

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

第1・2・9章	横浜国立大学大学院	田才 晃/楠 浩一
第3・4章	竹中工務店	石川裕次
第5章	広島大学	渡邊秀和
第6章	福井大学	磯雅人
第7章	京都大学	坂下雅信
第8章	東京大学	楠原文雄

はじめに

- 鉄筋コンクリート造構造部材の強度，剛性及び変形能は，構造計算で用いる構造部材のモデル化を決定する上で重要な評価項目であるが，その評価は，現在ほど材料の強度範囲が広くない時期に提案されたものも多くあり，構造設計の現状を踏まえた適用範囲に関する技術的知見の蓄積が必要である
- そこで，高強度材料等を用いた鉄筋コンクリート造の構造部材を対象として，過去に行われた鉄筋コンクリート造構造部材の構造実験結果から適切なデータを選定，収集し，基準明確化のために強度，剛性及び変形能の評価精度に関する知見を取り纏め，提案される評価方法が適切に利用されるための基盤を構築することを本課題の目的とする。

調査方法

調査対象論文： 1975年～2011年に発行された、下記4論文

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	21	46	1	5	22	16	111
	JCI大会	93	173	2	27	141	207	643
	JCI論文集	0	6	0	0	5	2	13
	構造工学	2	11	1	2	11	12	39
	その他	0	0	0	17	39	86	142
	合計	116	236	4	51	218	323	948

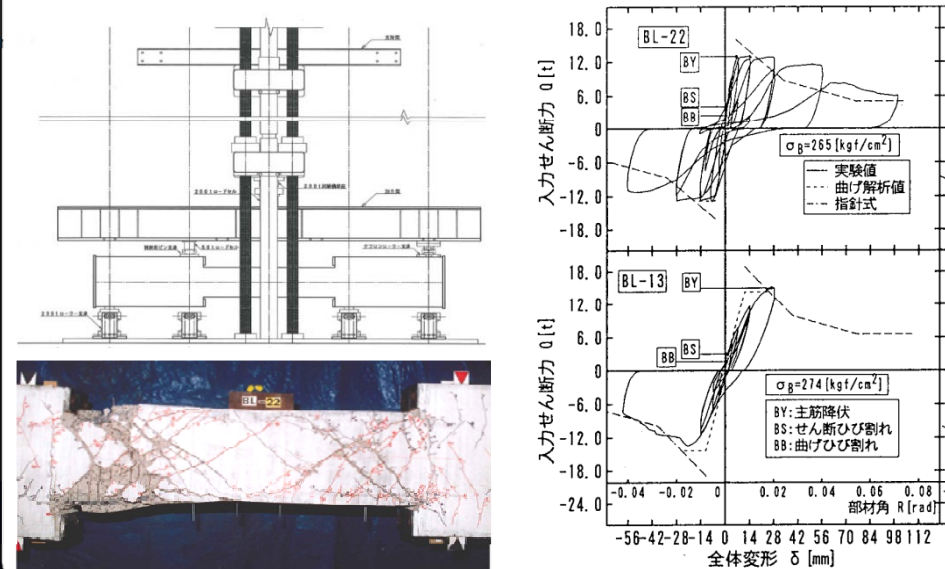
- これらの論文から実験データを入力したデータベースを作成
- これらを用いて技術基準解説書の式を用いて各部材の各構造的な性能について評価を行い、その評価精度について検討する

梁部材のデータベース



RC梁部材の被害例
(1995年阪神大震災)

RC梁部材の実験データベース



■ データベース (RC梁部材)

検討試験体数 985体 (1976年から2012年)

(せん断破壊, 曲げ降伏先行型, 付着破壊型)

(平行配筋, X形配筋, スラブ付き試験体)

