

鉄筋腐食により劣化したRCばかりの剛体一ばねモデルによる非線形解析

富田充宏¹・梶川康男²・久野和敬³

¹正会員 工修 石川工業高等専門学校講師 環境都市工学 (〒929-03 石川県津幡町北中条)

²正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)

³正会員 工修 (株) 奥村組 東京支社 (〒107 東京都港区元赤坂1-3-10)

本研究は、鉄筋腐食によって損傷を受けたRC部材の耐力低下、破壊形状および変形挙動を解析的に明らかにするために、離散化モデルである剛体一ばねモデル(RBSM)の解析法の適用を試みたものである。鉄筋腐食による縦ひびわれやコンクリートと鉄筋の付着破壊などの劣化要因を考慮した本解析法の解析結果と、電食させたRCばかりによる単調載荷および繰り返し載荷実験の実験結果とを比較し、その妥当性について検討した。その結果、破壊形状や変形挙動を精度良く示すことができ、本解析法の有効性が明らかになった。

Key Words : nonlinear analysis, RBSM, corrosion of reinforcement, cyclic load

1. まえがき

近年、海砂および塩化物を含む混和剤の使用や飛来塩分の浸透等を原因とした鉄筋腐食によって損傷を受けた鉄筋コンクリート(RC)構造物の早期劣化が問題となっている。そのため、鉄筋の腐食によるひびわれ発生機構や鉄筋腐食を受けたRC部材の耐力に関する研究^{1)~3)}等が、現在まで数多く発表されている。これらの研究では、鉄筋の腐食膨張圧、鉄筋軸方向に沿った縦ひびわれおよびそれに伴うコンクリートと鉄筋の付着破壊の程度が、RC部材の耐力低下や破壊形状に大きな影響を与えると指摘している。しかしながら、鉄筋腐食によるRC部材の変形挙動に関する既往の研究では、実験的な手法がほとんどであり、解析的な手法を試みた例⁴⁾は數少なく、劣化状況の異なるRC部材の耐力の推定や補修方法等を検討する上で、解析的な手法の確立が求められている。

本研究は、このような観点から鉄筋腐食によって損傷を受けたRC部材の耐力低下、破壊形状および変形挙動を解析的に明らかにするため、川井⁵⁾が提案した離散化モデルである剛体一ばねモデル(RBSM)による材料非線形解析を行い、本解析法の妥当性について、実験結果と比較、検討したもので

ある。この解析法は、解析対象を剛体要素の集合体とそれらを連結する二種類の分布ばねによりモデル化し、要素境界辺上でエネルギーを評価しているため、コンクリートのひびわれやせん断すべり等の不連続現象を比較的簡単に取り扱うことができる。そのため、劣化要因である鉄筋軸方向に発生する縦ひびわれやコンクリートと鉄筋の付着破壊などを解析に反映するには、有限要素法では通常リング要素やジョイント要素等^{6), 7)}の特殊な要素を導入しなければいけないが、本解析法ではそのような処理を行う必要はなく、上記の劣化要因をコンクリートと鉄筋の付着の履歴特性や鉄筋位置のコンクリート厚などで考慮することが可能である。

また、著者らは繰り返し荷重を受けるRC部材の変形挙動について剛体一ばねモデルを用いて非線形解析を試みており、その変形挙動を解析的に推定できることを確認している⁸⁾。そこで、今回の解析では鉄筋腐食によって劣化したRC床版等に輪荷重が作用した場合、すなわち繰り返し荷重下の劣化したRC部材を対象にしている。既往の研究において、鉄筋腐食によって劣化したRC部材の繰り返し荷重下の変形挙動はほとんど解明されていないのが現状であり、本研究の報告が参考になると想っている。

解析結果と比較するために実施した実験では、鉄

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンブ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	混和 材
25	8	57.0	40.9	150	264	769	1124	0.66

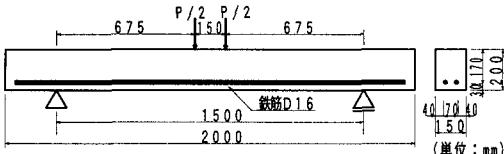


図-1 実験供試体

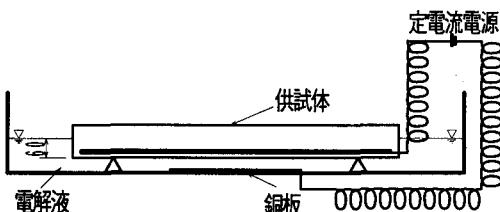


図-2 電食実験

筋腐食によって損傷を受けたRC部材のモデル化として、外部電流の印加により電食させた単鉄筋ばりを用い、単調載荷と片振りの繰り返し載荷の2種類とした。なお、構造的に最も単純な単鉄筋ばりを使用した理由は、腐食による劣化後の変形挙動および耐力の低下をより顕著に示すことができ、腐食と非腐食での挙動の相違を明確にするためである。

2. 電食RCばりの載荷実験

今回の実験は、特に鉄筋が全体的に腐食したRC部材を想定しており、電食により劣化させたRCばりについて、単調載荷および繰り返し載荷実験を実施した。また、劣化による変形挙動や破壊形状の相違を比較するために、電食していないRCばりについても同様の載荷実験を実施した。

(1)供試体

載荷実験に用いたRCばりの供試体の形状は、図-1に示すように、断面150mm×200mm、長さ2000mmのスターラップを有しない単鉄筋ばりで、スパン長1500mm、載荷間隔150mmとし、曲げ破壊を呈するようせん断スパン比4.2に設定した。主鉄筋には横フジ型異形棒鋼D16 (SD295) を2本用い、鉄筋比は1.3%とした。鉄筋のかぶりは、底面から30mm、側

