

論文

[2046] RBSMによる鉄筋コンクリートディープビームの破壊解析

鬼頭 宏明<sup>1</sup>, 竹内 則雄<sup>2</sup>, 上田 眞稔<sup>3</sup>, 樋口 晴紀<sup>4</sup>

1. はじめに

近年、コンクリート構造物に対する限界状態設計法への推移・適用に相まって、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の破壊に至る挙動を数値解析的手法により評価しようとする研究 [1,2] が活発に行われている。しかしながら、主たる手法として用いられている有限要素法は、連続体力学をその基礎とし、不連続現象が卓越するRC構造物の崩壊挙動、すなわち各載荷段階においてコンクリートのひびわれやせん断すべりの発生・進展に起因して刻々とその構造形態が変化する過程を終局状態まで追跡するには、数学的取扱いの難しさが伴い種々の技巧を必要とする。

一方、RBSM（剛体ばねモデル）[3] は、構造物の崩壊挙動に鑑み、剛体要素の集合体とそれらを連結するばねとにより、離散化モデルを構築するものであり、そのため要素間のすべり・分離等の非線形かつ不連続な現象を簡便に取扱える利点を有する。著者らは、このRBSMの特性に着眼し、その手法をRC構造物の離散化極限解析、例えばせん断壁 [4]、純せん断供試体 [5,6]、梁部材 [7]、コーベル [8] 等に適用してきた。

本研究は、RCディープビームの破壊に至る挙動をRBSMにより追跡を試みたものである。本稿では、まずRBSMにおけるRC構造物の材料構成関係の導入方法について解説し、継いでRC構造物にみられる複雑な非線形挙動を合理的に対処できるアルゴリズム、すなわち導入された材料構成関係に則り、ひびわれ、すべり、圧壊、再接触等の破壊進展状況を逐次評価しながら山田の  $r_{min}$  法 [9] を適用する手法を提示する。最後に既往のRCディープビームの耐荷力実験供試体 [10] に対する数値解析結果を例示し、RC構造物に対する本解析手法の有用性を検証する。

なお、本研究はJCI・破壊力学の応用研究委員会主催『コンクリート構造物の破壊に関する共通解析および実験』（以下、共通解析）の一環として実施したものであることを付記する。

2. RC要素のモデル化

RC要素のモデル化に際しては、鉄筋の配置方向を考慮した等価な直交異方性板とする方法を採用する。すなわち、一層のコンクリート要素と数層の鉄筋直交異方性要素の重ね合わせを行い一つのRC要素を構築する。このとき、ひびわれ後の付着効果はコンクリートにテンション・スティフニング効果を持たせることにより表現する。このようなRC要素を用い、鉄筋量の多い箇所だけ注意して要素分割を行えば自由度の増加を防ぐことができる。なお、RBSMによるRC要素のモデル化に関する詳細については文献 [4,5] を参照されたい。

3. RC材料の構成則

図1の点線はコンクリートの1軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線を示したものである。数値計算では、この曲線を図中の実線のトリリニアにより近似する。本稿では、圧縮強度を  $F_c$  とし

<sup>1</sup>大阪市立大学助手, 工学部土木工学科, 工修 (正会員)

<sup>2</sup>明星大学助教授, 理工学部土木工学科, 工博

<sup>3</sup>(株) 竹中工務店技術研究所主席研究員, 工修 (正会員)

<sup>4</sup>(株) 安部工業所技術部長

て、圧縮1次降伏  $F_{c1} = 0.5F_c$ 、圧縮2次降伏  $F_{c2} = 0.95F_c$ 、剛性低下率  $\beta = 0.5$  とした。圧縮2次降伏後はひずみ  $\epsilon_{cu}$  (0.3%) で圧壊するまで  $F_{c2}$  を保持し、その後、 $2\epsilon_{cu}$  に達するまでひずみレベルに応じて応力を解放し、最終的に  $0.2F_c$  を保持するとした。

一方、引張特性については、図2に示すように、弾性時には鉄筋とコンクリートを重ね合わせた剛性を持つ。その後、コンクリートの応力が引張強度に達すると急激な応力低下を起こさず、テンション・スティフニング効果により徐々に応力が解放される。この効果、すなわち、コンクリートの応力分担量の減少のしかたは鉄筋の配筋量や方向により異なり明かではない。ここでは図2の右に示すようにひずみの多項式近似(3次以下の関数)によりこれをモデル化する。なお、本稿ではこの効果を  $\sigma-\epsilon$  関係にて  $(F_t, \epsilon_{cr})$  と  $(0, 20\epsilon_{cr})$  を結ぶ1次関数として導入した。

