

## 論文 鉄筋の腐食による劣化を考慮した RC 部材の格子モデル解析

鈴木 暢恵<sup>\*1</sup>・三木 朋広<sup>\*2</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*3</sup>

要旨：鉄筋腐食によって劣化した RC 部材の耐荷機構を解析的に把握するために、格子モデルを用いた検討を行った。格子モデルは、対象部材をトラス要素に離散化させることによって、簡便かつ明確に RC 部材の耐荷機構を評価することのできる解析モデルである。本研究では、鉄筋の腐食による断面欠損に加え、鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮するための接合要素のモデル化を行った。正負交番載荷実験の結果との比較から、格子モデルによって、RC はりの耐荷力、変形性能を良好に予測できることが示された。

キーワード：腐食、軸方向鉄筋、RC 部材、付着性能、接合要素、格子モデル

## 1. はじめに

近年、新設される土木構造物の数に対して、既設構造物の維持・補修を必要とする箇所割合が増加している。一方で、土木構造物の高齢化も問題となっており、劣化状況の異なる既設構造物に対し、適切な維持管理プロセスの構築が求められている。鉄筋コンクリート (RC) 構造物においては、塩化物イオンの浸透を原因とした、鉄筋腐食による早期劣化が問題となっている。既往の研究<sup>1), 2)</sup>により、鉄筋の腐食膨張圧に起因した鉄筋に沿った縦ひび割れ、およびそれに伴う鉄筋とコンクリートの付着劣化によって、曲げ破壊型の RC 部材では、構造性能は腐食による断面欠損分以上に低下すると指摘されている。維持管理手法を決定する上で、解析的な手法は、有効なアプローチの一つである。たとえば富田ら<sup>3)</sup>は、鉄筋腐食によって劣化した RC 部材の耐荷力低下、ひび割れ性状、および変形挙動について剛体 - ばねモデルを用いて予測可能であることを明らかにしている。

本研究では、さらに簡便な手法の確立を目指し、格子モデル<sup>4), 5), 6)</sup>を用いた静的解析を行い、この解析の中で鉄筋とコンクリートの付着劣化挙動を考慮することとした。格子モデルは、RC 部材を軸力のみを伝えるトラス要素に離散化しているので、力の流れを容易に特定できる簡便な解析モデルで

ある。格子モデルに、より現実的な材料モデルを適用することによって、十分な精度の解析結果を得ることができる。従来の格子モデルでは、軸方向鉄筋要素とコンクリート要素が同一節点を有し、完全付着を仮定した解析を行っている。本研究では、軸方向鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮するために、軸方向鉄筋とコンクリートの節点を別々に設け、せん断ばねと垂直ばねを用いた接合要素のモデル化を検討した。

## 2. 格子モデル

## 2.1 格子モデルの概要

格子モデルは、図 - 1 に示すように、離散化されたトラス要素から構成される。また、コンクリートの斜め圧縮・引張部材を規則的に配置し、さらに端部節点以外で変位が独立なアーチ部材を組み込んでいる。図 - 2 は、格子モデルのコンクリート部材断面区分の概念図である。はりのコンクリート部分を図 - 2 に示すように、トラス部分とアーチ部分に区分する。それぞれの要素の幅は、アーチ部分を  $bt$ 、トラス部分を  $b(1-t)$  ( $0 < t < 1$ ) とする。ここで、 $t$  値は、部材幅に対するアーチ部分の割合として定義し、部材の初期状態における微小な強制変位に対する、部材全体のポテンシャルエネルギーが最小となるように定めている。

