

論文 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

小野正行^{*1}・江崎文也^{*2}・阿部浩一^{*3}

要旨：有開口耐震壁の静的および動的載荷実験を行い、有開口耐震壁のひび割れ性状、破壊性状、水平荷重－変形曲線および最大強度などに及ぼす載荷速度の影響について検討を行った。壁板の斜めひび割れ傾斜角と開口周比が0.4以上のものの破壊モードには載荷速度の影響が見られないこと、ひび割れの数、損傷の程度、水平荷重－変形曲線および最大強度には載荷速度の影響が見られることを示した。また、動的載荷時の最大強度は、著者提案の耐力低減率と無開口耐震壁の最大強度が精度よく評価される算定式を用いれば、実用上十分な精度で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

RC部材の荷重－変形関係、ひび割れ性状、破壊性状、強度などの力学的性状は、一般的に静的載荷実験によって得られた研究成果から評価され、その結果が構造物の設計に適用されている現状にある。しかし、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ことから、1960年以降、RC部材（はり、柱）の載荷速度の影響に関する研究が数多く報告されている^{1)~12)}。更に、RC部材の構成材料であるコンクリートや鉄筋（鋼材）の材料特性に及ぼす影響に関する研究も報告されている^{13)~16)}。

以上の既往の研究によれば、高速度な荷重を受けるRC部材（はり、柱）の力学的性状およびコンクリートと鉄筋の材料特性は、載荷速度の影響を受けると報告されている。しかしながら、実物大の約1/3の大きさの有開口耐震壁についての載荷速度の影響に関する実験研究は、現在のところ報告されていないようである。

そこで、開口周比が0.3～0.6程度の有開口耐震壁の試験体により、通常の載荷実験で一般

的に実施されているような載荷速度の場合（以後、静的載荷実験とする）と静的に載荷する場合よりも約10倍以上の載荷速度の場合（以後、動的載荷実験とする）の載荷実験を計画した。

本論は、静的および動的の両載荷実験から有開口耐震壁のひび割れ性状、破壊性状、水平荷重－変形曲線および最大強度など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

試験体の形状・寸法・配筋は、表－1と図－1に示す。各試験体とも開口は壁板中央部にある。試験体名にはFWt- ξ -Lの記号を付けている。Fは付帯ラーメン、Wは壁板、tは壁厚、 ξ は開口周比、Lは載荷方法（S:静的載荷、D:動的載荷）を表している。

2.2 使用材料の機械的性質

試験体打設毎にシリンドーを採取し、試験体と同一条件で養生を行ったシリンドーの圧縮と引張（割裂）強度および鉄筋の機械的性質を表－2に示す。シリンドーの圧縮試験結果の一例

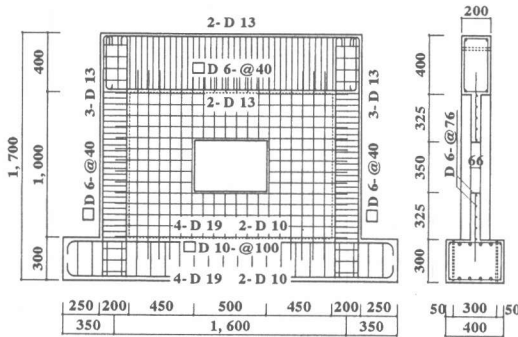
*1 近畿大学教授 九州工学部建築学科（正会員）

*2 九州共立大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 近畿大学教授 九州工学部建築学科、工博（正会員）

表－1 試験体の形状・寸法・配筋・開口寸法

型式番号	柱・はり				壁		
	柱断面 $b \times D$ (cm $\times$ cm)	はり断面 $b \times D$ (cm $\times$ cm)	柱・はり 主筋	帯筋・肋筋 径・間隔 (mm)	壁厚 (cm)	壁筋 径・間隔 (mm)	開口寸法 $h_o \times l_o$ (cm $\times$ cm)
FW6.6-0.302-S,D	20 $\times$ 20	20 $\times$ 40	4-D13	D6- ϕ 40 0.8	6.6	D6- ϕ 76 0.64	35 $\times$ 50
FW6.6-0.436-S,D							50 $\times$ 73
FW6.6-0.516-D							58 $\times$ 88
FW6.6-0.595-S,D							66 $\times$ 103



