論文　鉄筋コンクリート造有開口壁の終局強度と変形能の評価法の検討

加藤　大介[*1]・綱島　朋直[*2]

要旨：本研究では、既往の実験データを広く集めて，鉄筋コンクリート造有開口壁の終局強度と変形能の評価法の妥当性に関する検討を行っている。具体的には，RC 規準による開口低減率を用いる方法を検討し，この場合は広沢平均式がある程度安全側の実用式になることを示している。次に，開口左右の袖壁つき柱の強度の和とする方法についても検討し，この場合は分割累加式を用いた場合に精度がよいことを示している。さらに，本論文では，基準法による変形能の評価法，すなわち部材種別の判定法の現状についても考察を行っている。

キーワード：RC 造，耐震壁，有開口壁，せん断強度，変形能

1.　序

2010 年に日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準[1)]が改定され（以降，新 RC 規準と呼びそれ以前のものを旧 RC 規準と呼ぶ），耐震壁に関する取り扱い，特に，有開口壁については開口低減率と開口補強筋が変更になった。また，現在は終局強度においてもより合理的な設計法を目指す活動[2)]が行われている。

筆者らは有開口壁の強度と変形能に関する研究を行ってきたが[3)]，本研究では有開口壁に関する既往の研究の実験データをより広く集め，その強度と変形能の実験値と，現在提案・検討されている各種評価式による計算値との比較検討を行う。具体的には，開口低減率を用いたせん断強度式と開口左右の袖壁つき柱に分離して強度を算出する方法について検討を行う。

2.　対象とした試験体の諸元

対象とした試験体は，文献 4)5)6)にリストアップされている試験体と文献 7)8)で示された RC 造有開口試験体 142 体である。**表-1** にそれらの試験体の特徴と試験体数を示す。なお，偏在開口を有する試験体は正負方向の載荷により挙動が異なることが予想されるので，実験データとしては正負で別な試験体として扱っており，プロット数は 156 となる。その主な実験パラメータの範囲は，コンクリート強度（18.5～42.5 N/mm^2），壁横筋比（0.24～1.4%），壁筋降伏強度（160～616N/mm^2），柱せん断補強筋比（0.09～1.42%），柱面積の全面積に対する比（0.43～0.79），壁厚さの柱厚さに対する比（0.2～0.57），開口を除く全断面での軸力比（0～0.19），せん断スパン比（M/(QD)）（0.48～1.73），である。

3.　せん断強度の評価式の検討

3.1　開口低減率を用いる方法

本節では，無開口壁せん断強度式として基準解説書[9)]に示されている広沢平均式と広沢下限式，および建築学会の終局強度型設計指針[10)]による式を用い，これら 3 式によるせん断強度に新 RC 規準による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法の妥当性を検討する。**図-1(a-1)～(a-3)** は単層耐震壁を対象にしたもの，**図-1(b-1)～(b-3)** は連層耐震壁を対象にした場合の各種せん断強度計算値と実験値の関係である。なお，斜めのせん断補強筋をもつものはそのせん断強度への寄与分は全て考慮している。また，図に示されている凡例は以降の図も個別に凡例が示されていない場合は同じである。

新旧 RC 規準による開口低減は単数開口の場合はほぼ同程度となるため，精度も同程度となるが，これらの図をみると，複数開口のものも同程度の精度となっている。特に，広沢平均式（**図-1(a-2)**）では安全側の実用的な式になっていることがわかる。

3.2　斜め筋の効果について

日本建築学会の X 形配筋部材設計施工指針[11)]では，「壁部材の斜め筋は適切に配筋すれば損傷やせん断破壊の防止に有効であるが，実験データが少ないため余力として配筋するのが望ましい」としている。そこで，**図-1(a)(b)** では前述したように斜めのせん断補強筋の寄与を全て考慮して検討しているが，斜め筋の効果について詳細に検討するため，斜め筋をもつ試験体のみを抽出して**図-1(c-1)～(c-3)** に示した。これらの斜め筋は基礎には定着されておらず，従って，せん断強度のみに寄与する配筋となっているが，斜め筋を全部無視すると（**図-1(c-1)**）完全に安全側であるが，全部考慮（引張側と圧縮側のすべての鉄筋）すると危険側の試験体が増加する。半分程度（結果的に引張側のみ）考慮すると広沢平均式（**図-1(a-2)**）程度の安全率になる。