表-2 材料試験結果

コンクリート	
圧縮強度(MPa)	35.6
引張強度(MPa)	3.2
ヤング係数(kN/mm ²)	26.5
ボアン比	0.18
鉄筋	
降伏強度(MPa)	337.1
引張強度(MPa)	541.9
ヤング係数(kN/mm ²)	205.8

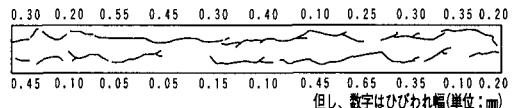


図-3 底面の縦ひびわれ

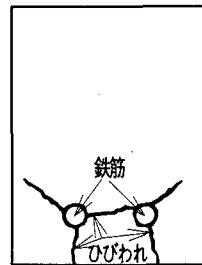


図-4 断面のひびわれ

面から40mmである。なお、コンクリートの配合とコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果をそれぞれ表-1および表-2に示す。

(2)電食実験と劣化状況

鉄筋の腐食促進法としては、既往の研究^{1), 2)}を参考にして定電流電源による電食法を用いることとした。この方法は、図-2に示すように鉄筋を強制アノード溶解させる方法であり、必ずしも自然腐食と同一の腐食状況に対応するとは限らない。しかし、今回の研究では全体的に著しく鉄筋が腐食した単鉄筋ばりの腐食状況を想定しており、そのモデル化としては電食法でも十分適用が可能であると考えている。この方法による腐食の程度は、積算電流量すなわち通電日数を変化させることにより調整できる。そこで、今回の実験では通電していない供試体(以下「非腐食ばり」と称す)と電流密度を0.5mA/cm²とし、通電日数15日間(積算電流量180mA·hr/cm²)で鉄筋を電食させた供試体(以下「腐食ばり」と称す)を作成した。なお、15日間通電の鉄筋の断面欠損率は、10%クエン酸アンモニウム溶液を用いた錆

表-3 供試体耐力

供試体番号	載荷形式	通電時間(0.5mA/cm ²)	縦ひびわれの最大幅(mm)	鉄筋降伏時の荷重(kN)	最大荷重(kN)	破壊形式
S-0	単調載荷	非腐食		52.0	62.8	曲げ破壊
S-15		15日間(360hr)	0.75		55.3	付着せん断破壊
R-0	片振り	非腐食		50.8	62.7	曲げ破壊
R-15	繰り返し載荷	15日間(360hr)	0.65		50.3	付着せん断破壊

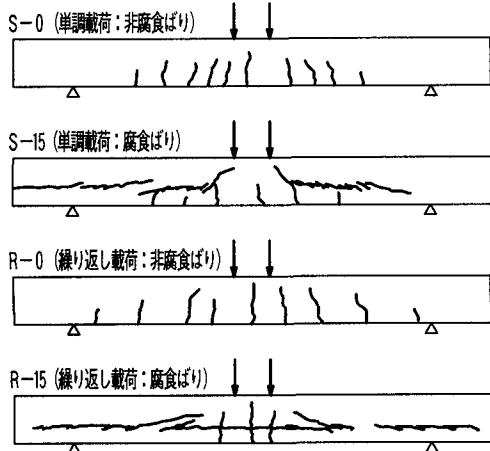


図-5 ひびわれ形状

の除去前後の重量変化から測定した結果、約5%であった。ここで、腐食ばりの劣化状況として供試体底面のひびわれ状況の一例を図-3に示す。これらは鉄筋の腐食膨張によって発生した供試体底面の鉄筋軸方向のひびわれである。なお、図中の数字はブリネル計測顕微鏡で測定したひびわれ幅の値であり、最大ひびわれ幅は0.65mmであった。図-4には、供試体断面のひびわれ進展状況を示す。著者らの以前の研究⁹⁾において、積算電流量50~70mA·hr/cm²で鉄筋間にひびわれが発生し、積算電流量100~120mA·hr/cm²で底面に縦ひびわれが発生することを報告しており、通電日数15日間（積算電流量180mA·hr/cm²）では、底面ばかりでなく側面の表面近くまで進展しており、側面の一部に錆汁の滲出が観察された。

(3) 載荷実験と実験結果

載荷実験は、サーボ型試験機により変位制御にて2点集中載荷した。載荷形式は単調載荷と片振り繰り返し載荷の2種類とし、繰り返し載荷での除荷は、供試体中央での変位が0.75mm, 1.5mm~7.5mmの間は1mm間隔および10.0mmに達した時の計9回とした。測定項目としては、供試体中央と支点との相対鉛直

