# 論文 粒子モデルによる鉄筋コンクリート梁のひび割れ解析

# 田嶋 和樹\*1・白井 伸明\*2・中村 隆大\*3

要旨:ひび割れ解析モデルの1つである粒子モデルを用いて,鉄筋コンクリート(RC)梁の ひび割れ解析を実施した。圧縮での破壊を考慮するなど従来の粒子モデルを改良するととも に,FEM 解析を活用して材料パラメータを同定することによって従来の課題を解決した。粒 子モデルによる RC 梁のひび割れ解析の結果,荷重-変形関係および破壊モードならびに供 試体に生じるひび割れ分布性状を良好に模擬することができた。 キーワード: ひび割れ,鉄筋コンクリート,梁,数値解析,粒子モデル

1. はじめに

被災度区分判定基準<sup>1)</sup>では,鉄筋コンクリー ト(以下,RC)部材の損傷度を判定するための 基準値として,ひび割れ幅の値を示している。 さらに,耐震性能評価指針<sup>2)</sup>では,部材の復元 力に対して限界状態,損傷度および残留ひび割 れ幅を対応づけており,RC部材の性能評価に関 する考え方を示している。このように,RC部材 に生じるひび割れに着目することは,部材の損 傷ならびに性能を評価する上で重要である。

本研究の目的は,RC部材の損傷ならびに性能 を解析的に評価・予測するための手法を構築す ることである。RC部材に生じるひび割れに着目 した場合,研究のアプローチとしては有限要素 ひび割れモデルまたはひび割れ解析モデルを用 いる2通りの方法が考えられる。前者の研究例 としては,分散ひび割れモデルを用いた佐藤ら <sup>3)</sup>の研究や離散ひび割れモデルを用いた関ら<sup>4)</sup> の研究が挙げられる。一方,本研究は後者のケ ースであり,筆者らが開発を進めている粒子モ デル<sup>5)</sup>を利用する。

粒子モデルはトラス要素のネットワークを用 いた簡便なモデルである。従来はコンクリート のひび割れ挙動を対象としてきたため,圧縮で の破壊を考慮していない等,RC 部材に適用に 際の問題点を解決する必要がある。また,RC 部材の損傷予測を可能とするためには,解析に 用いる材料パラメータの同定手法についても再 検討が必要である。

以上,本報では粒子モデルを RC 部材に適用 するための改良を行うとともに,解析に用いる 材料パラメータの同定手法を提案する。さらに, RC 梁部材の破壊試験を解析対象としてひび割 れ解析を実施し,解析手法の検証を行う。

# 2. 粒子モデルの概要と改良点

#### 2.1 要素ネットワーク

本研究の粒子モデルはJirasekら<sup>6,7)</sup>の定式化 に従い,軸方向力のみを負担するトラス要素に より構成される。コンクリートのひび割れ解析 を行う場合には,内部の複相構造を模擬するた めに,モルタル相,骨材相および界面相の3相 から成る要素ネットワークを定義した。しかし, RC部材への適用に際しては,単相で均質なコン クリート要素を仮定する(図-1)。



- \*1 日本大学 理工学部建築学科助手 博士(工学) (正会員)
- \*2 日本大学教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)
- \*3 清水建設(株) 工修 (正会員)

要素ネットワークにおいて単相のコンクリー ト要素を仮定する理由は以下の通りである。

- (1)コンクリートの複相構造を考慮するためにはそれに適した要素寸法(1 mm 程度)を選択する必要がある。部材レベルの解析を行う場合には要素数が膨大となり,計算時間が増大する。種々の検討を行うには現実的でない。
- (2)既往の研究<sup>8)</sup>において,コンクリート供試体 に生じるひび割れ幅を粒子モデルで評価した 結果,ひび割れ進展挙動は異なるものの,ひ び割れ幅に及ぼすモデル化(単相,複相)の 影響が確認されなかった(図-2)。
- (3)解析対象供試体のモルタルおよび骨材の試験結果は入手が困難であるため、単相構造で モデル化した方が複相構造を考慮したモデル 化よりも汎用性が高いと考えられる。



