

鉄筋コンクリート造の変断面部材の
構造特性評価に関する実験

平成21年度応募課題名

袖壁を有する柱および腰壁・垂壁を有する梁の
力学特性に関する実験と実用評価法の検証

東京大学地震研究所

横浜国立大学

福井大学

建築研究所

7. 鉄筋コンクリート造の変断面部材の構造特性評価に関する実験 袖壁を有する柱および腰壁・垂壁を有する梁の 力学特性に関する実験と実用評価法の提案—全体概要—

研究目的：鉄筋コンクリート造袖壁付き柱および腰壁・垂壁付き梁の
(1) 剛性，強度と靱性，損傷と変形の実験的に明らかにする
(2) せん断強度と曲げ強度，損傷評価の実用的な評価法を提案する

研究背景：変断面部材一般について

- (1) 壁板の破壊に起因する耐力低下，損傷状況などに不安がある
- (2) 強度や靱性の精度のよい評価法（研究、実用）が確立していない
→スリットの多用：低層建物では多くの場合に合理的ではない

20年度研究概要：袖壁付き柱6体、腰壁垂壁付き梁6体計12体の実験結果とともに、文献調査による実験データにより既往の実用評価法の精度が十分でないことを明らかにした

21年度研究成果：厚い袖壁付き柱6体（本課題予算では4体）、腰壁垂壁付き梁5体、薄い袖壁付き柱6体の実験により、評価法の確立に不可欠な実験結果を得るとともに、既往の実験結果も分析して、実用的評価法の提案し、検証結果を整理した

今後の課題：とくに**靱性**の実用評価法に必要な部材実験、**架構**や構造物の実験、振動実験、実用的評価法の提案と検証

7. 鉄筋コンクリート造の変断面部材の構造特性評価に関する実験
袖壁を有する柱および腰壁・垂壁を有する梁の
力学特性に関する実験と実用評価法の提案

第1章

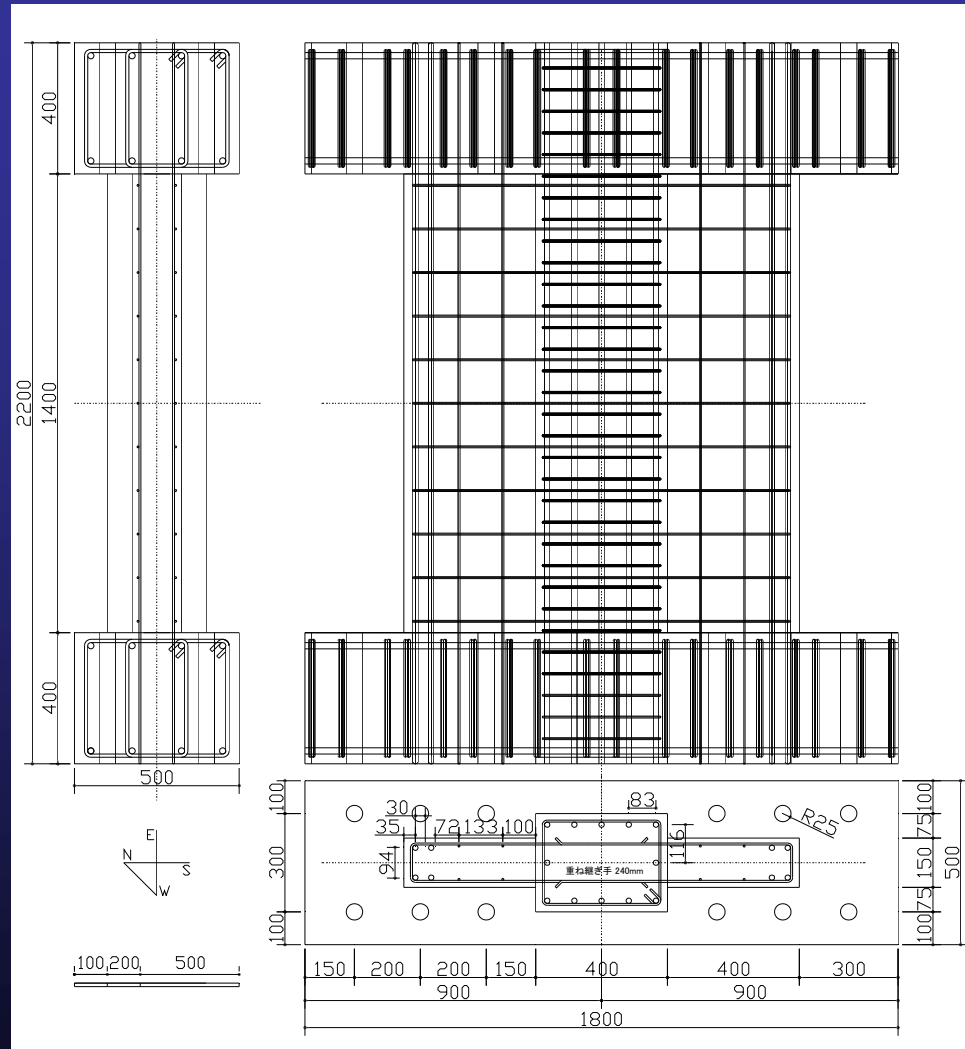
高強度鉄筋コンクリート造両側袖壁付き柱の
耐震性能に関する実験
—壁厚，補強筋比および柱偏在の影響—

(東京大学地震研究所，建築研究所)

- 新築対象
- 高強度コンクリート($F_c=40$)
- 壁厚さが厚い場合 ($t/B=0.5$)
- 柱が偏在する場合
- せん断強度式(実用評価式)の検証



試験体



標準試験体SWB40

壁厚比=0.5
(2009)

標準

0.32 0.32 0.32
SWB40

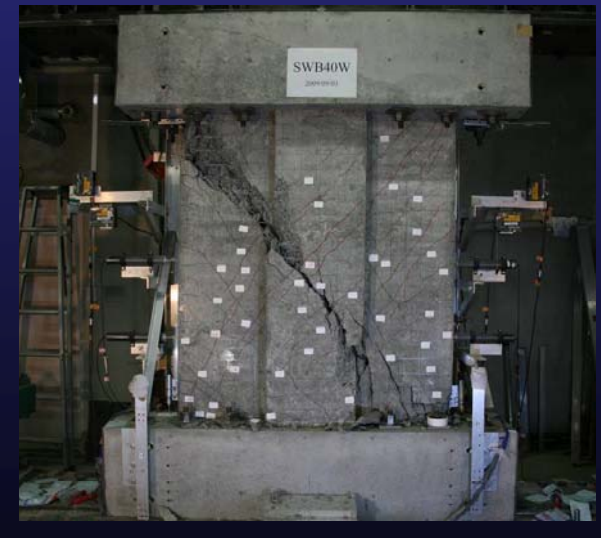
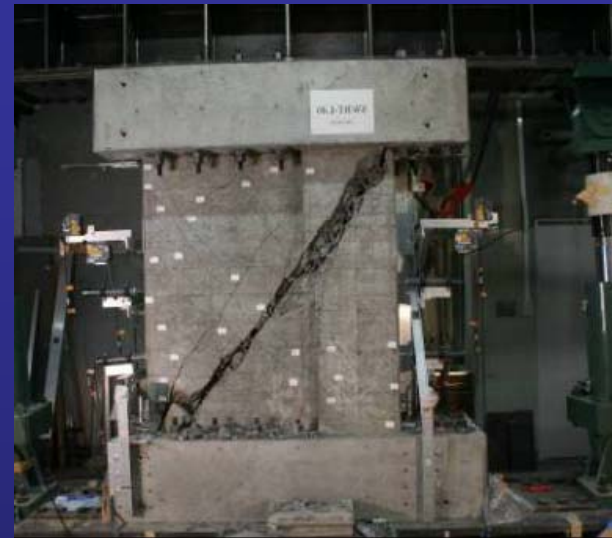
柱偏在

0.32 0.32 0.32
SWBA40
0.32 0.32
SWBT-L40

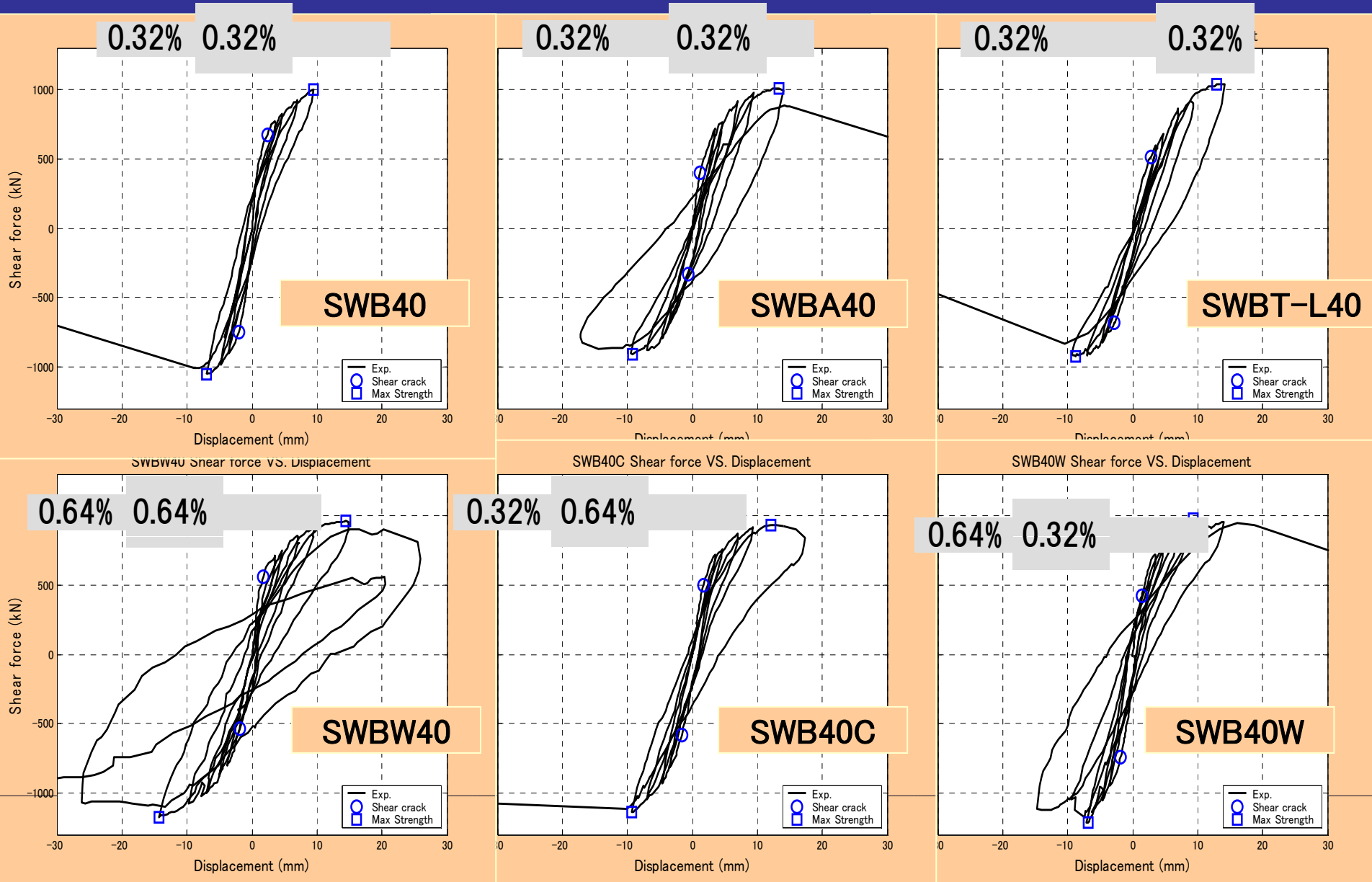
壁筋比

0.64 0.64 0.64
SWBW40
0.32 0.64 0.32
SWB40C
0.64 0.32 0.64
SWB40W

実験結果



実験結果



せん断強度式

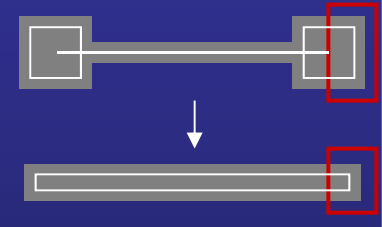
既往式

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/Qd_e + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \sigma_{wy}} \right\} b_e j_e + 0.1N$$

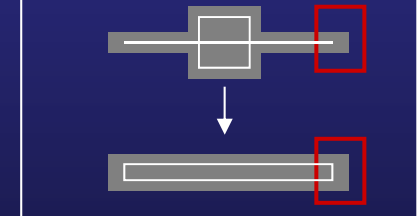
荒川min式

	日本建築防災協会 耐震診断基準・同解説	日本建築センター 構造関係技術解説書
壁引張側		
柱引張側		
d _e	柱の引張鉄筋中心から圧縮縁	引張鉄筋群中心から圧縮縁
b _e	(柱断面積 + 圧縮側壁断面積) / (柱せい + 圧縮側壁長さ)	断面積 / 全せい

耐震壁の等価置換



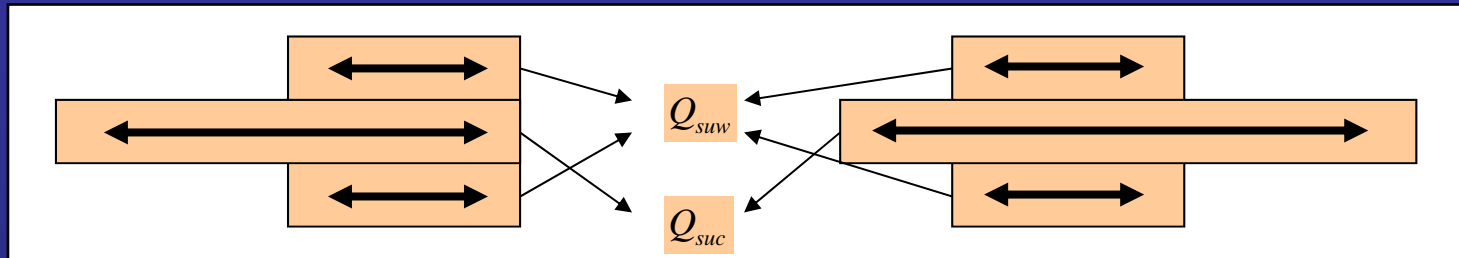
袖壁の等価置換



問題点

- ① コンクリートの応力度負担が過大になる端部の断面幅が小さい
- ② 耐震壁のよう等価壁厚に置換 → 端部が拘束されていないので危険側の評価
- ③ 等価な補強筋効果の算定は明らかに過大評価である

