

[2066] 偏在開口を有する耐震壁の弾塑性性状に関する実験的研究

正会員 徳広 育夫 (鹿児島大学工学部)

正会員 ○小野 正行 (近畿大学九州工学部)

1. まえがき

鉄筋コンクリート造構造物における耐震壁は、水平剛性と耐力が大きく、そのために水平力を負担させる重要な構造要素となつているが、その水平剛性と耐力の評価いかんによっては有壁ラーメン構造の安全性に大きな影響を及ぼすものである。現行の建築基準法施行令では、有壁ラーメン構造の安全性を確保するには、耐震壁の変形能力とその保有耐力を適切に評価することが構造設計上極めて重要な課題となっている。無開口耐震壁に関しては、既に数多くの研究がなされており、耐震要素として有効な耐震壁を設計する基本思想が明らかにされている [1]。また、その耐力を算定する種々の算定式が提案され、実際の設計に利用されている提案式もある。しかしながら、開口を有する耐震壁の弾塑性性状は無開口耐震壁ほど明らかにされていない。

従って、本研究は、壁筋比と付帯ラーメン（周辺架構）の拘束が同じ無開口耐震壁と偏在開口を有する耐震壁の試験体により繰り返し水平加力実験を行い

- 1) 開口の偏在がひび割れ性状、変形性状に及ぼす影響
- 2) RC規準 [1] の開口による耐力低減率は、開口の大きさが一定であれば、開口形状および位置に無関係にそのせん断耐力が算定されるので、開口形状および位置によってせん断耐力が相違する著者提案の圧力場を形成する面積を考慮した耐力低減率の提案 [2] [3] と実験値との対応

について検討を行ったものである。

2. 実験計画

2.1 試験体および材料の機械的性質

本実験に用いた試験体の形状・寸法および配筋を図-1に示し、試験体の形状・寸法と配筋および使用した材料の機械的性質を表-1に示す。試験体名には、FWt-ξ-A-Bの記号を付けて示している（記号の説明は表-1の注記を参照）。試験体は壁厚5cmの無開口耐震壁1体、等価開口周比が0.367の偏在開口を有する耐震壁1体の計2体の実物大の約1/3の試験体であり、RC規準18条の付帯ラーメンの断面形状に関する推奨条件を満足しているものである。

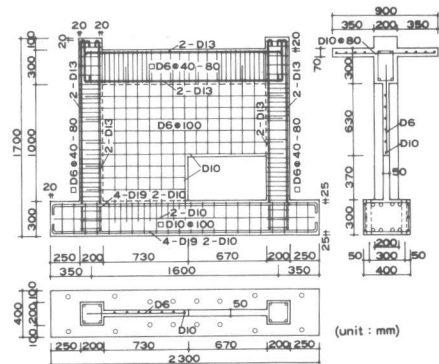


図-1 試験体FW5-0.367-S-MBの形状および配筋 (単位: mm)

せん断補強筋のあばら筋 (D6@40~80)、帯筋 (D6@80) および壁筋 (D6@100)は両試験体とも同じであるが、試験体FW5-0.367-S-MBの開口部の柱 (図-1) の帯筋のみD6@40とした。壁板開口部周辺の補強筋としてD10を用いた。使用鉄筋 (D6, D10, D13) はSD30相当の鉄筋である。試験体製作は、はり・柱には鉄製型枠を、壁板には木製型枠を使用し、基礎部分のコンクリート打設後2時間程において耐震壁部のコンクリートを打ち継いだ。試験体は一ヶ月間湿潤状態の布で覆い、その後実験当日まで室内養生を行った。試験体打設毎にシリンダーを採取し、試験体と同一条件で養生を行ったシリンダーの圧縮および引張（割裂）強度を表-1に示す。