2.2 コンクリートの応力 - ひずみ関係

図 - 3 にコンクリート要素に付与する応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ( $\varepsilon$ )関係を示す。本研究では RC梁のひび割れ解析を実施するため,圧縮での 破壊も考慮できるように圧縮側にも引張側と同 形状の $\sigma$  -  $\varepsilon$ 関係を仮定する。引張側および圧 縮側の特性の違いは,(1)ヤング係数( $E_{mc}$ , $E_m$ ), (2)材料強度( $\sigma_p$ , $\sigma_{pc}$ ),(3)限界ひずみ( $\varepsilon_{fr}$ , $\varepsilon_{fc}$ ) および(4)破壊エネルギー( $G_{FM}$ , $G_{FMc}$ )の値 によって表現される。要素に関しては4つの状 態(弾性,軟化,除荷,破断または圧壊)が考 慮され,各状態は $\sigma$  -  $\varepsilon$ 関係に対応している。 なお,本解析では全要素の状態変化を走査して 増分サイズを制御している。

### 2.3 材料パラメータの同定

従来のように,コンクリート供試体の破壊挙 動を詳細に分析することを目的とする場合には, 材料パラメータは解析対象供試体の試験結果か ら得られる剛性や最大荷重,破壊エネルギー等 の巨視的な応答や材料特性と関連付けることに よって同定すれば良い。しかし,この手法では 試験結果が既知であることが条件となるため, 損傷予測は不可能である。



図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

この問題を解決するために,本研究ではFEM 解析を活用する。解析対象供試体のFEM 解析 を実施し,試験結果を予測することによって, 従来と同様の方法でのパラメータ同定を行うこ とが可能になる。本研究においてFEM 解析を 活用する理由は以下の通りである。

- (1)解析に用いる材料パラメータとして,一般的 な材料試験結果を利用できる。
- (2)既往の研究成果が多く蓄積されているため 解に対する信頼性が高い。
- (3)汎用コードが多く開発され,広く一般的に利 用されている。
- 3. RC 梁のひび割れ解析
- 3.1 実験概要

供試体の概要を図-4 に示す。供試体は単純 梁形式に支持された 1 点集中載荷を受ける RC 梁部材である。載荷には 1900kN アムスラー試 験機を使用し,荷重はロードセルによって測定 した。変位は,容量 50mm, 1/200mm 精度の変 位計を用いて測定した。表 - 1 に試験パラメー タの一覧を示す。本試験では,コンクリート強 度の異なる2種類の供試体を各2体,計4体準 備し、それぞれ単調載荷および片側繰返し載荷 の2パターンの載荷方法で破壊した。図-5に 荷重 - 載荷点変位関係を示す。コンクリート強 度によって降伏点の値が大きく異なる結果とな った。また,図-6に供試体の最終破壊状況を 示す。本試験では全ての供試体に対して曲げ破 壊を想定していたが,FM21のみ破壊形式が異 なり,曲げ降伏後にせん断破壊した。



表-1 実験パラメータ

	載荷方法	コンクリート 圧縮強度	鉄筋
FM21	出油载芬	21.0 MPa	主筋
FM30	牛inf東11	30.5 MPa	D16 (SD345)
FC21	片側繰返し	21.0 MPa	あばら筋
FC30	載荷	30.5 MPa	D10 (SD295)



図-5 荷重-載荷点変位関係



図-6 最終破壊状況

### 3.2 FEM 解析

本解析では,分散ひび割れモデル用いた非線 形FEMによる2次元解析を実施する。なお,解 析 コードには汎用構造解析プログラム DIANA8.1<sup>9)</sup>を用いた。

図 - 7 に要素分割図を示す。本解析では,コ ンクリートは4節点アイソパラメトリック要素 を用いて離散化し,平面応力状態を仮定した。 梁主筋はトラス要素を用いて離散化し,あばら 筋は埋め込み鉄筋要素とした。 図 - 8 にコンクリートの 1 軸引張応力 - ひず み関係を示す。上昇域は引張強度ftまでを線形 に仮定した。下降域は引張軟化曲線を 3 直線で 近似し,要素代表長さ $L_c$ で除すことによりひび 割れ幅をクラックひずみに変換している。破壊 エネルギー $G_f$  (N/mm)は次式による大岡ら<sup>10)</sup>の 提案式より求めた:

 $G_F = (0.23 f_c + 136) / 1000$  (1) ここで  $f_c$  (MPa)はコンクリートの圧縮強度であ る。ひび割れコンクリートのせん断剛性低下率 は,次式<sup>11)</sup>により求めた:

 $\beta = G_{cr} / G_0 = 1 / (1 + 4447 * \varepsilon_{cr})$  (2) ここで, $G_{cr}$ :ひび割れ発生後のせん断剛性,  $G_0$ :ひび割れ発生前のせん断剛性である。