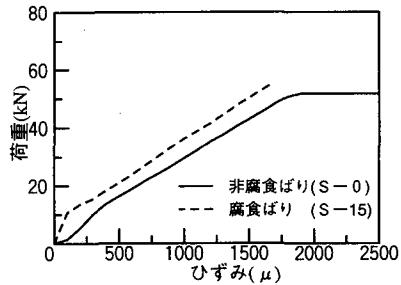


図-6 荷重-鉄筋ひずみ関係（単調載荷）

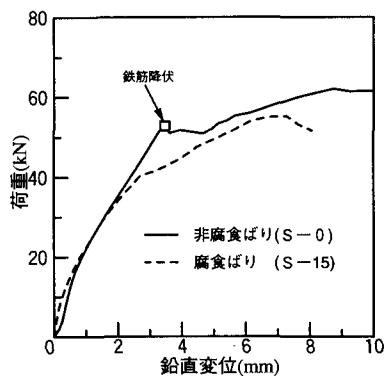


図-7 荷重-鉛直変位関係（単調載荷）

変位、供試体中央の鉄筋のひずみおよび供試体上縁および下縁のコンクリートひずみとした。

載荷実験結果として、破壊時のひびわれ形状を図-5に、また耐力を表-3に示す。図-5に示すひびわれ形状からわかるように、載荷形式に関係なく、非腐食ばりと腐食ばりとでは破壊形式が大きく異なる。非腐食ばりは曲げ破壊であるのに対し、腐食ばりは付着せん断破壊（付着割裂破壊）であった。また、図-6に示す単調載荷の荷重-供試体中央の鉄筋ひずみ関係からわかるように、腐食ばりの鉄筋は降伏しておらず、繰り返し載荷の場合も同様に鉄筋の降伏は見られなかった。なお、腐食ばりの場合縦ひびわれの影響により、載荷初期段階でのひずみの増加が少なく、非腐食ばりのひずみ量と比較して大

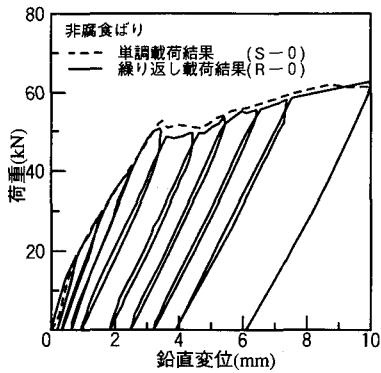


図-8 (a) 荷重-鉛直変位関係
(繰り返し載荷: 非腐食ばり)

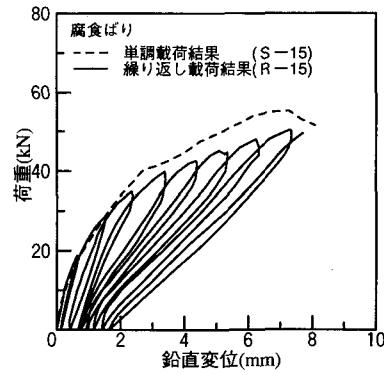


図-8 (b) 荷重-鉛直変位関係
(繰り返し載荷: 腐食ばり)

きな差が生じている。耐力については、腐食ばりは非腐食ばりと比較して単調載荷では12%、繰り返し載荷では20%とそれぞれ低下しており、低下の割合は繰り返し載荷の場合が顕著であった。

次に、単調載荷と繰り返し載荷の荷重-供試体中央の鉛直変位関係をそれぞれ図-7および図-8(a), (b)に示す。なお、繰り返し載荷の結果である図-8(a), (b)には単調載荷の結果を比較のために示してある。図-7に示した単調載荷の結果では、非腐食ばりの場合、変位3.0mm付近で鉄筋の降伏により剛性が急激に変化し、その後緩やかに変位が伸びて耐力の急激な低下は見られない。しかし、腐食ばりの場合、変位2.0mm付近で剛性が低下し始め変位7.0mm付近で最大耐力に達し、その後急激に耐力を無くしている。本研究で対象としている鉄筋軸全体に鉄筋が腐食した単鉄筋ばりでは、破壊形式が付着せん断破壊であることからもわかるように、鉄筋とコンクリートの付着が期待できず、そのため変形能が著しく低下したと考えられる。なお、変形能の低下は鉄筋の定着部の形状や定着部の腐食状況によって異なることが考えられる。

図-8(a)に示した非腐食ばりの繰り返し載荷の結果では、4ループ目に鉄筋が降伏し除荷時の残留変位が1.0mmとなり、その後の除荷-再載荷の変形は鉄筋の変形に支配された形で残留変位が増加し、除荷-再載荷の勾配は繰り返し回数に関係なくほぼ一定である。一方、図-8(b)に示した腐食ばりの場合、最終ループである9ループ目の再載荷時の途中で破壊に至った。3ループ目において再載荷時と除荷時の剛性が若干低下し始め、4ループ目以降除荷時の剛性は除荷-再載荷回数の増加に伴って著しく低下している。残留変位については、鉄筋が降伏していないことから鉄筋の変形の影響は見られず、非腐食ばりの残留変位の半分程度である。これらの

挙動は、縦ひびわれに起因する付着破壊が繰り返し載荷を受けるたびに順次進展していく、鉄筋軸に沿ったひびわれがはり端部に向かって発生していくためであると考えられる。

以上より、鉄筋の腐食を受けたRCばりは、非腐食RCばりと比較して、異なった変形挙動を示すことが明らかになった。その要因として鉄筋の腐食による鉄筋の断面欠損の影響よりも、鉄筋軸方向に生成する縦ひびわれの影響が大きいと考えられる。また、繰り返し荷重下では鉄筋の降伏の有無により全く異なる挙動を示し、鉄筋の降伏を左右する要因としては腐食による縦ひびわれが起因するコンクリートと鉄筋の付着破壊であると考えられる。

3. 剛体一ばねモデルによる解析

解析に適用した剛体一ばねモデルは、川井⁵⁾が終局状態での挙動を評価しようと開発した離散化モデルであり、不連続で複雑な塑性現象を呈する鉄筋コンクリート構造物の極限解析^{10)~12)}に用いられており、著者らもプレキャストコンクリート部材の材料非線形解析¹³⁾に適用している。

