

RBSM-FEM混合解析法による鉄筋の引抜実験解析

Pull-out Analysis of Rebar using RBSM - FEM Combined Model

竹本憲介*・香月智**・石川信隆***・彦坂熙****

Kensuke TAKEMOTO, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA and Hiroshi HIKOSAKA

*正会員 修(工) 防衛庁技術研究本部第4研究所 (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

**正会員 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***フェロー 工博 前防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

****フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

The paper presents a bond slip analysis between concrete and steel using the rigid body spring model (RBSM) and the finite element method (FEM) combined analysis. A new RBSM model proposed here in has 3 couples of spring normal to and parallel to the failure plane located at the center of the element with an arbitrary angle, and 4 nodes at the out side corner of the element so that this element can be installed in the FEM platform without any interface. This model can take into account the bilinear elastic plastic gap behavior and Mohr-Coulomb slip behavior including softening in elastic plastic behavior. The proposed combined model is validated by simulating Pull out test of rebar under 3 kinds of load conditions ; i.e., static, high speed, impact.

Key Words: Weight dropping test, Pull out analysis, Bond slip, RBSM-FEM mixed model

1. 緒言

一般にコンクリート構造物の解析では、コンクリートと鉄筋の付着状態を完全付着と仮定して解析が行われることが多く^{1), 2)}、また、有限要素法 (FEM) を使用していることが多い。FEM は連続体を基礎とする理論のため、コンクリート構造物のようにひび割れやせん断すべり等複雑な破壊現象を呈する場合はその表現が難しく、不連続な部分の挙動を表現するには特殊な取り扱いを行わなければならない^{3), 4), 5)}。このような観点から中田ら⁶⁾は、鉄筋コンクリートはりを用いた個別要素法によりモデル化し、コンクリートと鉄筋のひずみ速度効果についてパラメトリックスタディーを行い、解析法の妥当性について検討している。また、川井⁷⁾は塑性変形や破壊の本質はすべりや剥離にあるとし、固体や構造物が破壊や崩壊状態に達するといくつかのブロックに分離するか、リンク機構を形成し剛体運動を生じると考え、強い非線形領域を対象とした剛体ばねモデル (Rigid Body Spring Model, 以下 RBSM と称す) と称する新しい離散化モデルを提案した。

RBSM は、要素自体を剛体と仮定し、要素同士は各要素辺上に分布したばねにより結ばれ、このばねにひずみエネルギーが蓄えられているとして評価する。したがって、要素間のすべりや分離等の破壊現象を簡単に扱うことができる。例えば、竹内ら^{8), 9)}はボロノイ多角形

を用いて RBSM の自動要素分割を行い、無筋コンクリートの崩壊解析を行い、予め破壊パターンが予想できない問題に対して、RBSM が不連続性の崩壊挙動を追跡するのに有効なモデルであることを検証している。さらには、ハイブリッド型変位モデルの考え方に着目して Lagrange の未定乗数に RBSM の場の考え方を導入し、ばね定数としてペナルティを用いて要素境界辺上での変位の連続性を近似的に導入した新しい離散化モデルを開発している。その他、コンクリートの破壊解析に対する多くの研究がある^{10), 11)}。

ところでコンクリート構造物の動的応答は、全ての要素が破壊状態にあるわけではなく、滑らかな変形場の応答要素と滑動や割裂および圧壊などの局所的な不連続面を構成する要素とによって構成されている。よって、コンクリート構造物の破壊解析には FEM と RBSM を混合させた解析法が適しているように思われる。しかし、RBSM は要素の内部に変位評価点を有するのに対し、FEM は要素の境界線上に変位評価点 (節点) を有するため、単純に組み合わせることはできない。すなわち、どちらかのプラットフォームに統一された手法が望まれる。この点では、FEM のプラットフォームでユーザーオプションルーチンの使用可能なツールが多く出回っていることを鑑みると、FEM ベースに RBSM を導入した要素モデルの開発が便利と思われる。

このような観点から著者らは FEM の 4 節点四角形要

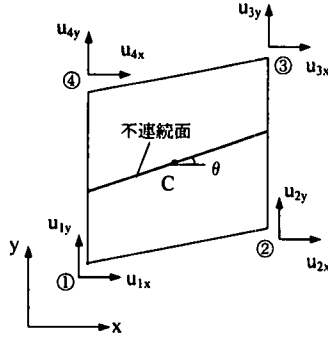


図-1 RBSM 要素モデル

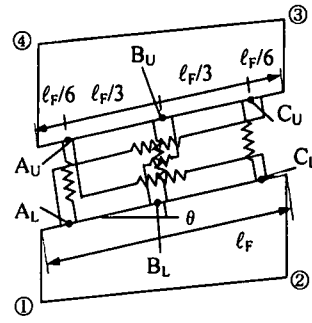


図-2 不連続面のバネ

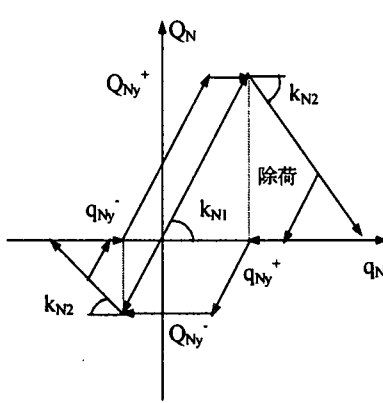


図-3 法線方向バネの構成則

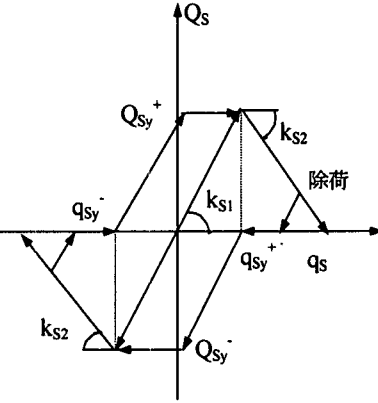


図-4 接線方向バネの構成則

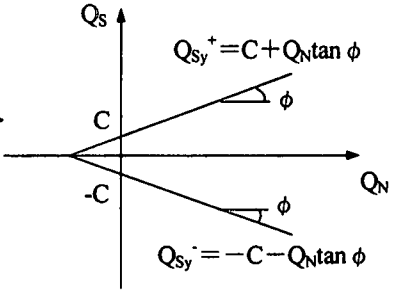


図-5 接線方向バネの降伏点構成則 (クーロンモデル)