せん断強度式



壁と柱の断面を縦（壁長さ）方向に分割し Q_{suc}, Q_{suw} を算出・累加する

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N$$

分割累加式

- ・ 柱、袖壁の実用せん断設計式と同様に応用可能
→ 荒川min式により算出
- ・ 断面形状によらず物理的に安全側の評価
- ・ 鉄筋の重複評価しないように適用する

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/Qd_e + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \sigma_{wy}} \right\} b_e j_e$$

荒川min式

アーチ・トラス機構

- ・ 袖壁部の全域で一様なトラス機構が生じないため柱部同様な計算方法で算出
- ・ 補強筋比によるクリティカル機構を考慮し以下の式のうち最小値とする

$$V_u = \mu p_{we} \sigma_{wy} b_e j_e + \left(v \sigma_B - \frac{5 p_{we} \sigma_{wy}}{\lambda} \right) \frac{bD}{2} \tan \theta$$

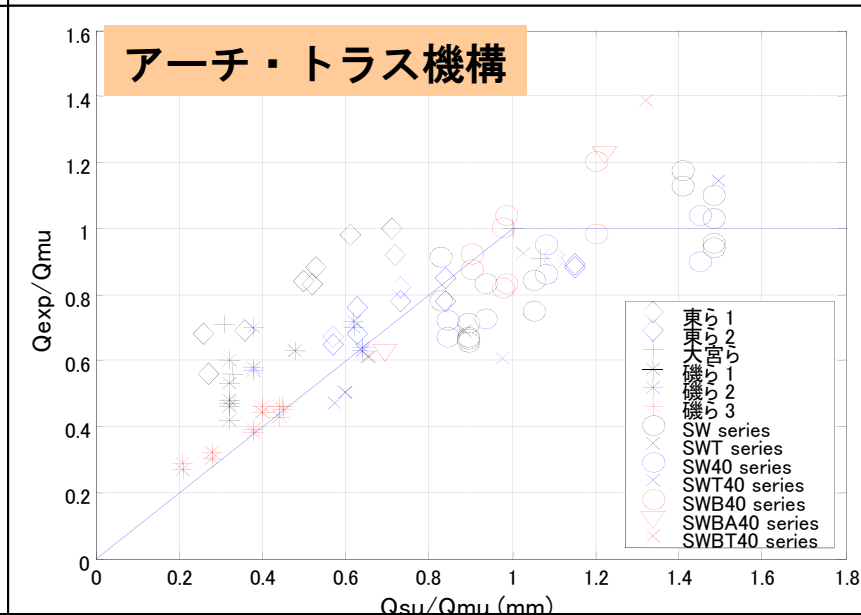
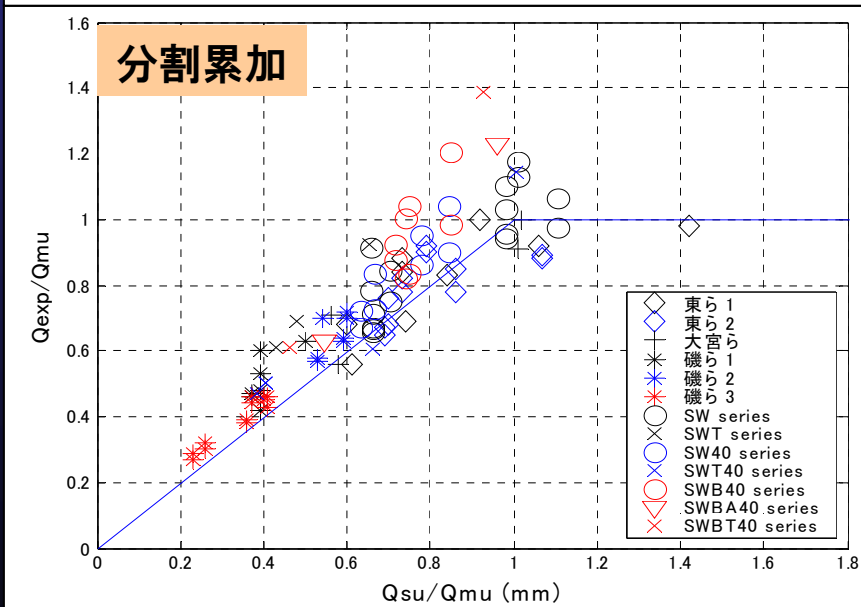
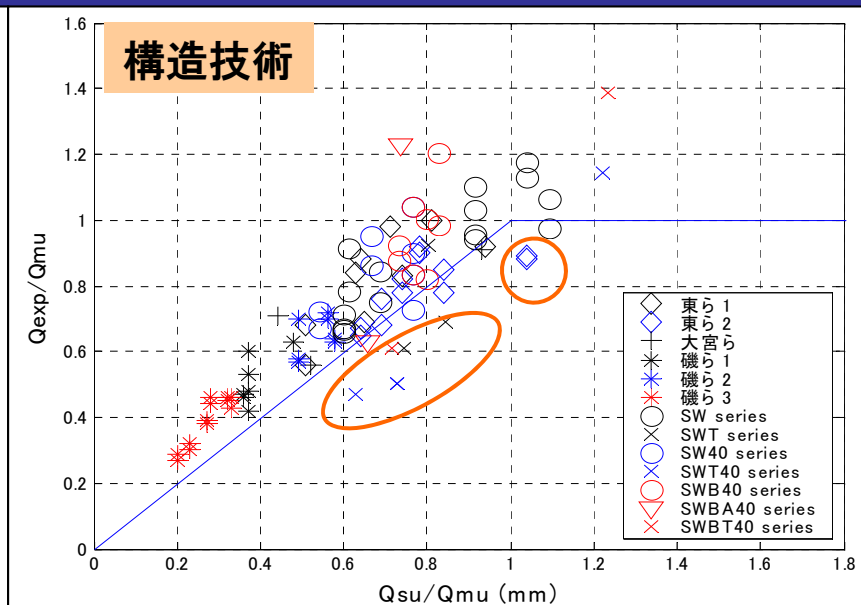
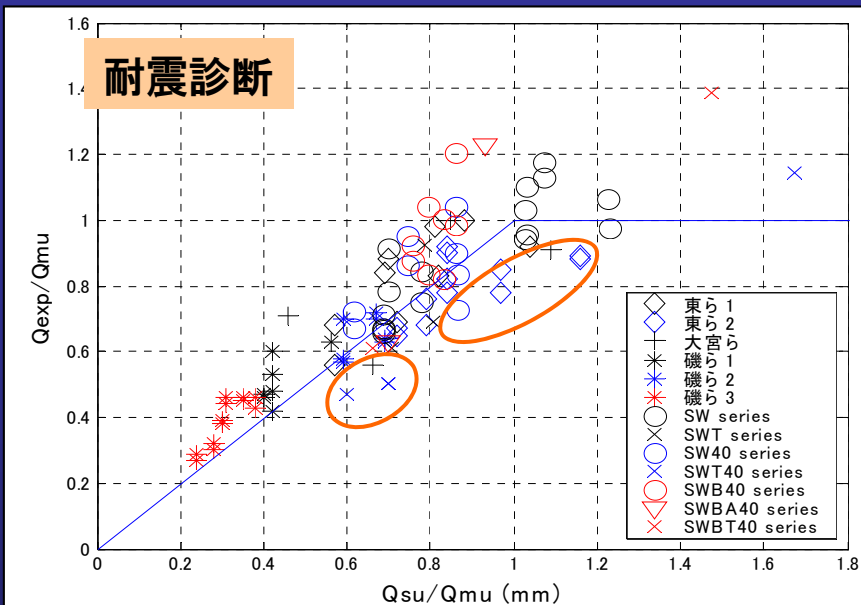
$$V_u = \frac{\lambda v \sigma_B + p_{we} \sigma_{wy}}{3} b_e j_e$$

靱性保証型指針

$$V_u = \frac{\lambda v \sigma_B}{2} b_e j_e$$

せん断強度式

* 過去(8体) & 既往(43体)の実験結果を含む計(67体)



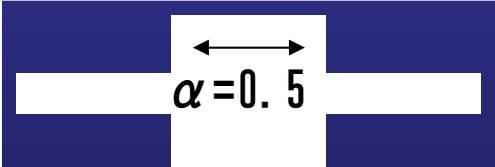

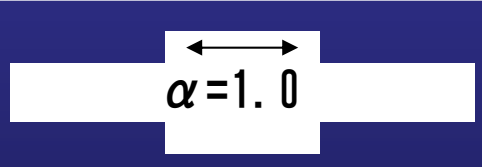
せん断強度式・修正

- 強度寄与係数 α による修正

$$Q_{su} = Q_{suw} + \alpha \cdot Q_{suc} + 0.1N$$

- 強度寄与係数 α の値

検討行った試験体に関してひずみを元に以下のように設定

 <p>$\alpha = 0.5$</p> <ul style="list-style-type: none">* 壁厚比0.25* 出張比1.0* 両側袖壁	 <p>$\alpha = 1.0$</p> <ul style="list-style-type: none">* 壁厚比0.25* 出張比1.0以下* 片側袖壁* 柱引張方向のみ	 <p>$\alpha = 1.0$</p> <ul style="list-style-type: none">* 壁厚比0.50* 両側・片側袖壁
--	---	--

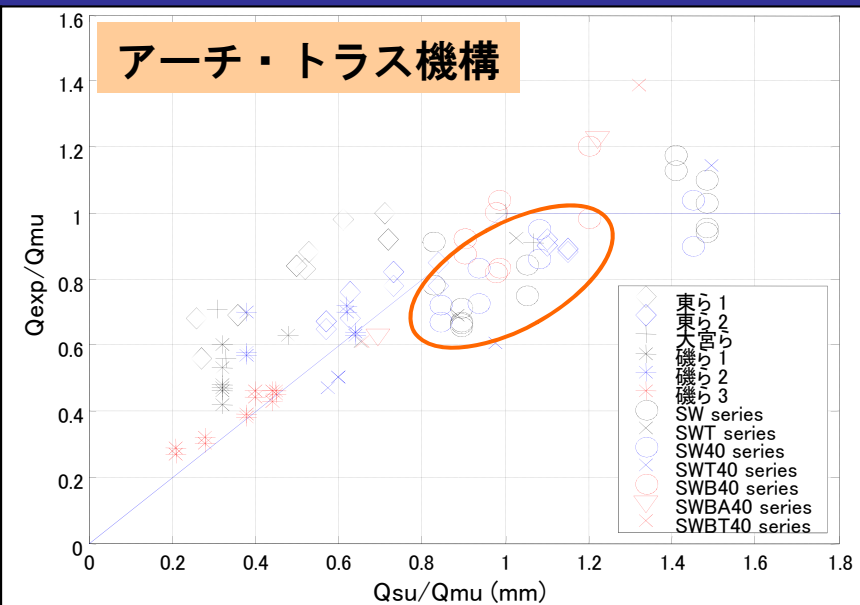
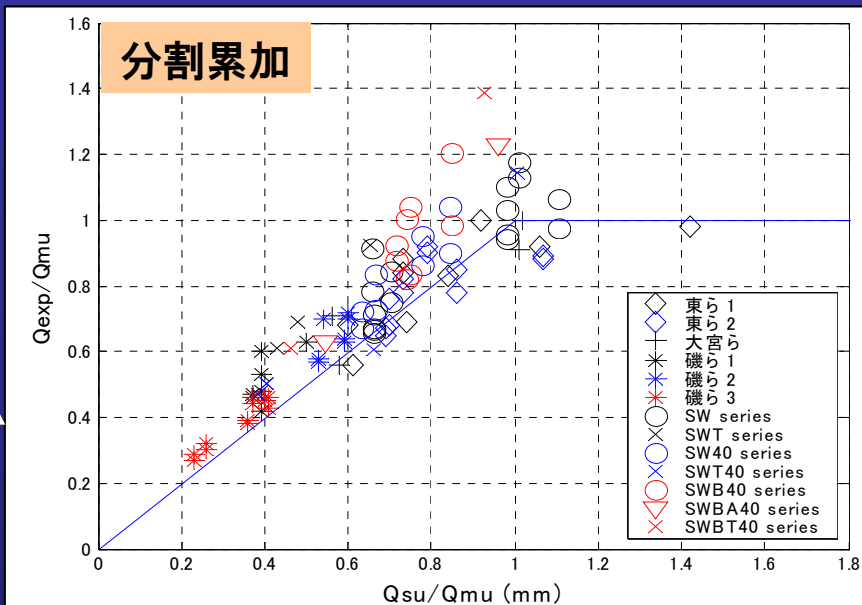
- 今後検討が必要な強度寄与係数 α

