

論文 ひび割れを考慮した RC はりの数値解析

益田 彰久*¹・松岡 茂*¹・武田 康司*¹・土井 至朗*¹

要旨：モードⅠとモードⅡの混合モードにおけるひび割れであるコンクリートの斜め引張ひび割れの発生・進展を分布ひび割れモデルによって解析する目的で筆者らが提案したひび割れモデルをRC構造物の解析に適用し、妥当性を検討した。コンクリートと鉄筋との付着は鉄筋周囲のコンクリートの破壊に依存し、その特性は実験と近いものであった。また断面高さを変化させたRCはりの曲げ試験を解析した結果、ひび割れパターン・破壊モード・せん断耐力の寸法効果について、実験に対応した妥当な値が得られた。

キーワード：破壊力学、分布ひび割れモデル、RC

1. はじめに

コンクリートの破壊はひび割れの発生・進展に支配されており、そのメカニズムを把握するためにひび割れの力学特性について研究が行われている。

コンクリートのひび割れは開口型のモードⅠ・面内せん断型のモードⅡおよび面外せん断型のモードⅢの3つのモードに分類することができる。コンクリート部材の耐力がせん断破壊で決定される場合、ひび割れは荷重方向に対し斜め方向に発生し、この場合のひび割れはモードⅠとモードⅡの混合状態にあると考えられる。筆者らはこの破壊形態を数値解析でシミュレーションするために、ひび割れ発生位置を予測しておく必要のない分布ひび割れモデルによって行えるようひび割れモデルを提案している¹⁾。

本研究ではそのひび割れモデルをRC構造に適用したときの妥当性を確認するために行った解析について報告する。

2. 解析手法の概要

2.1 引張軟化曲線

コンクリートの引張軟化特性として、Hordijk²⁾は既往の実験結果から式(1)を提案している。

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left\{ 1 + \left[C_1 \frac{w}{w_c} \right]^3 \right\} \exp \left[-C_2 \frac{w}{w_c} \right] - \frac{w}{w_c} \left[1 + C_1^3 \right] \exp(-C_2) \quad (1)$$

ここに、 $C_1=3$ 、 $C_2=6.93$ 、 w ：ひび割れ開口幅、 w_c ：限界開口幅(=160 μ m)、 f_t ：コンクリートの引張強度、 σ_t ： w における引張応力、である。一方、ひび割れ発生直後の接線勾配を有する直線の引張軟化曲線モデルでコンクリートの破壊現象における最大荷重を近似することができるとの報告³⁾がなされている。

そこで本研究では引張軟化曲線として図-1に示すように式(1)のひび割れ発生直後($w=0$)における接線勾配を有する直線とした。

2.2 ひび割れの局所化判定

ひび割れが発生した要素の引張特性が図-2に示す引張軟化曲線上のA点にある場合、次のインクリメントの計算では原点に指向する除荷経路をとるものと仮定して計算を行った。このインクリメント計算結果で引張特性が図-2に示す引張軟化曲線外のB点に位置する場合、この要素の引張特性は除荷経路でなく引張軟化曲線上にあるものとして、もう一度計算をやり直すものとした。このような繰り返し計算を行うことによりひび割れの局所化を評価した⁴⁾。

* 1 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術研究所 研究第1部 土木構造研究室(正会員)

2. 3 セン断剛性保持率

ひび割れ発生要素のせん断剛性をひび割れ発生前のせん断剛性で無次元化したものをせん断剛性保持率とし、式(2)で表されるものとした。

$$\beta = \exp(-\alpha \cdot w) \quad (2)$$

ここに、 β ：せん断剛性保持率、 α ：せん断剛性保持率の低減率、 w ：ひび割れ開口幅、である。せん断剛性保持率の低減率は、図-3に示すようにせん断剛性保持率のひび割れ発生直後の接線勾配と引張強度で無次元化した引張軟化曲線の勾配とが等しくなるように設定した。

その他、圧縮応力-ひずみ関係は二次曲線タイプを使用した。また降伏曲面は Drucker-Prager タイプを用い、圧縮応力-ひずみ関係を単軸試験結果とみなして降伏曲面の定数を定めた。

3. 鉄筋とコンクリートの付着性能

R C 構造物の破壊解析を行うに際し、コンクリートと鉄筋の付着性能に関して検討を行う必要がある。そこで Shima ら⁵⁾によって行なわれているコンクリートに埋め込んだ鉄筋の引張試験を対象に解析を行った。

