

論文

[2224] FEM解析による鉄筋コンクリート造連層耐震壁のせん断強度に関する研究

范 啓民*¹ 野口 博*²

1. はじめに

日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」¹⁾の塑性理論に基づいた耐震壁のせん断強度式(以後指針式と呼ぶ)では、中間梁の主筋は壁のせん断強度に直接には寄与しないものとし、せん断抵抗機構を層間トラス機構と層間アーチ機構に分離し、それらの和としてせん断強度を各層毎に算定する。しかし、トラス機構の角度は、せん断スパン比に関わらず45度に固定されている。筆者らの研究では、連層耐震壁の実験結果との比較によれば、指針式に従い階高を用いて算定したせん断強度は実験値を過大評価する傾向にある²⁾。最近では、壁谷澤は、中間梁の主筋がせん断強度に寄与するものとし、連層耐震壁全体を連層アーチ機構、梁筋トラス機構と壁筋トラス機構に分離し、それらをまとめて設計する方法(以後壁谷澤式と呼ぶ)を提案し³⁾、実験結果により検証している。また、長沼は、連層耐震壁を一つの壁と見なし、中間梁の主筋が壁横筋と同等程度で壁のせん断強度に寄与するものとし、せん断強度を算定する設計法(以後長沼式と呼ぶ)を提案し⁴⁾、有限要素解析により検証している。しかし、3層以上の実験データが極めて少ないため、両式の連層耐震壁に対する適用性を有限要素解析により詳細に検証する必要があると思われる。そこで本研究では、有限要素解析手法を用い、4~8層の幅高さ比の大きな連層耐震壁を中心に、せん断強度への影響因子をパラメータとした解析を行い、せん断強度に及ぼす因子の影響度及び指針式や既往の提案式の妥当性を検討する。

2. 有限要素解析手法及び検証

2.1 材料特性

コンクリートの構成則には、Darwin-Pecknoldの等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル⁵⁾を用いた。解析では、平面応力場を仮定しているため、柱のコアコンクリートの帯筋による拘束効果が考慮できない。そこで、修正Kent-Park式⁶⁾により帯筋の拘束効果を評価した。梁に関しても肋筋があるために、柱と同様の扱いとした。二軸応力下の破壊条件には、Kupferらの条件⁷⁾を用いている。ひび割れは要素内に一様なひび割れが生じると仮定する分布ひび割れモデルで表現した。また、ひび割れ面間の骨材の噛み合い効果については、Al-Mahaidi式⁸⁾を用い、ひび割れ直交方向の引張ひずみの増大に伴い減少するせん断剛性として評価した。鉄筋はRC積層要素としてモデル化した。鉄筋とコンクリートの付着については、白井式⁹⁾を用い、コンクリートの引張剛性効果として考慮した。ひび割れ発生後のコンクリート圧縮強度は、一軸圧縮強度より低下することを考慮し、濱田・野口式¹⁰⁾による圧縮低減係数で評価した。

表-1 試験体一覧表

試験体名	層数	文献No.	試験体名	層数	文献No.
W7501	2	11	78D3	3	15
W7502	2	11	78D3H	3	15
W7503	2	11	78D5	3	15
W7601	2	12	78D5H	3	15
W7602	2	12	78D5HW	3	15
W7603	2	12	302	3	16
W7604	3	13	402	3	16
W7605	3	13	404	3	16
W7606	2	13	406	3	16
76W101	3	14	W4BFN0	4	17
76W201	3	14	W4BFN1	4	17
76W401	3	14	W4SFN2	4	17

*1 千葉大学大学院生 工学研究科建築工学専攻 (正会員)

*2 千葉大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

2.2 解析対象試験体

連層耐震壁のせん断強度に関して解析モデルの適用性を検証するために、既往の実験から連層耐震壁の試験体を24体(2層:7体、3層:14体、4層:3体)選定し、解析対象とした。選定した試験体を表-1に示す。シアスパン比は0.83~1.5、コンクリート強度は193~372kgf/cm²、壁筋比は0.2~0.86%、試験体はいずれもせん断破壊したものである。

