

## RC造耐震壁の設計法に関する研究

F08D061G 綱島朋直  
 指導教員 加藤大介教授

### 1. 研究背景・目的

構造設計において、RC造建物の水平抵抗要素として耐震壁を計画し強度を確保する事は有効な方法である。時に建築計画上、耐震壁に窓・戸といった開口を設ける場合が多々ある。しかしこのような有開口耐震壁の強度・変形能に関しては無開口耐震壁に比べその性質について未だ不明な点が残されている。

そこで本研究では過去に行われた有開口壁の実験データを基に、既往の設計評価式と実験値との比較検討を行い、そこで把握された問題点に対して新たな提案を行っていく。前半は強度について、後半は変形能を中心として、それぞれにおいて、既往の評価法の有効性・問題点の把握、それを受けた新たな設計法の提案・検討を行う。

強度に関しては既往のRC規準による開口低減率の終局時における有効性を検証し、また、袖壁分離の考え方に基づいた新たな強度評価法を提案し同様に検討する。変形能評価法に関しては、建築基準法による部材ランク<sup>1)</sup>、耐震診断<sup>2)</sup>による靱性指標、終局強度型耐震設計指針<sup>3)</sup>による $v_m/v_o$ 降伏ヒンジ算定など様々な評価法があるが

それらの有効性を検証し、強度と同様に、袖壁分離法を応用した新たな変形能評価法の提案を試みる。対象試験体は各種研究機関で過去に行われた有開口壁試験体<sup>4)</sup>とし、偏在開口試験体に関しては加力方向別に別々の性状を示すので2体分の試験体と数えている。

### 2. 終局強度について

#### 2.1 開口低減率による方法

RC規準による開口低減率は本来1次設計の範疇であるが、2次設計においても有開口壁の終局強度算定には、当該壁部材の無開口時終局強度にRC規準による開口低減率を乗じて計算する場合がある。そこで現在法規上設計に使用されている無開口耐震壁せん断強度式としての広沢ave式<sup>1)</sup>、広沢min式<sup>1)</sup>、に更に建築学会の終局強度型設計指針<sup>3)</sup>による式(終局強度式)を加え、これら3式によるせん断強度に開口低減率を適用した評価値と実験値を比べ、終局時における開口低減率適用の妥当性を検討する。広沢ave式、広沢min式、終局強度式、及び曲げ強度式は(1)~(4)によって与えられる

・広沢ave式(記号は文献1参照)

$$Q_{wsu} = \left\{ \frac{0.068 p_{fc}^{0.23} \cdot (F_c + 18)}{\sqrt{M/(Q \cdot D)} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{wh}} + 0.1 \sigma_o \right\} \cdot t_c \cdot j$$

$$(1 \leq M/(Q \cdot D) \leq 3) \dots(1)$$

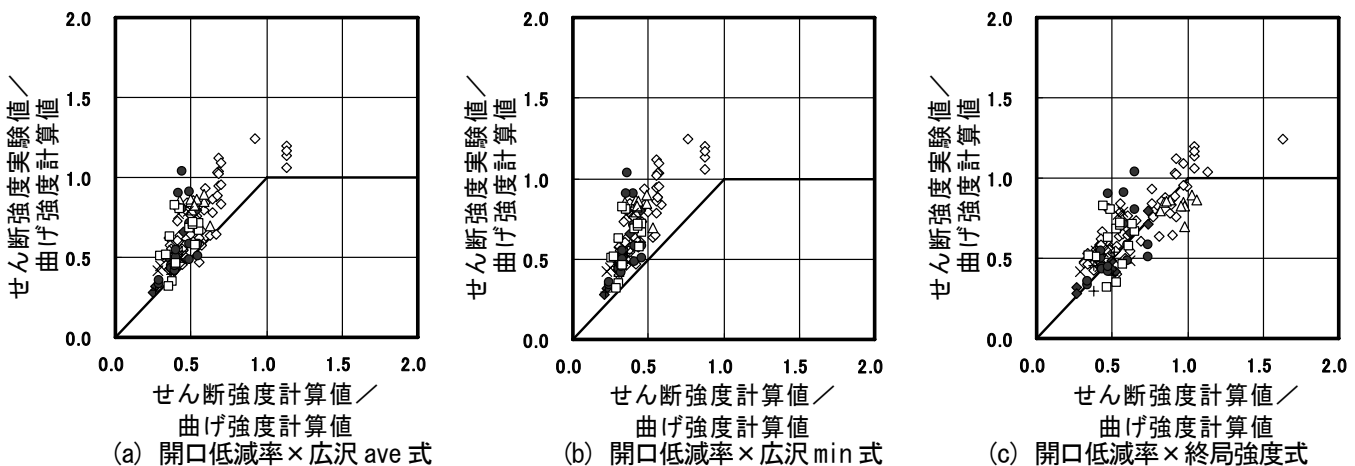
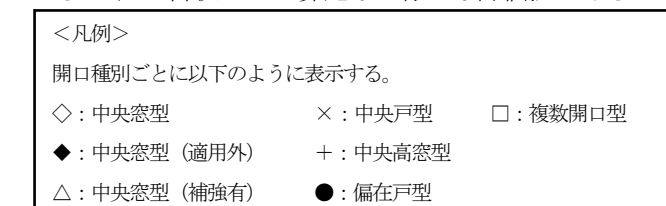