表-1 試験体の形状・寸法と配筋および材料の機械的性質

試験体名	はり・柱				壁				コンクリート、鉄筋の機械的性質				
	はり断面 (cm×cm)	柱断面 (cm×cm)	主筋	帯筋	Pw (%)	厚さ (cm)	壁筋	Ps (%)	開口寸法 h _o ×l _o (cm×cm)	Fc (kg/cm ²)	Ft (kg/cm ²)	σ _y (kg/cm ²)	σ _u (kg/cm ²)
FWt-ξ-A-B													
FW5-0.00	20×30	20×20	4-D13	D6-@40~80	0.4~0.8	5	D6-@100	0.64	37×67	321	28.6	D6 3870	D6 5380
FW5-0.367-S-MB	20×30	20×20	4-D13	D6-@40~80	0.4~0.8	5	D6-@100	0.64		336	31.8	D10 3850	D10 5540
												D13 3440	D13 5250

注) 柱の帯筋はFW5-0.367-S-MB試験体の開口部の柱のみD6-@40
 F:付帯ラーメン W:壁板 t:壁厚 ε=開口周比(√(h_o×l_o/h×l))
 A:同じ開口周比のとき、開口が縦長か横長の形状の区別(Sは縦長開口) B:開口の偏在とその位置(MBは下部偏在)
 Pw:帯筋比 Ps:壁筋比 Fc:コンクリート圧縮強度 Ft:コンクリート引張強度 σ_y:鉄筋の降伏点強度 σ_u:鉄筋の引張強度

また、表-2にコンクリート(レデーミクストコンクリート)の調合を示す。

表-2 コンクリートの調合表

粗骨材最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材率 (%)	混和剤 (cc/m ³)
15	21	4.0	63	212	337	939	814	55.0	674

2.2 加力方法および測定方法

加力装置、変位測定装置を図-2、図-3に示す。試験体は基礎部分を反力フレームにボルト締めし基礎の両端部に三角形のリブ付き形鋼をセットすることにより固定した。試験体の両柱頭部にオイルジャッキとロードセルを取り付け、PC鋼棒により一定鉛直荷重{柱一本につき20ton = (0.149 ~ 0.156)・BDF_c、B:柱幅、D:柱せい、F_c:コンクリートの圧縮強度}を加えた後、スラブ上面にボルト締めによりセットした水平力導入フレームの両端を左右のオイルジャッキにより繰り返し水平力を加えた。水平力の加力方法は変位制御で一変位振幅一サイクルの正負交番漸増繰り返し加力である。荷重はオイルジャッキ先端に取り付けられたロードセルで検出した。付帯ラーメンの変位は基礎ばりにボルトで固定された変位測定用フレームに取り付けられている高感度型変位計を用いて検出した。ひび割れは、目視によるスケッチと写真撮影によった。

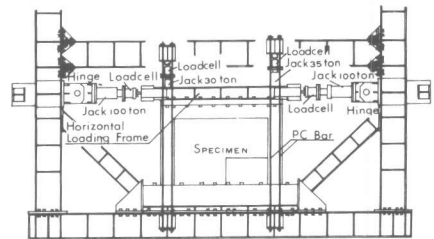


図-2 加力装置

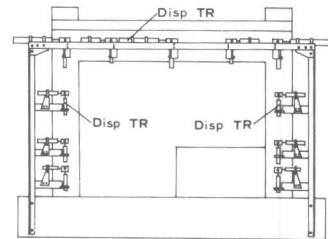


図-3 変位測定装置

3. 変形性状に関する検討

3.1 ひび割れ性状および変形性状

本実験における両試験体の荷重-変形曲線および実験終了後の写真を図-4(a)~(b)に示す。荷重-変形曲線の縦軸は、水平荷重Pを実験最大荷重の絶対値|P_{max}|で割った値であり、横軸ははり材軸線上のはり中央での水平変位δ(はり材軸線上の両柱頭の水平変位のほぼ平均値を示す)を柱脚よりはり材軸線までの高さh(115cm)で割った層間変形角R(=δ/h)である。同図から得られる水平荷重-変形曲線の包絡線を図-5に示す。

