

報告
 [2097] 鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の終局強度に関する基礎的研究

正会員 ○犬飼 瑞郎(建設省)
 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

現在まで、鉄筋コンクリート造開口耐震壁(以降、開口壁という)の実験的研究では、1層1スパン単位に製作した試験体が実験されてきた。その破壊性状は、図1 既往の実験[1]のような、開口左右両側の袖壁部分の斜めひび割れによるせん断破壊である。斜めひび割れは、圧縮側の開口隅角部から加力点に向かうものであり、このひび割れが進展して開口壁は耐力低下する。

また、開口壁には、開口補強筋を配筋する必要があると「鉄筋コンクリート構造規準・同解説」(1982年版)では述べられている。開口補強筋の配筋は、弾性論に基づいて求めた開口隅角部に生じる応力に開口補強筋が抵抗するように決められており、コンクリートにひび割れが生じた以降については考慮されていない。開口壁を終局状態まで調べた既往の研究[2]では、開口補強筋が開口壁のせん断耐力に寄与しないことが指摘されている。

本研究では、不静定構造物である開口壁の終局強度を検討するために損傷の大きい開口左右両側の袖壁部分を

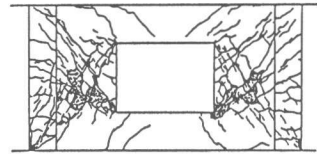
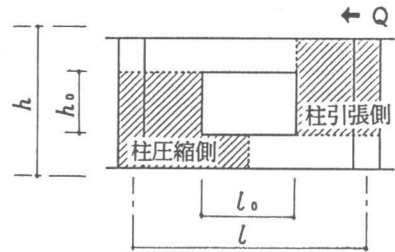
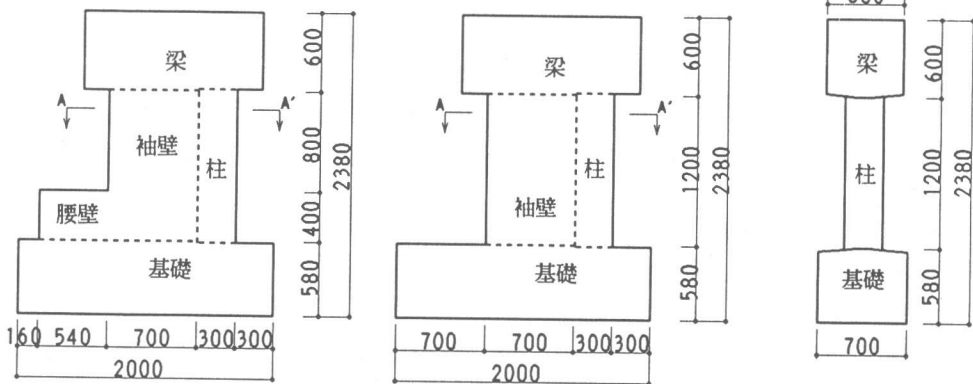


図1 既往の実験



h_o : 開口部の高さ
 h : 壁板周辺の梁中心間の距離
 l_o : 開口部の長さ
 l : 壁板周辺の柱中心間の距離

図2 試験体の切り出し図



(a-1) 柱圧縮型試験体
 (試験体I-05C, I-14C)

(a-2) 柱引張型試験体
 (試験体I-05T, I-14T)

全試験体共通

(b) 立面図2

(a) 立面図1

図3 試験体の概形図

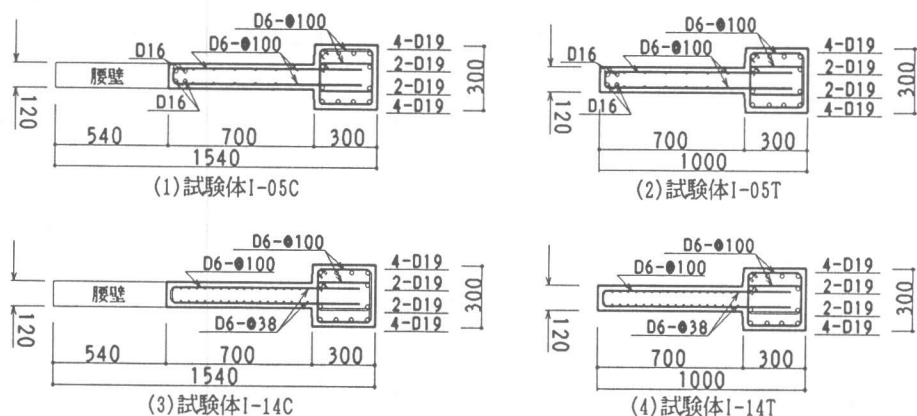


図4 A-A'断面図(図3 参照)

