

論文 一定速度の水平力を受ける RC 有開口耐震壁の履歴性状

徳田 俊宏*¹・小野 正行*²・江崎 文也*³

要旨：曲げ破壊先行とせん断破壊先行の無開口耐震壁に開口を設けた有開口耐震壁について、載荷する水平力の載荷速度を一定に保持し、一定軸力下の正負交番漸増繰り返し水平力載荷実験を行い、RC有開口耐震壁の履歴性状に及ぼす載荷速度の影響について検討を行った。載荷する載荷速度は、0.01cm/secと1.0cm/secの2種類である。壁板の斜めひび割れや履歴曲線および破壊モードには載荷速度の影響が見られないこと、柱や壁板の損傷および最大強度にはその影響が見られることを示した。また、有開口耐震壁の最大強度は著者提案の耐力低減率を用いて大略評価されることを示した。

キーワード：有開口耐震壁、載荷速度、ひび割れ性状、破壊性状、最大強度

1. はじめに

地震のような比較的高速度の荷重を受ける構造物は大きなひずみ速度（変形速度）で変形をすると考えられるが、高速度の荷重を受けた時の面部材をもつ耐震壁の破壊性状や強度特性に関する研究は、著者等や深田および望月による報告^{1)~4)}しかなく、実験資料が少ないのが現状である。そこで、RC有開口耐震壁の弾塑性性状に及ぼす載荷速度の影響を検討するため、実物大の約1/4の大きさの無開口と有開口耐震壁の試験体に比較的低い載荷速度とその100倍の速さの載荷速度で載荷する実験を計画した。

本報告は、RC有開口耐震壁に載荷する水平力の載荷速度を一定に保持し、一定軸力下の正負交番漸増繰り返し水平力載荷実験から、RC有開口耐震壁の履歴性状に及ぼす載荷速度の影響について報告するものである。

2. 実験計画

2.1 試験体の形状・寸法・配筋

試験体は実物大の約1/4の大きさであり、その形状・寸法・配筋を表-1と図-1に示す。有開口耐震壁の試験体は、無開口耐震壁の試験体の曲げ破壊先行とせん断破壊先行の試験体に

表-1 試験体の形状・寸法・配筋・開口寸法

試験体	柱断面 b×D (cm×cm)	柱主筋	帯筋		壁厚 (cm)	壁筋		開口寸法 (cm)
			径-間隔 (mm)	Pw (%)		径-間隔 (mm)	Ps (%)	
F1W5-0.00-1.0	15×15	4-D10	φ4@50	0.35	5.0	φ4@50	0.52	-
F1W5-0.28-1.0								21.0×31.5
S1W5-0.00-1.0		6-D13						-
S1W5-0.00-0.0								-
S1W5-0.28-1.0								-
S1W5-0.28-0.0								21.0×31.5

* 1 近畿大学 産業技術研究科造形学専攻 院生（正会員）

* 2 近畿大学教授 九州工学部建築学科（正会員）

* 3 九州共立大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

表-2 使用材料の機械的性質

(2)コンクリート

試験体	σ_B	σ_t
FIW5-0.00-1.0	27.3	2.13
SIW5-0.00-0.01		
SIW5-0.00-1.0	27.7	2.01
FIW5-0.28-1.0		
SIW5-0.28-0.01	30.9	2.31
SIW5-0.28-1.0		

σ_B : シリンダー圧縮強度(MPa)

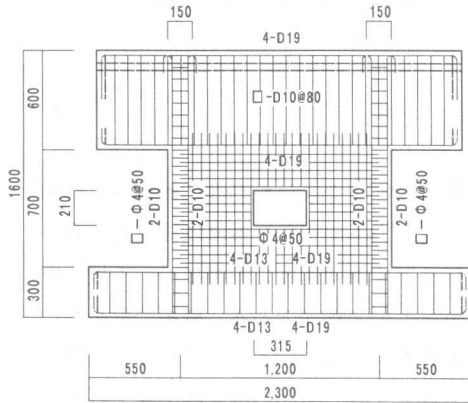
σ_t : 引張強度(割裂強度)(MPa)

(1)鉄筋

種別	σ_y	σ_u	E_s
$\phi 4$	160	301	131
D10	376	543	174
D13	350	514	173

σ_y : 降伏強度(MPa), σ_u : 引張強度(MPa)

