

# 論文 大きな偏在開口をもつ耐震壁の強度と変形

竹原雅夫\*1・望月 洵 \*2・飯田正敏\*3・村本 肇 \*3

要旨：大きな偏在開口をもつ耐震壁について、たれ壁の有無、側柱の全主筋比をパラメータにした試験体の実験とマクロモデルによる弾塑性解析を行っている。その結果、1)最大強度と最大層間変形角は壁板の圧壊によってその大きさがきまる、2)破壊モードは側柱の全主筋比によって左右される、3)強度と変形はマクロモデルによる弾塑性解析でよく評価できる、などを明らかにした。

キーワード：開口耐震壁、マクロモデル、最大強度、最大層間変形角

## 1. はじめに

中央開口をもつ耐震壁について、多くの実験的および解析的研究が蓄積されている。筆者らもマクロモデルの極限解析による最大強度の評価と構成則を導入した弾塑性解析による強度と変形の評価を試み、有用な成果を得ている[1][2]。しかし、出入口のような大きな偏在開口をもつ耐震壁については、必要にも関わらず扱った研究は少ない。山田らは、対角加力の実験結果に基づき解析モデルを提案しているが、強度と変形について妥当な評価に達していない[3]。野村らは、実験から耐震性能をまとめているが、強度と変形の評価については言及していない[4]。また小野らは、開口による低減率を用いた強度評価を試み、よい成果を得ているが適用例が少なく、また圧力場面積の算定方法に不明確な点が残っている[5]。本研究は、これらを考慮して、偏在開口をもつ耐震壁の試験体の実験から破壊性状の把握を、さらにマクロモデルを用いた弾塑性解析による強度と変形の評価を目的としている。

## 2. 実験計画

実験は、たれ壁の有無および側柱の全主筋比をパラメータとし、これらが開口耐震壁の破壊性状

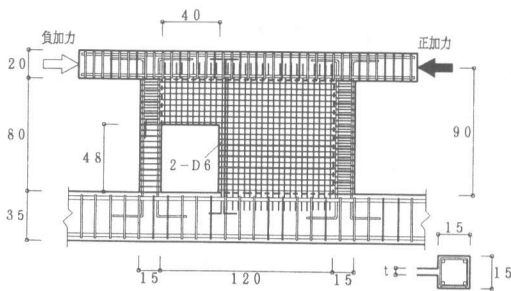


図1 試験体：94SW0-4,5 (単位:cm)

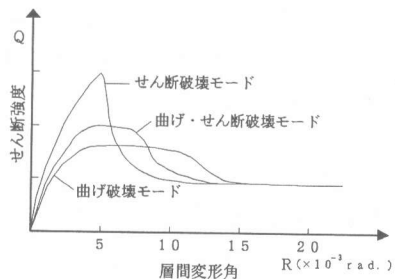


図2 破壊モードと包絡線の関係

\*1 東京建築専門学校、工修（正会員）

\*2 工学院大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

\*3 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻

表1 試験体の諸性質と実験結果

試験体名	柱		壁		$\sigma_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	実験値		解析値		
	Pg (%)	Pw (%)	t (cm)	Ps (%)		Qexp (tf)	Rbexp	Qcal (tf)	Qexp Qcal	
94SW0-01	3.54 (4-D16)	1.07 (D6- @40)	3.6	0.90	$(\phi 4-$ @40)	307.5	+18.90 -17.94	+7.7 -8.8	+19.10 -19.40	0.99 0.92
94SW0-02	2.26 (4-D13)		3.3	0.97		321.6	+16.31 -15.13	+10.0 -11.4	+15.60 -16.20	1.04 0.93
94SW0-03	1.27 (4-D10)		3.5	0.93		322.4	+12.21 -14.06	+14.0 -14.2	+13.00 -14.50	0.94 0.97
94SW0-04	3.54 (4-D16)		3.6	0.90		332.7	+23.06 -23.74	+8.9 -9.1	+21.90 -31.20	1.05 0.76
94SW0-05	2.26 (4-D13)		3.3	0.97		338.7	+17.72 -20.98	+7.7 -7.5	+18.00 -27.00	0.98 0.77