(1) コンクリートの材料特性

剛体一ばねモデルでは、図-9に示すように要素間の境界に存在する垂直応力とせん断応力に抵抗する2種類の分布ばね K_n および K_s に材料特性を直接導入することができる。そこで、コンクリートの材料特性として下記の特性を用いた。引張特性は、図-10に示すように垂直応力が引張強度 F_t に達するまで線形とし、引張強度 F_t に達した場合はひびわれが発生したとして垂直ばね K_n を切断する。その後はテンション・スティフネス効果を考慮し、ひびわれ発生

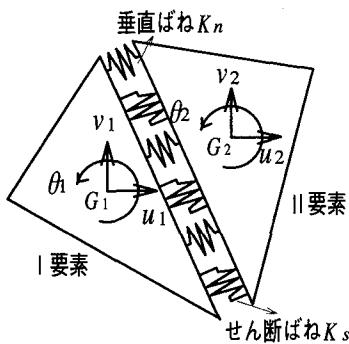


図-9 剛体-ばねモデル

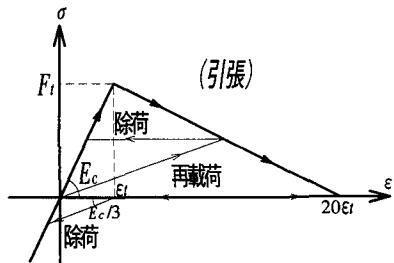


図-10 コンクリートの引張特性

直前の垂直応力をひびわれ面直交方向のひずみ ε_n の一次減少関数として次式により解放した。

$$\sigma_t = \frac{F_t}{19} \left(20 - \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_t} \right) \quad (1)$$

また、除荷等によるひびわれ面の再接触は完全に垂直応力を解放した場合、ひずみ ε_t より初期剛性 E_c の $1/3$ の勾配で直線的に圧縮側に変化するものとし、垂直応力を解放途中の場合、その時点の垂直応力を保持したまま初期剛性 E_c 上に変化するものとしてひびわれ面の再接触を考慮した。

ひびわれ面でのせん断剛性は、ひびわれ幅が増加すると急激に低下する傾向にあるため、せん断ばね K_s にひびわれ面直交方向のひずみ ε_n の関数としてその剛性を低下させた。その低減率 α は次式より求めた¹⁴⁾。

$$\varepsilon_n < 200\mu \quad \alpha = 1.0 \quad (2)$$

$$200\mu \leq \varepsilon_n \leq 4000\mu$$

$$\alpha = -0.63 \times 10^{-4} \varepsilon_n + 0.253 \quad (3)$$

$$\varepsilon_n > 4000\mu \quad \alpha = 0.0 \quad (4)$$

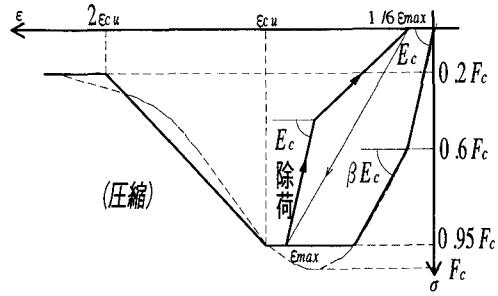


図-11 コンクリートの圧縮特性

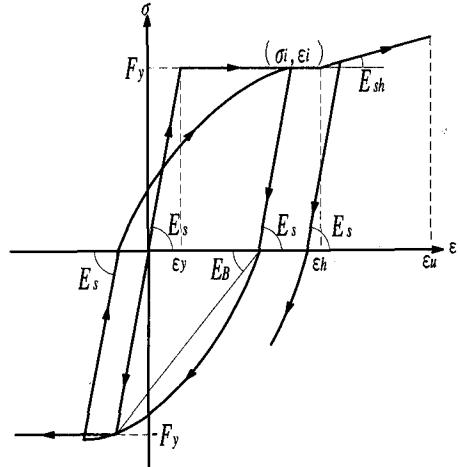


図-12 鉄筋の材料特性

一方、圧縮特性は圧縮応力-ひずみ関係を図-11に示すように折れ線で近似して表した¹⁵⁾。ここで、圧縮強度を F_c として、圧縮1次降伏強度 $F_{c1}=0.6F_c$ 、圧縮2次降伏強度 $F_{c2}=0.95F_c$ 、剛性低減率 $\beta=0.6$ の値を用いた。圧縮2次降伏後はひずみ ε_{cu} が 0.3% に達するまで F_{c2} を保持し、その後 $2\varepsilon_{cu}$ になるまで垂直応力を減少させ、最終的に $0.2F_c$ を保持するとした。除荷時の履歴については、梅原ら¹⁶⁾のモデルを参考にして圧縮第1次降伏以後に除荷を開始した場合は、除荷開始時の圧縮応力の半分になるまで初期剛性 E_c の勾配で減少し、その後は残留ひずみが除荷開始時のひずみ ε_{max} の $1/6$ となるように減少させた。なお、再載荷の場合は ε_{max} に直線的に変化するものとした。

また、垂直応力とせん断応力の相関関係に対しては、コンクリートの降伏条件に一般的に用いられているモール・クーロン型の降伏条件¹⁵⁾を採用した。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。なお、解析で用いた内部摩擦角 ϕ は 37° 、

表-4 付着定数

	k_1 (N/mm ³)	k_2 (N/mm ³)	k_3 (N/mm ³)	τ_1 (MPa)	τ_2 (MPa)
非腐食ばり	264.0	32.2	7.0	4.0	10.0
腐食ばり	30.0	0.3	0.0	0.8	1.0