図 - 9 にコンクリートの一軸圧縮応力 - ひず み関係を示す。上昇域は  $1/3 f_c$ を折れ点とする 2 直線で近似し,下降域は圧縮破壊エネルギー  $G_{FC}$ を考慮した軟化モデルを直線で近似した。 ピーク後の応力 - ひずみ関係は,応力 - 塑性変 形関係から,ひずみを $\delta_{\rho}/L_c$ として求めている。  $L_c$ は引張側と同様に仮定した。なお, $G_{FC}$  (N/mm) は中村ら<sup>12)</sup>により提案された次式より求めた:  $G_{FC} = 8.8(f_c)^{0.5}$  (3)

鉄筋の応力 - ひずみ関係は降伏値を折点とす る 2 直線モデルとし,降伏後の 2 次剛性は初期 剛性の 1/100 とした。また,引張側の主筋とコ ンクリート間の付着 - すべり挙動をモデル化す るために,界面要素を設けて図 - 10 に示すCEB モデル<sup>13)</sup>を適用した。

図 - 11 に荷重 - 載荷点変位関係の解析結果 を示す。図中には併せて実験結果も示す。解析 結果と実験結果を比較すると,FM30 は良好に 対応しており,モデル化の妥当性が確認できる。 一方,FM21 の解析結果は実験結果と全く対応 していない。これは,曲げ破壊を示した解析結 果と実験結果に生じた破壊モードの相違が原因 である。今回の FEM 解析のモデル化は比較的 単純なモデル化であるため,FM21 に生じた破 壊挙動を追従できなかった可能性が考えられる。



## 3.3 粒子モデルによるひび割れ解析

3.3.1 材料パラメータの同定

コンクリートの材料パラメータは,図-7 に 示した要素分割図から鉄筋を除去したコンクリ ート供試体の FEM 解析から得られる荷重-変 形応答を目標とし,パラメトリック解析によっ て同定する。なお,引張側の材料パラメータを 同定する場合,FEM 解析ならびに粒子モデルに おいて圧縮側を弾性体と仮定し,圧縮破壊の影 響を除去している。圧縮側の材料パラメータを 同定する場合も同様に引張側を弾性体と仮定す る。同定された材料パラメータを表-2 に示し, 同定値による解析結果を図-12 に示す。

一方,鉄筋の微視材料パラメータは RC 梁の FEM 解析から得られる荷重 - 変位関係を目標 として,パラメトリック解析によって同定する。 この時,既に同定しているコンクリートの材料 パラメータを粒子モデルに入力している。また, 本解析においては,鉄筋の材料パラメータはヤ ング係数と引張強度のみ同定し,限界ひずみは 無限大に設定することによって2直線モデルを 仮定する。表-3 に同定された鉄筋の材料パラ メータを示す。なお,先のFEM 解析では,FM30 のみモデル化の妥当性が確認されたため,鉄筋 の微視材料パラメータは FM30 のケースのみ同 定する。また,FM21 に関しては,FM30 と同種 類の鉄筋を使用していることから,FM30 にお ける同定値をそのまま利用する。

		<i>E<sub>m</sub></i> kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p}$ N/mm $^{2}$	Ef	G <sub>FM</sub> N/mm
FM	引張	0.348	0.011	0.014	0.0015
21	圧縮	0.187	0.139	0.321	0.4462
FM	引張	0.372	0.013	0.012	0.0016
30	圧縮	0.268	0.204	0.246	0.5018

表-2 コンクリートの材料パラメータ

L = 10 mm

表	- 3	鉄筋の材料ノ	(ラ)	ヘータ

	<i>E<sub>m</sub></i> kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\!p} = { m N/mm}^2$	Ef
主筋	140.0	330.0	
あばら筋	140.0	330.0	

3.3.2 粒子モデルによるひび割れ解析結果

図 - 13 に荷重 - 載荷点変位関係の解析結果 を示す。FM30 に関しては,解析結果はFEM 解 析結果ならびに実験結果と良好に対応している。 一方,FM21 に関しては,初期剛性を高めに評 価している点およびポストピーク領域での耐力 低下を模擬できていない点を除けば,概ね実験 値と良好に対応している。図 - 14 に粒子モデル によるひび割れ解析から得られたひび割れ図を 示す。FM30 に関しては曲げ破壊,FM21 に関し ては曲げ降伏と顕著なせん断ひび割れが現れて いるように,解析結果は破壊モードを正確に表 現している。FM21 に関して,FEM 解析では適 切な結果を得る事ができなかったことを考える と,粒子モデルは単純なモデル化で複雑な破壊 現象も追従できるモデルであると評価できる。



