

## S2. 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

部材の構造性能確認実験データベースの作成と設計式精度検証に関する調査

- 普通強度・高強度材料を用いた実験データベースの補完
  - 柱・梁, 耐震壁, 袖壁付柱, 腰壁・垂壁付梁, 柱梁接合部
  - 各剛性, 強度, 終局変形とそれに影響を与えるパラメータ情報
  - データを補完する論文選定基準の検討
  - 精度検討に用いるデータ選別基準の検討

- 既往の設計式の精度検証
  - 技術基準解説書
  - 日本建築学会指針式・規準式
    - 鉄筋コンクリート構造計算規準
    - 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針
    - 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針
    - その他
  - 対象とする特性は、モデル化上必要なもの
    - 初期剛性、降伏点剛性低下率
    - ひび割れ強度、降伏強度、終局強度
    - 損傷限界変形、安全限界変形、その他

# 今年度の新しい検討事項

- データの充実
  - 2013年度論文、基準整備促進事業、一部AIJ大会論文、建研資料
- 実験データ採否基準の明確化
- 学会規準式なども検討対象とした
- 今後、論文からのさらなるデータ収集の可能性の検討
  - 履歴曲線のデジタル化など

# 調査体制

## 事業主体

- 取りまとめ 田才 晃 横浜国立大学
- データベース 楠 浩一 横浜国立大学
- 柱・梁部材 石川 裕次 竹中工務店
- 耐震壁 坂下 雅信 京都大学
- 袖壁付柱 磯 雅人 福井大学
- 腰壁・垂壁付梁 渡邊 秀和 広島大学
- 柱梁接合部 楠原文雄 東京大学

## 共同研究機関

- (独)建築研究所

# 調査論文数

項目		梁	柱	垂れ壁・ 腰壁付き 梁	袖壁付 き柱	耐力壁	柱梁接 合部	合計
調査文献数	黄表紙	16	29	1	6	27	17	99
	JCI大会	67	185	3	2	169	226	668
	JCI論文集	3	6	0	29	5	2	45
	構造工学	2	11	1	0	16	15	45
	その他	26	31	0	16	40	36	156
	合計	<b>114</b>	<b>262</b>	<b>5</b>	<b>53</b>	<b>257</b>	<b>296</b>	<b>1013</b>
<b>全試験体数</b>		<b>497</b>	<b>1333</b>	<b>39</b>	<b>204</b>	<b>507</b>	<b>856</b>	-

# 梁部材の試験体データベース

調査文献数: **114** (1976年から2013年)

設計式の精度検証に用いた試験体数: **497**

- 曲げ降伏先行型: 327体, せん断破壊型: 114体, 付着破壊型: 55体
- 新耐震設計法施工前の総合研究「鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究」(1977年-1980年)を含む。

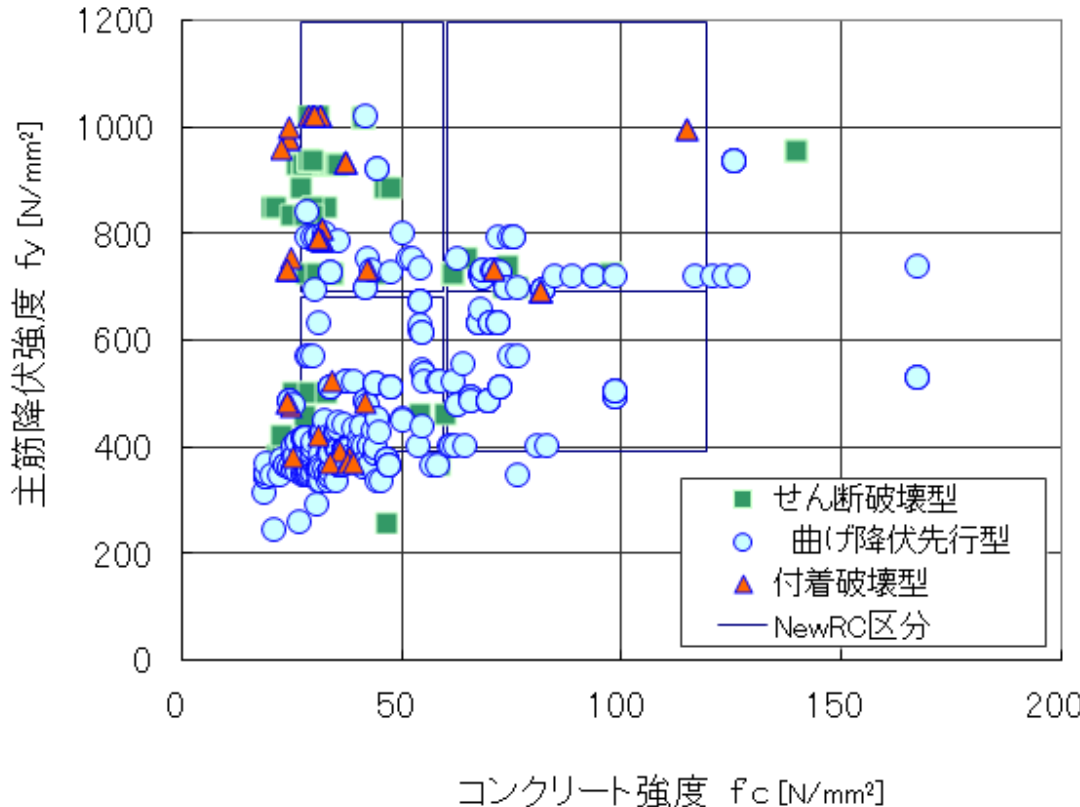


図-1 収集した梁部材実験データの分布

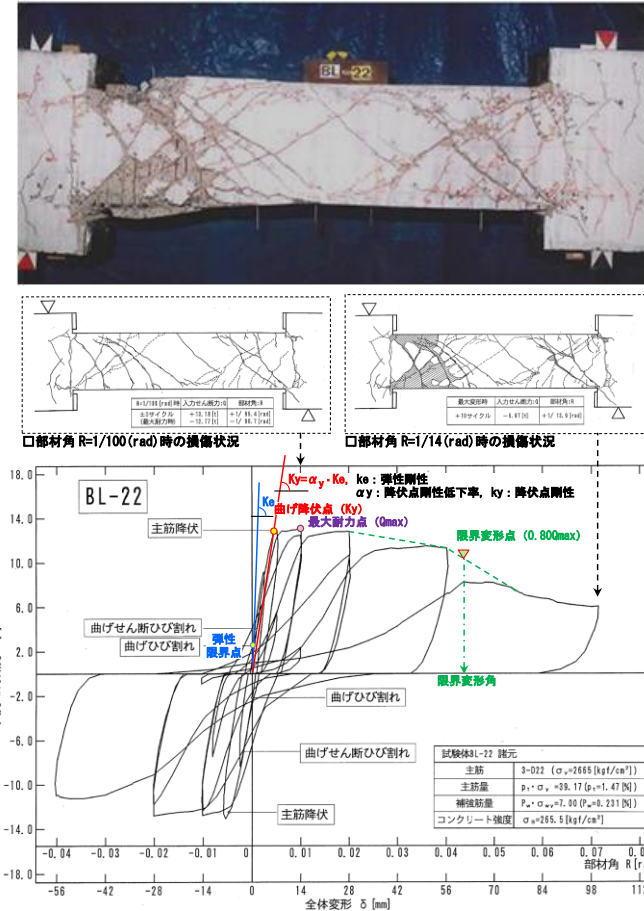


図-2 代表的な梁部材実験例

RC梁部材のせん断力—部材角関係および破壊状況に関する実験データ

# データベースの特徴

## データベースに含まれる試験体の特徴

- 曲げ降伏先行型:66%, せん断破壊型 :22%, 付着破壊型12%
  - 試験体のスケールは1/3前後のデータが60.4%
  - 高強度コンクリート(60N/mm<sup>2</sup>以上)の試験体が15.3%
  - 高強度主筋(SD490超)を用いた試験体は41.9%
  - 高強度せん断補強筋(SD490超)を用いた試験体は58.1%
- 高強度材料の使用が進んでいる。特に高強度鉄筋による施工合理化の動向と連動した結果  
→試験装置能力および鉄筋とコンクリートの付着再現性から1/3前後スケールが最も多い。

## データ収集上の問題点

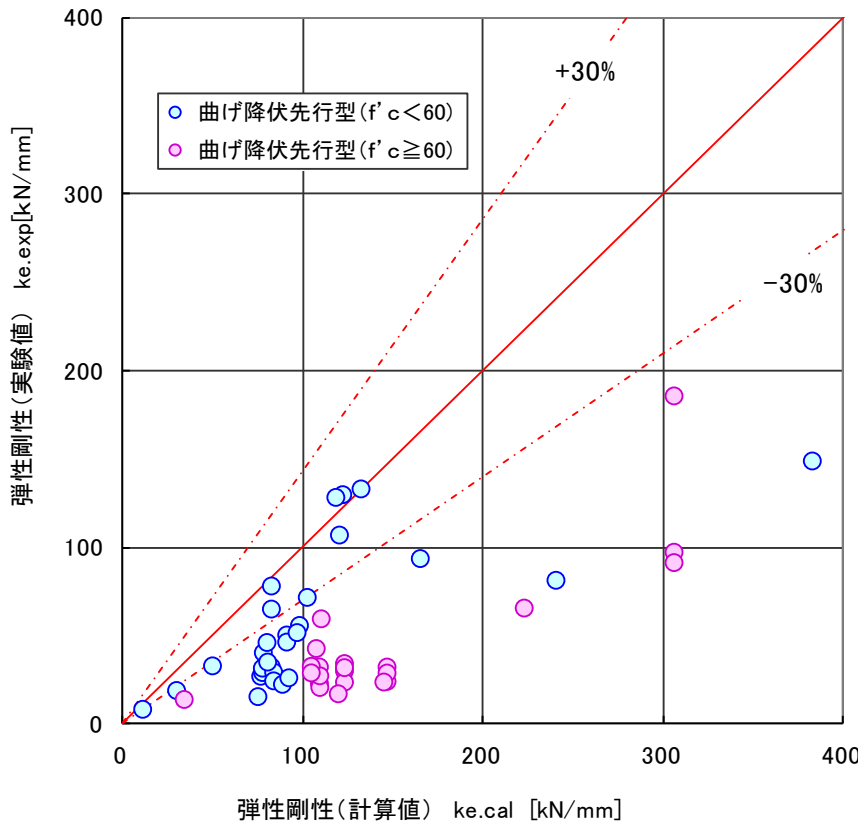
- 変形性能に関するデータが不足している
  - 弾性剛性, 降伏点剛性, 限界変形角データは2/3前後はグラフデータからの読取り
  - 実験前の発生している乾燥収縮ひび割れ, セット状況により弾性剛性の計測が難しい
  - 限界変形角の定義, 降伏点の定義が明確に定められていない。
- 強度に関するデータには, 一定の精度が期待できる。  
→変形に関わるデータについては, データ収集時の誤差を含んでおり,  
データのばらつきが大きい