図-4に試験供試体の概要図を、また表-1に供試体諸元を示す。今回の解析は鉄筋の材質のみを変えた2種類の試験に対して行った。鉄筋は曲げを負担しないトラス要素でモデル化し、解析の目的が斜めひび割れによるR C はりのせん断破壊の追跡であるため、鉄筋は完全弾塑性モデルとした。引張強度は Koenig ら⁶⁾が提案している式(3)により圧縮強度から推定した。

$$f_t = 2.12 \times \ln \left(1 + \frac{f_c}{10} \right) \quad (3)$$

ここに、 f_t ：引張強度(MPa)、 f_c ：圧縮強度(MPa)、である。この引張強度および図-1から引張軟化曲線を式(4)のように決定した。

$$f_t = -133w + 2.66 \quad (4)$$

ここに、 w ：ひび割れ開口幅(mm)である。またせん断剛性保持率を引張軟化曲線から式(5)に示すものとした。

$$\beta = \exp(-50w) \quad (5)$$

図-5に試験結果および解析結果から得られた荷重-変位曲線を示す。荷重は鉄筋に対する引張力、変位は鉄筋の変位を供試体長で除した平均ひずみとした。実験結果によると、平均ひずみ 0.1%程度までの範囲でコンクリートに破壊が発生し、その結果鉄筋との付着が弱くなっている様子がうかがえる。また 0.2%以降は付着が完全に切れ、鉄筋のみにより荷重が保持さ

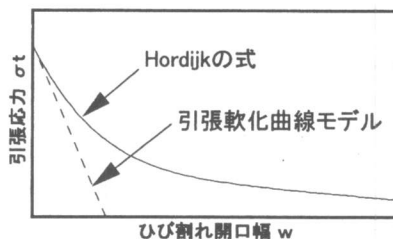


図-1 引張軟化曲線モデル

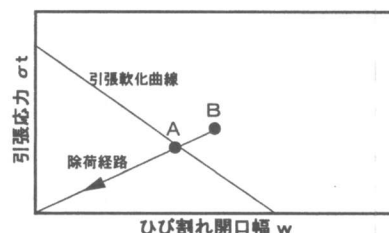


図-2 ひび割れの局所化判定

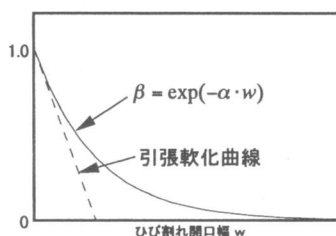


図-3 セン断剛性保持率の定義

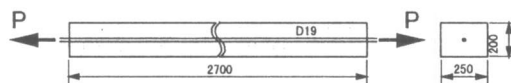


図-4 鉄筋引き抜き試験概要

表-1 供試体材料物性値

パターン	コンクリート圧縮強度 (MPa)	引張鉄筋率 (%)	鉄筋降伏強度 (MPa)	鉄筋弾性係数 (GPa)
A	25	0.6	610	190
B			350	

れている。そのため最大荷重は鉄筋の材質に依存すると考えられ、鉄筋が降伏すると荷重の増加は極端に緩やかになっている。

解析結果については、2つのパターンとも荷重が0.1MN付近で多少変動しながら平均ひずみのみが増加している領域が見られる。この領域は鉄筋と直交方向に生じるコンクリートのひび割れが供試体両端から中央に向かってある間隔で次々と発生している部分であり、最終的には図-6に示すように供試体全体にほぼ均等な間隔でひび割れが分布し、その後荷重の変動がなくなる。よってこの領域はコンクリートの性質に依存しているものと考えられ、このような荷重の変動は実験によって観測されたものとほぼ一致している。その後、鉄筋の剛性によって荷重は上昇し、最終的には鉄筋が降伏に至り荷重の増加が完全に失われている。解析では鉄筋の応力-ひずみ関係を完全弾塑性としているためこのような挙動となったが、実験と同様な結果が得られているものと判断される。

図-7に降伏直後における鉄筋応力の分布状況を示す。実験結果によると降伏応力を挟んで鉄筋応力が波打つように分布している。つまり複数箇所鉄筋の応力が降伏まで達しており、鉄筋とコンクリートとの付着が切れ鉄筋全長にわたり降伏に近づいていることがわかる。解析では応力分布の波が実験結果より細かくおよそ供試体断面高さの1/2の間隔になっている。この現象は鉄筋の降伏後の特性に関係しているものと思われる、今後の検討課題である。大部分の応力値は降伏以下であるがそのうちの一部が降伏応力に達しており、その箇所の影響で荷重の増加がなくなっているものと考えられる。この様子は図-6に示すコンクリートのひび割れ発生状況に対応しており、RCはりの曲げひび割れがある間隔で発生する状況と符合していると考えられる。

