

# 論文 高靱性型セメント材料を用いた鉄骨コンクリート構造柱の復元力特性に関する実験的研究

高橋 宏行\*1・前田 匡樹\*2・倉本 洋\*3

**要旨：**本研究では、鉄骨鉄筋コンクリート構造(以下、SRC 構造)の施工を合理化することを目的に、鉄筋を省略した鉄骨とコンクリートからなる合成構造(以下、SC 構造)を開発するため、SC 構造および一般的な SRC 構造の柱の曲げせん断加力実験を行ない、復元力特性について比較検討した。その結果、SC 構造柱は通常の SRC 構造と同程度の復元力特性であった。また、高靱性型セメント系材料を用いることによって、コンクリートのひび割れや圧壊などの損傷も少なく靱性に富む性能が得られることが明らかとなった。

**キーワード：**鉄骨コンクリート構造、高靱性型セメント材料、ひび割れ幅

## 1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート構造(以下、SRC 構造)は、鉄骨構造と鉄筋コンクリート構造を合成した構造システムであり、より高い耐力・変形性能が得られることが知られている。しかし、SRC 構造は、鉄骨工事及び鉄筋工事の両方が必要であり、施工が複雑になるという短所がある。そこで、SRC 構造の鉄筋を省略した鉄骨コンクリート合成構造(以下、SC 構造)で、施工を合理化することを検討した。しかし、SC 構造のコンクリート部分は、鉄筋による拘束がなく拘束効果を期待できないので、かぶりコンクリート部分は、早期に剥落することが予測され、耐力・変形性能にはあまり有効ではないと考えられる。そこで、このコンクリート部分に、最近研究開発<sup>[1][2][3]</sup>が行なわれている高靱性型セメント系材料を使用することにより SC 構造の欠点を補うことを検討した。高靱性型セメント系材料は、コンクリート中あるいはモルタル中に短繊維を混入する方法で靱性能を向上させ、コンクリートの弱点となる引張性状に改善が見られ、ひび割れ幅抑制、せん断補強効果が期待できる材料である。

以上のような背景のもと、本研究では、鉄骨と高靱性型セメント系材料からなる合成構造システムを開発し実用化することを目的とした、柱部材

の曲げせん断加力実験を行ない、その復元力特性について比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体形状を図-1 に、試験体一覧を表-1 に示す。

試験体は、上下に加力スタブを有し、柱部分は断面  $b \times D = 400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、内法高さ  $h_0 = 1600\text{mm}$  (せん断スパン比  $M/QD=2$ ) とした。

