

論文

[2075] 鉄筋コンクリート造開口耐震壁の補強方法と靱性

正会員 ○全 大 翰 (日建設計研修生)

正会員 細川 洋治 (東京大学工学部)

正会員 小谷 俊介 (東京大学工学部)

正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

1 はじめに

鉄筋コンクリート造建物の耐震壁には、窓や出入口等のため、開口を設けることが多い。過去震害を受けた建物の開口壁には開口横の壁部の斜めせん断破壊が多く見られる。開口壁を耐震要素として合理的に活用するためには開口横の壁部のせん断破壊を防ぎ、開口壁のせん断耐力および変形能を向上させることが望ましい。

本研究は開口がある鉄筋コンクリート造連層耐震壁の耐震性能を把握することで、開口壁の補強方法として開口横の壁部に斜め補強筋を用い、開口壁のせん断終局耐力および変形能を改善する方法を検討することを目的とした実験的研究である。また、日本建築学会鉄筋コンクリート造構造計算規準[1]の開口周囲の縦横補強筋の有効性についての考察も行なった。

2 実験概要

2.1 試験体

試験体は、3～4階建物の最下層の耐震壁を取り出した1/3スケールの1層1スパンの開口耐震壁の計6体であり、開口の大きさおよび開口周囲の縦横補強筋の有無により、①W04AXタイプ、②W03Xタイプ、の2種類である。W04AXタイプは開口率($\sqrt{l_o \cdot h_o / l \cdot h}$)0.4で、開口周囲に学会規準[1]に従い算出した縦横補強筋を配筋し、W03Xタイプは開口率0.3で、開口周囲の縦横補強筋を除いた。各2タイプの試験体形状および配筋図を図1に、各試験体のパラメータを表1に示す。

試験体上部の梁は連層耐震壁として高い剛性を持たせた。また、実建物の終局時の反曲点高さを模擬してシアースパン比を0.8に決めた。なお、開口率は実大建物の階高を360cm($h=120$ cm)と看做して計算した。壁筋については、開口周囲の補強効果を考え、開口縁面に寄せて(かぶり厚さ24mm)、D6を縦横128mm間隔でダブル($p_s=0.5\%$)に配置した。試験体W04AXタイプの開口周囲の縦横補強筋

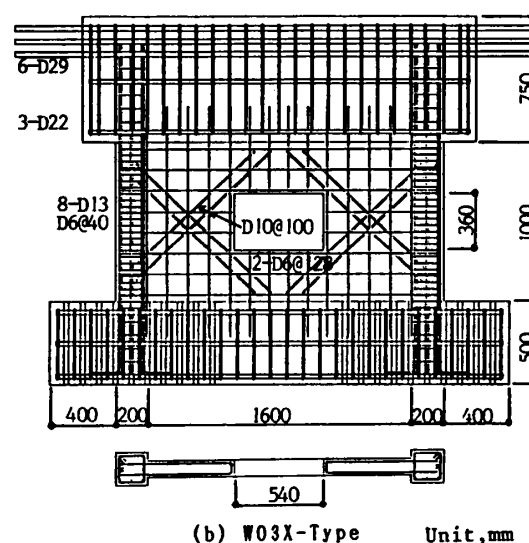
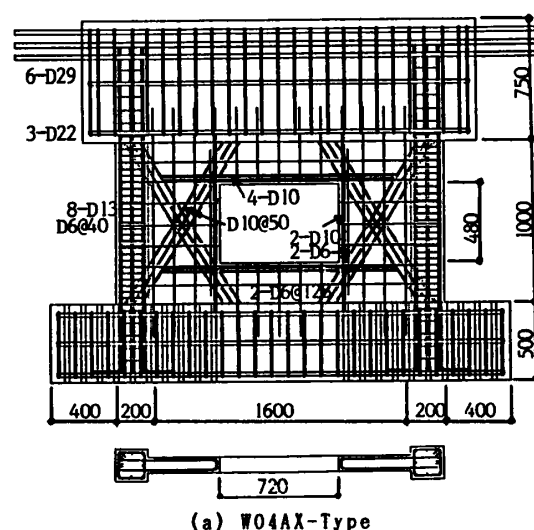