以下に両試験体の破壊に至るまでの特徴を示す。

[FW5-0.00] 初ひび割れは、層間変形角R_{cr}=0.26×10⁻³rad付近で壁板に入り、その時のτ_{cr}/F_c(τ_{cr}=P_{cr}/t_l、τ_{cr}:初ひび割れ時の平均せん断応力度、P_{cr}:初ひび割れ時の荷重、t:壁厚、l:柱中心間距離)は0.063であった。壁板内には数多くのせん断ひび割れ、柱には水平ひび割れが発生し、最大耐力付近ではり下近傍の壁板がスリップ圧縮破壊をした。以後壁板コンクリートの落下が起こり、柱脚部が曲げ圧壊をし、柱頭部がせん断破壊をして最終に

至った。

[FW5 -0.367 -S -MB] 初ひび割れは、負側加力時の $R_{cr}=0.26 \times 10^{-3}$ rad 付近で開口上部壁板に入り、その時の τ_{cr}/F_c は 0.051 であった。開口隅角部の斜張力によるひび割れは正側加力時の層間変形角 $R=0.5 \times 10^{-3}$ rad 付近で発生したが、変形が増大してもひび割れ幅の拡大は見られなく、壁板のせん断ひび割れ幅の方が拡大して行った。壁板内には数多くのせん断ひび割れ、柱には水平ひび割れが発生した。正側加力では、最大耐力付近で曲げ圧縮側柱（開口側の柱）の柱脚部が曲げ圧壊を始め、曲げ引張り側柱の柱脚近傍壁板がスリップ圧縮破壊をした。負側加力では、最大耐力付近で開口隅角部が圧壊をした。以後、壁板コンクリートの落下が起こり、柱脚部がせん断破壊をして最終に至った。

無開口、偏在開口の耐震壁とも $R_{cr} \approx 0.26 \times 10^{-3}$ rad までは荷重-変形関係は直線で弾性挙動とみなすことができる。両試験体とも変形が増大するにつれて剛性が徐々に低下して行き、無開口耐震壁は最大耐力近傍の荷重をある程度維持した後、柱のせん断破壊により急激な耐力低下をしている。偏在開口の耐震壁は正側加力では、壁板のスリップ圧縮破壊により、負側加力では、開口隅角部壁板の圧壊により耐力が支配され柱のせん断破壊によって急激な耐力低下をしている。図-5 から、同じ大きさの中央部開口を有する耐震壁 (FW5 -0.367 -S) [4] は偏在開口の耐震壁よりも耐力低下が小さく、じん性的な変形性状を示している。

3.2 せん断変形と曲げ変形

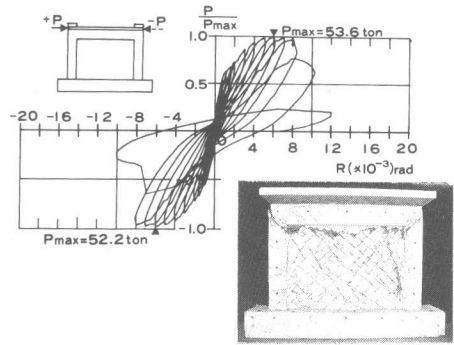
測定された柱の鉛直方向の変位を用いて、平石の方法 [5] により測定位置での全体曲げ変形 δ_B を求めた。はりでははり中央の水平変位 δ 、左右の柱の間では左右の柱の水平変位の平均の水平変位から各測定位置での δ_B を差し引くことによりせん断変形 δ_S を求めた。 δ_S および δ_B とはり中央での δ との関係を図-6 (a) ~ (b) に示す。図-6 (a) の無開口耐震壁は正側と負側加力の平均変位で示している。無開口と正側加力時の偏在開口の耐震壁の変形は 8 割り程がせん断変形であり圧力場を形成する面積の大きいほうが若干せん断変形が小さい。