2.3 実験結果と解析結果の比較

3試験体を一例として、荷重-変位関係の実験結果と解析結果を図-1に示す。また、全試験体のせん断強度の実験結果と解析結果との比較を図-2に示す。せん断強度に関しては解析は実験との差が6%以内に収まり、実験結果を良好に捉えている。また、ひび割れ状況及び破壊位置についても実験結果とほぼ一致し、実験結果を概ね良好に捉えた。但し、約1/4の試験体(3層:5体、4層:2体、各層加力)では、解析では変形が過小評価される傾向があった。これは、解析では、正負繰り返し载荷の影響、基礎スラブからの縦筋の抜け出し等を考慮していないことによると考えられる。以上の検証結果より、本研究で用いた解析モデルは、連層耐震壁の最大耐力については精度良く評価できることを確認した。

3. 有限要素解析による数値実験

本研究では、背の高い連層耐震壁を中心に、せん断強度に着目し、それに影響を与える因子の内、壁筋量、壁の幅高さ比(ここでいう幅高さ比とは、H/Lと定義する。H:上梁上面までの壁の全高、L:側柱の芯間距離。以後同様とする)、加力方法、柱軸力比及び中間梁の有無を取り上げ、それらをパラメータとする有限要素解析による数値実験を実施した。

3.1 数値実験計画

既往の実験研究において3層以上の試験体は極めて少ないために、本研究では、12層R

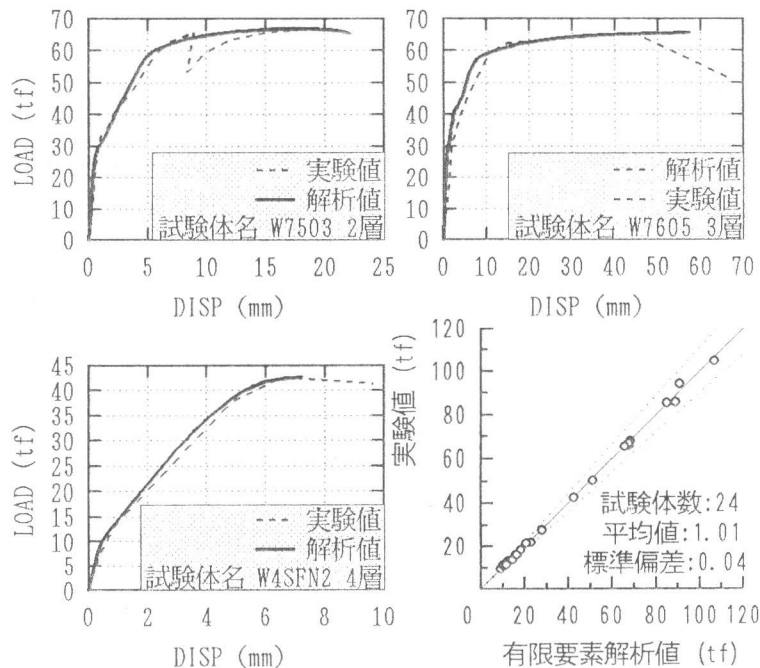


図-1 荷重-変位図 図-2 実験値と解析値の比較

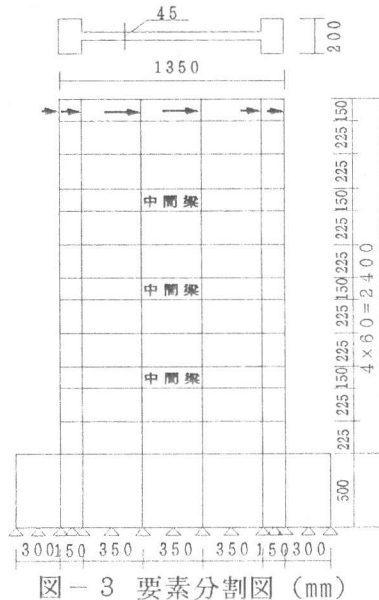


図-3 要素分割図 (mm)