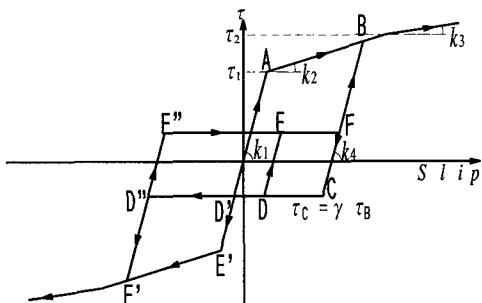


図-13 付着特性

粘着力Cは4.9MPaである。

(2) 鉄筋の材料特性

鉄筋の材料特性は、図-12に示すようにひずみ硬化特性とバウシンガー効果を考慮した松本¹⁷⁾の履歴モデルを使用した。このモデルは、鉄筋降伏前、および鉄筋降伏後の包絡線部分、除荷部分・再載荷部分の鉄筋の応力を次式で表している。

降伏前：

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad (5)$$

降伏後の包絡線：

$$\varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_h \quad \sigma_s = F_y \quad (6)$$

$$\varepsilon_u < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \quad \sigma_s = F_y + E_{sh}(\varepsilon_s - \varepsilon_h) \quad (7)$$

降伏後の除荷・再載荷

直線部：

$$\sigma_s = \sigma_i + E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_i) \quad (8)$$

曲線部：

$$\sigma_s = -F_y \left[a - \frac{a(a-1)}{-\left(\frac{E_B}{F_y} \right) \left(\varepsilon_s - \left(\varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E_s} \right) \right) + (a-1)} \right] \quad (9)$$

$$E_B = -\frac{E_s}{6} \log 10(\varepsilon_i - \varepsilon_y) \quad (10)$$

$$a = \frac{E_s}{(E_s - E_B)} \quad (11)$$

ここに、 σ_s , ε_s は鉄筋の応力とひずみ、 E_s は鉄筋のヤング係数、 E_{sh} はひずみ硬化後の塑性接線係数、 F_y , ε_y は降伏点の強度とひずみ、 ε_h , ε_u はひずみ硬化点

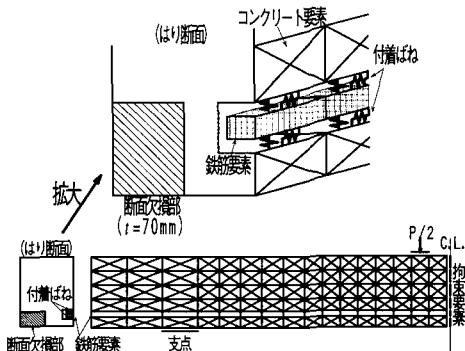


図-14 要素分割図

および引張強度点に対応するひずみ、 σ_i , ε_i は履歴を受けた鉄筋の最大応力と最大ひずみである。

(3) コンクリートと鉄筋の付着特性

繰り返し載荷時における付着応力とすべり量の関係($\tau - S$ 関係)を取り扱った報告^{18), 19)}は、単調載荷時のそれに比べるときわめて少ないので現状であり、既往のモデルのうちで森田・角の構成則²⁰⁾に準拠して、 $\tau - S$ 関係を図-13に示すようにモデル化し、包絡線部はトリリニアで近似して表した。その剛性(k_1 , k_2 , k_3)および付着応力(τ_1 , τ_2)は、非腐食ばりと腐食ばりに対応する引き抜きによる付着強度試験を実施し、その結果より表-4に示す値を使用した。腐食ばり用の付着強度試験に用いた試験体は、載荷実験の供試体の劣化状態と同じ条件になるように試験体断面および鉄筋のかぶりを同一にし、電食法で15日間通電させたものである。なお、引き抜き試験ではRCばかりで鉄筋まわりの応力場の違いから付着強度を過大評価するため、腐食ばりについては付着強度試験でのすべり量0.0002D(D:鉄筋径)での付着応力の1/2の値を付着応力 τ_1 とした。また、除荷時の剛性 k_4 については、非腐食ばりでは初期剛性 k_1 を使用した。腐食ばりでは鉄筋軸方向のひびわれ幅の増大により、繰り返しの履歴を受ける度にコンクリートと鉄筋の付着が徐々に破壊する。そのため、除荷時の剛性を一定にすることは適当でないと考え、予備計算の結果より図-13のC点が載荷時の最大すべり量の1/2になるように除荷時の剛性 k_4 を定めることにした。

