# 論文 鉄筋腐食したコンクリート構造部材の3次元格子モデル解析

三木 朋広\*1· 久保 陽平\*2· 二羽 淳一郎\*3

要旨:鉄筋腐食したコンクリート構造部材の残存構造性能を把握するため、3 次元格子モデルを 用いて解析的に検討した。格子モデルは、トラス要素で構成された簡便な解析モデルである。本 研究では、鉄筋腐食の程度を、鉄筋の断面欠損、および主鉄筋とコンクリートの付着劣化として 解析に反映させた。解析対象は、建設後約 40 年経過した桟橋から切り取った RC はりである。3 次元格子モデルに、空間的にばらついた鉄筋腐食による断面欠損率を考慮することによって、鉄 筋降伏荷重、最大荷重、および変形性能をおおむね予測できた。

キーワード:鉄筋腐食,付着性能,断面欠損,接合要素,3次元格子モデル

#### 1. はじめに

既設構造物の劣化が進む状況の下,適切な維持管 理システム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劣化が問題となっている。 鉄筋腐食が顕在化するときは、かぶりコンクリートにひ び割れが生じていることが多く、さらに著しく腐食が進 行すると、鉄筋とコンクリートの付着も健全時に比べ低 下する。既往の研究<sup>1)</sup>では、鉄筋の腐食膨張圧に起因 する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,腐食による 断面欠損分以上に曲げ耐荷力が低下すると指摘さ れている。

また,合理的な維持管理を行うには,劣化したコ ンクリート構造物の残存構造性能を正確に評価す る必要があり,そのための解析ツールが求められて いる。本研究では,例えば鉄筋腐食やひび割れ状況 などの劣化の程度を表す情報は既に把握している ものとし,それらを用いて構造物の残存性能を予測 する手法の構築を目指していく。

本研究で用いる格子モデル<sup>2</sup>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。鈴木ら<sup>3</sup>は,この格子モデルにおいて,主鉄筋 およびせん断補強筋の断面欠損を考慮することに 加え,主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から成る接合要素を用いる ことで,鉄筋腐食した RC はり部材の耐荷性能を評 価できることを明らかにした。このとき,解析は 2 次元のモデルで行われており,さらに検討対象は電 食によって鉄筋腐食した RC はり部材に限られて いる。しかし, Morinaga<sup>4</sup>は,電食などの促進試験 による鉄筋腐食は,実際の供用下のそれよりも一様 に分布していると報告している。すなわち,実際の 構造物においては,コンクリート中の複数本の鉄筋 が,それぞれ位置で異なる腐食状態を有していると 言える。このような空間的なばらつきを有する鉄筋 腐食の状態を,ある方向に平均化しなくてはならな い 2 次元モデルに反映させることは困難である。

そこで本研究では、空間的にばらつきを有すると いった現実の供用環境下で腐食した鉄筋の情報を、 解析モデルに忠実に反映させるため、格子モデルを 3 次元に拡張し、RC 部材の残存構造性能を評価す ることを目的とした。

# 2. 解析モデル

#### 2.1 格子モデルの概要

格子モデル<sup>2)</sup>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 トの斜め圧縮部材および斜め引張部材を、45 度と

- \*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博士(工学)(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 (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)



135度方向に規則的に配置し、さらに端部節点以外 で変位が独立な部材であるアーチ部材を組み込ん でいる。図-2は、格子モデルにおけるコンクリー 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b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、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。

# 2.2 各要素の構成則

## (1) コンクリートモデル

斜め圧縮部材およびアーチ部材に対して,ひび 割れたコンクリートの引張ひずみの増加にともな う,直交方向の圧縮強度の軟化挙動を,Vecchio ら が提案したモデル<sup>5)</sup>を用いて考慮した。曲げ圧縮部 材には,前川らのモデル<sup>6)</sup>を採用した。ただし,曲 げ圧縮部材については,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・前川のモデル<sup>7)</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。一



図-2 格子モデル断面区分の概略図



方,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,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>8)</sup>を適用した。内部履歴モデルには,長沼らの モデル<sup>9)</sup>を参考とした履歴曲線を使用した。ただし, コンクリートモデルには,鉄筋腐食の影響は考慮 していない。

## (2) 鉄筋モデル

鉄筋の応力-ひずみ関係には、引張応力域では、 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>の</sup>を用いた。一方、圧縮応 力域ではバイリニアモデルを用いた。本研究では、 腐食による断面欠損のみを考慮しており、剛性や 伸び率の低下は考慮しない。しかし、腐食が進み 断面欠損率が大きくなると、鉄筋の破断が見られ るようになる。RC 部材の変形性能を適切に予測す るために、精度の高いモデルが提案された際には、 更新する必要があるものと考える。

#### 2.3 鉄筋とコンクリート接合要素のモデル化<sup>3)</sup>

コンクリート要素と鉄筋要素は、図-3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



1シリーズ 2シリーズ 試験体名 1-1 1-2 1-3 2-1 2-2 2-3 断面幅 b (mm)\*1 699 535 798 732 569 812 断面高さh(mm)<sup>\*1</sup> 300 300 300 310 310 310 上段鉄筋本数\*2 3 4 3 3 3 3 下段鉄筋本数\*2 5 4 5 5 6 6