図1. せん断強度計算値とせん断強度実験値の比較結果(開口低減率×無開口時終局せん断強度)

・広沢 min 式 (記号は文献 1)参照

$$Q_{wsu} = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} \cdot (F_c + 18)}{M / (Q \cdot D) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{wh}} + 0.1 \sigma_o \right\} \cdot t_e \cdot j$$

$$(1 \leq M / (Q \cdot D) \leq 3) \quad \dots(2)$$

・終局強度式 (記号は文献 3)参照

$$Q_{su} = t \cdot l_{wb} \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot t \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B / 2$$

$$\dots(3)$$

・曲げ強度式(記号は文献 1)参照

$$M_u = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot L + 0.4 a_s \cdot \sigma_{sy} \cdot L + 0.5 N \cdot L \cdot \left( 1 - \frac{N}{B \cdot L \cdot \sigma_B} \right)$$

$$\dots(4)$$

なお、開口低減率は 2010 年 RC 改訂版に向けて再定義される予定であり、本論では現時点で提案されている最も近時のものを用いた。

計算強度値と実験強度値の関係を図 1 に示す。(a)より現在法規で指定されている広沢 min 式ならば、ある程度安全側の設計が可能で現状の法規による設計法の妥当性が検証された。

## 2.2 袖壁分離による方法

そこで新たな方法としてより実際の崩壊メカニズムに近い、開口壁を開口左右の 2 つの袖壁付柱に分離しそれぞれの袖壁付柱の強度和を、開口壁の強度とする方法を提案する。袖壁付柱の強度式として、せん断強度式は、

- ・構造規定による強度評価式 (構造規定式) <sup>1)</sup>
  - ・東京大学地震研究所による強度評価式 (地震研式) <sup>5)</sup>
  - ・新潟大学 孫浩陽による強度評価式 (孫式) <sup>6)</sup>
  - ・靱性保証型耐震設計指針 (靱性保証型式) <sup>7)</sup>
- 4 式でそれぞれ以下の(5)～(8)式で与えられる。

・構造規定式 (記号は文献 1)参照

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

$$0.5 \leq M / (Q \cdot l) \leq 2 \quad \dots(5)$$

・地震研式 (記号は文献 5)参照

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1 N \quad \dots(6)$$

$$Q_{suw} = \left\{ \frac{0.053 p_{twe}^{0.23} (\sigma_B + 18)}{M / (Q \cdot d_w) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_s \cdot \sigma_{sy}} \right\} \cdot t \cdot j_w$$

$$0.5 \leq M / (Q \cdot d_w) \leq 2$$

$$Q_{suc} = \left\{ \frac{0.053 p_{tce}^{0.23} (\sigma_B + 18)}{M / (Q \cdot d_{ce}) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{cwe} \cdot \sigma_{cwy}} \right\} \cdot b_{ce} \cdot j_c$$

$$1 \leq M / (Q \cdot d_{ce}) \leq 3$$

・孫式 (記号は文献 6)参照

$$Q_{su} = \min(Q_1, Q_2, Q_3) \quad \dots(7)$$

$$Q_1 = \mu \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy} \cdot b_e \cdot j_e + \left( v \cdot \sigma_B - \frac{5 p_{we} \cdot \sigma_{wy}}{\lambda_s} \right) \cdot \frac{b \cdot D}{2} \cdot \tan \theta$$

$$Q_2 = \frac{\lambda_s \cdot v \cdot \sigma_B + p_{we} \cdot \sigma_{wy}}{3} \cdot b_e \cdot j_e$$

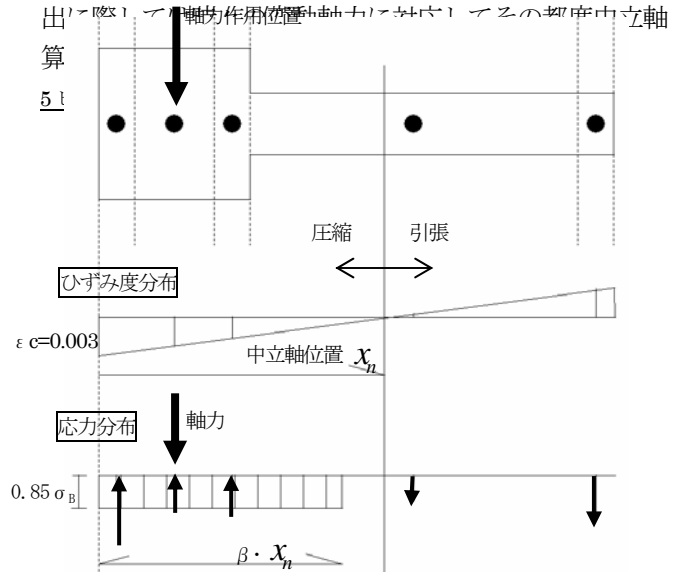
$$Q_3 = \frac{\lambda_s \cdot v \cdot \sigma_B}{2} \cdot b_e \cdot j_e$$