(4) 縦ひびわれの取り扱い

解析は対称性を利用して、スパン中央より左半分について図-14の要素分割を行った。鉄筋については断面積が等しくなるような厚さで図に示す四角形

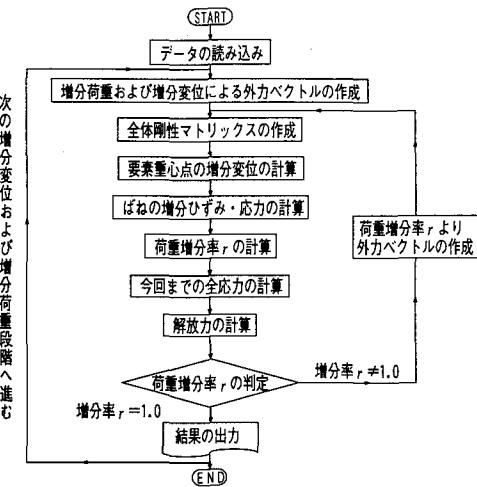


図-15 フローチャート

要素に配置し、コンクリートと鉄筋は完全付着とせず、コンクリート要素と鉄筋要素は別々の自由度を設けている。そして、鉄筋要素は上下に隣接するコンクリート要素と、3.(3)で記述した付着特性を持つせん断ばねと垂直ばねで連結した。垂直ばねの剛性は、非腐食ばりではコンクリートのヤング係数 26.5kN/mm^2 を使用した。腐食ばりではコンクリートと鉄筋の間に腐食生成物が生成されるため、その特性について考慮する必要がある。角本ら²¹⁾の研究によると腐食生成物のヤング係数に 200N/mm^2 程度を用いれば、鉄筋の腐食による縦ひびわれを類似できることや腐食生成物のヤング係数の違いが縦ひびわれの発生にあまり影響しないと指摘している。そこで、本研究では腐食ばりの場合の垂直ばねの剛性に 200N/mm^2 を用いた。なお、鉄筋要素とコンクリート要素の境界面の厚みは、鉄筋の周長の $1/2$ とした。

また、腐食ばりの場合主鉄筋間のひびわれおよび底面へのひびわれが発生していることから、主鉄筋間の底面かぶり部のコンクリートは載荷荷重に抵抗しないものと考え、図-14の斜線部分に相当する部分($t=70\text{mm}$)を断面の欠損として扱った。側面に進展しているひびわれについては、断面の欠損としての扱いはしていない。

支点、拘束要素および載荷要素は三角形要素の代わりに境界用の要素を用いた。この境界用の要素は、図-9に示した三角形要素が有している重心点の3自由度(u, v, θ)を要素の中点に存在させたものである。

(5)計算方法

計算方法は、竹内ら²²⁾が提案した r_{min} 法を拡張し

表-5 最大耐力の比較

供試体 番号	鉄筋降伏荷重 (kN)		最大耐重 (kN)		
	実験 結果	解析 結果	実験 結果	解析 結果	
S-0	52.0	49.7	1.05	62.8	60.7
S-15	-	-	-	55.3	54.4
R-0	50.8	49.6	1.02	62.7	64.5
R-15	-	-	-	50.3	46.4
					1.08

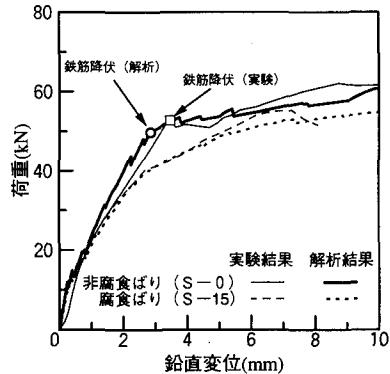


図-16 荷重-鉛直変位関係(単調載荷)

た非線形解析手法を用いたが、そのフローチャートを図-15に示す。この方法は、各増分段階で要素変位は微小であるとして線形計算し、その増分段階で要素境界面の全てのばねの材料特性が変化しなくなるまで繰り返し計算を行い、材料特性が変化しなくなれば次の増分段階に進み、指定した荷重および強制変位まで計算を行うものである。各増分段階での繰り返し計算とは、各要素境界面で応力およびひずみの材料特性が変化する増分率 r を求め、増分率 r が最小となった要素境界面のばね定数のみを変化させて、増分率 r が1.0になるまで計算を繰り返し行うものである。

今回の解析では、載荷時は変位増分法を用い、各増分強制変位量は 0.05mm とした。また、繰り返し載荷の場合の除荷時は荷重増分法を用い、各増分荷重量は載荷時で得られた最終荷重値の $1/10$ の値とし、10回の増分計算を行することで、荷重値をゼロまで戻した。

(6) 実験および解析結果の比較と考察

表-5に鉄筋降伏荷重と最大耐力の解析結果と実験結果の比較を示す。鉄筋降伏荷重については解析結果が多少低い値を示しているが、実験結果との差が5%以内であり良好な結果と考えられる。なお、腐食ばりの解析(供試体S-15およびR-15)においては実験結果同様鉄筋の降伏はみられなかった。最大

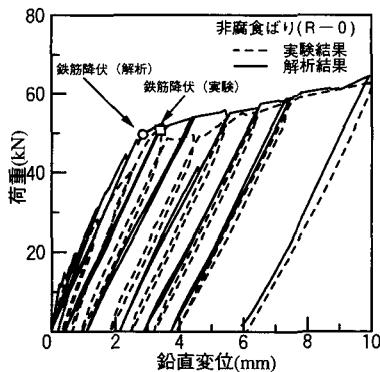


図-17(a) 荷重-鉛直変位関係
(繰り返し載荷: 非腐食ばり)

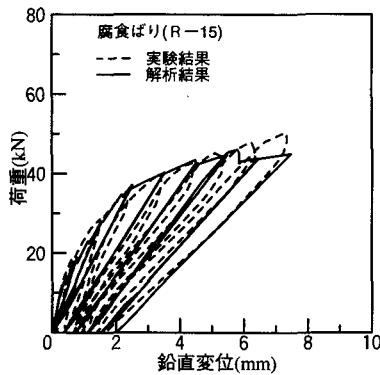


図-17(b) 荷重-鉛直変位関係
(繰り返し載荷: 腐食ばり)