素と同様な自由度を有する RBSM 要素モデル¹²⁾を提案し、コンクリートの破壊進展に対する基礎的な表現力について、三軸応力下のコンクリート要素の圧縮破壊実験をシミュレーションできることを示した。しかし、鉄筋コンクリート構造の基本的、かつ重要な不連続挙動である鉄筋とコンクリート間のすべり挙動への適合性については検討していない。

そこで本研究は、先の研究を拡張して、静的、高速及び重錘落下実験によるコンクリートと鉄筋の引抜実験（付着滑り）のシミュレーションに適用し、その適用性について検討したものである。

2. 解析法

2.1 運動方程式の解法

本研究の対象とする実験には高速引抜実験も含まれているので動的解析法を基に、解析法を構成する。

後述する鉄筋の引抜実験を有限要素法の三角形要素と軸力要素および RBSM 要素によって離散モデル化する。この構造全体の運動方程式は次式のように表される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_{dd} & \mathbf{m}_{df} \\ \mathbf{m}_{fd} & \mathbf{m}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_d \\ \ddot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{dd} & \mathbf{D}_{df} \\ \mathbf{D}_{fd} & \mathbf{D}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_d \\ \dot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{F}}_{kd} \\ \bar{\mathbf{F}}_{kf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{dd} & \mathbf{K}_{df} \\ \mathbf{K}_{fd} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_d \\ \mathbf{u}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_d \\ \mathbf{F}_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $(\bar{\cdot})$ は前段階での解を示し、 $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, $\mathbf{u}$: それぞれ節点の加速度、速度、変位ベクトル、 $\mathbf{F}$: 節点外力ベ

クトル、 $\mathbf{m}$: 質量マトリクス、 $\mathbf{D}$: 減衰マトリクス、 $\mathbf{K}$: 剛性マトリクスであり、添字 d は displacement control の略で加速度、速度または変位が既知で与えられる接点自由度に関するベクトルまたはマトリクス成分を表し、添字 f は、force control の略で外力が既知として表されるベクトルまたはマトリクス成分を表す。すなわち、 $\mathbf{F}_d$ は未知であり、 $\ddot{\mathbf{u}}_f$, $\dot{\mathbf{u}}_f$, $\mathbf{u}_f$ は既知数である。一方、 $\mathbf{F}_f$ は既知であり、 $\ddot{\mathbf{u}}_d$, $\dot{\mathbf{u}}_d$, $\mathbf{u}_d$ が境界条件などによって既知数として与えられる。

さらに、 $\mathbf{F}_k$ は構造物のひずみ抵抗力の時刻歴積分を表す。すなわち、

$$\mathbf{F}_k = \int_0^t \mathbf{K} \Delta \mathbf{u} dt = \sum \mathbf{K} \Delta \mathbf{u} \quad (2)$$

質量マトリクスについては、集中質量モデルを用いる。

また、減衰マトリクスは、要素ごとに質量マトリクスおよび剛性マトリクスに比例する減衰モデルを構築し積分するものとした。

$$\mathbf{D} = \sum_{i=1}^{n_e} \mathbf{D}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{D}_i = \alpha_{D_i} \mathbf{m}_i + \beta_{D_i} \mathbf{K}_i^0 \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{D}_i$: 構造全体系の自由度に展開された要素 i の減衰マトリクス、 n_e : 全要素数、 $\mathbf{m}_i$, $\mathbf{K}_i^0$: 構造全体の自由度に展開された要素 i のそれぞれの質量および初期剛性マトリクス、 α_{D_i} , β_{D_i} : 要素 i のそれぞれの粘性減衰および構造減衰に対する比例係数。

ところで時刻 $t + \Delta t$ における未知の $\dot{\mathbf{u}}_f$, $\mathbf{u}_f$ はニューマ

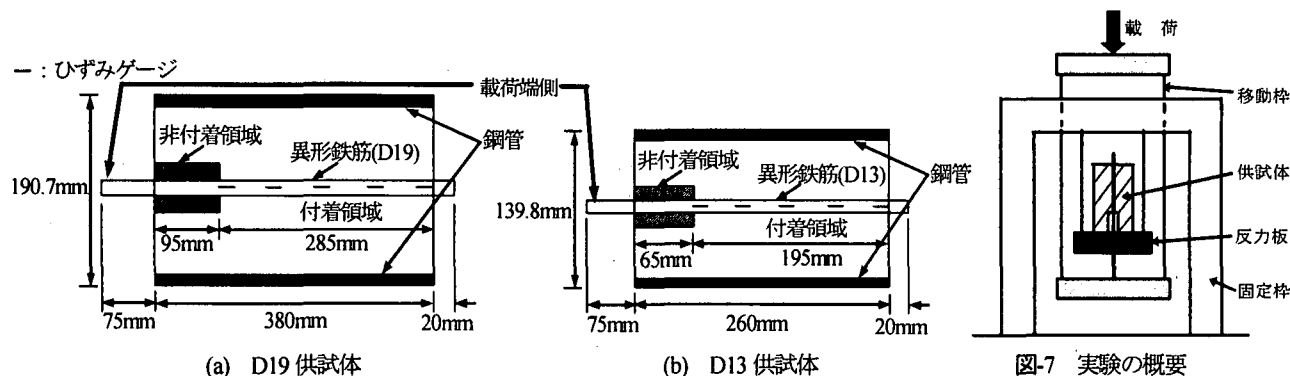


図-6 実験供試体

表-1 実験供試体の諸元

試験体名	鉄筋径	付着長 (mm)	非付着長 (mm)	コンクリート直径 (mm)	コンクリート長 (mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	鋼管寸法 (mm)
D13	D13	195	65	130.8	260	26.2	D139.8 t4.5
D19	D19	285	95	178.7	380	32.6	D190.7 t6.0

表-2 異形鉄筋の諸元

鉄筋種類	区分	弾性係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	ひずみ硬化開始ひずみ (%)	ひずみ硬化係数 (N/mm ²)
D13	静的	2.06×10 ⁵	422	1.60	4.17×10 ³
	動的	2.06×10 ⁵	525	1.65	4.21×10 ³
D19	静的	2.06×10 ⁵	444	1.72	3.36×10 ³
	動的	2.06×10 ⁵	547	1.67	3.38×10 ³

表-3 鋼管の諸元

鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	径圧比	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
139.8	4.5	31	412	441	45
190.7	6.0	32	392	509	34

ーク β 法の積分則によって次式のように与えられる。

$$\mathbf{u}_{f,t} = \dot{\mathbf{u}}_{f,t} \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\mathbf{u}}_{f,t} \beta \Delta t^2 (\ddot{\mathbf{u}}_{f,t+\Delta t} - \ddot{\mathbf{u}}_{f,t}) \quad (5a)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_{f,t+\Delta t} = \ddot{\mathbf{u}}_{f,t} + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\mathbf{u}}_{f,t+\Delta t} + \ddot{\mathbf{u}}_{f,t}) \quad (5b)$$