E_s : 降伏ひずみ(%)



FIW5-0.28-V

図-1 試験体の形状・寸法

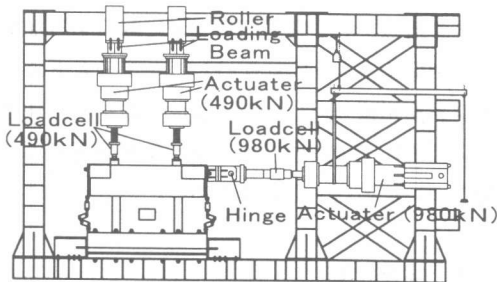


図-2 載荷装置

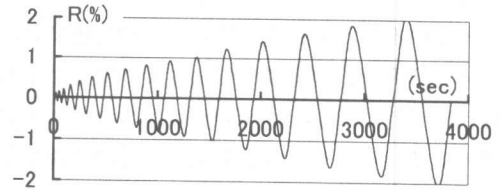
開口を設けたものである。

試験体名にはF[S]CW ξ -Vの記号を付けて示している。F: 曲げ破壊先行の試験体, S: セン断破壊先行の試験体, C: サイクル数, W: 壁板, t: 壁厚, ξ : 開口周比($\sqrt{h_o l_o / h l}$), V: 載荷速度(0.01cm/secと1.0cm/sec)を表している。試験体は無開口耐震壁3体, 有開口耐震壁3体の計6体である。試験体のコンクリート打設方法は, 縦打ちで行った。

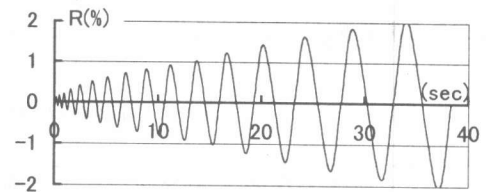
使用材料の機械的性質を表-2に示す。

2.2 載荷方法および載荷プログラム

載荷装置を図-2に, 載荷プログラムを図-3a)およびb)に示す。載荷にはコンピュータ制御によるアクチュエータ3台を用いた。試験体への正負繰り返し水平力の載荷は, 試験体の両柱頭部にそれぞれ110kNの鉛直荷重を載



a) 載荷速度0.01cm/sec



b) 載荷速度1.0cm/sec

図-3 載荷プログラム

荷した後, 加力点高さが基礎ばりの上端より90cmと120cmの位置の剛な上部ばりに埋め込まれたパイプに通したPC鋼棒を介して載荷した。

正負交番の水平力を載荷している間中, 両柱頭部に載荷した110kNの鉛直荷重が保持されるように制御した。水平力の載荷方法は, 通常の静的載荷実験とは異なり, 一定載荷速度下での

変位制御であり、同一変位振幅で1サイクルの正負交番漸増繰り返し载荷である。

水平力の载荷速度は、0.01cm/secと1.0cm/secであり、図-3 a) および b) に示すような载荷プログラムに従って水平力を载荷した。

図-3 a) および b) 中の縦軸は、層間変形角 $R (= \delta / h, \delta : \text{上部はり中央での水平変位}, h : \text{基礎上端より上部はり下端までの高さ } h = 70\text{cm})$ を示す。また、横軸は、制御する層間変形角 R の時刻歴 (sec) を示している。

2.3 測定装置および測定方法

载荷した水平力の検出は、アクチュエータ先端に取り付けたロードセルを用いて測定した。試験体の各部の変位は、図-4 に示す変位測定装置に取り付けている高感度変位計により測定した。水平荷重と変位および柱脚部の柱主筋のひずみの測定値は、動ひずみ測定器に0.1secと0.001sec サンプリング間隔で取り込み、その後パソコンのハードディスクに記録を行った。