以上のように提案しているひび割れモデルにより、鉄筋とコンクリートとの付着性能に類似した結果が得られたと判断される。

4. RC構造物への適用

4.1 せん断強度の寸法効果

井畔ら⁷⁾はせん断補強鉄筋が無い有効断面高さ10cmから300cmまでのRCはり供試体を使用して曲げ試験を行っており、せん断強度の寸法効果についての研究報告をしている。試験の概要を図-8に、断面寸法等の諸元を表-2に示す。この実験を本研究で提案している解析モデルにより解析を行った。コンクリート強度は表に示すように各供試体により多少異なっていることから、解析では配合強度である23.5MPaを使用した。またせん断剛性保持率は式(5)に示すものを使用した。

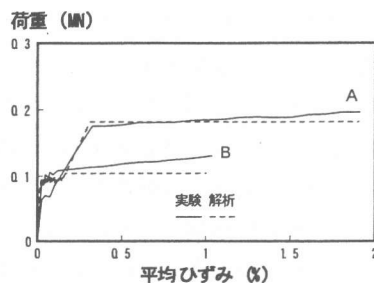


図-5 荷重-ひずみ曲線

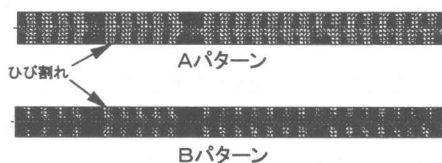


図-6 ひび割れ発生状況 (解析)

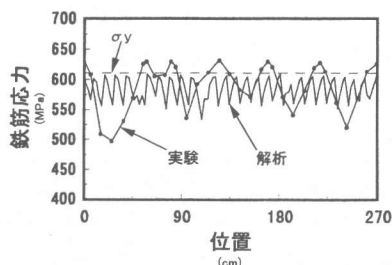


図-7 鉄筋の応力分布状況 (Aパターン)

井畔らによると、有効断面高 20cm 以下の供試体では主鉄筋が降伏し曲げ破壊により耐力が決定され、断面高 60cm 以上の供試体は斜めひび割れの発生・進展により耐力が決定されるせん断破壊を示したと報告されている。図-9 に有効断面高 20cm と 60cm の場合のひび割れ発生パターンを示す。実験結果からは 20cm の有効断面高のものについては斜めひび割れは観察されていない。これに対して有効断面高 60cm では斜めひび割れの発生が確認されており、ひび割れ発生状況からもせん断破壊であることが推察される。

解析によるひび割れ発生パターンについては、有効断面高 20cm では斜めひび割れの発生は得られていない。これに対し有効断面高 60cm では斜めひび割れの発生が認められる。また、解析では斜めひび割れが圧縮縁まで貫通した段階で計算を継続することができなくなっており、つまり解析においても有効断面高 60cm 以上では斜めひび割れの発生・進展により耐力が決定されており、せん断破壊であると判定された。

図-10 に有効断面高 20cm と 60cm の場合についての主鉄筋ひずみと荷重との関係を示す。有効断面高 20cm の場合は、解析では主鉄筋ひずみが完全に降伏 (1800μ) まで達している。また実験結果についても主鉄筋ひずみが降伏値を越えたところで計測ができなくなっており、これらのことより両者とも曲げ破壊により耐力が決定されていると考えられる。

一方、有効断面高 60cm の場合は、終局における主鉄筋ひずみは解析・実験とも降伏値以下であり、このことからせん断破壊により耐力が決定されていることが確認される。

図-11 にコンクリートのせん断強度と有効断面高との関係を示す。図中の実線は、井畔らが実験結果に基づいて提案したコンクリートのせん断強度の寸法効果である。解析結果は実験結果によるせん断強度の寸法効果にほぼ一致している。

