

論文 PCa パネルで耐震補強された既存 RC 構造中間層の弾塑性解析

鳥屋 隆志^{*1}・守屋 嘉晃^{*2}・小野里 憲一^{*3}・望月 洵^{*4}

要旨: 耐震補強を意図して、既存 RC 構造の中間層に H 型鋼の側柱をもつ PCa パネルを組み込んだ補強耐震壁の試験体について、マクロモデルによる弾塑性解析を行っている。解析結果は、既往のマクロモデルの上下梁を分割し、弾塑性の構成則を導入することにより、実験の、特に最大強度に至るまでの力-変形関係のスケルトンカーブと最大強度時の応力状態を、的確に捉えられることを示している。しかし、最大強度以降のスケルトンカーブについてはマクロモデルの再検討が必要である。また、接合プレートを PC 鋼棒で圧着接合することで、上下 RC 梁を補強した試験体の補強効果を解析的に検討し、その有効性を示している。

キーワード: 中間層の耐震補強, PCa パネル, 弾塑性解析, マクロモデル

1. はじめに

筆者らは既往の報告¹⁾で、既存 RC 構造の柱梁フレームに H 形鋼の側柱をもつプレキャストコンクリートパネル（以下、PCa パネルと略す。）を組み込んだ耐震壁（以下、補強耐震壁と呼ぶ。）について実験を行い、これが有効であることを示した。しかし、これは補強耐震壁を連層に配置することを前提としているため、上下梁を剛強と設定している。

一方、既存 RC 構造の中間層に補強耐震壁を配置した場合、上下 RC 梁の十分な拘束効果は期待できず、耐震性能は連層とした補強耐震壁に比べて低下することが予測される。

本研究は、出入り口開口（以下、開口と略す。）の有無および開口まわりの上下 RC 梁に対するせん断補強の有無をパラメータとした中間層の補強耐震壁の試験体について、上下 RC 梁の変形を考慮したマクロモデルを用いて弾塑性解析を試み、実験結果と比較することを主たる目的としている。加えて、接合プレートを PC 鋼棒を用いて圧着接合することで、上下 RC 梁を補強した試験体の補

強効果を解析的に検討している。

2. 解析の対象とした試験体

解析の対象とした試験体は、既存 RC 構造の中間層を模した柱梁フレームに、H 型鋼の側柱をもつ PCa パネルを組み込んだ補強耐震壁 5 体である。図-1 に試験体 00SR-3 の形状と配筋を示す。試験体は、実物の約 1/3 のスケールで計画され、H 型鋼の側柱は接合プレートおよび台座ブロックを介して、上下 RC 梁に PC 鋼棒で圧着接合されてい

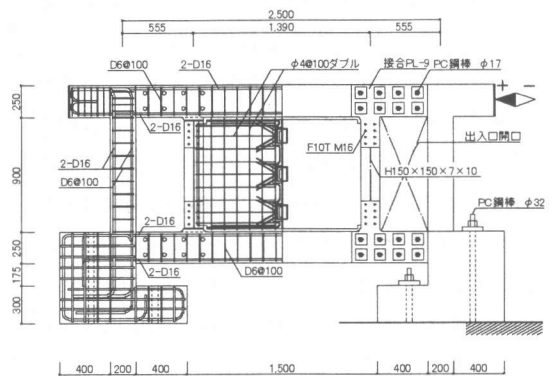


図-1 試験体 00SR-3 の形状と配筋

*1 ドーピー建設工業(株)技術課 工修 (正会員)
 *2 工学院大学大学院 工学研究科 (正会員)
 *3 O.R.S.事務所 工修 (正会員)
 *4 工学院大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

