

論文 ひび割れ注入補修されたコンクリートはりの曲げ破壊解析

国枝 稔^{*1}, John Bolander^{*2}, 鎌田敏郎^{*3}, 六郷恵哲^{*4}

要旨：本研究では、①ひび割れ注入補修された部材中を進展するひび割れ進展メカニズムの解明、②注入補修を数値解析的に再現する手法の提案を目的とし、ひび割れ注入補修された部材の曲げ破壊挙動の数値解析を Rigid-Body-Spring Network を用いて行なった。粗骨材をモデル化したインクルージョンの配置ならびに注入されたひび割れの配置などに依存したひび割れ性状が確認され、荷重-変形関係への影響についても把握した。

キーワード：注入補修、曲げひび割れ、付着、RBSN、破壊力学

1. はじめに

コンクリート構造物中に発生したひび割れを補修する方法の1つにひび割れ注入補修がある。従来からひび割れ注入材の付着性能は、重要な性能の1つとされており、曲げ載荷試験により得られる曲げ強度や曲げ破壊挙動をもとにその性能評価が行なわれている^{1),2)}。そこでは、一度破断させたはりを使用して作製したひび割れ注入補修供試体の曲げ（付着）強度ならびに破壊エネルギーが、補修前のプレーンコンクリートはりの曲げ強度ならびに破壊エネルギーに比べて大きくなること示しており、補修することにより曲げ強度ならびに破壊エネルギーが増加する理由の1つに、ひび割れ性状の違いが影響しているとの考察を行なっている。筆者ら³⁾は、供試体寸法の異なるひび割れ注入供試体を用いて曲げ載荷試験を行い、補修された供試体の曲げ強度の寸法効果が、プレーンコンクリートの曲げ強度の寸法効果に比べて大きいことを明らかにし、粗骨材寸法に依存したひび割れ性状の違いが影響しているとの考察を行なっている。

一方、ひび割れ注入により補修されたコンク

リートを対象とした数値解析の例は少なく、補修を対象とした数値解析手法を確立することは、補修材料や工法の選択の際にも有用である。Rigid-Body-Spring Network (RBSN)⁴⁾は、川井⁵⁾により開発された Rigid-Body-Spring-Model (RBSM: 剛体-ばねモデル)を改良した数値解析モデルであり、ひび割れの進展に伴って生じるコンクリートの破壊の解析への適用性が確認されている。

本研究では、ひび割れ注入補修を対象とした数値解析手法の開発ならびに補修供試体内におけるひび割れ発生メカニズムの解明を目的とし、RBSN による基礎的な検討を行なった。

2. 実験概要および実験結果³⁾

本研究では、既往の研究にて行なわれた実験の結果³⁾を対象とし、以下その実験概要を示す。はり高さ 100mm のコンクリート供試体を対象とし、エポキシ樹脂注入による補修部材の曲げ試験を行なった。表-1 に示す配合のコンクリートを用いて供試体を作製した。なお、粗骨材の最大寸法は 15mm とした。載荷試験直前には

*1 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*2 University of California at Davis, Associate Professor, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Ph. D.

*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

り高さの1/3の切欠きを設け、材齢35日にて3等分点曲げ載荷試験(図-1参照)を行なうとともに、荷重-CMOD曲線の計測を行なった。計4体の供試体(以後、初期載荷供試体とよぶ)から得られた荷重-CMOD曲線の平均を図-2に示す。また、この荷重-CMOD関係を用いて、多直線近似解析手法⁶⁾(逆解析)により推定した引張軟化曲線を図-3に示す。続いて、破断後の供試体を再びつき合せてシールをした後、乾燥した注入面(ひび割れ面)にエポキシ樹脂(表-2参照)を自然流下させて注入した。なお、補修後のすべての供試体(以後、補修供試体とよぶ)に関して、平均注入幅は約3mmの一定とした。エポキシ樹脂の材齢7日において、コンクリート供試体の場合と同様の手順で載荷試験を行い、荷重-CMOD曲線の計測を行なった。図-2に計4体の補修供試体を用いて載荷試験を行なった場合の荷重-CMOD曲線の平均を示す。コンクリート供試体ならびに補修供試体の曲げ強度はそれぞれ3.03MPa(標準偏差:0.17)、3.84MPa(標準偏差:0.30)となり、補修することにより曲げ強度が増加する結果となった。さらに、図-2に示されるように、破壊に要したエネルギーも補修供試体の方が大きいことが確認された。この理由としては、コンクリートの引張強度に比べてエポキシ樹脂のそれが大きく、さらにはエポキシ樹脂とコンクリートの良好な付着により、補修供試体内には初期載荷時のひび割れを迂回するひび割れが発生し、相対的に曲げ強度と消散エネルギーが大きくなったものと考えられる^{2),3),4)}。特に、エポキシ樹脂と粗骨材との良好な付着により、ひび割れの進展が阻止され、粗骨材の外側を迂回している様子が実験的にも確認された(図-4参照)。