*1 新潟大学　工学部建設学科教授　工博　(正会員)
*2 SU 設計

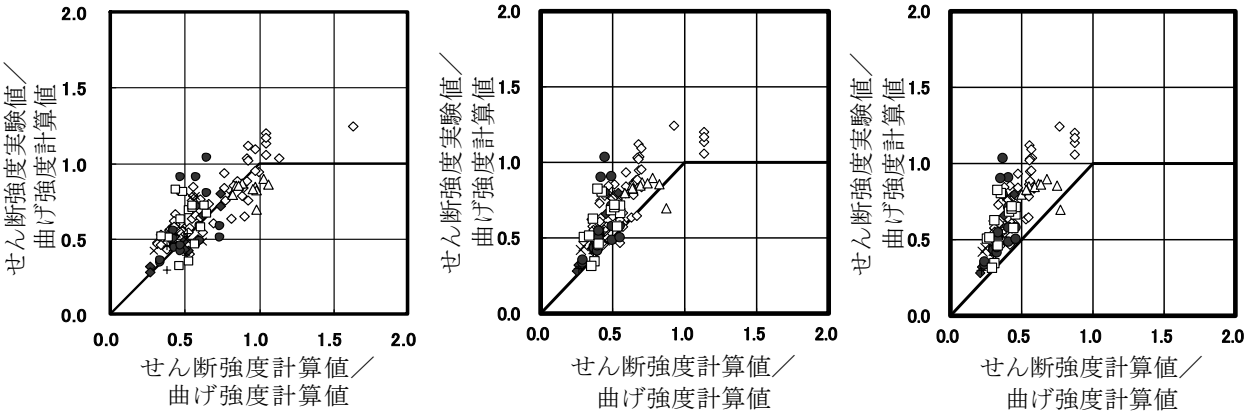
3.3　開口左右の袖壁つき柱の強度の和とする方法

文献3)では，有開口壁のせん断設計法として全体曲げ強度時の保証設計用のせん断力が開口左右の袖壁付き柱の強度の和を上回らないことを確認する方法が示されている。ここではこの方法を基本にして，有開口壁のせん断強度を開口左右の袖壁付き柱の終局強度の和より算出する方法の妥当性を検討する。すなわち，開口左右の袖壁付き柱の終局強度の和は，曲げ強度とせん

表-1　試験体数とその特徴

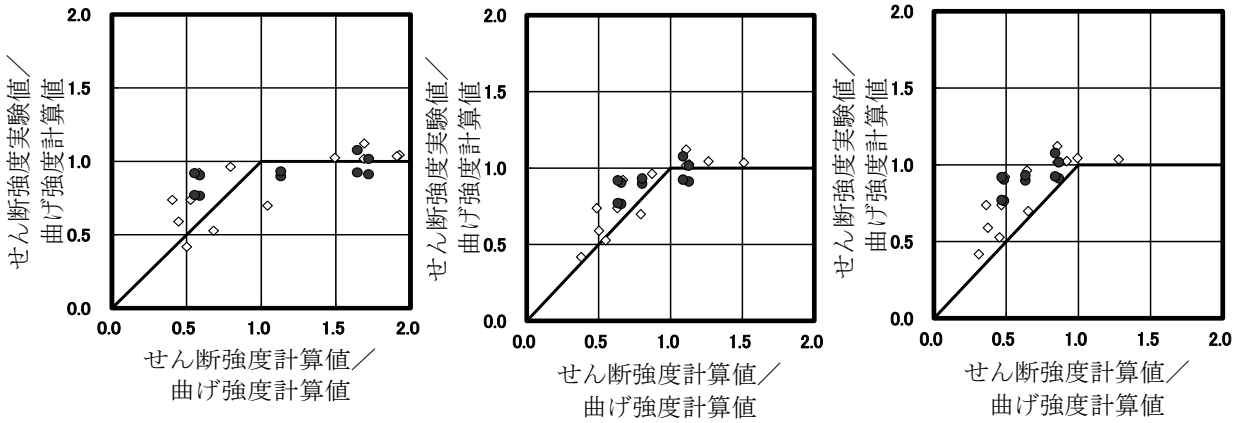
	全試験体	中央開口		戸型開口		複数開口	プロット数
		斜筋無	斜筋有	中央	偏在		
単層	124	78	10	13	9	14	133
連層	18	10	2	1	5	0	23

凡例：開口種別ごとに以下のように表示する。
(単層)◇：中央窓型　×：中央戸型　◆：中央窓型（適用外）＋：中央高窓型　△：中央窓型（補強有）●：偏在戸型　□：複数開口型
(連層)　◇：中央窓型　●：偏在