ただし、添え字 t は時刻を Δt は時間増分を表し、 β はニューマーク β 法のコントロール定数で通常 $1/4 \sim 1/6$ が用いられている。よって、式(1)の $\mathbf{F}_f$ に関する式と式(5)を連立して解くと、次の $\ddot{\mathbf{u}}_f$ に関する解析式が得られる。

$$\ddot{\mathbf{u}}_f = [\mathbf{m}_{fd} + (\Delta t/2)\mathbf{D}_{fd} + \beta \Delta t^2 \mathbf{K}_{fd}]^{-1} [\mathbf{F}_d - \bar{\mathbf{F}}_{d,f} - \mathbf{m}_{ff} \ddot{\mathbf{u}}_d - \mathbf{D}_{ff} \dot{\mathbf{u}}_d - \mathbf{D}_{ff} \{\bar{\mathbf{u}}_f + (\Delta t/2)\ddot{\mathbf{u}}_f\} - \mathbf{K}_{ff} \Delta \mathbf{u}_f - \mathbf{K}_{ff} \{\Delta \bar{\mathbf{u}}_f + ((1/2) - \beta) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_f\}] \quad (6)$$

よって、 $\ddot{\mathbf{u}}_f$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_f$ 、 $\mathbf{u}_f$ が既知となるので未知の外力 $\mathbf{F}_d$ は次式によって求められる。

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{m}_{dd} \ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{m}_{df} \ddot{\mathbf{u}}_f + \mathbf{D}_{dd} \dot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{D}_{df} \dot{\mathbf{u}}_f + \bar{\mathbf{F}}_{k,f} + \mathbf{K}_{dd} \mathbf{u}_d + \mathbf{K}_{df} \mathbf{u}_f \quad (7)$$

2.2 RBSM 要素¹²⁾

コンクリートのひび割れ、あるいはPC鋼線とコンクリートの付着すべり挙動を模擬するため RBSM 要素を用いる。提案する RBSM 要素モデルは、図-1 に示すよう

に4つの節点を接続する四角形の要素形状を有し、要素の重心を通り、全体座標系のX軸と θ なる角度を有する不連続面を持つものである。このように要素の境界点に変位自由度を設定することにより、FEMの4節点四角形要素と同様な取り扱いでFEMを基本とするプラットフォームに組み込むことが可能となる。すなわち、図-2に示す境界面に法線方向と接線方向の3組(6本)のバネを有するモデルを考え、法線方向および接線方向の構成則は図-3、4に示すような除荷を考慮した2段階の線形剛性を持つモデルとする。また、接線方向バネの降伏点構成則として図-5に示すCoulombモデルを用いる。

3. コンクリートと鉄筋の引抜解析

3.1 鉄筋の引抜実験の概要

山口らの鉄筋の引抜実験¹³⁾には、①すべり領域のひずみ分布と②鉄筋の付着限界についてデータが得られている。そこで提案するRBSM-FEM混合解析法の適用性について検討を試みる。本実験では、重錘落下実験(落下

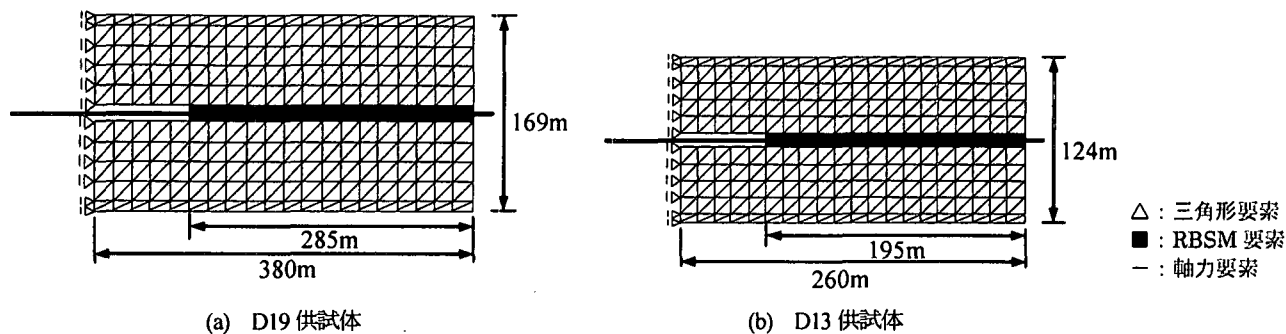


図-8 解析モデル

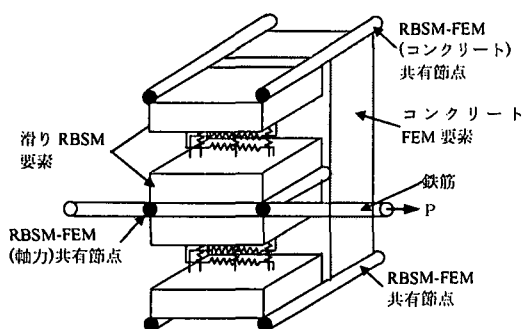


図-9 付着滑り RBSM-FEM 混合モデリング

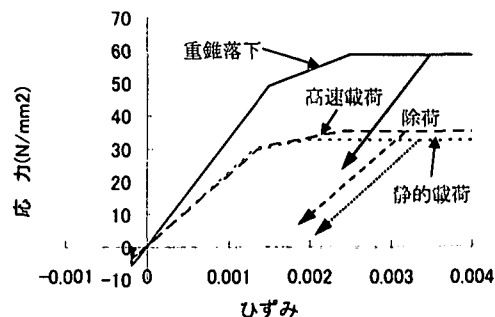
表-4 入力パラメータ

	D19 供試体		D13 供試体	
	要素厚さ	ポアソン比	要素厚さ	ポアソン比
FEM 要素	141.1mm	0.167	104.7mm	0.167
RBSM 要素	16.9mm		11.3mm	