また、せん断すべりに対しては、モール・クーロンの条件を用い、降伏後は塑性流れ則に従い破壊曲面上を移動するものとした。せん断すべりが生じた後にせん断ひずみが一定値  $\gamma_u$  に達した時、せん断破壊をしたものとして、せん断方向剛性を0とし応力を保持させた。ただし、せん断破壊面での圧縮応力は伝達するものとした。

以上の仮定のもとに、RBSMにおけるコンクリートの降伏破壊曲面を表すと図3のようになる。①は弾性、①はひびわれ発生、②はその残留応力が0になった状態で図1の  $20\epsilon_{cr}$  より左側の引張状態である。③は圧縮1次降伏、④は圧縮2次降伏で⑤は法線方向のひずみが図1の限界ひずみ  $\epsilon_{cu}$  に達した状態である。⑤はせん断すべりが発生した状態で、その後③の圧縮1次降伏の領域に入った場合⑤の経路をたどるものとする。

#### 4. 解析アルゴリズム

材料非線形問題を取扱う場合、山田の方法 ( $r_{min}$  法)[9]のように剛性を変化させながら荷重増分計算を行う方法ではひびわれや圧壊などによって応力解放が発生すると、その解放力により更にひびわれや圧壊、すべりなどが発生することが考えられるため、計算を収束させることが難しくなる。そこで、本稿では山田の方法による荷重増分法を拡張し、荷重量をカウントしながら解放力を残りの荷重に加え、すべり破壊、ひびわれ、圧壊などを同時に考慮できるアルゴリズムを提示する。

本アルゴリズムでは、まず、ある荷重増分量  $P$  を与え、この内どこかが破壊するのに要する荷重増分量を計算する。この方法は、すべりについて考えれば従来の山田の方法による荷重増分率  $r$

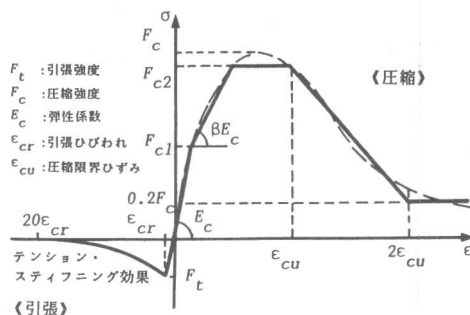


図1 コンクリートの応力-ひずみ関係

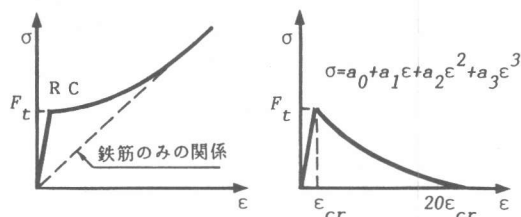


図2 テンション・スティフニング効果

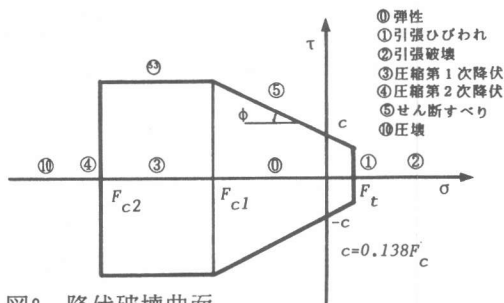


図3 降伏破壊曲面

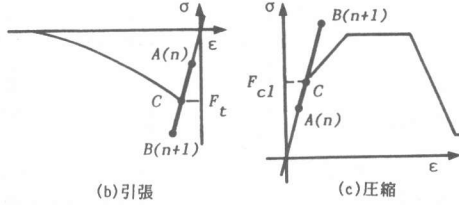
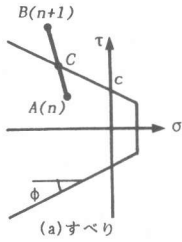


