

論文 RC コア壁の繰返し載荷実験のシミュレーション解析

*1 *2 *1 *3
宮下 丘 ・ 丸田 誠 ・ 高橋 元美 ・ 鈴木 紀雄

要旨：高層建物のコア部に耐震壁を設ける架構が最近多く出現してきており、実験および解析的研究が進められてきている。耐震壁を解析する方法としてはブレース置換、壁谷沢モデルやFEM法などがあるがFEM法は壁を忠実にモデル化できるとともに、使用されている材料を設定することにより耐震壁の終局時までの追跡が可能である。

本報告はRCコア壁の繰返し加力時の挙動をFEMを用いて解析を行ない、実験結果との比較を行ない解析法の可能性を検討したものである。

キーワード：シミュレーション解析、FEM、耐震壁、繰返し加力、高層建物

1. はじめに

RC造高層建物はフレームのみの架構が主流であったが、最近ではコア部に耐震壁を設ける架構が多く出現してきた。建物に耐震壁を取り入れる事は以前から検討されてきたが、一つには耐震壁を設置すると建物全体の剛性が硬くなりその結果として地震力が増えてしまい、耐震壁の効果があまり発揮されないことになった。

またRC柱の挙動が複雑なうえに耐震壁を架構に取り入れると地震時の建物の挙動を把握しづらい等の問題により耐震壁が用いられなかった。

しかし、建物の中心部に耐震壁を設けると耐震壁は曲げ変形が卓越し、建物全体の剛性もあまり硬くならず靱性に富んだ架構が可能となってきた。このため靱性のある耐震壁を開発するための実験や挙動の解明が進められている。

耐震壁を解析する方法としては柱やブレース置換、壁谷沢モデルやFEM等の方法が考えられている。これらの解析法の中でFEM法は壁を忠実にモデル化できるとともに、使用されるコンクリートや鉄筋の材料性能を設定することにより壁の挙動を追跡できる方法である。

FEMによるRC構造物の解析はコンクリートのひび割れ発生後の性状を中心に挙動が明らかになり終局時までの解析が可能となり、現在は

[1]
繰返し加力時の解析が精力的に行われ、解析精度も進歩しつつある。

本報告は繰返し加力を受けるH形コア壁の終局時までの挙動をFEMを用いて解析を試み、実験結果との比較検討を行なったのでその結果について報告するものである。

2. 解析法

解析はCloughらの開発した積層3角形シェル要素を用いたFEM解析法による。コンクリートは各々の層で独立に応力とひずみを求め、鉄筋は配筋される方向のみ剛性を有する鉄板に置換される。

解析上でのコンクリートの取り扱いについて以下に述べる。

- [4]
1) コンクリートは直交異方性とし、各々の主軸の応力とひずみ等から剛性を決める。
- [4][5]
2) コンクリートの応力-ひずみ関係は図-1に示すように仮定する。
- [5]
3) ひび割れ発生に伴うコンクリート強度の低下は次の式に従う。

$$\beta = 0.8 + 0.6 \left\{ (\epsilon_1 + 0.0002) \times 10^3 \right\}^{0.39} \quad (1)$$

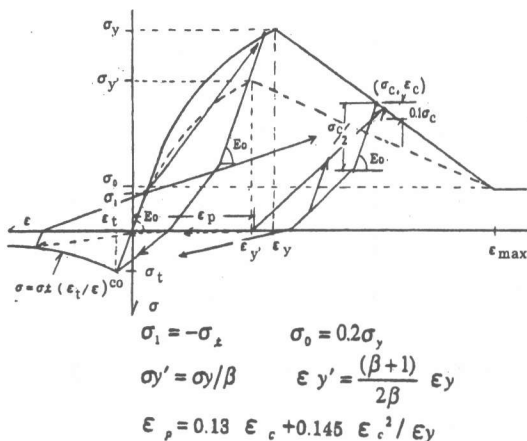
ただし $1.0 \leq \beta \leq 3.0$

ϵ_1 ひび割れ直交方向の引張ひずみ

*1 鹿島 情報システム部 工博 (正会員)

*2 鹿島 技術研究所 (正会員)

*3 鹿島 小堀研究室 工博 (正会員)