表1 試験体概要 (単位:mm)

試験体	寸法		配筋		開口補強筋
	壁板	柱・梁・基礎	壁	柱	
I-0.5C	700x120 540x120	柱 :300x300	縦筋 2-D6-φ100 $p_v=0.53\%$ 横筋 2-D6-φ100 $p_h=0.53\%$	主筋 12-D19	縦:4-D16 横:3-D16
I-0.5T	700x120	梁 :600x600	縦筋 2-D6-φ100 $p_v=0.53\%$ 横筋 2-D6-φ100 $p_h=0.53\%$	$p_n=3.8\%$	縦:4-D16 横:3-D16
I-1.4C	700x120 540x120	基礎 :580x700	縦筋 2-D6-φ38 $p_v=1.4\%$ 横筋 2-D6-φ100 $p_h=0.53\%$	せん断補強筋 2-D6-φ100	なし
I-1.4T	700x120	(縦x横)	縦筋 2-D6-φ38 $p_v=1.4\%$ 横筋 2-D6-φ100 $p_h=0.53\%$	$p_w=0.43\%$	なし

切り出し、ひび割れ(図1参照)を模擬するように設計した試験体(図2)を破壊する実験を行ない、壁縦筋の配筋の違いによる終局強度の変化を調べた。ここでは、その実験結果を報告する。

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1/2スケール、開口周比($\sqrt{h_o \cdot l_o / h \cdot l}$)=0.4、1層1スパンの開口壁の一部で、柱圧縮型試験体2体(試験体名I-05C, I-14C)と柱引張型試験体2体(試験体名I-05T, I-14T)の、合計4体である。配筋は試験体に加力点から反対側の加力点に向う斜めひび割れを生じさせせん断破壊させるように決めた。各試験体の概形を図3、断面図を図4に、試験体の概要を表1に示す。柱主筋12-D19(柱の全主筋比 $p_n=3.8\%$)、柱のせん断補強筋2-D6-φ100(せん断補強筋比 $p_w=0.43\%$)、壁横筋2-D6-φ100(壁横筋比 $p_{n,h}=0.53\%$)とした。

各試験体の名前とパラメータを表2に示す。試験体名は、I-ではじまり 05, 14は壁縦筋比を意味する。最後に付いている C, Tがそれぞれ柱圧縮型試験体、柱引張型試験体を表す。柱圧縮型試験体では、基礎との危険断面に曲げひび割れが生じないように壁縦筋を十分に配筋してある腰壁を付けた。開口補強筋の効果を調べるために壁板内の縦筋の配筋を変え、試験体I-05C, I-05Tでは開口補強筋4-D16と壁縦筋2-D6-φ100(壁縦筋比 $p_v=0.53\%$)であり、試験体I-14C, I-14Tでは壁板内にある縦筋の総断面積が試験体I-05C, I-05Tの壁板内の縦筋とほぼ同じになるように等間隔に

表2 試験体のパラメーター

試験体名	I-05C	I-05T	I-14C	I-14T
腰壁	有り	無し	有り	無し
開口補強筋	有り	有り	無し	無し
壁縦筋比 $p_v(\%)$	0.5	0.5	1.4	1.4

D6を配筋し壁縦筋のみの2-D6-@38(壁縦筋比 $p_v=1.4\%$)である。

2. 2使用材料：試験体に用いたコンクリート及び鉄筋の材料特性を表3に示す。コンクリートの設計強度は 220kgf/cm^2 であり、鉄筋は全てSD30を用いた。