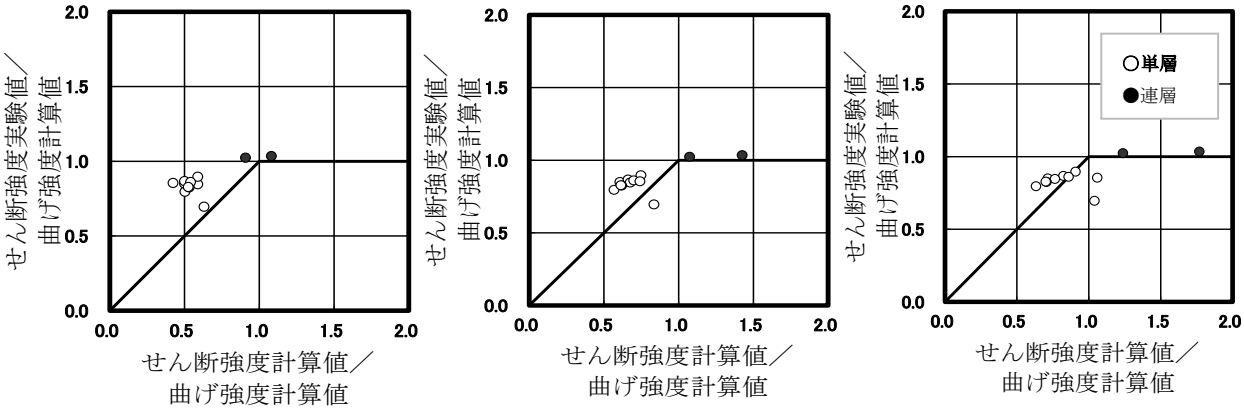
(a-1)開口低減率×終局強度指針式　(a-2) 開口低減率×広沢平均式　(a-3) 開口低減率×広沢下限式

(a)複数開口を含む全単層耐震壁を対象にした各種せん断強度式の検討(開口低減率×無開口時終局せん断強度)



(b-1)開口低減率×終局強度指針式　(b-2) 開口低減率×広沢平均式　(b-3) 開口低減率×広沢下限式

(b)連層耐震壁を対象にした各種せん断強度式の検討(開口低減率×無開口時終局せん断強度)



(c-1)全部無効　(c-2)半分有効　(c-3)全部有効

(c)斜め筋の効果の検討（開口低減率×広沢平均式）

図-1　開口低減率を用いた場合のせん断強度計算値と最大強度実験値の比較

断強度の小さい方としている。このとき，曲げ強度は簡略化（縦方向の鉄筋を柱 2 列，壁筋 1 列，開口端部補強筋 1 列に置換，コンクリートはストレスブロックに置換し，その最大応力度の低減係数 β は終局強度指針 [10] に従った）した平面保持解析による全塑性モーメントを用いている。軸力は左右の袖壁で変動することを考慮しているが，その軸力は柱芯位置に作用するとしている。その危険断面は開口の高さ位置とし（**図-2** の ho），上下の全塑性曲げモーメントの和を開口高さで除すことにより曲げ強度時のせん断力としている。

一方，せん断強度式は以下の 4 つを検討した。

・構造規定式：文献 9)で示されているせん断強度式。

・靭性保証原式（無開口壁用）：靭性保証型耐震設計法 [12]の無開口耐震壁用のせん断強度式を直接用いるもので，文献 12)の中にその計算例が示されている方法。

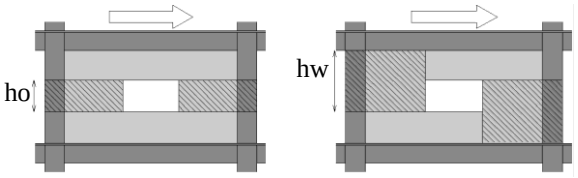
・修正靭性保証式（異形断面用）：文献 13)で提案した異形断面用の方法で，トラス機構は柱断面のみ，アーチ機構は袖壁を考慮した全断面長さとした上で，靭性保証型耐震設計法 [12]のせん断強度式を用いるもの。