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

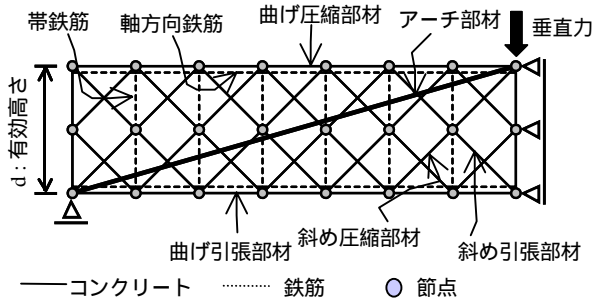


図 - 1 RCはりに対する格子モデル概略図

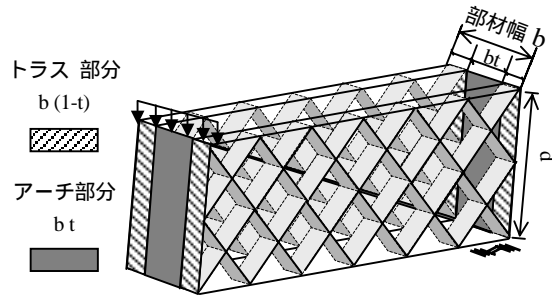


図 - 2 格子モデル断面区分の概略図

## 2.2 各要素の構成則

### (1) コンクリートモデル

コンクリートモデルは、解析精度の向上のため、長沼らのモデル<sup>7)</sup>を参考に、圧縮・引張両応力域における履歴と、引張応力域から圧縮応力域へと遷移する領域の履歴を定めた。履歴ループの概要を図 - 3 に示す。包絡線は、コンクリートの斜め圧縮部材およびアーチ部材に対して、せん断補強筋による拘束効果を考慮するために、Mander らが提案した圧縮応力  $\sigma_c'$  - 圧縮ひずみ  $\epsilon_c'$  関係<sup>8)</sup>を採用した。さらに、ひび割れたコンクリートの引張ひずみ  $\epsilon_t$  の増加にともなう、直交方向の圧縮強度の軟化挙動<sup>9)</sup>を、Vecchio らが提案したモデルを用いて考慮した。コンクリートの曲げ圧縮部材には、前川らのモデル<sup>10)</sup>を採用し、圧縮軟化の影響は考慮していない。

コンクリートの曲げ引張部材には、ひび割れ発生後には岡村・前川のテンションスティフニングモデル<sup>11)</sup>を用いて鉄筋とコンクリートの付着の影響を考慮した。また、コンクリートの斜め引張部材には、鉄筋の付着作用が影響しないと仮定した。したがって、コンクリート特有の脆性的な軟化挙動を表現するために、引張軟化曲線として 1/4 モデル<sup>12)</sup>を適用した。

### (2) 鉄筋モデル

鉄筋の応力 - ひずみ関係には、引張応力域においては、前川らが提案した、ひび割れたコンクリート中の鉄筋の平均化構成モデル<sup>10)</sup>を用いた。さらに、圧縮応力域ではパイリニアモデルを用いた。また、繰返し载荷を受ける場合には、応力が正負反転する際に現れるパウジンガー効果を考慮するために、福浦らの数値モデル<sup>13)</sup>を用いた。