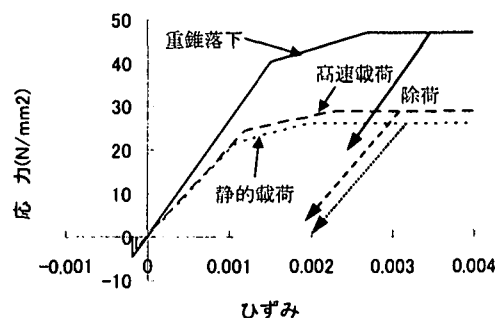
高さ 2 or 3m)、高速載荷実験（載荷速度 3m/sec）および静的実験を行っている。実験供試体は図-6 に示すようなコンクリート円筒の中心に異形鉄筋を埋め込んだ 2 種類である。また、重錘重量は 1.04kN であり、D19 供試体では落下高さ 3m（落下速度 7.67m/sec）、D13 供試体では落下高さ 2m（落下速度 6.26m/sec）である。実験は、図-7 に示すように反力板上に供試体を設置した上で移動枠の上部に載荷を加えて行った。計測項目は、鉄筋のひずみおよび鉄筋の自由端変位である。鉄筋のひずみは図-6(a) および(b)に示すようにコンクリートの付着領域を 4 分割する位置にそれぞれひずみゲージを貼付して測定している。また、D19 供試体では D19 鉄筋を、D13 供試体では D13 鉄筋を用いている。表-1 に実験供試体の諸元を、表-2 異形鉄筋の諸元を、表-3 に鋼管の諸元をそれぞれ示す。

3.2 構造解析モデル

本研究では、前述した鉄筋の引抜実験を図-8 に示すような有限要素法の三角形要素と軸力要素および RBSM 要素によって離散化モデル化する。実験供試体は円柱断面であるが、解析では等断面となるような正方形断面とした。ここで、鉄筋とコンクリートとの間の付着力を図-1 の RBSM 要素によって表すために、その近傍を図-9 のようにモデル化した。すなわち、鉄筋は RBSM 要素の一边と接続されており、RBSM 要素の他辺はコンクリー

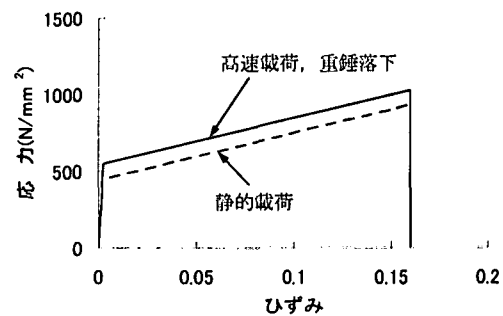


(a) D19 供試体

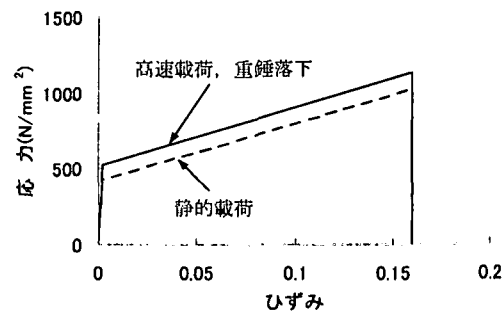


(b) D13 供試体

図-10 FEM コンクリート要素の構成則



(a) D19 供試体



(b) D13 供試体

図-11 軸力要素の構成則

表-5 入力パラメータ

要素	区分およびパラメータ		D19 供試体			D13 供試体		
			静的	高速	重錘落下	静的	高速	重錘落下
RBSM 要素	法線 方向	最大圧縮バネ力 $Q_{NCY}(kN)$	6.17	6.66	11.11	2.31	2.31	4.16
		最大引張バネ力 $Q_{NCY}(kN)$	0.62	0.67	1.11	0.23	0.23	0.42
		バネ係数 $K_N(kN/mm)$	308.5	327.6	427.5	115.7	115.7	154.2
		圧縮軟化係数 $K_{NC}(kN/mm)$	-102.8	-92.6	-142.5	-38.6	-38.6	-51.4
		引張軟化係数 $K_{NT}(kN/mm)$	-102.8	-227.2	-349.8	-38.6	-31.2	-126.1
	接線 方向	バネ係数 $K_{Sl}(kN/mm)$	10.1	17.0	17.0	3.5	3.5	8.2
		軟化係数 $K_{Sd}(kN/mm)$	0.90	3.00	1.90	0.70	1.80	3.10
		粘着力(kN)	0.85	0.92	1.53	0.32	0.32	0.57
		内部摩擦角 (°)	37	37	37	37	37	37

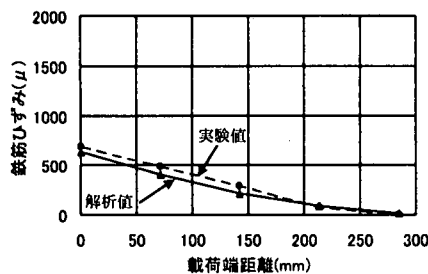
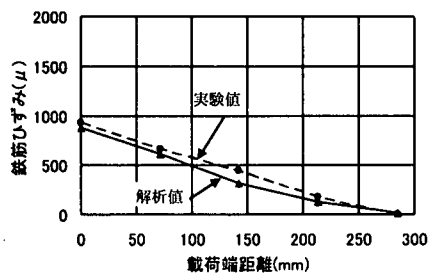
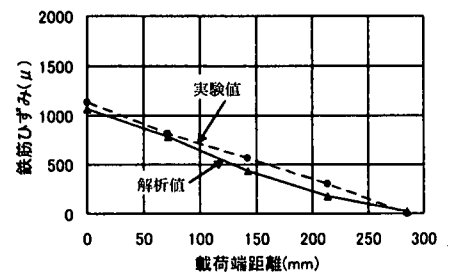
(a) $\delta \approx 0.10mm$ (b) $\delta \approx 0.15mm$ (c) $\delta \approx 0.20mm$

図-12 鉄筋のひずみ分布 (D19: 静的載荷)

ト要素と連接されている。ここで、図-9にて使用した要素厚さとポアソン比を表4に示す。

FEM コンクリート要素の構成則は、図-10(a)及び(b)に示すような Drucker-Prager の降伏関数¹⁴⁾を用いたトリニア型の弾塑性モデルにひずみ速度効果^{15), 16)}を考慮して、降伏応力を大きくしたものと与えた。RBSM 要素の構成パラメータについては、異形鉄筋の特性を考慮するために異形鉄筋の周長より付着面積を求め、法線方向については FEM の応力～ひずみ関係に付着面積を乗じて等価になるよう決定する。接線方向については、山口ら¹³⁾の実験において計測された付着応力～すべり関係に付着面積を乗じて決定した。同様に粘着力にも付着面積を乗じている。なお、高速載荷および重錘落下時のひずみ速度効果についても、山口らの提案式を参考に決定した。

すなわち、

$$\tau_d / \tau_s = 1.0 + 1.15 \times 10^{-3} \times (\log \dot{\epsilon} + 6)^{3.6} \quad (8)$$

ここで、 τ_d : 動的付着応力、 τ_s : 静的付着応力、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度。