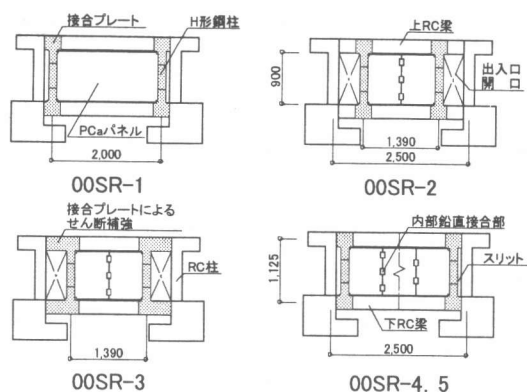


図-2 試験体の形状パターン

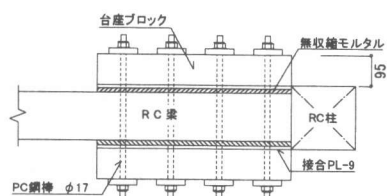


図-3 開口まわりのRC梁に対するせん断補強

表-1 試験体の諸性質

試験体名	柱梁フレーム						PCaパネル			無収縮モルタル σ_B	
	柱			梁			σ_B	$l' \times h'$	t		σ_B
	b	D	pw	b	D	pw					
00SR-1	200	200	0.32	150	250	0.43	24	1,950 × 860	50	24	42
00SR-2								1,340 × 860			
00SR-3								1,340 × 860			
00SR-4								1,950 × 860			
00SR-5								1,950 × 860			

[記号] $b \times D$ (mm): 柱または梁の幅とせい, pg (%): 柱または梁の主筋比 ($D16; \sigma_y=350N/mm^2$), pw (%): せん断補強筋比 ($D6; \sigma_y=433N/mm^2$), σ_B (N/mm^2): コンクリートまたは無収縮モルタルの1軸圧縮強度, $l' \times h'$ (mm): PCaパネルの内法寸法, t (mm): PCaパネルの厚さ
 [共通] RC柱: $P_g=1.99\%$ (4-D16), せん断補強筋(D6@100), H形鋼: H-150×150×7×10, $\sigma_y=291N/mm^2$ (SS400), RC梁: $P_g=2.12\%$ (4-D16), せん断補強筋(D6@100), 接合プレート: PL-9, $\sigma_y=393N/mm^2$, PC鋼棒 ($\phi 17$) 1本あたりの圧着力: $N_p=118kN$, PCaパネルの壁筋: $\phi 4@100$ 毎コブ $\sigma_y=596N/mm^2$

る。図-2に試験体の形状パターンを示す。00SR-1は無開口補強耐震壁で、PCaパネルを1枚板としている。00SR-4,5は00SR-1と形状は同じであるが、PCaパネルは3分割されている。分割パネルの鉛直接合部は鋼板の溶接接合でジョイントされ、ジョイントは00SR-4,5でそれぞれ2,3箇所である。00SR-2,3はPCaパネルの両側に開口をもつ試験体である。このうち、00SR-3の開口まわりの上下RC梁は、接合プレートを梁端まで伸ばし、PC鋼棒で圧着接合することでせん断補強されている(図-3)。すべての試験体の組立順序は実際の施工手順と同じである。

表-1に試験体の諸性質を示す。実験は上RC梁中心位置に正負繰返し水平力を作用させているが、本解析では簡単のため、1方向単調加力とする。また、試験体SR-1, SR-4, およびSR-5については、実験結果から分割パネルの鉛直接合部における著しい破壊および滑りが観察されなかったこと

から、パネルの分割が破壊性状に影響を与えないとして、1枚パネルとして扱っている。

3. マクロモデル

マクロモデルの範囲は、H形鋼の側柱をもつPCaパネルとこれを囲む1層1スパンのRCフレームから構成される補強耐震壁である。図-4にマ

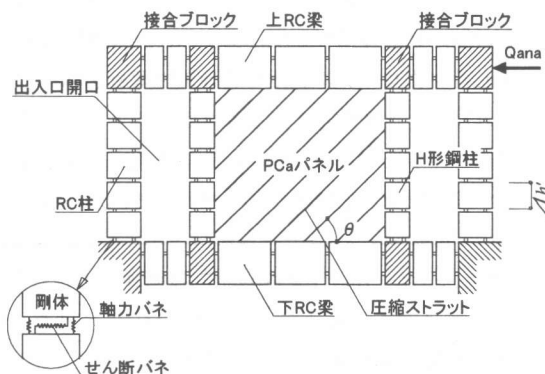


図-4 マクロモデル

表-2 各部材の強度と剛性

部材名	種類	強度	剛性
RC 梁 RC 柱	軸力 バネ	引張域	$cNnt = a_g \cdot s \sigma_y / 2$
		圧縮域	$cNnc = (a_g \cdot s \sigma_y + b \cdot D \cdot \sigma_B) / 2$
	せん断バネ	$Vu = [b \cdot j_t \cdot p w \cdot \sigma_w y \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2] / 0.8$	$cKnc = (Es \cdot a_g + Ec \cdot b \cdot D) / 2 \Delta h$
H 形鋼柱	軸力 バネ	引張域	$sNnt = a_g \cdot s \sigma_y / 2$
		圧縮域	$sNnc = (a_g \cdot s \sigma_y + b \cdot D \cdot \sigma_B) / 2$
	せん断バネ	—	$sKs = 2 \frac{Gs \cdot b \cdot D}{\Delta h}$
PCa パネル	圧縮ストラット	S.Popovics の応力-ひずみ関係 ²⁾	

