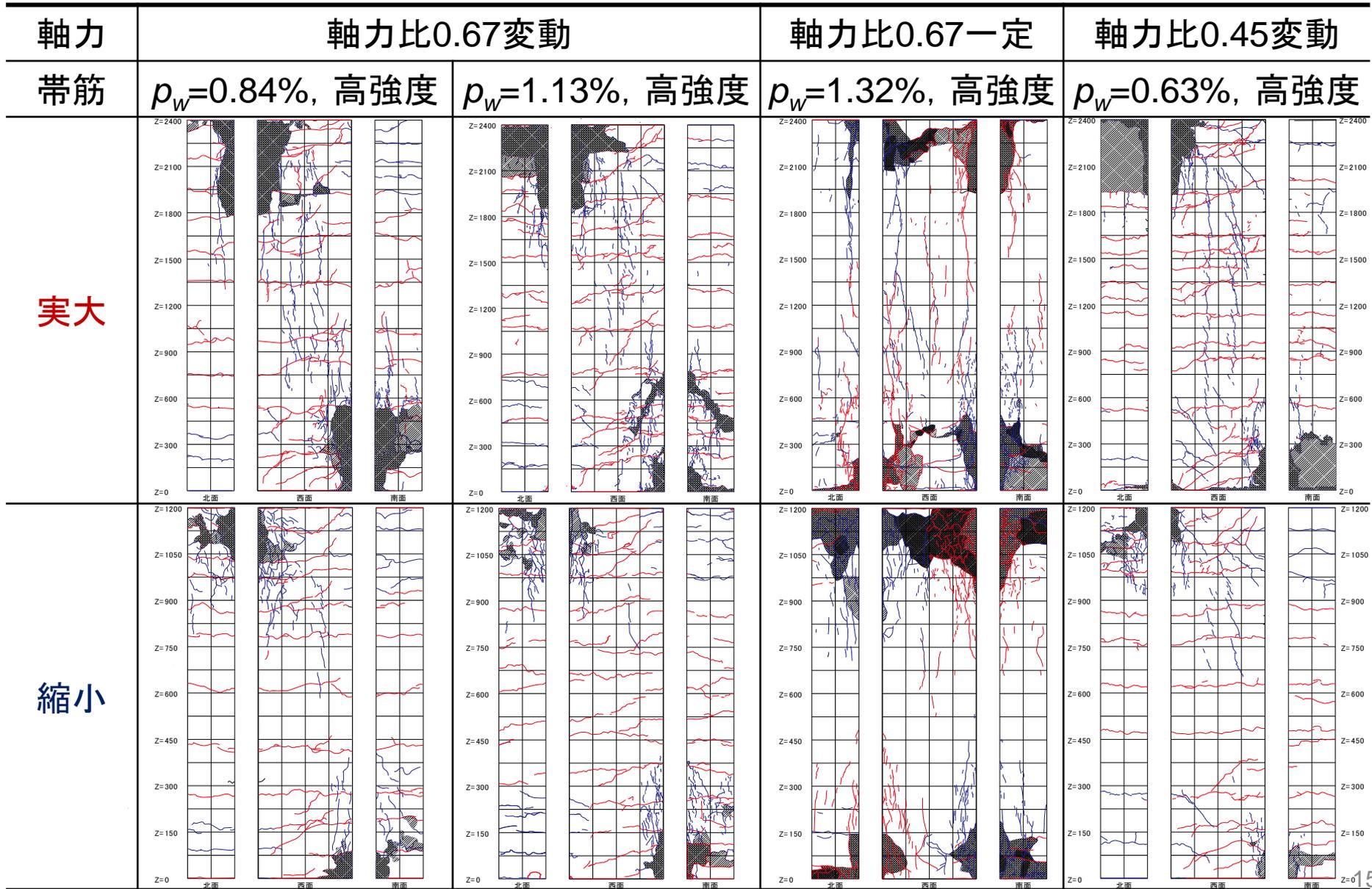
水平荷重一部材角関係(L45H63)



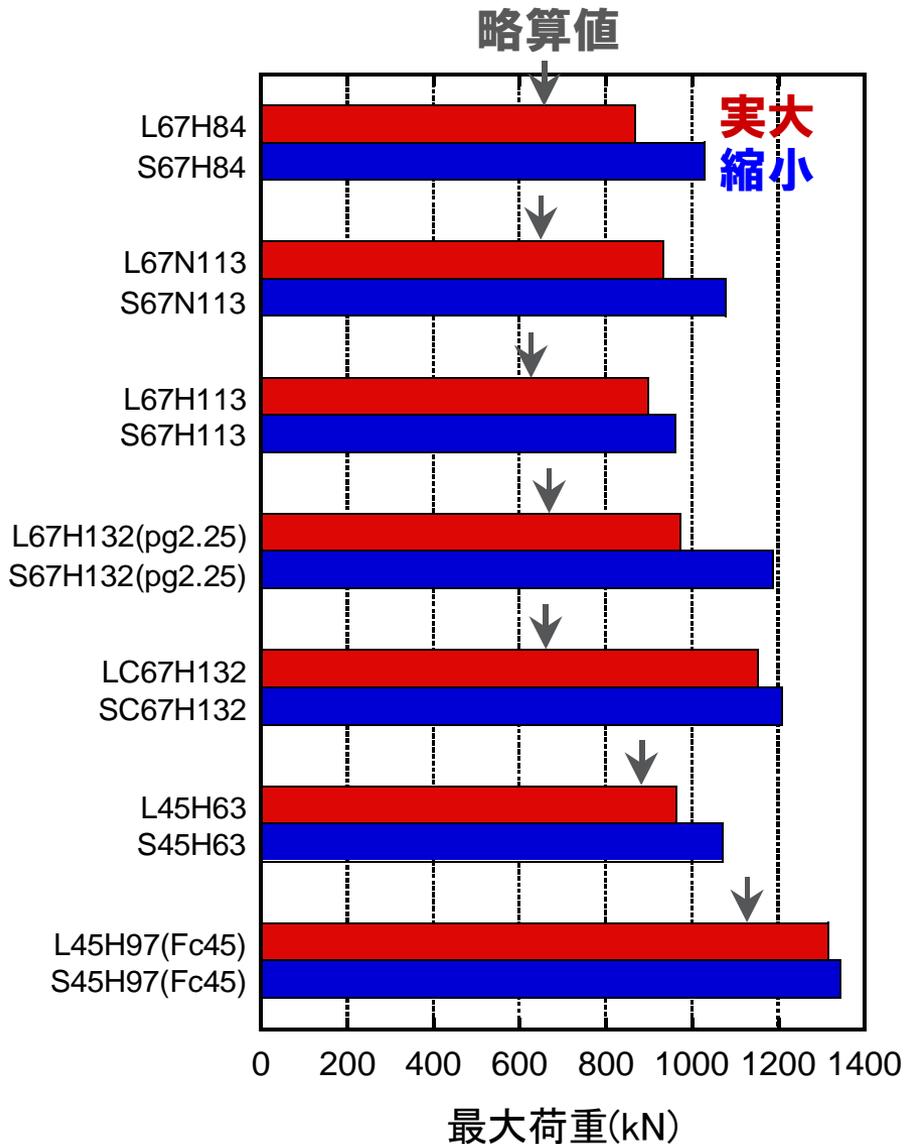
Kyoto Univ. Nishiyama&Tani Lab.