表-2 仮想試験体諸元一覧表

シリーズ	層数	H/L	壁筋比 (%)	変動因子
A41-A46	4	2	縦横共 各シリーズ 0.25~2.0 0.25, 0.5 0.75, 1.0 1.50, 2.0	頂部加力
A61-A66	6	3		中間梁無
A81-A86	8	4		頂部加力
B41-B46	4	2		中間梁有
B61-B66	6	3		頂部加力
B81-B86	8	4		各層加力
C51-C56	5	2.5		頂部加力
D71-D76	7	3.5		各層加力
F41-F46	4	2		頂部加力
E61-E66	6	3		柱軸力比
E81-E86	8	4		L/10Fc
F41-F46	4	2		頂部加力
F61-F66	6	3	柱軸力比	
F81-F86	8	4	L/6Fc	
柱	主筋比: 3.5%		帯筋比: 1.0%	
梁	主筋比: 1.0%		肋筋比: 0.3%	
コンクリート				
ヤング係数	圧縮強度	引張強度		
kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²		
2.17×10 ⁴	264.0	24.0		
鉄筋				
ヤング係数	降伏強度	弾性材料		
kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²		
柱主筋	2.1×10 ⁶	3500		
梁主筋		3000		
せん断補強筋		3000		

C造壁フレーム構造の設計例に基づき、連層耐震壁最下層8層を約1/6のスケールで取り出し、解析対象とする。柱断面は20x15cm、梁断面は15x15cm、壁厚は4.5cm、階高は60cmである。数値実験に用いた試験体寸法及び要素分割を図-3に、試験体の諸元を表-2に示す。各シリーズともに、壁筋比を0.25%~2%まで変化させている。なお、本研究では、せん断強度の検討を目的としているので、柱の主筋を弾性材料とし、上梁を剛体として計算した。

3.2 数値実験結果の検討

(1)壁筋比の影響 解析結果より壁高さ方向に沿って、最大せん断力を、側柱分、アーチ機構分、トラス機構分に分離し、その各負担割合についてA41、A44及びA46試験体を一例として図-4に示す。側柱の負担せん断力は、解析結果の両側柱のせん断応力分布から求めたものであるが、トラス機構及びアーチ機構のせん断力は、井上、鈴木らの研究^{1,8)}に基づいて求めた。図-4に示すようにトラス機構負担割合は、壁の上

下端で水平方向の変形が拘束されるため、壁の中腹で最大となり、壁筋比の増加に伴い負担率が大きくなる。アーチ機構負担率は、壁筋比が小さい場合には最も大きいですが、壁筋比の増加に伴い逆に中腹で減少する。側柱の負担率は引張側柱の柱頭と圧縮側柱の柱脚で大きくなる。6層及び8層の試験体においても同様な傾向が見られた。また、Aシリーズ試験体の最下層の破壊断面における各機構と側柱のせん断力負担分布を図-5に示す。

側柱の負担せん断力については、図-4に示すように最下層において引張側柱ではほとんどせん断力を負担せず、その大部分は圧縮側柱の負担せん断力である。図-5より壁筋比の増加に伴い、トラス機構の負担せん断力が増加しているのに対し、柱及びアーチ機構の負担せん断力はほとんど変化していないことが確認された。すなわち、壁筋比の増加によるせん断強度の上昇は、そのほとんどがトラス機構の