図1 試験体の形状

表1 試験体概要

試験体名	寸法 l×h (cm)	開口寸法 cm (周比)	配筋			補強筋	
			柱	梁	壁	開口周囲	斜筋
W04AX-0	壁厚t=10	72x48(0.4)	主筋 8-D13 $p_s=2.56$ 帯筋 D6@40 $p_w=0.8$	主筋 4-D22 あばら筋 D10@100	D6@128 ダブル $p_s=0.5$	縦:2-D6 2-D10	----
W04AX-1	壁板:160x100					横:4-D10	4-D10
W04AX-2	柱:20x20						8-D10
W04AX-3	梁:30x75						12-D10
W03X-1	基礎:75x50	54x36(0.3)				-----	4-D10
W03X-2						-----	8-D10

表2 材料特性
(a) コンクリート

試験体	圧縮強度 kg/cm ²	圧縮歪度 10 ⁻³	弾性係数 10 ⁵ kg/cm ²
W04AX-0, W04AX-1	262	2.1	2.56
W04AX-2, W04AX-3	258	2.5	2.37
W03X-1, W03X-2	257	2.0	2.54

(b) 鉄筋

種類	降伏強度 kg/cm ²	降伏歪度 10 ⁻³	弾性係数 10 ⁵ kg/cm ²
D6	3970	2.12	1.91
D10	3750	2.05	1.81
D13	3870	2.20	1.72

は開口端部では壁筋と束ねて25mm間隔で2列に配置した。開口横壁部の斜め補強筋にはD10を用い、壁縦横筋の内側に5mmあるいは10mmの間隔で並んで配置した。側柱には主筋8-D13($p_s=2.56\%$)、帯筋はD6@40($p_w=0.8\%$)で配筋した。試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料特性を表2に示す。コンクリートの弾性係数は $F_c/3$ 時の割線剛性であり、鉄筋の降伏強度は該当荷重を公称断面積で除した値である。

2.2 加力装置

加力方法は図3に示すように、最初に両柱の頂部に柱の断面積当り軸応力度 37.5kg/cm^2 を加えた後、試験体の梁の頂部に片側押しと片側引きの片持ち梁形式で繰り返し水平力を加えた。加力履歴は加力芯の水平変位で制御し、図2に示すように部材角 $1/400$ 、 $1/200$ 、 $1/150\text{rad}$ で各々2回正負繰り返しを、部材角 $1/100\text{rad}$ では1回の正負繰り返し加力を行なった。水平変位は加力点高さで左右、表裏の4箇所測定し、その平均値とした。

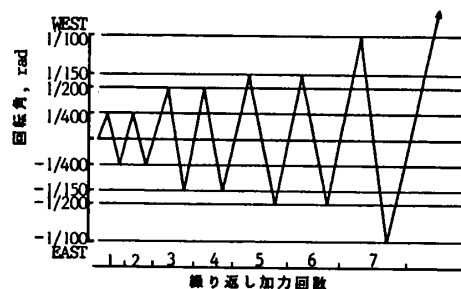


図2 加力履歴

3 実験結果

3.1 破壊経過

各試験体の最終ひび割れ状況を図4に示す。ひび割れは概ね正負1サイクル目の加力で、開口隅角部から始まる斜め引張りひび割れ、開口横壁部の斜めせん断ひび割れ、側柱の曲げひび割れの順序に発生した。開口隅角部の斜めひび割れは荷重が増加するに従い、開口