ひび割れの記録は、目視によるスケッチや写真撮影およびビデオ撮影によった。

3. 実験結果とその検討

3.1 ひび割れ性状および破壊性状

本実験における各試験体の実験終了時のひび割れ状況と破壊状況を図-5 a), 5 b) に示す。以下に、各試験体のひび割れ発生状況および破壊性状などの特徴を示す。

F1W5-0.28-1.0とS1W5-0.28-1.0試験体は、3サイクルの载荷中に、S1W5-0.28-0.01試験体は、2サイクルの载荷中に壁板に斜めひび割れが認められた。また、S1W5-0.28-0.01試験体は、5サイクル目の载荷中に壁板の斜めひび割れが柱頭部の柱に伸展し、柱脚部の柱よりも早くそのひび割れ幅が拡大し、柱頭部の損傷が顕著になった。载荷速度の速い2体の試験体の柱頭部への壁板の斜めひび割れの伸展時期の確認は出来なかった。有開口耐震壁の柱の斜めひび割れは、柱頭部の方が柱脚部の柱よりもそのひび割れ幅

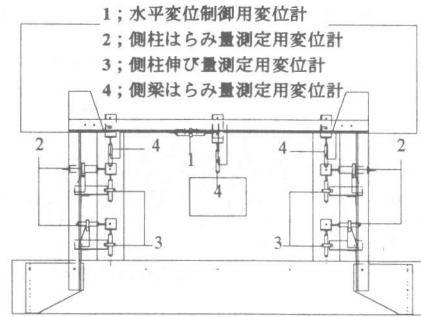


図-4 変位測定装置

が拡大し、柱頭部の柱の損傷が顕著であった。無開口耐震壁は、有開口耐震とは逆に柱頭部よりも柱脚部の柱の損傷が顕著であった。有開口耐震壁の壁板の斜めひび割れはほぼ45度に発生した。また、有開口耐震壁は、最大強度付近から壁板のスリップ破壊が進行し、壁板の圧縮破壊による損傷の程度は载荷速度の遅い方が甚大であり、载荷速度の影響が見られる。

3.2 QとRの履歴曲線および時刻歴

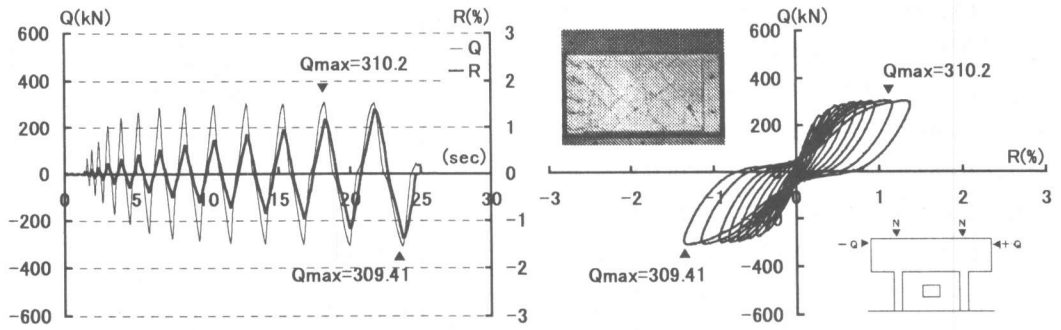
図-5 a), 5 b) に、水平荷重 (Q) と層間変形角 (R) の履歴曲線と図-3 a) および b) に示した载荷プログラムに従って载荷した実験時のQとRの時刻歴 (sec) を示す。

QとRの時刻歴から図-3 a) および b) の载荷プログラム通りにはほぼ载荷された。

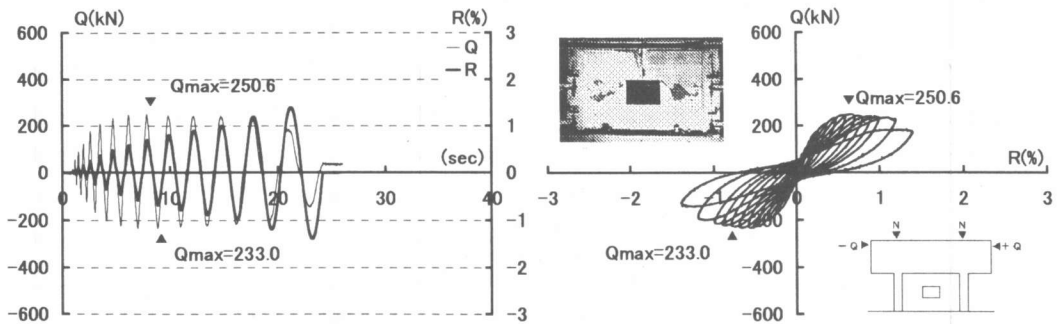
無開口耐震壁は計画した通りの破壊モードを示す履歴曲線を示し、せん断破壊先行の無開口耐震壁は载荷速度により最大強度が異なり、履歴曲線に及ぼす载荷速度の影響が見られる。