2. 3加力装置：軸力は一定とし、柱1本に固定荷重による60tonfと、図5のように開口壁を袖壁と柱の重心位置を柱とし、垂れ壁と梁の重心位置を梁としたフレームに置換し、反曲点が袖壁中央にあると仮定して求めた変動軸力の最大値40tonfを加減し、試験体I-05C、I-14Cの軸力を100tonf、試験体I-05T、I-14Tのを20tonfとした。水平力は梁下端から150mmの位置に加力芯がくるようにし、片持梁形式である。加力方法は、柱圧縮型試験体と柱引張型試験体とで模擬しようとしているひび割れが違いため単調漸増荷加力とした。加力装置図を図6に示す。水平変位は、試験体の圧縮縁位置で加力芯の高さの、表裏2箇所測定した値の平均値とした。

3 実験結果

3. 1破壊経過：各試験体の最終ひび割れ状態を図7に示す。

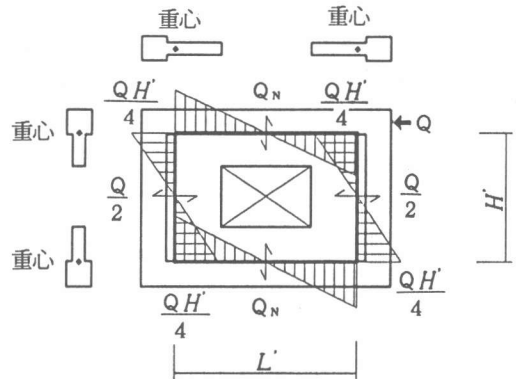
試験体I-05C、I-14Cでは、開口隅角部に斜め引張りひび割れ、壁板に加力点から柱脚に向う斜めひび割れ、柱脚に斜めひび割れ、の順でひび割れが発生した。壁板に斜めひび割れが生じて剛性が低下した。開口隅角部から柱脚に伸びた斜めひび割れと柱脚の斜めひび割れが開き圧縮コンクリートの圧壊によって、耐力低下した。壁板に入った斜めひび割れと柱脚に入った斜めひび割れとはつながらず、それらのひびわれをつなげるコンクリートの圧壊が壁板と柱の接合部で生じた。試験体I-05C、I-14Cの最終的な破壊形式は、圧縮縁のコンクリートの圧壊と斜めひび割れでのコンクリートの滑りによる斜め圧縮せん断破壊である。柱脚に入った斜めひび割れの傾き

表3 材料特性

鉄筋種類	(a)鉄筋		
	降伏強度 σ_y $\times 10^3\text{kgf/cm}^2$	降伏歪 ϵ_y $\times 10^{-3}\text{mm/mm}$	弾性係数 E_s $\times 10^6\text{kgf/cm}^2$
D6	3.56	2.28	1.56
D16	3.56	2.04	1.75
D19	3.46	1.88	1.84

試験体名	(b)コンクリート		
	圧縮強度 F_c kgf/cm^2	圧縮歪度 ϵ_c $\times 10^{-3}\text{mm/mm}$	弾性係数 $E_{1/4}$ $\times 10^6\text{kgf/cm}^2$
I-05C	212	3.28	2.63
I-14C	220	3.06	2.57
I-14T	222	3.20	2.43

$E_{1/4}:F_c$ の1/4の荷重での割線剛性



$$Q_N = \frac{QH'}{2L'} \quad \begin{array}{l} H' : \text{置換フレームの梁間距離} \\ L' : \text{置換フレームの柱間距離} \end{array}$$

図5 開口壁のフレーム置換モデル

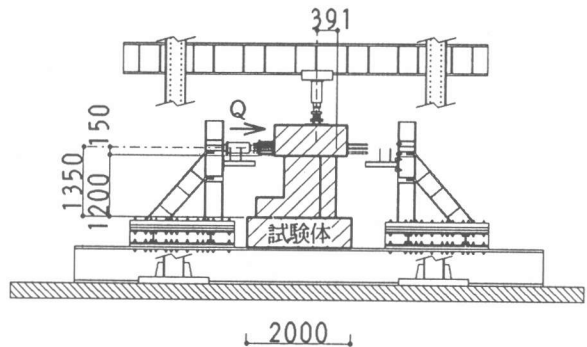


図6 加力装置図

は試験体I-05C、I-14Cとも同じであるが、壁板内で最も開いたひび割れは、試験体I-05Cでは水平方向から約30°傾いていたのに対して、試験体I-14Cではほぼ水平になっていた。

