論文 開口を有する RC 造耐震壁の復元力特性のモデル化手法

千葉 幸大*1・櫻井 真人*2・小林 淳*3・西田 哲也*4

要旨:本論文では開口周比の異なる RC 造有開口耐震壁の 2 試験体について,開口の配置や面積が復元力特 性へ与える影響を考慮できる計算方法を曲げ成分とせん断成分に分けて検討した。曲げ成分については,フ ァイバーモデルを用いて開口区間の壁板は曲げに抵抗しないものとして開口の大きさや配置の影響を考慮し た計算方法を検討した。せん断成分については,アーチ理論に基づき開口を考慮した圧縮ストラットを仮定 し,せん断ひび割れ点とせん断終局耐力について検討を行った。実験結果との比較より提案した計算方法が 開口による復元力特性への影響をおおむね評価できることを示した。

キーワード:有開口耐震壁,復元力特性,開口位置,ファイバーモデル,圧縮ストラット

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 建築物の2次設計以降のル ートにおいては、日本建築学会の「鉄筋コンクリート 構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説」¹⁾(以下, 保有水平耐力計算規準と略記)や建築行政情報センタ ーの「構造関係技術基準解説書」²⁾にあるように、各 部材の復元力特性をモデル化し、保有水平耐力計算や 時刻歴応答解析を実施するのが一般的である。しかし ながら、ドアや窓などの開口を有する耐震壁(以下, 有開口耐震壁と略記)については、過去の地震被害状 況および構造実験の結果から破壊モードが複雑である とともに耐震性能の把握が非常に困難である。

有開口耐震壁の耐震性能については,主に最大耐力 付近における破壊性状やせん断強度に関する研究が進 められており,筆者の一人³⁾は有開口耐震壁のせん断 力作用時に形成されるアーチ機構に着目し,圧縮スト ラットの形状に基づき,負担せん断力を求めることで 開口の配置や載荷方向によるせん断強度への影響を評 価できる強度式を提案している。一方で,最大耐力へ 至るまでの変形領域についても開口による復元力特性 への影響が考えられるものの,開口に応じた定量的な 性能評価法の確立には未だ至っていない。

無開口耐震壁の復元力特性は一般的に曲げとせん断 の復元力特性を個々に求め、それらを累加することで 評価している。保有水平耐力計算規準においては、せ ん断変形のスケルトンカーブを2折れ線、曲げ変形の スケルトンカーブを3折れ線でそれぞれモデル化して いる。また、曲げ変形に関しては鉄筋とコンクリート の要素で構成するファイバーモデルによって計算する 手法も示されている。一方、有開口耐震壁の耐力につ いては、同規準で示されている開口による低減率を同 形状の無開口耐震壁の耐力に乗じて低減しているが, 面積や開口長さによる低減率であるため,開口の配置 影響などが考慮されていない。また,剛性低減率につ いても同様に開口低減率に基づいて低減しているが, 必ずしも耐震壁の力学的抵抗機構に立脚したものでは ない。

有開口耐震壁の復元力特性モデル化に関する既往の 研究をみると、小野・徳広ら^{4),5}は、RC 造耐震壁の 開口による影響を壁板内に発生する斜め45°のひび 割れを仮定し、壁板に作用する圧力場の面積によって 評価しており、開口の位置や、開口面積の影響が考慮 された強度を耐力低減率という形で提案している。

このように既往の研究において開口の配置や開口面 積の終局せん断強度へ及ぼす影響について,壁板を流 れる圧縮応力に着目して低減率として評価する方法が いくつか提案されている。しかしながら,剛性低下や ひび割れ点などを含めた復元力特性として評価が行わ れているものは少ないのが現状である。

本研究では RC 造有開口耐震壁の定量的な復元力特 性モデルの構築を目標としている。本論文では筆者ら が実施した開口を有する RC 造耐震壁の構造実験結果 に対し,現行規準や既往研究により提案されている評 価法を用いた算定を行うとともに,筆者らが提案した 開口位置・個数の影響を考慮できるストラット式によ る評価法の提案を試みた。

2. 対象試験体概要

本検討では筆者らが行った静的載荷実験のの試験体 を対象とし、図-1にその立面図を示す。また、材料 特性を表-1に、部材断面詳細を表-2に示す。試験 体は6層程度のRC構造物下部2層を想定した開口を