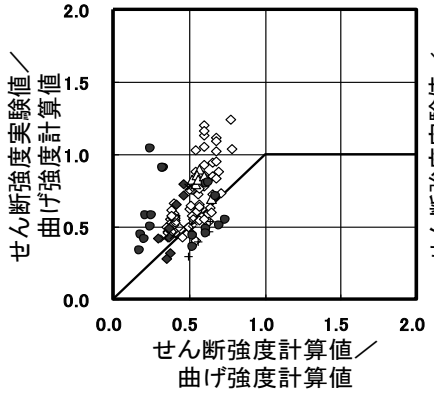
・分割累加式：壁谷澤らによる方法で，断面を２つに分解して荒川式系のせん断強度式を用いて，その累加をせん断強度とするもので，文献 14)の式を用いた。

このように開口左右の袖壁付き柱の強度を評価する場合の問題点は，左右の部材の柱内法長さと左右の袖壁つき柱に作用する変動軸力の評価法であるが，文献3)では，前述したように曲げ強度算出用の柱内法長さを**図-2** の h0 としているが，せん断強度算出用の柱内法長さは**図-2** の hw としている。この hw は腰壁と垂壁のうち袖壁による水平力の反力が圧縮側になる場合のみを有効とした高さであるが，実際の有効高さは ho と hw の間にあると考えられる。

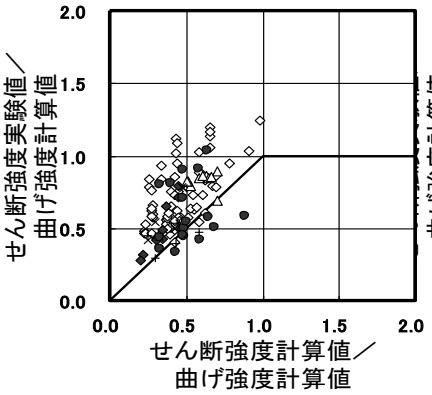
次に，変動軸力は柱と梁の芯位置でのフレームモデルに置換して，左右の袖壁の強度時の変動軸力が収斂するまで繰り返し計算を行っている。

図-2(a)(b)(c)(d-1)は左右の袖壁付き柱のせん断強度式として，構造規定式，靭性保証原式（無開口壁用），修正靭性保証式（異形断面用）および分割累加式を用い

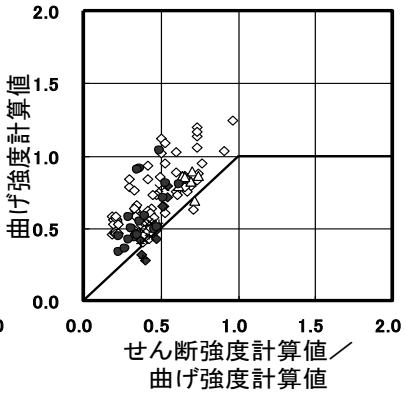




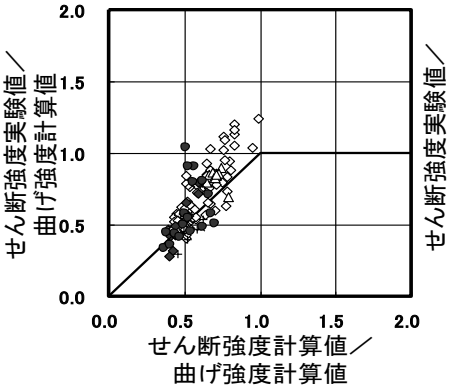
(a)袖壁つき柱のせん断強度式に構造規定式を用いた場合（内法長さは hw）



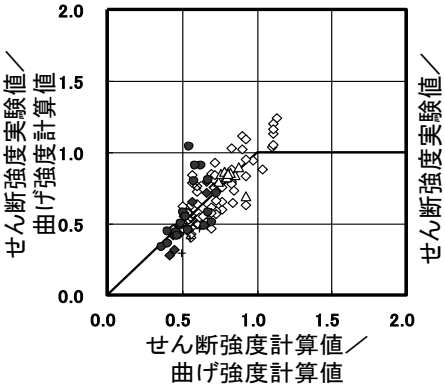
(b)袖壁つき柱のせん断強度式に靭性保証原式（無開口壁用）を用いた場合（内法長さは hw）



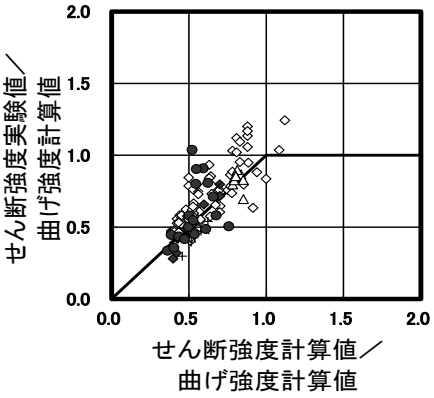
(c)袖壁つき柱のせん断強度式に修正靭性保証式（異形断面用）を用いた場合（内法長さは hw）