3.3 せん断塑性係数

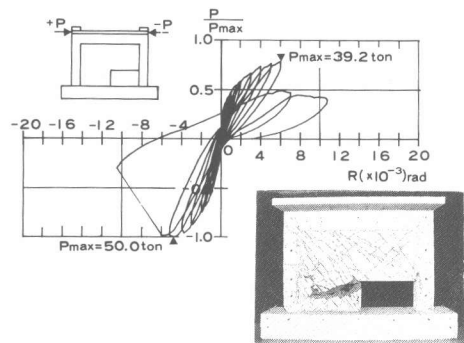
せん断変形 δ_S からせん断変形角 $R_S (= \delta_S / h)$ を求め次式によってせん断塑性係数 β を求めた。

$$\beta = (Q/R_S) / (Q/R_S)_{ini}$$

ここに、 Q/R_S : R_S 時のせん断剛性



(a) FW5 -0.00



(b) FW5 -0.367 -S -MB

図-4 水平荷重-変形曲線

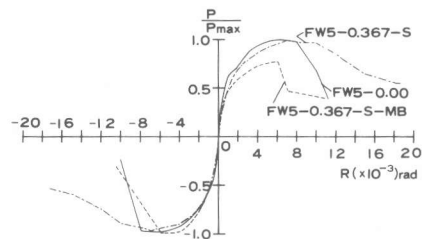


図-5 水平荷重-変形曲線の包絡線

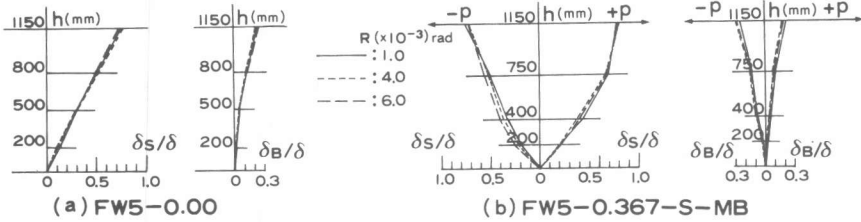


図-6 せん断変形 δ_s および曲げ変形 δ_B とはり中央での水平変位 δ との比 δ_s / δ , δ_B / δ と層間変形角 R の関係

(Q/R_s) ini : ひび割れ発生前の始源せん断剛性で本実験では次のように求めた。

FW5 -0.00 : (Q/R_s) ini = (16.2/0.135 × 10⁻³) = 11.96 × 10⁴ ton

FW5 -0.367 -S-MB : (Q/R_s) ini = (13.8/0.187 × 10⁻³) = 7.38 × 10⁴ ton

図-7に正側加力(実線で示す)と負側加力(破線で示す)の $\beta - R_s$ 関係を示す。初ひび割れ以後耐力に至るまでの $\beta - R_s$ の関係は、両対数表示のもとで直線的に低下する。その低下は偏在開口の耐震壁のほうが無開口耐震壁よりも若干小さい。また偏在開口の耐震壁は圧力場を形成する面積の大きいほうが小さい。