- 主筋圧縮降伏先行, 端部曲げ圧壊により最大耐力到達(顕著な主筋座屈)
- 正載荷2回目サイクルの剛性, 耐力低下が顕著

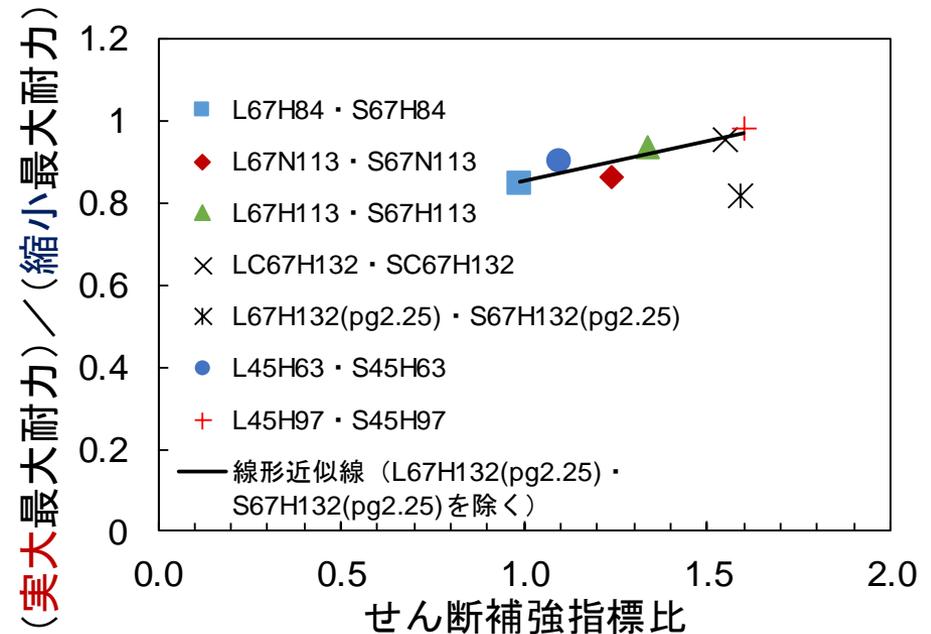
損傷性状($R=1/50\text{rad}$)



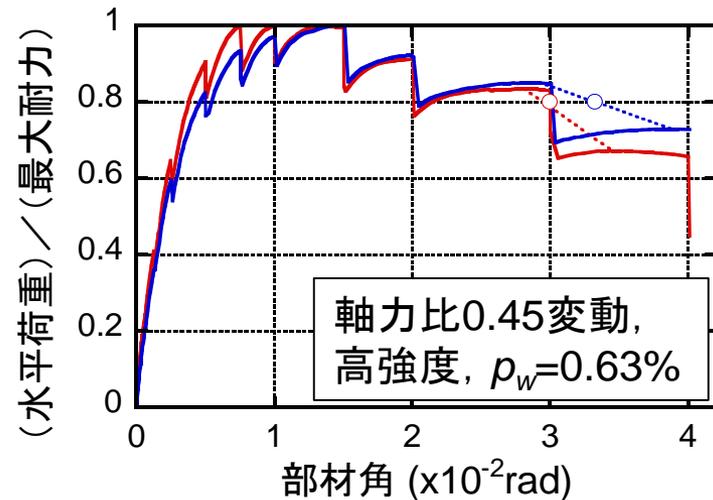
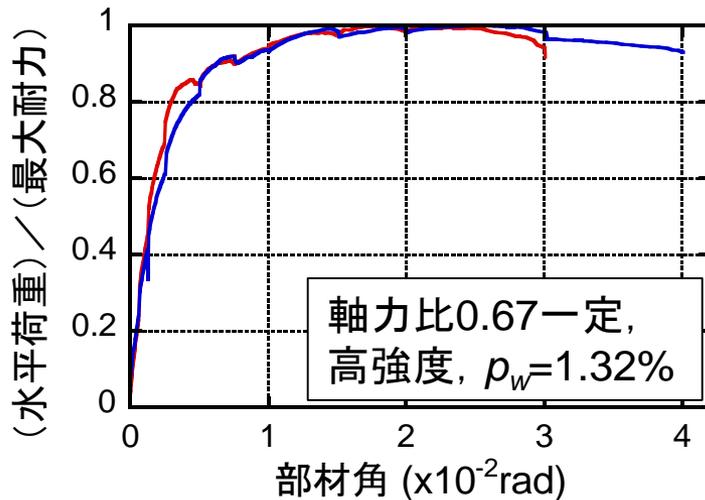
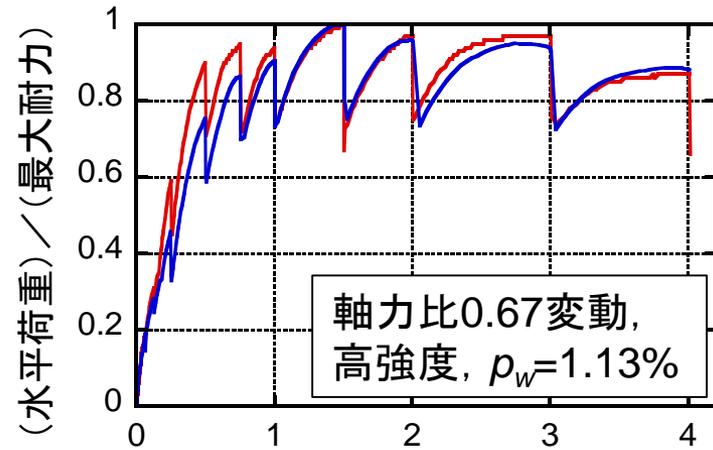
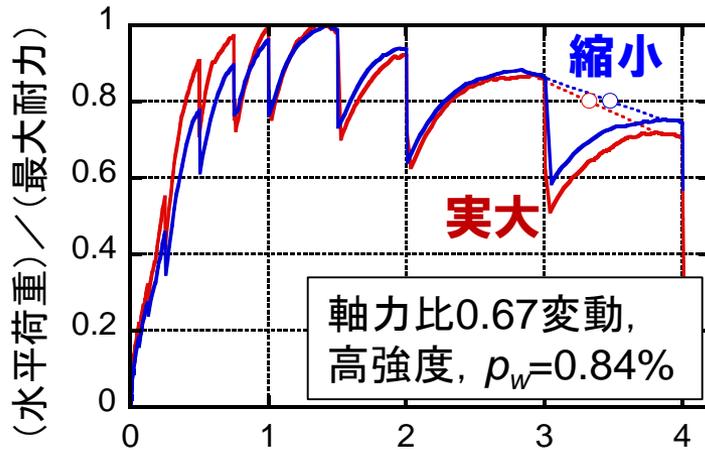
最大耐力(圧縮軸力時)



- 実大試験体の方が最大耐力が2~18%低い
- 略算式は軸力比0.67の場合には大幅に過小評価
- せん断補強指標比が大きくなると、両者の差は縮まる



限界変形角(P- Δ 効果非考慮)



- $R_u \geq 3.0\%$, または最終荷重サイクルで最大耐力80%まで低下せず
- 縮尺による顕著な差は確認できず

柱実験まとめ

みなしFA部材となる実大・縮小柱試験体の載荷実験を行い、以下の知見を得た
破壊性状(変動軸力試験体)

- 正載荷時には、主筋圧縮降伏が先行し、**端部曲げ圧壊**に伴って最大耐力を示した後、最終載荷サイクルまで安定して軸力保持
- 正載荷**2回目**サイクルで**顕著な剛性・耐力低下**
- 中子筋千鳥配置または中子筋に拘束されない主筋を有する試験体では、大変形時に**顕著な主筋座屈**確認 → 他の試験体に比べて耐力低下大

破壊性状(一定軸力試験体)

- 損傷経過は変動軸力試験体の正載荷時と同様
- 正載荷2回目サイクルで**顕著な剛性・耐力低下は確認されず**

最大耐力

- **縮尺による影響あり**((実大) / (縮小) = **0.82~0.98**)
- 曲げ略算式: 軸力比0.67試験体に対しては実験結果を大幅に過小評価、軸力比0.45試験体に対しては実験結果をやや低く評価

限界変形角 R_u

- **$R_u > 3%$ もしくは水平荷重が最大耐力の80%まで低下せず**
- **縮尺による顕著な差は確認できず**

2. 梁部材の実大試験体に対する 静的繰返し載荷実験 (福山大)

梁部材の実大試験体に対する静的繰返し载荷実験

現行告示でFB以下, 学会規準FA梁部材試験体の設計方針

- ・せん断応力度レベル($\tau_u / F_C > 0.15$)
- ・せん断余裕度(修正荒川mean式) $Q_{su} / Q_{mu} > 1.0$
- ・付着割裂破壊の防止(高強度せん断補強筋設計指針式) $Q_{BU} / Q_{mu} > 1.0$
- ・内法長さ比2.0以上 $l_0 / D \geq 2.0$