図4 荷重増分率の計算

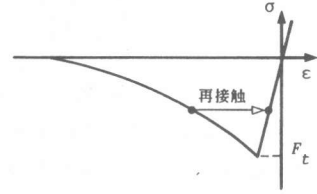


図5 再接触

と同じであり、モール・クーロンの条件の場合、式(1)の  $r$  に関する2次方程式を解いて求める。

$$(\tau + r \cdot \Delta\tau)^2 = \{c - (\sigma + r \cdot \Delta\sigma) \tan \phi\}^2 \quad (1)$$

図4 (a) で示せば、 $r = AC/AB$  である。この方法を拡張し、引張や圧縮についても図4 (b)(c) のように適用すれば、

$$[\text{引張}] \quad \sigma + r \cdot \Delta\sigma = F_t \quad ; \quad [\text{圧縮}] \quad \sigma + r \cdot \Delta\sigma = F_{c1} \quad (2)$$

なる関係式が得られる。荷重増分率はすべりの場合と同様、この式を解くことによって求める。圧縮2次降伏や圧壊などに対しても同様な手順で荷重増分率を求めればよい。降伏や破壊が生じたばねについては、それ以降の剛性を変化させる。この方法は、すべりの場合は塑性流れ則に従うものとし、ひびわれの場合は垂直方向のばね係数を0としせん断剛性を  $0.125G$  [11] に低減する。また、圧縮降伏については先に示した剛性低下率 ( $\beta$ ) を用いる。一方、計算を収束させるためには、一旦降伏やひびわれを起こしたばねに対して除荷や再接触を認めておく必要がある。除荷に対しては従来どうり塑性仕事により判定するが、再接触などについてはRBSM特有の相対変位を用い、図5のように行う。以上、再接触を含め、想定した各種の破壊条件に対する荷重増分率  $r$  を全てのばねについて計算し、その内最小の値  $r_{min}$  を今回の荷重増分率とする。このように考えると、現在の荷重  $P^{(i)}$  に対し、荷重増分率  $r_i$  とすれば、残りの荷重量  $P^{(i+1)}$  は

$$P^{(i+1)} = (1 - r_i)P^{(i)} \quad (3)$$

となる。従って、第  $n$  ステップの残りの荷重量  $P^{(n)}$  は、初めに与えた荷重を  $P$  として

$$P^{(n)} = \prod_{i=0}^{n-1} (1 - r_i)P \quad (4)$$

と求めることができる。このまま、ひびわれや圧壊などの応力解放が伴う破壊が生じなければ、式(4)は山田の方法と同じになる。もし、第  $(k-1)$  ステップに解放力  $F^{(k-1)}$  が発生した場合は、その解放力を残りの荷重量に式(5)のように加え合わせる。

$$P^{(n)} = \prod_{i=0}^{n-1} (1 - r_i)P + \sum_{k=1}^n \left\{ \prod_{i=k}^{n-1} (1 - r_i) F^{(k-1)} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $r_i$  は各収束段階における荷重増分率であり、第0ステップの増分率  $r_0$  は0とする。もし、第  $k$  ステップにて解放力が生じなければ、 $F^{(k)} = 0$  とする。このようにして、初めに与えた荷重と解放力を全て使い切るまで繰返し計算を行う。このとき、荷重増分率の合計  $r_{TOTAL}$  を

$$r_{\text{TOTAL}} = \sum_{k=1}^n \left\{ \prod_{i=0}^{k-1} (1-r_i)r_k \right\} \quad (6)$$

とし、 $r_{\text{TOTAL}} = 1$  で収束したものと考えることができる。図6は残りの荷重量を単位化し図化したものである。上段が初めに与えた荷重  $P$  に対するもので、中段は第1ステップで生じた解放力、下段は第2ステップで生じた解放力である。最終的には破壊箇所が無くなると式(6)における  $r_k$  が1となり全ての荷重を使い切ったことになる。