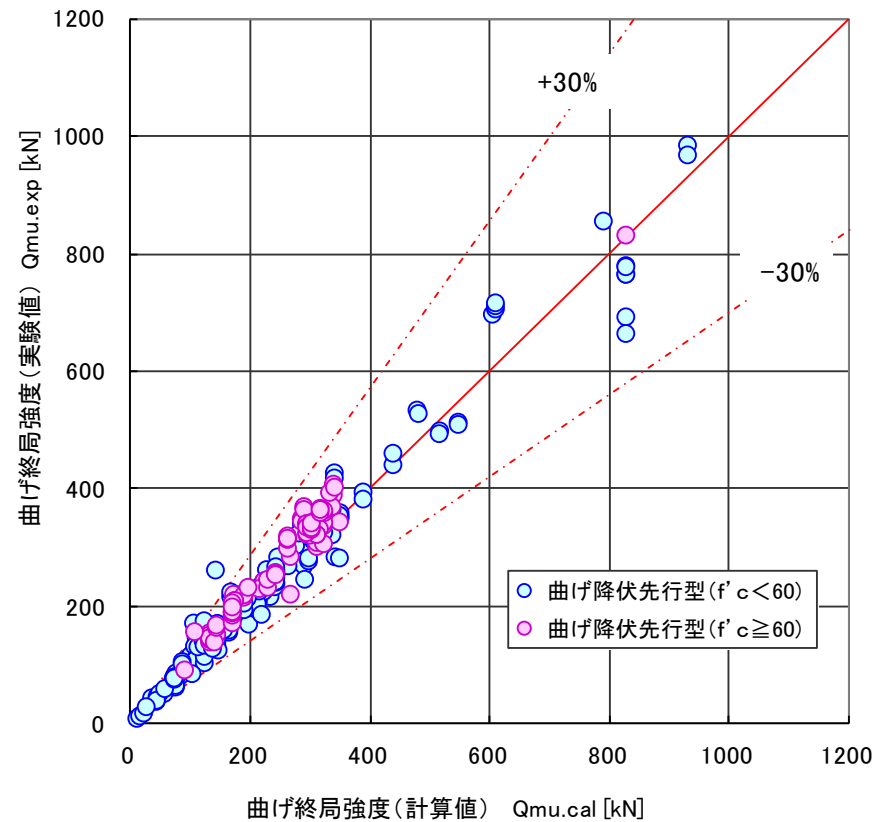
# 梁部材の設計式の精度検証例 (曲げ降伏先行型データ)

データ数		平均値	変動係数	最大値	最小値	±30%以内
全体	58	0.42	61.4%	1.09	0.10	13.8%
( $f_c < 60$ )	36	0.49	68.6%	1.09	0.10	22.2%
( $f_c \geq 60$ )	22	0.29	40.9%	0.61	0.15	0.0%

データ数		平均値	変動係数	最大値	最小値	±30%以内
全体	297	1.09	11.1%	1.88	0.81	96.6%
( $f_c < 60$ )	211	1.08	11.8%	1.88	0.81	96.2%
( $f_c \geq 60$ )	86	1.13	7.8%	1.50	0.84	97.7%



**図-3 弾性剛性: 実験値と計算値の比較**  
 実験値が著しく小さい。内法スパンのデータ取り扱いなどの課題あり



**図-4 曲げ終局強度: 実験値と計算値の比較**  
 適正な精度を有している。

# 梁部材の設計式の精度検証例 (せん断破壊型・付着破壊型データ)

せん断終局(荒川min)	試験体数	平均値	標準偏差	変動係数(%)
最大耐力/計算値	115	1.606	0.354	22.0

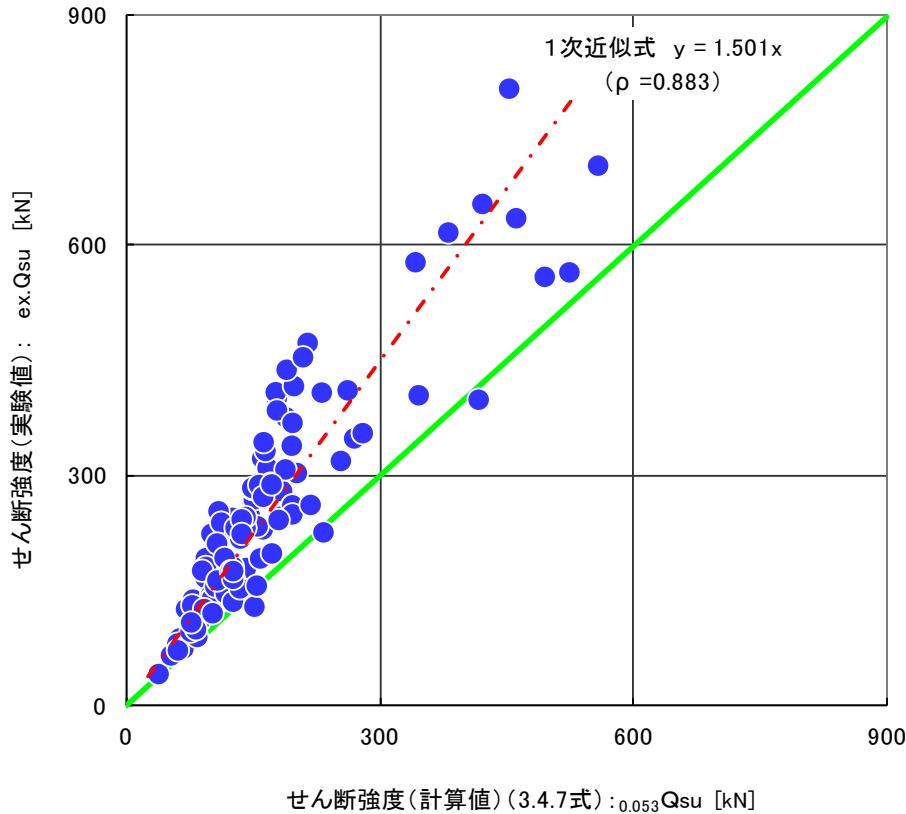


図-5 せん断強度: 実験値と計算値の比較

\*せん断強度式として適正な精度を有している

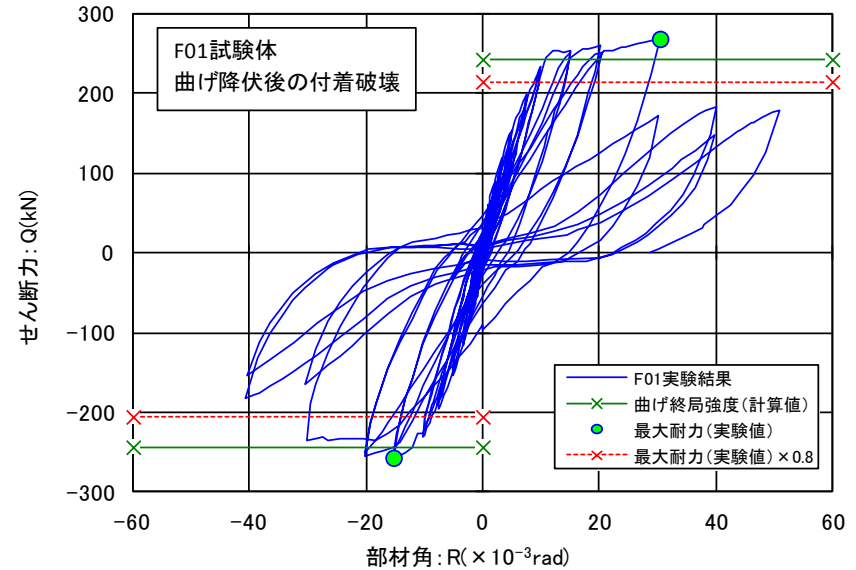
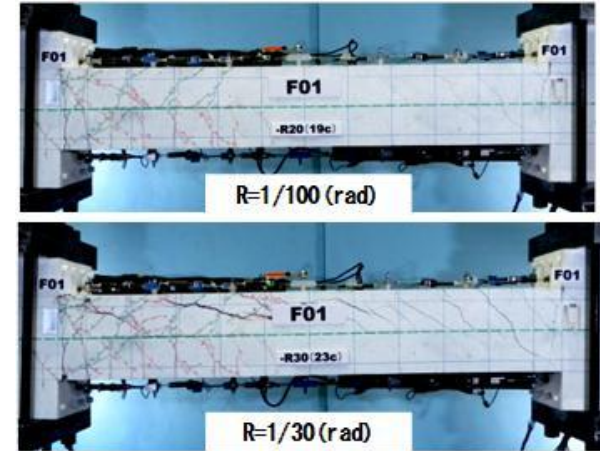


図-6 曲げ降伏後の付着破壊データ

\*付着破壊型は詳細なデータが必要があり, 発表論文からのデータ収集には限界がある。

# 柱部材の試験体データベース

調査文献数: **262** (1976年から2013年)

設計式の精度検証に用いた試験体数: **1333**

- 曲げ降伏先行型: 905体, せん断破壊型: 391体, 付着破壊型: 37体
- 新耐震設計法施工前の総合研究「鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究」(1977年-1980年)を含む。