【共通】上梁：bxD= 15x 20(cm) 上・下各 2-D16 スタラフ° D10-@60  
 下梁：bxD=318x310(cm) 上・下各 2-D25 スタラフ° D10-@100  
 鉄筋の降伏強度(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 D16:3719, D13:3629, D10:3658, D6:3133,  $\phi 4$ :4980

【記号】

Pg : 柱の全主筋比      Pw : 帯筋比      t : 壁厚      Rbexp : 最大層間変形角 (0.8QexpとQ-R  
 Ps : 壁筋比       $\sigma_b$  : コンクリートの圧縮強度      曲線との交点の大きい方の層間  
 Qexp : 実験の最大せん断強度      Qcal : 解析の最大せん断強度      変形角) (単位:  $\times 10^{-3}$ rad.)

と抵抗機構に与える影響の検討を意図している。試験体は、片側柱に隣接した大きな偏在開口をもつ耐震壁で、連層耐震壁の第1層を模したものである。上梁は上層壁板の拘束を考慮して幾分剛強な、下梁は基礎梁を考慮して十分に剛強な断面と補強筋をもっている。両側柱はせん断破壊が先行しないように帯筋で補強されている。試験体94SW0-1, 2, 3はたれ壁がなく、試験体94SW0-4, 5はたれ壁がある。試験体94SW0-1, 4、94SW0-2, 5、および94SW0-3の全主筋比は、それぞれ3.54%、2.26%、および1.27%で、全主筋比の大きい順にせん断破壊モード、曲げ・せん断破壊モード、および曲げ破壊モードで終わるように計画されている。なお、破壊モードの定義は筆者らの提案に基づいている[6]。

図1に試験体94SW0-4, 5の形状寸法と配筋を、表1に試験体の諸性質を示す。試験体94SW0-1, 2, 3の形状寸法と配筋は、たれ壁がないことを除いて図1と同じである。図2は、破壊モードと力-変形関係の包絡線との関係を示す模式図である。加力は上梁に作用する正負交番水平力とし、変位制御で与えた。加力サイクルは最大荷重または層間変形角 $R=10.0 \times 10^{-3}$ rad. までは $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad. ごと2回、それ以降は $R=1.0 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ rad. ごと1回とし、 $R=25.0 \times 10^{-3}$ rad. まで加力した。変形計測は、上梁と下梁の相対水平変位を変位計で、側柱主筋の上・下端および縦開口補強筋の上・下端の歪を歪ゲージで計測した。

3. 実験結果

各試験体の破壊経過は次のようである。

試験体94SW0-1, 2 : 両試験体とも全く同じ破壊経過を示した。 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad. で壁板中央に斜め亀裂が発生し、引張側柱脚部に曲げ亀裂が生じた。その後、最大荷重に達するまでに壁板にほぼ45°方向に傾斜した直交亀裂網ができ、圧縮ストラットが形成された。両側柱には曲げ亀裂と断面を横切る水平亀裂が生じた。側柱の中間部にも圧縮ストラットからの拘束反力による曲げ亀裂が多く生じた。最大荷重には、94SW0-1は $R=6.0 \times 10^{-3}$ rad. 前後で、94SW0-2は $R=8.0 \times 10^{-3}$ rad. 前後で達し、その際壁板の剥離をとまなう圧壊が局所的に生じた。その後、両試験体とも壁板の圧壊域が拡がり、強度低下を示したが、 $R=10.0 \times 10^{-3}$ rad. 以降安定な抵抗に移行した。破壊モードは、94SW0-1がせん断