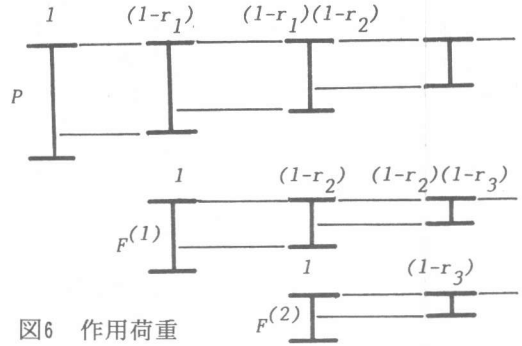
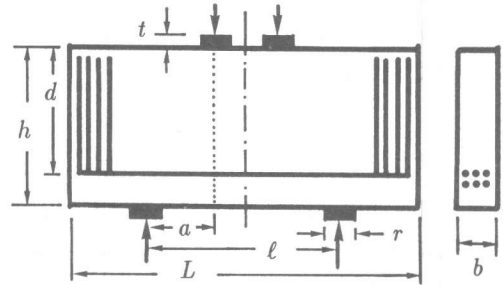


図6 作用荷重

### 5. 数値計算例

ここでは、共通解析にて指定されたRCディープビーム [10] の2体の実験供試体を対象とした解析結果を例示する。実験供試体は図7に示すように単純支持され、せん断スパン・高さ比を0.5または1.5として2点載荷されている。なお、載荷点と支持点には剛な支圧板が設置されている。また、配筋は引張側主鉄筋のみである。

数値解析では荷重と構造の対称性を考慮し、1/2スパン領域を解析対象とし、三角形または矩形平面要素を用いて図8のように要素分割を施した。鉄筋は、前述の手法により直交異方性板要素として、コンクリート要素に重ね合わせた(図8網掛け部)。なお、両解析モデルの要素数はA1で151(453自由度)、A3で249(747自由度)である。



	$a/d$ (mm)	$a$ (mm)	$d$ (mm)	$b$ (mm)	$h$ (mm)
A1	0.5	160	320	100	400
A3	1.5	480	320	100	400

	$l$ (mm)	$L$ (mm)	$r$ (mm)	$t$ (mm)	$p_w$ (%)
A1	460	900	100	30	3.72
A3	1100	1500	100	30	3.72

図7 解析対象とするRCディープビーム [10]

表1に解析に用いた材料定数を示す。なお、コンクリート材料自身の引張軟化挙動を特性づける引張限界ひずみは、共通解析にて提示された破壊エネルギー値 ( $G_f = 130 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{m}^2 = 0.13 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ )、表1の引張強度ならびに図8の要素寸法の平均値から算定すれば約  $30\varepsilon_{cr}$  となるが、本稿では前述のテンション・スティフニング効果の項で導入した値 ( $20\varepsilon_{cr}$ ) を統一使用した。

得られた解析結果として、最大荷重時での変形・破壊状況、同時での表面力の合ベクトル図と荷重-変位関係を各々図9~11に示す。まず、RBSMによる最大荷重 ( $_{\text{max}}V_{RB}$ ) に着目すれば、実験での最大荷重 ( $_{\text{max}}V_{ex}$ ) に対し両供試体とも良好な一致が認められる。次に、得られた最大荷重時での破壊状況(図9)を見れば、その破壊形式は両供試体ともせん断スパン内に発生した斜めひびわれに支配されるせん断破壊であると判断できる。また図10よりディープビームの破壊形式の特徴である斜めひびわれにより形成された支点と載荷点を結ぶ圧縮帯の存在も確認できる。実

表1: 材料定数一覧 (単位  $\text{kgf}, \text{cm}$ )

コンクリート						鉄筋			
圧縮強度	引張強度	粘着力	内部摩擦角	弾性係数	ポアソン比	板厚	弾性係数	降伏強度	等価板厚
$F_c$	$F_t$	$C$	$\phi$	$E_c$	$\nu$	$t$	$E_s$	$F_y$	$t_s$
555.0	33.8	76.6	37.0	$3.4 \times 10^5$	0.167	10.0	$2.1 \times 10^6$	3827.0	7.45

験結果においても両供試体ともせん断破壊形式を呈しており、本手法によりその把握が可能であるといえる。ただし、実験にて観察された供試体 A1 のウェヴコンクリートの圧壊は本モデルでは確認できなかった。この理由としては、ここで使用した要素分割方式では、前述の圧縮束の軸に直行する要素境界が存在せず、最大圧縮応力の作用状態を適正に表現し得なかったためと考えられる。最後に、荷重－変位関係から本手法の有用性を検討する。図 11 に示すように、曲げひびわれ・斜めひびわれ・せん断すべりの発生等の種々の破壊進行過程において数値的不安定を伴わず耐力の保持・増加を示し、最大荷重段階まで安定した収束解が求められている。また、実験結果と照合すれば、各破壊進展段階における剛性低下の評価も妥当であることが確認できる。

