

圧縮ストラットに基づく RC 造有開口耐震壁の算定手法の

無開口耐震壁に対する適用性に関する考察

櫻井真人¹

¹ 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

本論文では、有開口耐震壁の定量的な構造性能評価法の構築を目標に、今後実施予定である有開口耐震壁の構造実験のための比較用試験体となる無開口耐震壁試験体を対象に構造実験を行い、耐震壁試験体の基本的な構造性能を検証した。また、当該試験体を対象に筆者が提案した有開口耐震壁を対象とした簡便なせん断強度算定手法であるストラット式による算定を行い、ストラット式の適用性について検証した。実験では正負交番漸増繰り返し載荷を行い、ひび割れ性状、荷重-変形角関係などの計測を行い、試験体が当初設計通りの構造性能を有することを確認した。また、ストラット式の検討では、耐震壁試験体全体で圧縮ストラットが形成されているものと仮定して算定した結果、ストラット式による算定値が実験値と良い対応を示した。また、筆者が過去に実施した他の無開口耐震壁試験体に対しても算定を行い、同様に実験結果を良好に評価できることを示した。

キーワード：耐震壁，ストラット，FEM，せん断強度，静的載荷実験

筆者は有開口耐震壁の定量的な評価手法の構築を目指し、耐震壁部材の構造実験および有限要素法（以下、FEM）解析を中心に開口位置および個数の差異がせん断強度に及ぼす影響を詳細に把握する検討を継続的に実施しており、当該結果に基づいて耐震壁内部の応力伝達機構に立脚した簡便なせん断強度評価式（以下、ストラット式）を提案するに至った。（倉本，櫻井，河野，坂下，2012；櫻井，倉本，松井 2012）ストラット式については、ドアのような縦長開口に対しては算定精度が低下するなど引き続き算定精度向上に向けた検証を行なう必要がある。

一方、ストラット式は、壁板内のアーチ機構によるせん断抵抗が支配的となるため、有開口耐震壁の破壊モードがいずれも開口周辺の壁板におけるコンクリートの圧壊によるという既往の実験結果に基づいて導出している。このことから、有開口耐震壁と同じく壁板の圧壊という破壊モードを示す無開口耐

震壁であれば、ストラット式を適用できる可能性があり、検討の余地があるといえる。

そこで本論文では、今後の有開口耐震壁の構造実験のための比較用試験体となる無開口耐震壁試験体を対象に構造実験を行い、その構造性能を検証した。また、当該試験体を対象にストラット式による算定を行い、無開口耐震壁への適用性について検証した。

無開口耐震壁の静的載荷実験

試験体概要

図 1 に試験体形状を、表 1 に試験体の部材断面詳細を、表 2 に使用材料特性をそれぞれ示す。試験体 AWNO は 6 層程度の RC 造建物の連層耐震壁の下部 2.3 層部分を想定した実在の約 1/3 縮尺モデルのものである。想定する破壊モードはせん断破壊型とした。なお本試験体は、部材の微小変形領域における構造

性能を検証する目的とした実験により既に $R=1/1000\text{rad}$ 程度の変形まで加力されており、それによるひび割れが主に壁板で生じている。本研究の主目的である部材終局強度の検討においてはこれらの損傷が及ぼす影響は非常に小さいものと判断し、そのまま実験を遂行している。

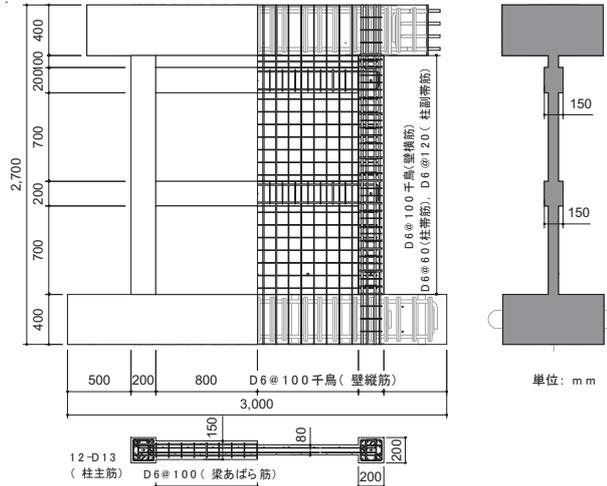


図1 試験体形状および配筋

表1 部材断面詳細

部材	断面	
	種類	仕様
柱	B × D	200 × 200 (mm)
	主筋	8-D13 ($p_g=2.5\%$)
	帯筋	2-D6@60 ($p_w=0.53\%$)
	副帯筋	2-D6@120 ($p_w=0.27\%$)
梁	B × D	150 × 200 (mm)
	主筋	4-D10 ($p_t=0.54\%$)
	帯筋	2-D6@100 ($p_w=0.42\%$)
壁	壁厚	80 (mm)
	壁筋	D6@100千鳥 ($p_g=0.4\%$)