・靱性保証式 (記号は文献 7)参照

$$Q_{su} = t \cdot l_{wb} \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot t \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B / 2$$

$$\dots(8)$$

曲げ強度に関しては袖壁断面を 5 個のピースに分割し、それぞれのピースに集約鉄筋要素・コンクリート要素を設定し、平面保持理論に基づき材軸を柱中心にとり柱中心におけるモーメントを求めた。また、この袖壁分離法は開口壁をフレームとしてモデル化するので、水平力と変動軸力の収斂計算を行っている。よって、曲げ強度算



曲げ強度精算式についての主な仮定は以下である。

- ・軸力作用位置は柱中心とする。
- ・曲げ終局強度は圧縮縁のコンクリートひずみが 0.003 に達するときとする。
- ・曲げ終局モーメント時の断面内各点のひずみ度は、中立軸からの距離に比例する。
- ・鉄筋の応力度－ひずみ度関係は  $\sigma_y$  で降伏する完全弾塑性とする。
- ・コンクリートの圧縮力は等価長方形応力ブロックとし、 $0.85 \sigma_B$  と係数  $\beta^3$  を用いる。

$$\beta = 0.85 \quad (\sigma_B \leq 28\text{N/mm}^2)$$

$$\beta = 0.85 - 0.05(\sigma_B - 28)/7 \quad (28\text{N/mm}^2 < \sigma_B \leq 56\text{N/mm}^2)$$

$$\beta = 0.65 \quad (56\text{N/mm}^2 < \sigma_B)$$

開口左右の袖壁付柱の高さについては、垂壁・腰壁による剛域や危険断面といった要素を考慮し、図2のように $h_o$ 、 $h_w$ の2種類の袖壁付柱高さを仮定し検討を行った。

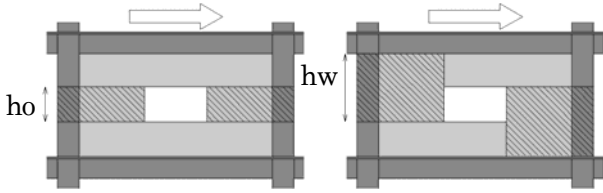


図2. 袖壁付柱高さの仮定 ( $h_o$ ,  $h_w$ )

また今回複数開口の試験体については袖壁分離法では検討対象外とした。

以上より、せん断強度式4種、柱長さ2種の合計8種の組み合わせの強度グラフを作成した。図3に結果を示し考察する。

まず袖壁付柱高さに着目すると、全体的に $h_o$ よりも $h_w$ の方がやや安全側の評価となっていると言える。また強度算出に関して、曲げ強度は袖壁付柱の高さの変化に影響を受けやすいが、せん断強度に関しては4式とも袖壁付柱高さの変化の影響がそれほど表れない。この事より、同じせん断強度式同士で左右の袖壁付柱高さだけを変化させたグラフで見比べた時、強度計算値の変化が大きいものは袖壁付柱の強度として曲げ強度値が採用されているもの、変化が小さいものはせん断強度が両袖壁付柱で採用されているものと観察することが出来る。

精度・安全性という点では、構造規定式のグラフでは $h_o$ 、 $h_w$ のどちらの袖壁付柱高さでも多くの試験体が危険側にプロットされている。理論式である孫式と靱性保証式では同程度の評価であり、地震研式を用いた場合が実験値と計算式の相関の精度が最も良かった。