表-1 試験体概要

\*1:平均值, \*2:直径 13mm 丸鋼

用いた。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とせん断応力を伝達するせ ん断ばねで結合し、それぞれのばねに材料特性を 付与した。垂直ばねはコンクリートのヤング係数 を用いた弾性体とした。せん断ばねは、鉄筋の表 面積全体に付着応力が一様に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 s (mm)の関係に置き換えた。本研究では、最大 付着応力 $\tau_{max}$ 、その時の鉄筋とコンクリート間の変 位 s<sub>1</sub>、付着応力が完全にゼロとなるときの変位 s<sub>2</sub> をパラメータとした、図ー4に示す付着特性を用い た。これらの値は、鉄筋の断面欠損率と付着劣化 の程度を関連付けた、加藤らが行った両引き試験 の結果<sup>10)</sup>を参考として定めた。用いた試験体は、 200×150×2000 mm のコンクリート中央に、D19 鉄 筋を 1 本埋め込んだものである。感度解析の結果 から、図ー4 の式中、 $s_1$ ,  $s_2$ は、それぞれ 0.1 mm, 0.8 mm とし、指数 a、b は、それぞれ a = 1, b = 4とした<sup>3)</sup>。また、 $\tau_{max}$ は、鉄筋断面欠損率 x (%)を用 いて、次式から求めることとした。

$$\tau_{\rm max} = -0.16 \, x + 4.0 \, ({\rm N/mm^2}) \tag{1}$$

なお,加藤らの研究では異形棒鋼を用いており, その直径も異なっているが,本研究では,丸鋼を 用いた場合にも,そのまま適用することとした。

# 3. 鉄筋腐食した RC 部材の耐荷性能の評価

## 3.1 解析の概要

解析対象には、加藤らによって行われた、建設 後約40年経過した桟橋上部工から切り出したRC 構造部材<sup>11)</sup>を選定した。この桟橋は、1965年に供 用が開始されたが、床版底面にひび割れやかぶり の剥落等の劣化が認められたため、2004年に撤去 された。曲げ載荷試験を行った試験体は、桟橋上 部工の2枚の床版から3体ずつ切り出した、計6 体の矩形断面RCはりである。試験体概要を表-1 に示す。曲げ載荷試験後に採取した鉄筋とコンク リートコアの強度試験の結果、鉄筋の降伏強度と ヤング係数はそれぞれ358 N/mm<sup>2</sup>、218 kN/mm<sup>2</sup>で あり、コンクリートの圧縮強度とヤング係数は、 それぞれ 38.6 N/mm<sup>2</sup>, 29.1 kN/mm<sup>2</sup> であった。

この実験の特徴として、実験後、各試験体の主 鉄筋をはつり出し、曲げスパン内の主鉄筋を長さ 100 mmに分割して平均断面欠損率を測定している ことがあげられる。図-5 に、下段主鉄筋の断面減 少率分布を示す。先に述べたように、それぞれ主 鉄筋の腐食状態が、空間的にばらついていること がわかる。概して曲げスパン中央部において断面 減少率が高い傾向が見受けられる。しかし、例え ば 2-3 試験体では、曲げスパン中央部で最大 51% の減少率を示す主鉄筋がある一方、まったく腐食 していない主鉄筋(減少率 0%)も確認できる。また、 各シリーズは同一床版内から切り出したものであ るが、それぞれの試験体で、最大減少率が大きく 異なっている。これは、ジャンカなど、コンクリ ートの初期欠陥の影響が大きいものと推測される。

図-6に、3次元格子モデルの概要を示す。モデ ルでは、2次元格子モデルを奥行き方向に下段主鉄 筋の本数分配置し、x-z平面および y-z平面内をト ラス部材で接合している。上下段主鉄筋の有効高 さを反映させるため、節点は、y方向に上縁からそ れぞれの鉄筋の有効高さ  $d_1, d_2$ の位置に配置した。  $1 シリーズで d_1 = 140$  mm、 $d_2 = 250$  mm、2 シリ-ズで  $d_1 = 150$  mm、 $d_2 = 260$  mm である。曲げスパン 内で計測された鉄筋の断面減少率から、鉄筋要素 の断面積および $\tau_{max}$ を決定した。これによって、鉄 筋腐食の影響を、鉄筋の断面欠損、鉄筋とコンク リート界面の付着劣化として考慮した。ただし、 鉄筋断面減少率を測定していない曲げスパンの外 側においては、両支点部で計測された断面減少率





## 3.2 2次元格子モデル解析の適用性

2次元格子モデルを用いた解析によって,鉄筋腐 食した損傷 RC はりの変形挙動を評価していく。2 次元モデルでは,複数本の鉄筋の,空間的なばらつ きを有する腐食状態を直接入力値として用いるこ とはできない。そこで,それぞれの鉄筋の断面欠損 率の最大値,断面奥行き方向の平均値,および最小 値を用いた場合の解析を実施する。ここでは,一例 として 1-2 試験体の解析結果を取り上げる。図-7 に断面減少率の分布を,図-8 に解析および実験か ら得られた荷重-載荷点変位関係を示す。この供試 体では,スパン中央,およびスパン端部の支点付近