□ せん断破壊試験体 115体を抽出

現行建築基準法 せん断強度式の検証

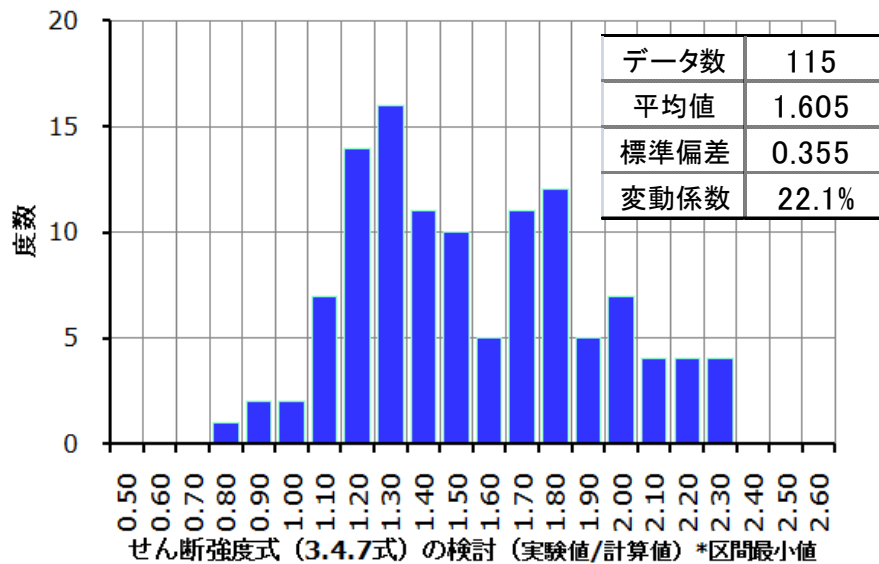
担当 石川裕次  TAKENAKA CORPORATION

梁部材のデータベース

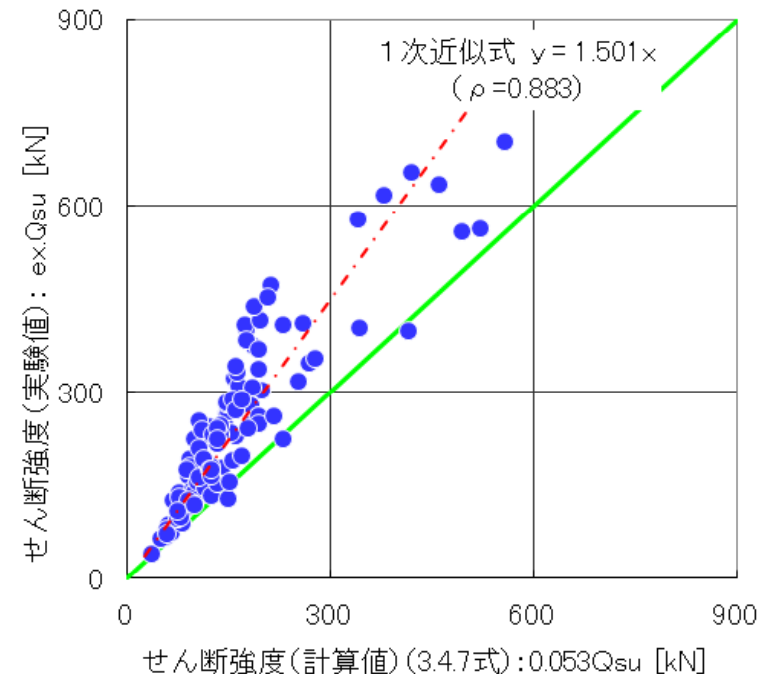
□2007年版建築物の構造関係技術基準解説書付録
せん断

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} \right\} bj \text{ (N)} \quad (\text{付1.3-6}) \quad \cdot \cdot (3.4.7)$$

- F_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
 M/Q : (ただし, $M/(Qd)$ は, $M/(Qd) < 1$ のとき1とし, $M/(Qd) > 3$ のとき3とする) (mm)
 d : はり有効せい (mm), p_w : せん断補強筋比 (小数)
 σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度 (N/mm²), b : はり幅 (mm)
 j : 応力中心距離 (mm) で $7d/8$ としてよい



■せん断強度式の実/計<1.0は2.6%のみ



柱部材のデータベース



RC柱部材の被害例
(2011年東北大震災)

RC梁部材の実験データベース



■ データベース (RC柱部材)

検討試験体数 1560体 (1975年から2011年)
(せん断破壊, 曲げ降伏先行型, 付着破壊型)
(平行配筋, X形配筋, 2方向加力, 動的載荷)

□ せん断破壊試験体 335体を抽出

現行建築基準法 せん断強度式の検証

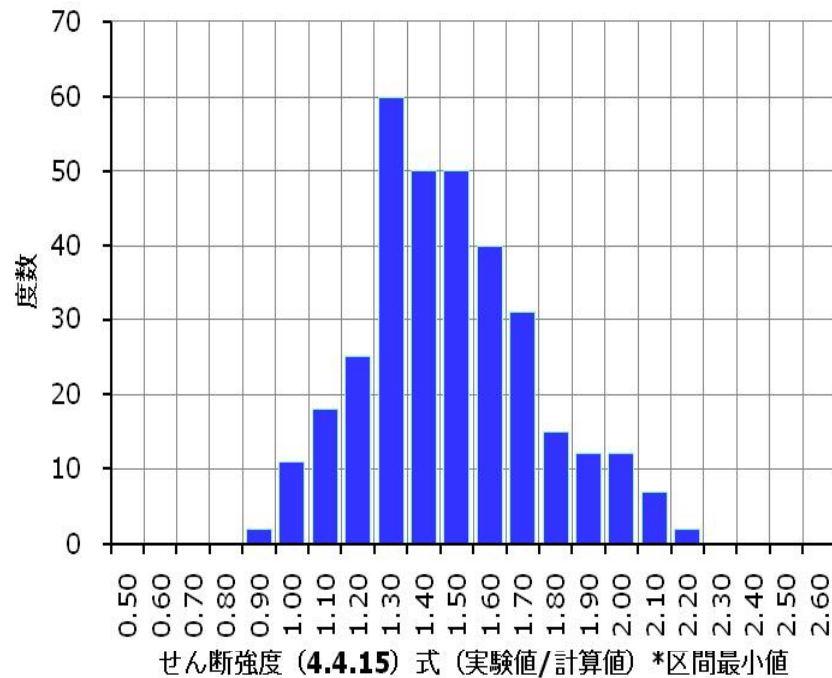
担当 石川裕次  TAKENAKA CORPORATION

柱部材のデータベース

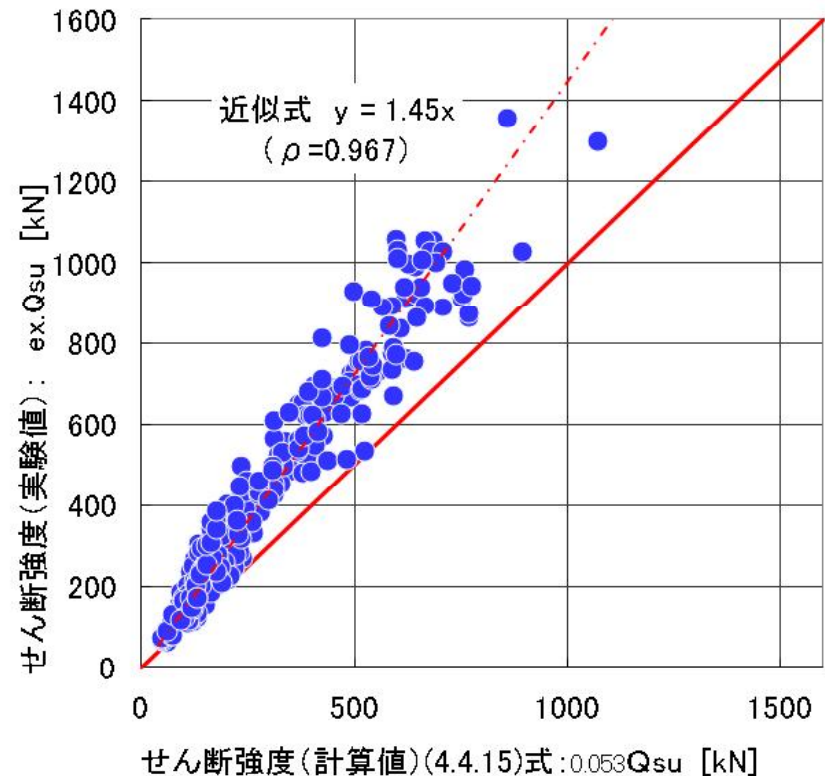
□2007年版建築物の構造関係技術基準解説書付録
せん断

$$Q_{su} = {}_B Q_{su} + 0.1\sigma_0 bj(N) \quad (\text{付1.3-16}) \quad \cdots (4.4.15)$$