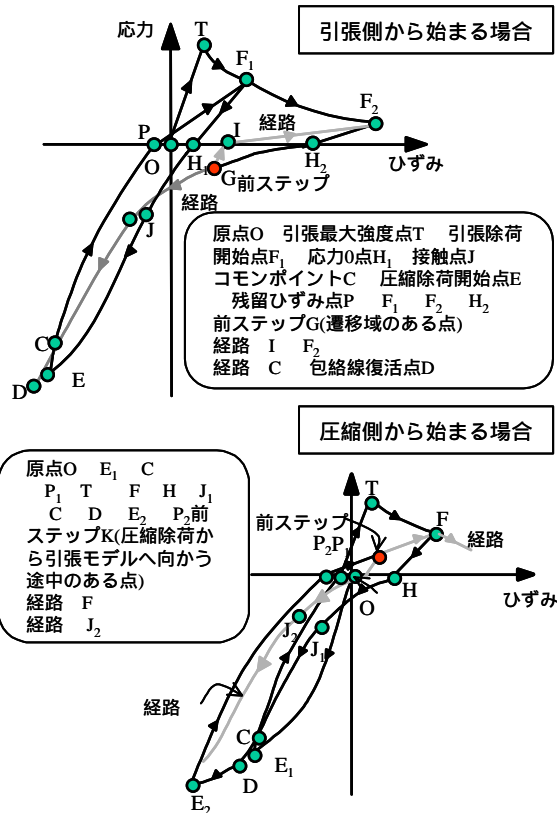


図 - 3 コンクリートの履歴ループ

### (3) 軸方向鉄筋とコンクリート間の接合要素のモデル化

本研究では、軸方向鉄筋とコンクリートの曲げ引張部材の節点を独立させ、付着応力を伝達するためのモデル化を行った。詳細を以下に示す。

コンクリート要素と鉄筋要素は、図 - 4 に示すように鉄筋要素をコンクリート要素で挟むように配置した。接合要素の厚みには鉄筋の直径  $D$  を用いることとした。鉄筋要素とコンクリート要素は、垂直応力を伝達する垂直ばね、せん断力を伝達するせん断ばねで結合し、それぞれのばねに材料特性を導入した。垂直ばねは、弾性体とし、ばね剛性にはコンクリートの弾性係数を用いた。垂直ば

ねの断面積は格子の一边  $d/2$  に鉄筋の直径  $D$  を乗じた値と定義した。せん断ばねは、鉄筋の表面積全体に付着応力が作用するものとして、付着応力に鉄筋の表面積を乗じ、付着力とすべり量の関係に置き換えた。本研究では、腐食による初期ひび割れを考慮するため、付着剛性  $k_1$ 、最大付着応力  $\tau_{max}$  またはその時の鉄筋とコンクリート間の変位  $s_1$  をパラメータとした付着特性を用いた。

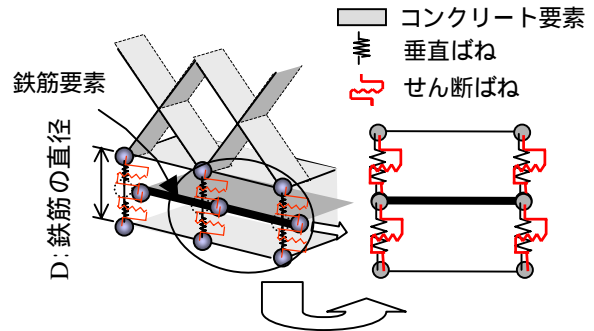


図 - 4 接合要素の概要

### 3. 軸方向鉄筋およびせん断補強筋が腐食した RC はりの静的正負交番解析

#### 3.1 解析対象とした実験の概要

解析対象には、加藤らによって行われた、軸方向鉄筋およびせん断補強筋を電食させた RC はりの静的正負交番荷重試験<sup>2)</sup>を選定した。この実験は、鉄筋腐食による RC 部材の構造性能低下を定量的に評価することを目的として実施されたものである。供試体の寸法、および配筋を図 - 5 に示す。また、コンクリートおよび鉄筋の材料特性を表 - 1 に示す。本研究では、軸方向鉄筋、およびせん断補強筋が、全体的に著しく腐食しているはり N-5、および非腐食はり N-02 の解析を行った。

腐食はり N-5 は、海水中に浸せきした RC はりにおいて、端部に露出させた 4 本の軸方向鉄筋に直流電流を印加し、電食させたものである。荷重試験終了後、鉄筋の腐食状態を把握するために、等モーメント区間の軸方向鉄筋、およびせん断スパン内のせん断補強筋をはつり出し、それぞれの質量減少量が測定された。さらに、一本の鉄筋に対して腐食分布を観測し、支点から荷重点まで一様に腐食していることが確かめられた。腐食はり N-5 の軸方向鉄筋およびせん断補強筋の断面欠損率を表 - 2 に示す。ここで、せん断補強筋が破断している部位は断面欠損率を 100%としている。

図 - 6 に荷重前後の N-5 のひび割れ発生状況を示す。図より、腐食によって、軸方向鉄筋に沿った腐食ひび割れが発生していることが確認できる。

#### 3.2 解析モデル

図 - 5 で示した供試体を図 - 7 に示す静的格子モデルに離散化した。接合要素を考慮した図 - 7 (a)のモデルでは、せん断補強筋に対しては接合要素を含めたモデル化は行っていない。格子の 1 辺を 100 mm とし、はり端部からはり中央までの 1700 mm を対象とした 1/2 対称モデルとして 2 次元解析を行った。せん断補強筋は、はり端部から支点まで、支点から荷重点まで、荷重点からはり中央部までそれぞれの部分の鉄筋比を満たすように配置した。軸方向鉄筋は、図 - 7 に示す上下 2 要素に座屈挙動<sup>6), 14)</sup>を考慮した。また、 $t$  値は 0.4 となった。本解析では、腐食による鉄筋断面欠損を考慮すること、および鉄筋とコンクリートの付着劣化に着目した。