(d-1) 内法長さを hw とした場合



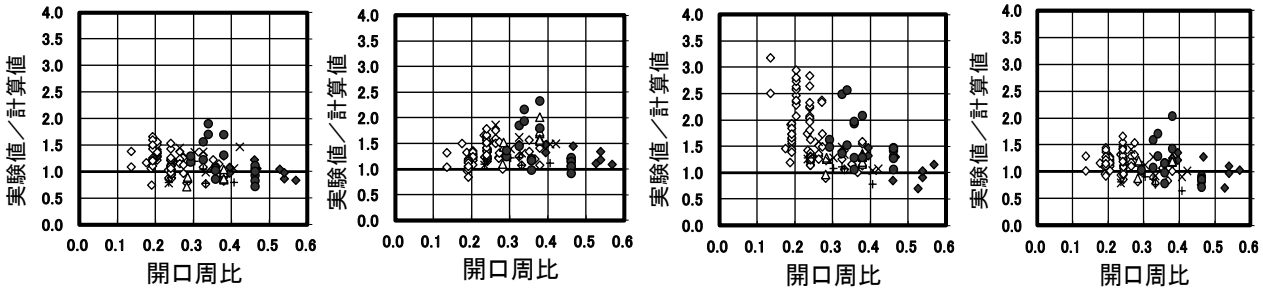
(d-2)内法長さを ho とした場合



(d-3)内法長さを hw とし変動軸力を無視

(d)袖壁つき柱のせん断強度式に分割累加式を用いた場合

図-2　左右の袖壁の強度の和としたせん断強度計算値と最大強度実験値の比較（複数開口試験体をを除く単層試験体）



(a) 開口低減率×
終局強度指針式

(b)開口低減率×
広沢平均式

(c) 靭性保証式
（内法長さ hw）

(d) 分割累加式
（内法長さ hw）

図-3　等価開口周比と各種強度式の精度の関係（複数開口試験体を除く単層試験体のみ）

た場合であるが，いずれもせん断強度を算出する袖壁つき柱の高さを hw としたものである。図をみるといずれもほぼ安全側に評価しているが，分割累加式（図-2(d-1)）が最も精度がよかった。そこで，分割累加式を用いた場合で，せん断強度の内法長さを ho としたものと変動軸力を無視したものを図-2(d-2)(d-3)に示す。内法長さを ho としたもの（図-2(d-2)）では危険側の試験体が多くなること，付加軸力の影響は少なかったこと（図-2(d-1)と(d-3)の比較），がわかる。

ところで，この方法による場合，左右の袖壁付き柱の破壊形式を評価することになるが，引張側の変動軸力を受ける側は曲げ降伏になる場合とせん断破壊になる場合があったが，圧縮側の変動軸力を受ける側では曲げ降伏になったものはなかった。このことから，現実的には，縦長の開口以外では新 RC 規準による開口補強筋の必要量を満たしておけば終局時に不足するようなことは多くはないと考えられる。

3.4　開口周比と開口の偏在に対する影響

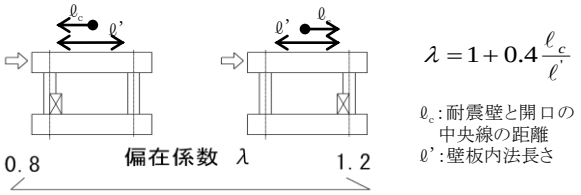
図-3(a)～(d)は開口周比の適用範囲を検討したもので，縦軸に評価式の精度（計算値に対する実験値の比）を横軸に開口周比（新 RC 規準による開口の面積比）をとって示したものである。図(a)と図(b)が開口低減率を用いた場合，図(c)と図(d)が袖壁つき柱の強度の和とした方法であるが，終局強度指針式と分割累加式によるものが広い開口周比の範囲で精度がよい。