FW6.6-0.302-S,D

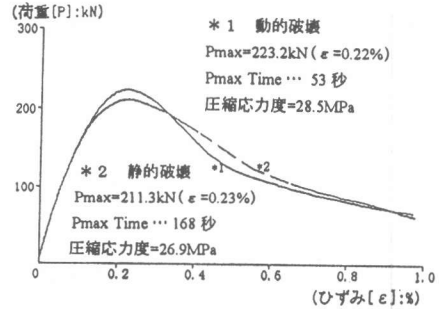
図－1 試験体の形状・寸法および配筋の一例

を図－2に示す。表－2中のシリンダー圧縮強度は、最大圧縮強度に達する平均載荷時間が約170秒（通常の載荷）の時を σ_{CB} （静的）、また、平均載荷時間が約50秒の時を σ_{CB} （動的）として示している。

2.3 載荷方法および測定方法

載荷装置および変位測定装置を図－3、図－4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。水平加力は、試験体の両柱頭部に鉛直荷重980kNを載荷した後、柱頭部一点加力ではなく、基礎上端から131cmの位置で7本のPC鋼棒によりはり両側面に設置した鋼板を締め付け、この鋼板により正負交番の水平力を載荷した。正負交番の水平力を載荷している間中、絶えず柱頭部の鉛直荷重98kNが保持されるように制御した。

水平力の載荷方法は、静的載荷実験も動的載荷実験も変位制御で一変位一サイクルの正負交番漸増繰り返し加力である。その載荷プログラムを図－5a)、5b)に示す。図中のRは、



図－2 シリンダーの圧縮試験結果の一例

表－2 使用材料の機械的性質

(1) コンクリート

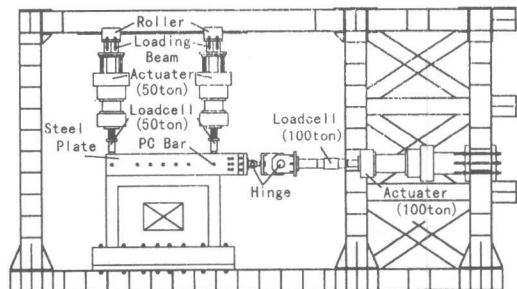
型式番号	σ_{CB}	σ_{CB}	σ_t	打設日
FW6.6-0.302-S,D	26.5	28.4	2.46	970828
FW6.6-0.436-S,D	26.5	28.4	2.46	970828
FW6.6-0.516-D	27.4	28.8	2.31	970910
FW6.6-0.595-S,D	27.4	28.8	2.31	970807

σ_{CB} : シリンダー圧縮強度 (静的) MPa
 σ_{CB} : シリンダー圧縮強度 (動的) MPa
 σ_t : 引張強度 (割裂強度) (静的) MPa

(2) 鉄筋

種別	σ_y	ε_y	σ_u
D6	379.4	0.194	5540
D13	337.3	0.182	5250

σ_y : 降伏強度 MPa σ_t : 引張強度 MPa
 ε_y : 降伏ひずみ (%)



図－3 載荷装置

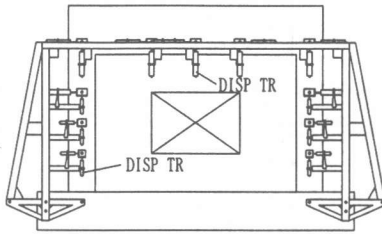


図-4 変位測定装置

層間変形角である。 $R (= \delta / h)$ は基礎上端より $h = 115\text{cm}$ の位置のより中央での水平変位 δ を h で割ったものである。

〔静的载荷実験〕：目的の変位に1.1秒間で達する载荷方法で、サイクルによって異なるが、 $0.01\text{cm/sec} \sim 0.1\text{cm/sec}$ 程度の载荷速度であり、実験時間は約1時間30分程度である。