#### 3.3 荷重条件

RC はりの正負交番荷重試験は、2 点支持 2 点荷重で行われた。荷重について、軸方向鉄筋の初降伏時のはりスパン中央の鉛直変位を基本とし、鉛直変位がこの整数倍に達した後に除荷する正負交番荷重を各 3 回ずつ繰返した。また、最大荷重が初降伏荷重を下回ったことを確認して、荷重を終

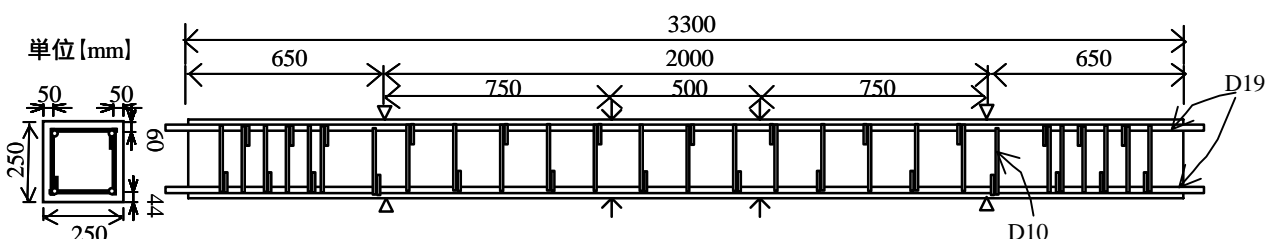


図 - 5 供試体概要

表 - 1 材料特性

コンクリート	
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	36.5
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	26
軸方向鉄筋 (D19, SD345)	
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	362
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	418
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	190
せん断補強鉄筋 (D10,SD345)	
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	401
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	474

表 - 2 N-5 中鉄筋平均断面欠損率

	断面欠損率 (%)
軸方向鉄筋	20.5
せん断補強筋	71.0

表 - 3 実験および解析結果

	N-02			N-5		
	実験	解析 (接合要素あり)	解析 (接合要素なし)	実験	解析 (付着劣化なし)	解析 (付着劣化考慮)
降伏荷重 (kN)	108.2	112.3	109.1	87.5	84.0	87.7
最大荷重 (kN)	118.9	118.6	127.7	90.5	97.5	93.2

了した。解析では、実験の荷重状況を適切に模擬するため、荷重が正の場合には図 - 7 の から、負の場合には から、強制変位を作用させた。

#### 4. 解析結果および付着劣化に対する考察

##### 4.1 接合要素のモデル化の検討

非腐食はり N-02 の実験および解析結果として、荷重 - 中央鉛直変位関係を図 - 8 に示す。解析結果には、新たに導入した接合要素を含んだ場合を図 - 8 (a) に、従来の格子モデルと同様に、接合要素を含まない場合を図 - 8 (b) に示している。接合要素の構成要素には、鉄筋とコンクリートのズレ変位が 0 となるように十分大きな剛性を与え、完全付着と同様な状態になるようにした。解析結果は表 - 3 にも示すように、荷重点が変化する荷重ゼロの付近では収束計算の影響で履歴挙動にやや違いが生じているものの、鉄筋降伏荷重、軸方向鉄筋降伏後の安定した耐荷力、除荷剛性を含め実験結果と比較し良好であった。接合要素のモデル化が腐食の有無によらず、適切であることを確かめられたため、以後の解析には接合要素を含んだ格



図 - 6 ひび割れ状況 (N-5)