一般的な SRC 構造柱を基本モデルとした試験体、計 4 体を作成した。

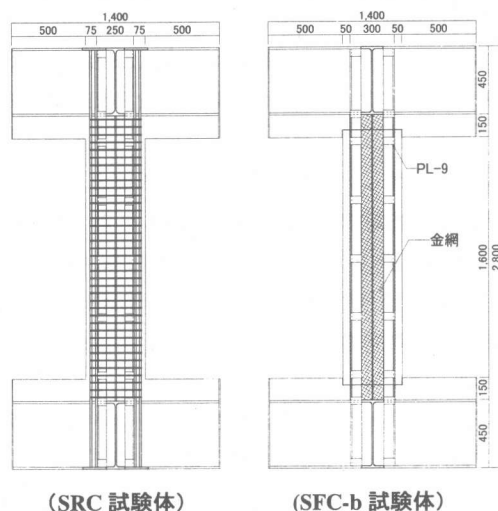


図-1 試験体形状例

\*1 (株)大林組 (正会員)  
 \*2 東北大学大学院 助教授 工学研究科 都市・建築学専攻, 博士 (工学) (正会員)  
 \*3 建設省建築研究所 企画部 国際研究協力官, 工学博士 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名		SRC	SC	SFC	SFC-b
断面形状 (mm)					
構造形式		SRC	SC		
コンクリート	種類	普通コンクリート		PVA-ECC <sup>1)</sup>	
	$\sigma_B$ (MPa)	35.5	37.3	31.2	34.8
	$E_c$ (GPa)	24.1	26.1	10.2	11.4
鉄骨		2H-250×125×6×9 (SS400)		2H-300×150×6.5×9 (SS400)	
主筋		12-D13 (SD295)	—	—	—
帯筋		2-D6@50 (SD295)	—	—	—
鉄骨とコンクリートとの付着		—	—	—	フランジ-金網
曲げ降伏強度	$Q_y$ (kN) <sup>2)</sup>	414.4	475.6	387.2	408.9
終局曲げ強度	$Q_{mu1}$ (kN) <sup>2)</sup>	510.0	531.6	522.1	554.2
	$Q_{mu2}$ (kN) <sup>3)</sup>	489.2	524.0	483.4	508.7
せん断強度	$Q_{su}$ (kN) <sup>3)</sup>	489.2	477.1	463.1	471.8

1)  $\sigma_B$ ,  $E_c$  共に 4 パッチの平均値による。 2) 平面保持を仮定した曲げ解析 3) SRC 規準計算値

表-2 PVA-ECC 特性表

ビニロン繊維の力学的特性						PVA-ECC 調合							
径 ( $\mu$ m)	長さ (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張 強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)	破断 伸び (%)	水セメント 比 W/C (%)	繊維 混入量 $V_f$ vol.(%)	所要量 ( 1 パッチあたり)					
								水 W (kg)	セメント C (kg)	砂 S (kg)	繊維 $V_f$ (kg)	増粘剤 V (g)	消泡剤 (g)
40.8	15.0	1.30	1850	43.9	7.0	50	1.5	87.0	43.5	34.8	1.77	43.5	4.35

SRC 試験体は標準試験体であり、2H - 250×125×6×9 の十字鉄骨を内蔵し、主筋 12 - D13、帯筋 2 - D6@50 を配筋し、曲げ降伏をせん断破壊に先行させるように設計した。他 3 体は、SRC 構造の鉄筋を省略し、標準試験体と曲げ強度を合わせるために、内蔵鉄骨の断面積を大きくした 2H - 300×250×6.5×9 の十字鉄骨を内蔵した SC 構造とした。SC 試験体は、SC 構造の性状を確認するため、鉄骨周囲に普通コンクリートを用いた。SFC 試験体及び SFC-b 試験体は、普通コンクリートの代わりに、引張韌性に富む高韌性型セメント系材料を用いた。更に SFC-b 試験体では、鉄骨とコンクリートの付着を改善するため、内蔵鉄骨の 4 面のフランジに金網を点溶接で貼付けた (図-1 参照)。部材の強度計算は、「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」<sup>14)</sup>(以下、SRC 規準)における終局曲げ耐力式、終局せん断耐力式、及び平面保持

を仮定した曲げ解析による。材料強度を用いた各強度の計算結果を表-1 に示す。曲げ解析では、コンクリートの応力 - 歪関係は Park-Kent モデル (拘束効果を無視) を用い、PVA-ECC は図-2 のようにモデル化した。鋼材はバイリニアモデルを用いた。曲げ終局モーメントは、コンクリートでは圧縮線の歪度が 0.3%、PVA-ECC では 0.6% となった時の値とした。

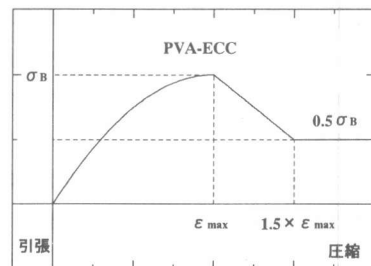


図-2 PVA-ECC のモデル化

本研究で使用した高靱性型セメント系材料は、既往の研究<sup>2)</sup>で研究開発された、ビニロン繊維を用いたビニロン繊維補強モルタル(以下、PVA-ECC(Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite))である。ビニロン繊維は長さ 15mm、直径 40.8  $\mu\text{m}$  のものを使用し体積混入率は 1.5% とした。表-2 に、ビニロン繊維の力学的特性、PVA-ECC の調合を示す。PVA-ECC の応力-歪関係は図-3 に示すように、約 2MPa でひび割れが発生した後もひずみ度 1% 程度まで引張応力度が上昇するという高い靱性を有することに特徴がある。使用したコンクリート、PVA-ECC および鉄骨、鉄筋の材料試験結果を表-1、表-3 に示す。試験体打設は 1 体につき 4 パッチ(1 パッチにつき調合容量で 72l)で縦打ちとした。