σ_0 平均軸方向応力度(= $N/(bD)$) (N/mm^2)。ただし、(付1.3-16)式では $0.4F_c$ 以下とする。

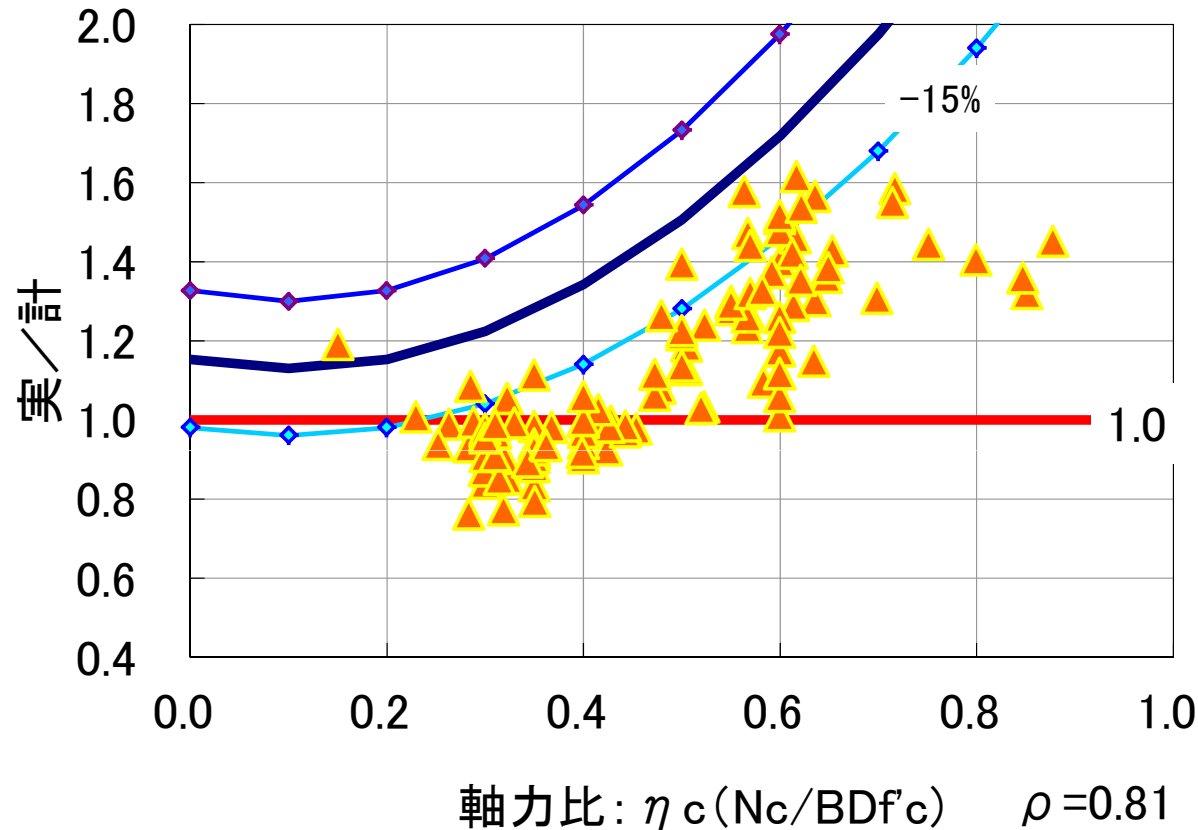


■せん断強度式の実/計<1.0は0.6%のみ



柱部材のデータベース

□2007年版建築物の構造関係技術基準解説書付録
曲げ終局強度



■ 柱軸力比が大きいと、曲げ終局強度(実験値)/計算値は大きくなる傾向にある。軸力比が0.30から0.40の範囲では計算値が実験値を過大評価する傾向が認められている。DATA 曲げ終局強度が確認された115体

垂れ壁・腰壁付き梁部材のデータベース

調査文献数

54編 試験体数 88体

(査読付論文集23＋梗概集等からの追加31)

設計式の精度検証
に用いた試験体

スリット付の垂れ壁・腰壁付き梁試験体 4体

スリット無しの垂れ壁・腰壁付き梁試験体 29体

合計 33体

除外した試験体

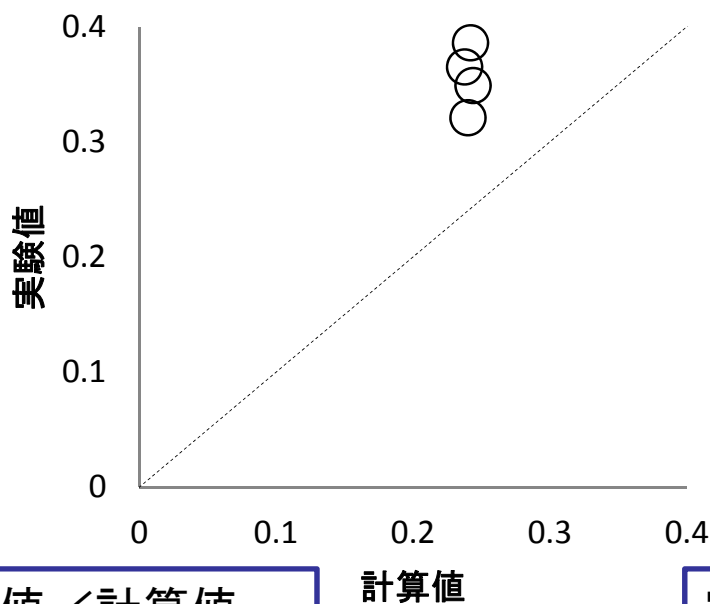
- ・実験データ・配筋データ・材料試験データが無いものは除外
- ・構造スリットのうち部分スリットは除外