設計式の概要

せん断応力度レベル $\tau_u / F_C = Q_{mu} / (bjF_C)$

曲げ終局強度 $Q_{mu} = 2M_{mu} / l_0$ $M_{mu} = 0.9a_t \sigma_y d$

せん断終局強度 $Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (18 + F_C)}{M / Qd + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} \right\} bj$

高強度せん断補強筋指針式 $Q_{BU} = j \cdot \tau_b \cdot \sum \phi + k_1 \cdot (1 - k_3) b \cdot D \cdot v \cdot F_C$

<付着破壊の影響を

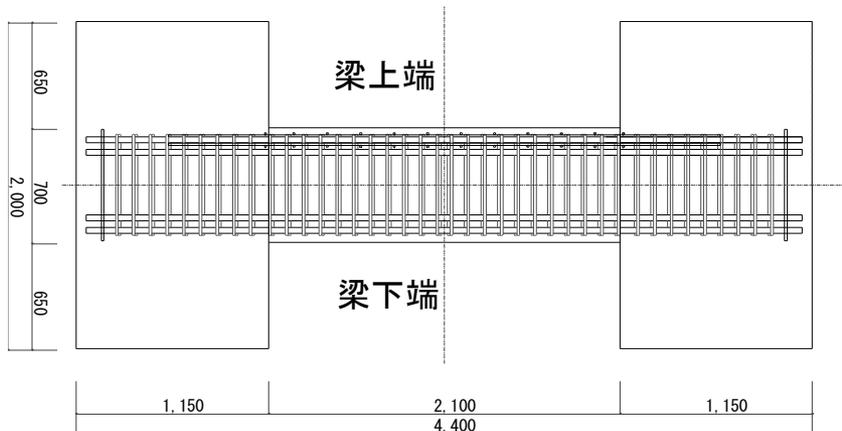
考慮したせん断強度>

$$\tau_b = k_0 \{ 0.307 b_i + 0.427 + (24.9 a_w h / (x N d_b)) \} (0.313 \sqrt{F_C})$$

試験体一覧

試験体	サイズ	断面		スラブ 有無	主筋		せん断補強筋		スラブ 片側断面 配筋	内法長さ (長さ比) mm
		b mm	D mm		(上下とも 2段配筋)	p_t %	配筋 材種	p_w %		
F-1	実大	600	700	無	5-D32	1.53	4-S16@100 (SD785)	1.33	150×500 D13@200	2100 (3.0)
F-2				有	2-D32					
R-1	縮小	300	350	無	5-D16	1.54	4-S8@100 (SD785)	1.33	75×250 D6@100	1050 (3.0)
R-2				有	2-D16					

実際の梁と同様に梁上端からコンクリート打設
(梁上端は下端よりも付着強度が小さくなる)



試験体配筋図(F-2)



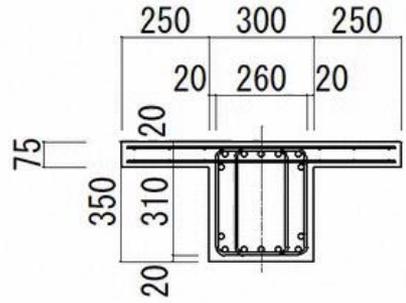
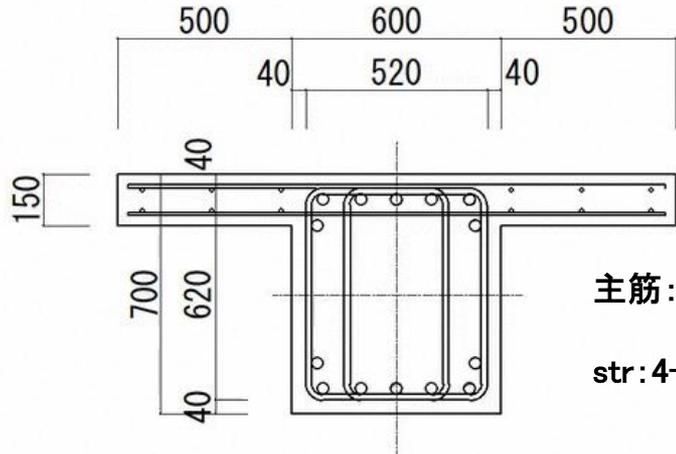
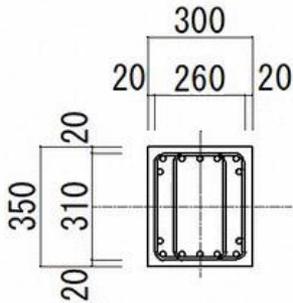
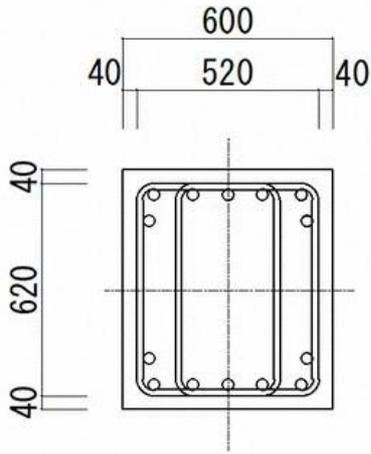
試験体製作状況(F-2)

試験体相関図

スラブ効果



寸法効果



スラブ筋: 片側
6-D13(SD295)

主筋: 上下とも
5-D32+2-D32(SD390)
str: 4-S16@100(SD785)

スラブ筋: 片側
6-D6(SD295)
主筋: 上下とも
5-D16+2-D16(SD390)
str: 4-S8@50(SD785)

試験体設計値一覧

曲げ強度およびせん断強度

$$\tau_u / F_C > 0.15$$

$$Q_{su} / Q_{mu} > 1.0$$

$$Q_{BU} / Q_{mu} > 1.0$$

試験体	サイズ	スラブ有無	コンクリート強度 σ_B N/mm ²	曲げ強度 ¹⁾ Q_{mu} kN	せん断強度 Q_{su} kN	せん断応力度 τ_u/F_c	せん断余裕度 ²⁾ Q_{su}/Q_{mu}	せん断補強指標	せん断余裕度 ³⁾ Q_{BU}/Q_{mu}
F-1	実大	無	23.4	1305.3	1445.5	0.176	1.11	0.392	1.22
F-2		有	24.1	1450.4	1454.5	0.190	1.00 (1.09)	0.390	1.11
R-1	縮小	無	23.7	311.6	359.9	0.166	1.16	0.393	1.29
R-2		有	24.0	348.2	360.8	0.183	1.04 (1.12)	0.392	1.16