〔動的载荷実験〕：静的载荷プログラムを使用し、全サイクルにおける载荷速度が 1.0cm/sec になるように制御した载荷方法であり、実験時間は45秒程度である。

水平荷重の検出は、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。静的载荷実験の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、パソコンによりフロッピーディスクに記録を行った。動的载荷実験での測定値は、 0.02sec のサンプリング周期で取り込み、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、静的载荷実験では目視によ

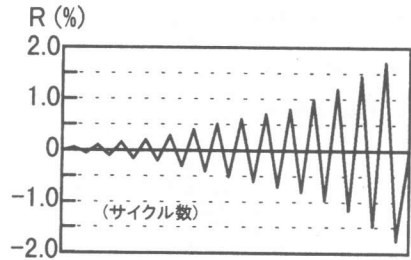


図-5 a) 静的载荷プログラム

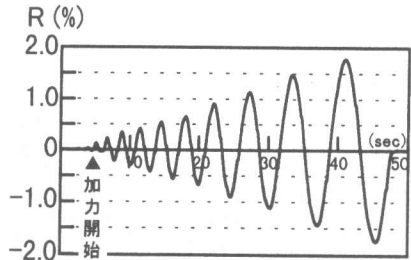


図-5 b) 動的载荷プログラム

るスケッチと写真撮影、動的载荷実験ではビデオ撮影と写真撮影によった。

3. 実験結果

本実験における各試験体の水平荷重-変形曲線と実験終了時のひび割れ状況を図-6 a), 6 b) に示す。水平荷重-変形曲線の縦軸は、水平荷重 Q であり、横軸は、層間変形角 $R (= \delta / h)$ である。図中の Q_{max} は、正側加力 (RQ) と負側加力 (LQ) における最大水平荷重を示す。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。