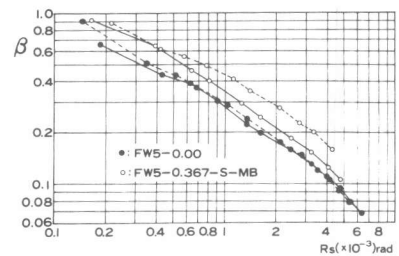


図-7 せん断塑性係数 β とせん断変形角 R_s の関係
実線は正側加力 破線は負側加力

4. 開口の影響による耐力低減率の提案

有開口耐震壁の壁板内に生ずるひび割れは図-8に示すような開口隅角部に生ずる局所的な斜め引張り応力によって生ずる初ひび割れAとせん断応力によって生ずる斜めひび割れB(せん断ひび割れ)があり、過去の震害例や実験例で見ることができる。付帯ラーメンの断面の大きさに関係なく壁板開口上下の隅角部から45°方向に引いた交点O(図-8)でせん断応力度が最大となること、瀬谷等の弾性解析と著者の光弾性実験結果によって確かめられている[6][7]。従って、斜めひび割れBは最大せん断応力度が生じる部分から発生することになる。この事実は本実験においても認められた。初ひび割れAが生じても(本実験では斜めひび割れBのほうが早く確認された)剛性低下はほとんどないが、斜めひび割れBは、耐震壁の剛性への影響が大きくなることはもちろん、そのせん断耐力にも大きな影響を及ぼすことになり設計上重要な問題となるひび割れである。壁板に斜めひび割れBが発生した後は、Ae部分の壁板が圧力場を形成(圧縮ブレースの役目)すると考える。開口を含むB~B間の壁板は、開口部が自由端であるため不完全圧力場となり、無開口耐震壁の場合には壁板全面が圧力場を形成するのと異なる点である。

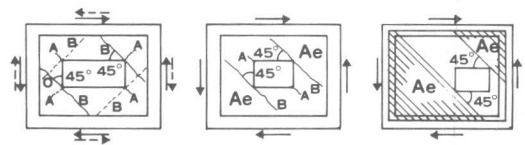


図-8 有開口耐震壁の典型的なひび割れと圧力場を形成する範囲
Ae : 圧力場を形成する面積

以上のことから、図-8に示す斜線部分の範囲を有開口耐震壁の圧力場を形成する面積 ΣAe とする。開口の存在によって、耐震壁のせん断耐力は減少するのであるが、その減少は圧力場を形成する面積に影響されると考えて、開口の影響による耐力低減率 r_u を次式のように提案する[2][3]。

$$r_u = \sqrt{\Sigma Ae / h l} \quad (1)$$

耐震壁の壁板はせん断ひび割れ発生後異方性板となり、圧力場を形成して面積膨張を起こすこ

とが解析上知られている [8]。有開口耐震壁は無開口耐震壁に比べ圧力場を形成する面積が減少し、面積膨張は小さくなると考えられる。図-9に、最大耐力近傍までの付帯ラーメンの変形を、図-10に面積膨張率 ϕ と層間変形角 R の関係を示す。 ϕ は各 R の時の面積膨張を試験体の無加力時の面積($h \times l$)に対する百分率で求めた。面積膨張は、図-9の付帯ラーメンの変形図を台形または三角形に分割して面積を求め、その面積から無加力時の面積を差し引いて求めた。無開口耐震壁の面積膨張は正側と負側加力で若干差が生じたので図-10中に示している最小二乗法で求めた実線の曲線とした。また、偏在開口も最小二乗法で求めた破線の値とした。図-9, 図-10から、無開口、偏在開口の耐震壁とも水平加力によつて曲げ引張り側柱は伸び、はり部が広がり面積膨張を起こしているが、圧力場を形成する面積の大きい無開口耐震壁のほうが偏在開口の耐震壁よりも大きい。また偏在開口の耐震壁の面積膨張も圧力場を形成する面積の大きい負側加力のほうが大きいことがわかる。図-11に、無開口耐震壁の面積膨張率 $\phi_{\xi=0}$ と偏在開口の耐震壁の面積膨張率 ϕ_{ξ} の比 $\phi_{\xi} / \phi_{\xi=0}$ と R および r_u の関係を示す。図-12に、偏在開口の耐震壁の各サイクル時の正側と負側加力時の最大水平荷重 $+P_{max}^c$ と $-P_{max}^c$ の比 $+P_{max}^c / -P_{max}^c$ と R および正側の $+r_u$ と負側の $-r_u$ の比 $+r_u / -r_u$ の関係を示す。図-11から、無開口と偏在開口の面積膨張率の比の値が耐力近くになると著者の提案した圧力場を形成する面積を考慮した耐力低減率の値に等しくなる。また図-12から、各サイクル時の正側と負側の最大水平荷重の比の値が正側と負側の耐力低減率の比に一致している。これは、せん断ひび割れ発生後の斜線(図-11中に示す)を付けた範囲の壁板が圧縮ブレスの効果を示しているものと言える。図-11の結果は、中央部に開口を有する耐震壁においても認められている [4]。