表2 材料特性

鉄筋		降伏点 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
種類	使用部位			
D6(SD295A)	柱梁帯筋・壁筋	315	137	532
D10(SD295A)	梁主筋	377	185	525
D13(SD345A)	柱主筋	386	177	547
コンクリート				
σ_B (N/mm^2)	1層			25.9
	2層			18.0

載荷計画

載荷装置を図2に示す。試験体はPC鋼棒で反力床に固定した上で、反力フレームに取り付けた2台のオイルジャッキ(500kN)によって正負繰り返し水平力を載荷した。このとき、上部スタブに取り付けたオイルジャッキ(中央1000kN, 他500kN)によ

り $N=414\text{kN}$ の一定軸力(柱軸力比 $N/bD\sigma_B=0.2$ に相当)を試験体頂部に作用させると同時に、作用せん断力に対応させて当該鉛直ジャッキを制御することで試験体頂部に付加モーメントを作用させ、せん断スパン比が1.0となるよう制御した。実験では試験体頂部の水平変位 δ を計測高さ $H (=2000\text{mm})$ で除した部材角 R により制御し、正負漸増繰返し載荷を実施した。なお、載荷方向は東から西への載荷を正載荷、西から東への載荷を負載荷としている。

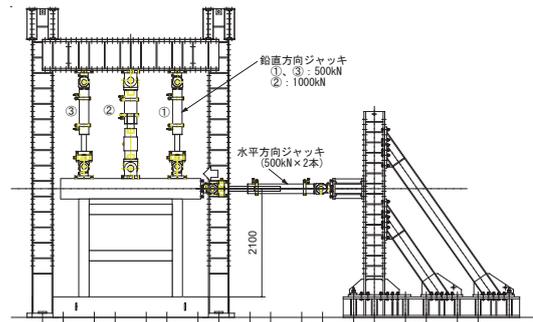


図2 載荷装置

実験結果

破壊性状

図4にせん断力-変形角関係を、図3に載荷終了後試験体写真をそれぞれ示す。

実験では $R=1/800\text{rad}$ サイクルまでに主に二層壁板内にせん断ひび割れが、側柱に柱脚から柱頭の順に曲げひび割れが生じた。以降のサイクルではこれまでの載荷で発生したひび割れが大きく伸展した。 $R=1/133\text{rad}$ サイクルでは正載荷側の最大せん断力 666.8kN を記録した。このサイクルでは試験体の面外変形が増大し変位計測フレームに接触した。このとき載荷途中で試験体の変形をすべて修正したため、以降のサイクルでは載荷順序が負載荷、正載荷の順となる。この際に西側柱がやや南方向、東側柱が大きく南方向へねじれが生じ、両側柱の脚部で圧壊によるコンクリートの剥落がみられた。その後 $R=1/100\text{rad}$ 第1サイクルの負載荷で壁板正面東側脚部においてコンクリートの圧壊がみられ、正載荷ピーク時に西側壁板脚部で圧壊がみられた。以降の載荷では東側柱脚部の剥落が進行し、 $R=1/67\text{rad}$ 第1サイクルの正載荷で変形ピークに到達する前に1層壁板脚部付近のひび割れ面に沿ってスリップ破壊が