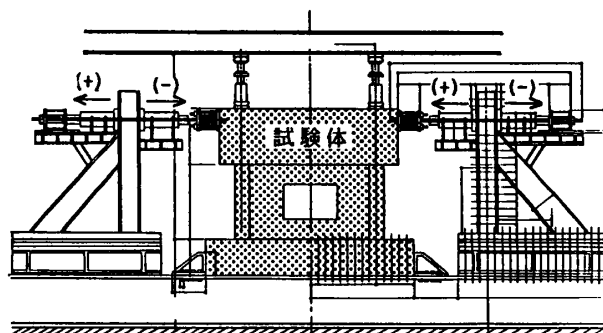


図3 加力装置

隅の応力集中部から斜め方向に10～20cm位まで伸展したが、ひび割れ幅はほとんど増大せず、開口壁の破壊あるいは変形には大きな影響を及ぼさなかった。壁板の斜めせん断ひび割れは開口左右の壁板に集中し、開口横の引張側壁板（水平荷重による全体曲げで開口の右側壁板）に斜めせん断ひび割れが生じて剛性が急に低下した。荷重の増加に従い、開口横壁の斜めひび割れが引張側壁では壁板全体にほぼ等しく分布したのに対し、圧縮側壁部では曲げにより圧縮力が大きくなるので、水平面に対する傾きが引張側より立つ傾向であり、ひび割れ本数も引張側の半分程度であった。水平変形の増加に従い圧縮側壁板の斜め圧縮ストラットが側柱に圧縮力を伝え、圧縮側の柱脚にせん断破壊をもたらした。すべての試験体の最終破壊は開口横の壁部のせん断破壊であった。

開口横の壁部に斜め補強筋が1列に配筋された試験体W04AX-1とW03X-1は、開口横壁板には斜め筋に沿ってひび割れが発生し、荷重が増加するに従い壁板コンクリートの損傷がこのひび割れに集中した。水平変形が増加するにつれ開口横の壁部に生じた斜めひび割れが大幅に広がり、圧縮側柱脚を貫通してせん断破壊した。試験体W04AX-2とW04AX-3は正負加力とも開口左右壁板にほぼ同じ傾きの斜めひび割れが細かく生じ、荷重が増加するに従い壁板の斜めひび

割れは開口上下壁板にも広がり、せん断滑りひび割れが梁および基礎の境界面で伸展した。最終破壊は開口横壁板のコンクリートのせん断破壊であった。

W03Xタイプの試験体では開口周囲の縦横補強筋が配筋されていないので、開口周囲及び隅角部の斜め引張りひび割れが、W04AXタイプ試験体より多少大きく伸展するが、荷重が増加してもその開きはほとんどなく、開口壁の破壊あるいは変形に及ぼす影響はほとんどなかった。