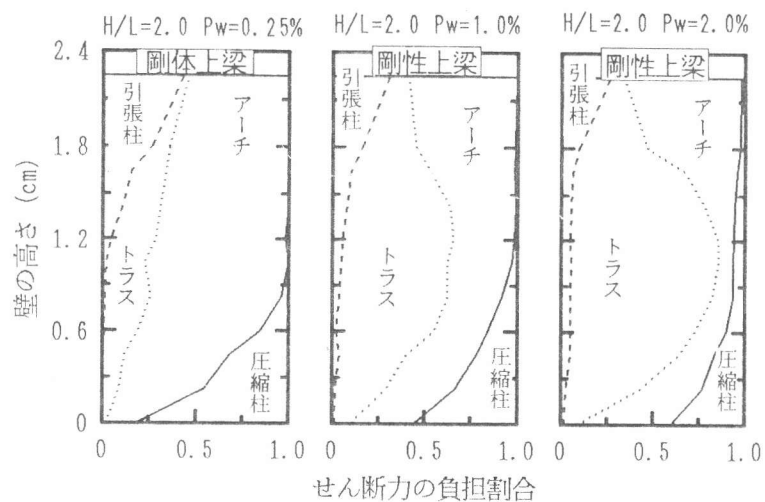


図-4 せん断強度時のせん断力負担割合図

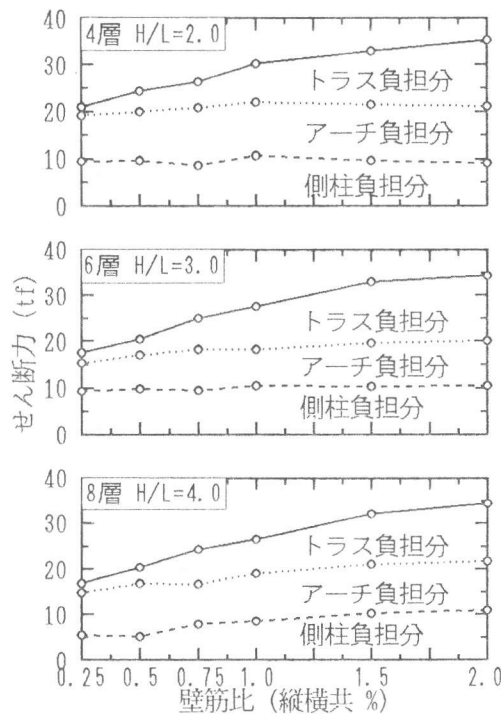


図-5 最下層のせん断強度時のせん断力負担分布図

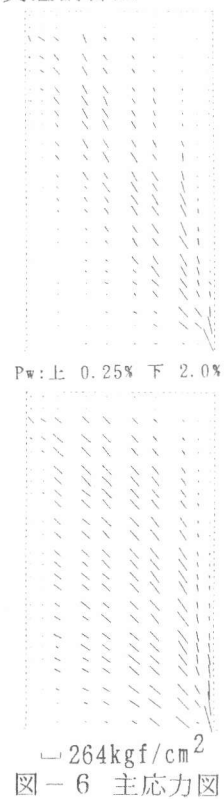


図-6 主応力分布図

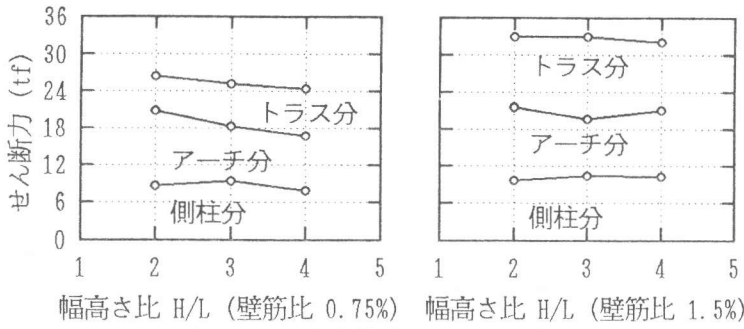


図-7 幅高さ比とせん断強度の関係

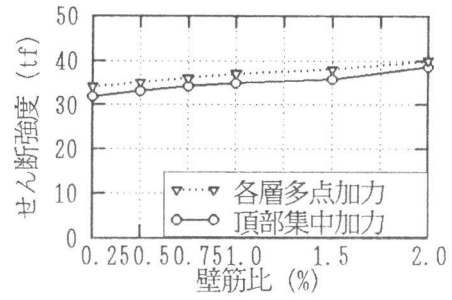


図-8 加力方法とせん断強度の関係

負担せん断力増加によるものである。図-6にA41とA46試験体の最大耐力時の主応力を示す。図-6より、壁筋比 P_w の小さい場合には、加力点と圧縮柱脚部を結ぶ力の流れが支配的であり、アーチ的なものが主となる。それに対して、 P_w の大きい場合には、圧縮応力が壁全域に分布し、トラス的なものが主となることが分かった。また、主応力の角度については、両者の違いが顕著に見られる。これよりトラス機構とアーチ機構の角度の違いを考慮する必要があると考えられる。

(2)幅高さ比の影響 各負担せん断力及び全せん断力と幅高さ比の関係について壁筋比0.75、1.5%の試験体を例として図-7に示す。壁筋比が低い場合では、せん断強度が幅高さ比の増加に伴い低下したが、せん断力の負担割合の大部分が柱及びアーチ機構によるものである。壁筋比の増加に従いトラス機構の負担分が増加し、幅高さ比がせん断強度に及ぼす影響は減少し、 $P_w=1.5\%$ の場合では、その影響はほとんど見られない。