有開口耐震壁の F1W5-0.28-1.0試験体は $R = 0.3\%$ 付近から 1.1% 付近まで最大強度近傍の荷重を保持する履歴曲線であり、無開口耐震壁と同じ曲げ破壊モードである。

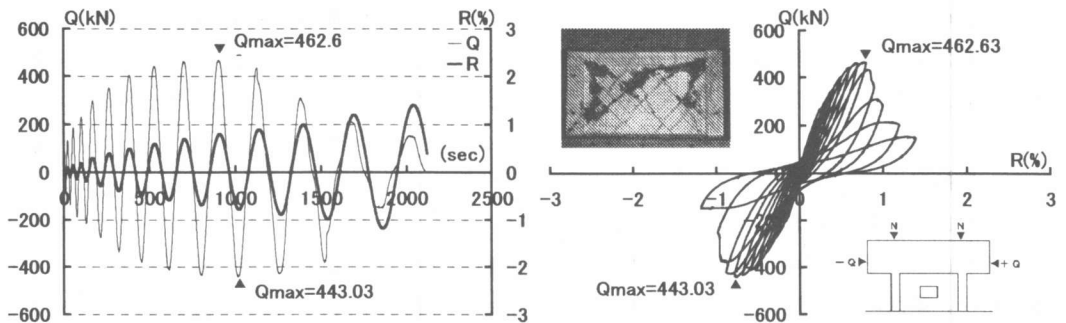
有開口耐震壁の試験体は、 $R = 0.5\%$ 付近で最大強度に達し、以後、最大強度近傍の荷重を保持することなく、急激な強度低下を示す履歴曲線を示し、载荷速度により最大強度が異なり、履歴曲線に及ぼす载荷速度の影響が見られる。破壊モードはせん断破壊モードである。