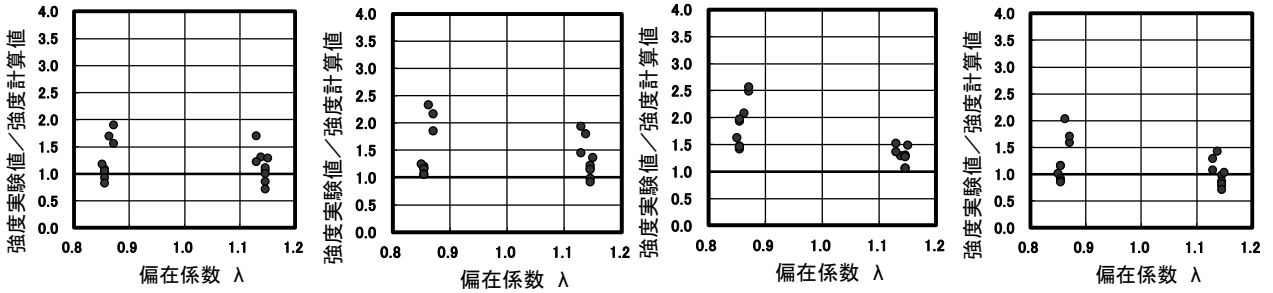
同じく図-4(a)～(d)は偏在開口への適用性をみたもので，縦軸に評価式の精度（計算値に対する実験値の比）を横軸に偏在係数λ（図中の説明参照）をとって示したものである。図(a)と図(b)が開口低減率を用いた場合，図(c)と図(d)が袖壁つき柱の強度の和とした方法であるが，終局強度指針式と分割累加式によるものが広い偏在率の範囲で精度がよいことがわかる。

4.　変形能の評価法に対する考察

4.1　現状のせん断余裕度により判断する方法の検討

現状の設計で用いられている耐震壁の既往の変形能評価法として，建築基準法の部材種別[9]による方法がある。この変形能評価法は，広沢平均式によるせん断強度と壁脚部曲げ強度を比較し，1.25 倍以上のせん断余裕度がある曲げ破壊の部材について，平均せん断応力度 τ_u（建物のメカニズム時のせん断力を[耐力壁の厚さ×開口を除いた柱芯間距離]で除した値）の大小により部材種別 WA（$\tau_u \leqq 0.2F_C$），WB（$\tau_u \leqq 0.25F_C$），WC（それ以外）を評価している。ここで，部材種別とは極めて変形能の良いものを WA,普通に良いものを WB,一般的な





(a) 開口低減率×
終局強度指針式

(b)開口低減率×
広沢平均式

(c) 靭性保証式
（内法長さ hw）

(d) 分割累加式
（内法長さ hw）

図-4　偏在係数λと各種強度式の精度の関係（偏在開口を有する単層試験体のみ）

ものを WC,脆性的なものを WD とし，建物に占めるそれらの比率により必要な強度を定めるための分類である。

図-5(a)(b)は変形能（Rexp）とせん断余裕度（Qs/Qm, Qs は開口低減率×広沢平均式）の関係である。ここで，変形能であるが，最大耐力の 80%に低下した変形としたが，文献によっては変形能のデータが掲載されていないものがあり，また，加力も十分に行われていないものもある。そこで，本論文ではそれらのデータは除外し，結果的に単層試験体で 83 プロット，連層試験体で 23 プロットを示している。また，斜め筋は 3.2 節の検討を参考に半分の面積のみ考慮している。また，参考のために耐震診断基準[15]の変形能の評価式も併せて示している。

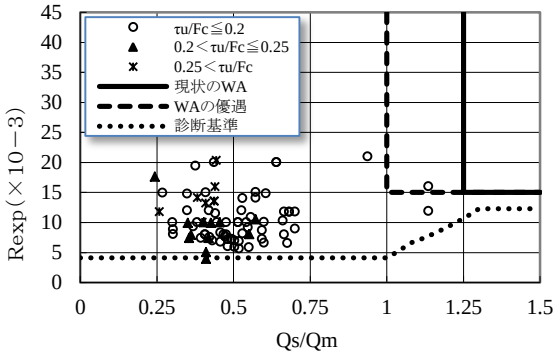
ところで，文献 2)では既往の実験データの分析により，WA と判定される無開口耐震壁は変形能で 0.015rad 程度以上はある，という示唆をしている。そこで，図中に実線でこの範囲を示した。実線の右上の領域で $\tau_u \leqq 0.2F_C$ のものが WA と判定される。従って本例では単層では WA と判定されるものはなく，連層で 2 体が WA と判定されている。