1) スラブ付き試験体の曲げ強度は全幅スラブ筋を考慮

2) 修正荒川mean式による値 スラブ付き試験体の()内の数値は有効幅を考慮した値

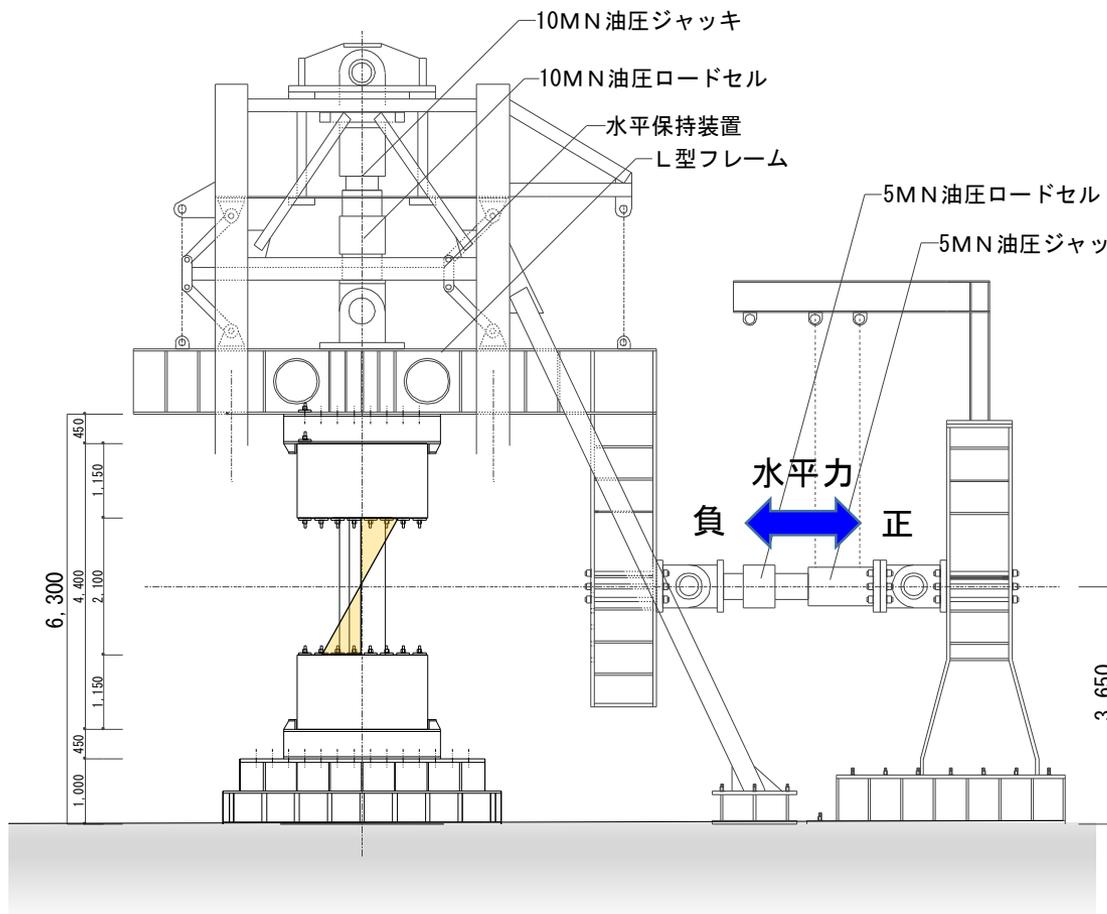
3) 高強度せん断補強設計指針式による値

付着割裂破壊の判定(靱性保証型耐震設計指針)

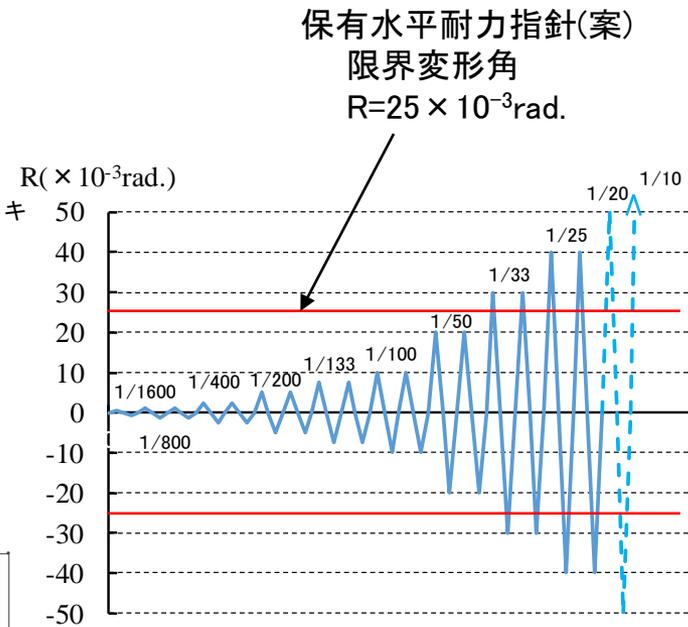
計算上、曲げ降伏後に
付着割裂破壊しない
ことを確認

試験体	スラブの有無	主筋径	降伏強度 (SD390)	コンクリート 強度	付着信頼強度		付着応力度		付着割裂破壊判定	
			σ_v N/mm ²	σ_B N/mm ²	1段目	2段目	1段目	2段目	1段目	2段目
					τ_{bu1} N/mm ²	τ_{bu2} N/mm ²	τ_{f1} N/mm ²	τ_{f2} N/mm ²	τ_{f1}/τ_{bu1}	τ_{f2}/τ_{bu2}
F-1	無	D32	453.4	23.4	4.93	7.88	4.85	3.64	0.98	0.46
F-2	有	D32	453.4	24.1	4.96	7.92	4.85	3.64	0.98	0.46
R-1	無	D16	431.8	23.7	4.96	7.93	4.62	3.46	0.93	0.44
R-2	有	D16	431.8	24.0	4.97	7.95	4.62	3.46	0.93	0.44

実験装置および加力履歴



建研式逆対称加力装置



加力履歴

矩形断面試験体Q-R関係および破壊状況の比較

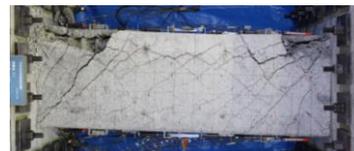
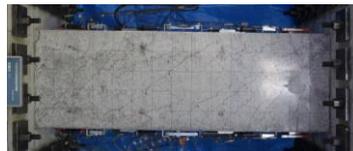
部材角

R=1/50(2%)

R=1/33(3%)

R=1/25(4%)

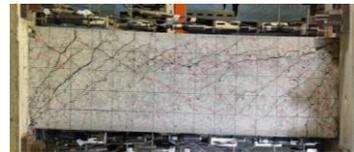
実大(F-1)



上端

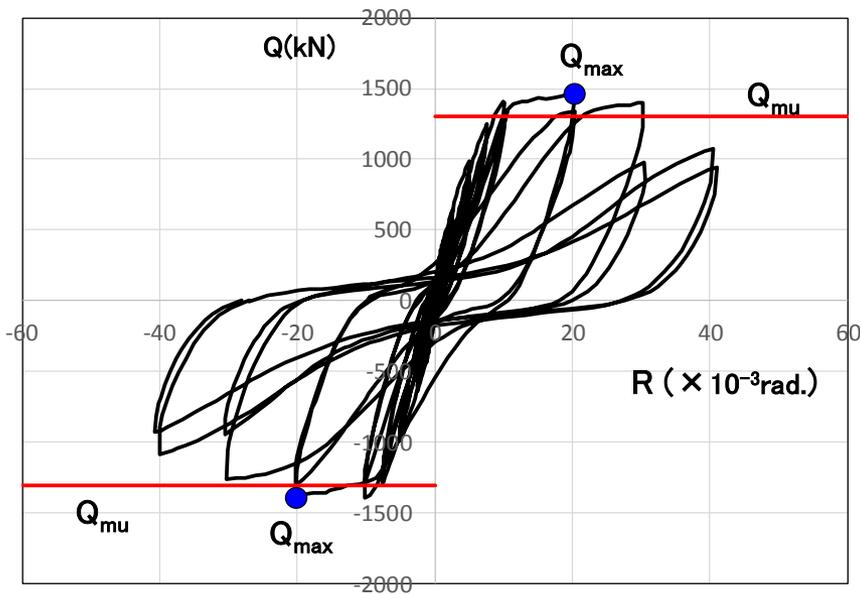
下端

1/2縮小(R-1)

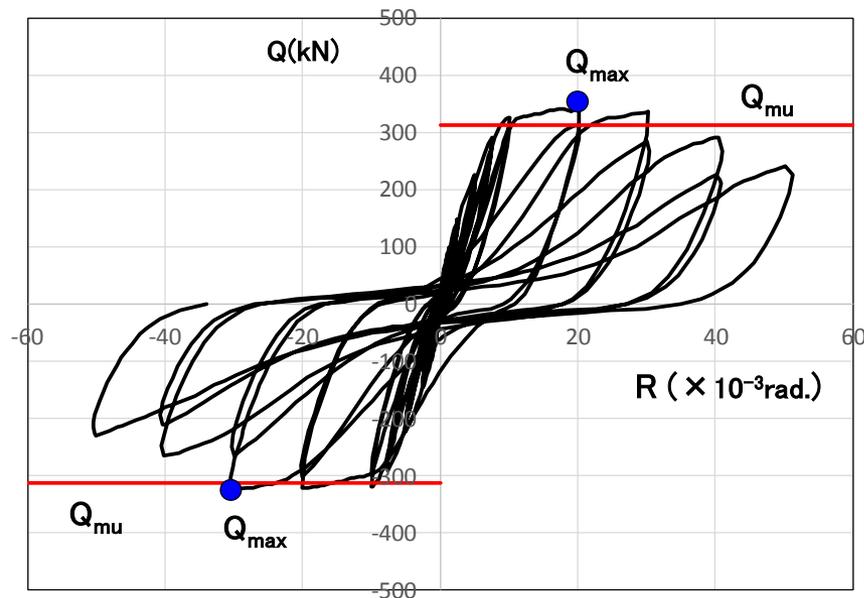


上端

下端



実大(F-1)