耐力については供試体R-15を除けば実験結果との相違が2~3%とほぼ一致した解析結果が得られた。

図-16に単調載荷での荷重-供試体中央の鉛直変位関係の解析結果と実験結果を示す。非腐食ばりの解析では、実験結果と比較して初期勾配が多少大きい傾向を示しているが、鉄筋の降伏による包絡線の急激な変化を捉え、その後の変形特性も精度良く一致している。また、腐食ばりの解析では、荷重の増加に伴う緩やかな勾配の変化を捉えている。この包絡線の剛性低下は鉄筋軸方向に発生するひびわれと付着ばねの剛性低下が原因と考えられる。解析結果では鉛直変位2mmで付着ばねの剛性が支点からはり中央まで図-13に示した k_2 に変化し、鉛直変位6mmで支点と荷重載荷点の区間内で k_3 に低下していた。なお、図-18に示す供試体S-15の鉄筋軸に沿ったひびわれ発生位置と付着ばねの剛性 k_3 に変化した位置はほぼ一致した。また、実験結果では鉛直変位8mm付近で急激に耐力を失い破壊に至っているが、解析

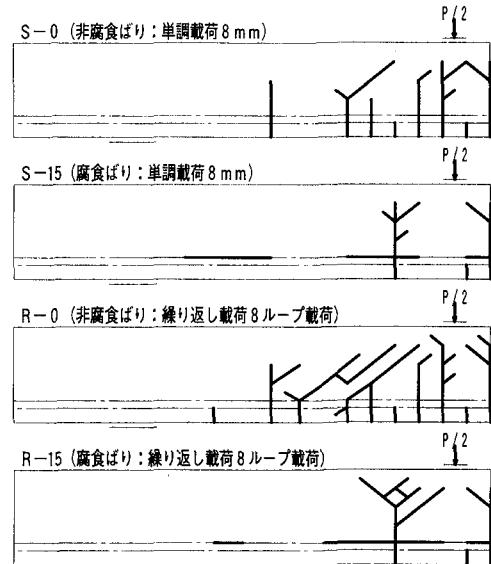


図-18 ひびわれ形状

ではその後も鉛直変位が伸びている。この原因として付着ばねの剛性が局部的に残っていることや付着ばねを連結したコンクリート要素間のばねと付着ばねとの相関を無視していることが考えられ、今後検討の余地があると思われる。

図-17(a), (b)に繰り返し載荷での荷重-供試体中央の鉛直変位関係の解析結果と実験結果を示す。図-17(a)に示した非腐食ばりの解析では、4~6ループ目の鉄筋降伏直後の荷重が実験結果より高めに出ているが、それ以後のループにおいては耐力、除荷-再載荷履歴曲線ならびに残留変位とも一致している。除荷-再載荷における勾配は、鉄筋の降伏後の変形に依存していることから本解析に使用した鉄筋の材料特性は妥当なものであったと考えられる。また、図-17(b)に示した腐食ばりの解析では、8ループ目の最終耐力が実験結果より低くなっているが、除荷-再載荷の履歴曲線は実験結果と非常に一致している。しかしながら、実験結果の除荷-再載荷の履歴曲線は橢円を描くような曲線であるが、解析結果は直線的な変化を示している。このことは、非腐食ばりの履歴曲線が鉄筋の変形に影響を受けるのに対して、腐食ばりの履歴曲線はコンクリートと鉄筋との付着破壊が大きく影響し、本解析で用いた付着特性の除荷-再載荷の剛性が同一であることや線形勾配を与えていていることが考えられる。今後、解析精度の向上のためには付着特性の検討が必要であると思われる。

図-18に単調載荷および繰り返し載荷の解析におけるひびわれ形状を示す。単調載荷は供試体中央の

鉛直変位が8mmの時点の結果であり、繰り返し載荷は8ループ目の再載荷された時点の結果である。図に示した太線で描かれたラインの垂直ばねK_nが引張強度F_tに達し、ひびわれが発生したとしてばねを切断している。実験結果のひびわれ形状である図-5と比較すると、荷重形式に関係なく非腐食ばねと腐食ばねの相違を精度良く解析できている。非腐食ばねは曲げによるひびわれが数本発生しているのに対し、腐食ばねでは曲げによるひびわれは供試体中央ともう一本の2箇所に集中している。また、鉄筋軸方向のひびわれも実験結果同様に確認できる。

以上に示した解析結果と実験結果の比較から、有限要素法などの数値解析法では繰り返し荷重下でのひびわれや付着面での挙動の特性が表現しにくいため、実験結果を説明できる解析は難しいと思われるが、剛体一ばねモデルを適用することで繰り返し荷重下の鉄筋腐食によって劣化を受けたRCばかりの変形挙動を十分に説明できる解析が可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究は、鉄筋腐食によって損傷を受けたRC部材の耐力低下、破壊形状および変形挙動を解析的に明らかにするため、剛体一ばねモデルによる材料非線形解析を行い、本解析法の妥当性について実験結果と比較、検討を行った。その結果から以下の知見を得た。

(1) 剛体一ばねモデルの適用により、繰り返し荷重下の腐食ばねの変形挙動、耐力低下および破壊状況を解析的にかなりの精度で推定できることが明らかになり、本解析の妥当性が認められた。本解析法は、劣化状況の異なるRC部材の耐力の推定や補修方法を検討する上で、有効な一解析手法であると考えられる。

(2) 鉄筋とコンクリートの付着の履歴特性を考慮した付着ばねの導入と鉄筋位置のコンクリート厚の低減等を解析法に取り入れることにより、腐食ばねの劣化要因を容易に表現することができた。

(3) 解析結果および実験結果より、繰り返し荷重下の腐食ばねでは、残留変位が非腐食ばねと比較して非常に小さい。このことは、除荷-再載荷の履歴曲線が鉄筋の降伏による変形でなく、鉄筋とコンクリートとの付着挙動に大きく影響するためであると考えられる。