*1 秋田県立大学大学院 システム科学技術研究科建築環境システム学専攻 (学生会員) *2 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科 助教 博士(工学) (正会員) *3 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科 教授 工博 (正会員) *4 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科 教授 博士(工学) (正会員)



図-1 対象試験体立面図

表一1 材料特性

コンクリート	Œ[N/mm²]		
	WO11	WO12	
上層部	29.6	29.7	
下層部	26.4	25.7	
鉄筋 (SD295A)	降伏点 [N/mm²]	ヤング係数 [N/mm ²]	
D6	429	1.86 × 10⁵	
D10	363	1.74 × 10 ⁵	
D13	385	1.73 × 10⁵	

柱	B×D	200 × 200	
	主筋	12-D13 (pt=3.8%)	
	帯筋	D6@60 (p _w =0.53%)	
	副帯筋	2-D6@120 (p _w =0.53%)	
梁	B×D	150 × 200	
	主筋	4-D10 (pg=0.95%)	
	帯筋	D6@100 (p _w =0. 42%)	
壁	壁厚	80	
	壁筋	D6@100 千鳥(ps=0.4%)	
	開口補強筋	D10(縦・横)	

有する連層耐震壁であり、開口数をパラメータとした 試験体 WO11 および WO12 について実験を行った。

想定した一定軸力下での水平加力を行うために,柱 軸力比 0.2 に相当する軸力を反力フレームに鉛直に取 り付けた 2 台のオイルジャッキによって上スタブから 作用させ,水平方向に取り付けた 2 台のオイルジャッ キにより壁脚部から 2.1m の高さで正負繰り返し載荷 を行った。なお,試験体のシアスパン比は,頂部モー メントを付加することで,1.0 とした。耐震壁の破壊モ ードはせん断破壊型とし,等価開口周比はそれぞれ 0.26, 0.37 とした。

図-2に実験によって得られた荷重-変形関係を示 す。開口数の多い試験体 WO12 は試験体 WO11 と比べ 耐力および剛性が低くなる傾向がみられた。また,正 載荷に比べ負載荷側の荷重が1割程度低くなったが, これは開口の偏在によって載荷方向の違いで圧縮スト ラットの形成に差異が生じたためであると考えられる。 なお,両試験体ともに計画では変形角1/100rad.まで載 荷予定であったが,試験体 WO11 については変形角 1/100rad.の正載荷中に面外方向への変形が過大になり



制御困難となったため載荷試験を終了した。

3. 開口を考慮した M− φの3 折れ線モデル手法

部材の曲げ変形を計算する手法の一つとして,ファ イバーモデルによる解析がある。この手法は,部材断 面を微小要素に分割し,分割要素内の各材料の断面積 に応カーひずみ度関係を与えることで作用する力のつ り合いから,明快な形で部材の曲げモーメントと曲率 の関係を計算できる。しかしながら,有開口耐震壁の ような部材においてファイバーモデルを適用する場合, コンクリートの断面欠損や補強筋の欠損を適切に考慮 することは難しい。

ファイバーモデルは平面保持の仮定に基づいた梁理 論によって変形を計算しているため、断面内のひずみ 分布はある曲率 φの傾きで線形に推移する。一方で、 有開口耐震壁においてはひずみの分布が線形とはなら ず、開口部分で異なった曲率を示すことが鈴木ら⁷7の 実験により確認されている。文献 7)の壁板脚部応力分 布によると、無開口耐震壁では壁全体でモーメントを 負担しているのに対し、有開口耐震壁では開口配置に 依らず、開口領域を挟んで個々の壁板がそれぞれ圧縮 場、引張場を形成していることが確認されている。図 -3に各試験体の変形角 R=1/1000rad.時の脚部鉄筋ひ ずみ度分布を示す。両試験体とも、文献 7)と同様に開 口を挟んだ壁板で圧縮場、引張場を形成したひずみ分 布を示していることがわかる。

この傾向に着目し、耐震壁がせん断力を受けた際の 変形を図-4のように仮定する。開口部分の壁板は曲 げ変形に抵抗せず、壁板部分で独立の変形が生じるも のと考え、開口部分ではひずみ分布が変化しない、す なわち曲率を0として計算を行う。また、本検討では M-φ関係を算出する際の曲率は引張縁から圧縮縁まで を線形の歪勾配と考えた平均曲率 φave とした。