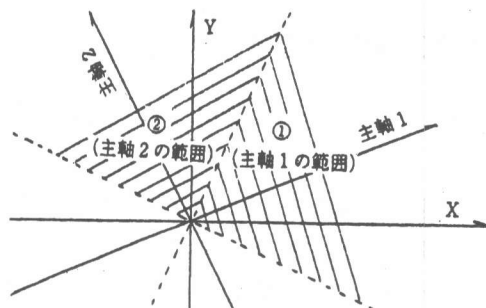
図—1 コンクリートの応力—ひずみ関係

4) ひび割れ発生後のコンクリートのせん断剛性は青柳らの式を用いる。

$$G = 3.6/\varepsilon_1 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

5) ひび割れ発生後の応力—ひずみ関係を規定する常数 c_0 は曲げ破壊が卓越する部分では 1.0 せん断破壊が卓越する部分では 0.6 を用いる。

次に繰り返し解析で問題となる主軸の決めかたについて述べる。最初に各々の要素に 2 つの主軸を仮定する。主軸はコンクリートのひび割れ方向になるべく直交する方向に設定する。2 つの主軸は必ずしも直交する必要はないがなるべく直交に近いほうが望ましい。図—2 のように仮定した主軸より主軸 1 は①の範囲とし主軸 2 は②の範囲とする。従って主方向は変化しても解析上の主軸は固定して解析を進める。



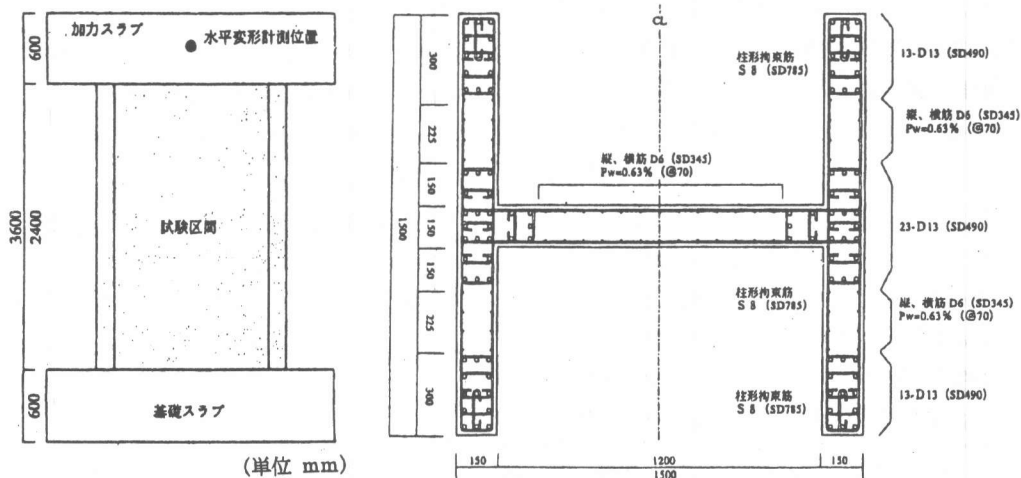
図—2 解析での主軸の取り扱い

また、解析時に応力—ひずみ関係が負勾配になる時があるが、その時は剛性を零として次のステップで減少すべき応力を外力として処理する。このような方法で解析を進めると最大耐力が判明しなくなるので、コンクリートと鉄筋の塑性状況より判断することとする。

3. 解析モデルおよび解析条件

図—3 に示す高強度コンクリートを用いた H 形壁を解析する。

H 形壁の強軸と弱軸に外力が働く 2 つのモデルを解析する。外力としては軸力を $0.1F_c(6.0\text{MPa})$ で一定とし、せん断力と曲げモーメントを繰り返し加力する。コア壁の曲げモーメント勾配を実建物と同じとするため実験モデルの頂部に曲げモーメントと水平力（脚部の曲げモーメントの 32% を水平力で 68% を曲げ加力）を加力する。



図—3 試験体概要と壁の配筋図

最終サイクルのひび割れ状況は図-4に示すように2つのケースとも実験では曲げ破壊で最大耐力に至った。加力に変形制御で行ない部材角で表-1の様におこない10サイクルで破壊に至らしめた。

解析モデルを図-5に示す。H形壁の端部や隅角部ではせん断補強筋が一般壁部より多いため、両部でコンクリートの応力-ひずみ関係を変える。拘束を受けるコンクリートは崎野らの式を用いて決める。コンクリートと鉄筋の材料性能は材料試験結果より表-2および表-3に示す値を解析では用いる。

