

論文 コンクリートのひび割れ幅の計測と予測

田嶋 和樹^{*1}・白井 伸明^{*2}・渡部 憲^{*3}

要旨：コンクリートに生じるひび割れの定量的評価を目的として、ひび割れ幅の計測方法を開発するとともに、ひび割れ解析によるひび割れ幅の予測を試みた。ひび割れ幅は、コンクリートの破壊エネルギー試験を実施し、スキャナを利用して取得したひび割れ画像に基づいて測定した。一方、ひび割れ幅の予測に際しては、コンクリートをメゾスケールでモデル化する2次元粒子モデルを用いてひび割れ解析を行った。その結果、概ね1/10 mm精度でひび割れ幅を評価できることを確認した。

キーワード：ひび割れ幅、ひび割れ解析、粒子モデル、イメージスキャナ、メゾスケール

1. はじめに

コンクリートに生じるひび割れは、鉄筋コンクリート(以下,RC)構造物の耐久性を著しく低下させる。これは、劣化の原因となる物質がひび割れを通じてコンクリート内部に侵入するためである。RC構造物の耐久性に及ぼすひび割れの影響を評価するためには、ひび割れの定量的評価が必要不可欠であると考えられる。

表-1はコンクリート工学年次論文集検索システムを利用してひび割れの物理量と論文数の関係を調査したものである。多くの研究者が、コンクリートのひび割れ幅はRC構造物の耐久性や耐震性能を評価する上で重要であると考えている。

本研究の目的は、コンクリートのひび割れ幅を高精度で計測する手法を開発し、同時にこれらのひび割れ幅を予測可能なひび割れ解析手法を開発することである。ひび割れ幅の計測方法としては、近年、「デジタルカメラ」を用いてひび割れ画像を取得し、ひび割れ幅を評価する方法が提案されている¹⁾。しかし、市販のデジタルカメラを用いた場合、撮影距離や角度などの影響により、ひび割れ幅の測定精度は不十分であると思われる。そこで本研究では、「イメージスキャナ」を用いて取得したひび割れ画像に基

づいてひび割れ幅を評価する。この手法はデジタルカメラに比べて測定範囲は狭いが、市販のスキャナを使用したとしても高精度の測定が可能である。

一方、コンクリートのひび割れ挙動をシミュレーションするメゾスケールの解析モデルとしては、格子モデル²⁾、粒子モデル^{3),4)}、剛体バネモデル⁵⁾等が開発されている。本研究では、筆者らが開発を進めている粒子モデルを適用する。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。本研究の粒子モデルは、コンクリートをモルタル相、骨材相および界面相の3相から成る複合材料としてモデル化する。コンクリートのひび割れ解析に関する既往の研究の多くは、破壊挙動の再現や破壊メカニズムの解明に重点を置いている。そのため、ひび割れ幅に着目した研究例は少なく、部分的に計測されたひび割れ幅との対応について述べるにとどまっている。

以上の点を踏まえ、本研究では、コンクリートの破壊エネルギー試験を実施し、イメージスキャナを用いてひび割れ幅を計測する。さらに、粒子モデルを用いてひび割れ幅の定量的評価を試み、ひび割れ幅の予測という観点から現状の粒子モデルの有効性と問題点について考察する。

*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 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 東海大学 工学部建築学科講師 博士(工学) (正会員)

表 - 1 ひび割れの物理量に関する調査結果

検索語	論文数	キーワード
ひび割れ	620	
ひび割れ幅	103	鉄筋腐食, 耐震性能 etc
ひび割れ間隔	10	ひび割れ幅の影響因子
ひび割れ深さ	9	非破壊検査 (超音波法)
ひび割れ長さ	1	鉄筋腐食
ひび割れ密度	1	温度ひび割れ制御

表 - 2 コンクリートの計画調合

	W/C (%)	単体量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
コンクリート	50	202	403	725	1008
モルタル		326	653	1175	0

W : 水, C : セメント, S : 細骨材, G : 粗骨材

2. コンクリートの破壊エネルギー試験

本研究では、コンクリートのひび割れ幅を計測するために破壊エネルギー試験⁶⁾を実施した。供試体梁寸法は 100×100×400 mm である。本試験では、ひび割れ幅の測定手法の検証に重点を置いているため、コンクリート供試体ならびにモルタル供試体を各 2 体のみ製作した。また、筆者らは既往の研究において材齢、水セメント比および粗骨材の有無をパラメータとしたコンクリートの破壊エネルギー試験を実施しており、多数の供試体の破壊性状を詳細に観察している⁷⁾。コンクリートの調合は表 - 2 に示すとおりである。供試体は、打設後 1 日で脱型し、試験材齢 7 日まで標準水中養生した。試験直前には、刃厚 2 mm のダイヤモンド・カッターを用い、供試体中央に深さ 50 mm の切欠きを設けた。