垂れ壁・腰壁付き梁部材のデータ ベース

精度検証結果

スリット有 垂れ壁・腰壁付き梁

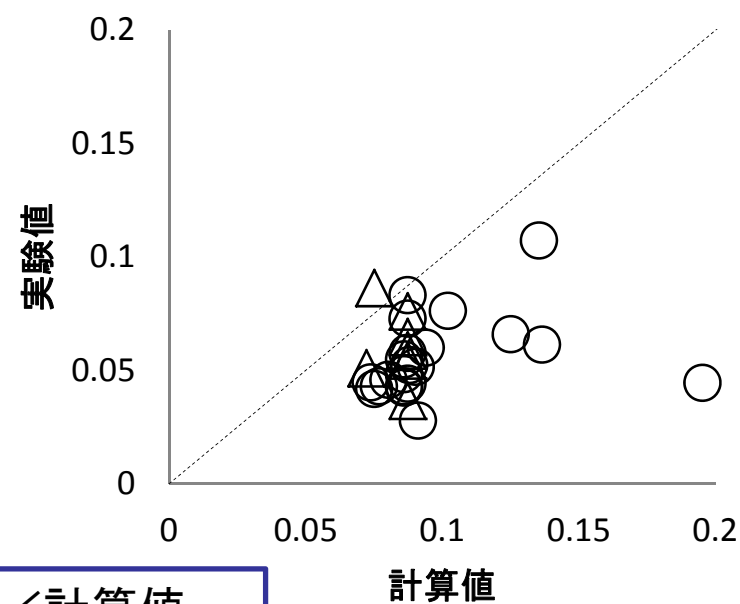
剛性低下率



実験値／計算値
平均:1.47
標準偏差:0.114

スリットなし 垂れ壁・腰壁付き梁

剛性低下率



実験値／計算値
平均:0.65
標準偏差:0.249

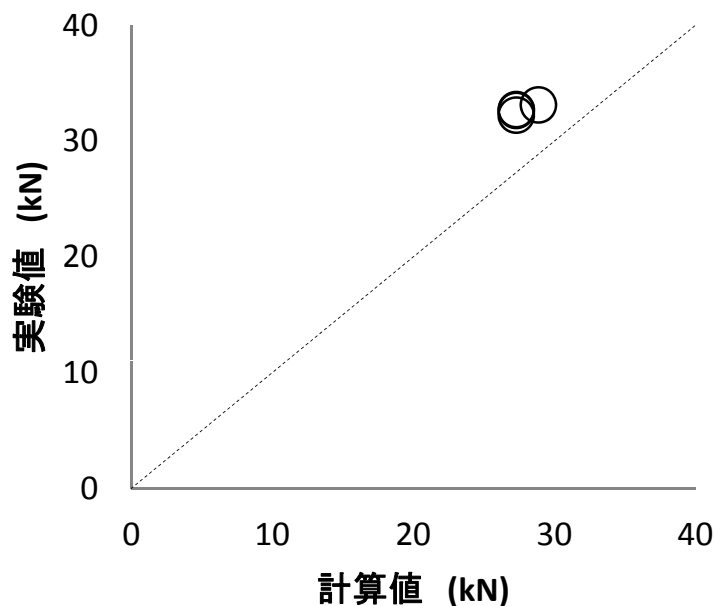
垂れ壁・腰壁付き梁部材のデータベース

精度検証結果

スリット有 垂れ壁・腰壁付き梁

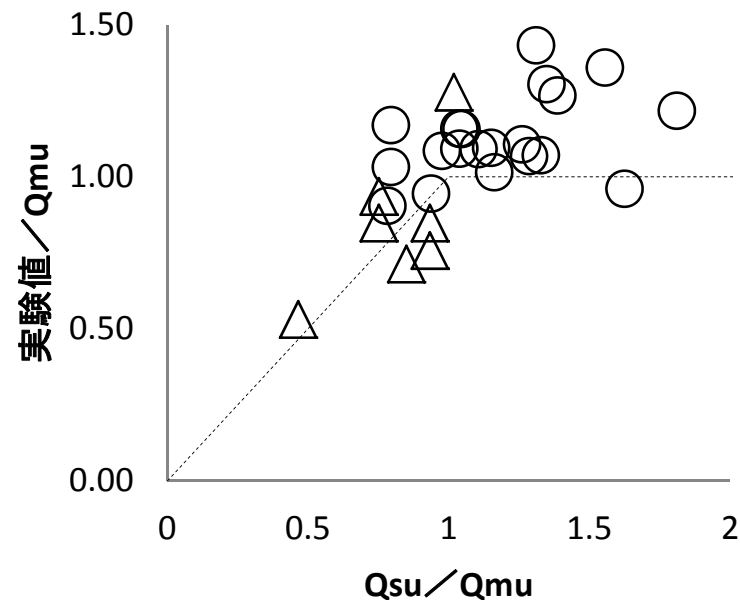
スリットなし 垂れ壁・腰壁付き梁

曲げ終局強度



実験値／計算値
平均:1.18
標準偏差:0.023

曲げ:Qmu せん断:Qsu



せん断(実／計)
平均:1.05
標準偏差:0.189

曲げ(実／計)
平均:1.13
標準偏差:0.137

袖壁付き柱部材のデータベース

調査文献数

51編 試験体数 **157**体

(査読付論文集**34**+梗概集等からの追加**17**)

設計式の精度検証
に用いた試験体

●均等袖壁付き柱 **121**体 (**77%**)



●不均等袖壁付き柱 **2**体 (**1%**)



●片側袖壁付き柱 **34**体 (**22%**)



合計 **157**体(**100%**)