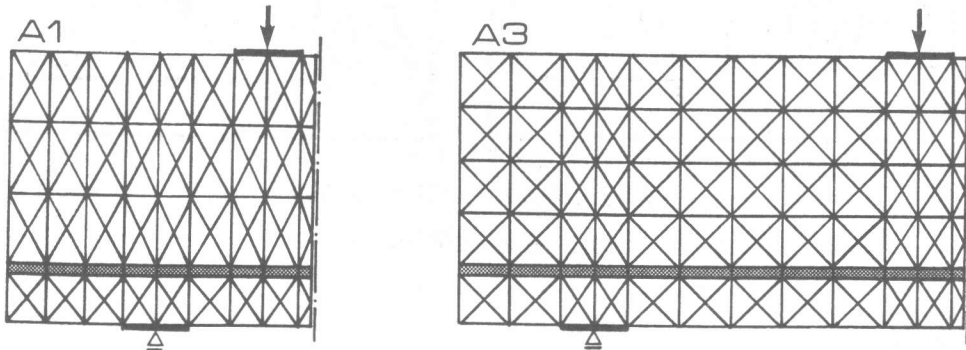


図8 要素分割(1/2スパン領域)：■コンクリートと鉄筋要素の重ね合わせ部分

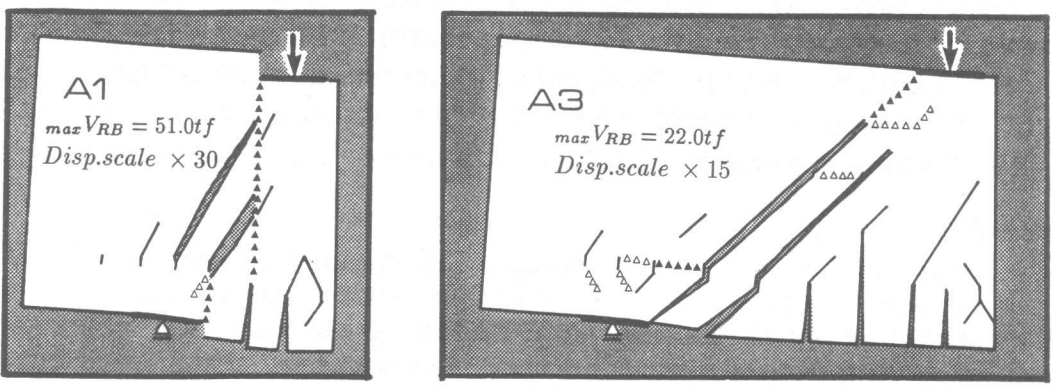


図9 最大荷重時での変形・破壊状況(1/2スパン領域)：△せん断すべり・▲せん断破壊

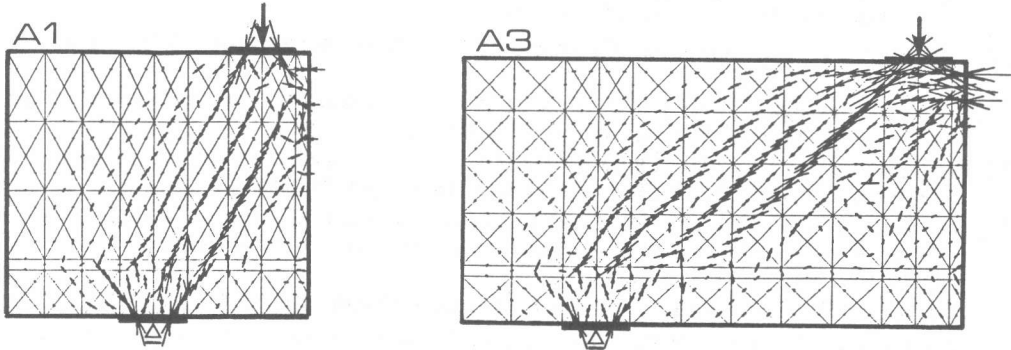


図10 最大荷重時での表面力の合ベクトル図(1/2スパン領域)