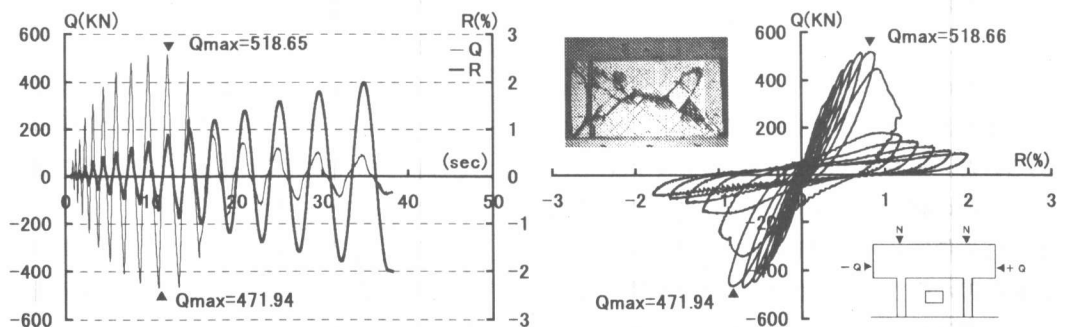
F1W5-0.00-1.0



F1W5-0.28-1.0

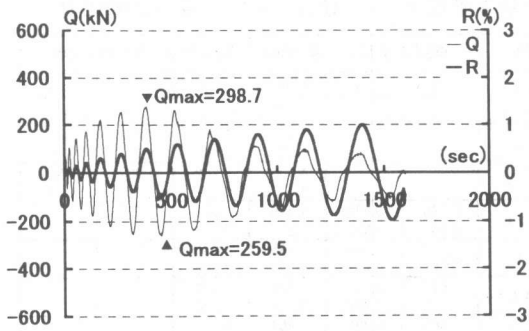


S1W5-0.00-0.01

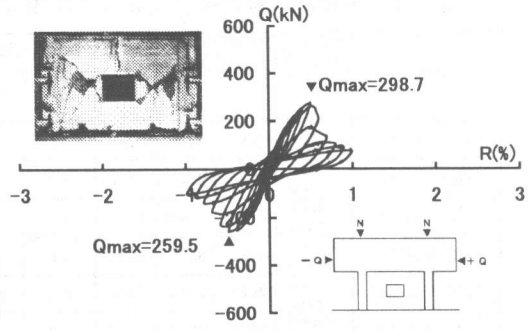


S1W5-0.00-1.0

図-5 a) 水平荷重 (Q) - 層間変形角 (R) の履歴曲線, Q と R の時刻歴 (sec) および実験終了時のひび割れと破壊状況



S1W5-0.28-0.01



S1W5-0.28-1.0

図-5 b) 水平荷重 (Q) - 層間変形角 (R) の履歴曲線, Q と R の時刻歴 (sec) および実験終了時のひび割れと破壊状況

4. 最大強度の検討

著者等は、小開口から大開口を有する有開口耐震壁の実用的な最大強度の評価方法として、圧力場を形成する壁板の面積を考慮した耐力低減率 r_u を次式のように提案している^{5), 6)}。

$$r_u = \sqrt{\Sigma Ae / h l}$$

ただし、 ΣAe : 圧力場を形成する壁板の面積

$h l$: 壁板の面積

本論では、壁板の斜めひび割れ傾斜角を45度として、最大強度に寄与する壁板の面積 ΣAe を求めた (文献5を参照)。

r_u と比較のためにRC規準の耐力低減率 $r^7)$ および本実験に応じた無開口耐震壁の最大強度算定式 $c_{a1} Q_{un}$ を用いて、有開口耐震壁の算定値の最大強度 $r_u \cdot c_{a1} Q_{un}$ 、 $r \cdot c_{a1} Q_{un}$ と実験値 $e_x Q_u$ との適合性について検討を行った。

無開口耐震壁の最大強度の算定式 ($c_{a1} Q_{un}$)

は、以下の算定式を用いた。

曲げ強度には曲げ強度式 ($c_{a1} Q_{mu}$)⁷⁾、せん断強度には富井・江崎式 ($c_{a1} Q_{us1}$)⁸⁾ および参考のために広沢式 ($c_{a1} Q_{us2}$)⁹⁾ を用いて算定を行った。

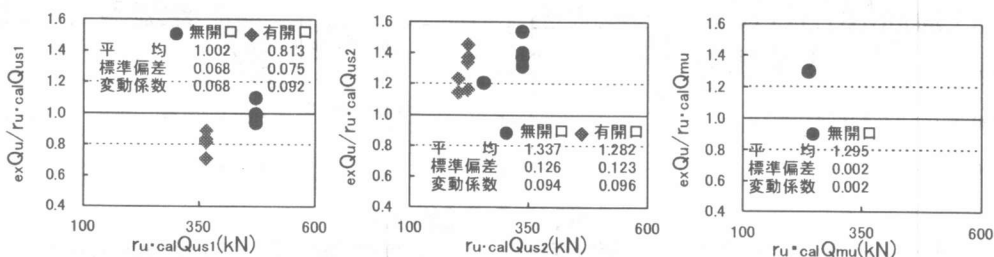
無開口耐震壁の最大強度の算定値と実験値との適合性を検討した結果を表-3および図-6に示す。せん断破壊モードの無開口耐震壁の最大強度の算定値は富井・江崎式の適用が実験値との適合性がよく、曲げ破壊モードの場合は、曲げ強度式よりも広沢式の方が実験値との適合性がよいといえる。

従って、せん断破壊モードの有開口耐震壁の場合も富井・江崎式に著者等の提案した耐力低減率 r_u を用いて算定した最大強度が実験値との適合性がよく、曲げ破壊モードの場合も無開口耐震壁の場合と同様広沢式の方が適合性がよいといえる。

表一 3 実験値の最大強度 $ex Q_u$ と算定値の最大強度 $ru \cdot cal Q_{us1}$, $ru \cdot cal Q_{us2}$ との比較