この仮定に基づき計算を行うと, 偏在開口をもつ耐 震壁の場合,ひずみ分布形状に差異が生じることから, それぞれ異なる耐力が導出されるため, 開口配置や開



口の大きさを考慮した M-φ 関係の計算が可能となる。

 $M-\varphi$ 関係における折れ点は M1, M2, M3', M3 と し, それぞれコンクリート曲げひび割れ時ひずみ,引 張側鉄筋降時ひずみ,引張側最外縁ひずみ 10000 μ , 30000 μ 点とする。**表**-3に各点の計算値を示す。断面 の要素の分割は全区間で 50mm 分割とした。コンクリ ートの材料特性はバイリニアモデルとし,引張側につ いては曲げひび割れ強度以降の負担を0とした。鉄筋 の材料特性は完全弾塑性のバイリニアとする。得られ た $M-\varphi$ 関係に基づき,材軸方向に 25mm 分割し,荷 重-曲げ変形関係を求めた。図-5に無開口と仮定し たファイバーモデルによる計算結果と,試験体 WO11 および WO12 の本手法による計算結果を示す。

4. 開口を考慮した τ - γの2折れ線モデル 4.1 せん断ひび割れ強度およびせん断終局強度の算出

保有水平耐力規準では、耐震壁のせん断変形の復元 力特性を、せん断ひび割れ強度、せん断終局強度の2 点でモデル化している。これに対し、有開口耐震壁の

表-3 M- φ関係計算値

	W011		W012	
	M[kN·m]	φ[μ]	M[kN·m]	φ[μ]
M3	-1411.7	-16.4	-1422.0	-16.6
-M3'	-1367.0	-5.6	-1372. 2	-5.7
-M2	-1081.7	-1.3	-1052. 7	-1.3
-M1	-187.0	-0.1	-169. 5	-0.1
0	0.0	0.0	0.0	0.0
M1	223. 1	0.1	221.3	0. 1
M2	1167. 6	1.4	1160. 5	1.4
M3'	1392. 3	5.7	1397.9	5.8
M3	1418. 9	16.5	1424. 5	16.6



場合は無開口のモデルに開口低減率を乗じることで耐 力と剛性の計算を行うとしている。

有開口耐震壁のせん断終局強度を求める手法として、 筆者の一人はアーチ機構によって形成される圧縮スト ラットの強度から、壁板の強度を算定できるストラッ ト式を提案している。図-6の a)のように、壁板長 *l_{pi}* と開口高さ *h*_oで示される領域において、脚部幅 0.5*l_{pi}* で *θ_i*の角度を持つ斜め方向圧縮ストラットを仮定し、 壁板の終局せん断力 *Q_{wi}*を式(1)のように提案している。

 $Q_{wi} = v \cdot \sigma_B \cdot \cos \theta_i \cdot \sin \theta_i \cdot 0.5 l_{pi} \cdot t_i \tag{1}$

ここで, v:コンクリートの有効強度係数 σ_B:コンクリートの一軸圧縮強度(N/mm²) θ_i:壁板で仮定した圧縮ストラットの角度 *l_{pi}*:壁板長(mm) *t_i*:壁厚(mm)

この式では開口の配置や面積によって圧縮ストラットの角度や幅が変化する状態を、比較的簡便な方法で せん断強度式として表現している。なお、有効強度係 数vについては、文献3)を参考されたい。本検討では、 この圧縮ストラットに基づくせん断強度算定方法をひ び割れ強度時においても適用することにした。図-6 のb)における青線のようなひび割れ長さを想定し、壁 板長 *l*_{pi} とストラット角度 θ_iよりひび割れ強度時せん断 力 *Q*_{cri} を式(2)と仮定した。



a) せん断終局強度時

図-6 壁板における圧縮ストラットの仮定



(2)

ここで, *h*_i:壁高さ(mm)

 $Q_{cri} = \tan \theta_i \cdot h_i \cdot \sigma_t \cdot t_i$

 σ_t : コンクリートの引張強度(N/mm²) ($\sigma_t = 0.33 \sqrt{\sigma_s}$)

有開口耐震壁としてのそれぞれのせん断強度 Qwo, Qcro は式(3),式(4)で示すように,各開口間で形成され る圧縮ストラットから算定された壁板のせん断強度の 総和とする。

$$Q_{uv} = \sum_{i=1}^{u+1} \mathcal{Q}_{ui}$$
(3)

$$Q_{co} = \sum_{i=1}^{s+1} Q_{ci}$$
(4)