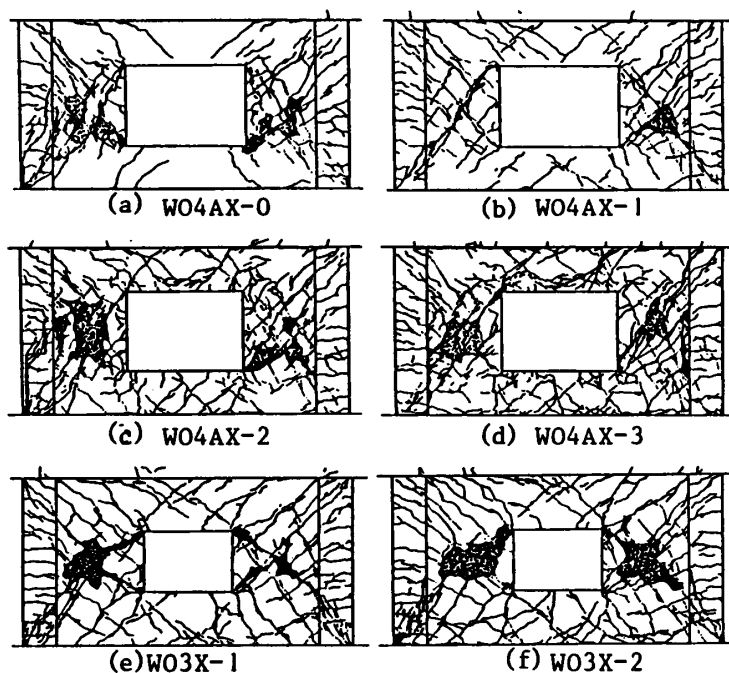


図4 最終ひび割れ状況

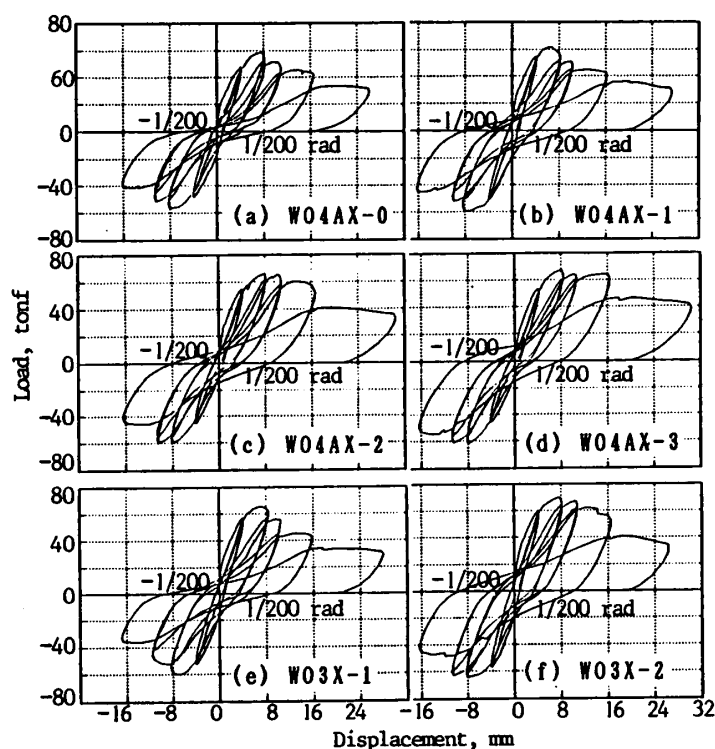


図5 荷重－変形履歴曲線

3.2 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形履歴曲線を図5に示す。各試験体の履歴曲線はいずれもスリップ性状と過去の最大変位点を指向する履歴を示し、同じ変位振幅での繰り返しサイクルの履歴曲線は逆S字形の幅が細いスリップ状の履歴を示した。各試験体共に部材角 $R=1/200$ radで最大耐力に達した。開口横に斜め筋がない試験体W04AX-0と1列に配筋した試験体(W04AX-1、W03X-1)は最大耐力以後の耐力低下が大きい。開口横壁部に斜め補強筋が多い試験体(W04AX-2、W04AX-3、W03X-2)は、部材角 $R=1/100$ radまでほとんど耐力低下が起らず、良好な変形性能を示した。

開口壁の変形の割合を調べるために、側柱の高さ方向で測定した軸変形より曲げ変形量を求め、全体変形に占める曲げ変形の割合を図6に示す。開口が大きいW04AXタイプの試験体では斜め補強筋が増すに従って最大耐力時(部材角 $1/200$ rad)の曲げ変形の割合が約10%から18%に増大し、開口が小さいW03Xタイプでは2体共に曲げ変形量が約20%を占めた。

3.3 開口補強筋の挙動

開口周囲の縦横補強筋の挙動を調べるため、開口の隅角部位置における鉄筋のひずみを測定し、繰り返し加力下の鉄筋の応力-ひずみ関係を用い、応力度を調べた。各縦横補強筋の応力

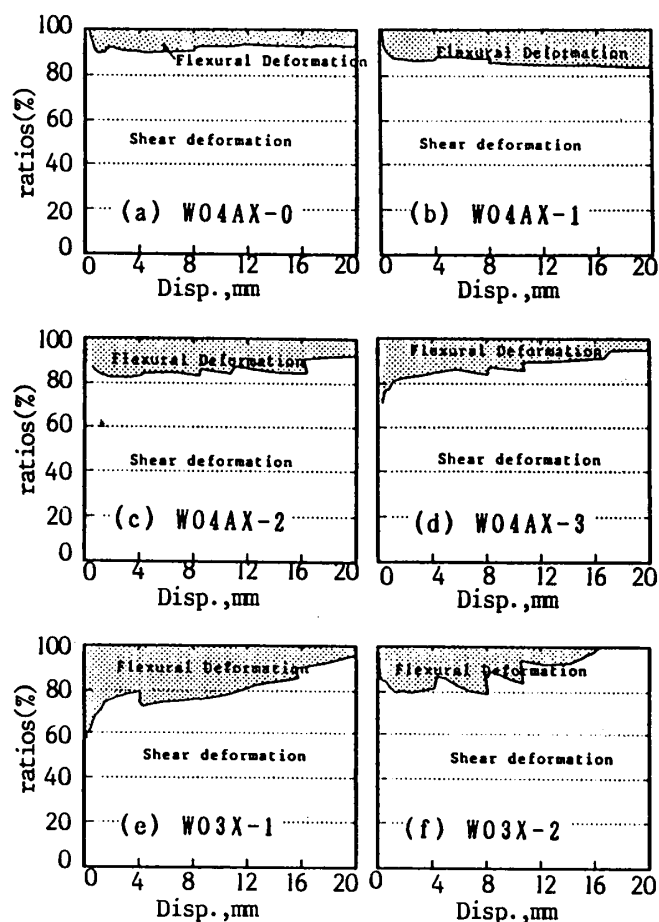
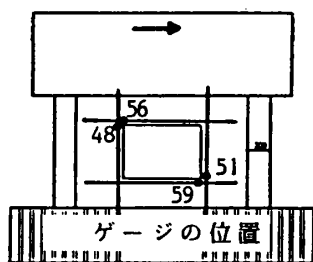