次に偏在開口試験体に着目してみる。偏在開口について開口低減率を用いた方法は同じ面積・形状の開口では壁板状のどこに位置しても同じ評価となるが、袖壁分離法は開口位

置の実状にあった評価を可能であると予想される。開口低減率による方法と袖壁分離法の精度の差を考察するた

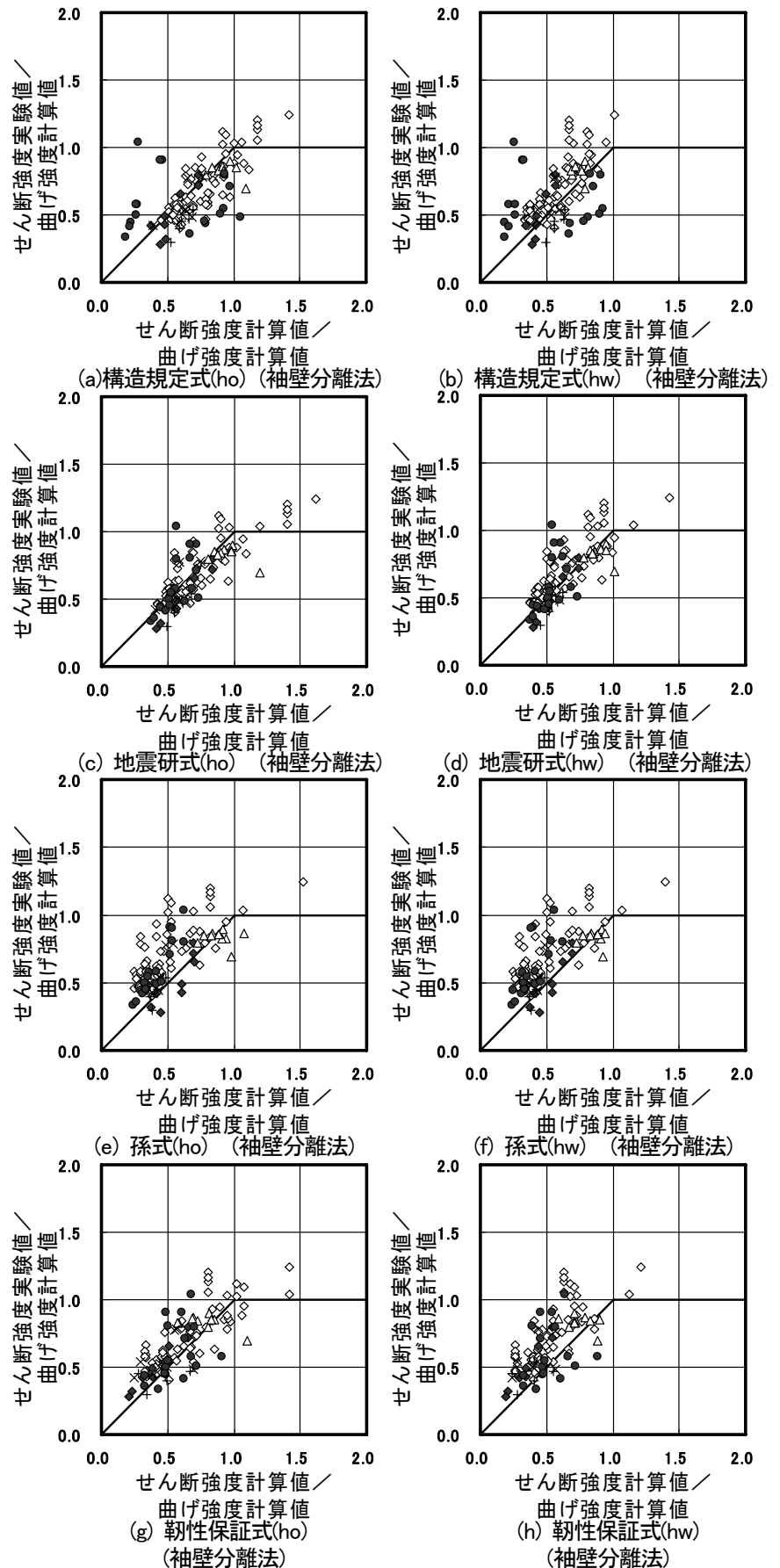


図3. せん断強度計算値とせん断強度実験値の比較結果(袖壁分離法)

め、図4に偏在度と強度精度の関係を示す。代表として、開口低減率による方法には広沢 min 式・終局強度式を、袖壁分離法には地震研式(ho)・孫式(ho)を挙げた。

グラフ横軸の偏在係数は開口の偏在度を表していて、偏在係数 1.0 で中央開口である。結果偏在開口壁の評価に関して開口低減率の方法ではバラツキが大きい。一方袖壁分離法では良い精度を示していて、孫式(ho)は特にバラツキが少ない。

### 3. 変形能について

#### 3.1 既往の評価法

変形能についてまず、既往の評価法である開口低減率を用いた強度算出法に依拠した方法を検討する。

構造規定による部材ランク、耐震診断による靱性指標、終局強度型設計指針による  $v_m/v_0$  という3種の評価法について行う。これらの評価法は曲げ破壊型となった部材についてのみその変形能を評価していて、せん断破壊型になる部材に関しては、その変形能を評価しない。(それぞれグラフ上の破線が曲げ破壊とせん断破壊の境界線である。)