5. せん断耐力の検討

無開口耐震壁の実験最大耐力値 oQ_{Uex} と偏在開口の耐震壁の実験最大耐力値 ξQ_{Uex} の比 $\xi Q_{Uex} / oQ_{Uex}$ と偏在開口の耐震壁の正側と負側

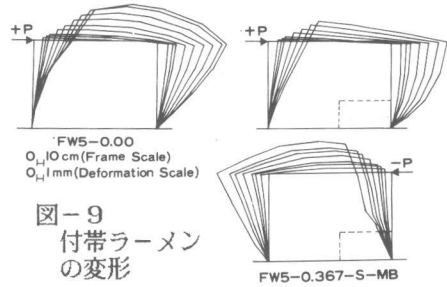


図-9 付帯ラーメンの変形

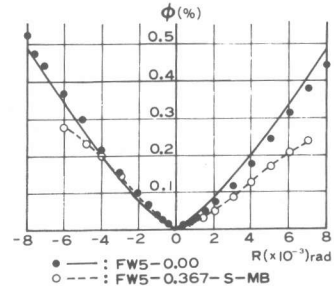


図-10 面積膨張率 ϕ と層間変形角 R の関係

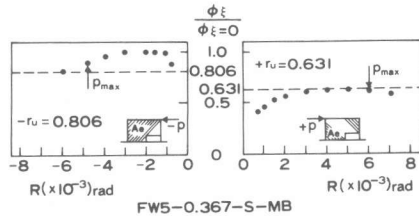


図-11 無開口耐震壁の面積膨張率 $\phi_{\xi=0}$ と偏在開口の耐震壁の面積膨張率 ϕ_{ξ} の比 $\phi_{\xi} / \phi_{\xi=0}$ と層間変形角 R および開口の影響による耐力低減 $r_u = \sqrt{\Sigma Ae} / h l$ の関係

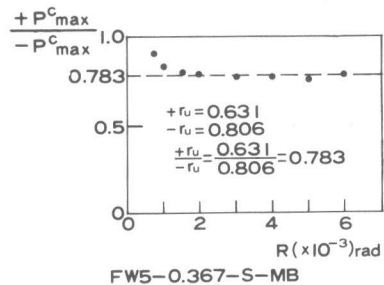


図-12 各サイクル時の正側と負側加力の最大水平荷重 $+P_{max}^c$ と $-P_{max}^c$ の比 $+P_{max}^c / -P_{max}^c$ と層間変形角 R および正側の耐力低減率 $+r_u$ と負側の耐力低減率 $-r_u$ の比 $+r_u / -r_u$ の関係

表-3 無開口耐震壁の実験最大耐力値 oQ_{uex} と偏在開口耐震壁の実験最大耐力値 ξQ_{uex} の比 $\xi Q_{uex} / oQ_{uex}$ と偏在開口耐震壁の正側と負側加力時の実験最大耐力値 $+\xi Q_{uex}$ と $-\xi Q_{uex}$ の比 $+\xi Q_{uex} / -\xi Q_{uex}$ および正側と負側の耐力低減率 $+r_u$ と $-r_u$ の比 $+r_u / -r_u$ の比較
 r : RC規準の耐力低減率 $r_u: \sqrt{\Sigma Ae / h l}$