1/2縮小(R-1)

スラブ付き断面試験体Q-R関係および破壊状況の比較

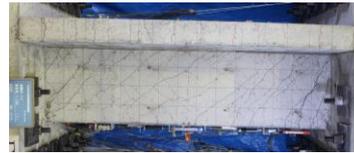
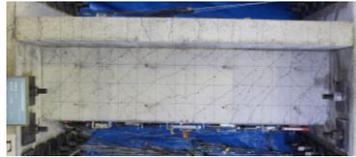
部材角

R=1/50(2%)

R=1/33(3%)

R=1/20(5%)

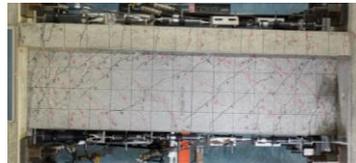
実大(F-2)



上端

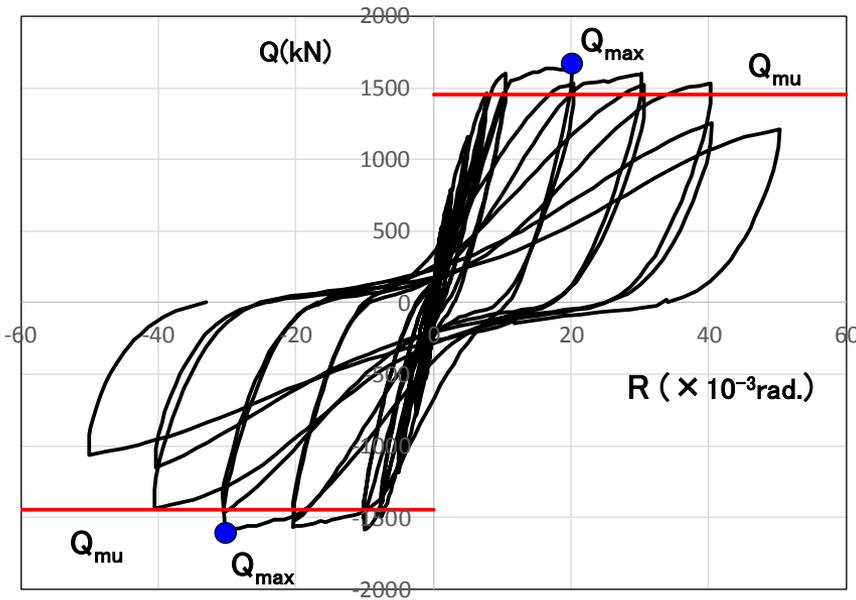
下端

1/2縮小(R-2)

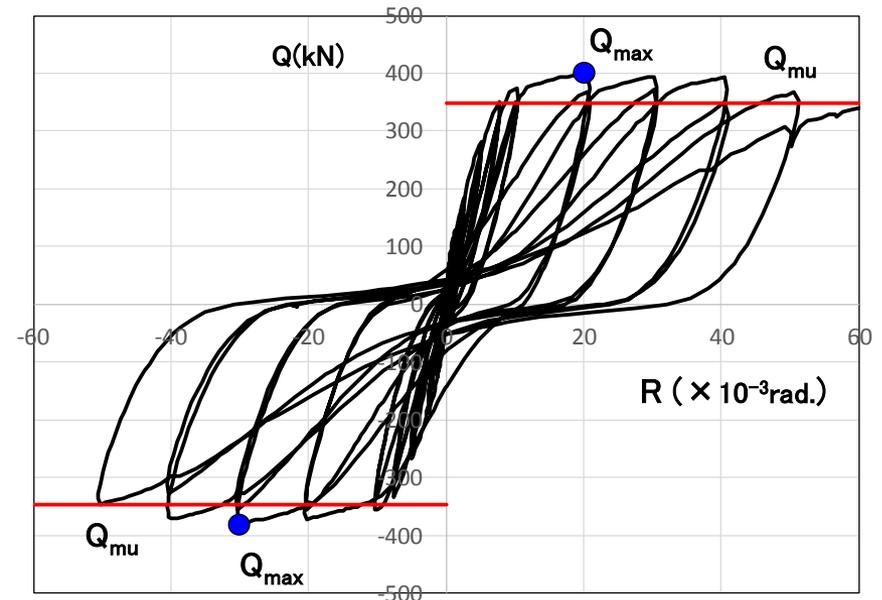


上端

下端



実大

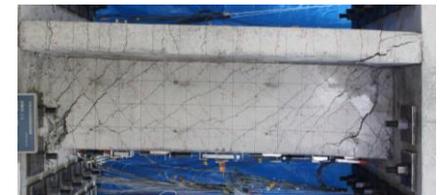
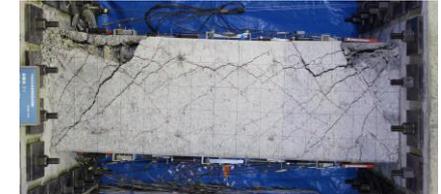


1/2縮小

スラブ効果

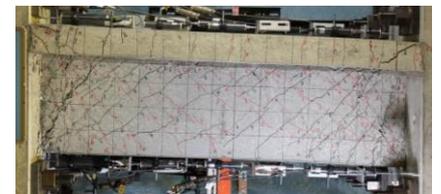
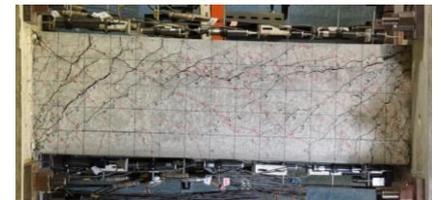
R=1/25破壊状況