部材ランクでは変形能を  $\tau u/Fc$  に応じてWA・WB・WCと分類している。靱性指標・ $v_m/v_0$  ではグラフ中の太線が評価値である。無開口壁のせん断強度として部材ランクでは広沢ave式を、靱性指標・ $v_m/v_0$  では終局強度式を使用している。図 5, 6, 7 が検討結果である。建築基準法による部材ランクの方法(広沢ave式)ではWAが2体あった。変形角実験値が低い方の試験体は  $1/75\text{rad}$  ( $13 \times 10^{-3}\text{rad}$ ) 前後で、それより変形角実験値が低い試験体は全てWDにプロットされている、すなわち現在の設計法によ

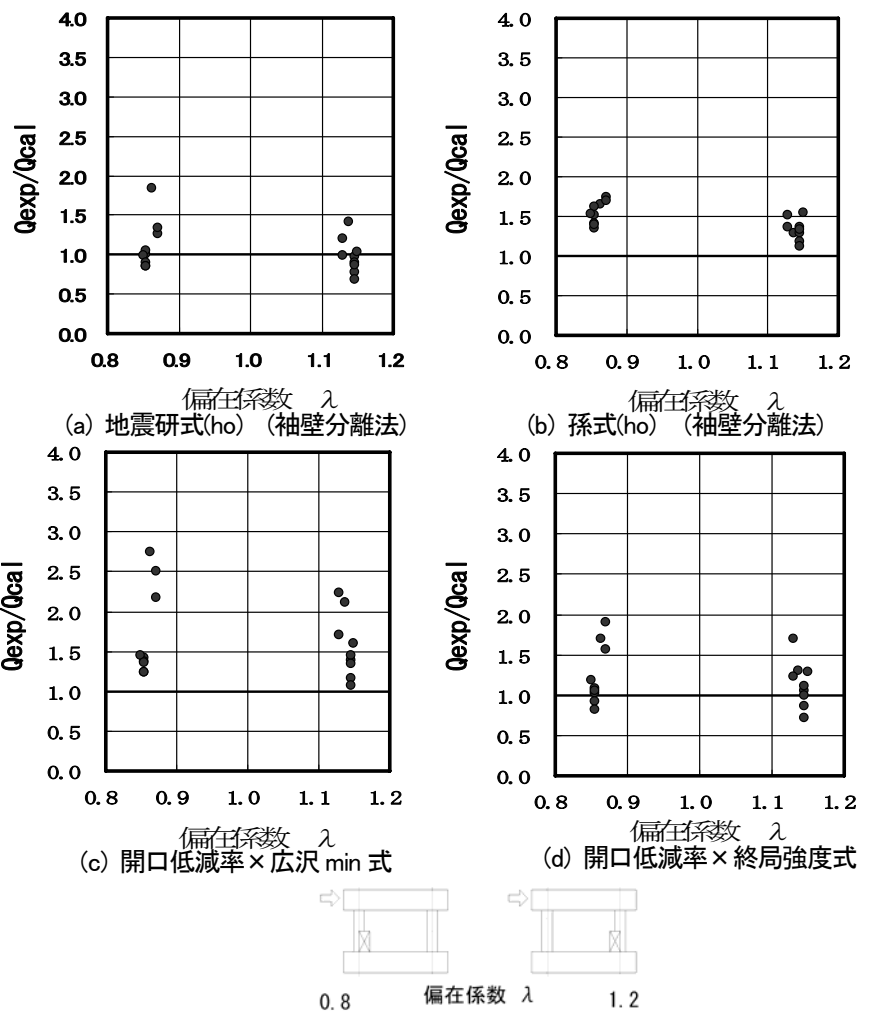


図4. 偏在係数と強度精度の関係

って評価すれば大体  $1/75\text{rad}$  以上の変形角が確保できるという事になる。これは概ね安全側の評価である。しかし評価試験体が2体と少なく、せん断破壊型とされた試験体の中にも変形能の良いデータが多数ある。靱性指標による評価

も  $v_m/v_0$  による評価も結果的に安全側の評価となっているが、精度は良くない。

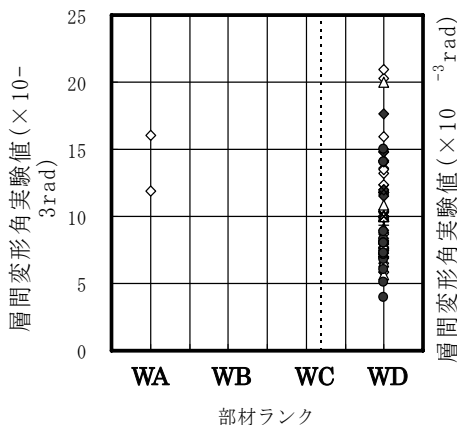


図5. 部材ランクと変形能 (開口低減率×広沢 ave 式)