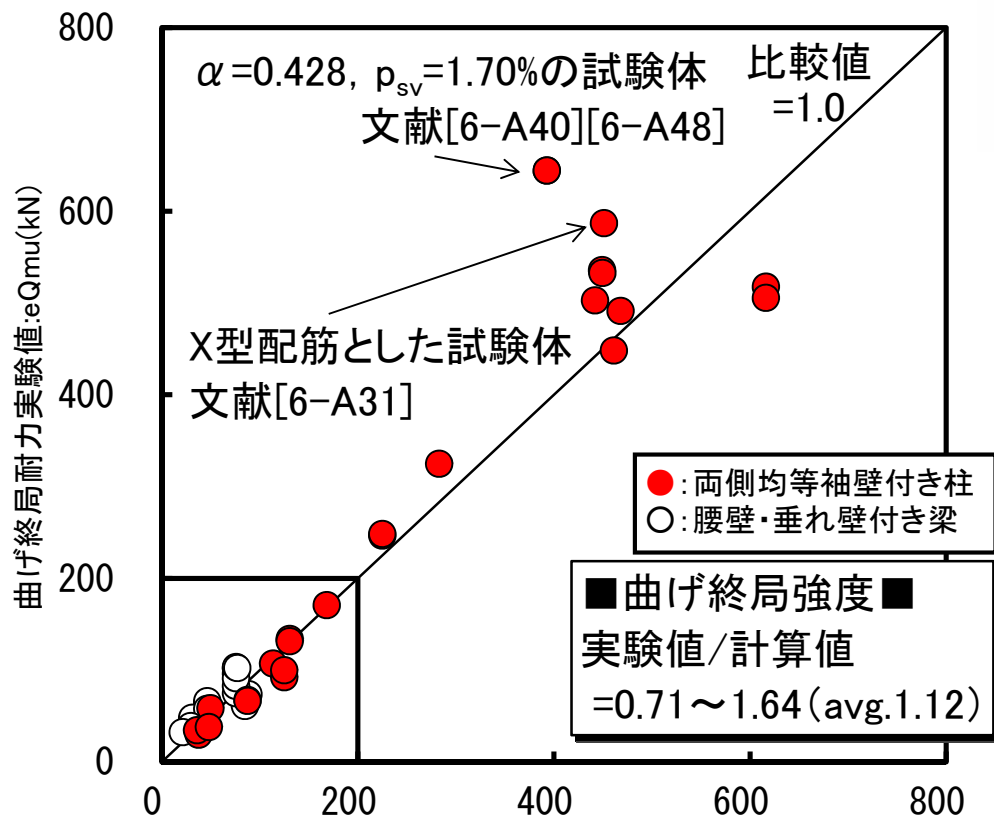
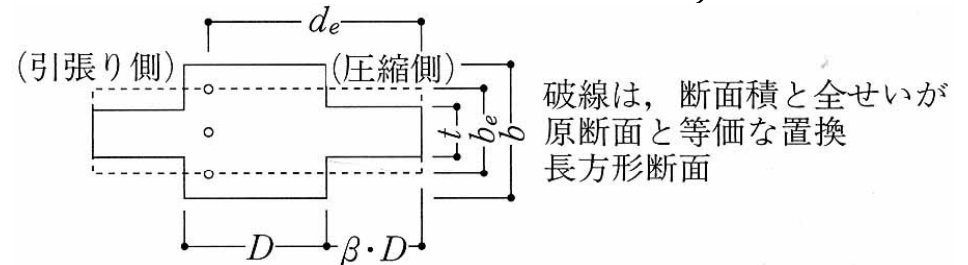
収集対象から除外した試験体

- ・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

評価式の精度検証の一例：曲げ終局強度

■ 曲げ終局モーメント評価式 (技術基準解説書, 耐震診断基準) ■

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



<式の導出仮定>

- ・袖壁部分の引張鉄筋を無視
- ・断面積と全せいが原断面と等価な長方形断面に置換

<留意点>

- ・袖壁部端部に多くの引張鉄筋が配置された試験体の場合には、**耐力を過小に評価**
- ・袖壁厚さ比が小さく、**比較的薄い袖壁を有する試験体は、耐力を過大に評価**

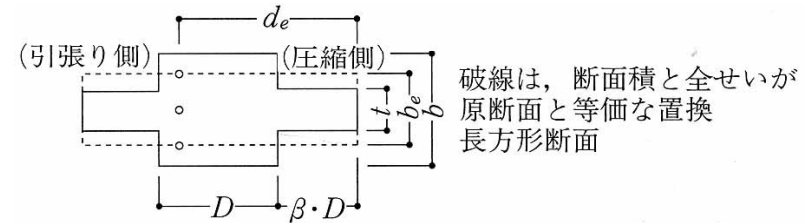
評価式の精度検証の一例：曲げおよびせん断終局強度

■せん断終局強度評価式(技術基準解説書)■

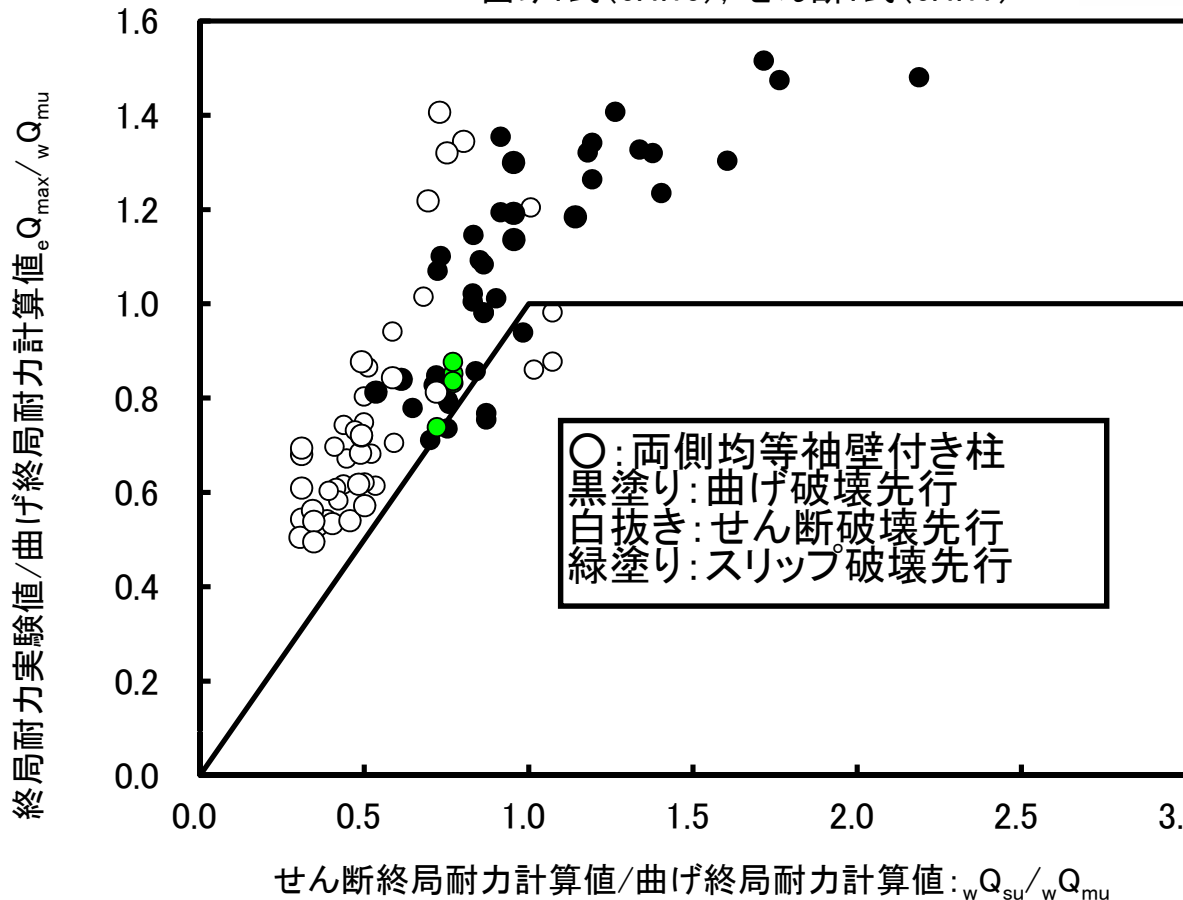
$$c Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + F_c)}{M / (Q \cdot d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b_e \cdot j_e + 0.1N$$