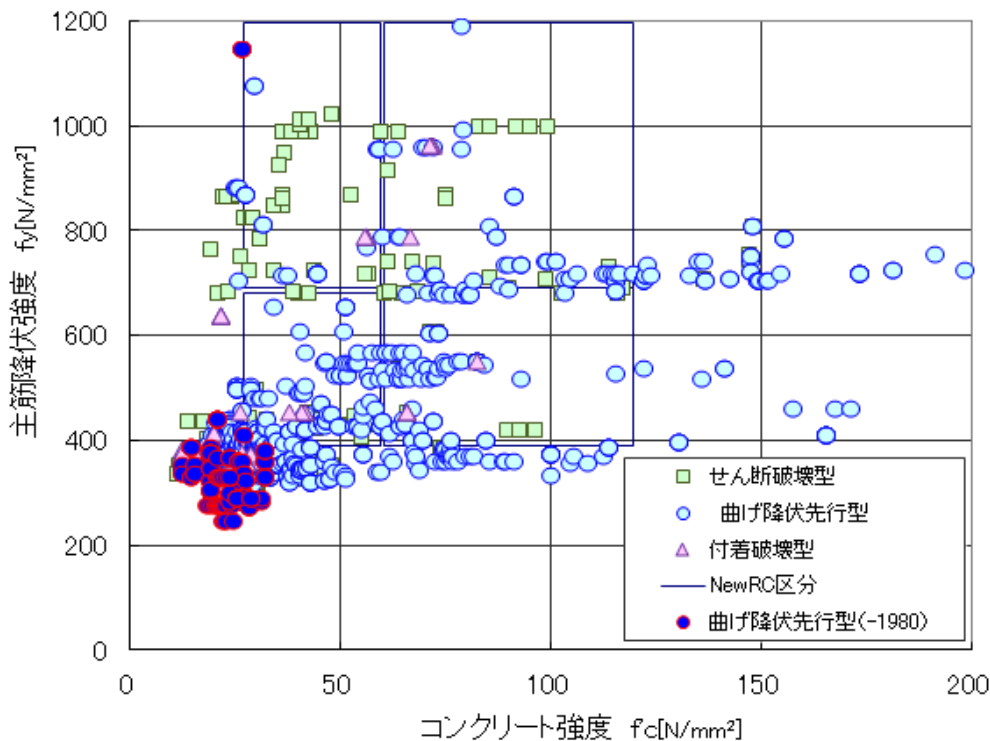


図-1 収集した柱部材実験データの分布

\*新耐震設計法以前はコンクリート強度20-30N/mm<sup>2</sup>,主筋強度400N/mm<sup>2</sup>以下に集中

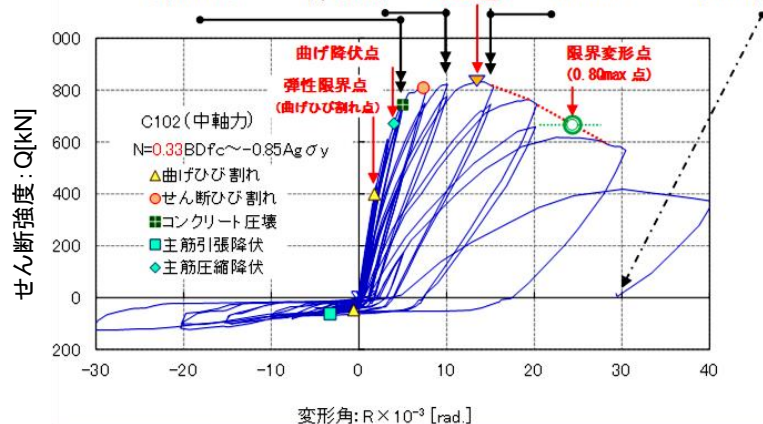
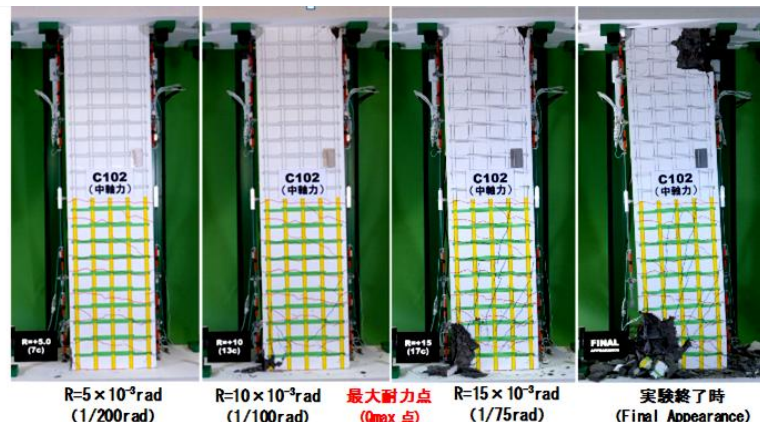


図-2 代表的な柱部材実験例

柱部材は、梁部材とは異なり、作用軸力の大きさや圧縮軸力が引張軸力かによって復元力特性が大きく異なる。

# データベースの特徴

## データベースに含まれる試験体の特徴

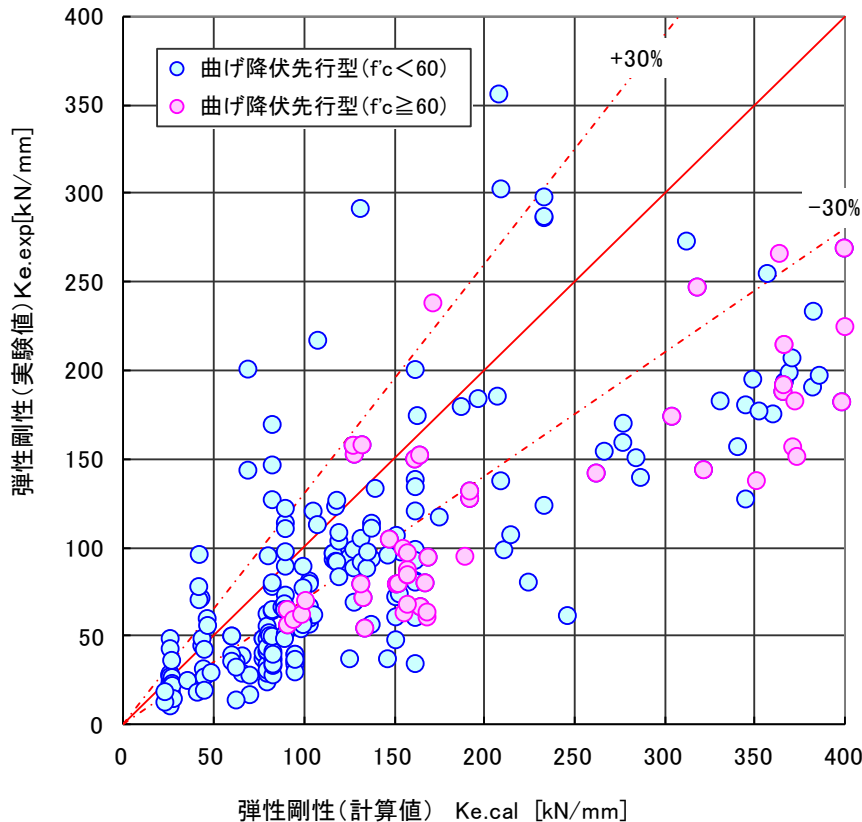
- 曲げ降伏先行型:68%, せん断破壊型 :29%, 付着破壊型3%
- 試験体のスケールは。平均的には1/2.5
- 高強度コンクリート(60N/mm<sup>2</sup>以上)の試験体が18.7%
- 高強度主筋(SD490超)を用いた試験体は27.4%
- 高強度せん断補強筋(SD490超)を用いた試験体は41.9%
  - 高強度材料の使用が進んでいる。特に高強度鉄筋による施工合理化の動向と連動した結果
  - 試験装置能力および鉄筋とコンクリートの付着再現性から1/2.5前後スケールが最も多い。

## データ収集上の問題点

- 変形性能に関するデータが不足している
- 弾性剛性, 降伏点剛性, 限界変形角データは2/3前後はグラフデータからの読取り
- 実験前の発生している乾燥収縮ひび割れ, セット状況により弾性剛性の計測が難しい
- 限界変形角の定義, 降伏点の定義が明確に定められていない。
  - 強度に関するデータには, 一定の精度が期待できる。
  - 変形に関わるデータについては, データ収集時の誤差を含んでおり, データのばらつきが大きい

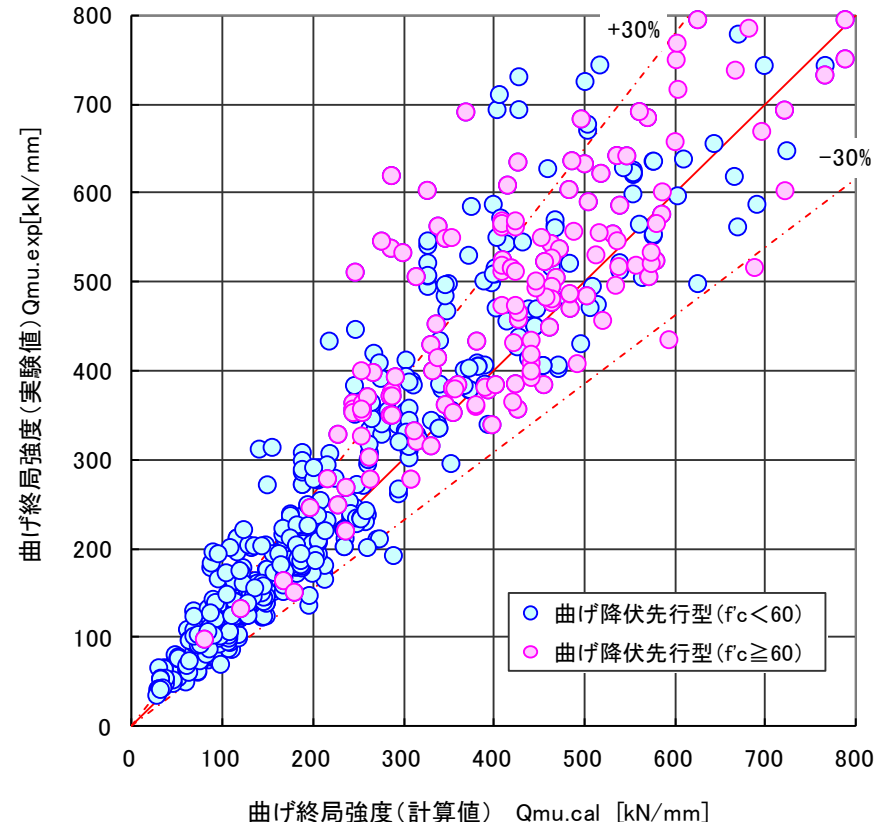
# 柱部材の設計式の精度検証例 (曲げ降伏先行型データ)

弾性剛性(実験値/計算値) データ: 曲げ降伏先行型柱部材						
データ数		平均値	変動係数	最大値	最小値	±30%以内
全体	285	0.72	55.0%	2.95	0.00	31.9%
( $f_c < 60$ )	213	0.76	57.8%	2.95	0.00	36.2%
( $f_c \geq 60$ )	72	0.61	32.1%	1.40	0.37	19.4%