また、鉄筋の軸力要素は図-11 に示すようなバイリニア型のモデルであり、ここでもひずみ速度効果を考慮す

る¹⁷⁾。また、粘着力および内部摩擦角は上田¹⁸⁾に準じ決定した。

以上の方法によって決定されたパラメータは表-5のようになる。

3.3 解析結果

(1) D19 供試体

図-12, 14, 15 にそれぞれ D19 供試体の静的載荷、高速載荷および重錘落下実験における載荷端における載荷端すべりが $\delta \approx 0.10mm$, $0.15mm$ および $0.20mm$ 時の鉄筋のひずみ分布を示す。

図-12 の静的載荷では、実験結果を見ると載荷端のすべりが $\delta \approx 0.10mm$, $0.15mm$, $0.20mm$ と増加するにつれて全体的に鉄筋のひずみが増加している。しかし、定着点と見られるひずみが 0 となる深さは 275mm 付近から変化せず、解析はこれらの傾向と良く一致したものとなっている。すなわち、山口らの付着応力～すべり関係モデルは静的において解析に適していることがわかる。

図-13 には、図-12 の載荷端のすべりが $\delta \approx 0.10mm$, $0.15mm$, $0.20mm$ における変形図を示す。これより、載荷端部から変形が進行していることがわかる。

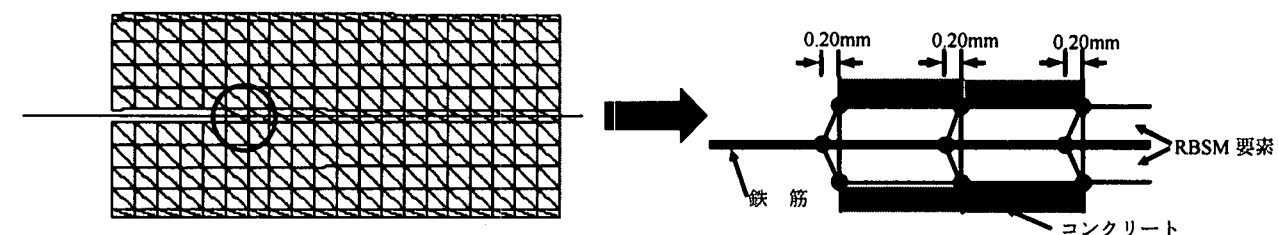
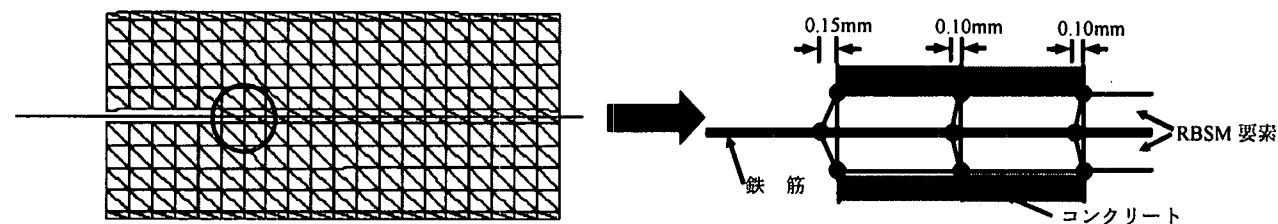
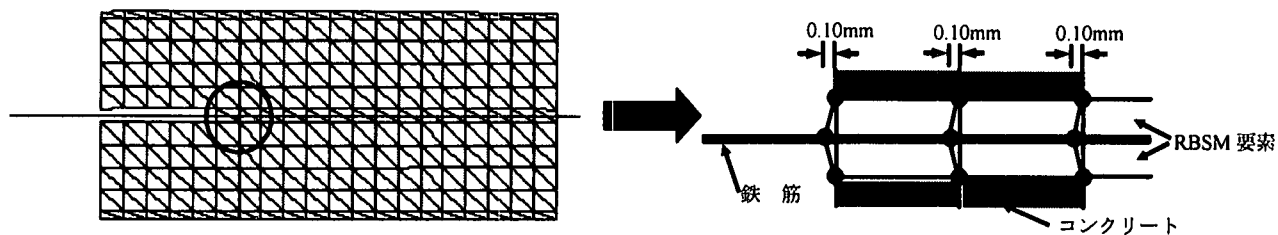


図-13 変形図

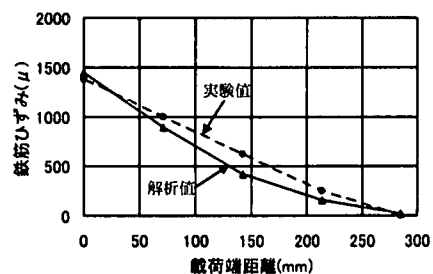
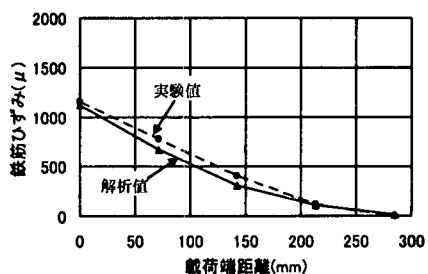
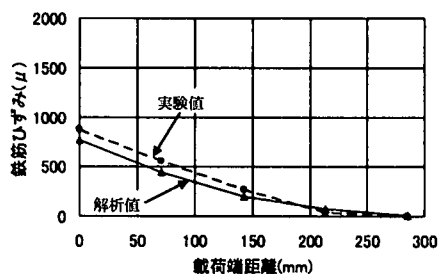


図-14 鉄筋のひずみ分布 (D19: 高速載荷 (載荷速度 3m/sec))