ここで, *n*:開口数

せん断ひび割れ強度 *Q*_{cro} およびせん断終局強度 *Q*_{wo} を用いて2点のせん断応力度 τ_{cr}および τ_{wi}を計算する。 4.2 せん断変形角 γ の算出

保有水平耐力規準では無開口耐震壁せん断剛性に等 価開口周比に基づく低減率を乗じたものを有開口耐震 壁のせん断剛性とし,せん断耐力とせん断剛性の関係 からせん断変形角γを計算する方法が示されている。

有開口耐震壁は開口によって断面欠損が生じるため, 耐力低下と同時に剛性低下が起きることは明らかであ る。一方で開口周比を用いた低減率では,耐力への低 減と同様に開口の形状や力の方向による差異を表すこ とができない。

そこで,開口の配置や大きさによって変化する圧縮 ストラットの面積に着目し,図-7に示すような有開 口耐震壁の圧縮ストラット面積 Aoの総和と同一形状

表一4 $\tau - \gamma$ 関係計算値

	W011		W012		
	τ [N/mm ²]	γ[×10 ⁻³]	τ [N/mm ²]	γ[×10 ⁻³]	
-S2	-3. 620	-2. 943	-2.775	-2. 932	
-S1	-1. 103	-0. 125	-0. 844	-0. 125	
0	0.000	0.000	0.000	0.000	
S1	1. 273	0. 125	1.013	0. 125	
S2	3, 885	2, 738	3, 320	2, 923	



の無開口耐震壁の圧縮ストラット面積 As の関係に基づき剛性低減率 rsを仮定し,式(5)に示す。

$$r_s = \frac{\sum A_o}{A_s} \tag{5}$$

この低減率 $r_s を開口による剛性の低減率とし、保有水$ $平耐力規準に示される形状係数<math>\kappa_e$ と前節のせん断ひび 割れ強度およびせん断終局強度における τ_{cr}, τ_{wi} を用い て計算した、 $\tau - \gamma$ 関係を表-4に示す。なお、せん断 ひび割れ点以降の剛性については規準に示されるせん 断剛性低下率 α_s を用いて計算した。 $\tau - \gamma$ 関係より、荷 重-せん断変形関係を算出したものを図-8に示す。

5. 計算値と実験値の比較

5.1曲げ変形の比較

第3章で求めた曲げ変形の計算結果と両試験体の実 験値の荷重-変形関係から分離した曲げ変形の包絡線 との比較を図-9に示す。同図には,保有水平耐力規 準で示される方法による曲げ変形の計算値も併せて示



す。提案した方法による計算値は実験値とおおむねよ い対応となっているが、負載荷側については最大荷重 において若干計算値が実験値を上回る結果となった。 規準式と比較すると最大耐力付近の剛性や耐力が本提 案方法はより実験値に近い性状を示していることが確 認できた。図-11にはひび割れ点前後の微小変形領 域の荷重-曲げ変形を示す。曲げひび割れ点について は実験において柱への曲げひび割れの発生が確認され た荷重がおおよそ150kN であったことから、計算値が 過少評価する傾向にある。曲げひび割れ点以降の剛性 については実験値とよく対応しており、開口の個数や 大きさによる影響について反映できているといえる。 5.2 せん断変形の比較

第4章で求めたせん断変形の計算結果と両試験体の 実験結果から得られた荷重-せん断変形の包絡線との 比較を図-10に示す。同図には,保有水平耐力規準 に示される方法によるせん断変形の計算値も併せて示 す。提案した計算方法による最大荷重及び変形につい ては両試験体ともにおおむねよい対応を示している。 また,試験体ごとの開口の配置による耐力の差異を圧 縮ストラットによって評価しているため、開口の偏在 によって生じる載荷方向による耐力の差異を表現でき ている。また、開口による剛性低減率についても実験 値の剛性の傾向を表現出来ているといえる。規準式に よる計算値については、開口長さ、等価開口周比、開 口高さに基づいて開口低減率が三種類定められており、 その中で最も不利な値を採用するため実験値よりもか なり安全側の評価をしている。一方、図-12に示す ようにひび割れ点近傍の剛性については、計算値と実 験値で差異がみられる結果となった。ひび割れ発生点 と強度の対応性については、今後、開口パターンを増 やしてさらに詳細に検討する必要がある。