**図-3 弾性剛性: 実験値と計算値の比較**  
実験値が著しく小さい。内法スパンのデータ取り扱いなどの課題あり

曲げ終局強度(実験値/計算値) データ: 曲げ降伏先行型柱部材						
データ数		平均値	変動係数	最大値	最小値	±30%以内
全体	794	1.17	23.0%	2.36	0.67	73.8%
( $f_c < 60$ )	556	1.19	22.6%	2.36	0.67	71.8%
( $f_c \geq 60$ )	238	1.11	23.0%	2.17	0.67	78.6%



**図-4 曲げ終局強度: 実験値と計算値の比較**  
ほぼ適正な精度を有している。



# 柱部材の設計式の精度検証例 (せん断破壊型・、曲げ降伏先行型データ)

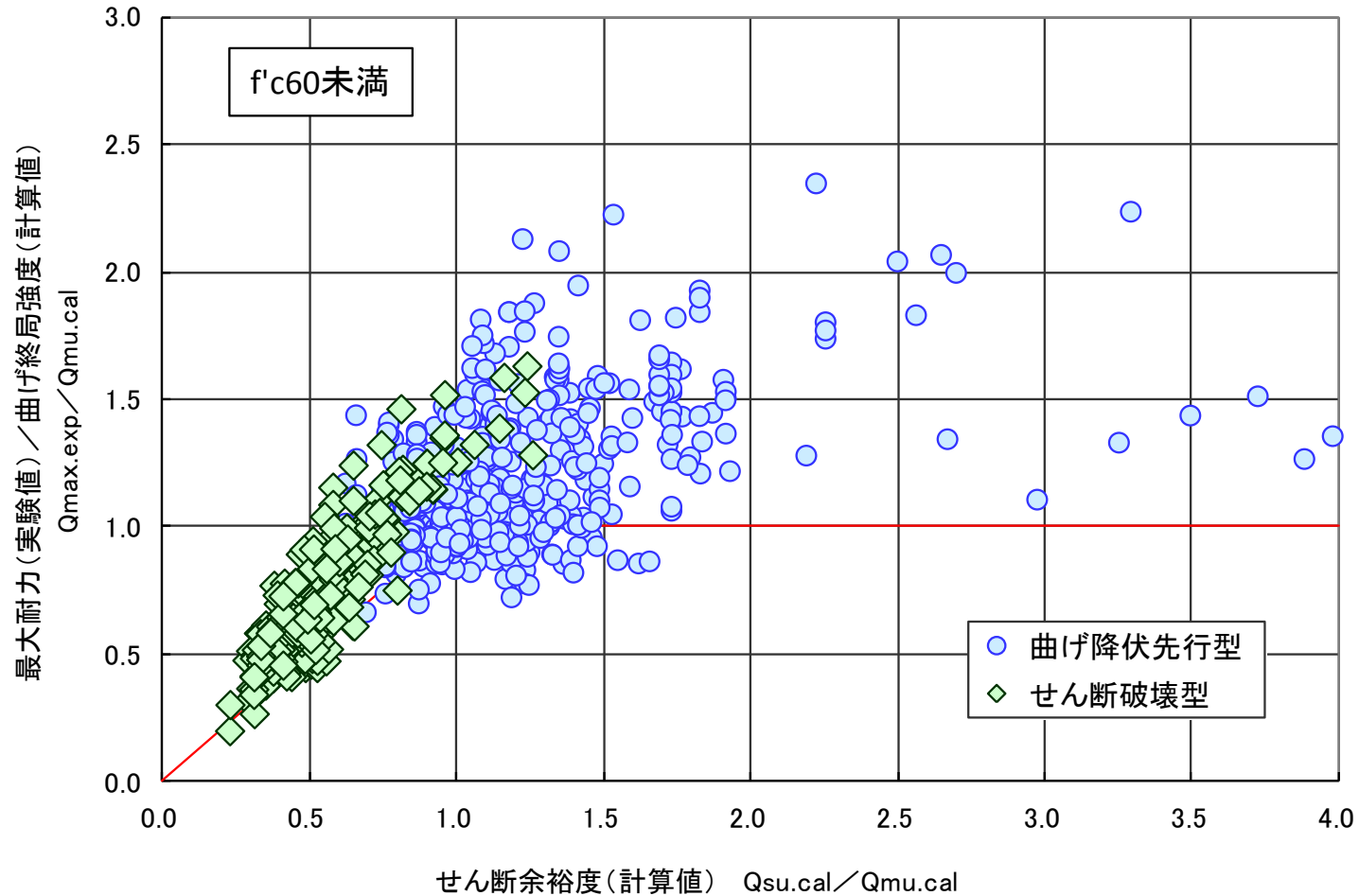


図-5 最大耐力(実験値)／曲げ終局強度(計算値)－せん断余裕度(計算値)関係  
(曲げ降伏先行型＋せん断破壊型データ)せん断強度式は基準平均値式

\*広沢式を基にしたせん断強度(建築基準法)は、高強度せん断補強筋の効果をやや安全側に評価する傾向がある

# 耐力壁部材の調査報告(担当:京都大学)

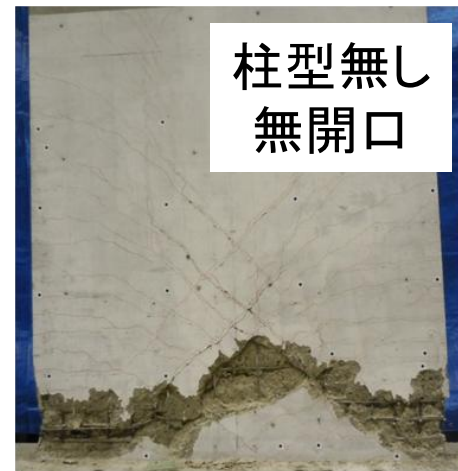
論文から収集した試験体の数 : 684体 (257論文)

検討に用いた試験体の数 : 507体\* (220論文)

\*以下の試験体は検討対象から除外した。

- ・コンクリート圧縮強度が60MPa以上
- ・特殊な配筋(X型配筋、非対称)
- ・特殊な形状(円形開口、非対称断面)
- ・特殊な載荷条件

(水平二方向、変動軸力、偏心軸力、変動せん断スパン)



## データベースの特徴

(形状)

- ・有開口耐力壁 : 30%
- ・柱型の無い耐力壁 : 21%

(破壊形式)

- ・曲げ破壊型 : 17%
- ・曲げ・せん断破壊型 : 26%
- ・せん断破壊型 : 56%

全体に占める割合

収集対象とした  
試験体の一例

# 調査例1: 曲げ終局強度

$$M_{wu} = a_t \sigma_y l_w + 0.5 a_w \sigma_{wy} l_w + 0.5 N l_w$$

$l_w$ : 両側柱中心間距離

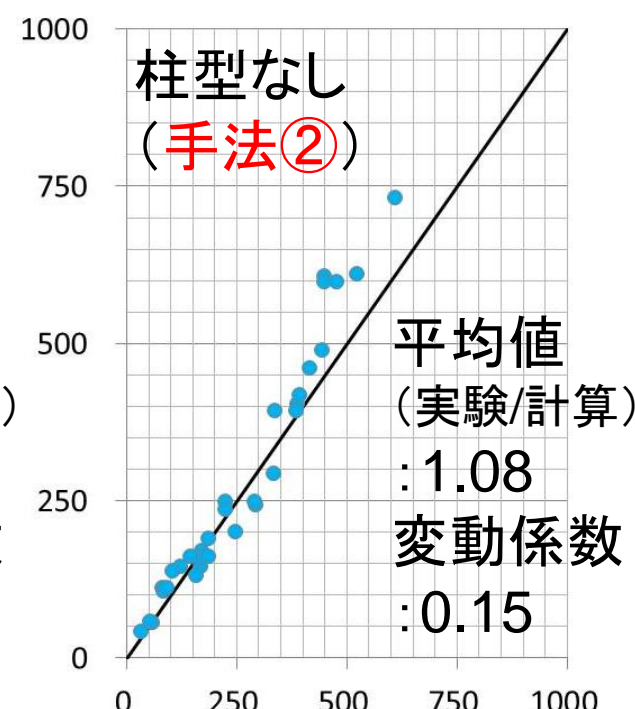
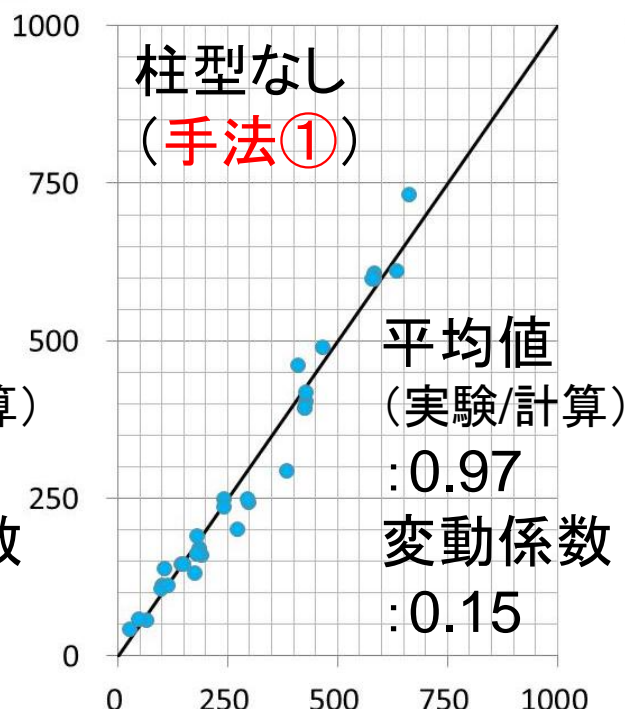
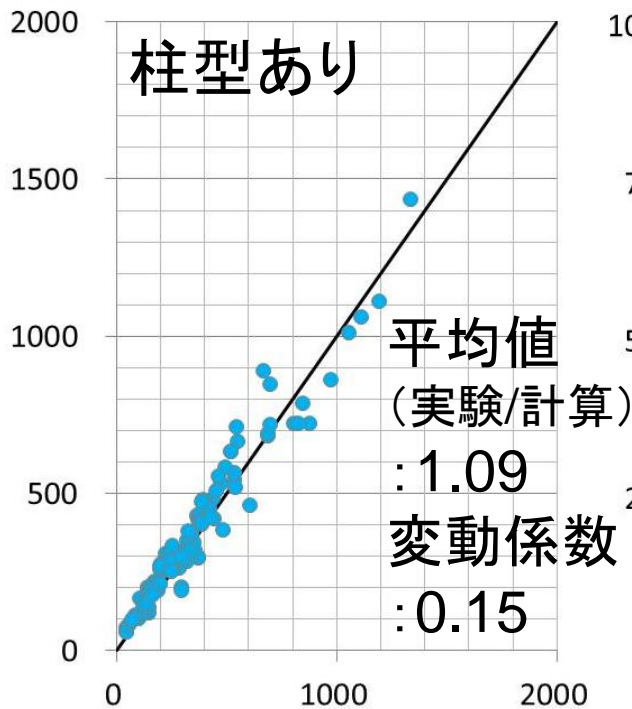
手法①