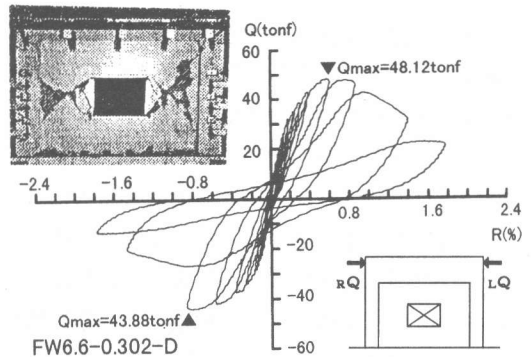
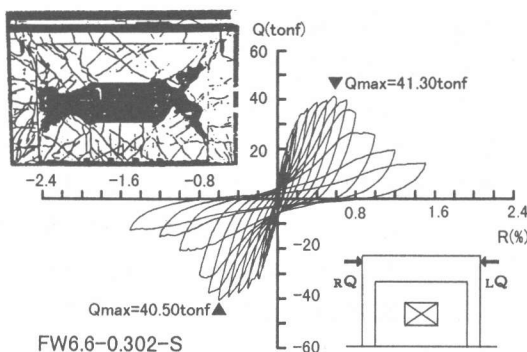
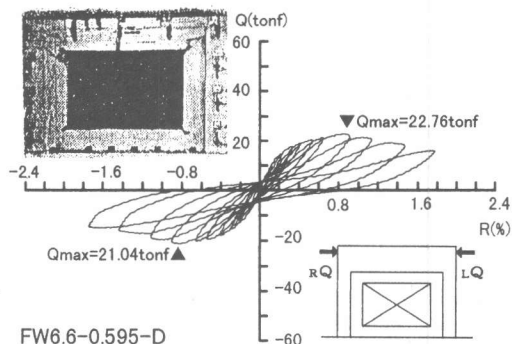
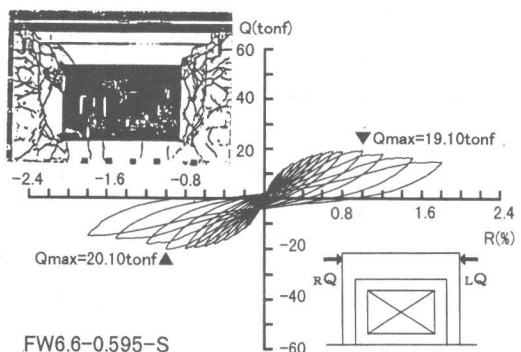
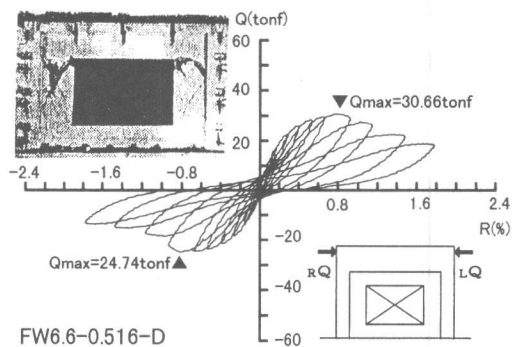
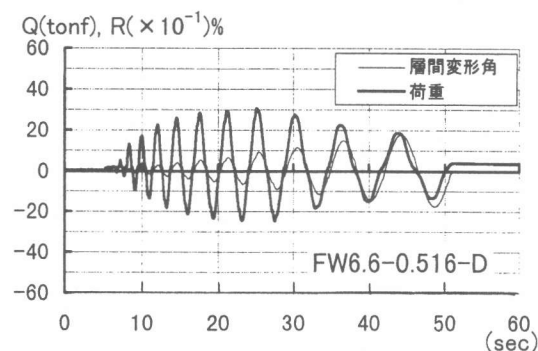
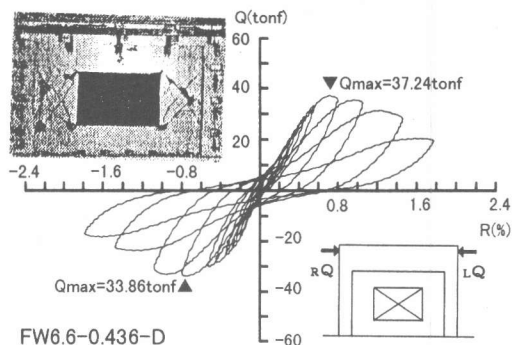
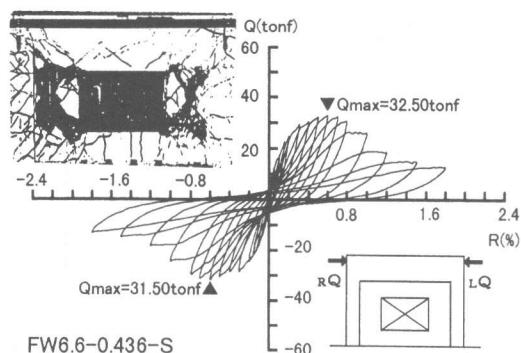


図-6 a) 静的、動的载荷実験の水平荷重-変形曲線



図一 6 b) 静的、動的載荷実験の水平荷重-変形曲線と載荷時刻歴における水平荷重の一例

〔静的載荷の試験体〕：極めて初期に開口隅角部にひび割れが発生し、壁板には R が $(0.05 \sim 0.25) \%$ 付近で斜めひび割れ、柱には腰壁高さ付近の位置に R が $(0.05 \sim 0.15) \%$ 付近で水平ひび割れが発生した。以後、変形の増大につれて、壁板内には数多くの斜めひび割れ、柱には水平ひび割れが発生した。壁板の斜めひび割れが柱やはりに伸展したが、壁板の斜めひび割れと柱の水平ひび割れの拡大、開口隅角部、柱脚部の圧縮破壊により最大強度に達した。最大強

度以降は、開口隅角部、袖壁部および柱脚部の圧縮破壊が顕著になる。水平荷重-変形曲線は、開口周比が 0.4 より小さいものは急激な強度低下を、開口周比が 0.4 以上のものは最大強度近傍の荷重を保持しながら緩やかな強度低下を示す。破壊モードは、静的載荷の場合、開口周比が 0.4 よりも小さいものはせん断破壊モード、開口周比が 0.4 以上になると曲げ破壊モードとなる。