■曲げ終局強度(技術基準解説書)■

全ページと同様の評価式



曲げ：式(6.4.15)，せん断：式(6.4.17)



比較値(=実/計)=0.86~2.24
 比較値の平均値：1.38
 標準偏差：0.29

- ・おおむね安全の評価である。
- ・破壊モード判定の精度は、せん断余裕度が1.0以下においても曲げ破壊した試験体が多く見られ、良好とは言えない。

耐力壁部材の調査報告(担当:京都大学)

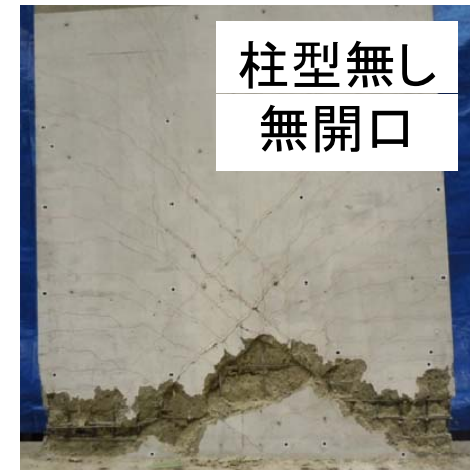


論文から収集した試験体の数 : 610体 (218論文)
検討に用いた試験体の数 : 480体* (191論文)

*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、非対称断面)
- ・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	全体に占める割合
(形状)	
・有開口耐力壁	: 30%
・柱型の無い耐力壁	: 20%
(破壊形式)	
・曲げ破壊型	: 14%
・曲げ・せん断破壊型	: 25%
・せん断破壊型	: 60%

収集対象とした
試験体の一例

調査結果の例1:せん断ひび割れ強度



「2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書」

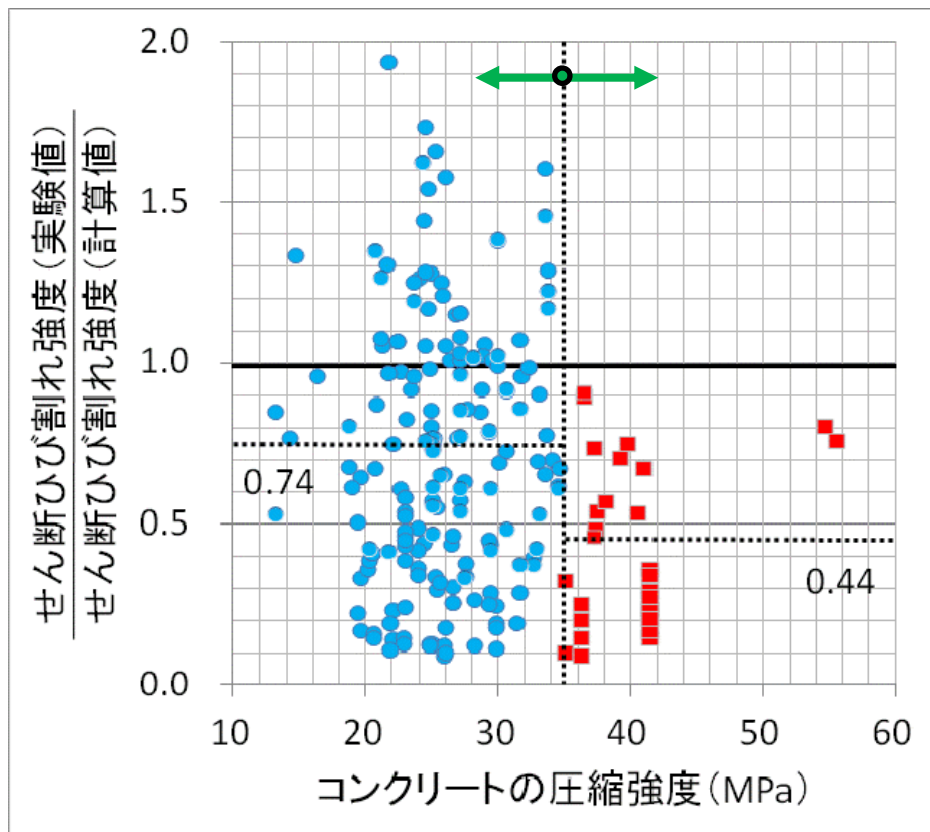
に記載されている3つの式(①~③)を比較

＜適用範囲内＞

$F_c \leq 35\text{MPa}$
(実験/計算)=0.74

＜適用範囲外＞

$F_c > 35\text{MPa}$
(実験/計算)=0.44



＜評価式②＞

$$Q_c = r_2 \times (0.043 p_g + 0.051) F_c A_w$$

データベース (F_c : 13~56MPa) の実験結果に、 F_c の適用範囲が 18~35MPa の評価式②を用いたところ、適用範囲外 (高強度コンクリートを用いた場合) では、評価精度が大きく低下することが分かった。