観察され急激な耐力低下がみられたため当該サイクルで実験を終了した。

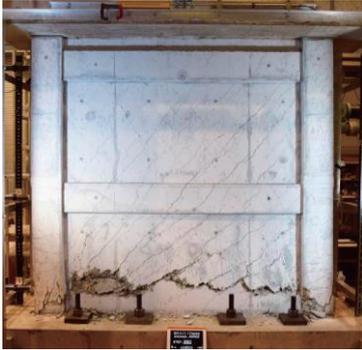


図3 最終破壊状況

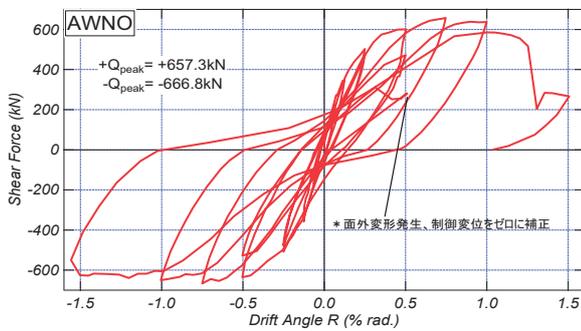


図4 せん断力-変形角関係

ストラット式の無開口耐震壁への適用

ストラット式の概要

図5にストラット式の壁板におけるアーチ機構の仮定を、図6に袖壁の取り扱い方法を示す。本提案式は、筆者の既往の研究から有開口耐震壁内部の応力状態に基づいて提案しているものである。

図5における壁板長 l_p と開口高さ h_o で示される領域において、幅 $0.5l_p$ となる斜め方向の圧縮ストラットが形成されているものとし、各壁板のせん断力 Q_{wi} を式(1)で求める。有開口耐震壁のせん断強度 Q_{wo} は、袖壁付柱も含めた各壁の総和として式(3)で与えられるものとする。ここで、圧縮側袖壁付柱の負担せん断力は図6に示すように柱と壁の部材厚さを等価厚さに置換して評価する。また、引張側袖壁付柱においては引張側柱を無視して袖壁のみの負担せん断力で評価する。

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

$$v = -0.016\sigma_B - 0.16 \frac{M}{QD} \quad (2)$$

$$+ 0.36 \frac{N}{bD\sigma_B} + 0.27p_W + 1.23$$

$$Q_{wo} = \sum_{i=1}^{n+1} Q_{wi} \quad (3)$$

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1軸圧縮強度(N/mm²)、 θ_i ：壁板の圧縮ストラットの角度、 l_{pi} ：壁板長(mm)、 t_i ：壁厚(mm)
 n ：開口数、 l_{pi} ：壁板長

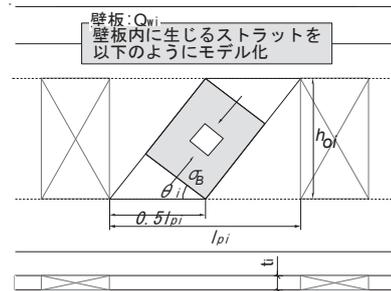


図5 壁板におけるアーチ機構の仮定

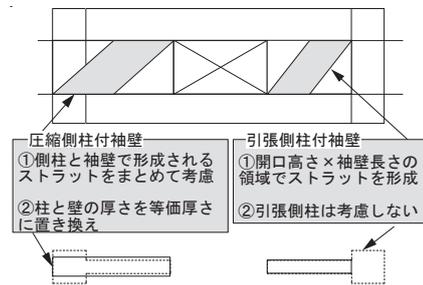


図6 壁板におけるアーチ機構の仮定

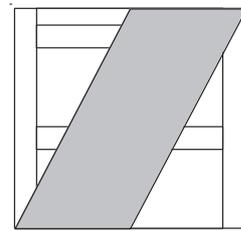


図7 無開口耐震壁に対する形成ストラットの仮定

算定結果.

試験体 AWNO に対する FEM による事前解析では、2層東側柱柱頭付近から1層西側柱柱脚へ応力が発生し、圧縮ストラットを形成している傾向がみられた。このことを参考に、ストラット式の算定では図7に示すように試験部壁板全体すなわち連層でスト

ラットが形成されるような応力抵抗機構を仮定した。

表 3 にストラット式による算定結果を示す。なお、同表には比較のため、他の規基準で採用されている終局曲げ強度、荒川 min 式、トラス・アーチ理論式による終局せん断強度、富井・江崎 (1986) のスリップ耐力式による終局せん断強度による算定結果も併せて示す。

表 3 算定結果

		Q _{cal.}	Q _{cal.} / Q _{exp.}
曲げ終局強度 Q _{mu} (kN)		783	1.17
せん断終局強度 (kN)	Q _{wo}	696	1.04
	Q _{su}	499	0.75
	V _u	669	1.00
	Q _u	745	1.12