(記号)

a_g (mm²): 主筋の全断面積,
 a_z (mm²): 鋼材の断面積,
 $s \sigma_y$ (N/mm²): 鉄筋または鋼材の降伏強度,
 b (mm): 柱の幅または鋼材の厚さ,
 D (mm): 柱のせいまたは鋼材の幅,
 σ_B (N/mm²): コンクリートの圧縮強度,
 Es (N/mm²): 鉄筋または鋼材のヤング係数,
 Ec (N/mm²): コンクリートのヤング係数,
 Δh (mm): 柱または梁の分割長さ,
 Gc, Gs (N/mm²): コンクリート, 鋼材のせん断弾性係数

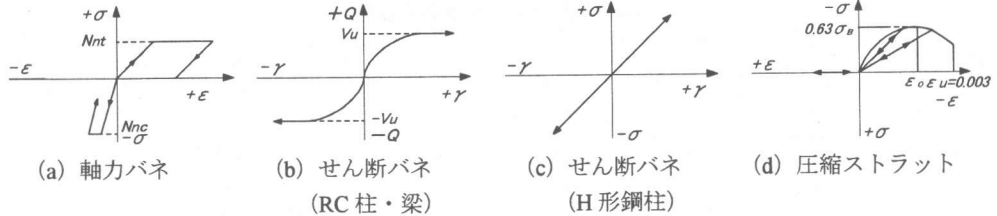


図-5 結合バネの構成則

クロモデルとその要素分割の状態を示す。

マクロモデルは RC 柱, RC 梁, H 形鋼柱, および PCa パネルから構成される。RC 柱, RC 梁, および H 形鋼柱は, それぞれ剛体要素に分割され, 軸力バネとせん断バネで連結される。分割された剛体要素のほか, 図-4 に示した接合ブロックは剛体と扱う。接合プレートで補強された梁の接合バネのうち, 軸力バネは RC 梁と接合プレートの置換バネの累加とし, せん断バネは十分に大きい値と扱う。PCa パネルは, 斜めひび割れが伸展した状態を想定して傾斜角 θ をもつ圧縮ストラットに置換される。結合バネの特性は以下のとおりである。

- 1) RC 柱と RC 梁: 軸力バネは完全弾塑性則にしたがう。せん断バネの剛性には, ひび割れの発生を考慮して, 圧縮域の軸力バネの剛性

に対する引張域と圧縮域の軸力バネの剛性の平均値の比を低減係数として導入する。

- 2) H 形鋼柱: RC 柱と同じ扱いである。軸力バネの降伏強度と剛性は, 引張域で型钢のみを考慮し, 圧縮域で型钢と無収縮モルタルの累加とする。せん断バネは型钢のみと考え, RC 柱で導入した低減係数は省略する。H 形鋼柱と RC 梁の接合プレートは H 形鋼端部で軸力バネとせん断バネに置換される。
- 3) 圧縮ストラット: 圧縮ストラットは, S.Popovics の応力-ひずみ関係²⁾ にしたがう。ただし, その最大強度はコンクリートの圧縮強度 σ_B に有効圧縮強度係数 0.63 を乗じ, 終局ひずみを $\epsilon = u = 0.003$ とする。圧縮ストラットの傾斜角 θ は文献 3) に基づいて, PCa パネルの形状比から 00SR-1, 4 および 5