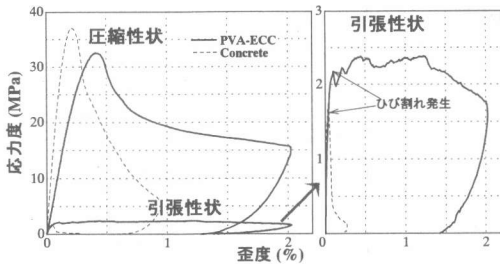


図-3 PVA-ECC 材料特性

表-3 鉄骨・鉄筋の材料試験結果

種類	規格	ヤング係数 (GPa)	降伏応力度 (MPa)	備考
H-300x150 x6.5x9	SS400	207.6	322.6	フランジ
		214.8	411.8	ウェブ
H-250x125 x6x9	SS400	203.9	299.5	フランジ
		209.4	346.8	ウェブ
PL-9	SS400	217.2	379.4	タイプレート
D13	SD295	180.9	328.7	主筋
D6	SD295	202.9	413.3	帯筋

## 2.2 加力方法

加力は、図-4 に示す加力装置図を用いて行なった。載荷は、一定軸力(軸力比  $\eta = N / (bD \sigma_B) = 0.2$ ) および正負逆対称曲げせん断交番載荷とした。水平載荷の加力履歴は変形制御とし、部材変形角  $R=0.25\%$  を 1 サイクル、0.5%、1%、1.5%、2%、3%、4% を 2 サイクルずつ繰返した後、5% まで載荷し、加力を終了した。

## 3. 実験結果

各試験体の荷重変形関係を図-5 に、実験結果の一覧を表-4 に示す。部材降伏点は、主筋およびフランジが降伏歪に達し、部材の荷重変形関係において剛性が低下する点とした。

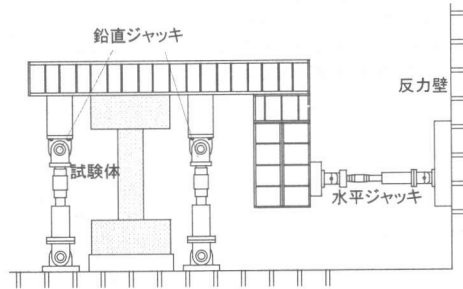


図-4 加力装置

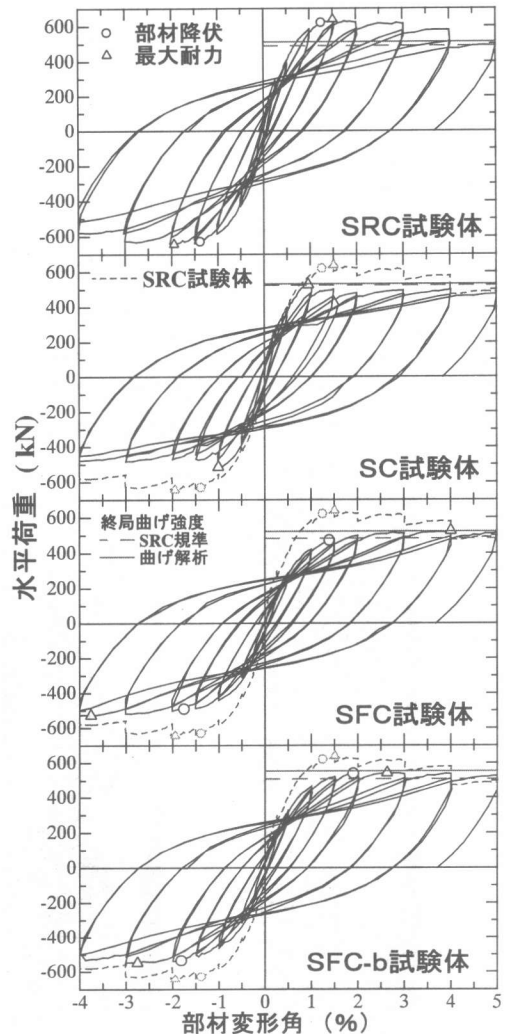


図-5 荷重変形関係

表-4 実験結果一覧

試験体	部材降伏時		最大耐力時	
	Ry (%)	Py (kN)	Rmax (%)	Pmax (kN)
SRC	1.3	620.3	1.5	638.2
SC	1.0	527.2	1.0	527.2
SFC	1.4	472.4	4.0	524.8
SFC-b	1.4	540.7	2.6	542.2