(3)加力方法の影響 頂部加力の5層に対し、等価なシアスパン比が等しくなる7層の各層に逆三角形分布荷重を作用させ、そのせん断強度の比較を図-8に示す。頂部加力の場合に比較して各層加力では耐力が増加する傾向が見られるが、その量は僅かなもので、両者の加力方法がせん断強度に与える影響には顕著な差は見られない。

(4)柱軸力比の影響 図-9にせん断強度と柱軸力比の関係について示す。本解析では、軸力を柱のみに作用させた。 $H/L=2$ の場合では、軸力の増加に伴いせん断強度がやや増加しているが、 H/L の増加に従いこの影響は減少し、 $H/L=4$ ではほとんど見られない。これらより軸力はせん断強度にほとんど影響しないと考えられる。8層において $P_w=2\%$ の試験体では、せん断強度は軸力の増加によって逆に低下した現象が生じた。この原因としては、図-10に示すように軸力の増加に従い、アーチ機構の負担せん断力は増加するが、側柱と

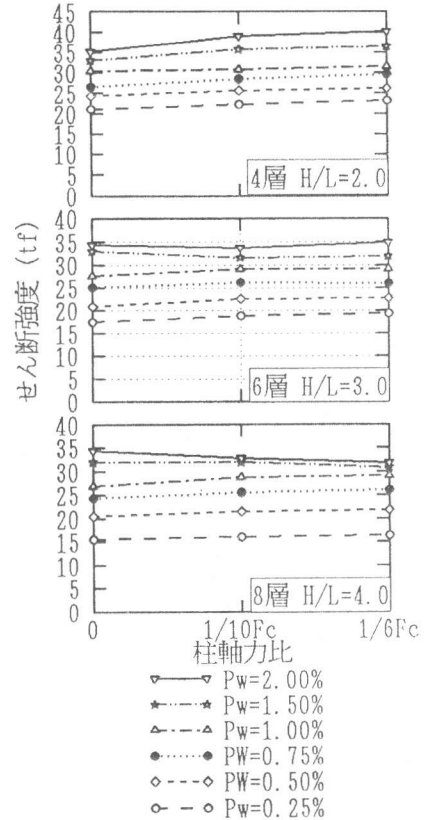


図-9 柱軸力比とせん断強度の関係

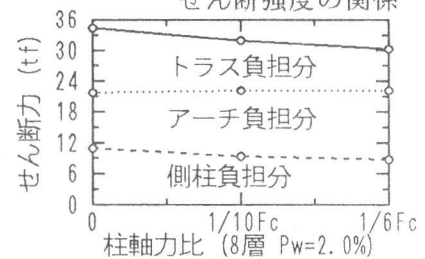


図-10 せん断強度時のせん断力負担分布関係

表-3 Gシリーズ試験体一覧表(頂部加力)

シリアル 層数	H/L	壁横筋 比(%)	梁主筋 比(%)	等価な壁 横筋比(%)	壁縦筋 比(%)	比較用 試験体
G41	4	0.25	0.375	0.5	0.5	A42
G42			0.975	1.0	1.0	A44
G43			1.575	1.5	1.5	A45
G81	8	0.25	0.375	0.5	0.5	A82
G82			0.975	1.0	1.0	A84
G83			1.575	1.5	1.5	A85

傾向が壁筋比が2.0%の試験体においては最も顕著に見られた。中間梁がある試験体の計算では、指針式で仮定しているように $\cot\phi=1.0$ とし、梁筋を考慮せず、階高を用いた計算値は、ほとんど解析値を上回っており、危険側に評価していることがわかった。長沼式については、中間梁の主筋を等価な壁横筋比に換算し、壁横筋比を増すことにより、層間アーチ機構を間接的に考慮する。すなわち、計算上では、層間アーチ機構+梁筋トラス機構=全体トラス機構と考えている。但し、トラス角度は指針式と同様に $\cot\phi=1.0$ と仮定している。中間梁の無い試験体の計算値は、全て解析値を下回り、計算値と解析値の差は平均0.72である。中間梁がある試験体の計算値は、解析値とほぼ対応している。これらから連層耐震壁を一つの壁と見なしてせん断強度を算定する方法は合理的であり、ほとんど安全側に評価されることが認められる。壁谷澤式については、計算上では基本的に長沼式と同様であるが、 $\cot\phi=1.5$ と仮定している。中間梁の無い試験体の計算値は、指針式の計算値と等しい。中間梁がある試験体の計算値は、長沼式計算値に比べ、やや高くなり、解析値に接近した。背の高い耐震壁の場合には、低壁筋比のものに対しては（本研究では、 $p_w=1.0\%$ 以下）、 $\cot\phi=1.5$ の仮定の方が合理的と考えられるが、今後 FEM解析での応力の角度の評価などによる検討が必要である。