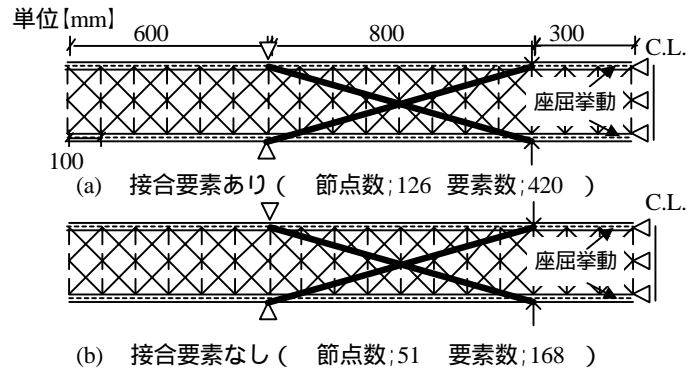


図 - 7 解析モデル (N-02, N-5)

子モデルを用いることとした。

##### 4.2 断面欠損を考慮した解析結果

腐食はり N-5 に対する解析的検討を試みる。はじめに、軸方向鉄筋およびせん断補強筋の断面欠損のみを考慮し、軸方向鉄筋とコンクリート要素を完全付着と仮定した解析を実施することとした。腐食はり N-5 の実験、および軸方向鉄筋の断面欠損のみを考慮した解析結果として、荷重 - 中央鉛直変位関係を図 - 9 (a) に示す。非腐食はりの結果と比較して、腐食はりでは、鉄筋降伏荷重は 108.2 kN から 87.5 kN に低下した。解析結果においても、同様の耐荷力の低下を示した。したがって、軸方向鉄筋の腐食による断面欠損が耐荷性能に影響を与えていることがわかる。一方で、変形性能については、実験では鉛直変位 15 mm から 20 mm への荷重中に急激な荷重の低下を示している。しかし、解析では軸方向鉄筋の降伏後も安定した挙動を示している。次に、軸方向鉄筋およびせん断補強筋の断面欠損を考慮した解析結果を図 - 9 (b) に示す。軸方向鉄筋の断面欠損を考慮した場合と同様に、鉄筋降伏後も荷重は漸増し、実験にみら

れるような急激な荷重の低減を予測することはできなかった。すなわち、定量的な断面欠損量を把握している場合、耐荷力は良好に予測することができるが、断面欠損を考慮するだけでは、変形性能は予測できないということである。

#### 4.3 せん断ばねに関する感度解析

せん断ばねの付着剛性 $k_1$ および最大付着応力 $\tau_{max}$ 時の、鉄筋とコンクリート間の変位(ズレ変位) $s_1$ が、耐荷性能および変形性能に与える影響を確かめることを目的として、図-10に示す簡単な材料モデルを用いて単調載荷解析で検討を行った。 $s_1$ をElomorsi<sup>15)</sup>らの提案を参考に3mmとし、付着剛性を变化させた解析結果を図-11(a)に示す。 $k_1$ の値が小さくなるにつれて曲げひび割れ発生後の剛性は低下し、その結果鉄筋降伏変位が大きくなった。一方で、鉄筋の降伏荷重には違いは現れなかった。次に $k_1$ を $1\text{ N/mm}^3$ とし、 $s_1$ を变化させた解析結果を図-11(b)に示す。付着切れが生じると、トラス的、アーチ的耐荷機構が成り立たなくなり、荷重が急激に低下していることがわかる。したがって、付着切れを考慮することで、荷重が低減する挙動を表現できることが示唆された。

#### 4.4 付着挙動を考慮した解析結果

せん断ばねに付着挙動を組み込むことによって、正負交番解析を試みた。付着挙動特性は図-12に示すように、付着切れ時のズレ変位を最大付着応力 $\tau_{max}$ 時のズレ変位 $s_1$ とし、その後応力をなだらかに低減させるものとした。なお、履歴ループは簡便かつ除荷剛性の低下を考慮できる原点指向型とし、付着特性