破壊モード、94SW0-2が曲げ・せん断破壊モードであった。図3に94SW0-1の最終時亀裂状況と力-変形関係を示す。

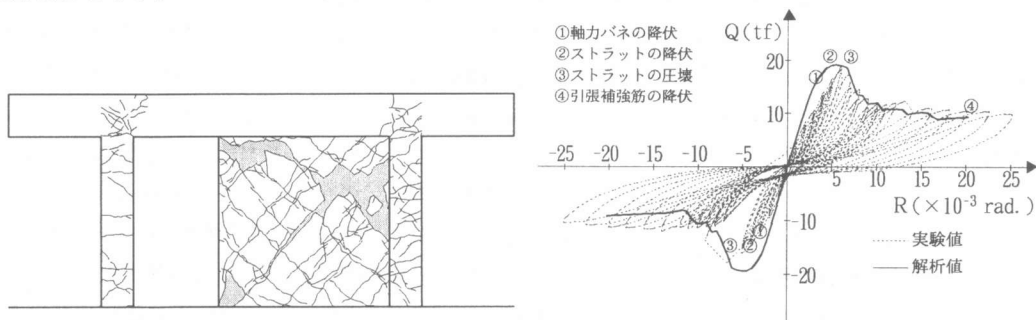


図3 最終時亀裂状況と力-変形関係：94SW0-1

試験体94SW0-3：最大荷重には $R=8.0 \times 10^{-3}$  rad. 前後で達した。ここまでの経過は94SW0-1, 2と大きく変わらない。正加力域では、最大荷重以降に力-変形曲線の包絡線は平滑域を形成し、その後ゆるやかな強度低下を示した。この間、左右側柱下端の水平亀裂は拡幅した。負加力域では明確な平滑域が存在しなかったが、破壊モードは曲げ破壊モードであった。図4に最終時亀裂状況と力-変形関係を示す。

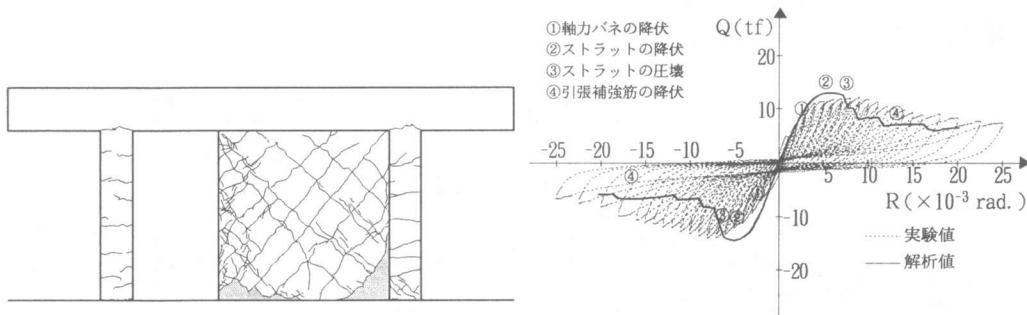


図4 最終時亀裂状況と力-変形関係：94SW0-3

試験体94SW0-4, 5：側柱のたれ壁下端位置に曲げ亀裂が多く生じたことを除けば、破壊経過は94SW0-1, 2に近いものであった。最大強度には $R=6 \sim 7.0 \times 10^{-3}$  rad. 前後で達し、壁板中央での剥離をとまなう圧壊とともに急激な強度低下を示し、その後、安定な抵抗に移行した。両試験体とも破壊モードはせん断破壊モードであった。図5に94SW0-5の最終時亀裂状況と力-変形関係を示す。