3.1 変形性状および破壊性状

各試験体の最終破壊状況を、写真-1~写真-4 に示す。

(1) SRC 試験体では、非常に高い性能を示すことが確認できた。変形性状では、部材変形角 (R=) 1.5%において、危険断面のコンクリートの圧壊が生じ始め、横補強筋が降伏し始めると最大耐力に達した。破壊はヒンジ部分のコンクリートの圧壊に集中し、R=4%において主筋が座屈するといった破壊形式を示した。

(2) SC 試験体については、柱部分の拘束がないため、R=0.5%という早期から柱部中央においてせん断ひび割れが生じ、その後、R=1%で危険断面のフランジが降伏し始めると、最大耐力に達し、せん断ひび割れが大きく開き、若干耐力が低下した。その後、大変形まで荷重変形関係曲線は、他の試験体と同様に履歴面積の大きい紡錘型のループであった。しかしながら、使用性、修復性の点でそれぞれの限界変形は、他の試験体よりかなり

小さいものであると判断される。

(3) PVA-ECC を用いた SFC 試験体および SFC-b 試験体においては、荷重変形関係を SRC 試験体、SC 試験体と比較すると、初期剛性が低いという特徴が見られた。これは、PVA-ECC の剛性が普通コンクリートに比べて低いこと、乾燥収縮によって初期ひび割れが多く生じたことなどが、要因として考えられる。ひび割れ性状については、ひび割れは発生するが大きく開かず、ひび割れの分散効果が確認できた。R=5%まで加力したが、圧壊などの PVA-ECC の剥落は発生せず、健全な状態での高い靱性能が確認できた。

SFC-b 試験体において、付着の改善のために金網を貼り付けたが、若干の初期剛性および最大耐力の向上が見られた以外は、SFC 試験体と顕著な差異はなかった。

3.2 耐力、エネルギー吸収能力の比較

各試験体の耐力低下を比較するため、最大耐力で基準化した荷重変形関係包絡線を図-6 に示す。エネルギー吸収能力の評価を等価減衰定数により行った。等価減衰定数  $h_{eq}^{[5]}$  の比較を、図-7 に示す。

SRC 試験体の最大耐力は、終局曲げ耐力の計算値と比べ非常に高かった。他 3 体の SC 構造である試験体の最大耐力は、SRC 試験体よりは低いものの、終局曲げ耐力の計算値は上回った。SRC