上端曲げ降伏後
付着割裂破壊



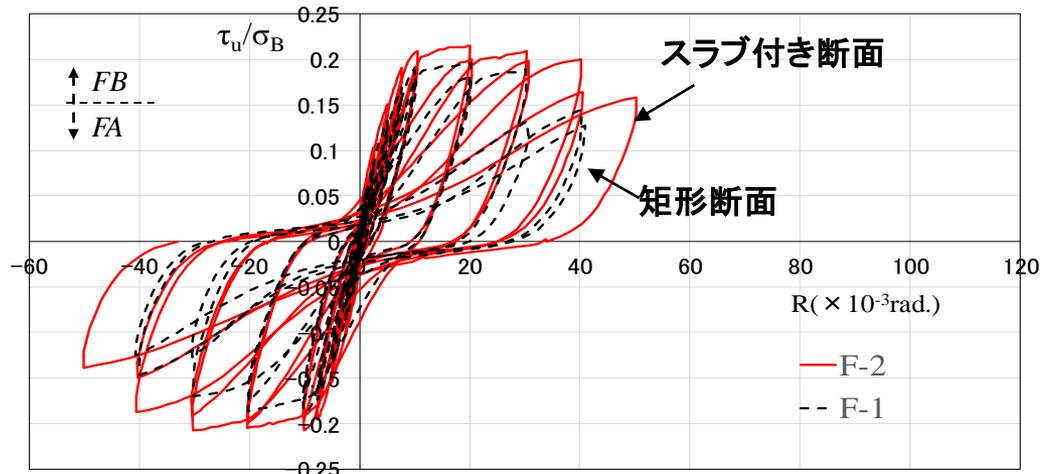
曲げ降伏後せん断破壊

上端曲げ降伏後
付着割裂破壊



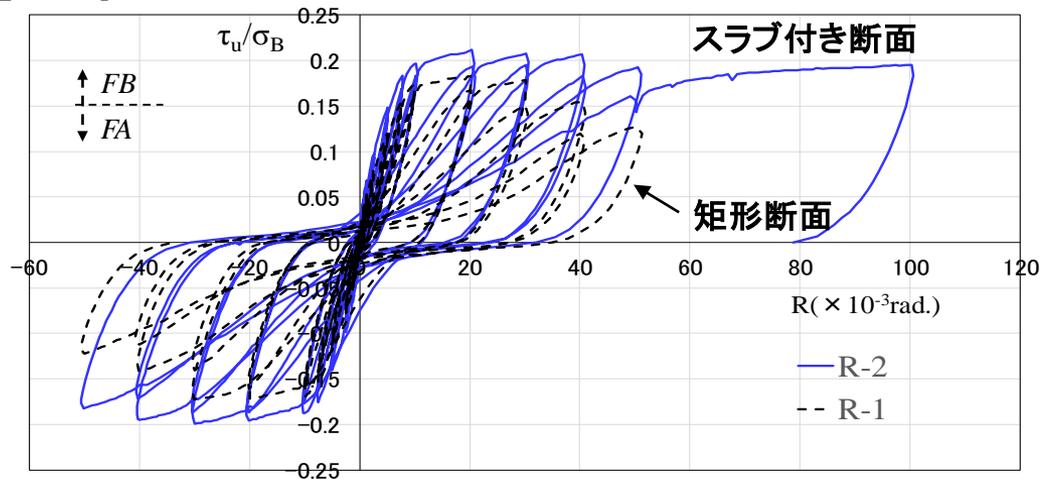
曲げ降伏後せん断破壊

実大



- ・上端筋の付着割裂破壊防止
- ・変形性能の向上

1/2縮小



寸法効果

初期剛性

寸法効果はない

計算式

➤ 初期剛性

$$1/K_{ini} = 1/K_B + 1/K_S$$

- ・主筋考慮
- ・スラブ断面考慮(1.2b)
- ・スラブ筋考慮しない

➤ 降伏点剛性低下率

$$\alpha_y = (-0.0836 + 0.159a/D + 0.169\eta_0) \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

: $a/D < 2.0$

スラブ付き断面の場合

$$\alpha_y' = (I_0/I_T)\alpha_y$$

I_0 : 矩形断面2次モーメント(主筋考慮)

I_T : スラブを考慮した断面2次モーメント

試験体	スラブリの有無	初期剛性			降伏時剛性		
		実験値 eK kN/mm	計算値 cK kN/mm	eK/cK	実験値 $e\alpha_y$	計算値 $c\alpha_y$	$e\alpha_y/c\alpha_y$
F-1	無	1041.67	1060.48	0.98	0.076	0.115	0.66
F-2	有	1041.67	1198.42	0.87	0.087	0.107	0.82
R-1	無	489.51	532.12	0.92	0.075	0.115	0.65
R-2	有	587.42	565.82	1.04	0.073	0.113	0.65

曲げひび割れ強度・曲げ終局強度

寸法効果はない

計算式

➤ 曲げひび割れ強度

$$M_{cr} = 0.56\sqrt{\sigma_B} Z_e$$

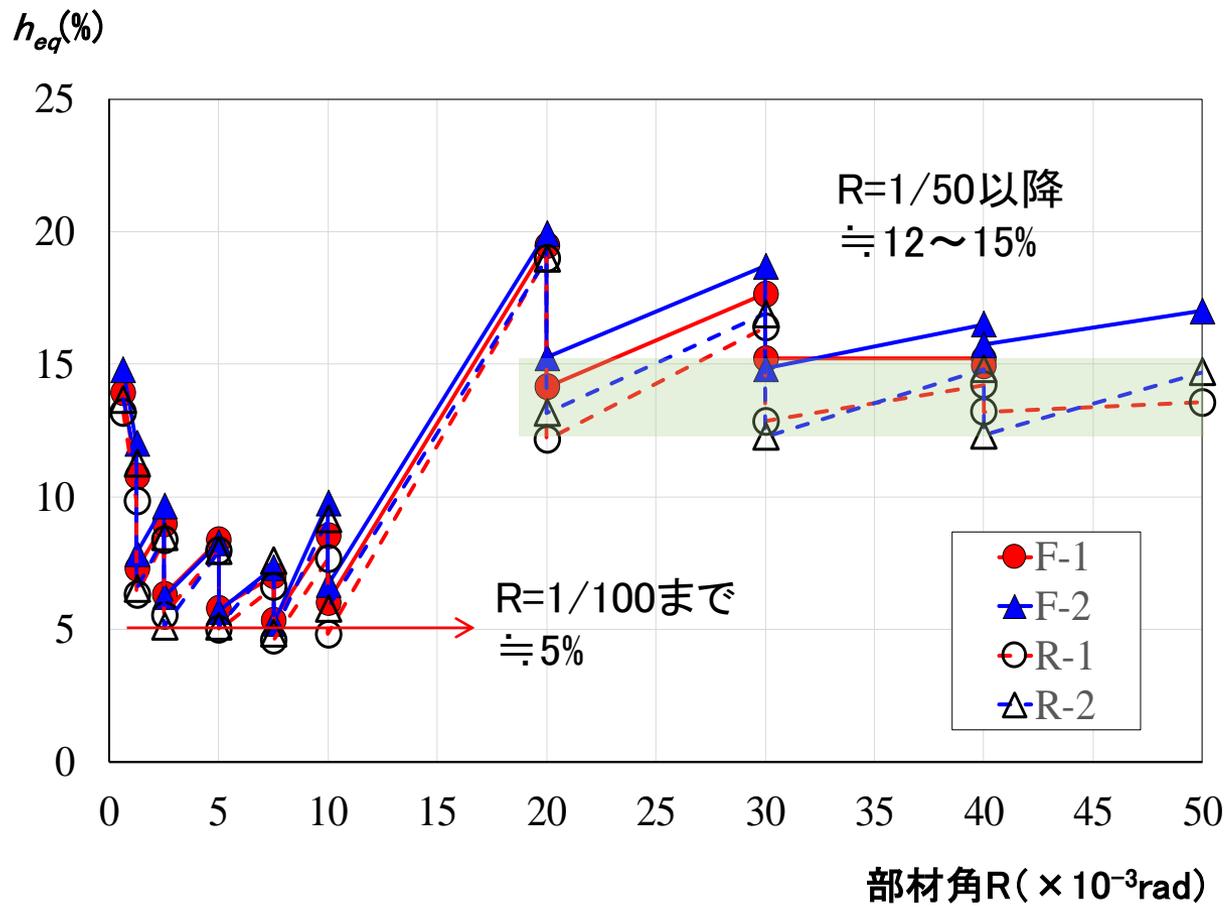
➤ 曲げ終局強度

$$M_u = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d$$

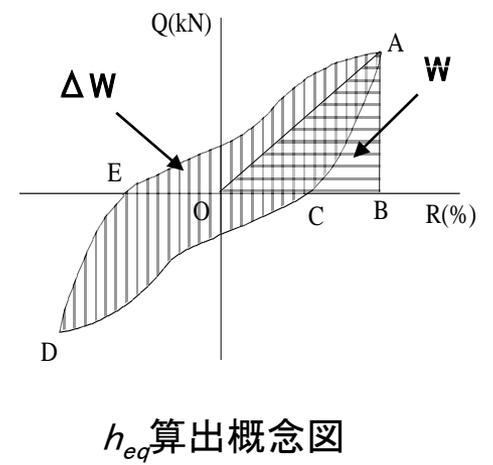
試験体名	曲げひび割れ強度			曲げ終局強度		
	eQ_{mc} kN	cQ_{mc} kN	eQ_{mc}/cQ_{mc}	Q_{max} kN	Q_{mu} kN	Q_{max}/Q_{mu}
F-1	297.5	175.6	1.69	1455.0	1305.3	1.11
F-2	180.0	191.9	0.94	1647.5	1479.4	1.11
R-1	45.0	44.1	1.02	343.6	311.6	1.10
R-2	41.1	45.4	0.90	403.4	348.2	1.16