- ? 壁厚比0.25以下の袖壁が薄い場合
- ? 袖壁出張比が大きい場合
- ? 片側の柱圧縮方向

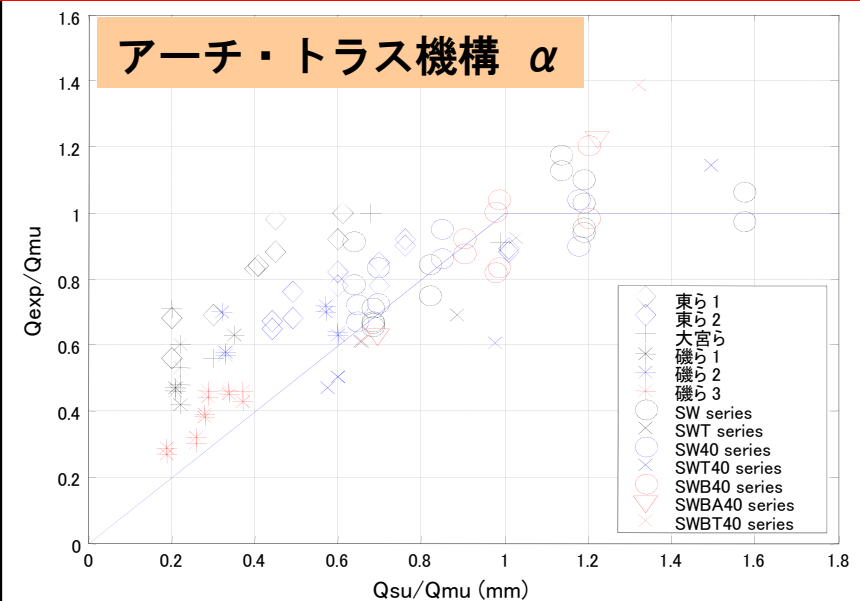
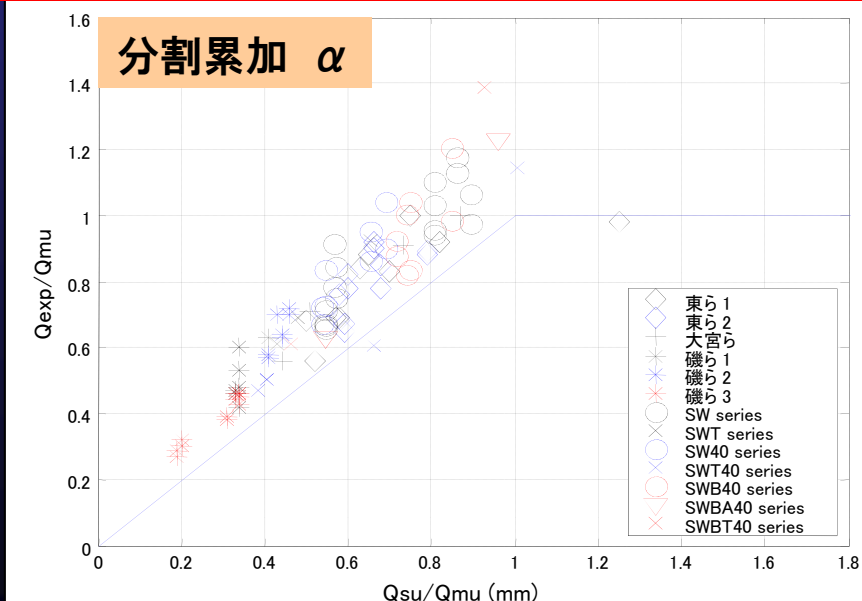
せん断強度式

* 24体 (うち過去8体) & 既往 (43体) の実験結果を含む計 (67体)

修正前



修正後



破壊モード

* 壁部と柱部を分けて考える

a. 鉄筋降伏から >> 強度評価

壁横筋vs壁縦筋 主筋vs帯筋、袖壁部と柱部を、せん断(s)曲げ(m)

mm

柱：曲げ
壁：曲げ

sm

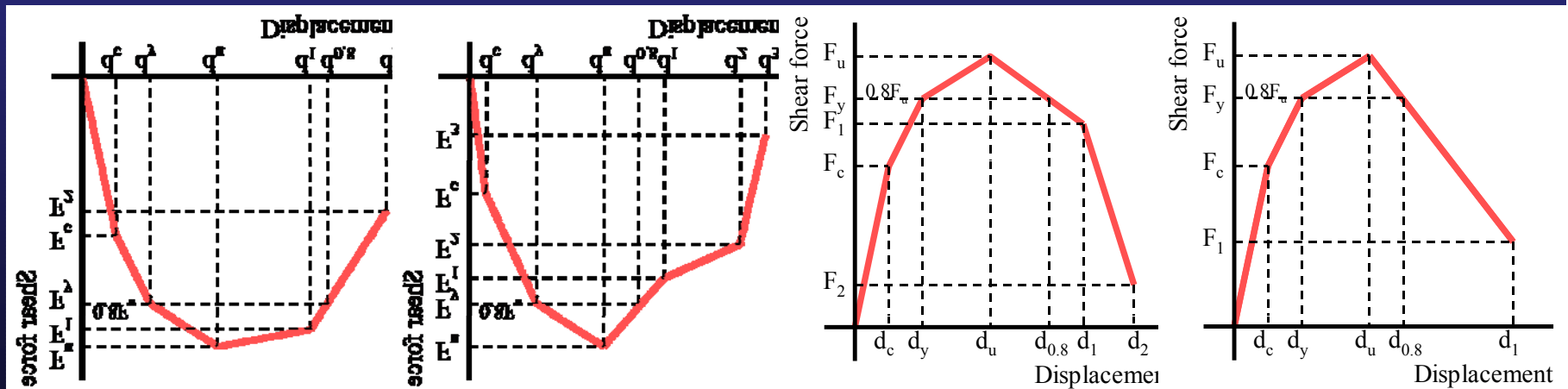
柱：曲げ
壁：せん断

SS

柱：せん断
壁：せん断

b. 復元力から >> 靱性評価

部材の挙動から、袖壁部と柱部を、せん断(S)曲げ(M)損傷(D)



MM

柱：曲げ
壁：曲げ

DM

柱：曲げ
壁：損傷

DS

柱：せん断
壁：損傷

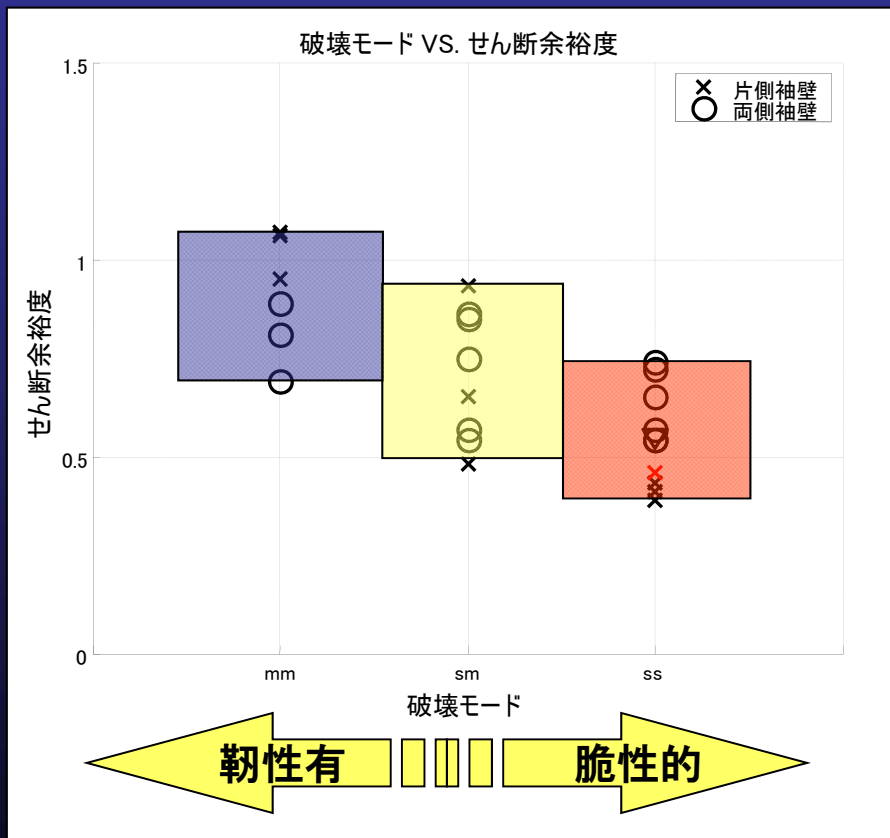
SS

柱：せん断
壁：せん断

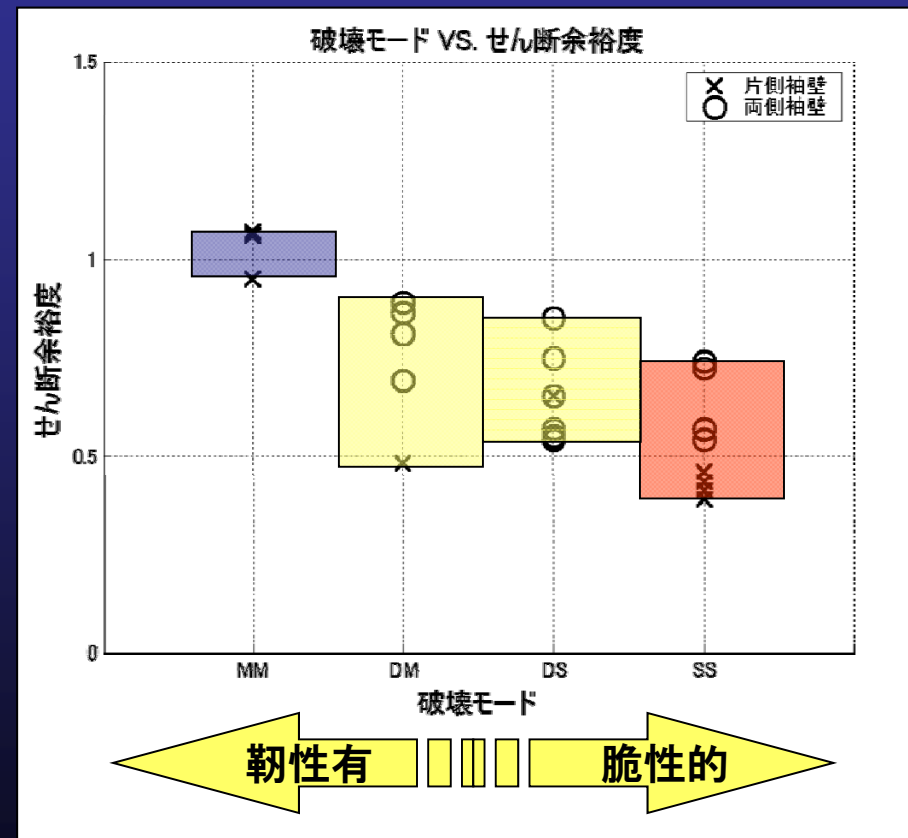
破壊形式とせん断余裕度

- * 曲げ式：完全塑性理論
- * せん断式：分割累加式

鉄筋降伏からの破壊モード



復元力からの破壊モード



まとめ

壁厚が比較的厚い（柱幅300，壁厚150，壁厚比0.5）場合で，柱位置や補強筋比を主要なパラメータとした袖壁付き柱6体の実験を行い，以下の結論を得た。

(1) 試験体SWB40，SWB40C，SWB40W，SWBA40 は，破壊形式がせん断破壊型となった。SWBT-L40は壁引張側で曲げ型，柱引張側でせん断破壊型となった。帯筋比，壁筋比を2倍にしてM/Qdをやや大きくした試験体SWBW40 は曲げ破壊型となった。

(2) 同じ断面・加力条件で，柱または袖壁のせん断補強筋比が異なる試験体SWB40，SWB40C，SWB40Wを比較すると，柱または袖壁の横補強筋が増えることで，せん断破壊耐力および最大耐力時変形が向上し，特に柱帯筋を増やしたSWB40Cは最大耐力到達時変形が1.2倍程度になった。

(3) 柱の位置が異なる試験体SWB40，SWBA40，SWBT-L40のせん断耐力（負側）を比較すると，負側の耐力に対して柱位置はあまり影響しないことがわかった。柱圧縮（正）側の最大耐力もさらに大きい可能性もあるが，大きな違いはなかった。

(4) 袖壁付き柱が最大耐力に到達したときに，柱の主筋または帯筋が降伏し始めていることから，部材の耐力に柱帯筋が十分寄与していることが推定された。

まとめ

(1) 24体試験体の実験結果を、鉄筋の降伏状況&最大耐力以降挙動より、以下の4種類の構造特性に分類し、これらの破壊モードをせん断破壊余裕度に対してある程度関係づけることができた

- a. 袖壁端部縦筋と主筋が降伏し曲げ型となり耐力低下ほとんどなく靱性ある挙動
- b. 袖壁損傷より耐力が低下するが、耐力低下後には柱が曲げ変形し靱性ある挙動
- c. 最大耐力以降、袖壁・柱が共に耐力低下が生じ最終的にせん断破壊
- d. 耐力低下や袖壁の損傷前の小さい変形で全体に渡ってせん断破壊

(2) 67体の袖壁付き柱の終局せん断強度に対してせん断強度式の精度を検証し、以下のような結論を得た

- 既往式 : 特定の形状の試験体において精度が悪い
- 分割累加式 : 比較的精度よく全試験体に対して適切に評価
- アーチ・トラス : 課題評価の試験体もあり、ばらつきが大きい
- 修正式 : 強度寄与係数 α を設計式に一般化しうる可能性を確認した

第1章 高強度鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の耐震性能に関する実験
—壁厚, 補強筋比および柱偏在の影響— (東京大学地震研究所)

7. 鉄筋コンクリート造の変断面部材の構造特性評価に関する実験
袖壁を有する柱および腰壁・垂壁を有する梁の
力学特性に関する実験と実用評価法の提案

第2章

腰壁垂れ壁付き梁部材の構造性能 に関する実験

(横浜国立大学, 建築研究所)