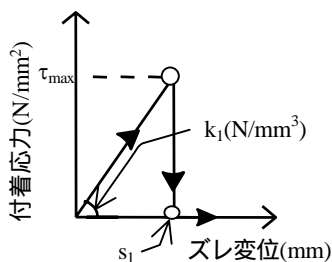


図-10 感度解析のための付着特性

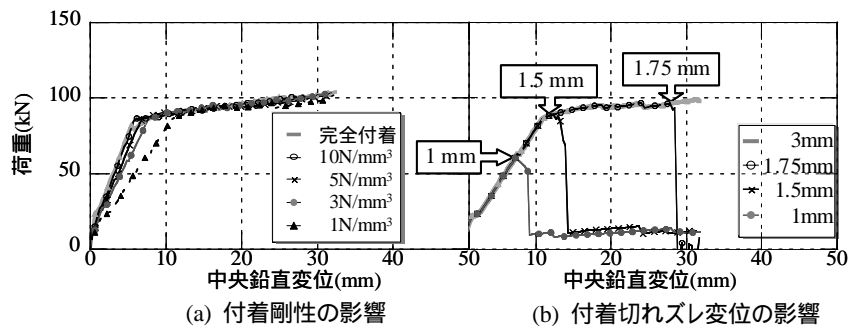


図-11 せん断ばねの感度解析 (N-5)

は正負対称とした。既往の研究<sup>1),15)</sup>および実験結果との適合性を考慮し、各係数の詳細を図-12に示す値とした。上に述べた付着モデルを組み込んだN-5の解析結果を図-13および表-3に示す。また、下部接合要素の付着切れ後の履歴挙動を抽出している。軸方向鉄筋とコンクリートの付着劣化挙動を考慮することにより、解析結果においても急激な荷重の低減を予測することができた。解析において、付着切れはやはり中央部の等モーメント区間で生じた。そこで、図-14に等モーメント区間の下部軸方向鉄筋それぞれの平均応力を算出した、平均応力-中央鉛直変位関係を示す。さらに、図-13に示す付着切れ後の履歴挙動を図-14に対応させ、抽出した。付着切れ後は、剛性が小

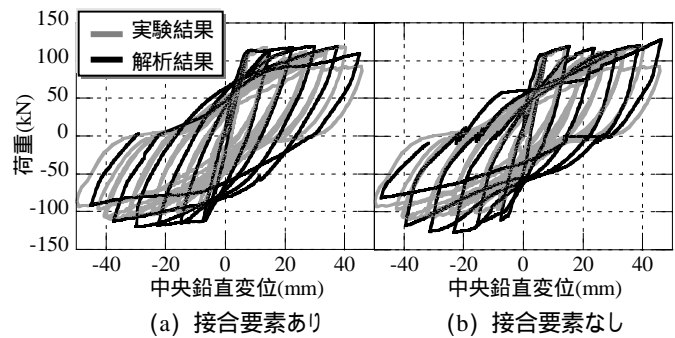


図-8 荷重-変位関係 (N-02)

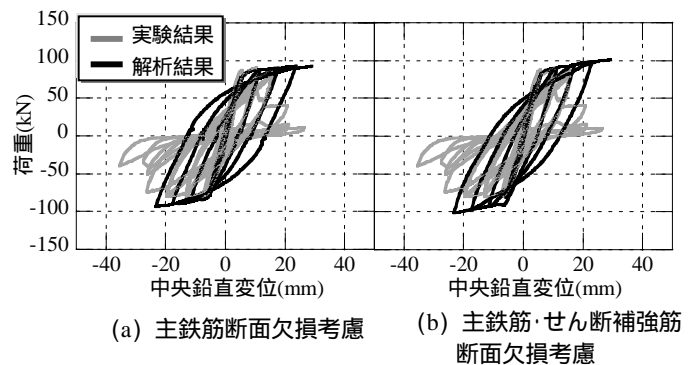


図-9 断面欠損のみ考慮した荷重-変位関係 (N-5)



さくなり、負担する応力が急減することが確かめられた。すなわち、付着劣化挙動を考慮することで、コンクリートと鉄筋の一体性が失われるために耐荷力が急減することを解析的に表現できた。

## 5. まとめ

加藤らの鉄筋の腐食によって劣化した RC 部材に関して、解析的検討を行った。特に軸方向鉄筋とコンクリートの付着劣化に着目し、新たにせん断ばねと垂直ばねを組み込んだ接合要素のモデル化を検討した。結論を以下にまとめる。