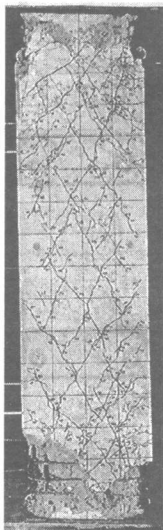


写真-1  
SRC 試験体



写真-2  
SC 試験体

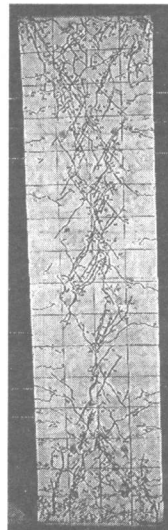


写真-3  
SFC 試験体

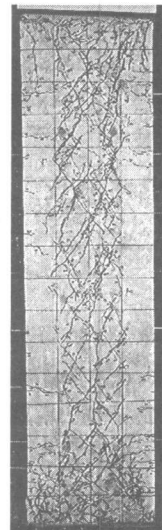


写真-4  
SFC-b 試験体

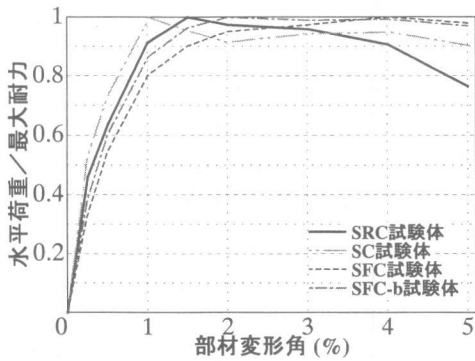


図-6 最大耐力で基準化した荷重変形関係包絡線

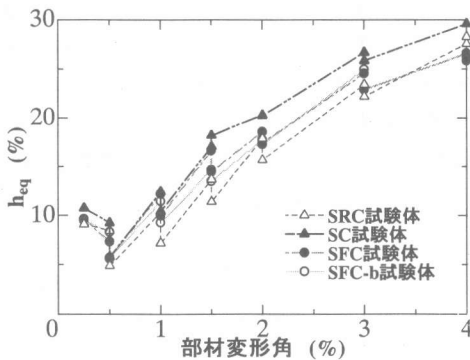


図-7 等価減衰定数の比較

験体は変形の増大と共に最大耐力の80%まで耐力低下した。これに対し、PVA-ECCを用いたSFC試験体、SFC-b試験体は、ほとんど耐力低下は見られず高い靱性変形性能が得られた。

エネルギー吸収能力については、全試験体で、 $h_{eq}$ は類似した傾向を示し、高いエネルギー吸収能力を示したため、明瞭な差は見られなかった。破壊性状が大きく異なるSC試験体においても、SRC試験体と同程度のエネルギー吸収能力が得られた。

### 3.3 ひび割れ幅の測定

各試験体の各変形、第1サイクルピーク時、および除荷時においてひび割れ幅をクラックスケールにより測定した。各試験体の正載荷、除荷時の最大せん断ひび割れ幅の推移を図-8に、最大曲げひび割れ幅の推移を図-9に示す。正載荷、負載荷では、ほぼ同様の挙動を示した。

鉄筋を配筋していないSC試験体においては、せん断ひび割れ幅の進展が顕著であることが分

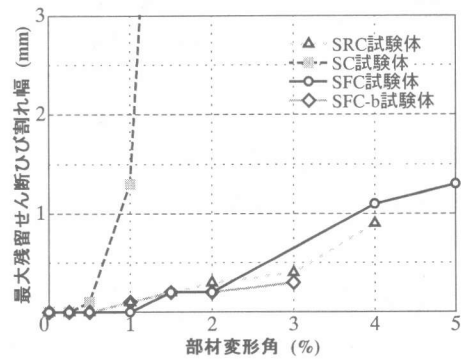


図-8 最大残留せん断ひび割れ幅の推移

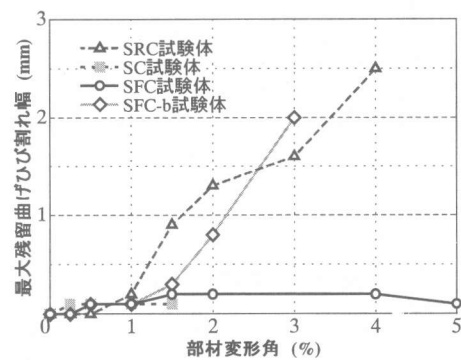


図-9 最大残留曲げひび割れ幅の推移

かる。それに対し、PVA-ECCを用いたSFC試験体、SFC-b試験体では、PVA-ECCが鉄筋により拘束されていないにもかかわらず、コンクリートが鉄筋で拘束されているSRC試験体と同じように、せん断ひび割れはあまり進展しなかった。このことから、SC試験体は、SRC試験体と同程度の優れた履歴性状が見られたが、 $R=1$ 程度から残留ひび割れによる損傷が大きく、使用性、修復性の点での変形性能は他の試験体よりも劣っていると考えられる。一方、PVA-ECCを用いたSFC試験体、SFC-b試験体においては、試験区間でのひび割れ幅は小さく、圧壊による剥落も起きず、 $R=5$ 程度の大変形まで修復が比較的容易に行なえる程度の損傷であることから、使用限界、修復限界変形はSRC試験体、SC試験体よりも大きく、使用性、修復性に優れた構造システムであることが明らかとなった。

### 3.4 鉄骨コンクリート間のすべり量の測定

鉄骨コンクリート間のすべり量の測定は、鉄骨フランジ及びかぶりコンクリートに定着したネジ棒の相対変位により、図-10 に示す位置、計 6 ヶ所で行なった。各サイクル、ピーク時の測定結果を図-11 に示す。相対的に鉄骨が上側にすべるときすべり量を、正とする。