柱型がない場合: 壁全長の0.9倍 [技術基準解説書]

← 柱型がある場合と評価精度が異なる。 / 手法②

← 壁端部の曲げ補強筋位置から決定することで改善

曲げ終局強度時せん断力(kN, 実験値)



曲げ終局強度時せん断力(kN, 計算値)



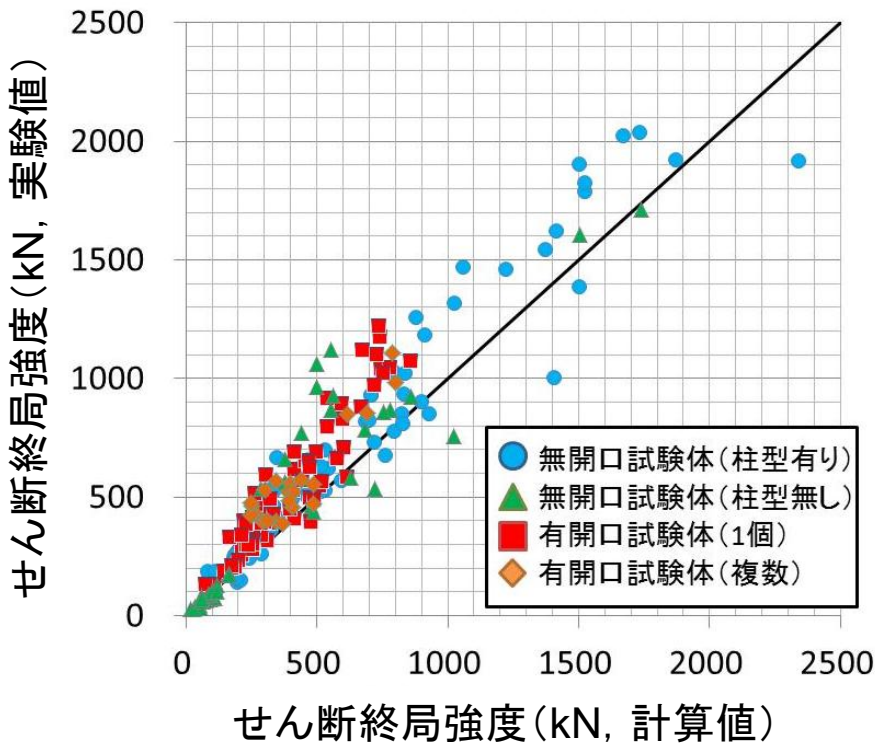
# 調査例2: せん断終局強度



トラスアーチ式  
(平均式)

$${}_s V_u = r_2 \times \left\{ t_w l_{wb} p_{sx} \sigma_y \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} v_0 \sigma_B / 2 \right\}$$

$$v_0 = \begin{cases} 0.8 - \sigma_B / 200 & \sigma_B \leq 70 \text{ N/mm}^2 \\ 1.907 \sigma_B^{-0.34} & \sigma_B > 70 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$



(実験値/計算値)

トラスアーチ式 (平均式)

柱型あり: 1.22, 柱型なし: 1.15

広沢式 (mean式)

柱型あり: 1.40, 柱型なし: 1.11

- ・柱型の有無で、評価精度が異なる
- ・せん断終局強度を安全側に評価  
→せん断強度時変形角の過小評価

調査文献数

**53編** 試験体数 **204**体

(査読付論文集**37**+梗概集等からの追加**16**)

設計式の精度検証  
に用いた試験体

●均等袖壁付き柱 **161**体 (**79%**)



●不均等袖壁付き柱 **2**体 (**1%**)



●片側袖壁付き柱 **41**体 (**20%**)



合計 **204**体(**100%**)

収集対象から除外した試験体

- ・直交壁が取り付いた袖壁付きRC柱
- ・構造スリット(完全スリットおよび部分スリット)を設けた袖壁付きRC柱
- ・袖壁付きSRC柱
- ・繊維等により補強された袖壁付きRC柱 等

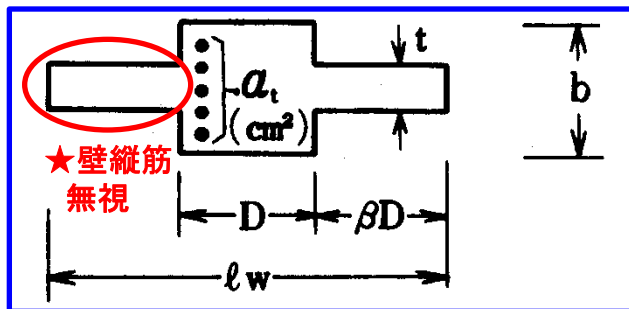
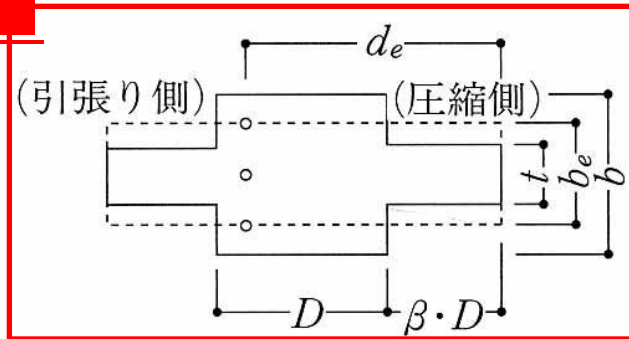
# 評価式の精度検証の一例：曲げおよびせん断終局強度1

## ■せん断終局強度評価式(技術基準解説書)■

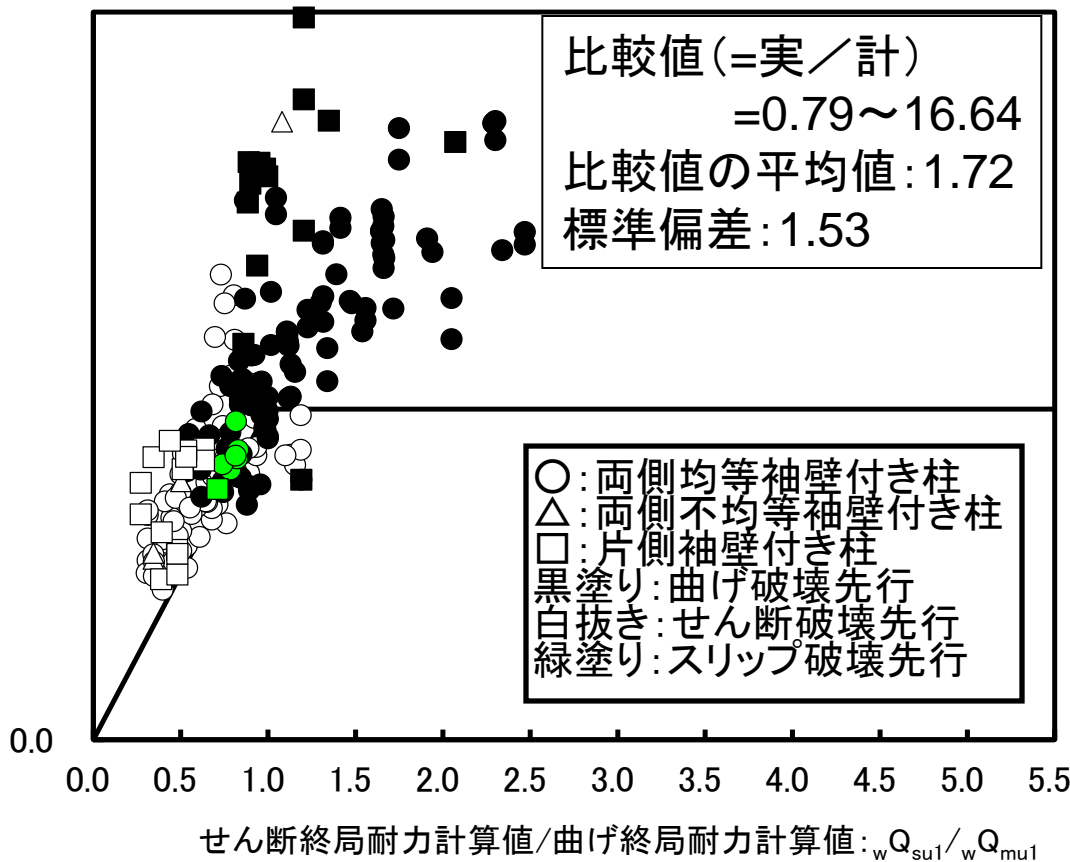
$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + F_c)}{M / (Q \cdot d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b_e \cdot j_e + 0.1N$$

## ■曲げ終局強度(技術基準解説書)■

$$M_u = (0.9 + \beta) \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left\{ 1 + \beta - \frac{N}{b_e \cdot D \cdot F_c} \left( 1 + \frac{a_t \cdot \sigma_y}{N} \right)^2 \right\}$$