3. 解析概要

3.1 RBSNの概要

RBSNでは、ランダムに配置された母点を基にヴォロノイ分割⁷⁾を行い、図-5に示すような解析モデルの離散化を行なった。図-6に要

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G ^{*1}	Ad ^{*2}
55.6	161	290	836	1001	0.725

*1: 骨材の最大寸法 15mm

*2: AE 減水剤

表-2 使用したエポキシ樹脂の物性

弾性係数(GPa)	2.5
接着強さ(MPa)(JIS A 6024)	7.5
曲げ強さ(MPa)	74.4
粘度(mPa·s)(JIS K 6833)	600

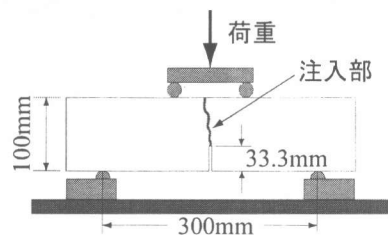


図-1 3等分点曲げ載荷試験

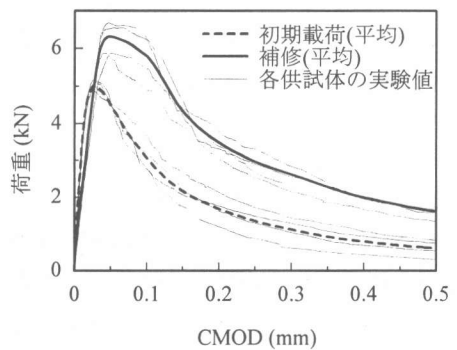


図-2 荷重-CMOD関係

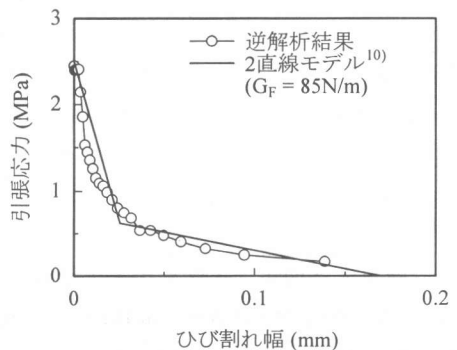


図-3 逆解析による引張軟化曲線

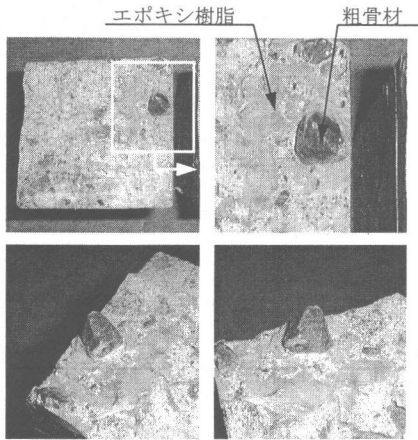


図-4 粗骨材周りのモルタルを取り除いてエポキシ樹脂を露出させた状況

素剛性マトリックスを構成する1組(2個)のヴォロノイセルの例を示す。ここで示されるヴォロノイセルを剛体と仮定し、各セルの母点に並進変位2, 回転1の3自由度を設定した。各セルの境界边上には、境界と垂直, 平行ならびに回転方向に3種類のばね(垂線ばね, 平行ばね, 回転ばね)を配置し、このばねに蓄えられたエネルギーをもとに破壊や軟化特性(図-3参照)の評価を行なった。なお、ヴォロノイセルの寸法ならびに形状がひび割れ性状に与える影響を取除くため、図-7に示すような $h \cos \theta$ を基準としたクラックバンド⁸⁾を用いて評価を行なった。このクラックバンドは、各計算ステップでの応力解析において求められる垂線ばねおよび平行ばねの合力と境界辺とのなす角 θ に基づき算定されるものである⁹⁾。なお、 F_r の作用する方向の応力を σ 、供試体厚を t とすると、

$$\sigma = F_r / l \cos \theta \cdot t \quad (1)$$

となり、この応力 σ がコンクリートの引張強度 f_t を越えた時点でひび割れが発生するものとした。ひび割れ発生後には引張軟化曲線(ひび割れ部における伝達応力とひび割れ幅との関係)に基づく引張応力を伝達させた(図-7参照)。