以上が現状であるが，本研究では特に連層耐震壁において WA とは判定されていないが十分に変形能が大きいものがあるところに着目した。すなわち，せん断余裕率を n_R(=1/1.25=0.8)倍低下させた場合の WA と同格となる条件を柱帯筋比に着目して検討した。柱帯筋比に着目した理由は，曲げ降伏後の変形能に大きく影響する因子にも関わらず，現状の部材ランクを決定する曲げ強度とせん断強度式では考慮されていないからである。図-5 でせん断余裕率を 0.8 倍まで下げた線を破線で示した（図中で WA の優遇と表記）。連層試験体ではこれにより WA と優遇された試験体が 7 体あり，これらは柱帯筋比が 0.85%と 1.4%の試験体であった。一方，単層では対象となる試験体が 2 体（柱帯筋比が 0.25%）あったが，このうち 1 体がこの線を下回った。すなわち，検証試験体は少ないが，これらの図より柱帯筋が 0.25%以下では不可だが，0.85%以上なら優遇できる可能性がある。

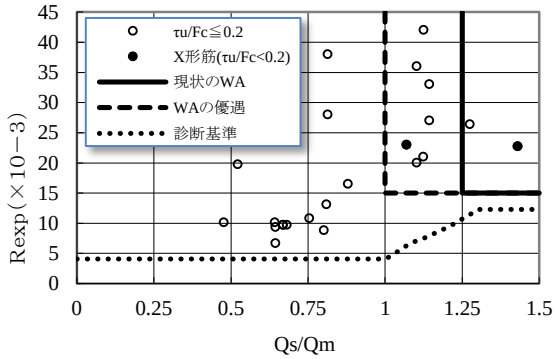
次に，軸力の影響をみておく。図-6 は既往の試験体で 80%低下時の変形能が示されている全試験体の終局時の圧縮側柱の軸力比 η（全軸力と引張側主筋と壁縦筋の降伏時軸力の和を圧縮側柱断面積で除した値のコンクリート強度比）分布であるが，これらの試験体の軸力比は高くはなく，全て 2/3 以下であった。

4.2 開口形状と位置（戸型開口と偏在開口）の影響

次に，有開口壁は，同じ開口低減率であっても，開口の大きさや位置によりその変形能は大きく異なるので，その影響を検討した。図-7 は連層壁を対象にした図-5(b)の横軸 Qs/Qm が 1 以上の試験体群の変形能実験値を連層壁 1 層部分の層間変形角（全変形)と曲げ変形で比較したものである（試験体は文献 7）と 8)のもの）。ここで，曲げ変形は 2 層床部分の梁の回転角としているが，試験体によっては大きく低減することがわかる。すなわち，これらの場合，1 層の部材の変形としてみた場合の変形能は優れているが，連層耐震壁に要求され

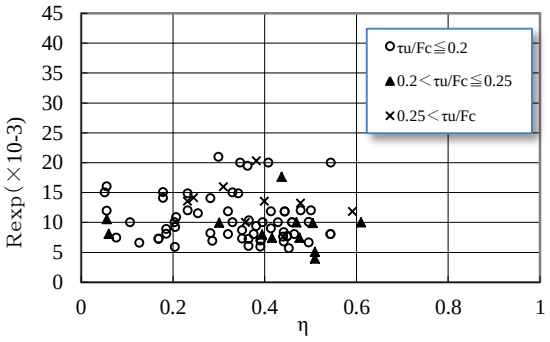


(a)単層有開口壁(83 プロット，複数開口は含まない)

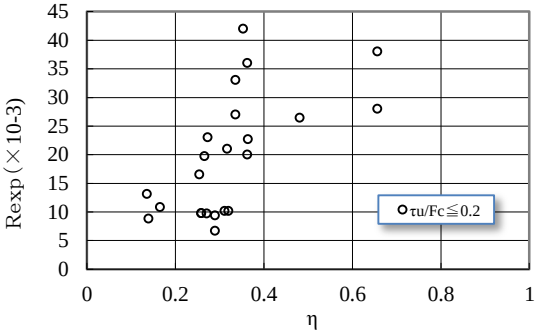


(b)連層有開口壁(23 プロット)

図-5　変形能とせん断余裕度（広沢平均式）の関係



(a)単層有開口壁(83 プロット，複数開口は含まない)



(b)連層有開口壁(23 プロット)