よって提案モデルにより RC はりのせん断強度寸法効果を解析できることが確認された。

4.2 ディープビームの解析

Walraven ら⁸⁾は、ディープビームのせん断強度に対する寸法効果を検討する目的で曲げ試験を行っている。そこで Walraven らの実験を解析

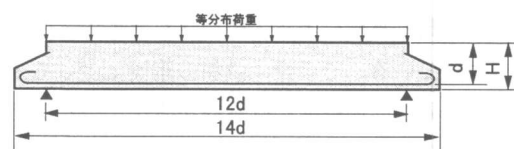


図-8 はり曲げ試験概要

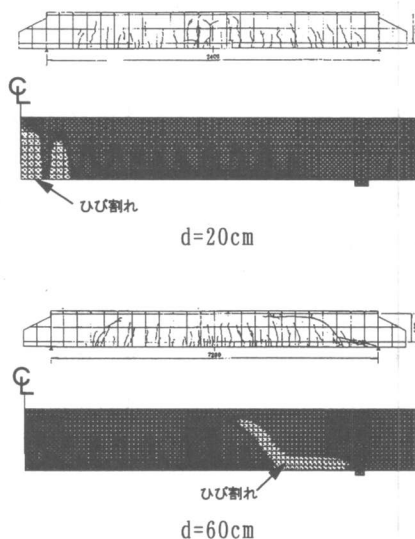


図-9 ひび割れ発生状況 (実験・解析)

表-2 供試体寸法・材料物性値

試験体寸法						コンクリート			鉄筋		
有効高さ d(cm)	載荷スパン 12d(cm)	載荷スパン比	全長 14d(cm)	全高 H(cm)	全幅 b(cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	径・本数	軸方向鉄筋比	降伏強度 (MPa)
10	120	12	140	12	15.8	10	20.6	1.85	D6×2	0.4	440
20	240		280	22	15.8		19.7	1.87	D6×4		
60	720		840	65.5	30		21.1	1.81	D6×24		
100	1200		1400	120	50		27.2	2.05	D10×28		
100	1200		1400	120	50	21.9	2.23	D10×28	370		
200	2400		2800	210	100	25	28.5	2.73		D16×40	
300	3600		4200	314	150	24.3	2.19	D25×36		360	

し、せん断強度に対する寸法効果を検討した。
試験概要図を図-12に、解析対象とした試験条件を表-3に示す。実験では圧縮強度にばらつきが見られるが、解析では平均値の19.3MPaを使用した。引張強度は式(3)により圧縮強度から推定し、せん断剛性保持率は式(5)を使用した。

ディープビームでは圧縮側にアーチストラットが形成されるため、コンクリートの圧縮破壊特性の影響を受ける。本研究ではコンクリートの圧縮破壊特性については検討していないため、圧縮破壊特性の影響を受ける部材への適用性については検討する必要がある。しかしこのWalravenらの実験は3点曲げ試験であり、アーチストラットが形成され難いと考えられ、よってコンクリートの圧縮破壊特性の影響は少ないものと考えた。

図-13に供試体高さ100cmの場合の実験および解析により得られたひび割れ発生パターンを示す。実験結果では曲げひび割れが発生した後に斜めひび割れが発生しており、試験終了時点では図に示すように斜めひび割れと載荷板直下のひび割れが貫通している。解析結果では主筋に沿ったひび割れが支承点側の部材端まで達し、その後斜めひび割れが曲げひび割れに達したことにより計算を継続することができなくなっている。

図-14にせん断強度と断面高との関係を整理した結果を示す。この図から解析結果による寸法効果は、Walravenらの実験とほぼ一致していることが確認される。

5. まとめ

本研究では、任意の位置にひび割れ発生の可能性を有する分布ひび割れモデルによってモードIとモードIIの混合モード下におけるひび割れを解析することを目的に提案したひび割れモデルについて、RC構造に対する適用性を確認するため解析を行った。