図 - 12 コンクリートのパラメトリック解析結果



図 - 14 ひび割れ図

### 3.3.3 解析結果に基づく考察

コンクリート強度が低下することによって, RC梁の曲げ耐力が低下した。通常,RC梁の曲 げ耐力*M*,は次式によって評価される。

$$M_{\rm y} = 0.9 \ a_t \cdot \sigma_{\rm y} \cdot d \tag{4}$$

ここで, *a<sub>t</sub>*: 引張鉄筋断面積, *σ<sub>y</sub>*: 鉄筋の降伏 点,d:有効せいである。今回の実験では,全て の供試体で同種の鉄筋を使用していることから、 曲げ耐力の減少は応力中心間距離(= 0.9d)の 減少によって引きおこされたと考えられる。図 - 15 に解析によって得られたFM21 の中央部断 面におけるひずみ分布の変化を示す。荷重が 10kNおよび 30kNの時は供試体上部に圧縮ひず み、供試体下部に引張ひずみが作用しているが, 50kNの時には梁高さ 60~100mmにかけて引張 ひずみが減少し,一部圧縮ひずみが生じている。 この時,供試体にはせん断ひび割れが発生して おり、このことから考察すると、せん断ひび割 れの発生により供試体中央部に圧縮応力が作用 し,その結果生じた圧縮ひずみの影響によって 梁中央部断面におけるひずみ分布が変化したと 考えられる。つまり、せん断ひび割れの発生に よって生じた圧縮応力によって応力中心間距離 が減少し,その結果としてFM21 において曲げ 耐力が減少したと考えられる。

4. まとめ

粒子モデルを用いて RC 梁のひび割れ解析を 行った。その結果,以下の知見を得た。

- 1) 粒子モデルはRC梁の荷重 載荷点変位関係 および破壊モード,ひび割れ性状を良好に模 擬することができた。
- 2)FEM 解析の精度に依存する面もあるが,FEM 解析を活用することによって,従来同定が困 難であった粒子モデルの材料パラメータを同 定する事が可能となった。
- 3)コンクリート強度の低下による曲げ耐力低下 のメカニズムとして,せん断ひび割れの発生 に伴う応力中心間距離の減少が考えられる。



#### 謝辞

本研究の一部は文科省学術フロンティア推進事業 (日本大学理工学部):研究課題「環境・防災都市に関 する研究(研究代表者:石丸辰治)」の一環として実施 したものであり,一部は科学研究費補助金(基盤研究(C) 代表者:白井伸明)の助成を受けて行われたものである。

## 参考文献

- 1)日本建築防災協会:震災建築物の被災度区分判定基準 および復旧技術指針,2002
- 2)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説,2004
- 3)佐藤裕一,長沼一洋:分散ひび割れ型 FEM によるひ び割れ幅の予測(その1,2),日本建築学会大会学術 講演梗概集,C-2分冊,pp.341-344,2005
- 4)キ路寛,関博:離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食 によるひび割れ幅に関する解析的検討,コンクリー ト工学年次論文集,Vol.21,No.2,pp.1033-1038,1999
- 5)田嶋和樹,白井伸明:2次元粒子モデルを用いたコン クリートの破壊解析に関する基礎的研究,日本建築 学会構造系論文集,No.571,pp.7-14,2003.9
- 6)Jirasek, M. and Bazant, Z.P.: Macroscopic Fracture Characteristics of Random Particle Systems, International Journal of Frcature, Vol.69, pp.201-228, 1994/1995
- 7) Jirasek, M. and Bazant, Z.P., "Particle model for quasibrittle fracture and application to sea ice, "Journal of Engineering Mechanics, 1995.9, pp.1016-1025
- 8)河村準,田嶋和樹,白井伸明:コンクリートのひび割 れ幅の数値解析評価(その1),日本建築学会大会学 術講演梗概集,C-2分冊,pp.353-354,2005
- 9)DIANA Foundation Expertise Center forComputational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 2002
- 10)大岡督尚,橘高義典,渡部憲:コンクリートの破壊 パラメータに及ぼす短繊維混入及び材齢の影響,日 本建築学会構造系論文集,No.529,pp.1-6,2000.3
- 11)Walraven J C. and Keuser W.: The shear retention factor as a compromise between numerical simplicity and realistic material behavior, Darmstadt Concrete. 2, pp.221-234, 1987
- 12)Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
- 13) CEB: CEB-FIP MODEL CODE1990 DESIGN CODE, Thomas Telford Service Ltd.