3.2 コンクリート供試体のモデル化

図-5に示すように、計算時間の短縮を目的

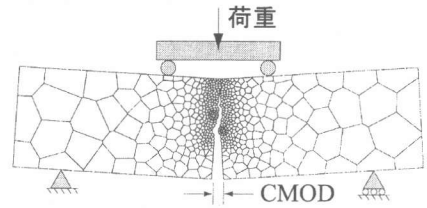


図-5 分散化された供試体(L=5, 载荷中)

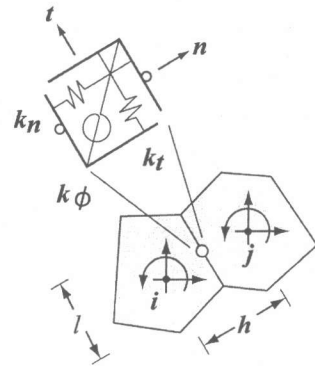


図-6 ヴォロノイセルの例

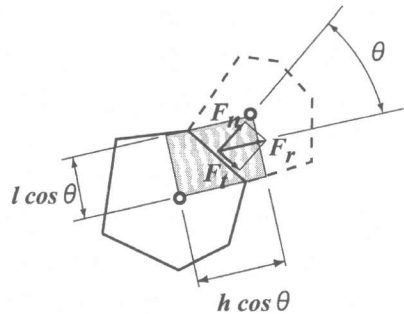


図-7 クラックバンドモデル

とし、ヴォロノイセルの大きさ(母点の配置密度)を変化させ、特にひび割れの進展が予想されるリガメント付近のみ小さくすることとした。ここでは、コンクリートを均質材料としてモデル化するため、実験値(引張強度: $f_t=2.5\text{MPa}$, ヤング係数: $E=25.8\text{GPa}$, 破壊エネルギー: $G_f=85\text{N/m}$)をコンクリート材料の特性値として使用することとし、軟化特性には1/4モデル¹⁰⁾(図-3参照)を使用した。ひび割れの進展に影響を及ぼす粗骨材の影響を確認するために、切欠きの上部には直径10mmの2個のインクル

ージョン（骨材モデル）を配置した（図-8 参照）。なお、これらのインクルージョンも複数のヴォロノイセルにより構成されており、ヤング係数ならびに骨材モデルとコンクリートとの界面の強度はすべてコンクリートと同値とした。ただし、骨材モデルの強度のみコンクリートよりも高強度とし、骨材モデルを貫通するひび割れは発生しないと仮定することで、ひび割れの進展を阻止する粗骨材をモデル化した。なお実験において、エポキシ樹脂とコンクリートとの剥離が観察されなかったため、解析中においても剥離はモデル化せず、2個の骨材モデル間の水平距離 L の変化が、補修供試体内におけるひび割れ性状に及ぼす影響について確認することとした。

3.3 注入補修のモデル化

本解析では、初期載荷時において最大荷重到達後の軟化領域において、最大荷重の約10%まで低下した時点におけるひび割れのうち、ひび割れ幅が0.05mm以上のひび割れ（主ひび割れと呼ぶ）に対して注入補修を行なうこととした。補修の対象となったひび割れに相当するばね（垂線ばね、平行ばね、回転ばね）の剛性をエポキシ樹脂の剛性に置換することで、注入補修のモデル化を行なった。エポキシ樹脂のヤング係数は $E=2.0\text{GPa}$ とし、解析上破断しないと仮定した。なお、供試体中央部におけるヴォロノイセルの母点間の平均距離（ばねの長さに対応する） h は3mmとし、エポキシ樹脂の注入幅と等しくした。そのため、エポキシ樹脂の注入によって再現される剛性の低下は実験とほぼ同程度であると考えられる。なお補修の対象とならなかった微細なひび割れに関しては、簡単のため健全部のコンクリートとして扱うこととした。