終局耐力実験値/曲げ終局耐力計算値  $Q_{max}/Q_{mu1}$



## ■留意点■

- ・袖壁端部に多くの引張鉄筋が配置された試験体の場合、本曲げ強度計算値は曲げ耐力実験値に対して過小に評価される可能性がある。



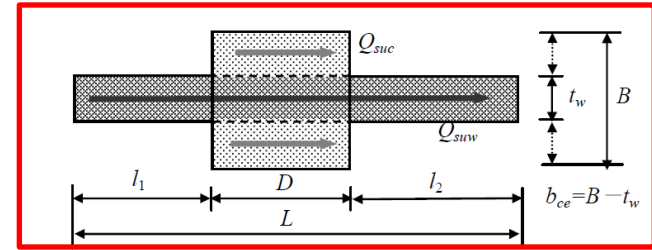
University of Fukui

福井大学  
磯 雅人

# 評価式の精度検証の一例：曲げおよびせん断終局強度2

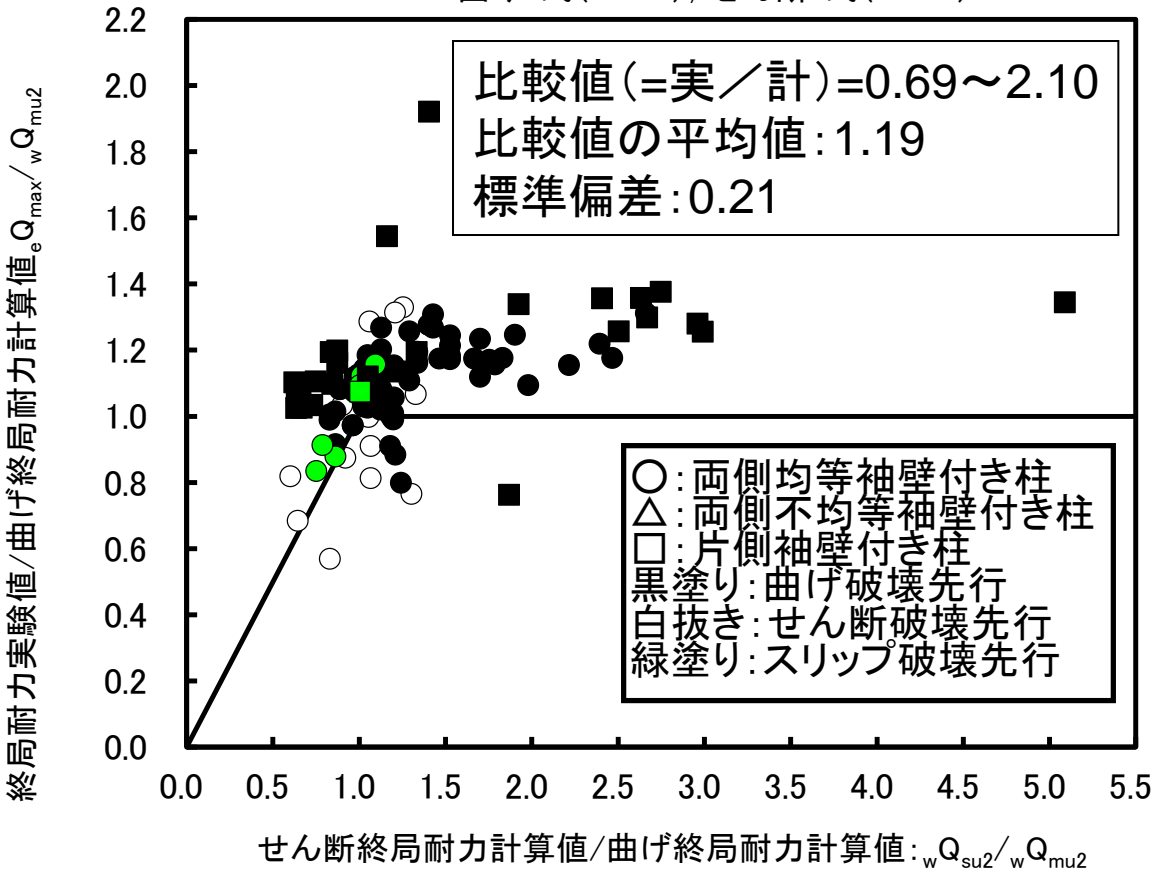
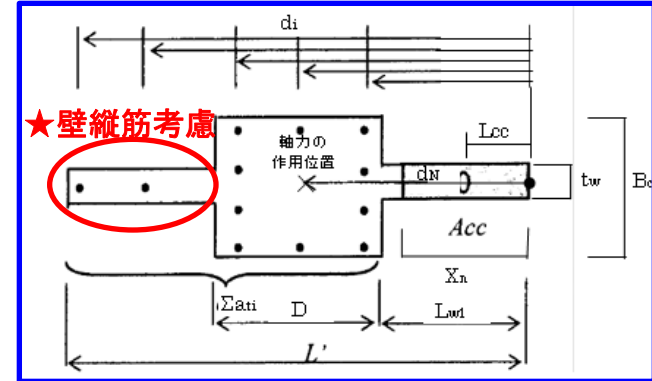
## ■せん断終局強度評価式(分割累加式)■

$$Q_{su2} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N$$



## ■曲げ終局強度(曲げ理論式)■

$$M_0 = \sum a_{ti} \cdot \sigma_{yi} (d_i - L_{cc}) + N(d_N - L_{cc})$$



## ■留意点■

- ・高軸力が作用し、袖壁の圧壊が先行する試験体の場合、本曲げ強度計算値は曲げ耐力実験値に対して、過大に評価される可能性がある。

# 腰壁・垂れ壁付き梁部材のデータベース

調査文献数24編 収集試験体数 76体

- ・実験データ・配筋データ・材料試験データが不足している試験体は除外
- ・構造スリットのうち部分スリットは除外

検討に用いた試験体一覧

	構造スリットあり	構造スリットなし
弾性剛性	8点(4体)	45点(34体)
剛性低下率	8点(4体)	33点(23体)
限界変形角	4点(4体)	21点(11体)
曲げひびわれ強度	8点(4体)	37点(33体)
せん断ひびわれ強度	0点	38点(32体)
曲げ終局強度	8点(4体)	37点(28体)
せん断終局強度	0点	7点(7体)

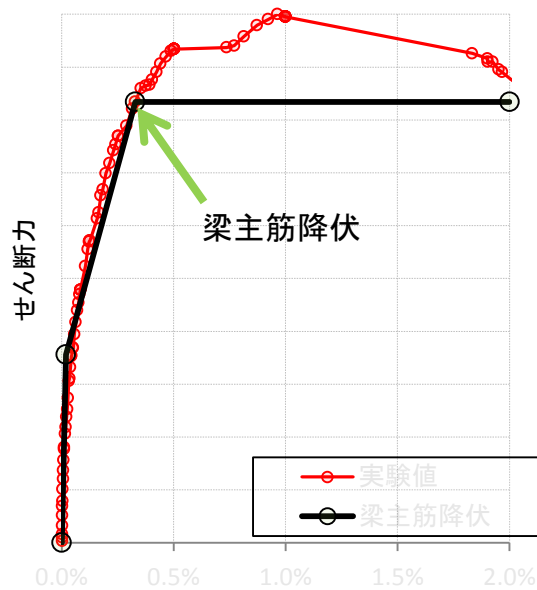
※ 繰り返し加力による実験値は正負のデータを用いた

- **せん断終局強度の実験データがそれぞれ0体、7体と特に少ない。**
- せん断破壊は脆性的な破壊であり、実験によるデータの蓄積が必要不可欠であり、早急に実験を実施する必要がある

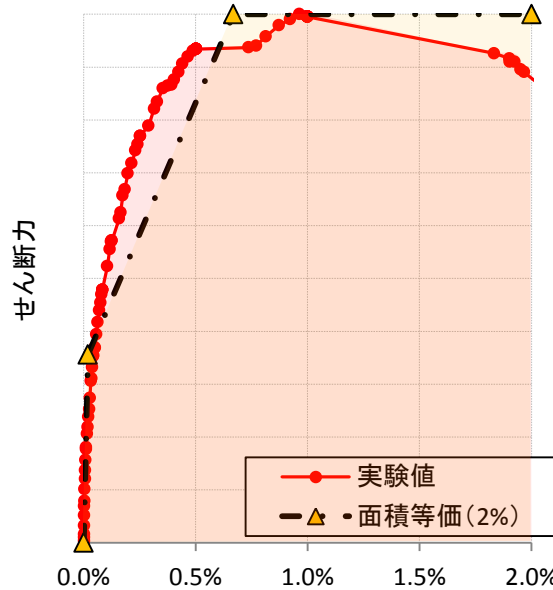
# 評価例：降伏点剛性低下率の評価（スリットなし）

- 腰壁・垂れ壁の影響により第二折れ点が明確に現れないため、降伏点剛性低下率に対応する実験値の定義が難しい。

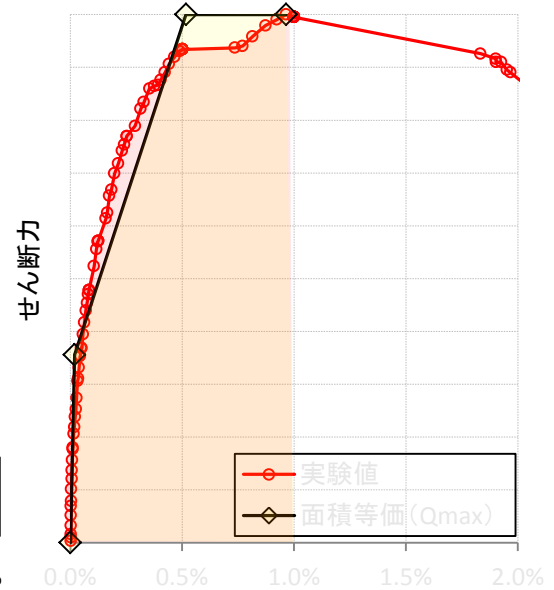
⇒ 以下の3種類の定義を設けて評価



梁主筋降伏



面積等価(2%)

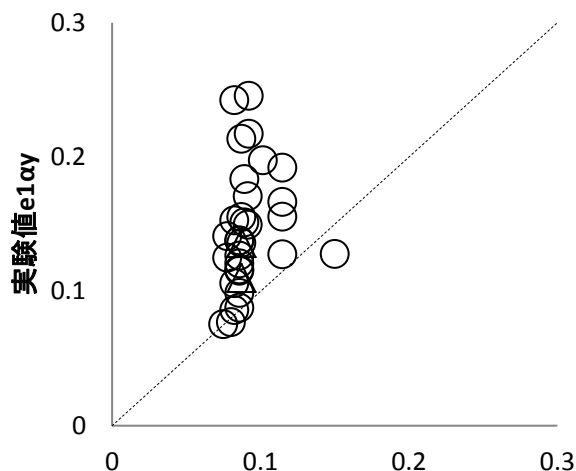


面積等価(Q<sub>max</sub>)