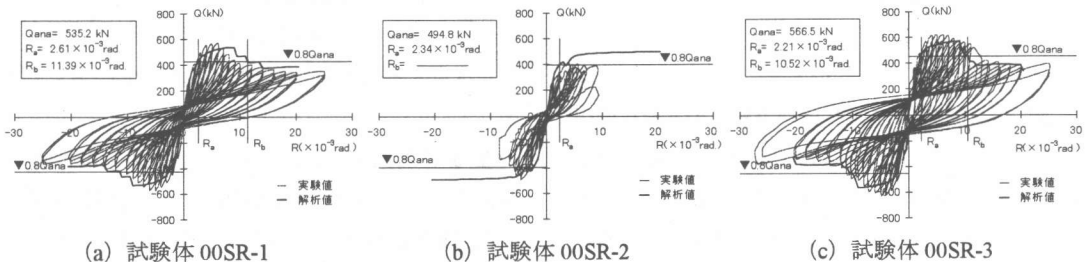
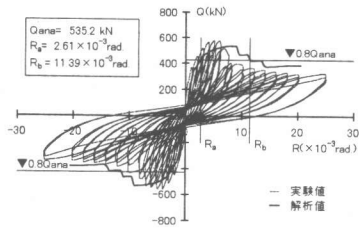
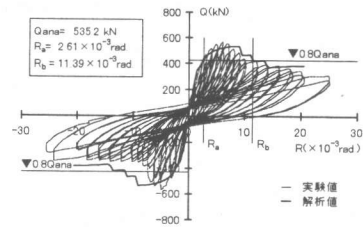


図-6 実験の力-変形関係と解析のスケルトンカーブ



(d) 試験体 00SR-4



(e) 試験体 00SR-5

図-7 実験の力-変形関係と解析のスケルトンカーブ

表-3 実験値と解析値の比較

試験体名		実験値				解析値				Q exp	μ exp
		Qexp	Ra	Rb	μ exp	Qana	Ra	Rb	μ ana	Qana	μ ana
00SR-1	+	570.4	2.7	8.6	3.2	535.2	2.61	11.39	4.36	1.07	0.73
	-	569.3	2.0	9.6	4.8					1.06	1.10
00SR-2	+	413.7	2.2	7.5	3.4	494.8	2.34	—	—	0.83	—
	-	495.7	2.3	6.3	2.7					1.00	—
00SR-3	+	620.0	2.5	12.1	4.8	566.5	2.21	10.52	4.76	1.09	1.01
	-	628.9	2.2	8.8	4.0					1.11	0.84
00SR-4	+	578.5	2.5	7.5	3.0	535.2	2.61	11.39	4.36	1.08	0.69
	-	559.0	1.9	9.2	4.8					1.04	1.10
00SR-5	+	570.0	2.8	9.5	3.4	535.2	2.61	11.39	4.36	1.07	0.78
	-	567.1	2.7	7.3	2.7					1.06	0.62

Qexp (kN) : 最大強度の実験値, Qana (kN) : 最大強度の解析値,

Ra ($\times 10^{-3}$ rad) : 最大強度 $\times 0.8$ の値と実験の包絡線または解析のスケルトンカーブの交点の小さい方の値,

Rb ($\times 10^{-3}$ rad) : 最大強度 $\times 0.8$ の値と実験の包絡線または解析のスケルトンカーブの交点の大きい方の値,

μ exp : Rb/Ra の実験値, μ ana : Rb/Ra の解析値

は 36.25° , 00SR-2,3 は 41.19° とする。圧縮ストラットと剛体要素との接合部のせん断応力は摩擦抵抗に基づく滑り強度を超える。実験では圧入された目地モルタルが滑落せず, PCa パネルの滑りは H 形鋼柱によって拘束されていることが観察されている。このことから, 接合部のせん断応力と滑り強度との差は, H 形鋼柱または上下 RC 梁で抵抗されるものとし, 滑りの影響は省略する。

表-3 に各部材の強度と剛性を, 図-5 に結合バネの構成則を示す。弾塑性解析は上記の条件を考慮し, 変位増分法に基づいて行う。

4. 解析結果

図-6 および 7 に全試験体の実験の力-変形関係と解析のスケルトンカーブを示す。最大強度付近までは, どの試験体も, 解析値は実験の力-変形関係のスケルトンカーブを, 大要, 再現している。

試験体 00SR-2 の最大強度の実験値は, 開口ま

わりの RC 梁のせん断破壊によって限界づけられている。一方, 解析では, マクロモデルに設定したせん断バネの構成則が降伏流れを仮定しているため, スケルトンカーブは最大強度以降で平滑域を形成している。しかし, RC 梁のせん断バネが降伏したときの層間変形角は実験で観察されたものと同様である。