4. 解析結果

4.1 荷重-CMOD 曲線

実験で得られた結果（図-2の平均値）ならびに骨材モデル間距離 L を変化させた場合の荷

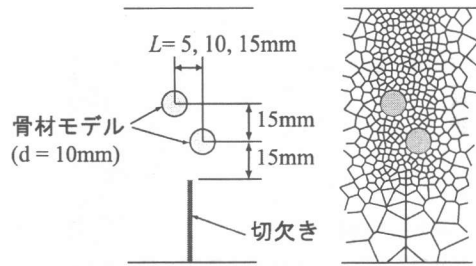


図-8 骨材モデルの配置

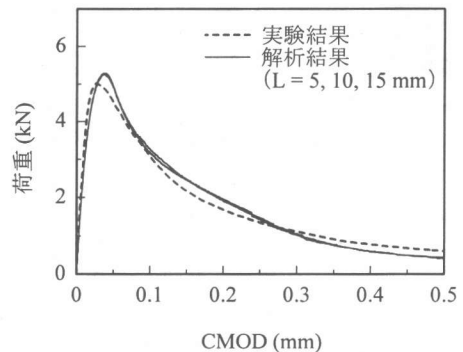


図-9 初期載荷供試体の荷重-CMOD 曲線

重-CMOD 曲線の解析結果を図-9に示す。本モデルを用いて得られた初期載荷供試体の荷重-CMOD 曲線は、実験結果とよく対応し、特に初期載荷供試体の解析結果においては、骨材モデル間距離 L の違いによらず、ほぼ同一の荷重-CMOD 曲線が得られた。骨材モデル間距離 L を変化させた場合における、補修供試体の荷重-CMOD 曲線の解析結果を初期載荷供試体のそれとともに図-10に示す。

補修供試体の初期剛性に関しては、エポキシ樹脂の存在により初期載荷供試体のそれに比べて小さくなっている。最大荷重も初期載荷に比べて若干ではあるが大きくなり、最大荷重以降の靱性については、特に骨材モデル間距離 $L=10\text{mm}$ の場合に特に増大する結果となった。実験においては、注入補修後に約20%の耐力の増加が認められたが、解析の結果は定量的に一致していない。2次元での解析における骨材モデルは供試体厚さ方向にも一様に存在するため、3次的に配置する骨材の場合に比べて、最大

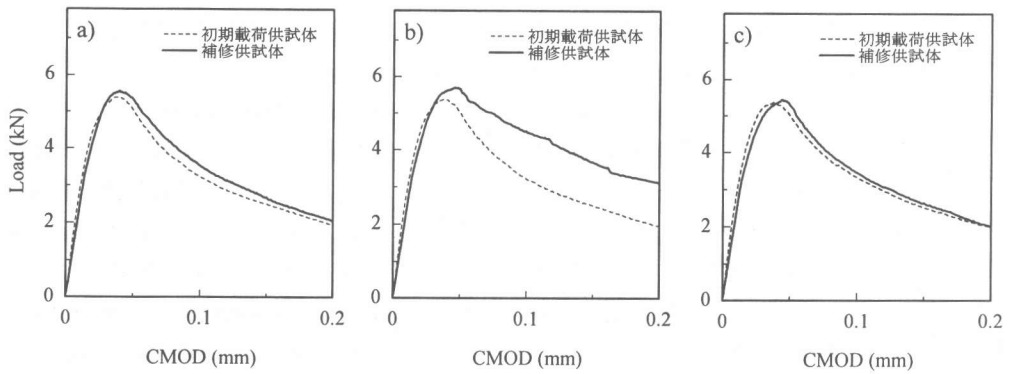


図-10 解析における荷重-CMOD曲線: a) $L=5\text{mm}$, b) $L=10\text{mm}$, c) $L=15\text{mm}$

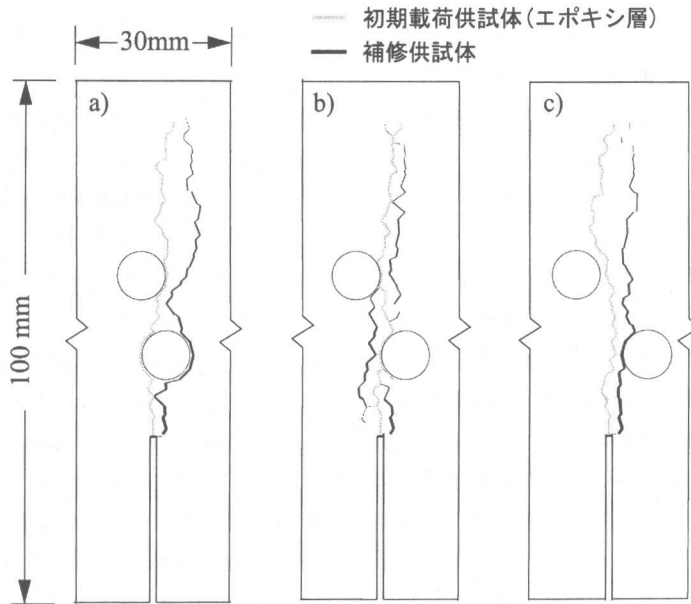


図-11 ひび割れ性状: a) $L=5\text{mm}$, b) $L=10\text{mm}$, c) $L=15\text{mm}$

耐力ならびに靱性が小さくなることが確認されている¹¹⁾。骨材の分布に依存したひび割れ進展に着目した今回の解析においても、この影響が顕在化しているものと考えられる。