〔動的載荷の試験体〕：FW6.6-0.436-D 試験体

は、載荷装置締め付け不良のためほぼ245kNの載荷の後、再実験を行ったものである。

動的載荷実験のひび割れの記録はビデオカメラと写真撮影によった。しかし、その解像度の影響のため、正確に壁板などの初期ひび割れを確認することは困難であるが壁板の斜めひび割れは、ほぼRが(0.1~0.2)%付近で観察された。壁板や柱のひび割れは静的載荷のようには変形の増大によりその数は増えないが、静的載荷とほぼ同様な破壊性状を示した。しかし、強度が載荷方向により異なり、開口周比が0.4よりも小さなものは急激な強度低下を、開口周比が0.4以上になると最大強度近傍の荷重を保持しながら緩やかな強度低下を示す水平荷重-変形曲線となる。破壊モードは、全試験体とも曲げ破壊

モードである。

なお、静的も動的載荷実験も柱脚部の柱主筋は、最大強度に達する以前に全試験体とも降伏をしている。

4. 最大強度の検討

著者は、壁板中央開口や偏在開口が開口周比0.6程度までの大きさを有する場合および開口が複数の場合の有開口耐震壁の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を提案し、それらの最大強度は破壊モードに関係なく実用上十分な精度で評価されることを示した^{(7)~(9)}。

既往の無開口耐震壁の最大強度の算定式から求めた算定値(Q_{uo})と著者提案の耐力低減率

表-3 実験値 Q_{uex} と算定値の最大強度 $r_u \cdot Q_{uo}$ 、 $r \cdot Q_{uo}$ 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		有開口耐震壁の実験値と算定値の最大強度の比					
	Q_{uex} (tonf)	Q_{uo1} (tonf)	Q_{uo2} (tonf)	Q_{uo3} (tonf)	r_u	r (r_1, r_2)	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{uo1}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{uo1}}$	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{uo2}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{uo2}}$	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{uo3}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{uo3}}$
FW6.6-0.302-S	+41.30 -40.50	64.62	53.58	48.83	0.707	0.688 ^{*1}	0.804 0.886	0.928 0.910	1.090 1.069	1.119 1.097	1.196 1.173	1.227 1.204
FW6.6-0.302-D	+48.12 -43.88	66.14	55.19	49.34	0.707	0.688 ^{*1}	1.029 0.938	1.056 0.963	1.233 1.124	1.265 1.154	1.379 1.258	1.415 1.291
FW6.6-0.436-S	+33.40 -31.50	64.62	53.58	48.83	0.613	0.544 ^{*1}	0.843 0.795	0.950 0.896	1.017 0.956	1.146 1.081	1.116 1.052	1.257 1.186
FW6.6-0.436-D	+37.24 -33.86	66.14	55.19	49.34	0.613	0.544 ^{*1}	0.919 0.835	1.035 0.941	1.101 1.000	1.240 1.128	1.231 1.119	1.387 1.261
FW6.6-0.516-D	+30.66 -24.74	66.43	55.95	49.56	0.539	0.450 ^{*1}	0.856 0.691	1.026 0.828	1.017 0.820	1.218 0.983	1.148 0.926	1.375 1.109
FW6.6-0.595-S	+19.10 -20.10	65.31	54.31	49.07	0.431	0.356 ^{*1}	0.678 0.714	0.821 0.865	0.816 0.859	0.988 1.040	0.903 0.950	1.093 1.151
FW6.6-0.595-D	+22.76 -21.08	66.43	55.51	49.44	0.431	0.356 ^{*1}	0.794 0.736	0.962 0.891	0.951 0.881	1.152 1.067	1.068 0.989	1.293 1.198
正側と負側加力の実験値の水平耐力(Q_{uex})についての標準偏差 変動係数							平均 0.830 0.099 0.119	平均 0.934 0.070 0.075	平均 0.995 0.083 0.119	平均 1.120 0.083 0.074	平均 1.108 0.132 0.119	平均 1.246 0.096 0.077
実験値の水平耐力(Q_{uex})が小さい方の標準偏差 変動係数							平均 0.794 0.091 0.115	平均 0.893 0.049 0.055	平均 0.952 0.060 0.116	平均 1.071 0.060 0.056	平均 1.060 0.121 0.114	平均 1.192 0.067 0.056