研究目的

- 本研究では昨年度に引き続き、曲げ破壊を想定した腰壁・垂れ壁付梁試験体，スリット試験体の実験を行った。

実験① 腰壁・垂れ壁付き梁試験体

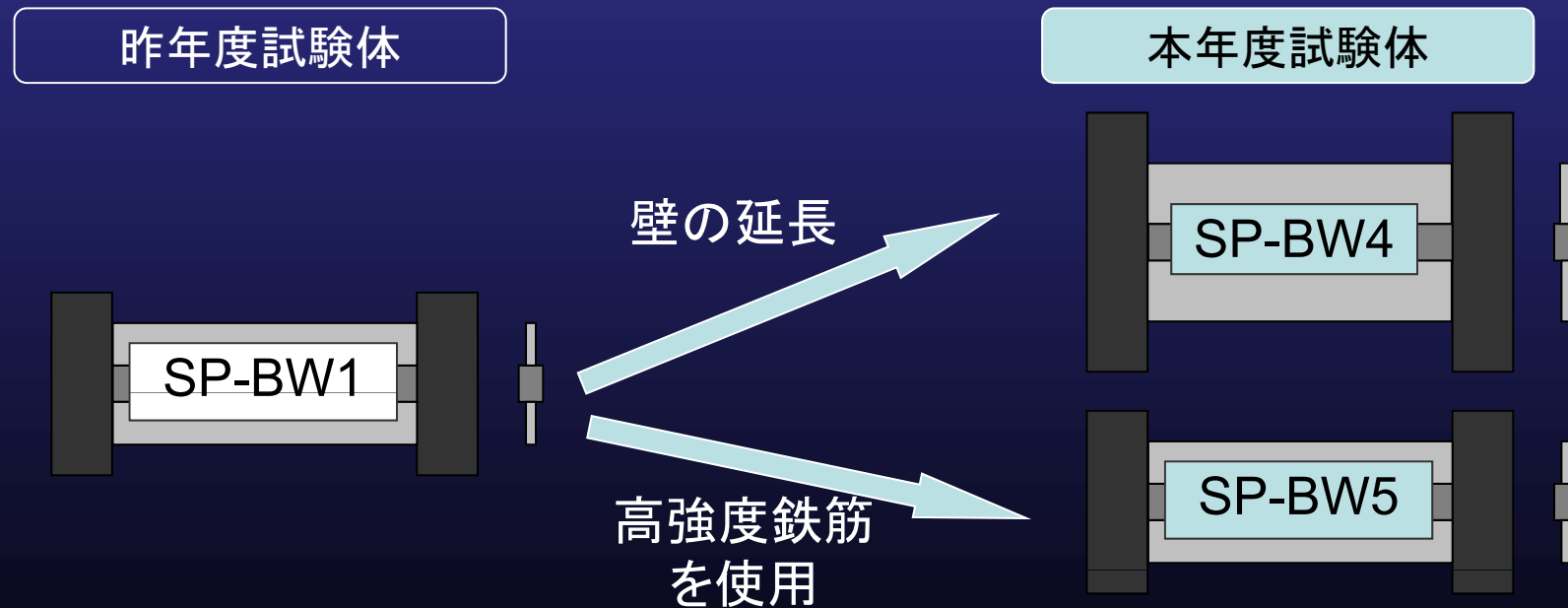
導入せん断力増大→変形性能の確認

実験② スリット試験体

取り付く壁を変化→初期剛性，降伏時変形の確認

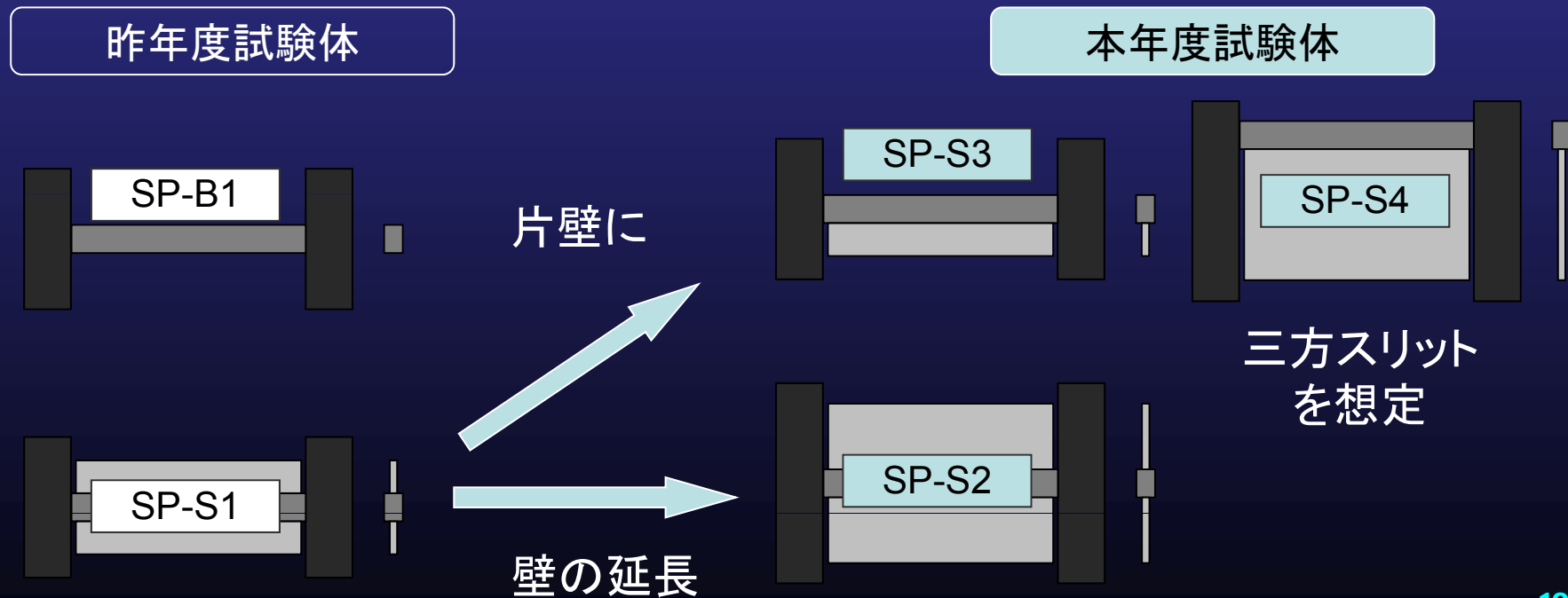
実験① 腰壁・垂れ壁付き梁試験体

- 昨年度試験体 $\tau_u / F_c \doteq 0.04$ (< 0.15)
終局変形角 $1/40$ (rad.)
- 本年度実験
導入せん断力増大 → 変形性能の確認