図-6　変形能と側柱軸力比の関係（全試験体）

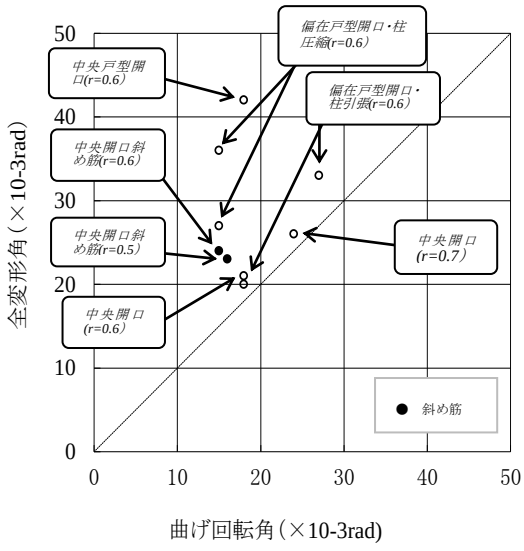


図-7　WA候補の有開口壁試験体の１層部分の層間変形角（全変形角）と曲げ変形角（2 層床梁回転角）の関係（図-5(b)の横軸 1 以上の 9 プロット）

ている全体曲げ変形能という視点でみると変形能が低減していることがわかる。特に，中央戸型開口と偏在戸型開口で柱が圧縮側になる場合にその低減が大きい。いずれも WA の目安である 0.015rad ぎりぎりである。

4.3　斜め筋の効果

3.2 節ではせん断強度に対する斜め筋の効果を検討したが，ここでは，部材種別に対する効果を検討する。X 形配筋部材設計施工指針 [11]では，梁と柱については部材種別の提案がされている。例えば，梁については τ_u/F_C の適用に当たり斜め筋の負担せん断力を減じてよいとしている（$_p\tau_u/F_C$）。これを耐震壁に適用することはできないが，せん断強度に斜め筋の半分の効果を算入した場合の 2 体（図-5(b)の●）をみると，1 体は現状の部材種別でも WA となり，もう 1 体は部材種別の優遇を受けて WA となりうる。ただし，図-7 で示した通り，斜め筋を有する場合，1 層の部材の変形としてみた場合の変形能は優れているが，連層耐震壁に要求されている全体曲げ変形能という視点でみると変形能が若干低減していることがわかる。しかしながら，戸型開口や偏在開口ほどではないので，強度と同様に半分程度は考慮してよいと判断できる。

5. まとめ

(1)既往の開口低減率による方法では，広沢平均式を用いた場合はある程度安全側の実用的な評価式である。また，斜め筋は全断面積の半分が有効と考えてよい。

(2)開口左右の袖壁つき柱の強度の和とする方法では，袖壁つき柱のせん断強度として分割累加式を用いた場合に実験値との相関が良く，開口周比・開口の偏在の観点からも精度もよく，バラツキも少なかった。

(3)現在の設計では WA とならないが，およそ 0.015rad 以上の層間変形角実験値を有する WA 相当の変形能を持つ部材を選択する指標として，例えば，①柱型の帯筋比が 0.85%以上，②開口が戸型や偏在ではないこと，を条件としてせん断余裕率を 0.8 倍低下させることができる可能性があることを示した。

参考文献

1)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010

2)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の保有水平耐力計算と地震被害，2011 年度日本建築学会大会（関東）構造部門（RC 構造）PD 資料，2011,8

3)加藤大介、壁谷沢寿海、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造有開口壁の耐震設計法、コンクリート工学論文集、Vol.2、No.2、1991 年、pp.143-152

4) 日本建築学会・靭性設計小委員会：靭性設計小委員会報告書（終局強度型耐震設計法に関連する最新の研究成果），1992．8

5) 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

6)綱島朋直、加藤大介：鉄筋コンクリート造有開口壁の終局強度と開口補強について、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 53 号、2010 年、pp.227-230

7)加藤大介、杉下陽一、小倉宏一、大谷裕美：鉄筋コンクリート造連層有開口耐震壁の変形能の評価方法、日本建築学会構造系論文集、第 530 号、2000 年 4 月、pp.107-113

8)小倉宏一、加藤大介、中村友紀子、土井希祐：鉄筋コンクリート造連層有開口耐震壁の静加力実験、構造工学論文集 Vol.46B、2000 年 3 月、pp.539-546

9)日本建築センター：建築物の構造関係技術基準解説書,2007

10)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,1990

11)日本建築学会：鉄筋コンクリート X 形配筋部材設計施工指針・同解説，2010

12)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説,1999

13)加藤大介、孫浩陽：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、第 566 号、2003 年 4 月、pp.97-103

14)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，コンクリート工学年次論文集,Vol30，No.3,pp.115-120,2008

15)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・同解節,2001