4.2 ひび割れ性状

図-11 に初期載荷供試体ならびに補修供試体の解析における主ひび割れ (0.05mm 以上) を示す。グレーが初期載荷供試体の主ひび割れ (エポキシ樹脂注入)、黒が補修供試体における主ひび割れを示す。初期載荷供試体においては、すべての骨材モデル間距離 L に関して、2 個の

骨材モデル間をひび割れが進展しており、特に L が小さい場合には、2 個の骨材モデルを連結するひび割れが進展するという特徴を有していた。さらに、骨材モデル間距離 L の違い (初期載荷供試体のひび割れ性状) に対応した 3 種類の補修供試体のひび割れ性状が確認された。 $L=5\text{mm}$ の場合、補修供試体におけるひび割れは 2 個の骨材モデルの外側を迂回するように進展した。このことは、最大荷重が初期載荷供試体のそれと比べてやや大きくなった理由の 1 つと考えられる。 $L=10\text{mm}$ の場合、2 個の骨材モデル付近まで一旦ひび割れが進展したが、2 個の

骨材モデルを連結するエポキシ樹脂層によりひび割れの進展が阻止され、さらにエポキシ樹脂層の反対側にひび割れが生じるという結果となった。この間にも、エポキシ樹脂は引張力に抵抗しており、荷重-CMOD 曲線にみられる靱性の向上につながったものと考えられる。本解析では、エポキシ樹脂層は破断しないと仮定したが、今後はエポキシ樹脂の破壊に関する特性値（引張強度など）を適切に把握し、解析に組み込むことも重要となる。 $L=15\text{mm}$ の場合、初期載荷供試体ならびに補修供試体のひび割れは、それぞれ 2 個の骨材モデルの間を進展しているが、それぞれは互いに干渉することなく進展しており、荷重-CMOD 曲線においてもほとんど変化が見られなかった。

5. まとめ

ひび割れ注入によるプレーンコンクリートはりの補修を解析により再現する手法を提案し、特に切欠き先端に配置された 2 個の骨材モデルの相互距離に着目した解析により、補修供試体内におけるひび割れ進展のメカニズムの一部が確認された。また、このようなひび割れ進展に関する定量的な解析のための 3 次元モデルの開発が望まれる。

また、ひび割れ注入材の特性に関して、従来母材コンクリートとの付着といった指標が重要視されているが、十分な付着を有している注入材を使用した場合における評価も重要であると考えられる。

参考文献

- 1) Kleinschrodt, H. D. : Evaluation of Force-locking Epoxy Resin Injections in Concrete Cracks by Means of Fracture Mechanics Parameters, *Fracture of Concrete and Rock Recent Developments*, ed. by Shah, S. P., Swartz, S. E. and Barr, B., ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp.537-548, 1989
- 2) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春 : コンクリート切り欠き試験体の曲げ試験によるひび割れ補修材料の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 432 号, pp.1-9, 1992
- 3) 国枝稔, 川瀬貴行, 鎌田敏郎, 六郷恵哲 : ひび割れ注入材の曲げ付着特性の評価に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.203-213, 2001
- 4) Bolander, J. and Saito, S. : Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, No.5-6, pp.569-591, 1998
- 5) 川井忠彦, 竹内則雄 : 離散化極限解析プログラミング-コンピュータによる極限解析法シリーズ 2, 培風館, 1990
- 6) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市, 六郷恵哲 : 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996
- 7) Okabe, A., Boots, B. and Sugihara, K. : Spatial Tessellations - Concepts and Applications of Voronoi Diagrams, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1992
- 8) Bazant, Z. P. and Oh, B. H. : Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Material and Structures*, RILEM, Vol. 16, pp.155-177, 1983.
- 9) Thomure, J., Yip, M. and Bolander, J. : Fracture Energy Consumption in Random Spring Networks, EM2000, *Engrg. Mechanics Division Conference*, ASCE, 2000
- 10) 六郷恵哲, 岩佐正徳, 鈴木泰生, 小柳洽 : 各種コンクリートの破壊力学パラメータ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11-1, pp.247-252, 1989
- 11) Lee, K. M., Buyukozturk, O. and Kitsutaka, Y. : The Role of Interface Fracture Toughness in Cracking Behavior of High-Strength Concrete, *Interface Fracture and Bond (SP-156)*, ed. Buyukozturk, O. and Wecharatana, M., ACI, pp.69-84, 1995