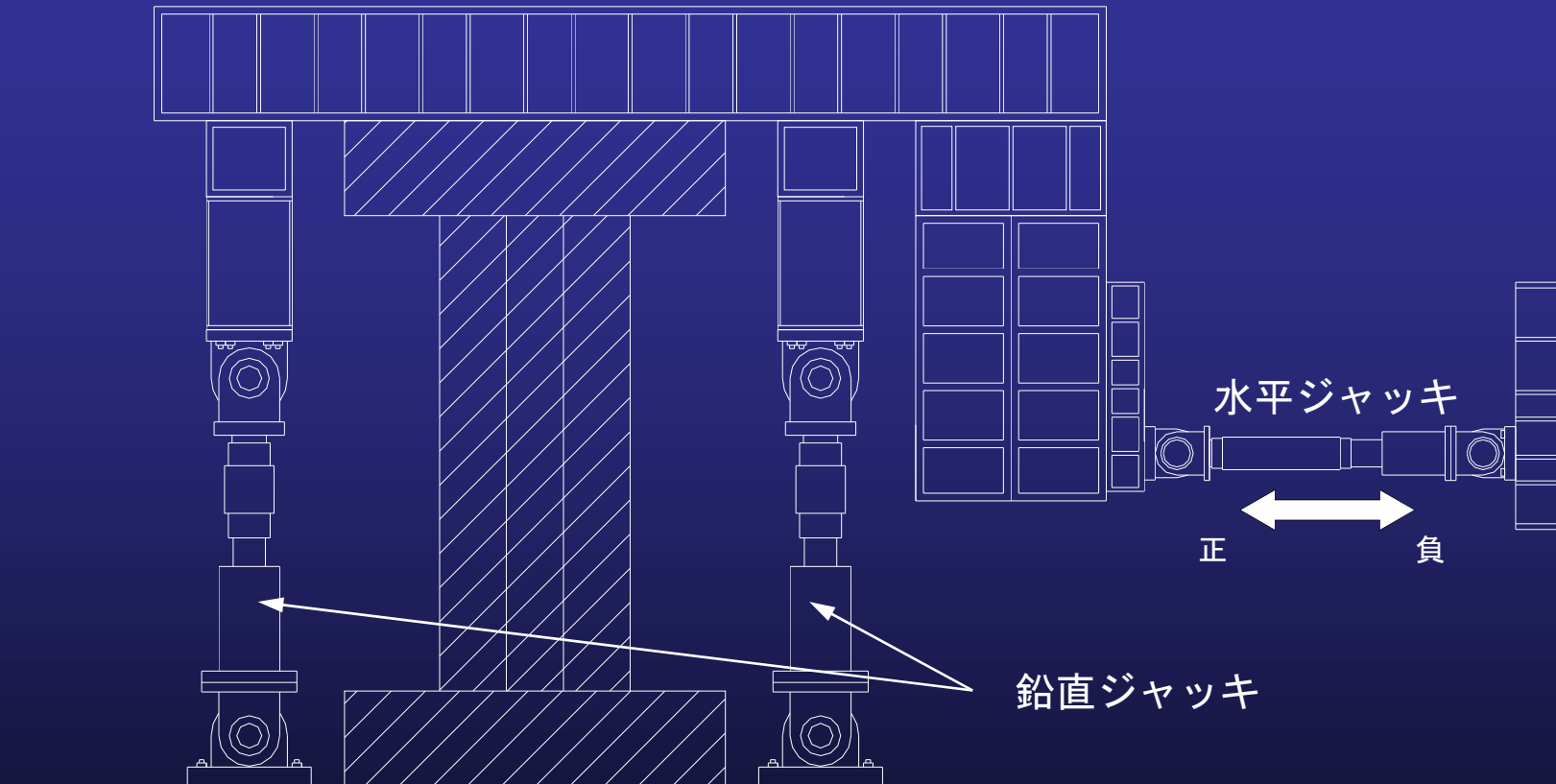


実験② スリット試験体

- 昨年度試験体 初期剛性→増大, 降伏時変形→減少
壁の影響が無視できない
- 本年度実験
取り付く壁を変化→初期剛性, 降伏時変形の確認

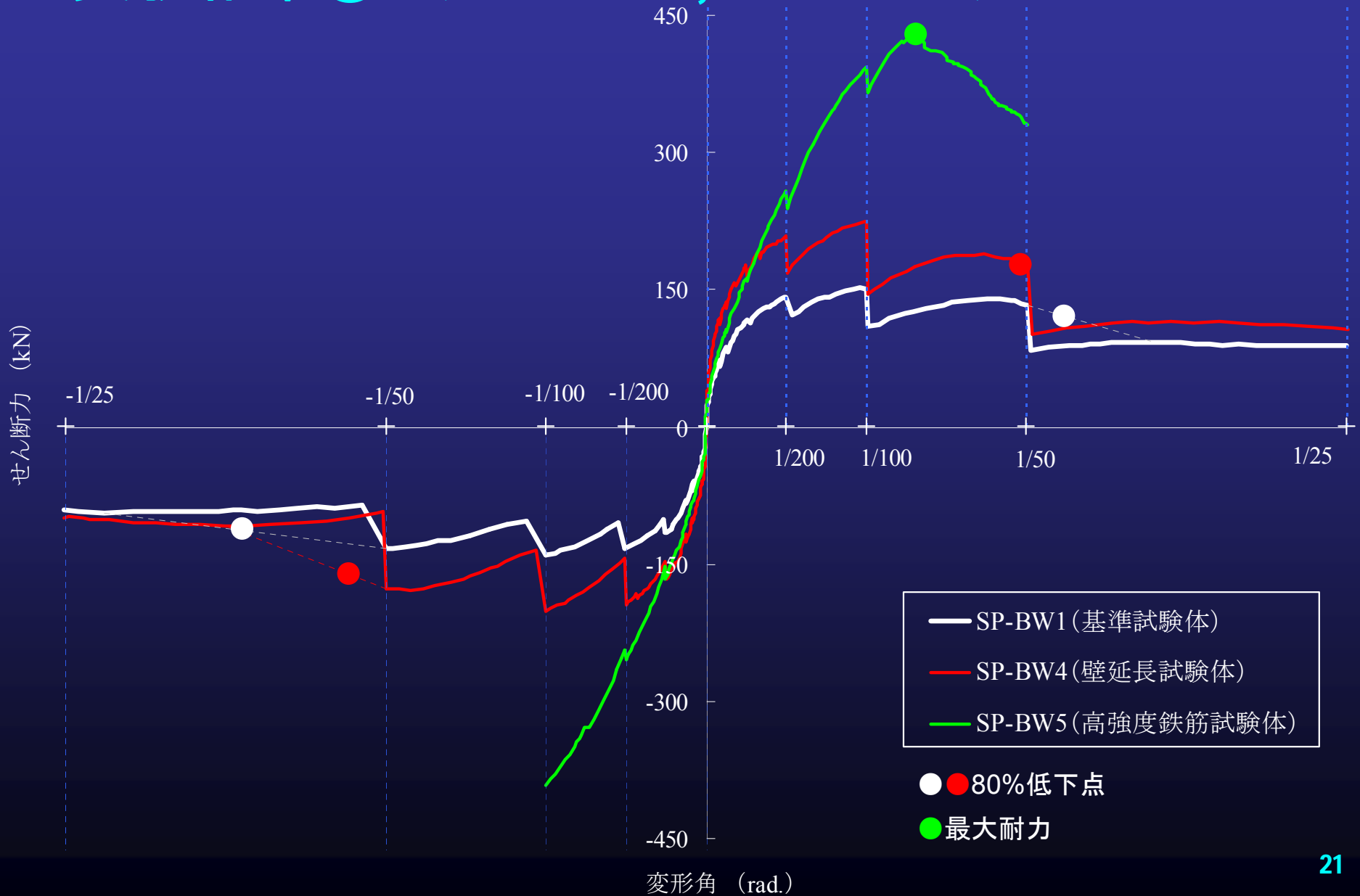


実験①, ②加力装置図

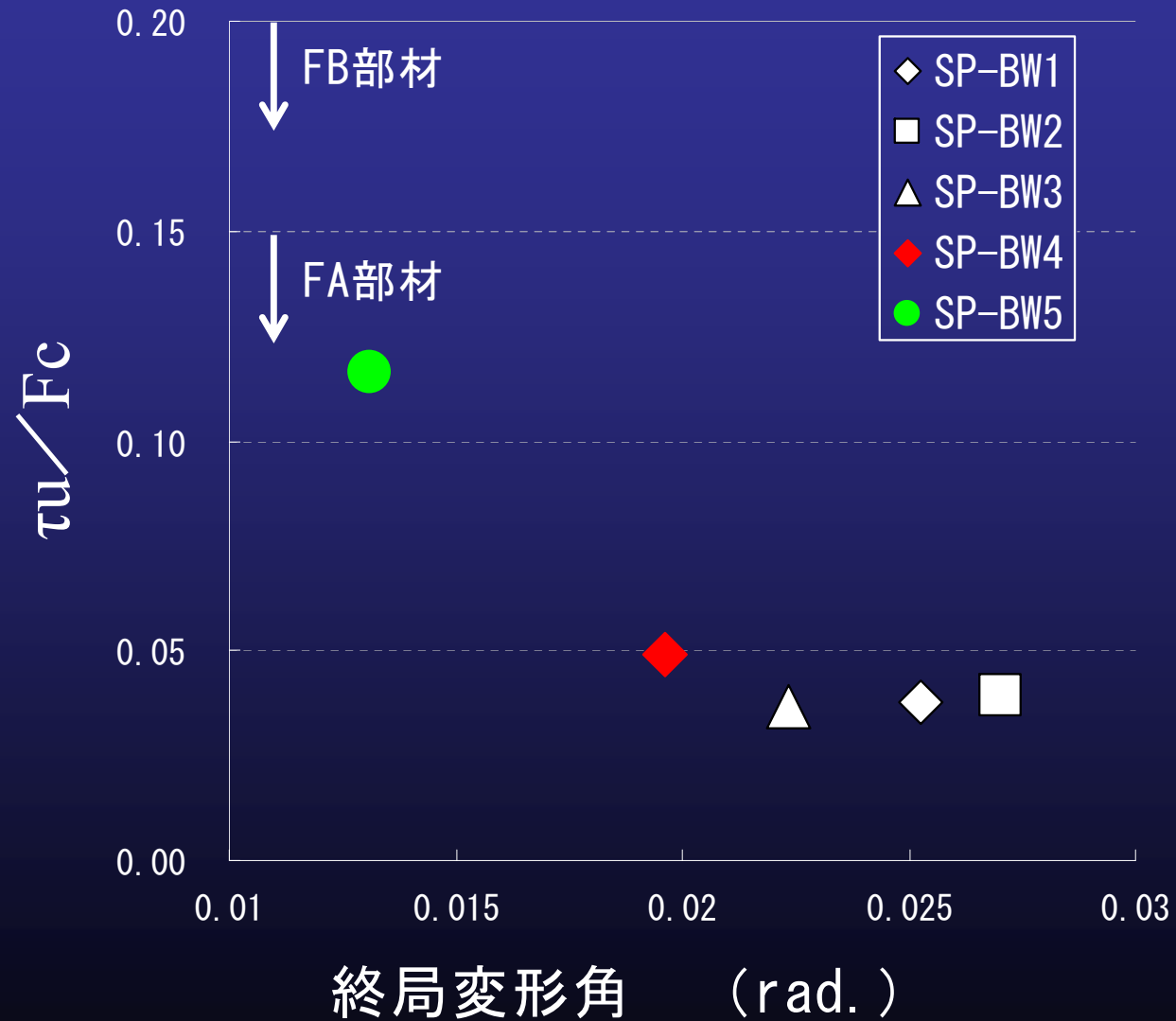


軸力0で一定,
正負繰り返し逆対称曲げモーメント

実験結果① (SP-BW4, SP-BW5)

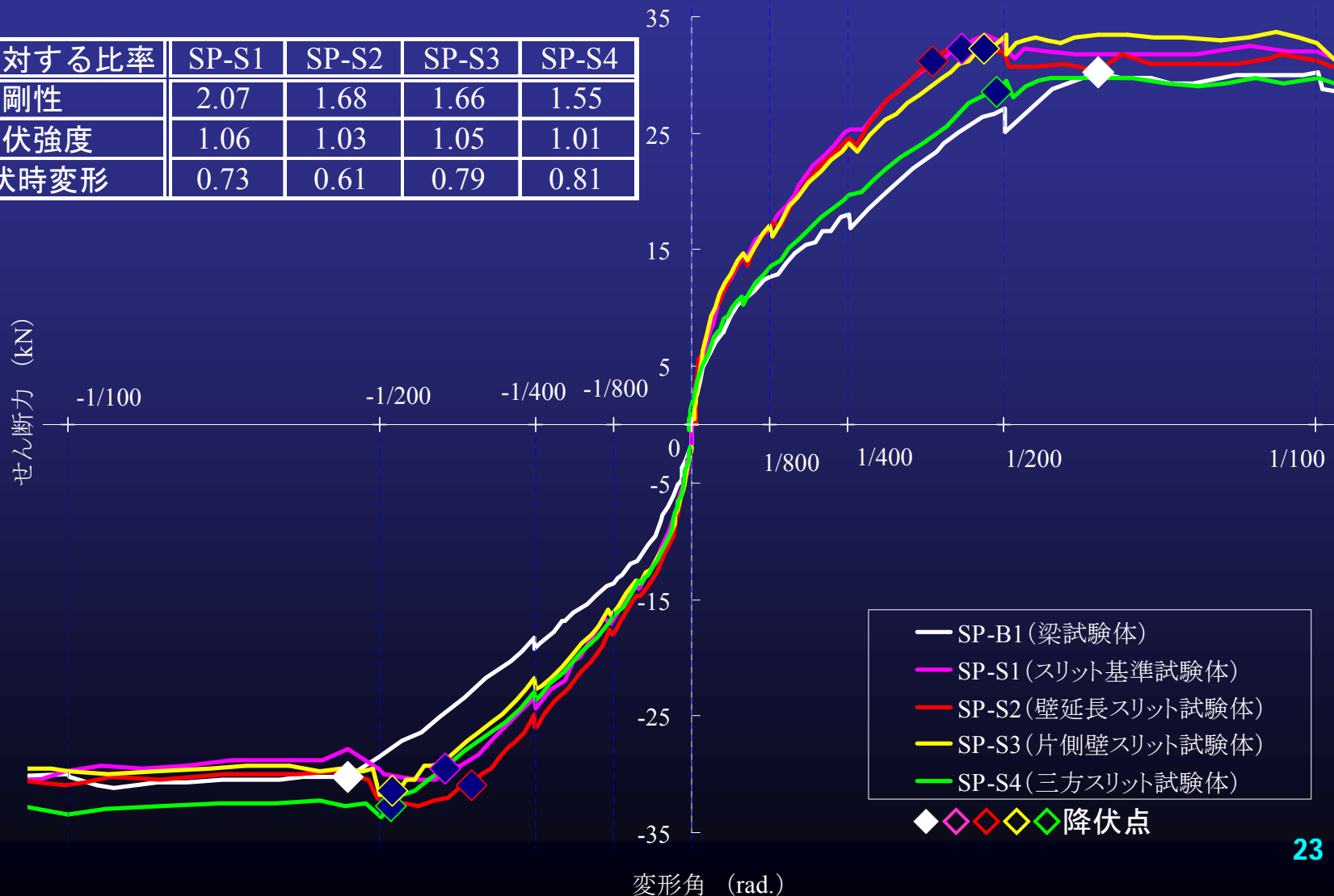


実験結果① (SP-BW4, SP-BW5)



実験結果② (SP-S2~ SP-S4)

梁試験体に対する比率	SP-S1	SP-S2	SP-S3	SP-S4
初期剛性	2.07	1.68	1.66	1.55
曲げ降伏強度	1.06	1.03	1.05	1.01
曲げ降伏時変形	0.73	0.61	0.79	0.81



検討項目(その他)

- 使用限界
- 曲げひび割れ強度
- 曲げ降伏強度
- 曲げ終局強度
- 等価粘性減衰定数 h_{eq}

結論

(1) 腰壁・垂れ壁付梁壁試験体

壁延長試験体

$\tau_u / F_c = 0.049$
終局変形角 $1/50$ (rad.)

高強度鉄筋試験体

$\tau_u / F_c = 0.116$
終局変形角 $1/76$ (rad.)

(2) スリット試験体

- ・初期剛性→増大, 降伏時変形→減少
壁の影響が無視できない
- ・壁を長くしても初期剛性は単調増加しない
- ・曲げ降伏強度 梁試験体とほぼ同じ

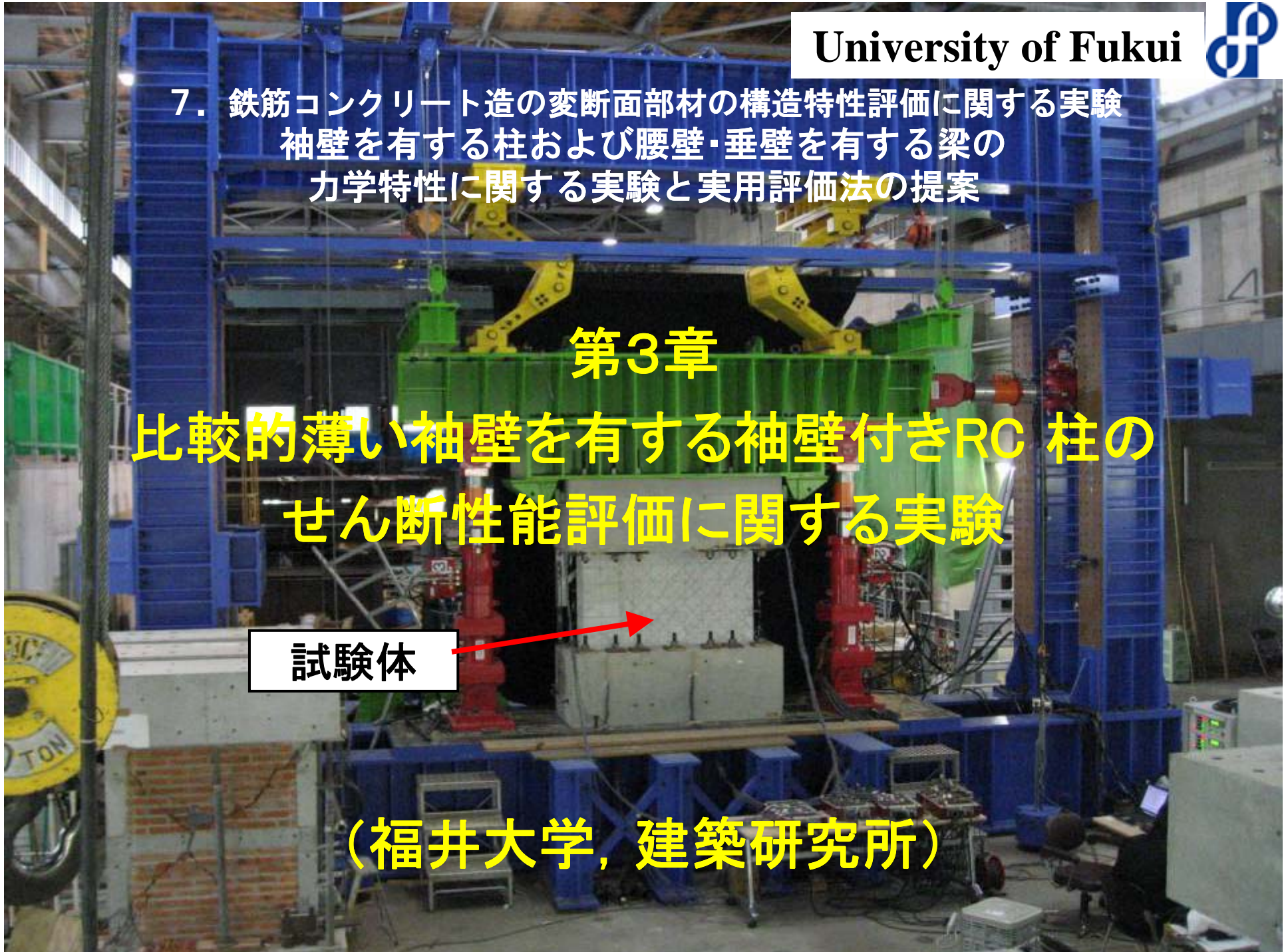
7. 鉄筋コンクリート造の変断面部材の構造特性評価に関する実験
袖壁を有する柱および腰壁・垂壁を有する梁の
力学特性に関する実験と実用評価法の提案

第3章

比較的薄い袖壁を有する袖壁付きRC 柱の
せん断性能評価に関する実験

試験体

(福井大学, 建築研究所)



目的

本研究では、袖壁の厚さが**比較的薄い袖壁(断面幅の1/6の袖壁厚さ)**付きRC柱を想定し、構造実験により、そのせん断性状(破壊性状, 変形性状, 耐力)を確認, 評価することを目的