図-8 1-2 試験体の荷重-載荷点変位の関係 (2 次元モデル)



の断面欠損率が大きく,その領域のばらつきも大き いことがわかる。図-8から,入力値として用いる 鉄筋断面減少率の分布が異なると,曲げ耐荷力,変 形性能ともに著しく異なってくることがわかる。図 -5に示す断面欠損率の分布を見ると,1-2試験体 では,曲げスパンの端部において,最大断面減少率 45%を示した鉄筋がある一方,周辺の鉄筋ではまっ たく腐食していないことも確認できる。このことか ら,腐食状態が空間的にばらついている場合,入力 する鉄筋断面の減少率分布の平均値,最大値および 最小値についてもばらつきが大きく,2次元解析の 結果に影響を与えたものと考える。

ここで示したように,現実の供用環境下で,空間 的なばらつきを有する腐食を受けた RC 部材にお いては、2次元解析でその影響を適切に反映するこ とが困難となる。また、今後、実構造物の構造性能 の把握を目指す場合、様々な載荷状態を再現するた めにも、3次元解析が必要であると考える。

#### 3.3 3 次元格子モデル解析への拡張

図-9に、解析および実験から得られた荷重-載 荷点変位関係を示す。この図から、試験体にひび割 れが発生するか、腐食ひび割れが進展するまでの荷 重-変位関係は、解析と実験の一致を見ることがで きる。変形性能に関しては、多少小さく予測してい るものの、おおむね再現できていることがわかる。 ただし、試験体 1-2、1-3、2-2、2-3 では主鉄筋の破 断に伴って荷重が大きく低下したが、解析では腐食 による鉄筋の伸び率の低下を考慮していないため、 変形性能を精度よく予測できてはいない。なお,1-2 試験体の結果を見ると,図-8に示した鉄筋の断面 欠損率の平均値を用いた結果とほぼ等しいことが わかる。今回の実験では,奥行き方法に一様に線載 荷しており,平均値を用いた2次元解析と3次元解 析の結果に大きな違いがなかったものと考える。

次に,解析と実験の比較として,図-10 にひび 割れ発生荷重,図-11 に主鉄筋降伏荷重,および 図-12 に最大荷重を示す。図-10 に示すように, 解析におけるひび割れ発生荷重は,実験における値 よりも著しく高い値を示していることがわかる。一 方,図-11,図-12 に示すように,主鉄筋降伏荷 重においては解析値と実験値の比が0.77 から1.13, 最大荷重においても0.79 から1.15 と,解析によっ てほぼ妥当に再現できている。

ここで,ひび割れ発生荷重の過大評価に関しては, 解析において,ジャンカなどの初期欠陥や腐食ひび 割れによる断面積の減少を考慮していないためと 考える。また,本解析で用いた式(1)は,断面減少 率が最大で10%程度の実験を基にしている。しか し,今回対象とした試験体においては,最大で51% の断面減少率が確認されていることから,鉄筋腐食 の進んだ実構造物を対象とする場合の,材料特性の 妥当性の確認,あるいは改善は今後の課題とする。

# 4. まとめ

本研究では、実際の供用環境下で鉄筋腐食した RC 部材を対象として、3 次元格子モデルを用いた 解析を行い、部材の残存構造性能の予測を試みた。 以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) 複数本の主鉄筋それぞれが異なる腐食状態を 有する RC 部材の場合,その影響を2次元モデ ルでは適切に再現できないことを確認した。
- (2) 3 次元格子モデルを用いた解析によって、鉄筋 腐食した RC 部材の残存構造性能の評価を試み た結果,鉄筋降伏荷重および最大荷重に関して、 実験値をほぼ妥当に予測することができた。

謝辞:本研究で使用した貴重な実験データを提供 して頂きました,港湾空港技術研究所 横田弘 LCM 研究センター長,ならびに加藤絵万博士に心から 御礼申し上げます。

### 参考文献

- 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
- 2) 三木朋広、二羽淳一郎: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.744/V-65, pp.39-58, 2004.11
- 3) 鈴木暢恵ほか: 格子モデル解析による損傷 RC は り部材のせん断耐荷機構の評価, コンクリート 工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.235-240, 2006
- Morinaga, S.: Remaining Life of Reinforced Concrete Structures after Corrosion Cracking, Durability of Building Materials and Components, pp.127-137, 1996
- Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, Mar./Apr., 1986
- 6)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.634/V-45, pp.157-176, 1999.11
- 7) 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
- 8)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
- 9)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
- 10)加藤絵万ほか:鉄筋とコンクリート間の付着性 能に及ぼす鉄筋腐食の影響,港湾空港技術研究 所資料, No.1044, 2003.3
- 加藤絵万ほか:建設後 30 年以上経過した桟橋上 部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造 性能,港湾空港技術研究所資料, No.1140, 2006.9