解析では変位制御でなく荷重制御で行なうため必ずしも各サイクルの変位は実験値と一致し

表-1 加力手順

サイクル	①	②③	④⑤	⑥⑦	⑧⑨	⑩
変形角 (R)	1/800	1/400	1/200	1/100	1/50	破壊まで

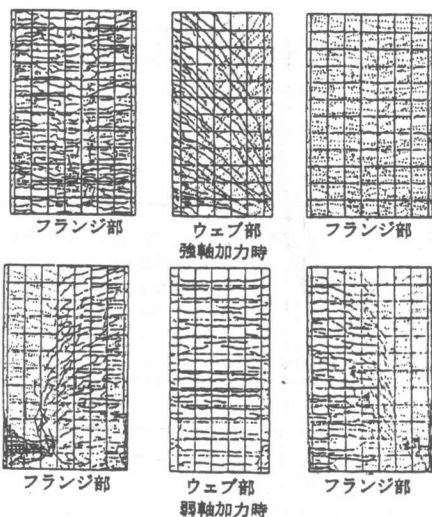


図-4 最終サイクルのひび割れ状況

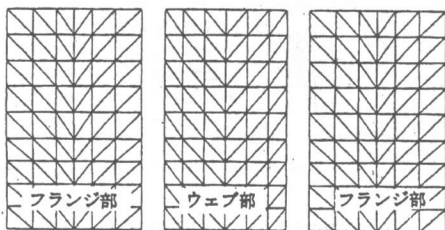


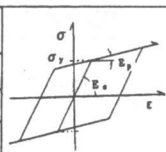
図-5 解析モデル

表-2 コンクリートの材料性能

部位	E_c $\times 10^4$ MPa	σ_y MPa	ϵ_y	ϵ_t	ϵ_{max}
コア部	3.10	71.0	0.0050	0.0001	0.0900
一般部	3.10	62.0	0.0030	0.0001	0.0055

表-3 鉄筋の材料性能

鉄筋	E_s $\times 10^5$ N/mm ²	σ_y N/mm ²	E_p $\times 10^5$ N/mm ²
D6	2.10	379	0.0042
S8	2.10	873	0.0042
D12	2.10	576	0.0042



無くても良いとして解析を進める。また、解析では最大耐力後の不安定な状態は解析不可能なので、最大耐力が発生する時点まで解析する。

4. 解析結果

1) H形壁の強軸方向加力のケース

最初に単調載加の結果について報告する。

図-6に脚部曲げモーメントと頂部水平変形の関係を示す。解析結果と実験結果はひび割れ発生後の剛性低下を除き両者は比較的良好な一致を示した。コンクリートのひび割れ発生荷重は解析値と実験値は一致したが、鉄筋の降伏は解析の方が幾分低い荷重で発生した。

最大耐力は解析では引張り側フランジ壁脚部の縦筋が全て降伏するとともに、圧縮側フランジ脚部のコンクリートが圧縮強度を超えた負勾配域に入った時点と仮定したところ解析結果の最大耐力は9800.kN m となった。実験では変形角が1/25で加力装置の都合上実験を終了したが、この時点で圧縮側フランジ脚部のかぶり

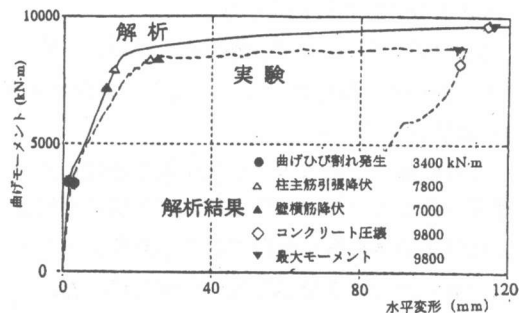


図-6 強軸加力時の脚部曲げモーメントと水平変形の関係 (単調加力)

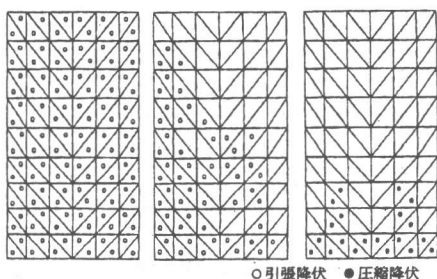


図-7 強軸加力時の縦筋の降伏状況
(最大モーメント時)