図6 変形量の割合

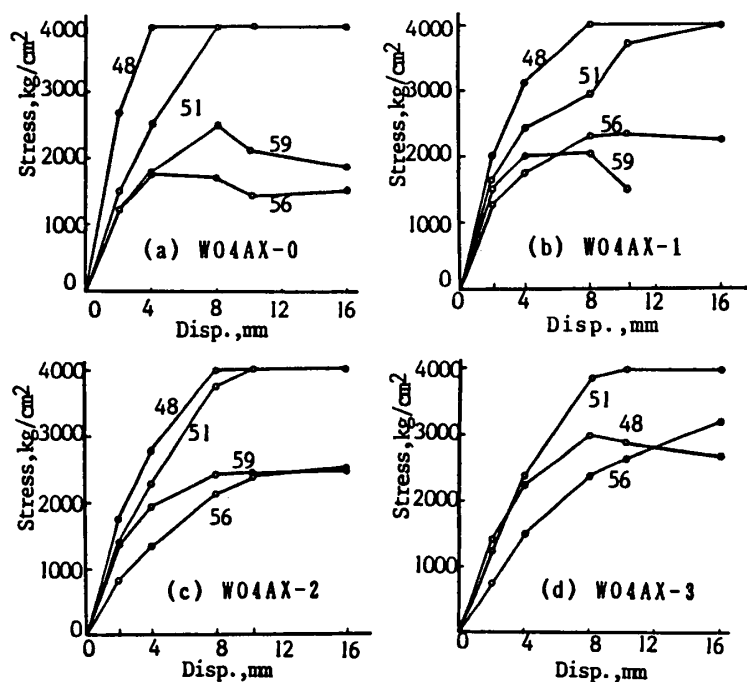


図7 開口補強筋の応力度

度と試験体の水平変形との関係を図7に示す。図中の各番号は左側のゲージ位置図に示した通りである。W04AXタイプの全試験体共に、縦補強筋は最大荷重近傍(水平変形 $R=1/200$ rad)で引張降伏したのに対し、横補強筋は降伏強度の半分程度にとどまっている。これは、学会規準の計算では開口周辺の縁応力により横筋が縦筋より大きな応力を示すこととは異なる挙動を現わす。開口上下に強剛な梁がある場合、開口左右の壁柱が主に水平変形を負担してラーメン的に変形し、縦補強筋には曲げによる引張応力度が加わったためと考えられる。

4 実験結果の考察

4.1 斜め筋の効果

開口横壁部の斜め補強筋量が開口壁の耐力および変形能に及ぼす効果について考察する。開口横の壁部の斜め筋で測定したひずみ度を用い、引張力を負担する斜め筋と圧縮力を負担する斜め筋の各々の負担せん断力を求め、図8に示す。引張力を負担する斜め筋は水平変形 $1/400$ rad($\delta=4$ mm)で引張降伏し、試験体の最大耐力に寄与するのに対し、圧縮力を負担する斜め筋は水平変形 $1/100$ rad($\delta=16$ mm)程度で圧縮降伏と同時に座屈した。従って、圧縮力を負担する斜め筋は座屈まで最大耐力以後の耐力低下を抑える効果があるといえる。