図 - 1 に供試体セットアップ状況を示す。载荷には、安定して軟化応答を制御できるインストロン型精密万能試験機 (容量 100 kN) を用いた。荷重 (P) は試験機に固定されたロードセルを用いて検力し、開口変位 (CMOD) はクリップゲージ (精度 1/1000 mm) により計測した。

3. ひび割れ幅の計測

本試験では CMOD 値が目標値に達した後、载荷を一時停止し、スキャナによるひび割れ画像の取得を開始した。図 - 2 に計測された P - CMOD 関係を示す。なお、図中の丸印はひび割れ画像を取得した地点を示している。また、モルタル供試体については、計測不備のため 1 体のみ結果を示す。

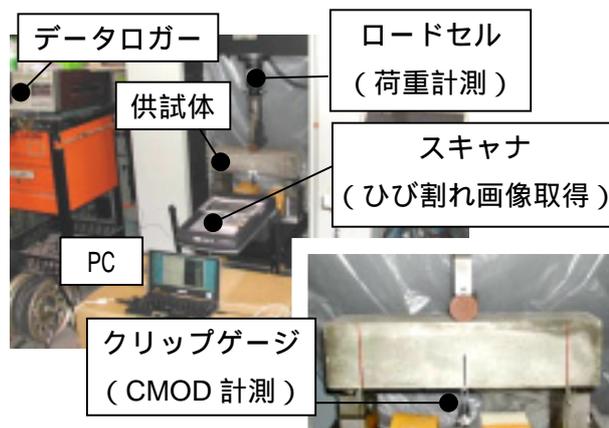


図 - 1 供試体セットアップ状況

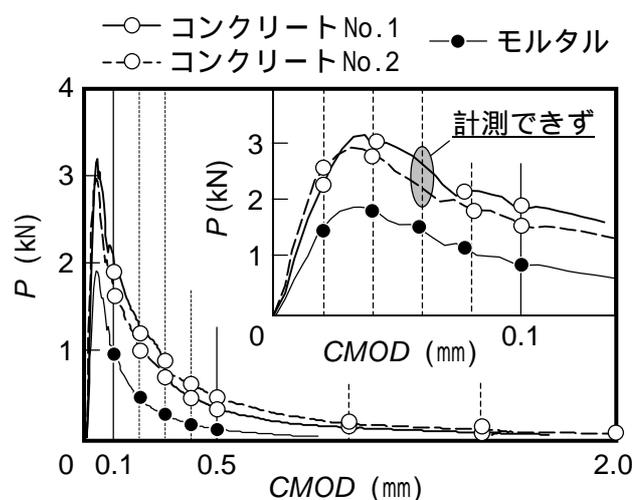


図 - 2 P - CMOD 関係

スキャナを用いてひび割れ画像を取得する場合、読取り解像度の設定が重要である。解像度とは、画像データの単位長さあたりの画素数を示す値であり、その単位は dpi (dot per inch) である。詳細なひび割れ画像を取得するためには、読取り解像度を高く設定する必要がある。本研究では読取り解像度として 2400 dpi を設定した。解像度が 2400 dpi の場合、画素の寸法はおよそ 0.01 mm となる (図 - 3)。これは、鉄筋腐食の観点から各国の指針で定められている許容ひび

割れ幅 0.1 ~ 0.3 mm をおよそ 10 ~ 30 個の画素で表現することに相当している。

図 - 4 にひび割れの読取り領域を示す。基本的な読取り領域は、高さ 60 mm × 幅 20 mm の長方形領域としたが、ひび割れ伸展状況に応じて読み取り幅は適宜変化させた。また、読取り領域内にはクラックスケールを設置し、ひび割れ画像内の基準寸法とした。