試験体 00SR-1, 4 および 5 は, 他の試験体に比べて, PCa パネルの幅が大きい。しかし, 圧縮ストラットが全域で有効に働かず, 実験と解析の最大強度は試験体 00SR-3 よりも小さくなっている。これは, PCa パネルの上下 RC 梁が圧縮ストラットを拘束するのに十分な剛性をもたないことに起因している。

表-3 に最大強度と靱性率 μ の実験値, 解析値, およびその比を示す。解析の最大強度は実験の最大強度を的確に捉えている。しかし, 変形解析は, 最大強度前の Ra を, 大要, 評価できているが,

最大強度後の R_b は大きめに評価している。モデルの再検討が必要である。

図-8 に試験体 00SR-1 と 3 の最大強度時の応力状態、および 00SR-2 の開口まわり RC 梁がせん断強度に達したときの応力状態を示す。図中の数値は、RC 柱と H 形鋼柱の脚部位置の負担せん断力と圧縮ストラットの軸力を示している。また、図の●印は降伏している軸力バネを、×印はせん断強度に達しているせん断バネを表わしている。破線で示してある圧縮ストラットは有効でない部材である。

試験体 00SR-1 は最大強度時において、RC 柱、H 形鋼柱ともに曲げ降伏をしているが、圧縮ストラットが中央対角域で有効でない。これは、実験のひび割れ状況とよく一致している。

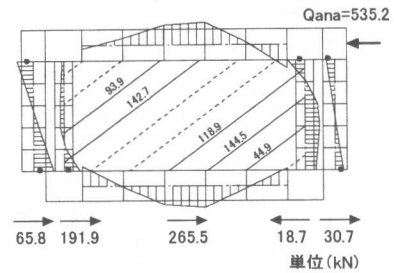
試験体 00SR-2 は RC 柱と圧縮側 H 形鋼柱の柱脚で曲げ降伏の状態にあるが、開口まわりの RC 梁のせん断バネが降伏している。また、00SR-1 に比べ、H 形鋼柱によって上下 RC 梁の変形が拘束され、圧縮ストラットは中央対角域で有効に作用している。

試験体 00SR-3 は、開口まわりの RC 梁を接合プレートによってせん断補強している。実験では、開口まわりの RC 梁にせん断ひび割れは生じていなかった。RC 柱は柱頭、柱脚において曲げ降伏に近い状態を示し、H 形鋼柱は曲げ降伏している。圧縮ストラットは 00SR-2 と同様に中央対角域で有効に作用し、その領域も広がっている。解析のスケルトンカーブも実験結果をよく捉えている。これらから、この試験体に採用した RC 梁のせん断補強の方法は有効といえる。

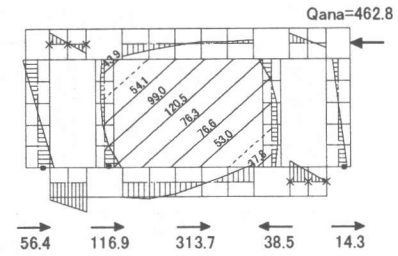
5. RC 梁の補強法の有効性の検討

一般に耐震補強が必要な既存 RC 構造は、RC 梁の強度と剛性に乏しいものが多い。このため、柱間隔が大きい場合、補強耐震壁の保有せん断耐力を確保するためには RC 梁の強度と剛性を高めることが必要になる。

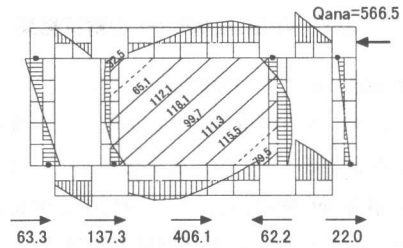
ここでは、試験体 00SR-3 でその有効性が認められたせん断補強法を、上下 RC 梁全長にわたっ