5.3 全体変形の比較

荷重-全体変形関係における実験値と計算値の比較 を図-13に示す。また、同図には保有水平耐力規準 に則り計算した復元力特性も併せて示す。計算値の変 形については曲げ変形とせん断変形の計算値を累加し たものとした。また,せん断破壊型試験体であるため, 終局せん断耐力で頭打ちとして計算を行った。

計算値をみると、試験体 WO11 はせん断耐力到達前



図-13 荷重-全体変形関係

に鉄筋の降伏が発生し, 試験体 WO12 ではせん断耐力 以降の変形で鉄筋が降伏したため, WO11 は 4 点の折 れ線, WO12 は 3 点の折れ線で表現している。実験で 計測されたひずみ値を確認すると, 試験体 WO11 につ いては最大耐力到達とほぼ同時に引張側鉄筋の降伏が 発生し, WO12 については最大耐力以降の変形におい て鉄筋降伏していることから, 計算においてもその傾 向がみられたと考えられる。規準式と比較するとひび 割れ発生点付近では,本手法の計算値と近い値となっ ているのに対し,最大耐力付近では規準式が安全側の 評価をしていることがわかる。

以上の結果から,提案した算定手法による復元力特 性は,実験値包絡線との対応から曲げおよびせん断の それぞれについて,開口位置の影響を考慮することが 可能であることが確認できた。

本論文では,弾性領域から最大耐力までの復元力特 性について検討を行った。最大耐力以降についても開 口による断面欠損が復元力特性へ影響を及ぼすことが 考えられるため,今後の検討課題としたい。

6. まとめ

本論文では, RC 造有開口耐震壁の復元力特性を計 算するにあたり,開口面積や開口配置による影響を考 慮した計算方法について検討した。結果を以下に示す。

- 曲げの復元力特性について,開口区間の壁板は曲 げ変形に抵抗しないと仮定し,曲率を0としてフ ァイバーモデルによる計算を行った。開口の大き さや配置による影響が反映され,おおむね実験値 とよい対応を示したが,曲げひび割れ点について 過小評価する傾向がみられた。本検討では曲げ成 分を計算する際,簡便に計算を行うために全変形 角で開口区間の曲率を一律0としたが,変形角ご とに曲率の設定を行う必要があると考えられる。
- 2) せん断の復元力特性については、圧縮ストラット に基づいたせん断強度評価方法に基づいて算定 を行い、最大耐力や剛性についてはよい精度で開 口の影響を評価できた。ひび割れ点近傍の性状に

ついては、形状係数 κ の計算において、開口によ る断面欠損の影響を考慮できていないことが精 度低下の原因の一つとして考えられ、これらを考 慮した検討が必要である。

本検討で用いた評価法は, FEM 解析の応力分布 性状に基づき,ストラット幅を壁板の 0.5 倍とす ることでストラットの角度を決定している略算式 である。この評価法は,壁板の長さに依存するた め算定精度向上のためには,壁板に依存しない評 価法の検討が必要である。

参考文献

- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造保有水平耐 力計算規準(案)・同解説,2016
- 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか:2015年 版建築物の構造関係技術基準解説書2016年追補 収録版,全国官報販売協同組合,2017
- 櫻井真人,倉本洋,松井智哉:複数開口を有する RC 造耐震壁のせん断強度算定法,日本建築学会 構造系論文報告集,第679号,p.1445-1453,2012
- 小野正行,徳広育夫:鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による耐力低減率の提案,日本建築 学会構造系論文報告集,第 435 号,pp119-129, 1992.5
- 徳広育夫,小野正行: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,コンクリート工 学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.385-390, 1987.7
- 6) 櫻井真人,千葉幸大,三浦翔大,小林淳,尾形芳 博,相澤直之:微小変形領域における RC 造耐震 壁の非線形性に関する検討(その10)有開口耐震 壁試験体と応力計の概要,日本建築学会学術講演 梗概集 2017(構造 II),2017
- う 鈴木健太,崎田知芳,松井智哉,倉本洋:複数開 口有する RC 造開口耐震壁の静的載荷試実験,コ ンクリート工学年次論文集,Vol.29,No.3, pp.325-330,2007.7