試験体I-05T、I-14Tでは、柱脚に曲げひび割れ、加力点から反対側の加力点に向う斜めひび割れの順でひび割れが発生した。斜めひび割れが壁板と柱頭に生じると剛性が低下し、圧縮縁のコンクリートが圧壊して、最終的に曲げ圧縮破壊した。圧縮縁で部材の厚さが薄くなっているのに対して引張側の柱主筋量が多いため圧縮コンクリートの圧壊が著しく、柱脚で曲げひび割れが開くことはなかった。圧縮縁に開口補強筋がある試験体I-05Tではコンクリートの圧壊する範囲は圧縮縁から約40cmであったのに対して、試験体I-14Tではコンクリート圧壊の範囲は圧縮縁から約60cmであった。

3.2 荷重-変形関係：各試験体の荷重-変形関係を図8に示す。ここで、水平荷重は水平力用加力ジャッキに取り付けたロードセルの値を、軸力によるP- δ 効果の補正をした値である。部材角は、水平変位を基礎から加力芯までの高さ(1350mm(図6参照))で除した値である。剛性の低下を調べるために、水平荷重が最大耐力の1/4を越えた直後の測定点と原点を結んで求まる割線剛性と、ある測定点とその直後の測定点を直線で結んでもとめた剛性を比べた。耐力低下については、最大耐力を記録した後に水平荷重が最大耐力の80%に落ちた時を限界変形として述べる。図8中の①は軸力導入時、②は水平荷重が最大荷重の1/4を越えた直後、③は剛性が②の時の割線剛性の1/10以下になった直後、④は最も引張側の鉄筋が引張降伏した直後、⑤は最大耐力時、⑥限界変形時である。(試験体I-14Cだけ③と④の発生する順番が入替わる。)

試験体I-05C、I-14Cは剛性が低下した後、部材角1/50を越えるまで耐力が低下せずに良好な変形性能を示した。耐力低下が起きると最大耐力の80%以下まで急激に耐力低下した。試験体I-05T、I-14Tは、剛性が低下し最大耐力を記録すると、すぐに耐力低下を起こした。

3.3 鉄筋の歪分布：各試験体の剛性低下がどこの鉄筋と関係しているかを調べるために、鉄筋の材軸方向と垂直な断面できったときの歪分布を図9に示す。図9の横軸は左縁からの距離、縦軸は