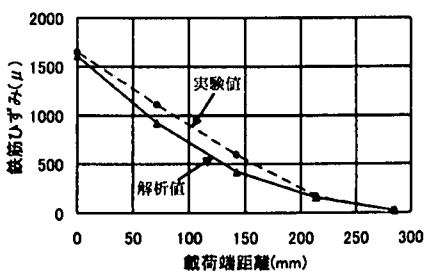
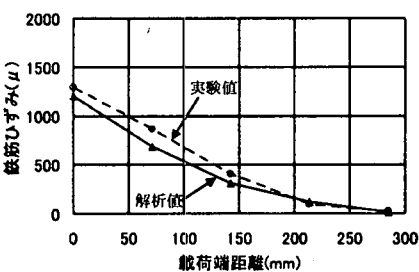
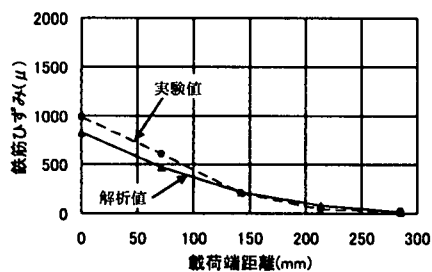
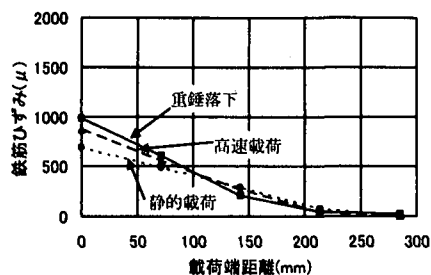
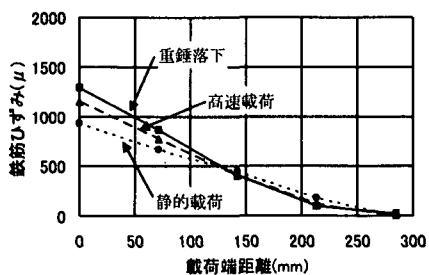


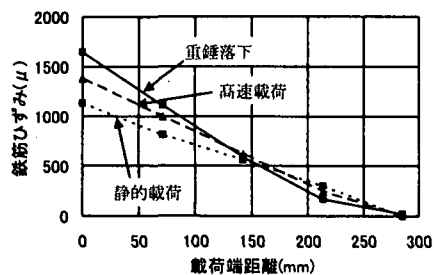
図-15 鉄筋のひずみ分布 (D19: 重錘落下 (落下速度 7.67m/sec))



(a) $\delta \approx 0.10\text{mm}$

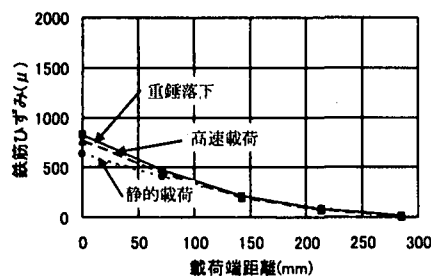


(b) $\delta \approx 0.15\text{mm}$

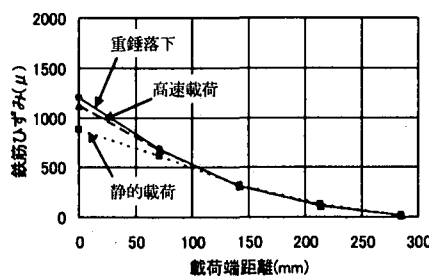


(c) $\delta \approx 0.20\text{mm}$

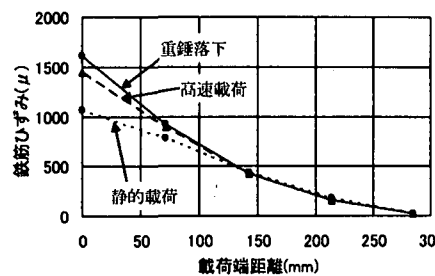
図-16 D19の鉄筋のひずみ分布 (実験値)



(a) $\delta \approx 0.10\text{mm}$

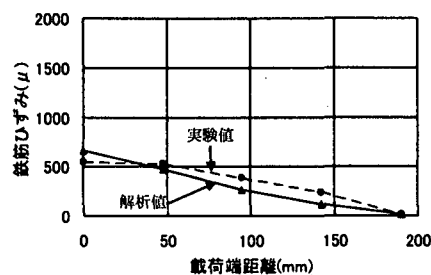


(b) $\delta \approx 0.15\text{mm}$

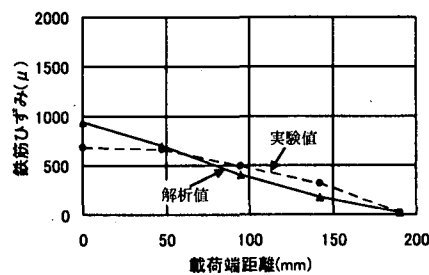


(c) $\delta \approx 0.20\text{mm}$

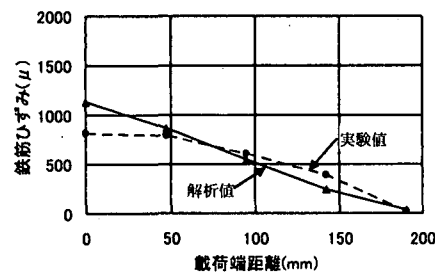
図-17 D19の鉄筋のひずみ分布 (解析値)



(a) $\delta \approx 0.10\text{mm}$

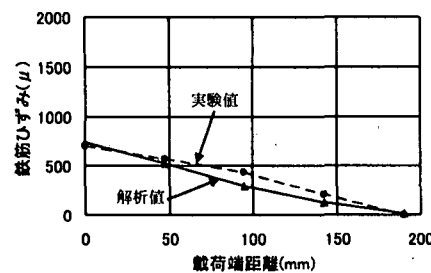


(b) $\delta \approx 0.15\text{mm}$

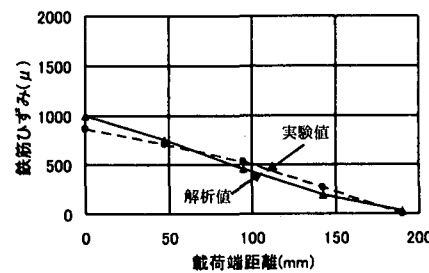


(c) $\delta \approx 0.20\text{mm}$

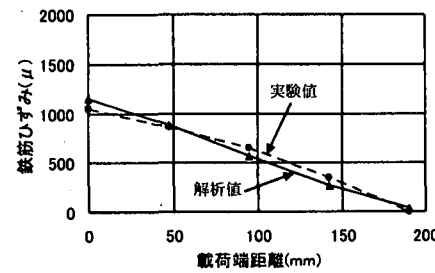
図-18 鉄筋のひずみ分布 (D13: 静的載荷)