注) 無開口耐震壁の実験最大耐力値 oQ_{uex} は正側 (53.6 ton) と負側 (52.2 ton) の平均値

試験体名	低減率		実験値 oQ_{uex} ξQ_{uex}	$\xi Q_{uex} / oQ_{uex}$	$+\xi Q_{uex} / -\xi Q_{uex}$	$+r_u / -r_u$
	r	r_u				
FW5-0.00	1.0	1.0	52.9			1.0
FW5-0.367-S-MB	0.581	0.631 -0.806	39.2 -50.0	0.741 0.945	0.784	0.783

加力時の実験最大耐力値 $+\xi Q_{uex}$ と $-\xi Q_{uex}$ の比 $+\xi Q_{uex} / -\xi Q_{uex}$ および正側と負側の耐力低減率 $+r_u$ と $-r_u$ の比 $+r_u / -r_u$ を表-3に示す。

無開口耐震壁の実験最大耐力値 oQ_{uex} と偏在開口耐震壁の実験最大耐力値 ξQ_{uex} の比 $\xi Q_{uex} / oQ_{uex}$ は著者提案の耐力低減率 r_u と差が見られるが、これはコンクリート強度や開口部周辺の補強筋の影響と考えられる。しかしながら、偏在開口耐震壁の正側と負側加力時の実験最大耐力値の比 $+\xi Q_{uex} / -\xi Q_{uex}$ は材料定数等の影響のない完全に無次元化されたものであり、その耐力値の比は正側と負側の耐力低減率の比 $+r_u / -r_u$ に一致している。

開口が偏在すると加力方向によってその耐力が異なるが、著者提案の圧力場を形成する面積を考慮した耐力低減率によれば、実験値と極めてよい対応を示すと言える。

6. 結 び

実験結果から得られた成果をまとめると以下のようになる。

- i) 開口隅角部の斜張力によるひび割れ幅の拡大はあまりなく、これが直接の破壊原因とはならなかった。
- ii) せん断ひび割れが明確になった後、最大耐力近傍までのせん断変形は無開口耐震壁とほぼ同じで、その変形は全変形の8割り程であり、圧力場を形成する面積の大きいほうが若干小さい。
- iii) せん断塑性係数とせん断変形角との間には両対数表示のもとで直線的な関係にあり、その低下は無開口耐震壁よりも若干小さく、圧力場を形成する面積の大きいほうが小さい。
- iv) 耐震壁の面積膨張は圧力場を形成する面積の大きいものほど大きくなり、無開口と偏在開口耐震壁の面積膨張率の比は(1)式の耐力低減率 r_u の値に等しくなる。
- v) RC規準の耐力低減率 r は開口形状および位置に無関係であるが、形状と位置によって変化する(1)式の耐力低減率 r_u は汎用性があり、実験値とよい対応を示した。

参考文献

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1982
- [2] 徳広育夫、小野正行：鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による低減率 r 、日本建築学会九州支部研究報告、第27号、昭和58年3月、pp.193~196
- [3] 徳広育夫、古賀 醇：有開口耐震壁の初ひび割れ時の平均せん断応力度と開口の影響による耐力低減率の検討、日本建築学会中国・九州支部研究報告、第6号、昭和59年3月、pp.241~244
- [4] 徳広育夫、小野正行：各種形状の開口を有する鉄筋コンクリート造開口耐震壁の弾塑性性状に関する実験的研究(その1、その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)昭和61年8月、pp.265~268
- [5] 平石久廣：耐震壁のせん断変形と曲げ変形の算定方法、日本建築学会論文報告集、第333号、昭和58年11月、pp.55~62
- [6] 瀬谷 胖、松井源吾：開口のある耐震壁の応力と変形に関する研究、日本建築学会論文報告集、第286号、昭和54年12月、pp.45~53
- [7] 徳広育夫、小野正行：有開口耐震壁の最大せん断応力度とその位置、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、昭和57年10月、pp.1481~1482
- [8] 坪井善勝、富井政英：直交異方性弾性版理論による鉄筋コンクリート壁の亀裂発生後に於ける剪断抵抗の解析、建築学会論文集、第48号、昭和29年3月、pp.26~39