斜め筋による各試験体の耐力上昇と引張力を

を負担する斜め筋の有効断面積($eAsd=Asd \cdot \cos \alpha$ 、 Asd :引張力を負担する斜め筋のみの断面積、 α :斜め筋が水平方向と成す傾き角度)との関係を図9に示す。斜め筋が配筋されてない試験体W04AX-0を基準として各試験体の最大耐力を比較した。図中で○印と□印は各々試験体W04AXおよびW03Xタイプの実験値である。また、点線と実線は引張力を負担する斜め筋のせん断耐力で、試験体W04AX-0の実験値を基準にして引いたものである。この線の傾きは引張力を負担する斜め筋の有効断面積による最大せん断耐力の増加を表す。試験体W04AXタイプとW03Xタイプ共に斜め筋による最大せん断耐力の上昇は引張力を負担する斜め筋の断面積にほぼ比例して増加する。

4.2 変形性能

各試験体の荷重-変形包絡線を図10に示す。各試験体の変形能を最大耐力時の変形と最大耐

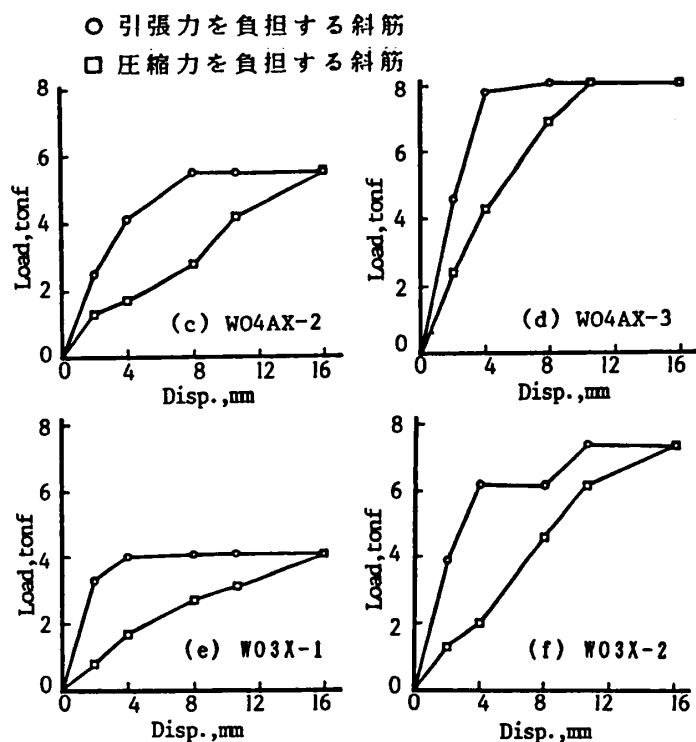


図8 斜め筋の負担力

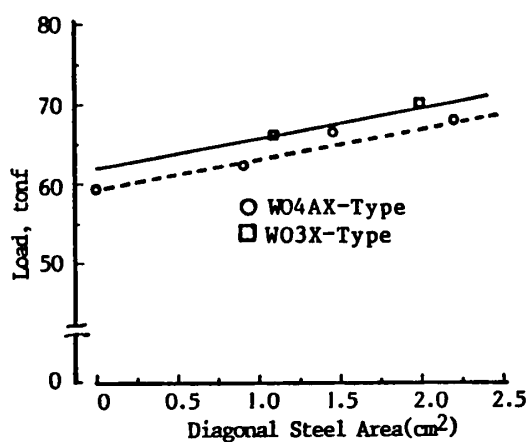


図9 斜め筋による最大耐力の上昇

の80%に耐力が低下した時の限界変形能(R_u)を見ると、斜め筋が少ない試験体(W04AX-0、W04AX-1、W03X-1)は 7×10^{-3} rad程度の限界変形能を示すのに対し、斜め筋が多い試験体(W04AX-2、W04AX-3、W03X-2)は 10×10^{-3} rad以上の限界変形能を示す。