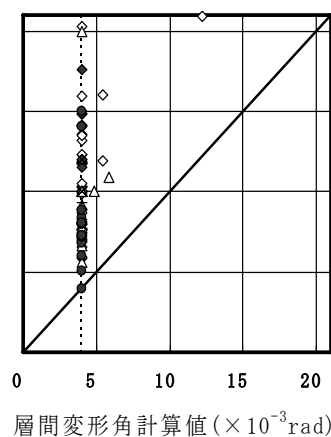


図6. 靱性指標と変形能 (開口低減率×終局強度式)

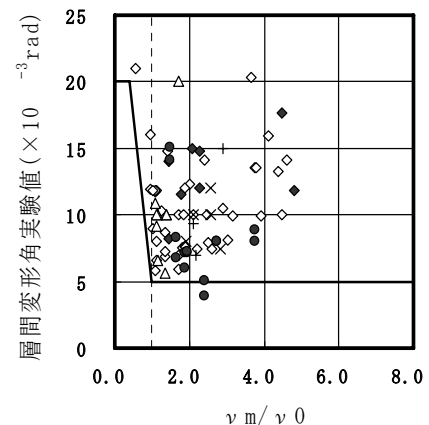


図7.  $v_m/v_0$  と変形能 (開口低減率×終局強度式)

### 3.2 新たな評価法

既往の評価法は基本的に、開口低減率を用いた無開口壁の方法をベースとした方法であるので、壁脚部の曲げ強度と壁自体のせん断強度を比較していることになる。すなわち壁を片持ち柱モデルと想定していて、脚部曲げ破壊とならなかった時点でせん断破壊・変形能無しと判断される。せん断破壊型で変形能の良かったデータは有開口壁のフレーム特性が表れたと考えられ、無開口壁をベースとした従来の方法では評価しきれなかったと考えられる。

そこで、これらのデータを評価する為に、 $v_m/v_o$  による変形能評価法に袖壁分離法を応用した新たな変形能評価法を提案する。

ここで  $v_m/v_o$  について説明する。 $v_m$  とは、せん断強度式中の  $v$  に代入する事でせん断強度値が対象の曲げ強度値と一致する値である。 $v_m/v_o$  が大きいほどせん断余裕が無いことになる。

提案法では壁部材を  $v_m/v_o$  を用いた方法で片持ち柱モデルとフレームモデルの両観点から評価する。

具体的にその方法を説明する。まず脚部曲げ強度に対し比較するせん断強度を袖壁強度和とし、既往の評価法と同様にここで曲げ破壊型となるものは変形能評価対象と分類する。次に脚部曲げ破壊とならなかったデータに関してフレームモデルとし再評価し、そこで2つの袖壁付柱についての個々の破壊形式に着目する。袖壁付柱が両側とも曲げ破壊する場合にはそれらの変形能も評価する。片側、もしくは両側供せん断破壊形式となった場合には変形能を評価しない。以上のように2段階の方法をとる。図8は既往の評価法と提案法のフローチャートを表す。