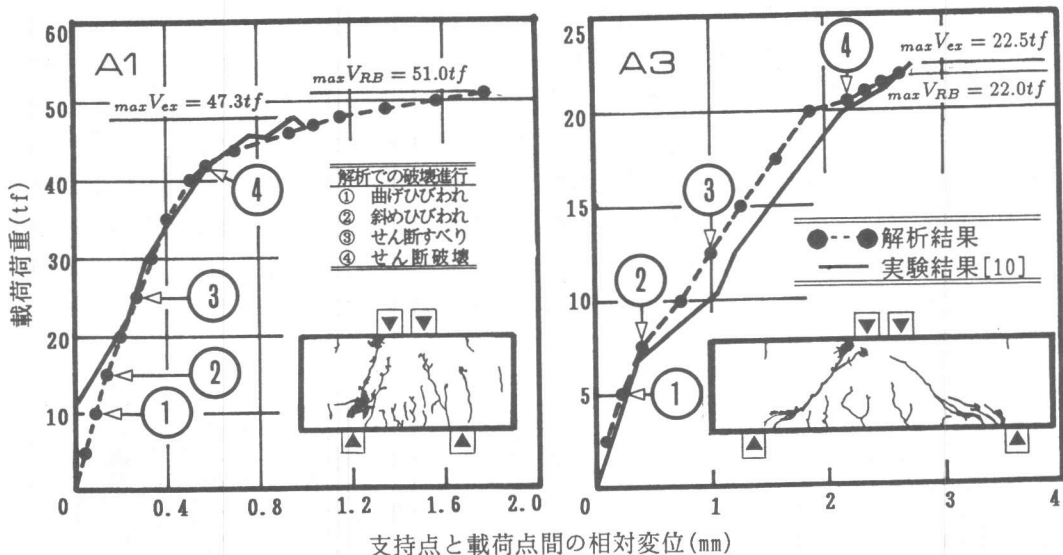


図11 荷重-変位関係

## 6. まとめ

RBSMを用いてRCディープビームの破壊解析を行い既往の実験結果と比較検討した結果、本手法はRC構造物の終局強度、破壊形式および変形特性を良好に把握でき、本手法が不連続性の顕著なRC構造物の崩壊挙動を追跡するのに有用なモデルであることを検証できた。

本研究の遂行に際し、川井忠彦教授(東京理科大学)ならびに園田恵一郎教授(大阪市立大学)には多くのご助言を頂いた。また数値計算では、上林厚志氏(竹中技術研究所)を始め、高野令男氏(明星大学大学院)、酒井一治氏(元明星大学学生)にご協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- [1] JCI: Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Tokyo, 1985
- [2] 日本コンクリート工学協会: 鉄筋コンクリートの有限要素法解析に関する第2回日米セミナー報告集, 1991
- [3] 川井忠彦: コンピュータによる極限解析法シリーズ1・離散化極限解析法概論, 培風館, 1991
- [4] 上田・毛井・川井: 離散化極限解析法による鉄筋コンクリート構造物の非線形解析, RC構造の有限要素法解析に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.179-186, 1984
- [5] Ueda, M., Takeuchi, N., Higuchi, H. and Kawai, T.: A discrete limit analysis of reinforced concrete structures, Proc. of the Int. Conf. on Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures (eds. Damjanic, F. et al), Split, Yugoslavia, Vol.2, pp.1369-1384, 1984
- [6] 上田・竹内・樋口・鬼頭・川井: 引張・圧縮破壊を考慮したRC構造物の離散化極限解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, pp.315-323, 1990
- [7] 上田・竹内・樋口・鬼頭・川井: 川井モデルによる鉄筋コンクリート梁の解析, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 日本鋼構造協会, Vol.14, pp.449-454, 1990
- [8] 竹内・鬼頭・樋口・上林・上田: RBSMを用いた鉄筋コンクリートコーベルの耐力力について, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 日本鋼構造協会, Vol.16, pp.23-28, 1992
- [9] Yamada, Y., Yoshimura, N. and Sakurai, T.: Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by the finite element method, Int. Jour. of Mechanical Science, Vol.10, No.5, pp.345-354, 1968
- [10] 二羽淳一郎: ディープビームの鉄筋コンクリート部材のせん断耐力機構, 東京大学博士論文, 1983
- [11] Yuzugullu, O. and Schnobrich, W.C.: A numerical procedure for the determination of the behavior of a shear wall frame system, ACI Jour., Vol.70, pp.474-479, 1976