# 評価例：降伏点剛性低下率の評価（スリットなし）

- 計算式 ⇒ RC規準式（矩形断面に置換して菅野式を準用）

剛性低下率

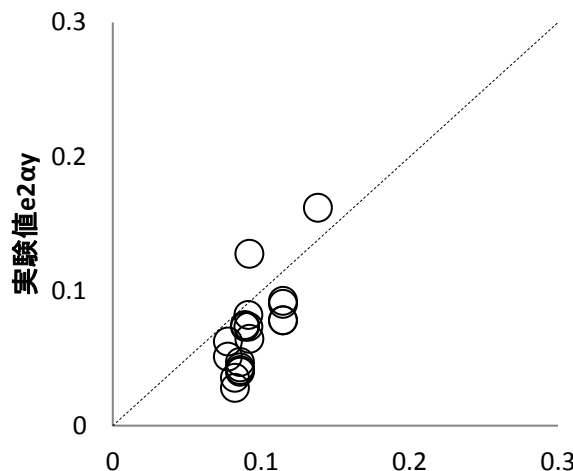


計算値cαy

梁主筋降伏

実験値／計算値  
0.87~2.94(平均1.54)  
変動係数 0.320

剛性低下率

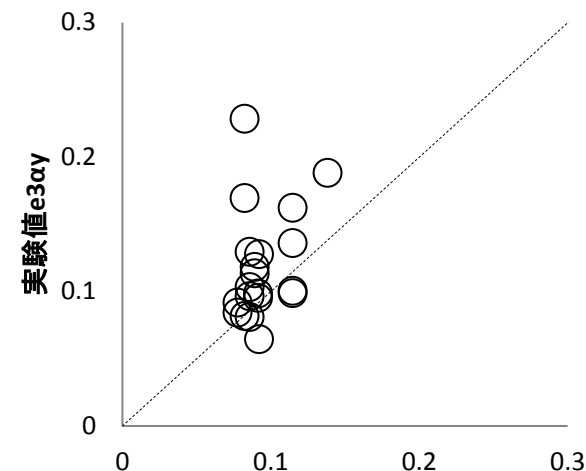


計算値cαy

面積等価(2%)

実験値／計算値  
0.34~1.38(平均0.72)  
変動係数 0.350

剛性低下率



計算値cαy

面積等価(Q<sub>max</sub>)

実験値／計算値  
0.70~2.77(平均1.27)  
変動係数 0.361

精度が十分とはいえない

⇒実験による腰壁・垂れ壁付き梁の履歴性状を三折れ線でモデル化する際の手法にも依存するため、今後は部材のモデル化も含めた総合的な評価が必要と考えられる。

# 柱梁接合部の試験体データベース

調査文献数: **296** (査読付論文集260 + 梗概集等からの追加36)

データを収集した試験体数: **1255**

設計式の精度検証に用いた試験体数: **856**

- 十字形: 375体, ト形: 266体, T形: 72体, L形: 143体
- 詳細な測定データによる分析に用いた基準整備促進事業の既往の試験体 83体

精度検証時に除外した試験体

- 杭頭接合部やサの字形試験体など形状が特殊な試験体や加力方法が特殊な試験体
- 腰壁等の壁付試験体, 梁端にハンチを有する試験体
- 軽量コンクリート, 繊維補強コンクリートを用いた試験体
- 接合部内主筋に特殊な加工をした試験体や柱梁接合部に貫通孔を設けた試験体
- 梁幅が柱幅より大きい試験体やスラブ付試験体
- 水平2方向に加力された試験体, 水平斜め方向に載荷した立体試験体, 変動軸力を作用させた試験体

## 精度検証を行った評価式:

- 弾性剛性 (技術基準解説書・学会靱性指針式)
- 斜めひび割れ強度 (学会靱性指針式・学会性能評価指針式)
- 接合部せん断強度 (技術基準解説書・学会靱性指針式)
- 柱梁接合部の終局モーメント (楠原・塩原式)
- 復元力特性 (学会性能評価指針式: せん断変形角とせん断応力度の関係)

部分架構の強度

- 降伏強度
- 終局強度

+



# データベースの特徴

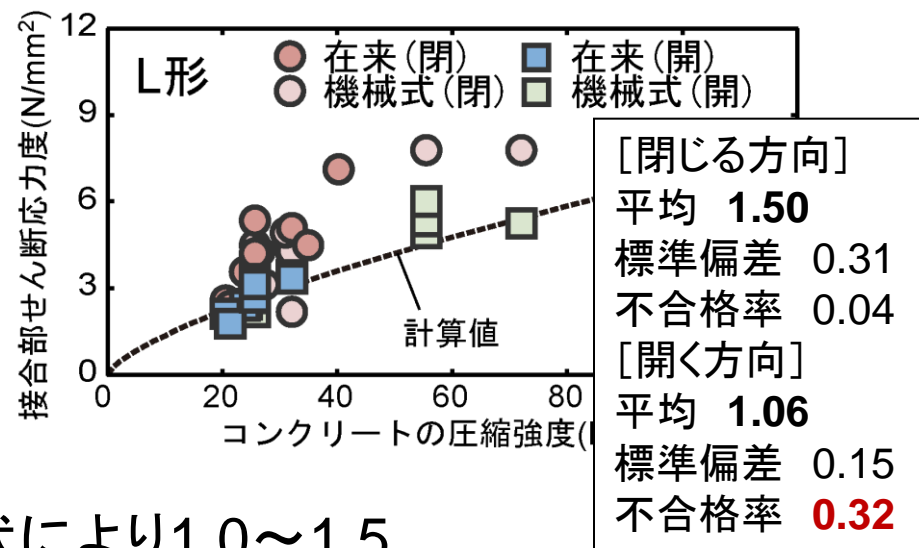
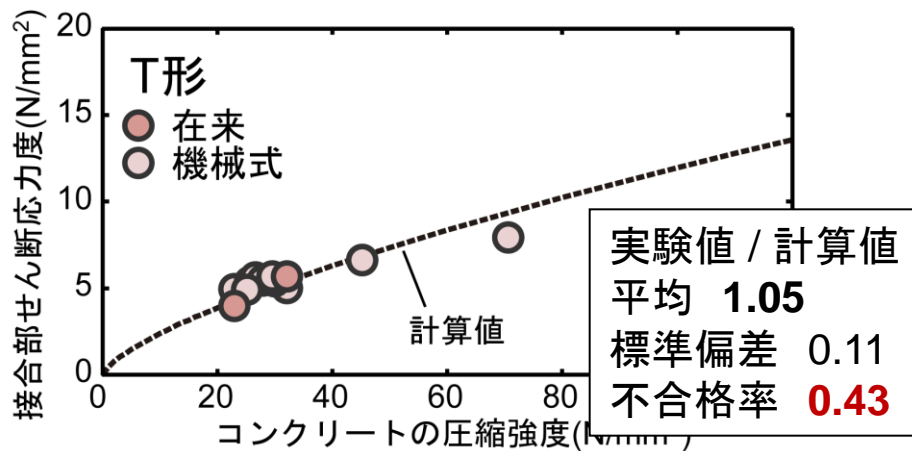
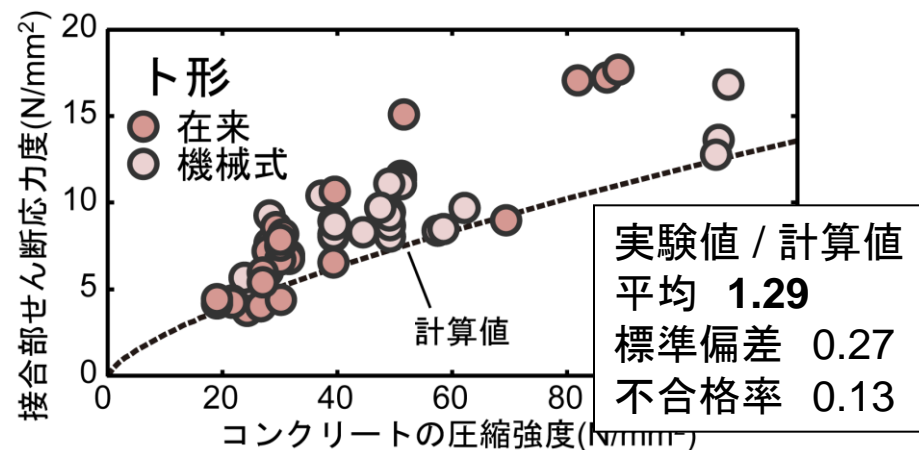
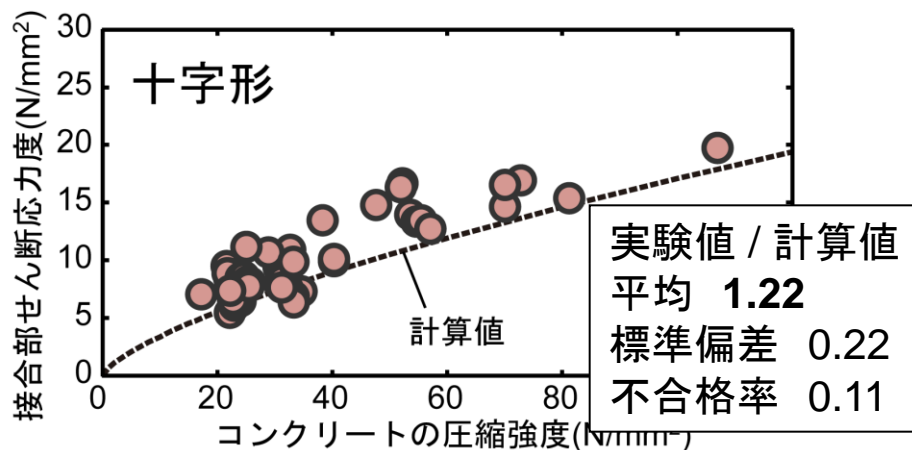
## データベースに含まれる試験体の特徴

- 主筋降伏前接合部破壊(**J型**):約20%, 主筋降伏後接合部破壊(**BJ型**):約45%
- 試験体のスケールは1/2~1/3が多い
- **超高強度コンクリート**(60N/mm<sup>2</sup>以上)の試験体が約20%
- **機械式定着**を用いた試験体はト形, T形, L形試験体のうち66%
- 接合部横補強筋量, 主筋定着長さは学会設計指針の規定を満たすものがほとんど
- 柱と梁の曲げ強度の比は70%が1.5以上で, 38%は2以上

## データ収集上の問題点

- 約20%の試験体で文献中に梁, 柱の主筋位置の記載なし  
→ 文献に記載の図面から推定した
- 破壊形式, 接合部せん断力, 接合部せん断変形角の定義が文献により異なる  
→ 接合部せん断力は統一した方法ですべて再計算
- ひび割れ発生時, 主筋降伏時の荷重等の記載がない文献が多い  
(記載があったのはひび割れ時は約30%, 主筋降伏時は約45%)