- 1) 接合要素を用いた RC はりの正負交番解析を行い、非腐食・腐食はりともに良好な解析結果を得ることができたことがわかった。
- 2) せん断ばねに付着切れを考慮することによって軸方向鉄筋の応力分担が小さくなり、耐荷力が急減することが解析的に確認された。

謝辞： 本研究では、港湾空港技術研究所で行われた実験のデータを使用させていただきました。ご協力頂きました港湾空港技術研究所 構造強度研究室の横田弘室長，加藤絵万氏に感謝します。

## 参考文献

- 1) 佐藤文則ほか：鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.203-212，1991.2
- 2) 加藤絵万ほか：繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1849-1854，2003.7
- 3) 冨田充宏ほか：鉄筋腐食により劣化した RC はりの剛体 - ばねモデルによる非線形解析，土木学会論文集，No.584/ -42，pp.267-276，1998.1
- 4) 二羽淳一郎ほか：鉄筋コンクリートはりのせん断耐力機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No.508/V-26，pp.79-88，1995.2
- 5) 三木朋広ほか：3次元格子モデルを用いた鉄筋コンクリート部材の非線形解析，土木学会論文集，No.774/V-65，pp.39-58，2004.11
- 6) 三木朋広ほか：鉄筋座屈を考慮した格子モデルによる RC 橋脚の静的正負交番解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.979-984，2002.6
- 7) 長沼一洋ほか：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，No.536，pp.135-142，2000.10
- 8) Mander, J. B. et.al.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, August, 1988.
- 9) Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete

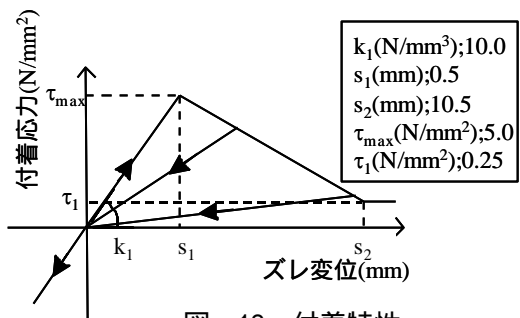


図 - 12 付着特性

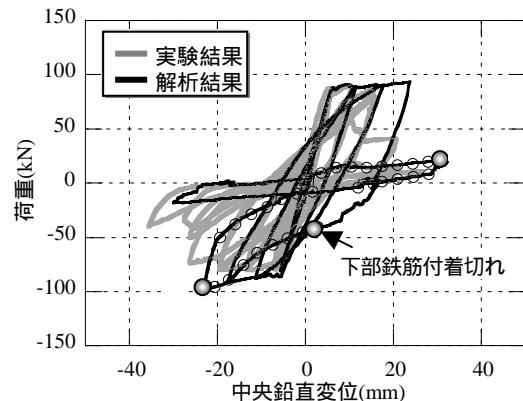


図 - 13 付着劣化挙動を考慮した荷重 - 変位関係 (N-5)

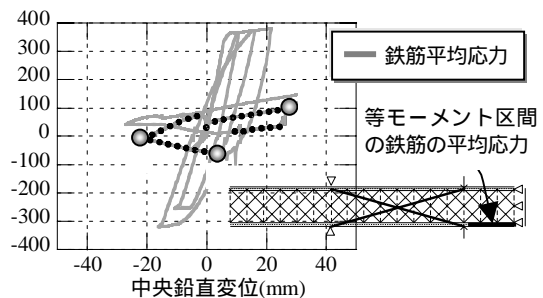


図 - 14 付着切れによる鉄筋の応力の変化 (解析結果)

Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, Mar./Apr., 1986

- 10) 前川宏一ほか：擬似直交2方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.63-76，2003.5
- 11) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 12) 内田裕市ほか：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.203-212，1991.2
- 13) 福浦尚之ほか：RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル，土木学会論文集，No.564/V-35，pp.291-295，1997.5
- 14) Dhakal, R. P.: Enhanced Fiber Model in Highly Inelastic Range and Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete, Doctoral thesis, The University of Tokyo, September 2000.
- 15) Elmorsy, M. et.al. : Modeling Bond-slip Deformations in Reinforced Concrete Beam-column Joints, Can. J. Civ. Eng. Vol.27, pp.490-505, 2000