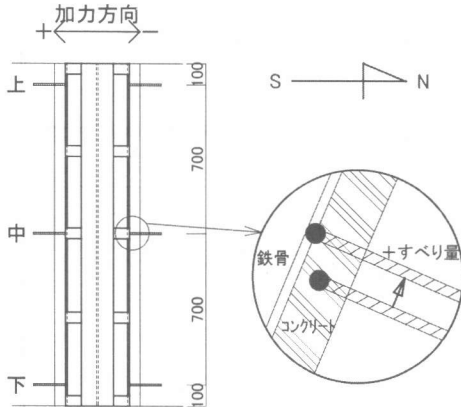


図-10 すべり量測定位置

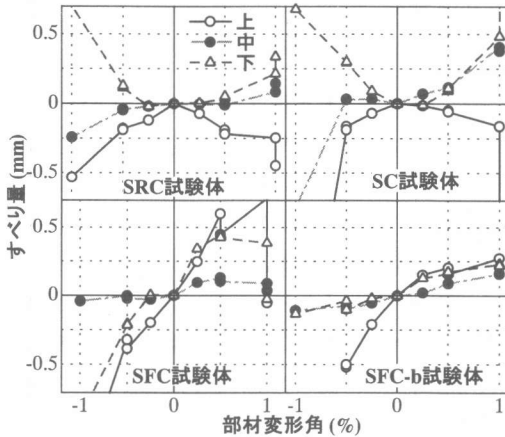


図-11 鉄骨コンクリート間のすべり量の比較(南側)

各試験体で明瞭な差は見られなかったが、SRC 試験体では鉄筋による拘束を受けているためすべり量は小さかった。SFC-b 試験体は、鉄筋による拘束を受けていないが、フランジに金網を貼付したことから、附着性状に改善が見られすべり量が小さくなっていった。SFC-b 試験体で初期剛性の改善が得られたのは、附着が改善されたことによると思われる。

### 4. まとめ

SRC 構造の施工性を改善するため、鉄筋を省略した、SC 構造の実用化を検討することを目的に、一般的な SRC 構造及び SC 構造の、柱部材の比較実験を行なった。その結果、SC 構造においても、SRC 構造と同程度の優れた耐力・履歴性状が得られた。しかし、 $R=1$ 程度からせん断ひび割れが拡大し、使用性、修復性の点での変形性能は劣っていた。普通コンクリートの代わりに高靱性型セメント系材料である PVA-ECC を用いた SC 構造では、PVA-ECC の高い靱性から、コンクリート (PVA-ECC) 部のひび割れや圧壊などの損傷が大変形時まで小さなレベルに留まると共に、耐力・靱性に富む良好な構造性能が得られ、SC 構造の実用可能性を確認することができた。

本研究で用いた PVA-ECC には、短繊維を混入する事により施工性が悪くなること、骨材が入っていないことから材料の剛性が低いことといった弱点があるが、SC 構造システムとしてこの弱点を補うことが、今後の検討の課題である。

#### 【謝辞】

本研究は日米共同研究「Smart Structural Systems」(日本側委員長: 小谷俊介・東大教授) の一環として行われたものである。研究立案の段階で同・エフェクタ部会/セメント複合材料 WG (主査: 松崎育弘・東京理科大学) の委員の方々に貴重なご意見を賜った。また、PVA-ECC の製作、打設、材料試験では、建設省建築研究所・福山洋博士、同・諏訪田晴彦氏、(株)東急建設・磯雅人氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

#### 【参考文献】

- [1] Li, V. C. : From Micromechanics to Structural Engineering—The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol.10, No.2, pp.37-48, July, 1993
- [2] 佐藤幸博, 福山洋, 金久保利之: 高靱性セメント系複合材料の基本的力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1435-1440, 1999.7
- [3] 蔵谷幸憲, 福山洋, 中野克彦, 松崎育弘: 高靱性セメント系複合材料を用いた梁部材の構造性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.511-516, 1999.7
- [4] 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1987
- [5] 柴田明徳: 最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析, 1981