実験式で安全側下限値を与える傾向がある荒川 min 式は 2 割程度実験値を過小評価した。また、富井・江崎のスリップ耐力式では想定破壊モードは一致するものの、1 割程度実験値を過大評価している。一方、理論式であるトラス・アーチ式はかなり精度よく評価している。これら既往の算定式に対しストラット式算定結果は実験値に対する算定値の比率で 1.04 となり、概ね実験値を良好に評価可能である。

表 4 に筆者が実施した既往の無開口耐震壁実験試験体に対するストラット式の算定結果を示す。なお、これら試験体の形状および縮尺は概ね図 1 のものと同等である (倉本ら, 2012)。表 5 においても、せん断破壊型となった試験体 AWNO, WAS および WNO では概ね実験値と算定値が良い対応を示していることがわかる。一方、M/QD が 1.8 で曲げ破壊型となる試験体 WNO-F については側柱主筋降伏により強度が頭打ちとなるため算定値は過大評価となった。

表 4 既往の無開口耐震壁に対する算定結果

試験体	AWNO	WAS	WNO	WNO-F
実施年度	H.26	H.17	H.21	H.22
破壊モード	せん断	せん断	せん断	曲げ
実験値 Q _{exp.} (kN)	667	681	731	481
σ _B (N/mm ²)	25.9	26	30.5	21
M・Q/D	1.05	1.38	1.2	1.8
N/(bD・σ _B)	0.2	0.2	0.2	0.2
p _w (%)	0.4	0.4	0.4	0.4
θ (°)	25.35	24.78	26.57	26.57
ν (式(2))	0.8276	0.7732	0.7300	0.7860
ストラット式算定値 Q _{cal.}	696	675	712	554
Q _{cal.} / Q _{exp.}	1.04	0.99	0.97	1.15

まとめ

本論文では、今後実施予定の有開口耐震壁試験体と比較を行うための無開口耐震壁試験体の構造実験を実施し、筆者が提案した有開口耐震壁せん断強度評価手法の無開口耐震壁への適用性を検討した。

無開口耐震壁の実験では最終破壊モードおよび強度算定結果より、概ね当初設計通りの挙動を示した。

ストラット式の無開口耐震壁に対する算定では、事前解析により求められた耐震壁の最小主応力コンタを参考に圧縮ストラットの角度を連層のものと仮定することで実験結果を良好に評価できた。

ただし、耐震壁では付帯フレームの構造性能が剛性および強度に影響を及ぼすと考えられるが、ストラット式では簡便な仮定により評価している状況である。今後はその効果を定量的に把握し、ストラット式に適切に反映させることが課題である。

文献

倉本洋, 櫻井真人, 河野進, 坂下雅信 (2012). 「有開口耐力壁の変形能力の評価等に関する実験・解析」『ビルディングレター』563 (11) 2-13

櫻井真人, 倉本洋, 松井智哉 (2012) 「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集』679 (5) 1445-1453

日本建築センター (2007). 『2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書』. 全国官報販売協同組合

日本建築学会 (1999). 『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』. 日本建築学会

富井政英, 江崎文也 (1986) 「壁板スリップ破壊によって支配される 1 スパン 1 層鉄筋コンクリート造：耐震壁の水平耐力算定式」『日本建築学会構造系論文報告集』366 142-154

秋田知芳, 倉本洋, 松井智哉, 壁谷澤寿海 (2005).

「静的載荷実験に基づく RC 造耐震壁の復元力特性のモデル化」『構造工学論文集』B51B 415-426

〔平成 27 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 27 年 7 月 31 日受理〕

Applicability to Non-Opening RC Shear Walls for Shear Estimation on RC Shear Walls with Multi-Openings using Compressive Struts

Masato Sakurai¹

¹ *Department of Architecture & Environment Systems, Faculty of Systems Science & Technology, Akita Prefectural University*

Static loading tests of RC shear walls without opening were performed to study the seismic performance and compare the test result of RC shear walls with openings for near the future. The test results demonstrated that the seismic performance of RC shear walls without opening, such as shear strength and failure, were in good agreement with the design values. Moreover, using proposed estimation for RC shear walls with openings, the shear strength of the specimens was estimated, and there was good agreement between experimental and calculated results.

Keywords: RC shear wall, strut, FEM, shear strength, static loading test