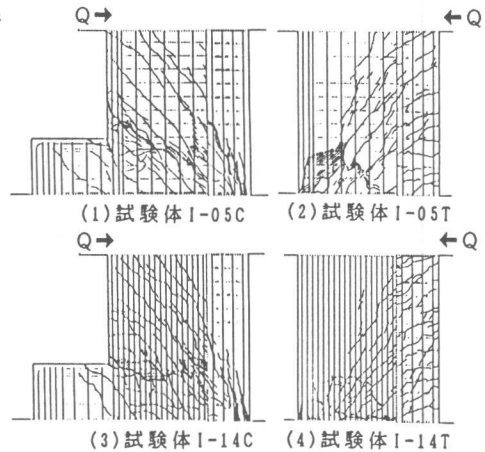


図7 最終破壊状態図

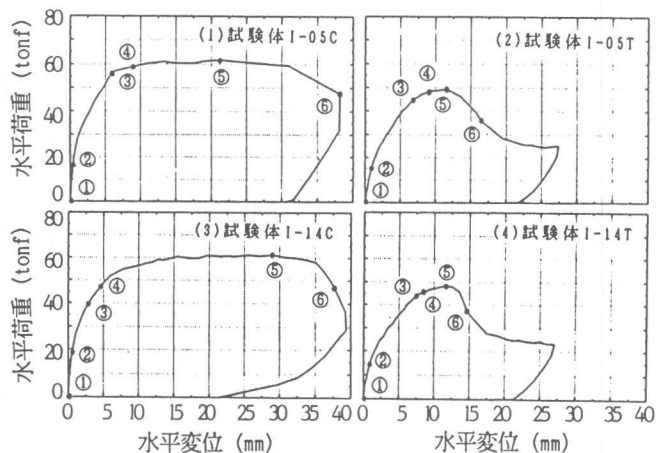


図8 荷重-変形関係

歪の値である。歪の値は正(+)が引張側で負(-)が圧縮側である。

図8との対応は、①が○—○、②が○—○、③が△—△、④が△—△、⑤が□—□、⑥が□—□である。

試験体I-05C、I-14Cの、開口補強筋を開口下辺で切った断面と、壁縦筋を開口下辺から下50mmで切った断面の歪分布(図9 (1-a), (3-a))を見ると、開口補強筋と壁縦筋の引張降伏によって、剛性が低下していることがわかる。図9 (1-b), (3-b)から、柱主筋は最大荷重時(⑤)以降最も圧縮側の主筋が圧縮側にあり壁板に近い主筋が引張側にあることから、歪が零になる中立軸は柱の中にあることがわかる。歪の大きさは、試験体I-14Cの壁縦筋のほうが試験体I-05Cのよりも小さかった。

試験体I-05T、I-14Tでは、壁の縦筋を基礎から50mmの位置で切った断面の歪分布(図9 (2), (4))から、剛性低下は圧縮領域内の開口補強筋の圧縮降伏によることがわかる。試験体I-05Tでは歪の大きさは剛性低下時(③)に $5 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$ 以下であるが、試験体I-14Tでは剛性低下時(③)に $5 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$ を越えており、縦筋を均等に配筋したほうが歪の進む大きさが大きいことを示している。

4 実験結果の考察

4.1 縦筋の配筋の違いによる効果：

各試験体の変形性能を表4に、柱圧縮型、引張型試験体の荷重-変形関

係をそれぞれ比較したグラフを図10に示す。開口補強筋のある試験体と縦筋を密に配筋した試験体とで、最大耐力、変形性能ともにほぼ同じだった。限界変形での部材角を比べると、試験体I-05Cは1/35.4、試験体I-14Cは1/36.4であり、試験体I-05Tは1/86.0、試験体I-14Tは1/91.8である。柱に圧縮がかかる試験体の変形性能が良好であった。

4.2 せん断終局耐力：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式で求めた計算値と比較を表5に示す。曲げ終局強度は、平面保持を仮定して求めており*) 圧縮縁のコンク