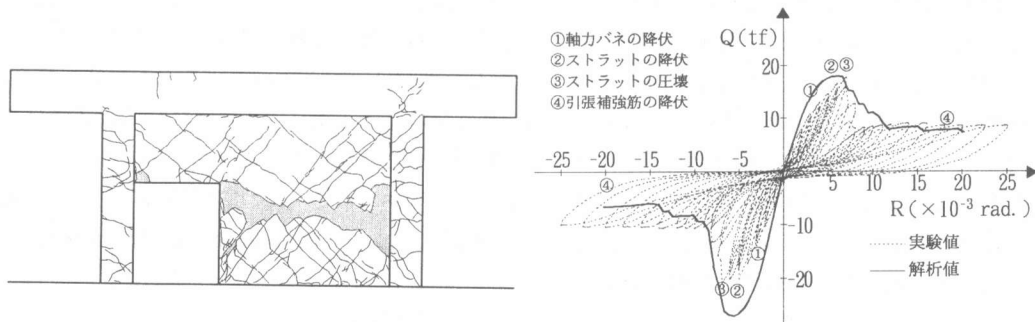


図5 最終時亀裂状況と力-変形関係：94SW0-5

全試験体に共通して、正負加力域の力-変形関係はほぼ同じで、その最大強度に著しい差異は生じなかった。一般に偏在開口耐震壁の場合、正負加力域の最大強度には差異があると考えられている。実験的には文献[2]に著しい差異が報告されている。ただし、この試験体の多くは壁板の圧壊とともに側柱にせん断破壊が生じている。一方、解析的には文献[3]の圧力場の考え、および筆者らの弾塑性解析モデルの抵抗機構からは、正負加力域での最大強度の差異は考えられる。これは圧力場または圧縮ストラットが一つの加力域で圧壊に達したとき、これと交差する圧力場または圧縮ストラットが他の加力域において有効とする前提に基づく。本実験の場合、この前提が成りたなかつたため、最大強度に著しい差異が生じなかったと考えられる。図6は、試験体94SW0-5の右側柱下端の主筋歪および縦開口補強筋上・下端歪と層間変形角との関係である。歪は加力サイクルのピーク時の値である。負加力域で主筋4本のうち、内側の2本が最大強度以降で降伏歪に近づいているが、降伏歪に達していない。開口補強筋も同じである。

これらの実験結果から、偏在開口耐震壁は最大強度時において次の抵抗機構にあったといえる。

壁板は斜め亀裂の発生によって圧縮ストラットを形成し、縦補強筋は引張ブレースとなる。左側柱の上・下端は曲げ降伏し、右側柱は圧縮ストラットの拘束反力をうけて、正加力域で上端が、負加力域で下端が曲げ降伏しているかこれに近い状態にある。水平力には、圧縮ストラットと引張側柱のアーチ作用および圧縮側柱のせん断力で抵抗している。耐震壁の最大強度と最大層間変形角は圧縮ストラットの圧壊によってその大きさがきまる。このとき一つの加力域での圧縮ストラットの圧壊が他の加力域での破壊性状に影響を与える。

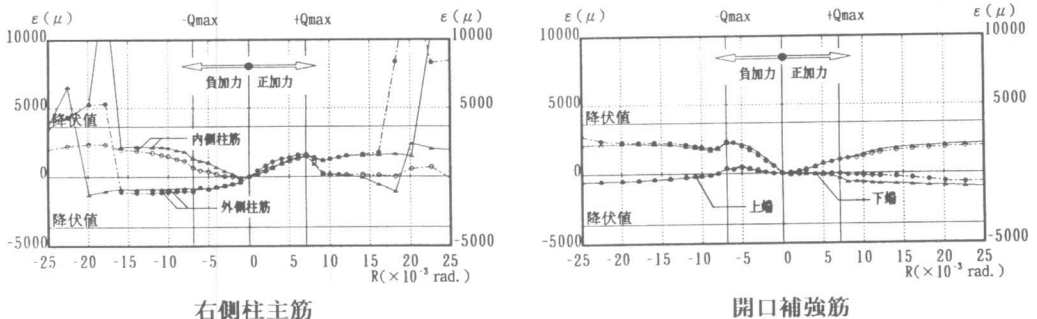


図6 右側柱主筋歪および縦開口補強筋歪と層間変形角の関係：94SW0-5

#### 4. マクロモデルによる弾塑性解析

図7に試験体のマクロモデルを示す。マクロモデルは、壁板に斜め亀裂が十分に生じた状態を考え、上・下梁、側柱、圧縮ストラット、および縦横の引張補強筋より構成される。圧縮ストラットの傾斜角は実験で観察された亀裂の状態から45°とし、開口をよぎる圧縮ストラットと縦・横の引張補強筋は有効でないとして除去される。縦開口補強筋は上・下梁に定着されているため考慮される。上・下梁は断面が大きいこと、および大きな亀裂が生じなかったことから剛体として扱う。側柱は剛体要素および弾塑性軸力バネと弾性せん断バネに置換される。これらの構成部材の構成則は、文献[2]で用いたものと同じとしている。ただし、圧縮ストラットはPopovicsの応力-歪関係[7]を次のように修正した関係にしたがうとする。

$$\sigma = \frac{n \cdot \xi}{n-1 + \xi^n} \cdot \sigma_B' \quad \text{ただし、} \quad \left. \begin{aligned} \sigma_B' &= 0.63 \sigma_B, n = 0.57 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma_B + 1 \\ \xi &= \varepsilon / \varepsilon_0, \varepsilon_0 = 4.29 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_B^{0.25} \end{aligned} \right\} (1)$$