等価粘性減衰定数

寸法効果・スラブ有無の影響はない

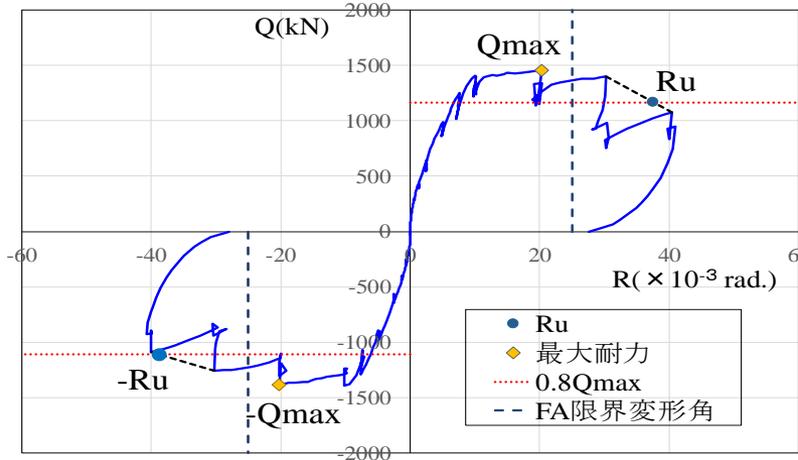


$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{\Delta W}{W}$$

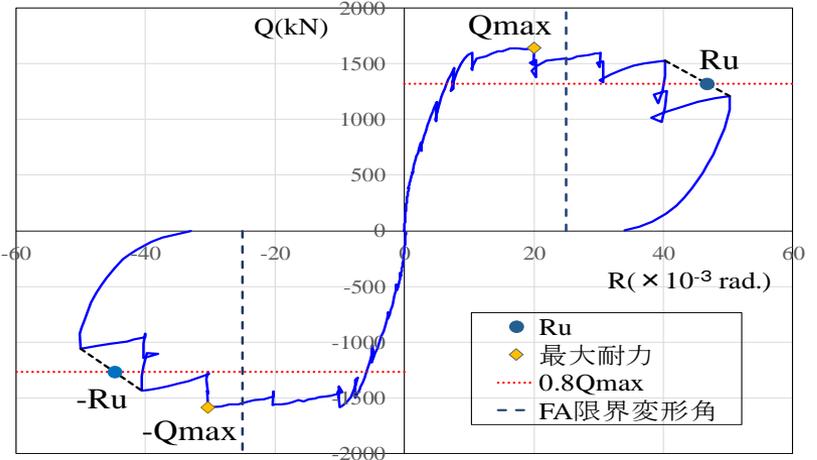


等価粘性減衰定数の推移

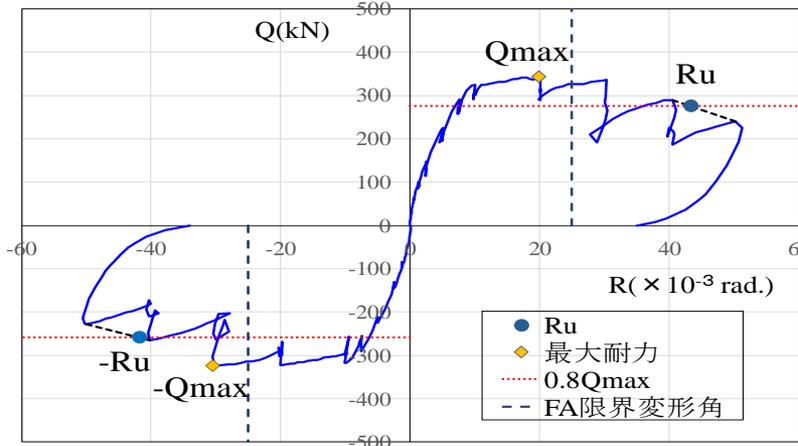
限界変形角



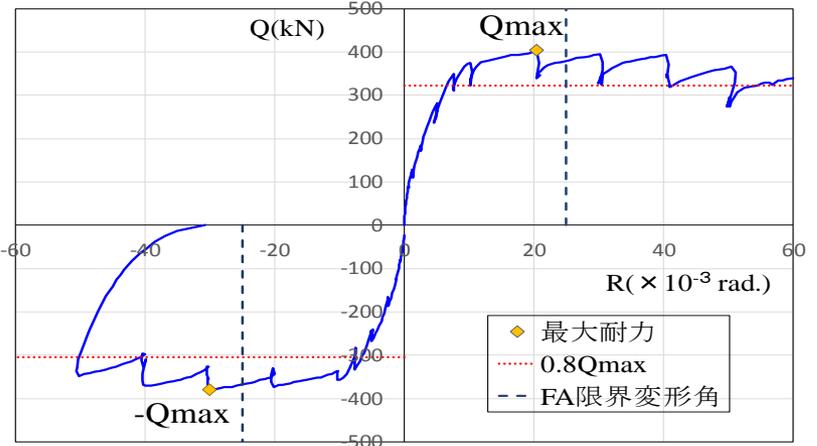
(a) F-1試験体



(b) F-2試験体



(c) R-1試験体



(d) R-2試験体

限界変形角の算出

梁部材実験まとめ

高密配筋された梁部材実験から下記が確認された。

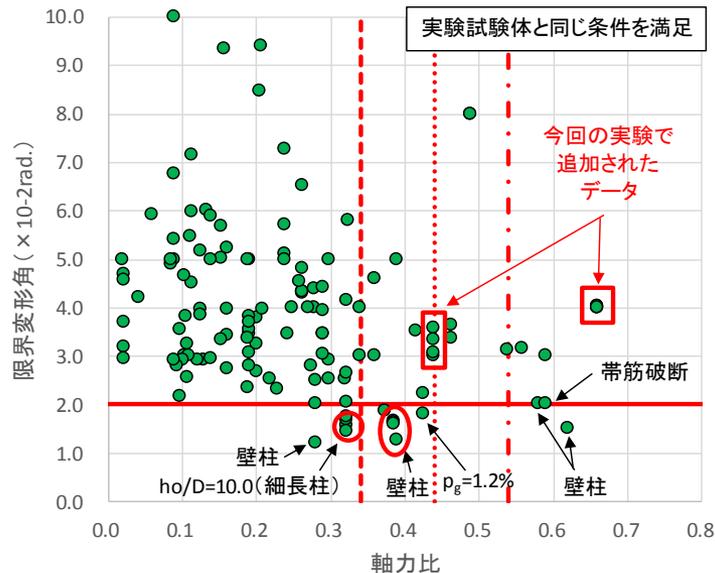
- 1) せん断応力度レベル τ_u/σ_B が0.15を超える部材種別FBの梁部材でも、修正荒川mean式によるせん断余裕度が1.0以上かつ付着応力度が付着信頼強度以下であれば曲げ先行型となる。
- 2) 矩形断面では上端主筋の曲げ降伏後付着割裂破壊が進展し、 $R=1/33$ (3%)の繰返しで耐力低下が大きい。スラブ付き断面では端部せん断破壊が進み、せん断応力度レベルは高くなるが、 $R=1/33$ (3%)の繰返しでも耐力低下は小さく変形性能は向上した。
- 3) 曲げ終局強度を維持できる部材角は、包絡線では縮小試験体よりも実大試験体ともに $R=1/40$ (2.5%)以上であった。
- 4) 初期剛性・諸強度・降伏点剛性低下率ならびに等価粘性減衰定数には寸法効果の影響は見られなかった。
- 5) 限界変形角(0.8 Q_{max})は実大の方が低下する傾向がある。

**3. 実験データベースを用いた分析および
直交方向水平力が1階隅柱に作用する
変動軸力に及ぼす影響
(京都大)**

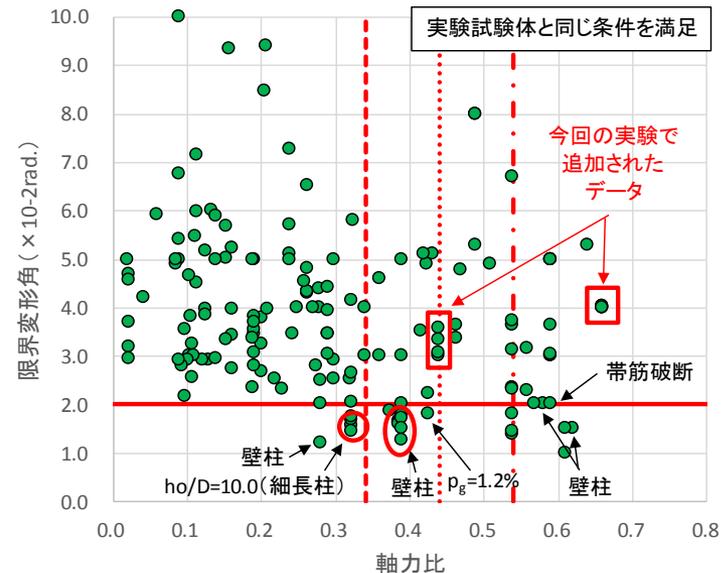
実験データベースを用いた分析

建築基準整備促進事業「高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造構造部材の強度，剛性及び変形能の評価方法に関する検討(平成24～25年度)」で構築された実験データベースを活用