袖壁分離法で使用できるせん断強度式は  $v$  を使っている孫式、靱性保証式のみである。偏在開口試験体に関

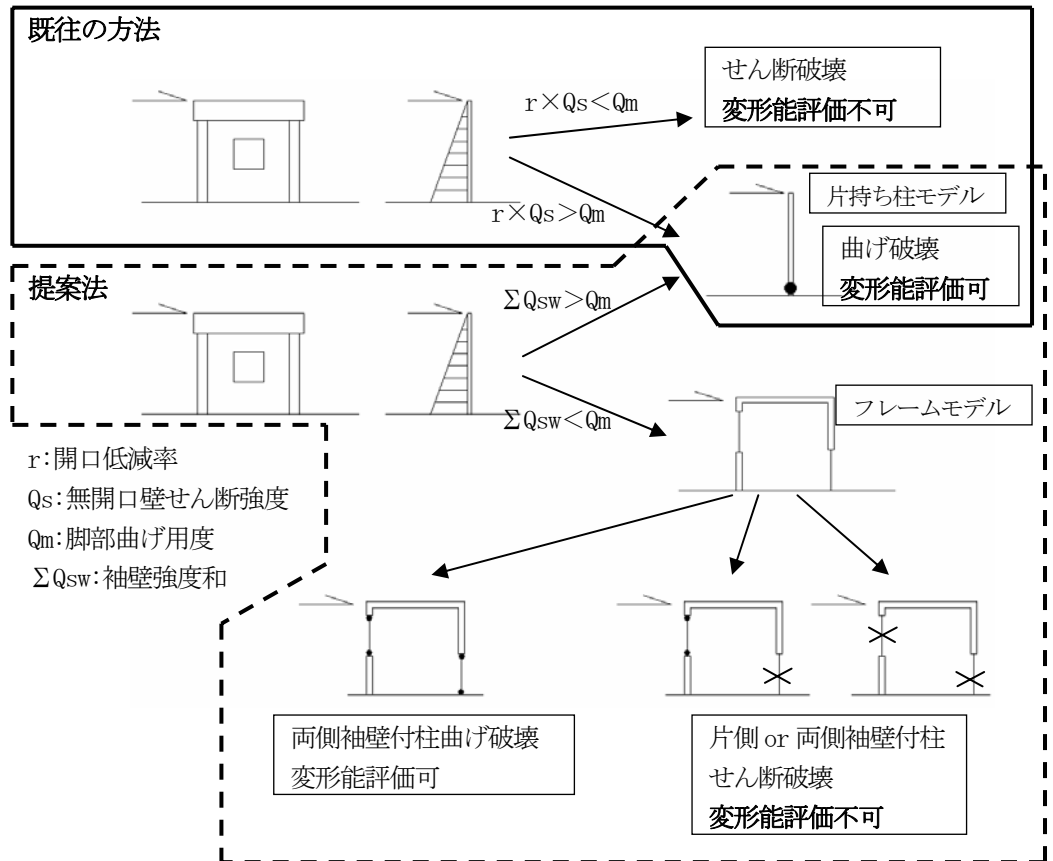


図8. 既往の評価法(実線内)と提案法(破線内)のフローチャート

しては、独立柱の圧壊などがありこの方法では適切に評価できないため対象から除外している。

開口低減率による方法の  $v_m$  と区別するため、脚部曲げ強度をせん断強度 (袖壁強度和) の一致目標とさせた  $v_m$  を  $wv_m$ 、袖壁曲げ強度をせん断強度の一致目標とさせた  $v_m$  を  $swv_m$  と表記する。 $swv_m$  は袖壁毎に2つ算出されるのでより不利な方として、大きな値の方を採用した。

図9が脚部曲げ強度と袖壁付柱強度和による片持ち柱モデルの結果グラフ、図10がフレームモデルによる結果グラフである。

図9においてy軸上にプロットされている点は  $wv_m$  算出不可能であった点で試験体総数の便宜上プロットしている。これは各袖壁付柱の曲げ強度の和が脚部曲げ強度より大きくなり、 $wv_m$  をどのように変化させてもせん断強度が袖壁付柱の強度として採用されず脚部曲げ強度に一致させることができなかった為である。

まず図9より、脚部曲げ破壊型のグラフでは靱性保証式 ( $h_o$ ,  $h_w$ ) で良い精度の評価ができています。フレームモデル評ではバラツキは大きくなったが、両袖壁付柱曲げ破壊型は、孫式 ( $h_w$ ) に2体見られ安全側の評価なされていた。しかしまだ両袖壁付柱が曲げ破壊しなかった場合

でも変形能の良いデータがあった。

#### 4. 結論

- ・ 既往の開口低減率による方法では、広沢 min 式を用いた場合ならばある程度安全側として評価できる。
- ・ 袖壁分離による提案法では、袖壁のせん断強度として地震研式を用いた場合実験値との相関の良かった。
- ・ 変形能に関して既往の評価法が安全側の評価であることが確認されたが、評価できる実験データが少なかった。
- ・ 新たな提案である袖壁分離法を用いたフレームモデルによる変形能2段階評価法では、既往の評価法でせん断破壊型とされた部材の中のデータの一部にも変形能を評価する事ができた。

#### 参考文献

- 1) 日本建築センター：建築物の構造関係技術基準解説書
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説
- 4) 綱島,湯澤,加藤：鉄筋コンクリート造有開口壁の強度と変形能の評価法の提案, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 2009
- 5) 壁谷澤寿成・壁谷澤寿海・他：せん断破壊型そで壁付き柱に関する実験的研究, JCI 30-2, 2008, pp. 115-120
- 6) 孫浩陽ほか：袖壁つき RC 造柱の最大耐力以降の挙動の評価法, 日本建築学会構造系論文集, 2003, 4, pp. 97-103
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説

<凡例> 袖壁付き柱の破壊形式毎に以下のように分類した  
 ○：両袖壁曲げ破壊  
 △：引張側袖壁のみ曲げ破壊  
 □：圧縮側袖壁のみ曲げ破壊  
 ×：両袖壁せん断破壊