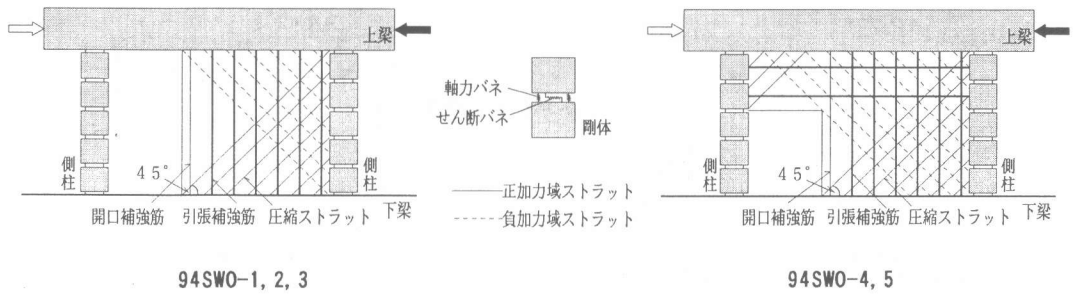


図7 マクロモデル

解析には、側柱の分割数を5、圧縮ストラットの分割幅を8cm程度とし、材料定数と板厚は実測値とした。ただし、コンクリートのヤング係数には  $E_c = 2.1 \times 10^5 \times \sqrt{\sigma_B / 200}$  kgf/cm<sup>2</sup> を用いた。解析法は層間変形角の増分  $\Delta R = 0.5 \times 10^{-3}$  rad. の変位増分解析である。

表1に最大強度の実験値、解析値、および実験値／解析値を示す。表中の+-の記号はそれぞれ正加力と負加力を表す。図8に正負加力域の最大強度の実験値と解析値の関係を示す。解析結果は、試験体94SWO-1, 2, 3に対して正・負加力ともよく評価できている。試験体94SWO-4, 5の場合、正加力の最大強度を的確に捉えているが、負加力の最大強度は過大評価となっている。これは、実験では正加力域に

おける圧縮ストラットの圧壊が負加力域の圧縮ストラットの圧壊をも引き起こしていることによる。図3, 4, 5に解析の包絡線を実線で、構成部材の降伏または圧壊が初めて生じた点を数字で示してある。94SWO-3, 5の負加力域を除けば、最大強度以降も含めてよく実験値と対応している。

図9は試験体94SWO-1, 5の最大強度時におけるマクロモデルの破壊状況である。試験体94SWO-1は正加力域で、壁板中央よりの圧縮ストラット3本が降伏し、また左側柱上・下端および右側柱上端で曲げ降伏している。負加力域では、壁板中央よりの圧縮ストラット3本が降伏し、左側柱上・下端および右側柱下端が曲げ降伏している。いずれの加力域でも側柱の軸降伏は生じていない。試験体94SWO-5もその抵抗機構は94SWO-1と大きく変わらないが、正加力域で左側柱下端のみ曲げ降伏し、右側柱では上端と中央部で曲げ降伏している。負加力域では、左側柱上・下端と右側柱下端が曲げ降伏している。しかし、たれ壁の存在によって圧縮ストラット数が正加力域に比べて多く、最大強度が大きくなっている。これらの解析による壁版と側柱の破壊状況は実験で観察された破壊状況によく対応している。図9, 10に最大強度時における下梁上端位置のせん断力を示してある。これから、上梁に作用する水平力は一部左側柱を流れるが、ほとんどの水平力は正加力域で右側柱上部から圧縮ストラットの軸力となって、また負加力域では圧縮ストラットから右側柱下端のせん断力となって下梁に伝わっている。最大耐力は全主筋比が大きくなるほど大きくなり、またたれ壁があることによって増加している。これは全主筋比が大きくなるとせん断破壊モードとなること、圧縮側柱の曲げ降伏強度が大きくなること、およびたれ壁の存在によって圧縮側柱のせん断抵抗が増加することに起因している。