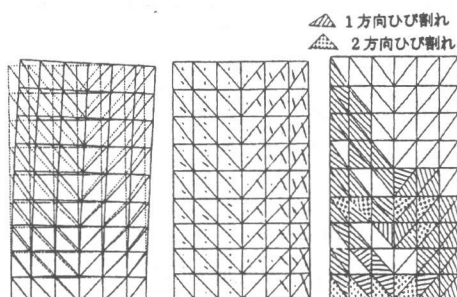


図-8 強軸加力時のウェブ部の変形、主応力
およびひび割れ図 (最大モーメント時)

コンクリートが剥落するとともに内部に埋め込んだモールドゲージの値からもコンクリートが圧壊したと考えられるので実験での最大耐力は8728kNmと判断される。従って、最大耐力は解析結果の方が高い耐力となったが最大耐力時の変形はほぼ良い一致を示した。

図-7に最大耐力時の鉄筋の降伏状態を示す。縦筋は引張り側フランジ壁脚部とウェブ壁脚部のほとんどの部分で引張り降伏が発生し、圧縮側フランジ壁脚部は圧縮降伏が認められた。

図-8に最大耐力時のウェブ部の変形、主応力およびひび割れ図を示す。

次に繰り返し加力時の解析結果について述べる。図-9に脚部曲げモーメントと頂部水平変位の関係を示す。

解析結果と実験結果を比較すると初期剛性は両者一致しているが、ひび割れ発生後の剛性低下は実験結果の方が顕著であるが全体的スケルトンカーブは両者比較的良好一致を示した。

履歴ループは解析結果はきれいな紡錘形を示したが、実験結果は幾分逆S字形を示すため履

歴ループの面積は解析結果の方が大きい結果となった。また、実験では一定変位の繰り返し加力に対し剛性の低下は起こらなかったが、解析結果はウェブ部にせん断ひび割れが発生しひび割れ幅の増大とともにコンクリート強度が低下するため剛性低下が認められた。

曲げひび割れ発生、壁端部の柱主筋の引張り降伏、コンクリート圧壊および最大耐力等の発生荷重は両者良い一致を示した。

図-10に最大耐力時の鉄筋の降伏状態を示す。引張り側フランジ壁および圧縮側フランジ壁の脚部縦筋は全て降伏し、ウェブ壁の縦筋では引張りおよび圧縮降伏が認められた。横筋の降伏はウェブ壁で若干認められた。

図-11に主要なサイクルでのウェブ壁部のコンクリートの主応力図を示す。単調載荷の解析結果の主応力分布とこの図を比較するとウェブ壁の脚部に主応力方向に乱れが認められる。

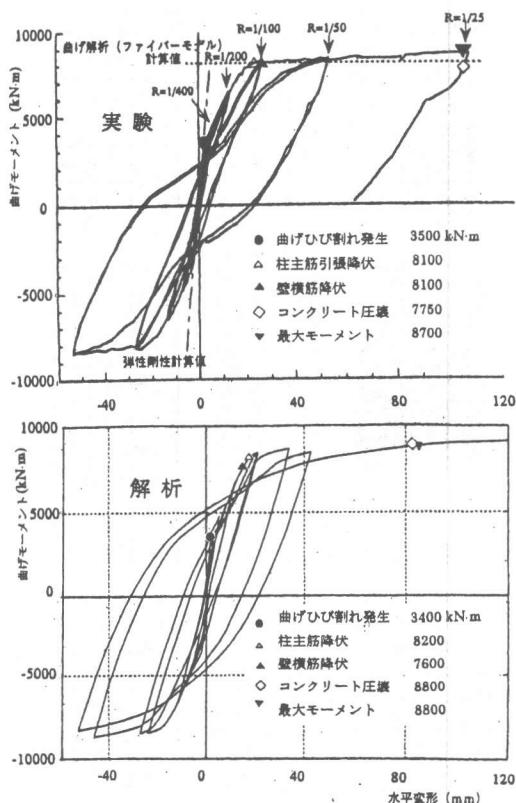
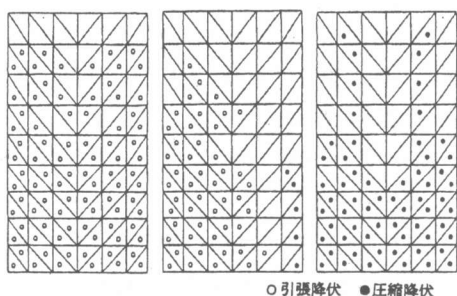
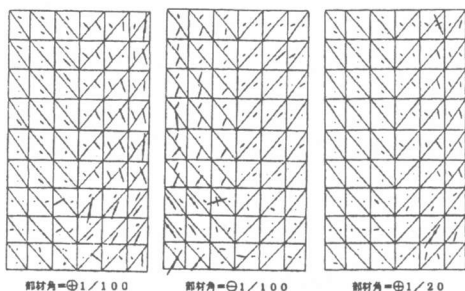