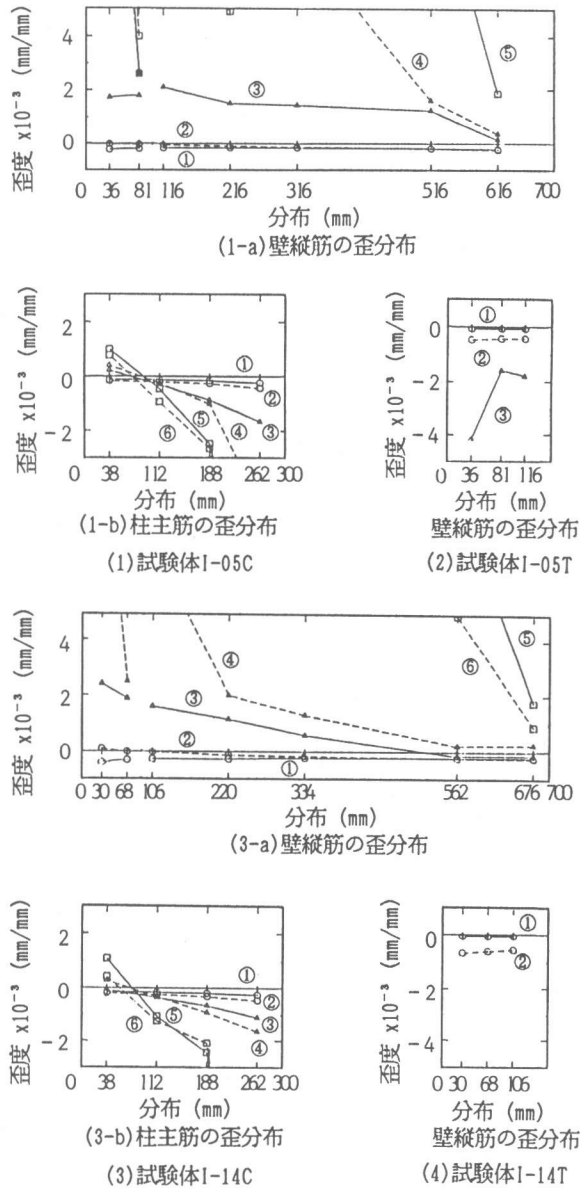


図9 歪分布図

リートの歪が0.4%になった時の値である。柱圧縮型試験体では開口下辺での高さで求めた値、柱引張型試験体では基礎との危険断面でもとめた値である。せん断終局強度は袖壁付き部材に用いる荒川mean式[3]を用いている。引張側の鉄筋は、壁板内の全縦筋とし圧縮縁から引張側鉄筋までの距離は、圧縮縁から壁板内の全縦筋の重心位置とした。計算で使った引張鉄筋の中心から圧縮までの距離(d_s [3])は、試験体I-05Cのが84.7cm、試験体I-14Cのが64.7cm(図4参照)である。試験体I-05C、I-14Cは、斜めせん断圧縮破壊であったがせん断終局強度の計算値が実験値を下回っていて、計算値の実験値との比はそれぞれ0.85、0.64であった。試験体I-05T、I-14Tは曲げ圧壊破壊であったが、曲げ終局強度の計算値が実験値を上回っていて、計算値の実験値との比はそれぞれ1.32、1.22であった。表4の計算値の実験値との比は、全試験体とも判断した破壊形式と違う破壊形式の計算値が0.9~1.1と良く対応した。

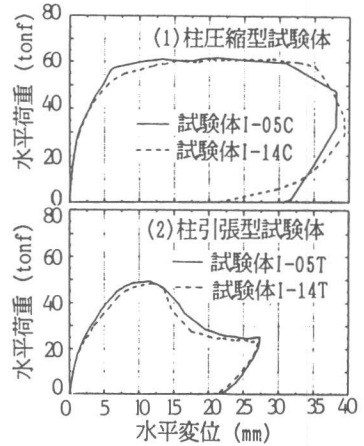


図10 荷重-変形関係

5 系吉言命

以上の実験結果から次の結論を得た。

(1) 柱圧縮型試験体(試験体I-05C、I-14C)では引張筋の重心位置を圧縮側に近づけても耐力が変わらず、壁縦筋の配筋の変化による耐力の違いは認められなかった。

(2) 柱引張型試験体(試験体I-05T、I-14T)では引張側にある柱主筋量が多いために部材中央付近までコンクリートが圧壊し、曲げ圧壊破壊でも急激な耐力低下を起こす。

表4 各試験体の変形性能

試験体名	最大耐力時			最大耐力の80%の時		
	荷重 (tonf)	変位 (mm)	部材角 (rad)	荷重 (tonf)	変位 (mm)	部材角 (rad)
I-05C	61.7	21.2	1/63.7	47.5	38.1	1/35.4
I-05T	49.2	11.6	1/116	35.5	15.7	1/86.0
I-14C	61.5	29.0	1/46.6	46.1	37.1	1/36.4
I-14T	48.1	11.8	1/114	36.9	14.7	1/91.8

表5 各試験体の終局強度

試験体名	実験値 Q (tonf)	計算値		計算値/実験値	
		Q _{mu} (tonf)	Q _{su} (tonf)	Q _{mu} /Q	Q _{su} /Q
I-05C	61.7	67.5	52.4	1.09	0.85
I-05T	49.2	64.7	50.5	1.32	1.03
I-14C	61.5	57.9	39.6	0.94	0.64
I-14T	48.1	58.8	50.5	1.22	1.05

Q_{mu}: 曲げ終局強度時のせん断力

Q_{su}: せん断終局強度(荒川mean式)

□: 判断した破壊形式での計算値の実験値との比

謝辞: 実験の援助をしてくれた大

内 栄生君(鹿島建設)に、感謝します。

*なお、曲げ耐力の計算には、東京大学大学院建築学専攻 青山・小谷研究室大学院生 李康寧の曲げ部材の耐力計算用プログラム「MVSC」を使った。

<参考文献> 1. 全 ほか、「鉄筋コンクリート造開口耐震壁の補強方法及び靱性」、コンクリート工学年次論文報告集 第10巻 第3号 1988年、pp415-420 2. 精木 他、「有開口鉄筋コンクリート耐震壁の変形と耐力について」、日本建築学会論文報告集、第293号、昭和55年7月、pp69-83 3. 日本建築学会、「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」