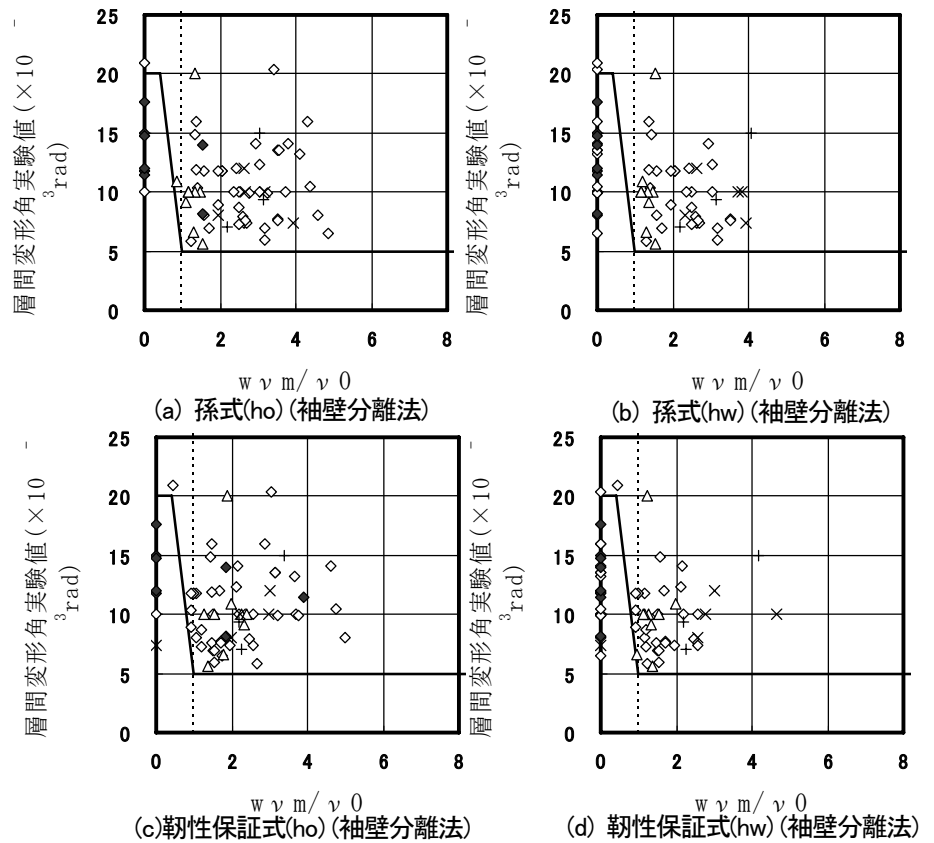


図9.  $wv m / v 0$  と変形能(片持ち柱モデル)

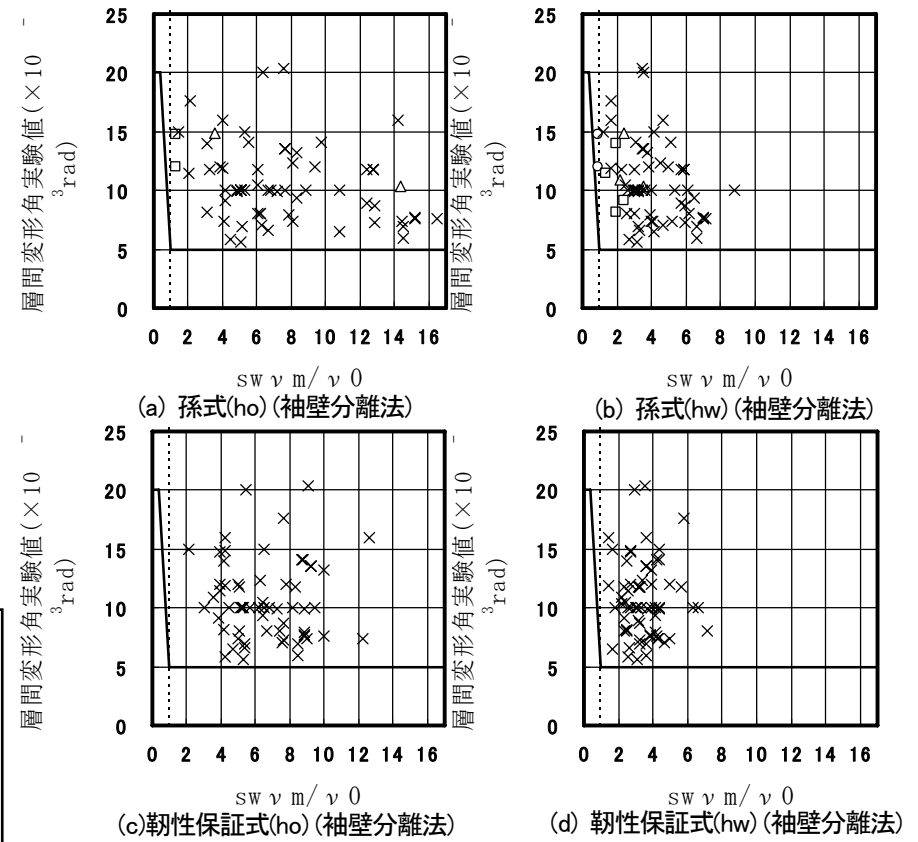


図10.  $sw v m / v 0$  と変形能(フレームモデル)

※片持ち柱モデルで脚部曲げ破壊となったデータは除外している