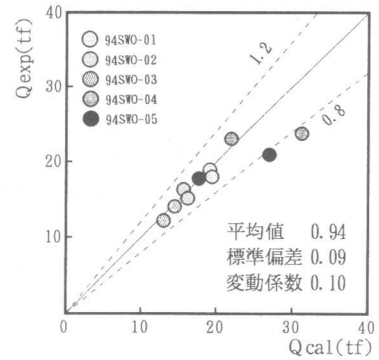


図8 最大強度の実験値と解析値の関係

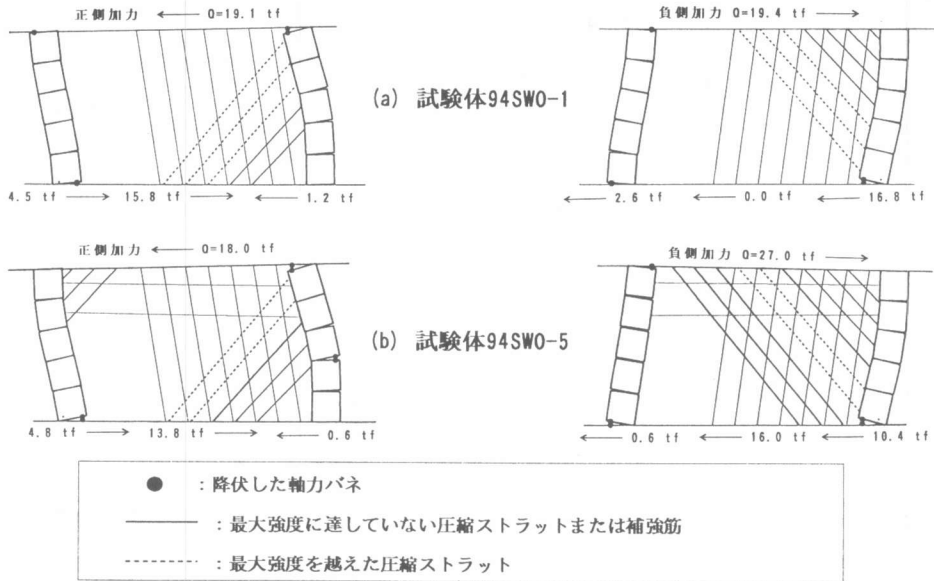


図9 最大強度時のマクロモデルの破壊状況

## 5. 結び

- 1) 最大強度と最大層間変形角は壁板の圧壊によってその大きさがきまる。この場合、正負加力の最大強度の差異は大きくない。
- 2) 破壊モードは側柱の全主筋比の大小によって左右される。
- 3) 強度と変形は、マクロモデルによる弾塑性解析でよく評価できる。

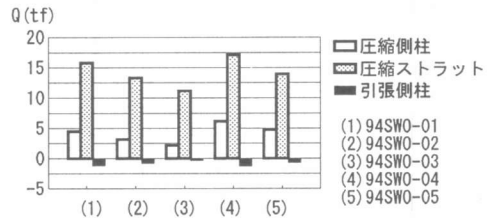


図10 最大強度時の側柱と圧縮ストラットのせん断力の解析値：正加力域

## 参考文献

- [1]竹原雅夫・望月 洵・小野里憲一・鈴木章司：有開口連層耐震壁の最大強度式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 2，pp. 885-890，1992
- [2]竹原雅夫・望月 洵・小野里憲一・赤塚孝行：有開口連層耐震壁のマクロモデルによる弾塑性解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 2，pp. 1197-1200，1993
- [3]山田稔・河村広・西川泰弘：偏在開口鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性交番繰返し変形性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp. 1619-1620，1981. 9
- [4]野村設郎・川口俊郎・土田伸二：鉄筋コンクリート縦開口壁の耐震性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp. 1909-1910，1984. 10
- [5]小野正行・徳広育夫・倉富和義：鉄筋コンクリート造縦長開口耐震壁の水平耐力の評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 2，pp. 1191-1196，1993
- [6]竹原雅夫・望月 洵・小野里憲一・飯田正敏：有開口耐震壁の破壊モードの判別式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 2，1994
- [7]S. Popovics：Factors Affecting the Elastic Deformation of Concrete. Proc. of the International Conference on Materials, Kyoto, 1971, Vol. IV, pp. 172