● 下記変動要因がせん断性状に及ぼす影響を確認

- ・ 袖壁の左右の出幅の変化
- ・ 軸力比
- ・ 袖壁の偏心
- ・ 袖壁横筋比

● 既往のせん断終局強度式による計算値との適合性の確認

- ・ RC耐震診断基準式
- ・ 技術基準式

● 短期許容せん断力時のひび割れ状況の確認

実験概要 ～試験体形状～

・共通要因

■寸法■

柱断面: **300mm** × **300mm**

内法高さ: **900mm**

袖壁を含めた全せい: **1500mm**

袖壁厚さ: **50mm**

■コンクリート■

設計基準強度: 24N/mm²

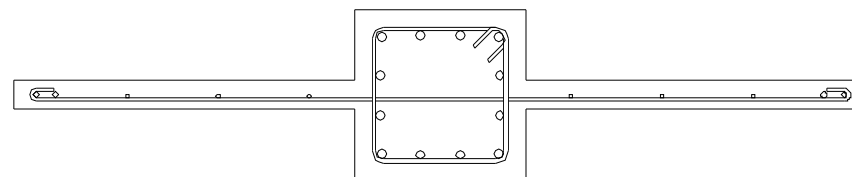
■配筋■

柱主筋 12-D16(SD685)

柱帯筋 D6(SD295A)@50

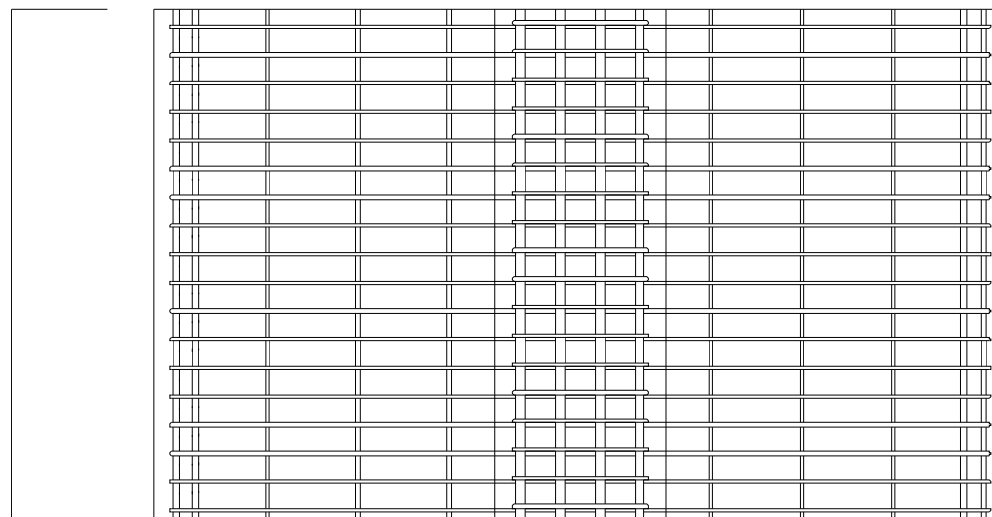
壁縦筋一般部 D6(SD685)@160

300
125 50 125



単位(mm)

900



600

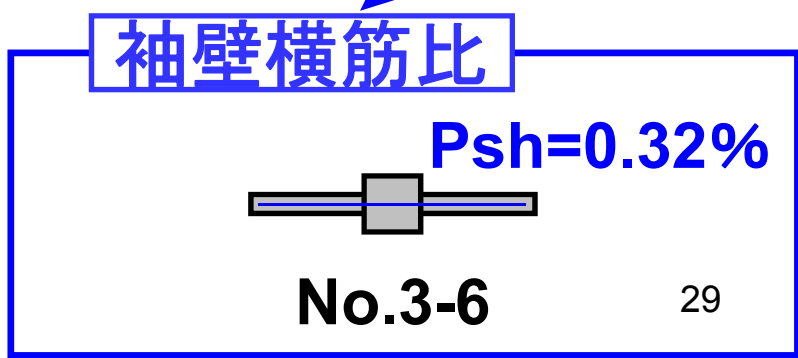
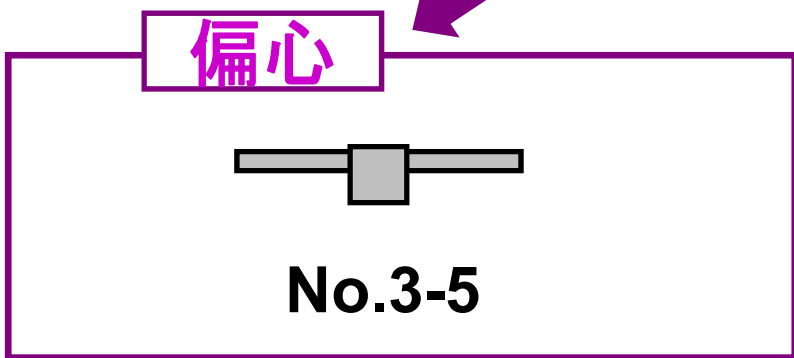
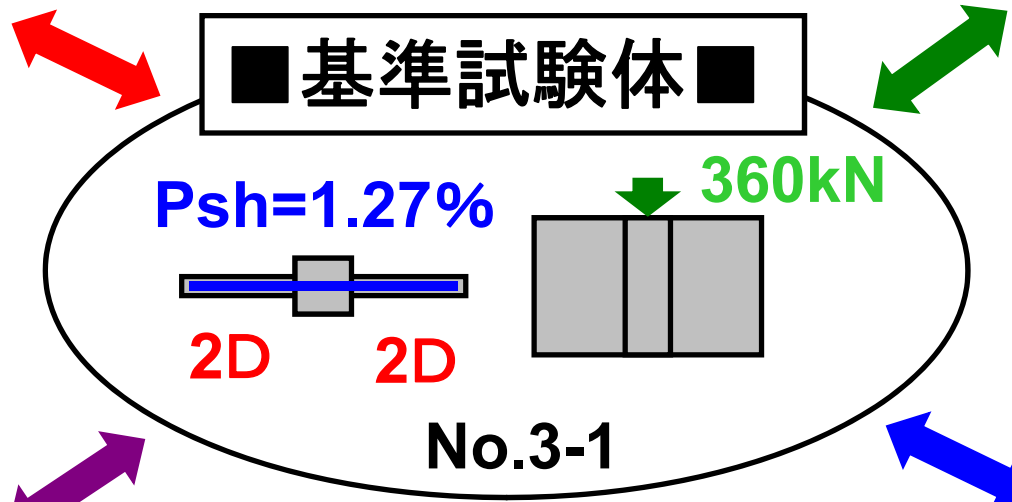
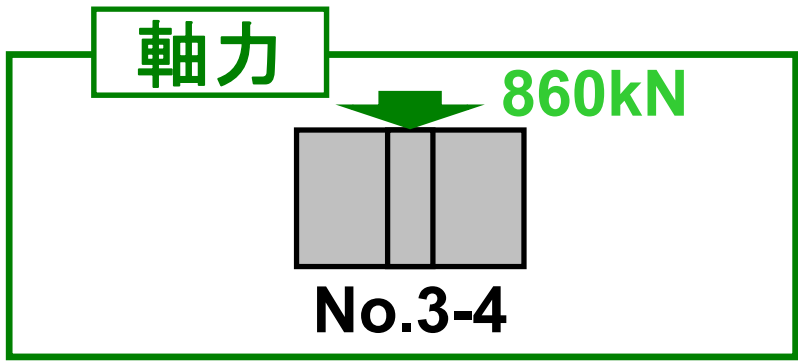
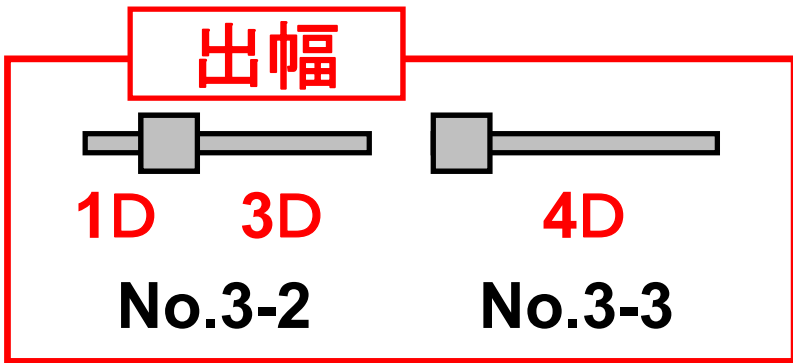
300

600

1500

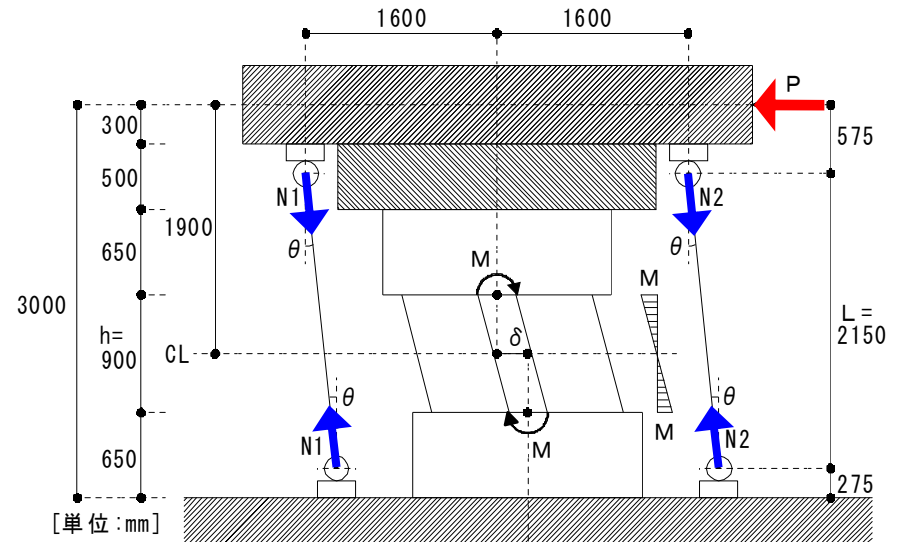
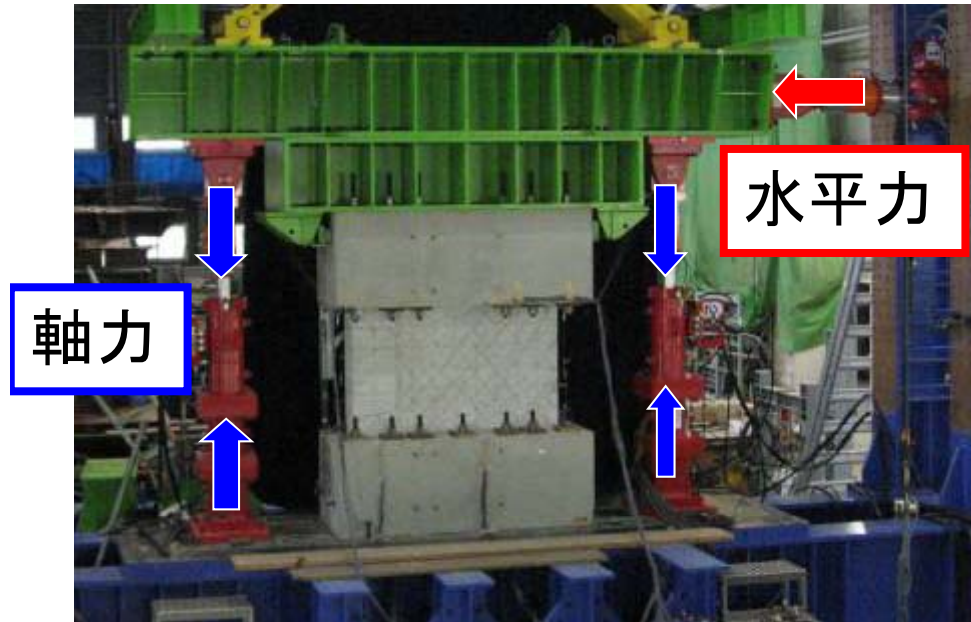
例 No. 3-1 配筋図

実験概要 ~試験体一覧図~



加力方法

建研式加力(逆対称)



■試験区間に生じるせん断力 Q■

$$Q = P - (N1 + N2) \sin \theta + (N1 + N2) \delta \cos \theta / h$$

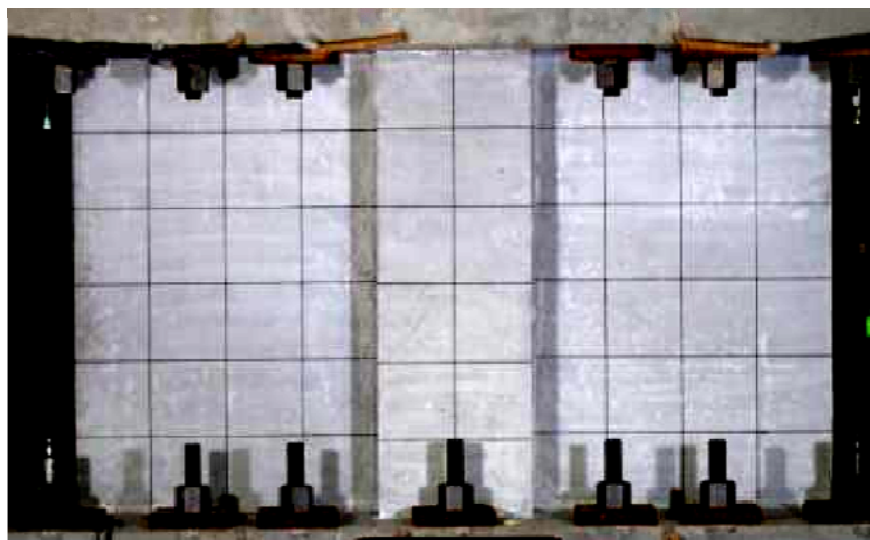
ここに、

$$\sin \theta = \frac{\delta}{\sqrt{L^2 + \delta^2}} \quad \cos \theta = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \delta^2}}$$

$$N1 + N2 = 360(\text{kN}) \quad \dots \text{No.3-1} \sim \text{3-5}$$

$$N1 + N2 = 860(\text{kN}) \quad \dots \text{No.3-6}$$

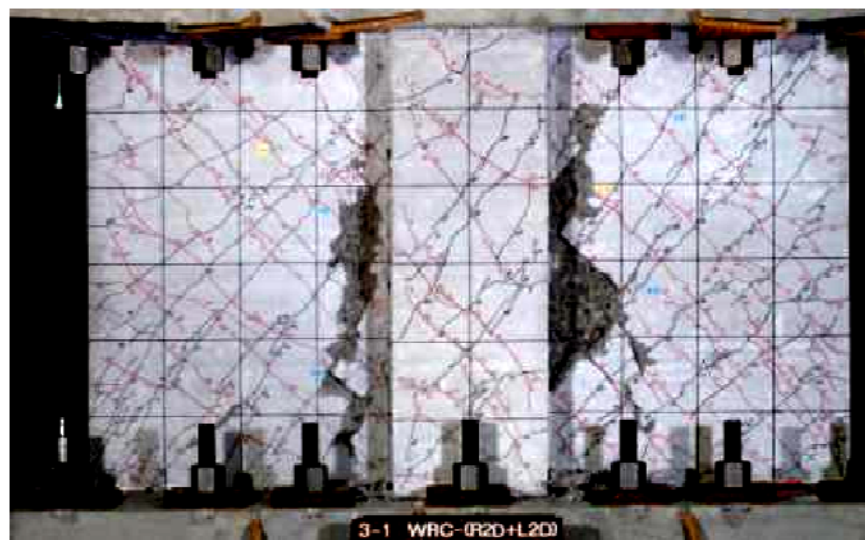
破壊性状の一例 (No.3-1 WRC-(R2D+L2D)-42/127-1/6Fc-SS)