(a) $\delta \approx 0.10\text{mm}$

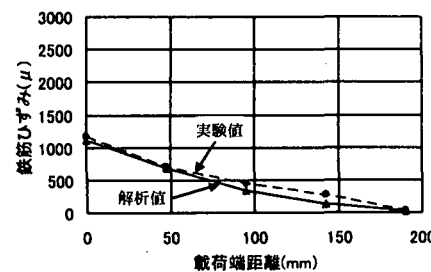


(b) $\delta \approx 0.15\text{mm}$

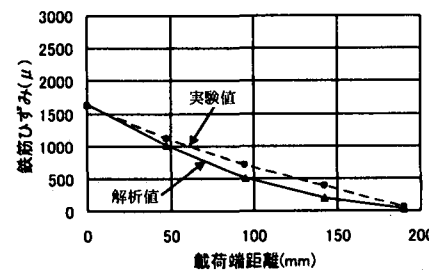


(c) $\delta \approx 0.20\text{mm}$

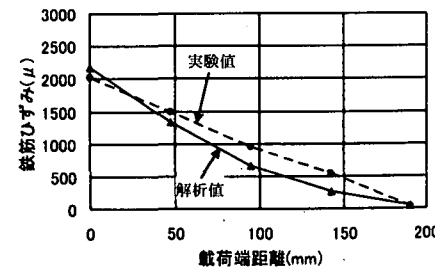
図-19 鉄筋のひずみ分布 (D13: 高速載荷 (載荷速度 3m/sec))



(a) $\delta \approx 0.10\text{mm}$



(b) $\delta \approx 0.15\text{mm}$



(c) $\delta \approx 0.20\text{mm}$

図-20 鉄筋のひずみ分布 (D13: 重錘落下 (落下速度 6.26m/sec))

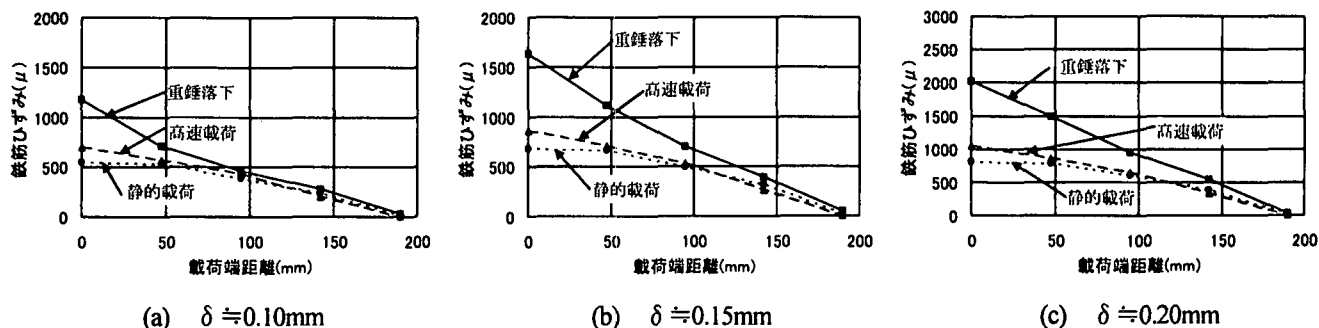


図-21 D13の鉄筋のひずみ分布 (実験値)

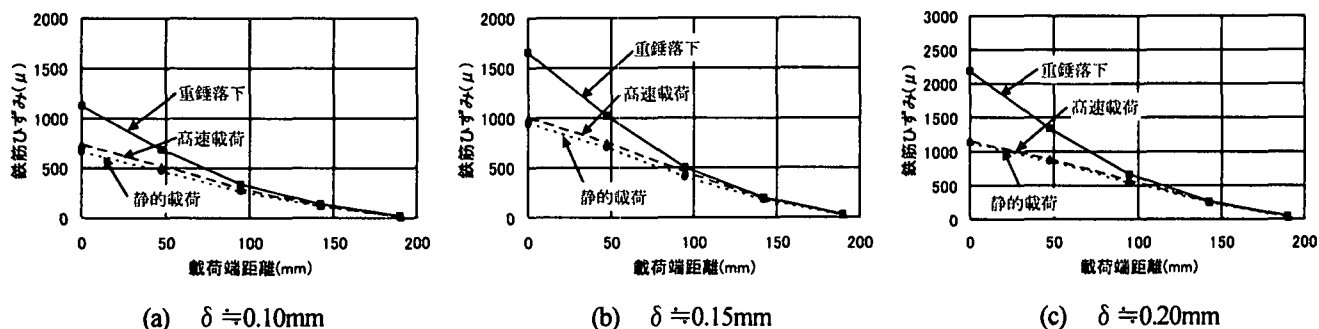


図-22 D13の鉄筋のひずみ分布 (解析値)

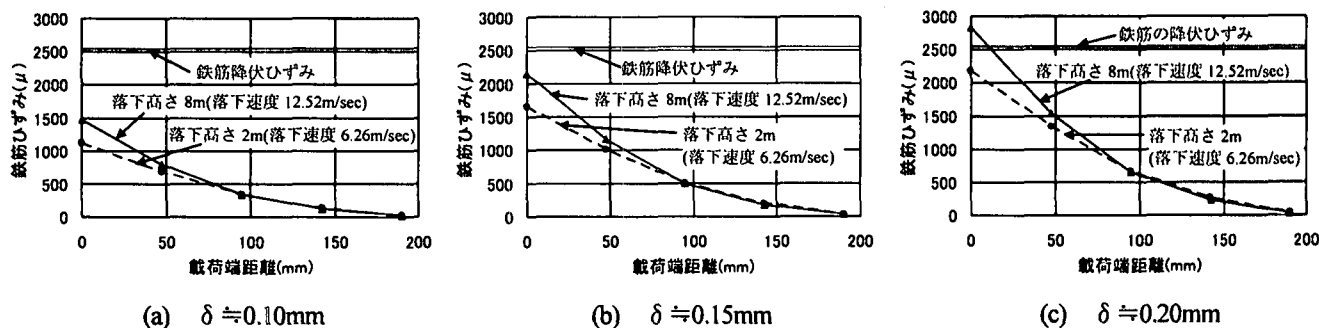


図-23 D13の鉄筋のひずみ分布 (重錘落下)

続いて、図-14 の高速載荷においても実験結果は載荷端すべりの増大につれて鉄筋のひずみ分布が大きくなる。しかし、よく観察すると鉄筋のひずみ分布が静的載荷とは異なり載荷端から約 210mm においてひずみの勾配に変曲点が現れているようにも見える。なお、定着点が 275mm となることは変わらない。解析はこれらの傾向を良くトレースしており、式(8)の付着応力増加に関するひずみ速度効果モデルは適正であることがわかる。

図-15 の重錘落下では、実験結果において高速載荷よりもひずみ分布の変化率が大きく、カーブが急になっている。しかし、解析ではその急激な曲率をトレースできないため載荷端付近のひずみを過小評価することとなる。しかし、解析結果は実験の載荷端から内部に至るに従って鉄筋のひずみが低減する傾向については良くシミュレートできていることがわかる。

図-16 には実験の、図-17 には解析による載荷速度の違いによる鉄筋のひずみ分布を比較して示す。これより実験結果および解析結果ともに載荷端すべりが同じであっても載荷速度の増大に伴い、載荷端から遠い位置にお