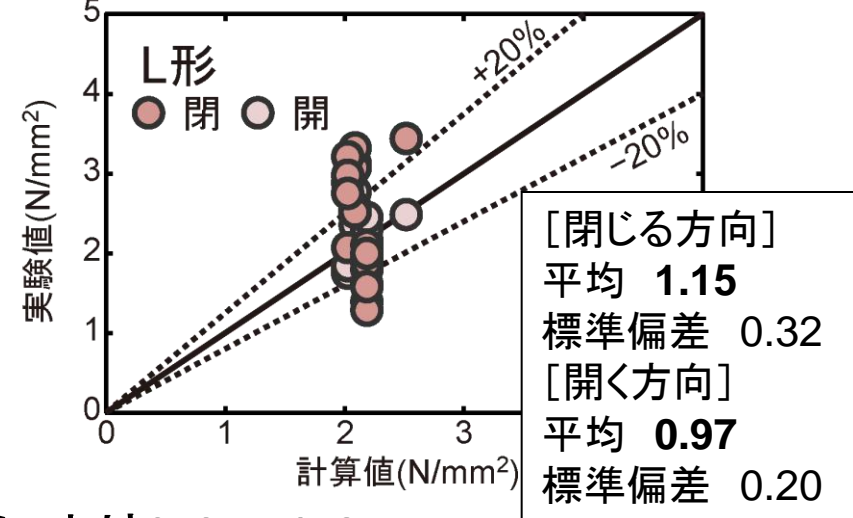
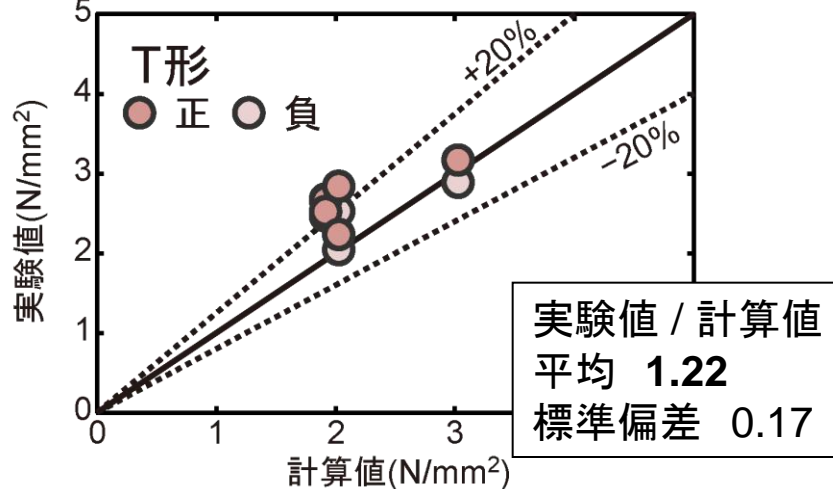
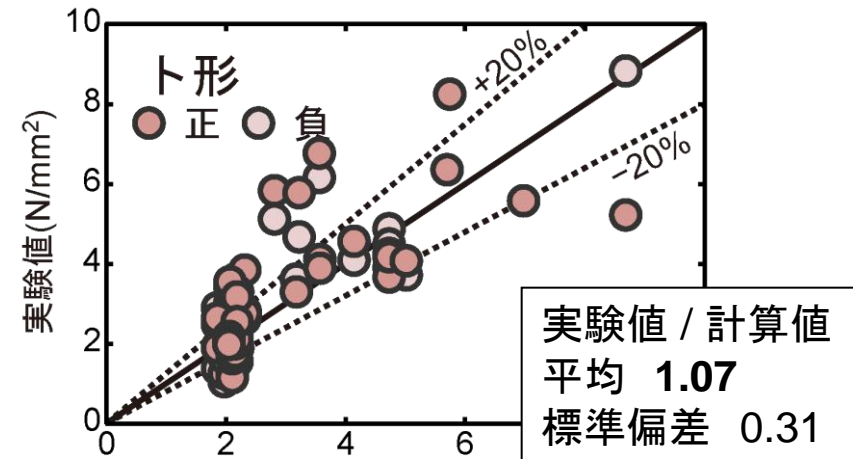
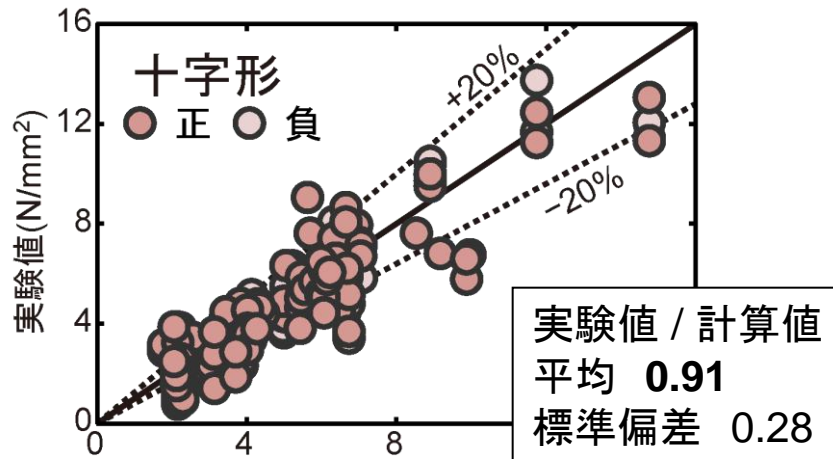
# 柱梁接合部の設計式の精度検証 (せん断終局強度: 学会靱性指針式)



- 実験値の計算値に対する比は形状により1.0~1.5
- T形, L形の開く方向では不合格率が多い

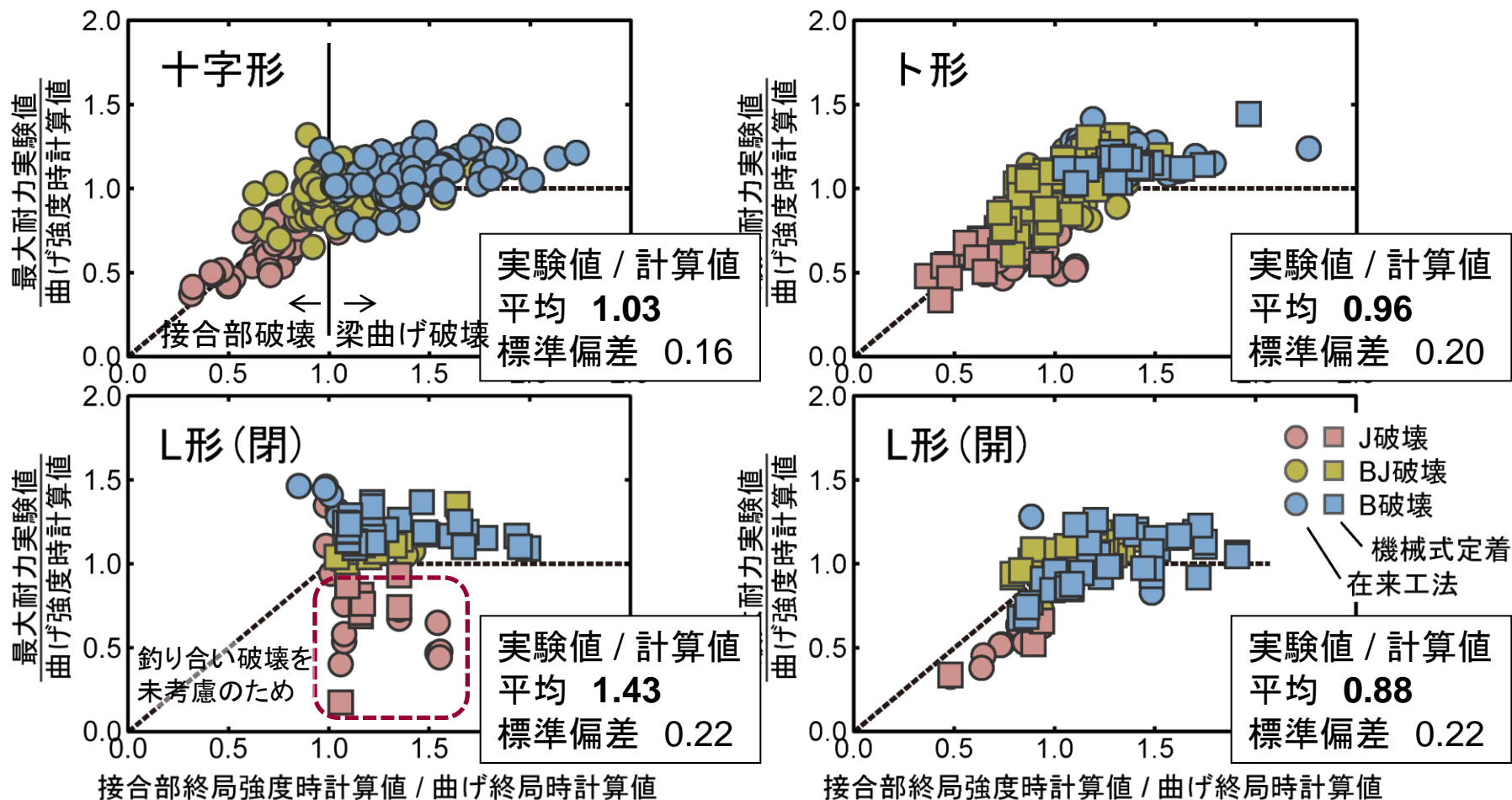
# 柱梁接合部の設計式の精度検証

(ひび割れ強度：学会性能評価指針式)



- 実験値の計算値に対する比は形状により0.9~1.2
- ひび割れ強度の評価が異なる学会靱性指針式では0.8~1.1

# 柱梁接合部の設計式の精度検証 (終局モーメント: 楠原・塩原式)



- 接合部強度で決まる場合の実験値の計算値に対する比は0.9~1.4
- 折り曲げ定着の場合に計算値は実験値をやや過大評価

# まとめ

- これまで広く行われてきた部材の加力実験データベースを精度検証の利用が可能な状態となった。
- 部材のモデル化,設計式の精度の確認を行った。
  - 技術基準解説書
  - 学会指針式・規準式
- 今後、実験の少ないパラメータの組み合わせの確認や、継続的なデータベースの維持が必要。