(a) 試験体 00SR-1



(b) 試験体 00SR-2



(c) 試験体 00SR-3

図-7 最大強度時の応力状態

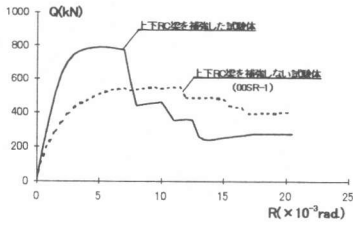
て用いた場合の有効性について検討結果を示す。

a) 試験体 00SR-1 の上下 RC 梁を全長にわたる接合プレートでせん断補強した解析

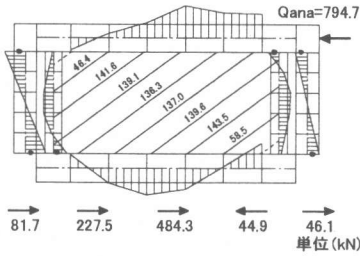
接合プレートは、幅：RC 梁のせい、厚さ：2-PL9、材質：SS400 とし、2-φ17@200 の PC 鋼棒で上下 RC 梁の側面に接合される。補強された RC 梁の曲げ剛性は RC 梁と接合プレートの累加とし、せん断剛性は十分に大きい値とした。その他は、試験体 00SR-1 と同じである。

図-9 に解析のスケルトンカーブと最大強度時の応力状態を示す。図には、RC 梁にせん断補強を施さない場合のスケルトンカーブを重ねて描いてある。

解析結果は、図-8 (a) に比べて最大強度が増大し、圧縮ストラットの有効域が広がっていることを示している。また、RC 柱と H 形鋼柱は、いずれも柱脚で曲げ降伏が、それに近い状態にあり、

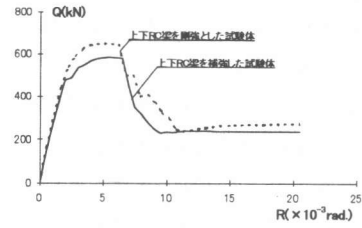


(a) 解析のスケルトンカーブ

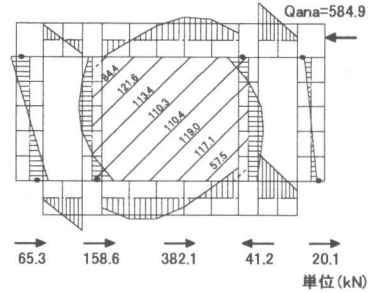


(b) 最大強度時の応力状態

図-9 補強した00SR-1の解析結果



(a) 解析のスケルトンカーブ



(b) 最大強度時の応力状態

図-10 99SWFH₂O₂-3の解析結果

試験体 00SR-3 に近い性状を示している。一方、圧縮ストラットの破壊により、スケルトンカーブは最大強度以降に強度が急激に低下している。

b) 試験体 99SWFH₂O₂-3¹⁾ の RC 梁を全長にわたってせん断補強した場合の解析

試験体 99SWFH₂O₂-3 は連層の補強耐震壁の基層をモデル化しているため、RC 下梁を剛強にしてある。ここでは、RC 下梁も上梁と同じ断面をもつマクロモデルを設定した。補強の接合プレートは a) と同じである。図-10 に解析のスケルトンカーブおよび最大強度時の応力状態を示す。図-10 (a) には、上下 RC 梁を剛強として扱った 99SWFH₂O₂-3 の解析結果を重ねて描いてある。この解析結果は、実験のスケルトンカーブとよく対応していたものである。図は、せん断補強によって圧縮ストラットの有効域が広がり、上下梁を剛強とした場合に近づくことを示している。

これらの結果は、既存 RC 構造の RC 梁の強度と剛性が不足する場合、接合プレートを PC 鋼棒で圧着接合する補強方法の有効性が認められることを示している。しかし、補強の量を定量的に把握するためには、さらなる実験的または解析的検討が必要である。

6. まとめ

本研究の結果は、次のようにまとめられる。

- 1) 上下 RC 梁を分割したマクロモデルの弾塑性解析によって、中間層の補強耐震壁のカー変形関係と応力状態を捉えることができる。
- 2) 既存 RC 梁の強度と剛性が不足するとき、接合プレートを圧着接合する補強法は有効である。

参考文献

- 1) 鳥屋隆志, 望月洵, 池田文好, 守屋嘉晃: PCa パネルを用いた既存 RC 構造の耐震補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.1633-1638, 2000.6
- 2) S.Popovics: Factors Affecting the Elastic Deformations of Concrete, Mechanical Behavior of Materials, Proceeding of the International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol.IV, Society of Materials Science, Japan, pp.172-183, 1972
- 3) 望月洵, 小野里憲一, 中島直子: 修正簡略マクロモデルによる耐震壁 573 体の最大強度の解析精度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.205-206, 1997.9