まず提案した解析モデルに曲げ剛性を有しな

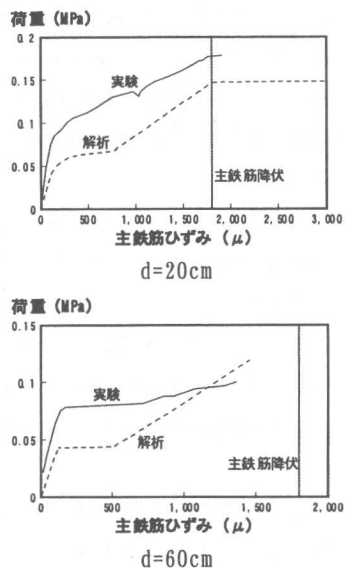


図-10 荷重-主鉄筋ひずみ曲線

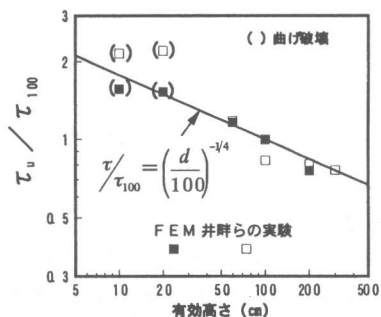


図-11 せん断強度の寸法効果

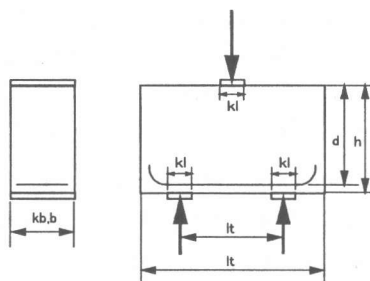


図-12 ディープビーム曲げ試験概要

表-3 供試体寸法・材料物性値

h mm	d mm	l mm	b mm	lt mm	kl mm	As mm ²	fc MPa
200	160	680	250	320	50	606	18.1
600	560	1380	250	1120	150	1570	19.8
1000	930	2250	250	1860	250	2510	20.0

いトラス要素によってモデル化した鉄筋を組み込むことにより、RC構造物の破壊挙動を表現できることを確認した。この場合、鉄筋とコンクリートとの付着力の減少は鉄筋周辺のコンクリートの破壊で表され、特別なモデルを用意する必要はなかった。

またRC部材を用いた実験を提案しているモデルにて解析し結果を比較した結果、ひび割れパターンや最大耐力などについて妥当な値を得ることができた。さらに曲げ破壊・せん断破壊の破壊モードの判定、せん断耐力の寸法効果についても実験と同等の結果が得られていることを確認した。

このように斜めひび割れの進展によって終局耐力が決定されるせん断破壊モードを持つ構造物に対する解析について、提案したひび割れモデルの有用性が確認された。

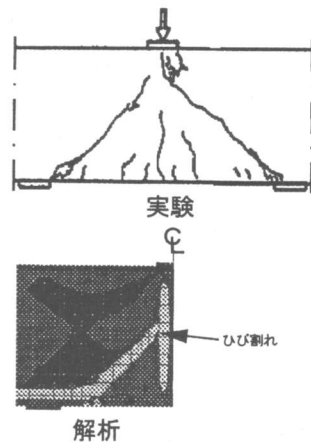


図-1 3 ひび割れ発生状況 (h=1000mm)

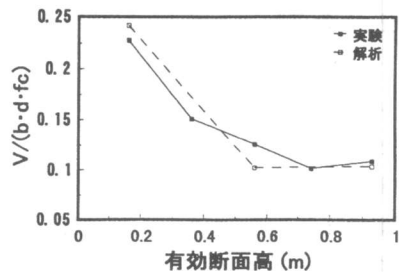


図-1 4 せん断強度の寸法効果

参考文献

- 1) 松岡 茂, 益田 彰久, 武田 康司, 土井 至朗: ひび割れ発生・進展に支配されたコンクリート構造物の解析モデル, 土木学会論文集, 投稿中
- 2) Hordijk, P.A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 3) 堀井 秀之: フラクチャープロセスゾーン問題とコンクリート・岩石・セラミックスに対する破壊力学の体系化, 構造工学論文集, Vol. 35A, 1989.
- 4) 渡辺 忠朋・松岡 茂・武田 康志: 破壊力学に基づくRC部材のせん断耐力の研究, 土木学会論文集, V, 1998.5. 掲載決定済み
- 5) Shima, H., Chou, L. and Okamura, H.: Micro and Macro Models for Bond in Reinforced

Concrete, Journal of The Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.XXXIX, No.2, pp133-194, 1987.

- 6) Koenig, G., Grimm, R. and Remmel, G.: Shear Behavior of Longitudinally Reinforced Concrete Members of HSC, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, pp.63-74, 1993.
- 7) 井畔 瑞人, 塩屋 俊幸, 野尻 陽一, 秋山 暉: 等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 348/V-1 (報告), pp. 175-184, 1984.
- 8) Walraven, J., C.: Size Effects: Their Nature and Their Recognition in Building Codes, Size Effect in Concrete Structures. Edited by H.Mihashi, H.Okamura and Z.P.Bazant., pp375-394, 1994.