短期許容せん断力時

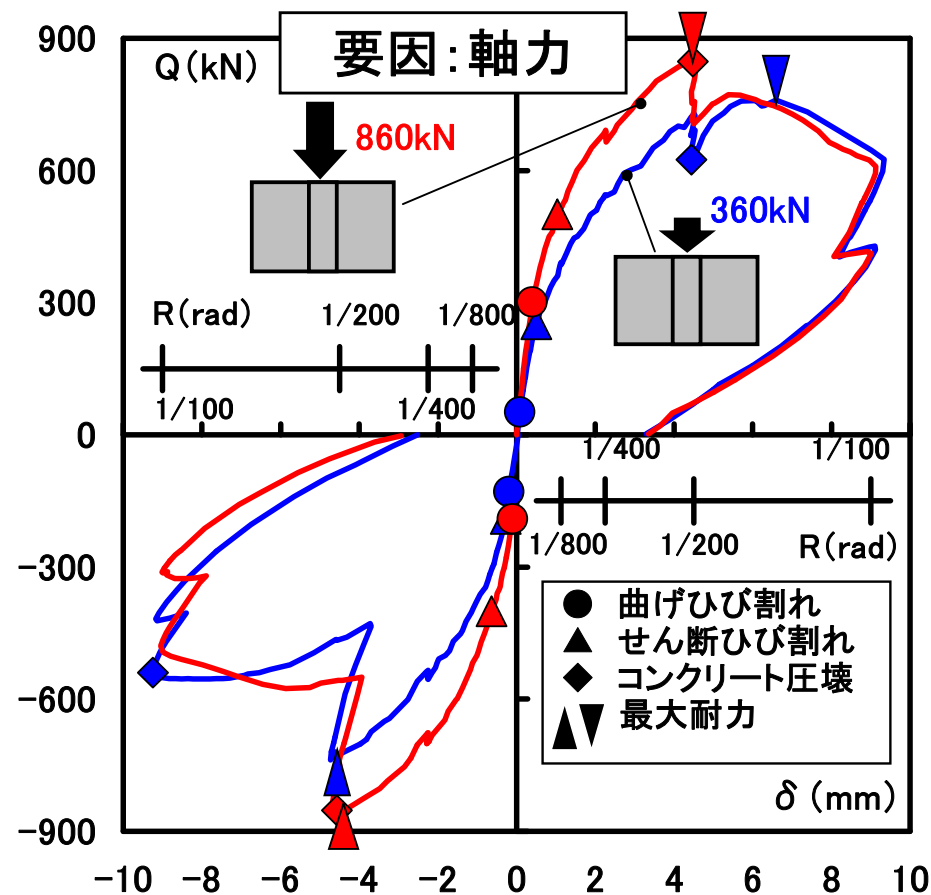
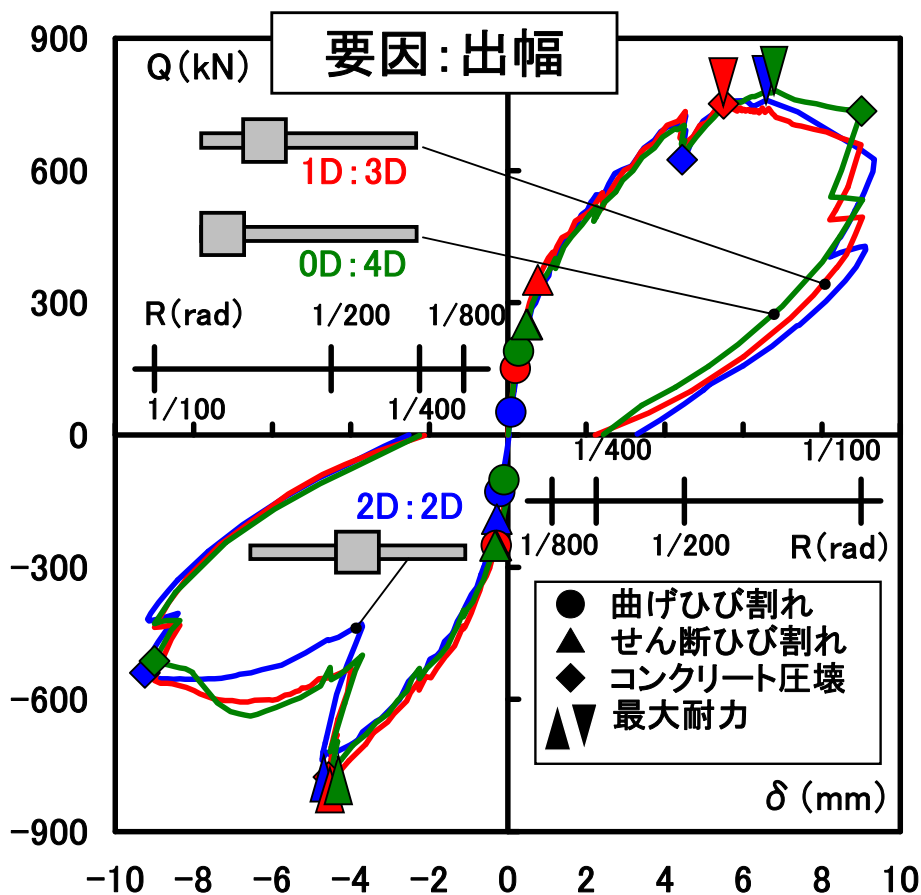


最大耐力を含むサイクル(R=1/100rad.)



最終破壊状況(せん断破壊)

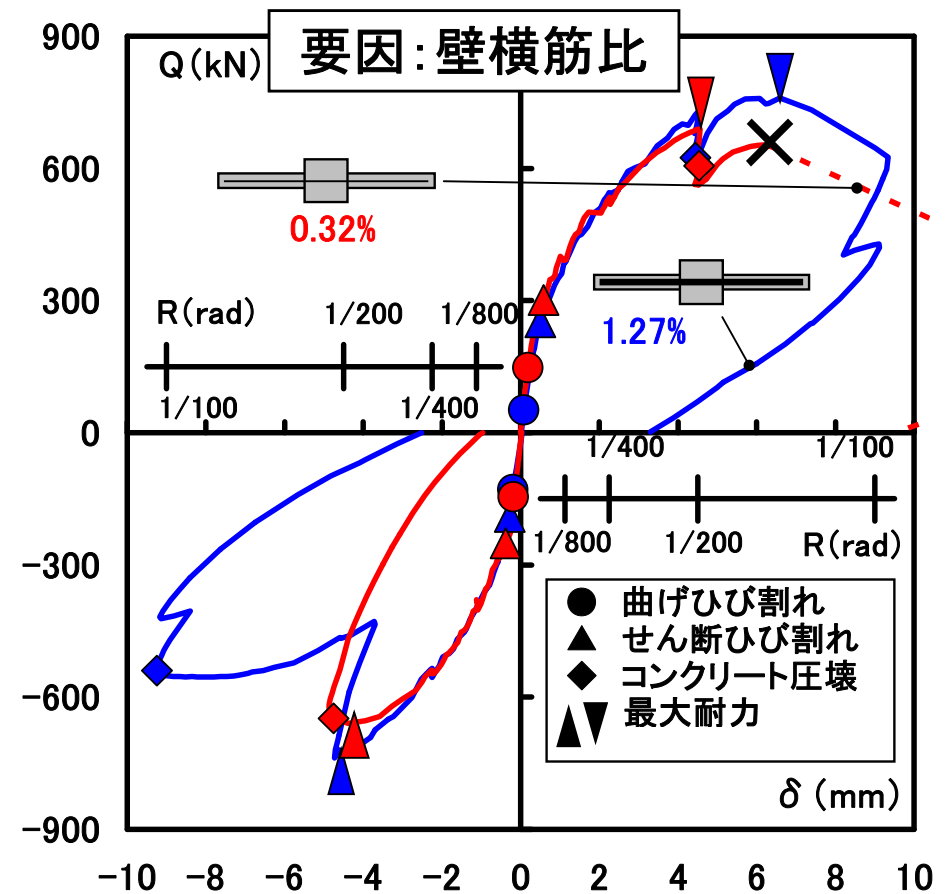
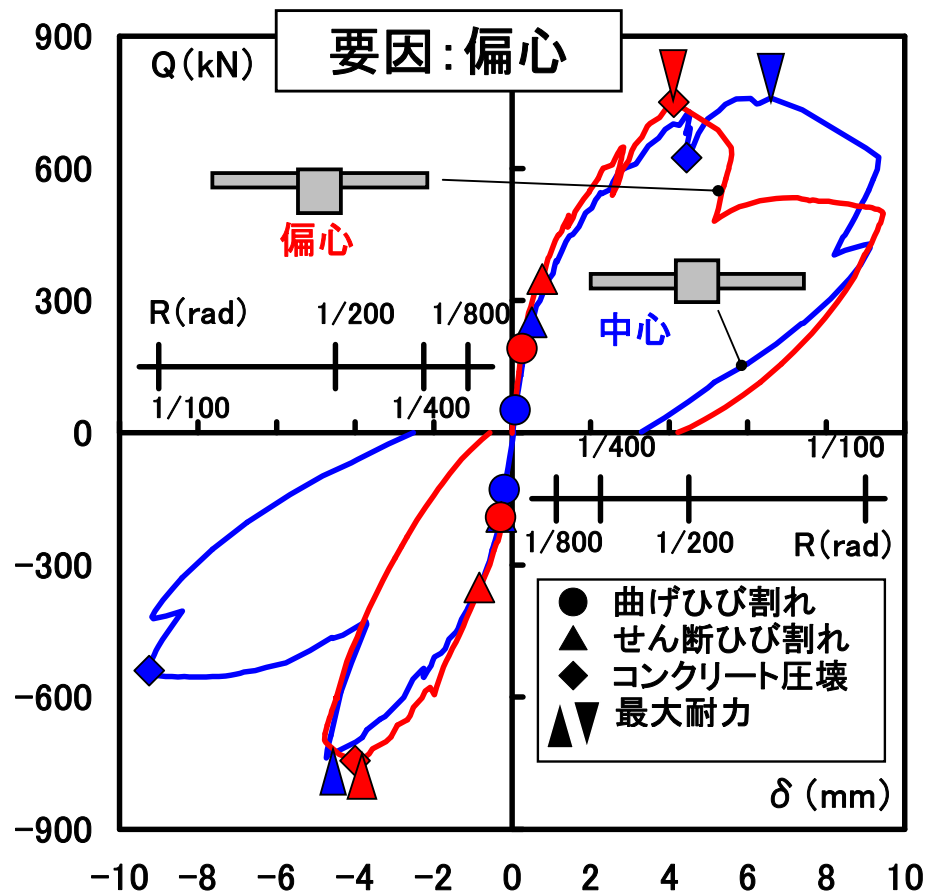
せん断力(Q)-相対変位(δ)関係