調査結果の例2: せん断破壊時の変形角



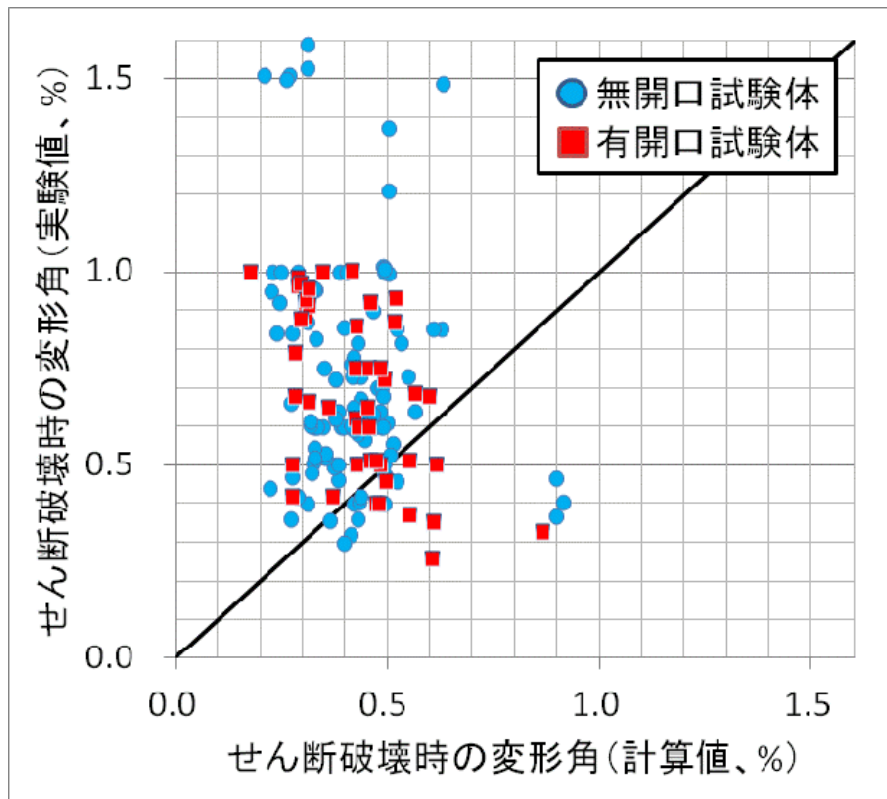
「2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書」

に記載されている評価法を検証

(実験値/計算値)

無開口壁: 1.91

有開口壁: 2.00



(実験値/計算値)の比率が2倍近く離れており、実際の挙動との乖離が大きい。

原因を検証した結果、

- ① 平均値を与えるときとされる既存の算定式が3~4割程度高めのせん断終局強度を与えていた。
- ② 高強度鉄筋を壁筋に用いた試験体で、せん断破壊時の剛性が過大評価されている事例があった。

柱梁接合部の試験体データベース

調査文献数：**323** (査読付論文集237 + 梗概集等からの追加86)

データを収集した試験体数：**1356**

設計式の精度検証に用いた試験体数：**983**

(せん断終局強度の検討はこのうち主筋降伏前に接合部破壊した試験体**183**体)

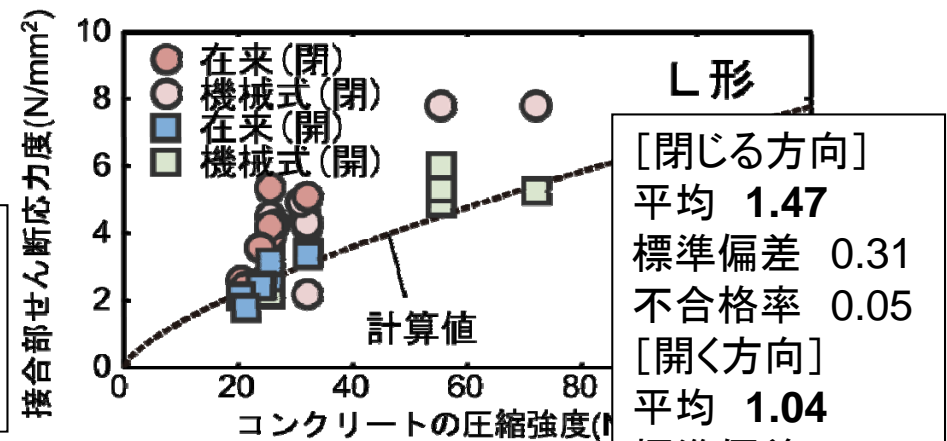
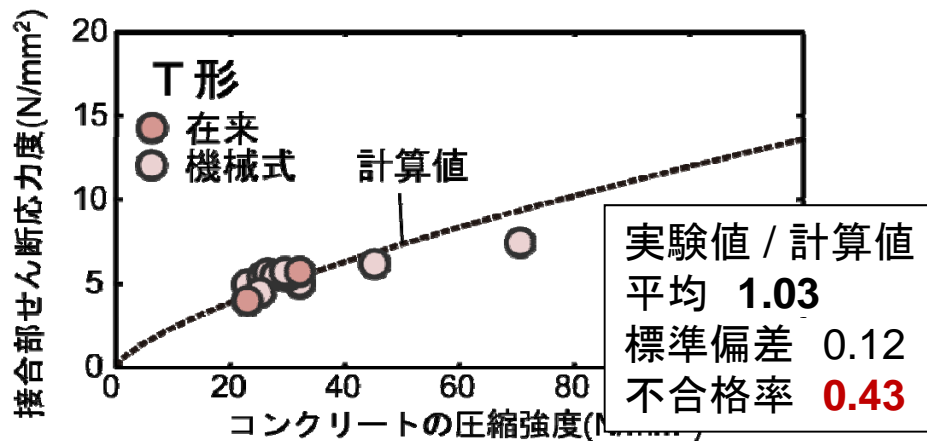
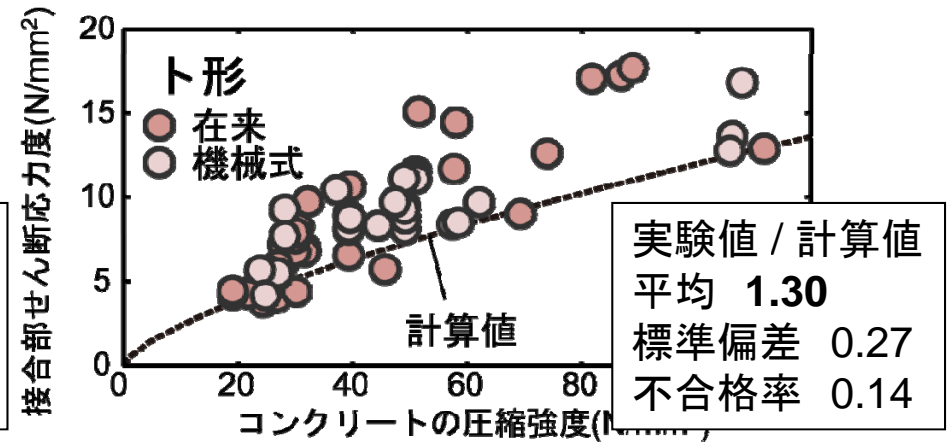
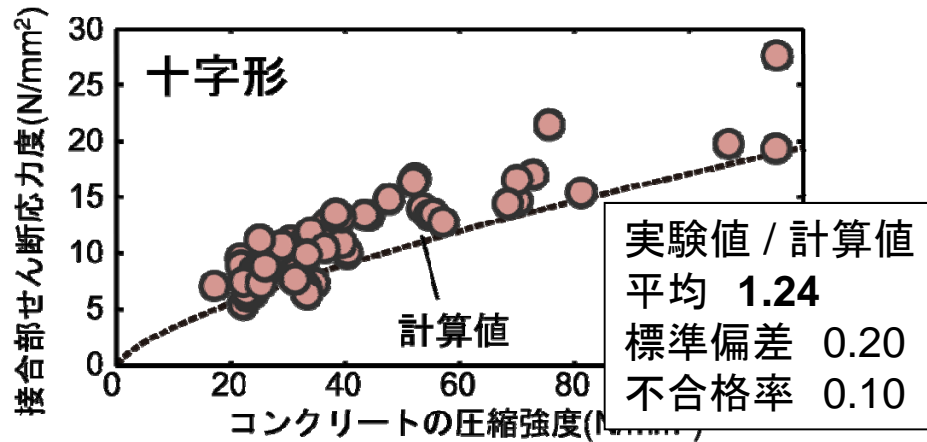
データベースに含まれる試験体の特徴