4.3 セン断終局強度

実験から得られた各試験体の最大耐力を既往のせん断終局強度算定式で求めた計算値と比較して表3に示す。ここで、既往のせん断終局強度の算定式には斜め補強筋による上昇耐力を評価することができないので、斜め筋による上昇耐力の評価は引張力を負担する斜め筋の断面積で計算したPaulay等[2]の提案式($Q_{sd} = eA_s d \cdot \sigma_y \cdot \cos \theta$)を用いて計算し、既往の耐震壁のせん断終局強度式に開口低減率をかけた値を累加した。実験値と計算値には算定式によってかなりばらつきがある。荒川式[3]と広沢式[3]は、頂部加力スタブ(梁)の影響を評価できないため、実験値を過小評価する結果となった。

5 結論

以上の実験結果から次のような結論を得た：

①開口横の左右壁部の斜め補強筋は、そのうち引張力を負担する鉄筋がせん断耐力に寄与し、また圧縮力を負担する斜め補強筋は最大耐力以後の変形性能を向上させる効果がある。

②学会規準が定める開口周囲の縦横補強筋は開口隅角部から始まるひび割れに多少影響するが、開口壁の破壊および変形性能にはほとんど影響を及ぼさなかった。壁筋を開口周囲の縁引張力に有効に働くよう開口縁に寄せて配筋した場合、開口周囲の縦横補強の効果があり、補強筋の挙動から見ると開口周囲の縦筋に大きな応力が生じ、縦補強筋の役割が重要と考える。

③開口横壁を斜め筋で補強することにより開口上下及び開口隅角部に応力が流れ、大きな変形をもたらすことが明らかになった。特に、斜め筋の定着が切れる開口上下でのひび割れ幅が大きく開き、せん断破壊した。開口横壁を補強するに当たってこの点に十分注意が必要である。

[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、1982年。

[2]Paulay, T., and Syngé, A. T., : Ductility in Earth-quake Resisting Squat Shear walls, ACI Journal, V. 79, No. 26, July-August, 1982, pp257-269.

[3]日本建築学会：耐震設計における保有耐力と変形性能、1981年。

[4]Barda, F., Hanson, J., and Corley, N. G., : Shear Strength of Low-Rise Walls with Boundary Elements, Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones, SP53-8, ACI, 1977, pp149-202.

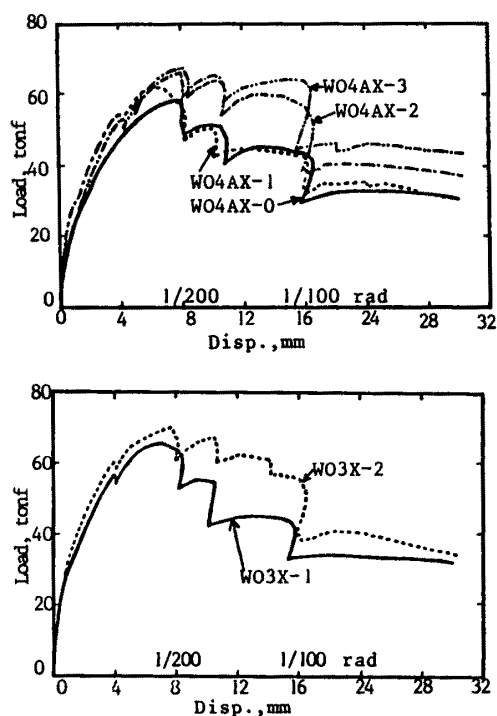


図10 荷重－変形包絡線

表3 各試験体のせん断終局強度

試験体	eQsu tonf	Qsd tonf	Qsu1 tonf	Qsu2 tonf	Qsu3 tonf
W04AX-0	59.4	0	48.0	42.0	58.6
W04AX-1	62.3	3.2	51.2	45.2	60.8
W04AX-2	66.5	5.3	53.3	47.1	63.7
W04AX-3	67.9	8.0	55.7	49.8	66.4
W03X-1	66.2	4.1	59.6	52.8	72.0
W03X-2	70.2	7.4	62.9	56.1	75.4

eQsu：実験値、Qsd：斜め筋の負担分
Qsu1：広沢式[3]、Qsu2：荒川式[3]
Qsu3：Barda式[4]