5. まとめ (1)連層耐震壁のせん断抵抗機構においては、側柱と壁板のコンクリートによるアーチ機構の負担せん断力はほぼ一定値で、壁筋比の増加によるせん断強度の上昇は、そのほとんどがトラス機構の負担せん断力増加によるものである。
- (2)せん断強度が幅高さ比の増加に伴い低下するが、壁筋比の増加に従い、幅高さ比のせん断強度に及ぼす影響は減少する。
- (3)頂部加力と各層加力に比べ、加力方法がせん断強度に与える影響は顕著には見られない。
- (4)側柱軸力はせん断強度にほとんど影響しない。
- (5)中間梁のあるものと中間梁の無いものに比較すると、せん断強度がやや高くなるが、大きな違いが見られなかった。
- (6)連層耐震壁全体を一つの壁板とみなし、中間梁の主筋を考慮してせん断強度を算定する方法は、せん断強度を合理的かつ安全側に評価することが FEM解析による検討から認められたが、背の高い連層耐震壁に対しては、 $\cot\phi=1.0$ の仮定を FEM解析での応力の角度の評価などにより、再考する必要がある。

【謝辞】本研究は、文部省科研費補助金（総合研究(A):課題番号0430249、研究代表者 野口 博）による分担研究である。

【参考文献】1)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 2)范 啓民、野口 博：鉄筋コンクリート造耐震壁のデータベースによるせん断度、終局変形のAIJ指針式に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.339-340、1992.8 3)壁谷澤寿海：連層耐震壁の設計法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.357-358、1992.8 4)長沼一洋：鉄筋コンクリート連層耐震壁の設計法に関する研究（その2）連層耐震壁のせん断強度の算定法、（その3）連層耐震壁の設計法の試案とその検証、1993年度日本建築学会関東支部研究報告集（構造系）、pp.105-112 5)Darwin, D. and Pecknold, D. A. W., "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete", University of Illinois, UILU-ENG-74-2018, 1974 6)Park, R., Priestley, M. J. N. and V. D. Gill: Ductility of Square Confined Concrete Columns, Proceedings ASCE, Vol. 1, 108, ST4, April 1982, pp. 929-950 7)Kupfer, H. B. and Gerstie, K. H., "Behavior of Concrete Under Biaxial S-tresses", Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 99, No. EM4, Aug-ust, 1973, pp. 853-866 8)Al-Mahaidi, R. S. H., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members", Report No. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, January 1979 9)佐藤稔夫、白井伸明、加藤庄二：RC耐震壁の履歴特性と非弾性解析（解析用付着モデルとその検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1803-1804、昭和55年9月 10)大久保雅章、濱田 聡、野口 博：地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験、第11回コンクリート工学年次論文報告集11-1, pp. 323-326, 1989 11)大野 新、安達 洋ら：鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究（その7）荷重履歴・柱帯筋量シリーズ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1601-1602、1976.10 12)大野 新、安達 洋ら：鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究（その16）柱帯筋量・壁筋量シリーズ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1631-1632、1977.10 13)遠藤利根穂、齊藤完治：鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究（その17）シアスパン比シリーズ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1633-1634、1977.10 14)佐藤稔夫、大野 新、安達 洋ら：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する実験研究（その1）実験概要並びに結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1645-1646、1977.10 15)狩野芳一、高木仁之：小型3層鉄筋コンクリート耐震壁の強度及び変形性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1535-1536、1979.9 16)狩野芳一、高木仁之：鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究（その10.3層耐震壁における壁筋量の効果）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1607-1608、1976.10 17)柴田拓二、平吹雅弘、後藤康明、城 攻：鉄筋コンクリート造連層耐震壁の変形挙動（その1～その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.573-578、1990.10 18)井上範夫ら：鉄筋コンクリート壁の耐震機構に関する研究（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.385-388、1987.10