➤ 実験試験体と同じ条件を満足した柱試験体



釣合軸力時の検討も実施



釣合軸力時の検討を省略

釣合軸力時の検討を省略すると、
軸力比0.5～0.6付近で変形性能が特に低い試験体



釣合軸力時の
検討不可欠

直交方向水平力が1階隅柱軸力に及ぼす影響(解析概要)

直交方向水平力による変動軸力を考慮する方法に**統一された見解がない**
直交方向入力の**0.3倍以上**(保有水平耐力規準), **0.5倍**(終局強度指針)分を加算, など

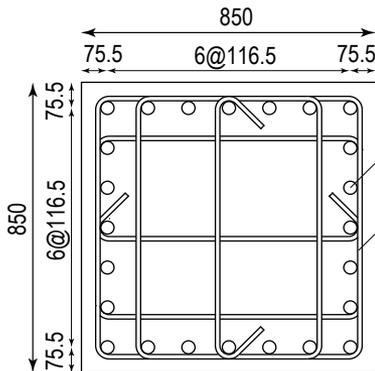


直交方向水平力が1階隅柱に作用する変動軸力に及ぼす影響について検討

➤ 検討に用いた建物モデル: 保有水平耐力規準・設計例1

- 平面4×4スパンの14層RC造建物
- 耐震壁のない整形な純フレーム構造(全体降伏型)
- 一貫計算プログラムにより増分解析

検討対象隅柱(1階)

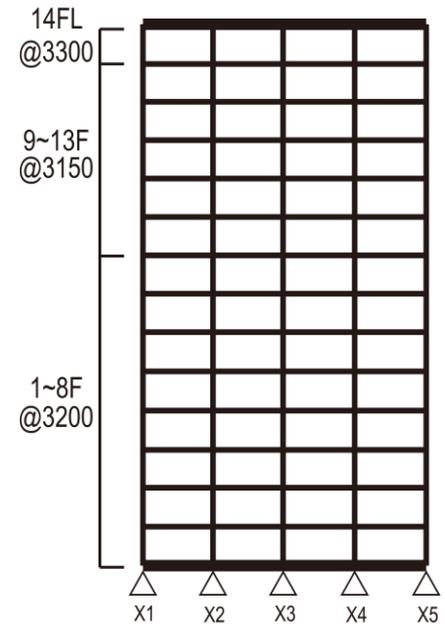
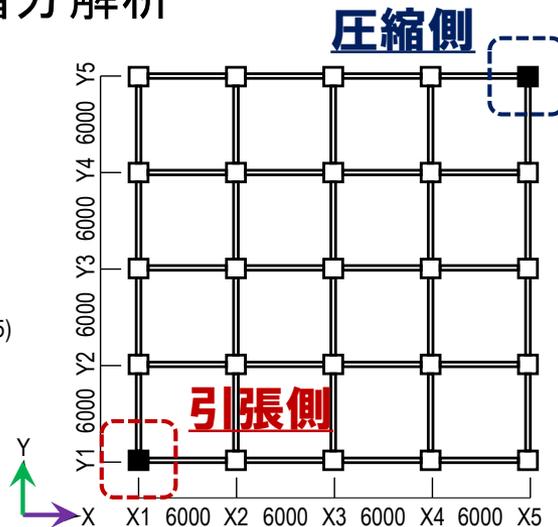


コンクリート: F_c36

主筋: 24-D38(SD390)

せん断補強筋: 5-S13@100(USD785)

直交方向(Y方向)
検討方向(X方向)



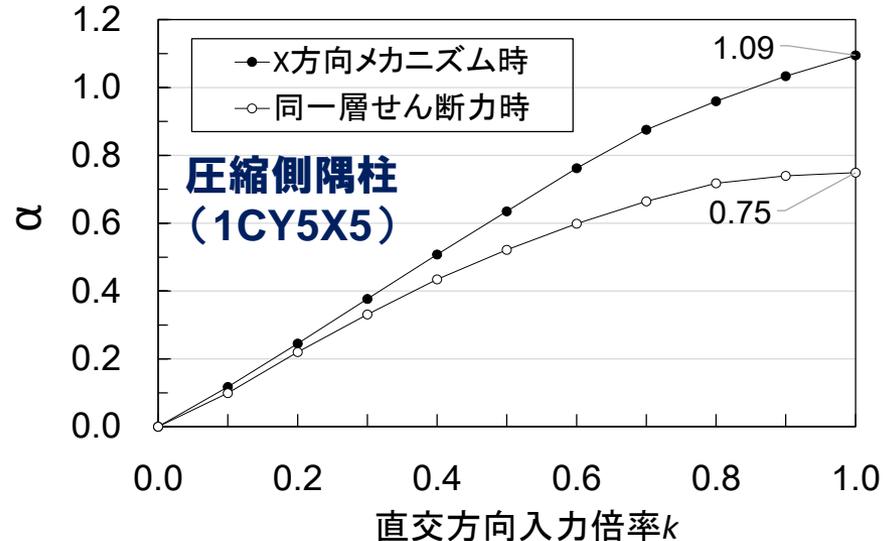
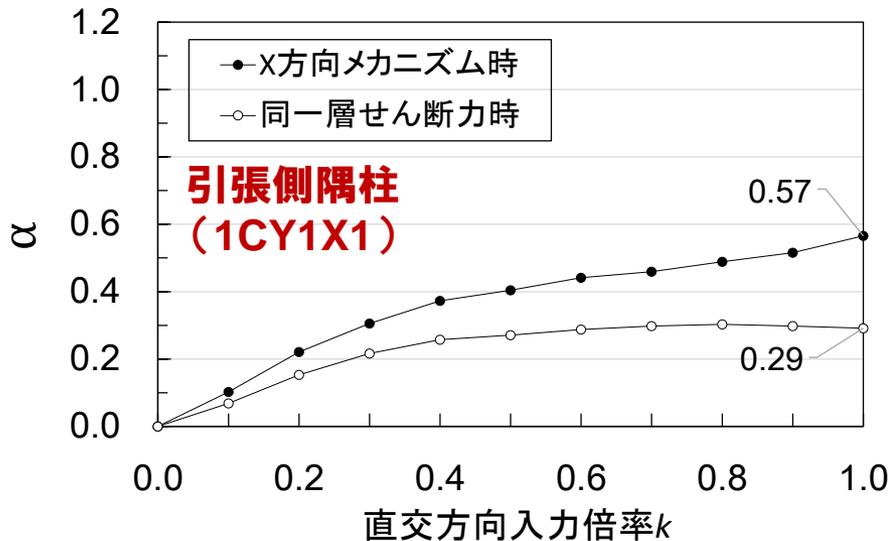
直交方向水平力が1階隅柱軸力に及ぼす影響(解析結果)

X方向水平入力 H_X に対するY方向水平入力 H_Y の倍率を k として、
 $k=0.0\sim 1.0$ の間で0.1刻みで分割し、それぞれの倍率 k に対して増分解析

$$\Delta N_k = \Delta N_{HX} + \alpha \Delta N_{HY}$$

↑
 規準・指針に示される
 直交方向加算分の倍率に相当

ΔN_k : 倍率 k での軸力増分
 ΔN_{HX} : X方向メカニズム時軸力増分
 ΔN_{HY} : Y方向メカニズム時軸力増分



- X方向メカニズム時: X方向で崩壊メカニズムが形成される時点
- 同一層せん断力時: 二方向加力時のX方向とY方向の層せん断力のベクトル和が、X方向一方向入力とした場合に崩壊メカニズムを形成する時の層せん断力と等しくなる時点

➡ 直交方向水平力による軸力増加が規準・指針より大きくなるケースも