るひずみは小さくなるが、載荷端近傍におけるひずみが増大し、ひずみ分布の勾配が急になる。また、静的載荷に比べ高速載荷および重錘落下実験の場合は、載荷点近傍においては大きなひずみが集中する傾向があることがわかる。これは、限界付着応力がひずみ速度効果によって大きくなるためである。また、静的載荷においてはひずみの勾配が概ね一定であるものの高速載荷および重錘落下実験においては載荷端から 210mm 前後で変曲点を有しており、載荷速度が増大するにつれて全体的なすべりから局所的なすべりに変化している実験結果をトレースできていると考える。

(2) D13 供試体

図-18, 19, 20 にそれぞれ D13 供試体の静的載荷、高速載荷および重錘落下実験における鉄筋のひずみ分布を示す。D19 に比して D13 は径が小さく断面積当たりの付着面積が大きいため、この影響を解析的にトレースできるか否かが焦点となる。この影響と思われるが、図-18 の静的載荷の実験結果では、載荷端付近でひずみが一定

となるところができ、上に凸なひずみ分布となっている。これに対して解析は、ほとんど直線的にひずみが低下しており、やや傾向が異なっている。しかし、図-19 の高速載荷や、図-20 の重錘落下では実験と良く一致した解析結果を得ている。なお、いずれの場合も定着部は、載荷端から 190mm のところであり D19 の 275mm より顕著に浅い。

図-21 および図-22 には載荷方法の違いが鉄筋のひずみ分布に及ぼす影響を比較により示す。図-21 より実験における分布が、静的と高速載荷の違いに比して、重錘落下では、著しく載荷端部のひずみが集中して大きくなっている。この傾向は、図-22 の解析においても全く同様となっている。これは、D19 供試体に比べ D13 供試体の定着位置が浅いためである。

S. Mindess ら¹⁹⁾によると、鉄筋の引抜実験において衝撃的な荷重で鉄筋を引抜くと静的では引抜ける場合でも鉄筋が破断する場合があることを報告している。そこで試みに図-20 で示した重錘落下実験の落下高さ 2m (落下速度 6.26m/sec) よりもさらに高い落下高さを 8m で落下した場合に相当する衝突速度 12.52m/sec で解析した場合の鉄筋のひずみ分布を図-23 に示す。比較のため図-20 に示した衝突速度 6.26m/sec の場合の解析におけるひずみ分布も示す。これより、明らかに衝突速度が増すと載荷端のひずみが大きくなる。一方で、定着位置は 190mm と変化しないことがわかる。このため $\delta \approx 0.20\text{mm}$ では、衝突速度 6.26m/sec の場合では鉄筋ひずみは降伏していないが、衝突速度 12.52m/sec の場合では載荷端での鉄筋のひずみは降伏ひずみに達しており、S. Mindess ら¹⁹⁾の指摘と一致する傾向を得られた。

4. 結 言

本研究は、静的、高速及び重錘落下実験によるコンクリートと鉄筋の引抜実験（付着滑り）のシミュレーションに RBSM-FEM 混合モデルを適用し、その適用性について検討したものである。得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1)鉄筋の付着に関して、山口らのモデルを用いると高速引抜きに応じたひずみ速度効果を導入でき、実験結果と良く一致する。
- (2)静的と高速載荷の違いに比して、重錘落下ものが、著しく載荷端部に集中してひずみが大きくなる実験結果を解析においてもシミュレートできた。
- (3)衝撃的な荷重により鉄筋を引抜く場合には、載荷端側の鉄筋ひずみは局所的に大きくなり、また衝撃的な荷重が大きいほど鉄筋が降伏に至ることが解析的に明らかになった。
- (4)載荷速度の増大に伴い、すべりが全体的なすべりから局所的なすべりに変化している実験結果を解析においてもシミュレートできた。

なお、本研究では、鉄筋が弾性応答域にある場合の実験結果との対応性を検討したが、鉄筋が降伏した場合には局所化が生起することの影響などについて別途検討が必要である。

参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 小室雅人, 松岡健一: 弾塑性衝撃応答解析法の R C 梁への適用性, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1597~1579, 1997.
- 2) 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する R C 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/ I -47, pp.215~233, 1999.
- 3) 野口博: 有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析, 日本建築学会論文報告集, 第 258 号, pp.27~37, 1977.
- 4) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素法解析, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp.1~10, 1985.
- 5) 呉智深, 町田篤彦, 高東劭: 一般的な不連続変形を考慮した混合型有限要素解析法の開発, 土木学会論文集, No.598/ I -44, pp.149~159, 1998.
- 6) 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1761~1771, 1998.
- 7) 川井忠彦: 離散化極限解析法概論, 培風館, 1991.
- 8) 竹内則雄, 上田真稔, 鬼頭宏明, 樋口晴紀, 上林厚志: ボロノイ分割を用いた RBSM による無筋コンクリート梁の寸法効果解析, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp.519~527, 1994.
- 9) 竹内則雄, 草深守人, 武田洋, 佐藤一雄, 川井忠彦: ペナルティを用いたハイブリッド型モデルによる離散化極限解析, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp.261~270, 2000.
- 10) Shigehiko SAITO, Hiroshi HIKOSAKA: NUMERICAL ANALYSES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING SPRING NETWORK MODELS, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.289~303, 1999.
- 11) 富田充宏, 梶川康男, 吉田直司: 軸力と繰返し曲げを受ける R C 部材の RBSM による挙動解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.347~354, 1997.
- 12) 竹本憲介, 上林勝敏, 香月智, 石川信隆: R B S M - F E M 混合型要素モデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, No.696/ I -58, pp.197~213, 2002.
- 13) 山口弘, 安藤智啓, 星川辰雄, 藤本一男: 鉄筋とコンクリートの動的付着特性に関する実験的研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, I -B214, pp.428~429, 1997.
- 14) 色部誠, 河角誠, 安達洋: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985.
- 15) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的軟化特性とそのモデル化, 土木学会論文集, No.669/ V-50, pp.135~148, 2001.
- 16) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度効

果の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.125~134, 2001.

- 17) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1567~1580, 1991.

- 18) 上田眞稔: 鉄筋コンクリート部材の離散化極限解析

法に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1995.

- 19) X. Ye, N. Wang, S. Mindess: Effect of Loading Rate and Support Conditions on The Mode of Failure of Prestressed Concrete Railroad Ties Subjected to Impact Loading, Cement and Concrete Research, Vol. 24, pp.1286~1298, 1994.

(2003 年 4 月 18 日 受付)