- ・弾性剛性は柱が寄っている試験体ほど高いが、せん断ひび割れ (▲) 後は大差なし
- ・最大耐力, および最大耐力後の変形性能に大差なし

- ・弾性剛性, および最大耐力は軸力が大きいほど上昇
- ・最大耐力後の変形性能は本試験の範囲では大差なし

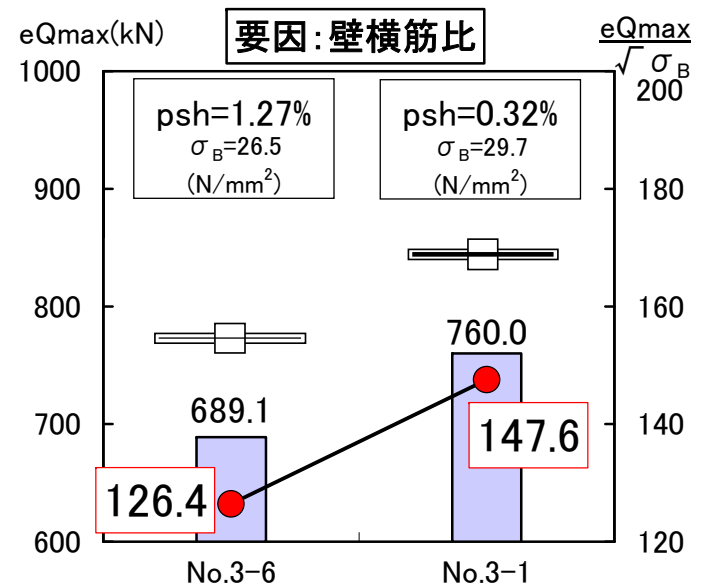
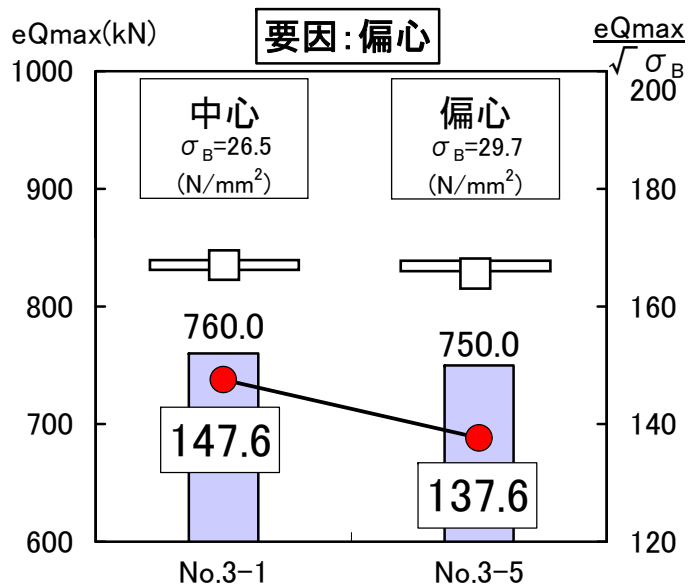
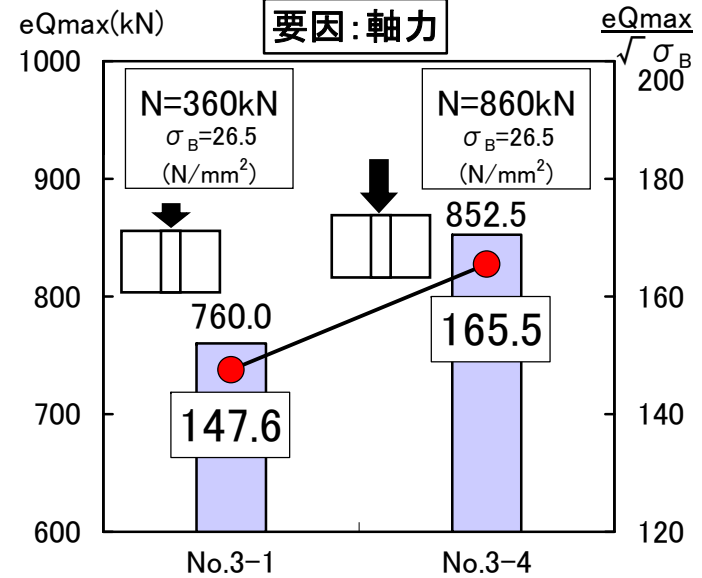
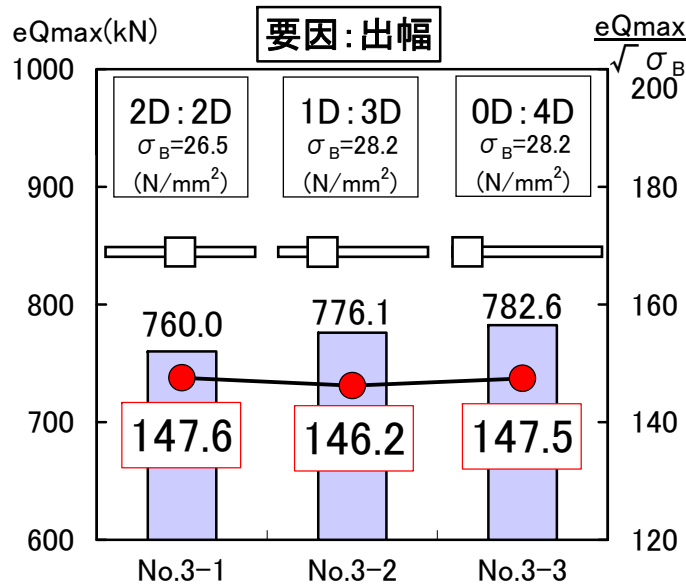
せん断力(Q)-相対変位(δ)関係



- ・最大耐力前の挙動は大差なし
- ・最大耐力時の変位, および最大耐力後の変形性能が偏心により低下し, より脆性的となった

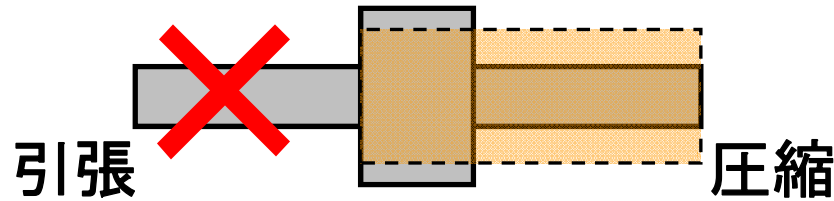
- ・最大耐力前の挙動は大差なし
- ・最大耐力は壁横筋比が大きいほど大きく, 変形性能も改善された

最大耐力の比較(要因別)

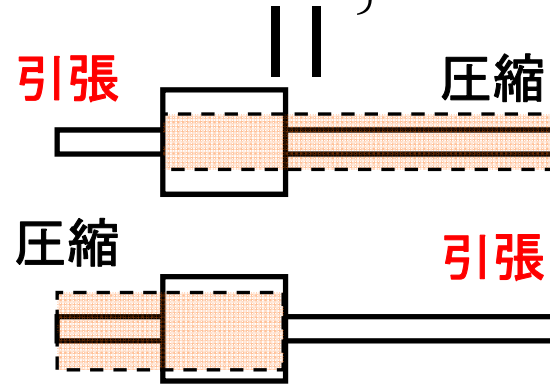


■RC耐震診断基準式■

$${}_w Q_{Su1} = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (180 + F_c)}{M/(Q \cdot d_e) + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_{we} \cdot \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_{0e}} \right\} b_e \cdot j_e$$



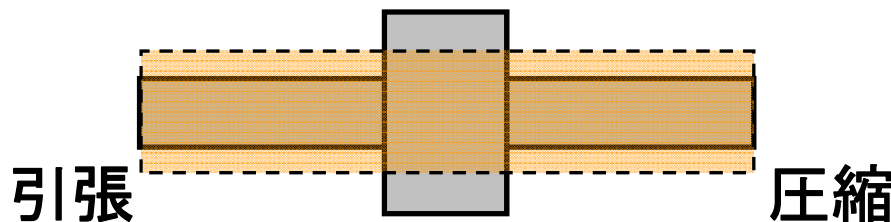
① 引張側の袖壁を無視して
長方形断面に置換



② 左右で計算値が異なる
場合, 両方向の平均値

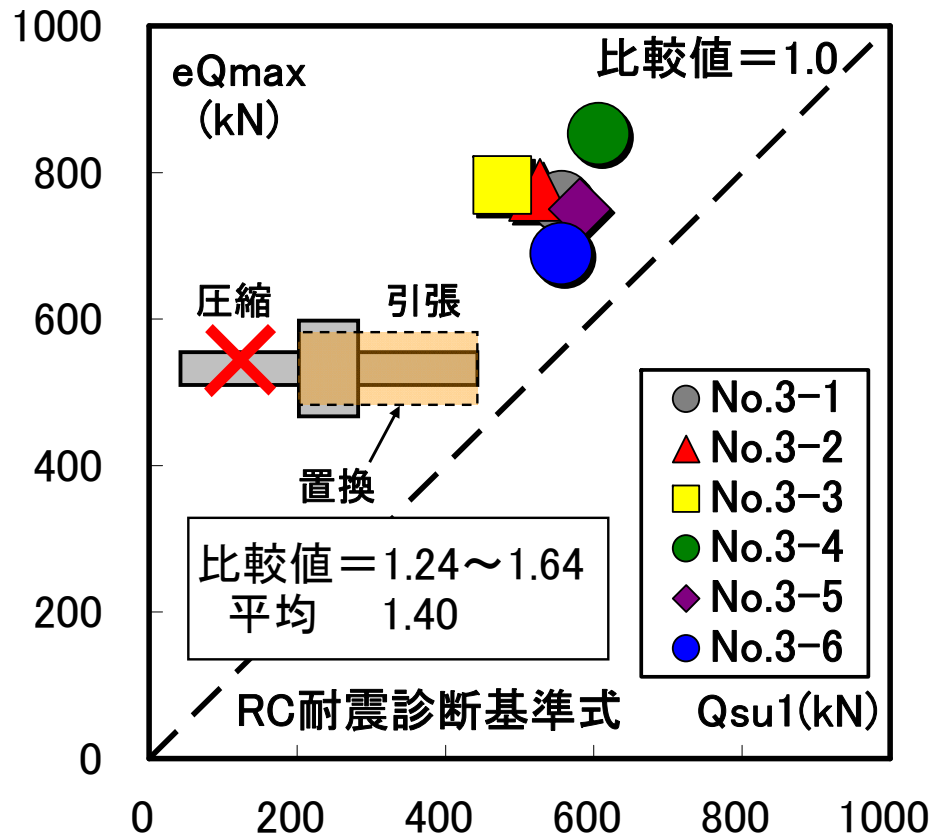
■技術基準式■

$${}_g Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b_e \cdot j_e + 0.1N$$



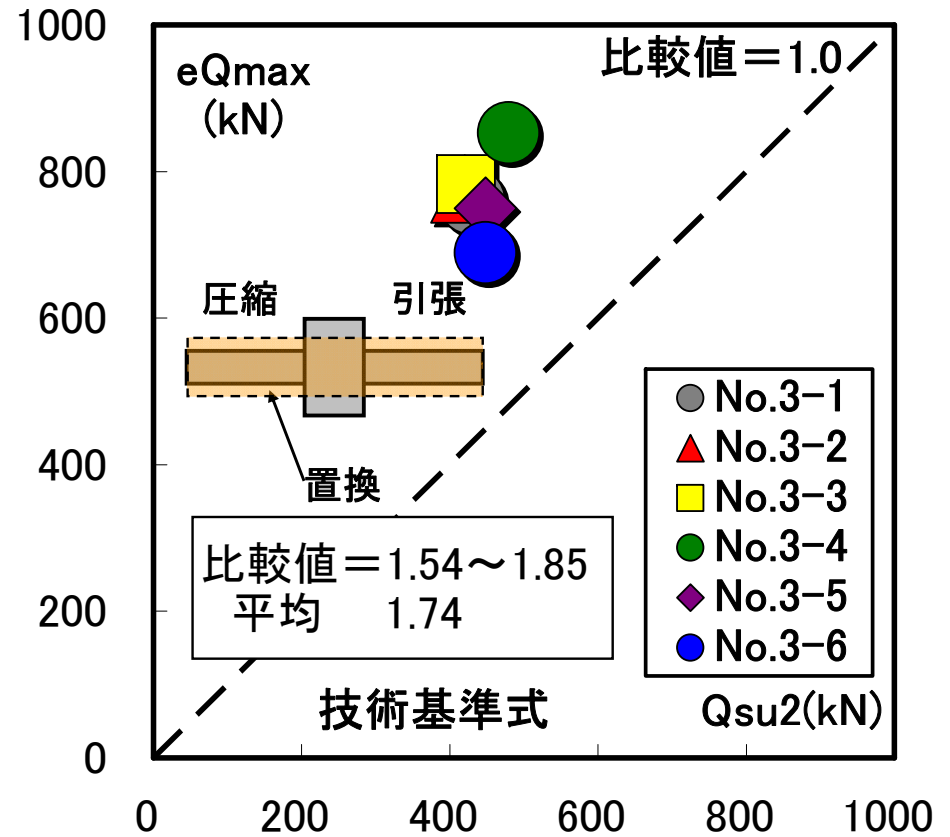
全断面を考慮して
長方形断面に置換 35

RC耐震診断基準式



- すべて安全側に評価された(計算値が実験値よりやや小さめ)
- 袖壁出幅が左右で異なる試験体の精度が悪い(左図▲, ■)

技術基準式

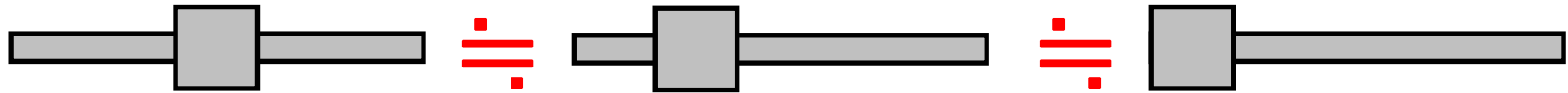


- すべて安全側に評価された(計算値が実験値よりかなり小さめ)

まとめ：第3章 比較的薄い袖壁を有する袖壁付きRC 柱のせん断性能評価に関する実験

■せん断終局耐力と諸要因の関係■

- ①左右出幅(柱位置)を変化させてもせん断終局耐力はほぼ一定であり、影響は認められなかった。



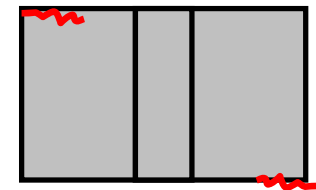
- ②軸力および壁横筋比の増加に伴い、せん断終局耐力が上昇する事が確認された。

- ③袖壁が偏心して取付く事でせん断終局耐力が減少することが確認された。



■短期許容せん断力時のひび割れ状況■

引張端に曲げひび割れが発生した程度であり、損傷は軽微であった。



■既往のせん断終局耐力評価式による比較■

既往の2手法の評価式(RC耐震診断基準式、および技術基準式)ではいずれも安全側に評価された。