試験体	実験値の最大強度				無開口耐震壁の算定値の最大強度		耐力低減率		無開口・有開口耐震壁の実験値と算定値の最大強度の比					
	$ex Q_u$	$cal Q_{us1}$	$cal Q_{us2}$	$cal Q_{mu}$	r_u	r	$ex Q_u$	$ex Q_u$	$ex Q_u$	$ex Q_u$	$ex Q_u$	$ex Q_u$		
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		(r_1, r_2)	$ru \cdot cal Q_{us1}$	$ru \cdot cal Q_{us1}$	$ru \cdot cal Q_{us2}$	$ru \cdot cal Q_{us2}$	$cal Q_{mu}$	$cal Q_{mu}$		
F1W5-0.00-1.0	+310.2 -309.4	471.0	257.0	239.2	1.0	1.0			1.207 1.204	1.207 1.204	1.297 1.293	1.297 1.293		
F1W5-0.28-1.0	+250.6 -233.0	487.5	271.4	239.2	0.75	0.72*1			1.231 1.145	1.282 1.192	1.397 1.299	1.455 1.353		
S1W5-0.00-0.01	+462.6 -443.0	473.0	338.0	532.0	1.0	1.0	0.978 0.937	0.978 0.937	1.369 1.311	1.369 1.311				
S1W5-0.00-1	+518.7 -471.9	473.0	338.0	532.0	1.0	1.0	1.097 0.998	1.097 0.998	1.535 1.396	1.535 1.396				
S1W5-0.28-0.01	+298.7 -259.5	487.5	298.1	532.0	0.75	0.72*1	0.817 0.710	0.851 0.739	1.336 1.161	1.392 1.209				
S1W5-0.28-1.0	+324.5 -305.8	487.5	298.1	532.0	0.75	0.72*1	0.888 0.836	0.925 0.871	1.451 1.368	1.512 1.425				
無開口耐震壁の実験値の水平耐力 ($ex Q_u$) についての							平均	1.002	1.002	1.337	1.337	1.295	1.295	
							標準偏差	0.068	0.068	0.126	0.126	0.002	0.002	
							変動係数	0.068	0.068	0.094	0.094	0.002	0.002	
有開口耐震壁の実験値の水平耐力 ($ex Q_u$) についての							平均	0.813	0.847	1.282	1.335			
							標準偏差	0.075	0.107	0.123	0.128			
							変動係数	0.092	0.127	0.096	0.096			

注) + : 正方向載荷 (+Q) - : 負方向載荷 (-Q) * 1 : r_2



図一 6 $ex Q_u$ と $ru \cdot cal Q_{us1}$, $ru \cdot cal Q_{us2}$, $ru \cdot cal Q_{mu}$ との関係

5. 結び

載荷速度の異なる載荷実験を行い、検討を行った結果、以下のことが知れた。

- 1) 柱の斜めひび割れ幅の拡大や壁板の圧壊には載荷速度の影響が見られ、載荷速度の遅い方がその損傷の程度が甚大である。
- 2) 有開口耐震壁の履歴曲線と破壊モードには載荷速度の影響が見られなく、破壊モードは無開口耐震壁と同じせん断破壊モードである。
- 3) 最大強度は載荷速度の影響が見られ、載荷速度の速い方がその強度が大きくなる。
- 4) せん断破壊モードの有開口耐震壁の最大強度は、著者等提案の耐力低減率と富井・江崎式を用いれば大略評価される。

【参考文献】

1) 小野正行・江崎文也・阿部浩一:「有開口耐震壁の弾塑性性状に及ぼす載荷速度の影響に関する研究」, コンクリート工学年次論文報告, Vol. 20, No. 3, pp. 595

~600, 1998.

2) 江崎文也・小野正行:「無開口耐震壁の破壊モードに及ぼす載荷速度の影響に関する研究」, コンクリート工学年次論文報告, Vol. 21, No. 3, pp. 745~750, 1999.

3) 澤田泰夫:「鉄筋コンクリート造耐震壁の動的破壊実験」, 大会号, pp. 1521~1522, 1979. 9

4) 後藤寛・服部英一・望月祐:「高速繰返し荷重をうける無開口耐震壁の劣化性状」, 大会号, pp. 431~432, 1999. 10.

5) 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, pp. 119~129, 1992. 5.

6) 日本建築学会:「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」, 1988

7) 日本建築防災協会:「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断規準・同解説」, pp. 1112, 1992. 8

8) 江崎文也・富井政英・光山裕朗:「せん断破壊を起こす連層耐震壁の水平耐力に及ぼす鉛直荷重の影響に関する研究」, 大会号, pp. 529~530, 1988. 10.

9) 広沢雅也ほか:「鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性に関する総合研究」, 大会号, pp. 1173~1174, 1975. 9.