注) + : 正側加力(NQ) - : 負側加力(LQ) * 1 : r_1

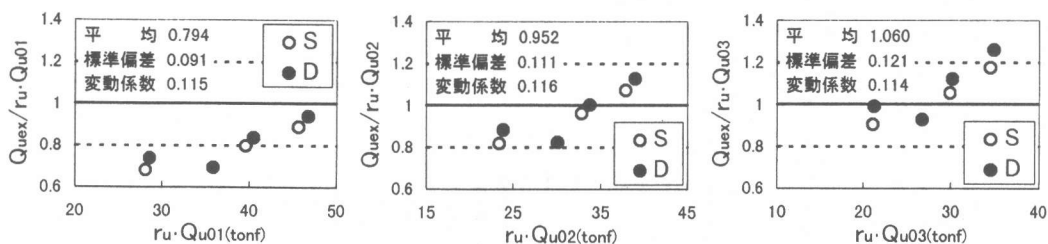


図-7 Q_{max} と $r_u \cdot Q_{uo1}$ 、 $r_u \cdot Q_{uo2}$ 、 $r_u \cdot Q_{uo3}$ との関係

r_u ($=\sqrt{\Sigma Ae/hl}$, ΣAe : 圧力場を形成する壁板の面積和, hl : 壁板の面積^{17)~19)}と比較のために RC 規準の耐力低減率 r [$=\min(r_1=1-l_0/l$, $r_2=1-\sqrt{h_0l_0/hl})$]²⁰⁾を用いて, 有開口耐震壁の実験値と算定値の最大強度 Q_{uex} と $r_u \cdot Q_{u01}$, $r \cdot Q_{u01}$, $r_u \cdot Q_{u02}$, $r \cdot Q_{u02}$, $r_u \cdot Q_{u03}$, $r \cdot Q_{u03}$ との適合性について検討を行った。その結果を表-3 と図-7 に示す。

既往の無開口耐震壁の最大強度の算定には, 富井・江崎式 (Q_{u01})²¹⁾, 広沢式 (Q_{u02})²²⁾, マクロモデルによる望月式 (Q_{u03})²³⁾を用いた。富井・江崎式は, その適用の確認を行っていないが, 参考のために用いたものである。

5. 結び

有開口耐震壁の静的, 動的載荷実験から載荷速度の影響について検討を行った結果, 以下のことが知れた。

- 1) 壁板の斜めひび割れ傾斜角には載荷速度の影響は見られない。

2) 同一変形時における柱や壁板などのひび割れの数は動的載荷の方が静的載荷よりも少ない。また, 柱や壁板の損傷の程度は静的載荷の方が動的載荷よりも甚大であり, 載荷速度の影響が見られる。

3) 水平荷重-変形曲線には載荷速度の影響が見られるが, 破壊モードは開口の小さい一を除いて, その影響は見られない。

4) 最大強度は, 載荷速度の影響が見られる。動的載荷の最大強度は, 正側載荷の方が負側載荷よりも (10 ~ 20) % 程大きく, 負側載荷は静的載荷の最大強度とほぼ同じである。

5) 動的載荷時の最大強度は, 著者提案の耐力低減率と無開口耐震壁の最大強度を精度よく評価される算定式を用いれば, 実用上十分な精度で評価される。

[謝辞] 本論文をまとめるにあたり, 工学院大学教授望月洵博士に無開口耐震壁の強度解析のご協力いただいた。ここに, 深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 2) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 3) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 4) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 5) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 6) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 7) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 8) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 9) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 10) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 11) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 12) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 13) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 14) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 15) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 16) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 17) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 18) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 19) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 20) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 21) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 22) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995
- 23) 竹文竹「山」大竹す最と藤大小次中「最梗」歳日安そ新「竹」日竹日岩根荒年小建「Wasayuki Ono」Framed Shear Wall Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete with a Large Opening, Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995