図-9 強軸加力時の脚部曲げモーメント
と水平変形の関係 (繰り返し加力)



図一 10 強軸加力時の縦筋の降伏状況
(繰り返し加力)

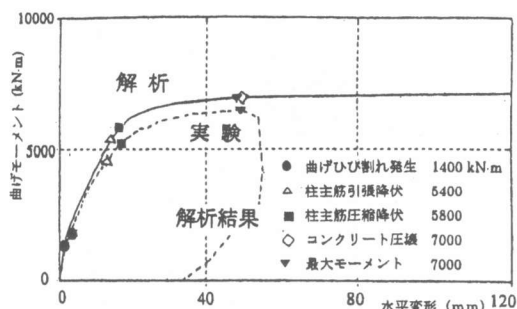


図一 11 強軸加力時のコンクリートの主応力
(ウェブ壁部)

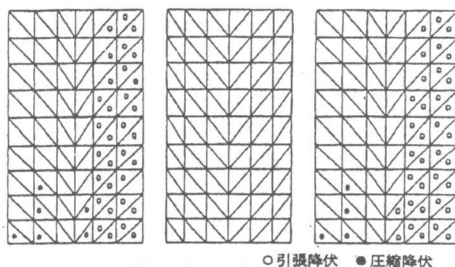
2) H形壁の弱軸方向加力のケース

最初に単調荷の結果について述べる。図一 1 2 に脚部曲げモーメントと頂部水平変位の関係を示す。解析の最大耐力はフランジ壁脚部の圧縮側コンクリートが負勾配域に至った時点とする。解析結果は実験結果より幾分耐力が大きいものの、両者は比較的良好な一致を示した。コンクリートのひび割れ発生や柱主筋の降伏等の荷重も解析値の方が幾分大きい結果となった。最大耐力時の鉄筋の降伏状態を図一 1 3 に示す。フランジ壁の引張り側および圧縮側で縦筋の降伏が認められるが、横筋の降伏は壁全域で認められなかった。図一 1 4 にフランジ部壁の変形、主応力およびひび割れ図を示す。

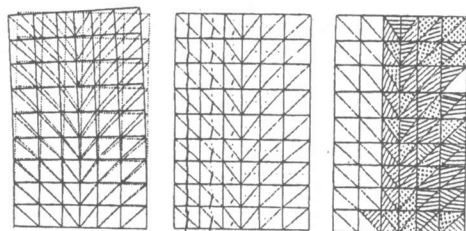
次に繰り返し加力時の解析結果について述べる。図一 1 5 に脚部曲げモーメントと頂部水平変位の関係を示す。解析値と実験値は比較的良好な一致を示した。しかし、解析結果は実験結果より一定変形時の繰り返し加力による剛性低下が認められた。柱主筋の引張りおよび圧縮降伏の発生荷重は解析値と実験値は一致している



図一 1 2 弱軸加力時の脚部曲げモーメント
と水平変形の関係 (単調加力)



図一 1 3 弱軸加力時の縦筋の降伏状況
(最大モーメント時)

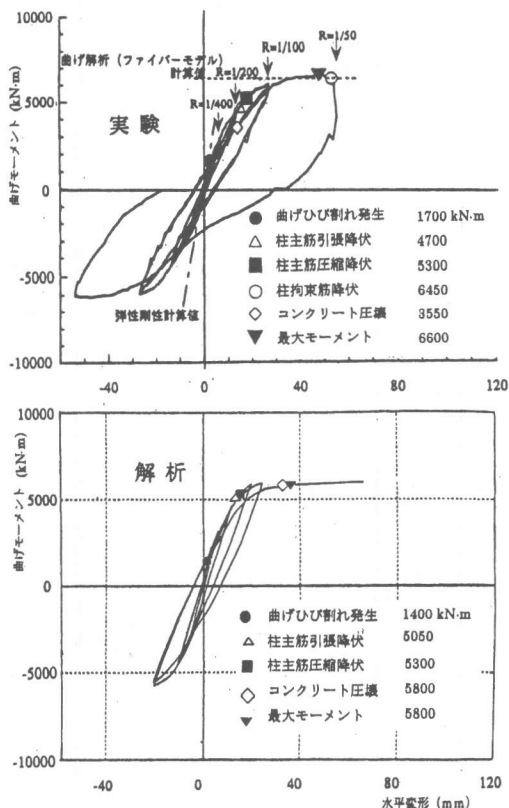


図一 1 4 弱軸加力時のフランジ部の変形、
主応力およびひび割れ図 (最大モーメント時)