- 梁, 柱主筋降伏前に接合部破壊した試験体が約20%
- 超高強度コンクリート(60N/mm²以上)の試験体が約20%
- ト形, T形, L形試験体では機械式定着の試験体が約55%
- 柱と梁曲げ強度の比は約80%が1.5以上で, 約45%は2以上

精度検証を行う設計式

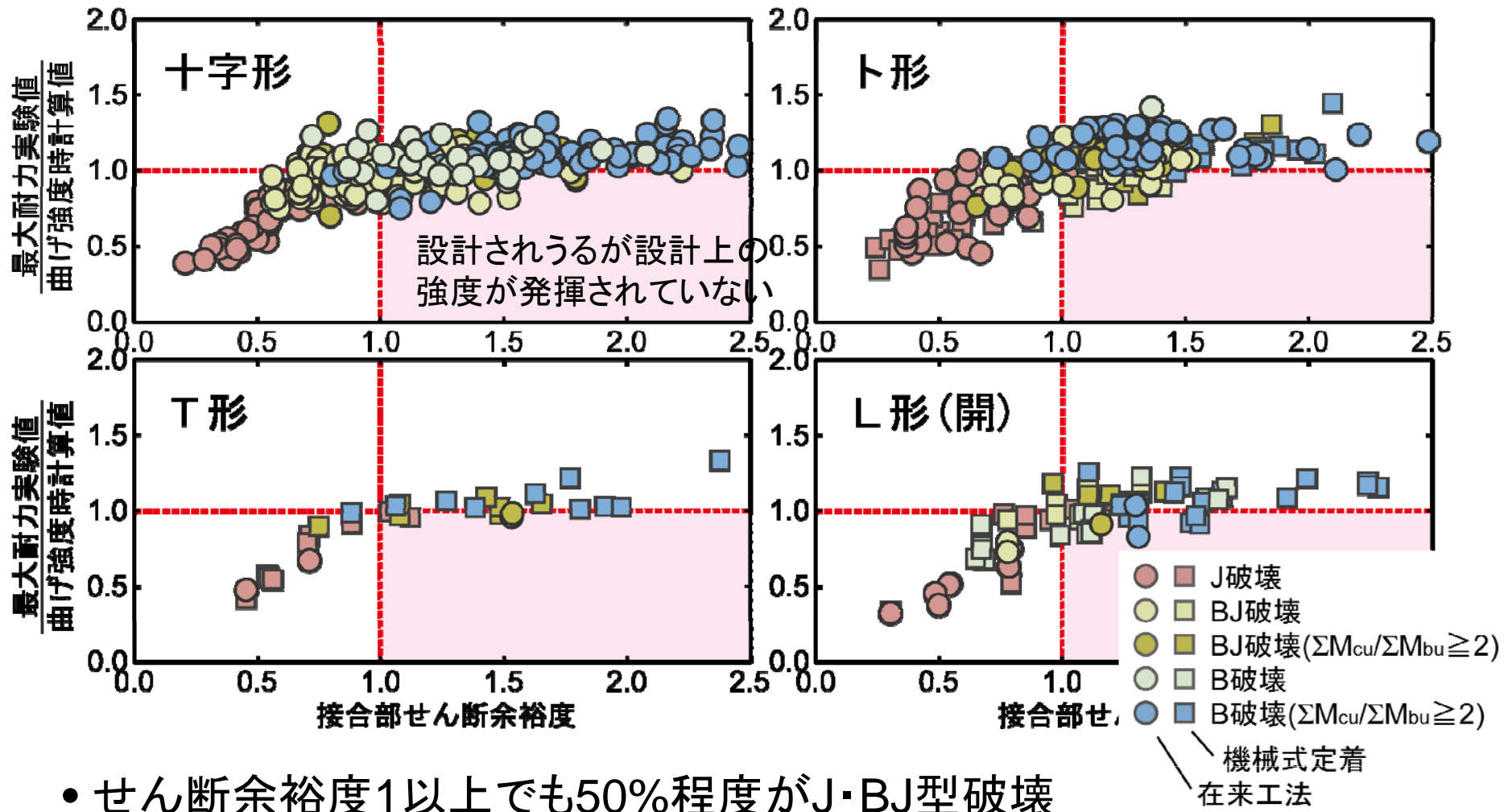
- 柱梁接合部のせん断応力度とせん断変形角の関係の弾性剛性
→ 実験値の記載のある文献はなく検証できなかった
- 柱梁接合部のせん断終局強度
→ 強度式の精度検証では一律に梁端モーメント実験値から推定

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大きい

柱梁接合部の設計式の精度検証 (せん断余裕度と破壊形式)



- せん断余裕度1以上でも50%程度がJ・BJ型破壊
- // 15%程度で最大耐力は曲げ強度計算値以下

結論，今後の課題

- RC造構造物の部材毎に、既発表論文を調査しデータベースを作成，このデータベースを用いて既往の評価式による計算値と実験値との比較，検討を行い各評価式の精度を示した。
- データベース化した論文数は，約948編である。今後，調査対象の論文を広げ，さらにデータを蓄積する必要がある。とくに変形情報，剛性情報，エネルギー吸収に関する情報は少なく，論文中のグラフから，その情報をデジタルに変換して得ることも検討する必要がある。
- 今回検討した式以外の評価式についてもその精度について検討を行なう必要がある。