(4) 実験結果においては、腐食ばねの最大耐力は非腐食ばねと比較して、繰り返し載荷で20%程度

低下し、単調載荷よりその低下の割合が顕著であった。また、変形能についても著しく劣ることがわかった。

本研究では、せん断補強筋であるスターラップを有していないRCばかりのみに対して検討を行ったが、既往の研究^{1), 2)}においてスターラップを配した腐食RCばかりでは耐力の低下が認められないとの報告がある。しかしながら、建設時期が古い床版等ではせん断補強筋が現在のように配筋されておらず、腐食による劣化が考えられる。今後、そのような床版についてもその変形挙動について検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 魚本健人, 辻恒平, 柿沢忠弘: 鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.173~176, 1984.
- 2) 武若耕司, 松本進: コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.177~180, 1984.
- 3) 中田泰広, 丸山久一, 橋本親典, 清水敬二: 鉄筋腐食によるひびわれが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.551~556, 1990.
- 4) 橋吉宏, 梶川康男, 川村満紀: 鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばかりの挙動に関する考察, 土木学会論文集, No.402/V-10, pp.105~114, 1989.
- 5) Kawai,T.: New Element Models in Discrete Structural Analysis, 日本造船学会論文集, No.141, pp.174~180, 1977.
- 6) Ngo,D. and Scordelis,A.C.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, Vol.64, No.3, pp.152~163, 1967.
- 7) Goodman,R.E. R.L.Taylor and T.L.Brekke: A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Proc. of ASCE, Vol.94, No.SM3, pp.637~659, 1968.
- 8) 富田充宏, 梶川康男, 吉田直司: 軸力と繰り返し曲げを受けるRC部材のRBSMによる挙動解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.347~354, 1997.
- 9) 梶川康男, 八島明生, 角本周: 鉄筋腐食によるコンクリート中のひびわれ挙動と膨張圧の推定, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.311~314, 1990.
- 10) 竹内則雄, 上田眞穂, 鬼頭宏明, 橋口晴紀, 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.
- 11) 園田恵一郎, 鬼頭宏明, 奥谷知明: 剛体バネ要素法の合成はりの極限解析に対する適用性について, 構造工学における数値解析シンポジウム論文集, Vol. 12, pp. 85~90, 1988.
 - 12) 石川信隆, 鈴木真次, 水山高久, 石川芳治, 古川浩平: RC 製砂防ダム袖部の衝撃破壊に対する剛体バネモデルの適用性, 計算工学講演会論文集, Vol. 1, pp. 895~898, 1996.
 - 13) 富田充宏, 前川幸次, 梶川康男: プレキャスト PC 部材接合部の剛体一ばねモデルによる挙動解析, 土木学会論文集, No. 437/I-17, pp. 105~113, 1991.
 - 14) Cendolin,L. and Dei,Poli S. : Finite Element Studies of Shear Critical Reinforced Concrete Beams, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 103, pp. 395~410, 1977.
 - 15) 川井忠彦, 上田眞稔, 竹内則雄, 渡辺正明, 横口晴紀, 毛井崇博: 鉄筋コンクリート構造物の離散化極限解析(その1), 生産研究, 38巻4号, pp. 181~184, 1986.
 - 16) 梅原秀哲, 田辺忠顯, 吉田弥智: 鋼材の付着状態を考慮した PC ラーメンの履歴挙動に関する研究, 土木学会論文集, No. 396/V-9, pp. 89~98, 1988.
 - 17) 松本公典: RC, PC および PCR 部材のモーメント-曲率の関係とその応用, 土木学会論文報告集, No. 331, pp. 155~165, 1983.
 - 18) 吉川弘道, 小林保之: 繰返し荷重を受ける RC 部材の引張硬化係数と増分型構成則, コンクリート工学論文集, Vol. 6, No. 2, pp. 27~36, 1992.
 - 19) 上田正生, 土橋由造: 軸力を受ける鉄筋コンクリート棒部材の材料非線形付着すべり解析, 土木学会論文集, No. 360/V-3, pp. 71~80, 1985.
 - 20) 森田司郎, 角徹三: 繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 建築学会論文報告集, 第229号, pp. 15~24, 1975.
 - 21) 角本周, 梶川康男, 川村満紀: コンクリート中の鉄筋腐食による膨張挙動の弾塑性解析とその適用性, 土木学会論文集, No. 402/V-10, pp. 151~159, 1989.
 - 22) 竹内則雄, 川井忠彦: すべり・接触・引張破壊を考慮した離散化極限解析法について, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, Vol. 12, pp. 311~316, 1988.

(1997.2.26 受付)

NONLINEAR ANALYSIS OF RC BEAMS DAMAGED BY CORROSION OF REINFORCEMENT USING RBSM

Michihiro TOMIDA, Yasuo KAJIKAWA and Kazutaka KUNO

The purpose of this study is to apply the method of Rigid Bodies-Spring Model (RBSM) in order to explain analytically the ultimate resistance and the mechanical behavior of RC members damaged by corrosion of reinforcement. In order to investigate the modeling of the cracks due to the corrosion of reinforcement and the expression on analysis of introducing the bond-slip between concrete and steel bar, the analytical results obtained by RBSM were compared with the experimental ones of cyclic bending tests on RC beams with an accelerated galvanostatic corrosion method. As a result, it was confirmed that the analytical method of RBSM was effective for analyzing the nonlinear deformational behavior of the damaged RC beams by corrosion of reinforcement.