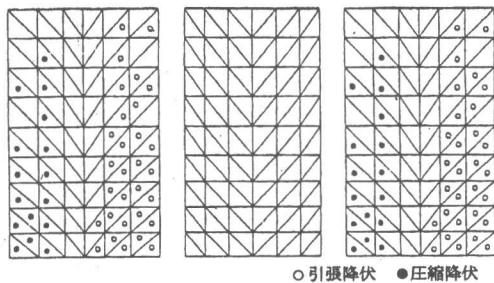
が曲げひび割れ発生と最大耐力は解析結果の方が低い結果となった。図一 1 6 に最大耐力時の鉄筋の降伏状態を示す。鉄筋の降伏は2つのフランジ壁でのみ認められ、縦筋は引張りおよび圧縮降伏が壁のかなりの高さまで認められる。また、横筋の降伏はどこにも認められなかった。

図一 1 7 に主要サイクルでのフランジ壁部のコンクリートの主応力図を示す。これを見ると主応力分布は単調解析の主応力分布と良く一致している。

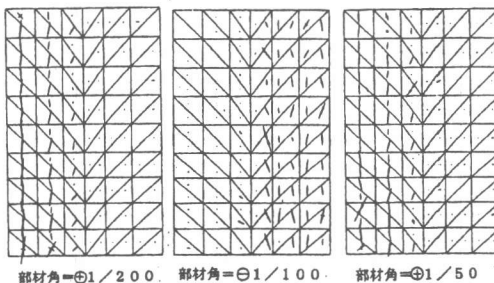
繰り返し加力を受けるH形壁の解析を行ない、解析結果のコンクリートや鉄筋の降伏状況およびコンクリートの主応力等より強軸及び弱軸方向とも解析は正常に終了したものと判断される。



図一15 弱軸加力時の脚部曲げモーメントと水平変形の関係 (繰返し加力)



図一16 弱軸加力時の縦筋の降伏状況 (繰返し加力時)



図一17 弱軸加力時のコンクリートの主応力 (フランジ部)

5. まとめ

繰返し加力を受ける H 形コア壁の解析を行ない次のような事が分かった。

- 1) H形コア壁の繰返し加力に対する水平変位はほぼ追跡できた。
- 2) コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏発生荷重および最大耐力等もほぼ実験結果と一致した。

また、解析を通じて次の点が今後の問題として残った。

- 1) 同一変形での繰返し加力に対する剛性の低下が解析結果の方が顕著である。
- 2) ひび割れ発生に伴う剛性低下が解析結果の方が小さい傾向にある。

これらの事はひび割れ発生後のコンクリートの応力-ひずみ関係をどのように定式化するかということに帰着する問題である。今後も解析を試み、コンクリートのひび割れ発生後の挙動を明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] Report on Simulation of Ultimate Dynamic Response Test of Seismic Shear Wall"
Committee the Safety of Nuclear Installations
OECD Nuclear Energy Agency March 1996
- [2] 別所、丸田、鈴木、永井 “H形断面RCコア壁の構造確認実験” (その1 実験計画及び結果概要)
(その2 実験結果の解析的検討)
日本建築学会大会梗概集 1997年9月 pp.185-188
- [3] 津川、宮下、本橋、森川 “RCシェル構造物の弾塑性解析プログラム” 日本建築学会 1981年3月
第3回電子計算機利用シンポジウム pp.145-150
- [4] 宮下、速水 “鉄筋コンクリート平板の繰返し加力に対する弾塑性解析”
(その3 繰返し時のコンクリートの応力-ひずみ関係)
日本建築学会大会梗概集 1990年10月 pp.1353-1354
- [5] 建設省総プロ “鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発”
高強度鉄筋分科会 構成方程式・有限要素法WG
研究成果報告書 平成5年3月 pp.33-35
- [6] 孫、崎野 “高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の靱性改善に関する実験的研究”
コンクリート工学年次大会論文集
1993年6月 Vol.15 No.2 pp.719-724