図 - 5 に取得したひび割れ画像を示す。取得したひび割れ画像を観察すると、ひび割れの境界は不鮮明であり明確に判別できない。ひび割れ幅を正確に評価するためには、ひび割れ画像に 2 値化処理を施し、ひび割れの境界を明確にする必要がある。2 値化とは、画像内の各画素を濃度に応じて「白」か「黒」に変換する処理であり、その境界値を「しきい値」と呼んでいる。本研究では、ひび割れ画像の明るさやコントラストを調整した後、ひび割れ画像内のクラックスケールが適切に識別できる「しきい値」を選択して 2 値化処理を行った。

図 - 6 にひび割れ幅の評価方法を示す。まず、ひび割れの傾き（直線 A）をひび割れ画素の中心位置から推定する。次に、ひび割れの傾きに対して直交線（直線 B）を引き、ひび割れの境界に位置する画素との交点 (M, N) を選択する。本研究では 線分 M-N の長さをひび割れ幅として定義している。最後に、ひび割れ幅の各方向成分 (X, Y) を求めてひび割れ幅を評価する。なお、 X および Y は各方向の画素数に画素寸法 0.0105 mm を乗じることによって求めることができる。

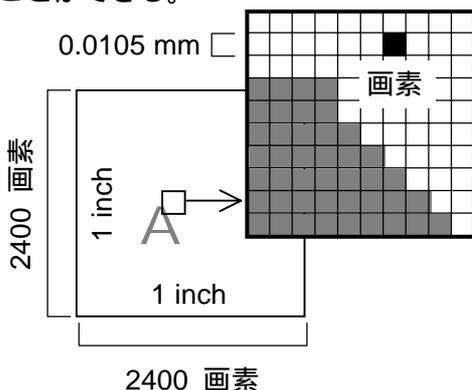


図 - 3 スキャナの解像度 (2400 dpi)

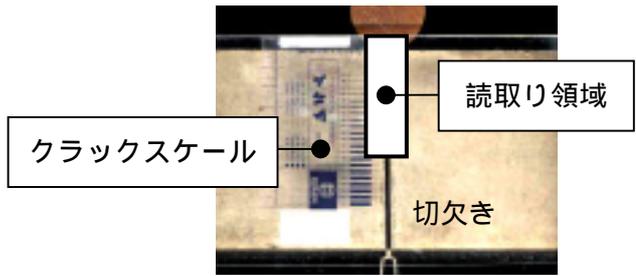


図 - 4 ひび割れの読取り領域

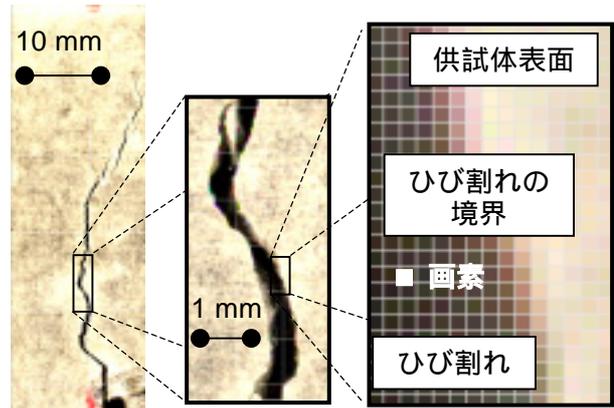


図 - 5 取得したひび割れ画像

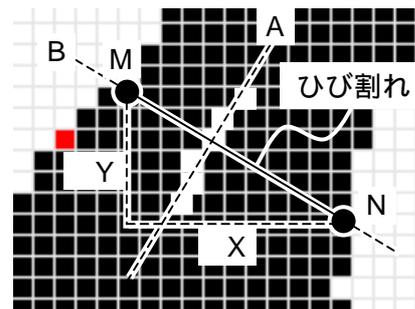


図 - 6 ひび割れ幅の評価方法

4. ひび割れ解析によるひび割れ幅の評価

4.1 粒子モデルの概要

本研究の粒子モデルは Jirasek ら^{3),4)}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。本研究の粒子モデルでは、コンクリート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する (図 - 7)。

図 - 8 に各要素に付与する応力 (σ) - ひずみ (ε) 関係を示す。この σ - ε 関係は、微視材料パラメータである (1) 微視ヤング係数 (E_m)、(2) 微視引張強度 (σ_p)、(3) 限界ひずみ (ε_f) および (4) 微視破壊エネルギー (G_{FM}) によって決定される。これら微視材料パラメータは、実験から得られる巨視ヤング係数 (E) や巨視破

壊エネルギー (G_F) 等の巨視材料パラメータと関連付けることによって同定される。また、要素に関しては4つの状態(弾性, 軟化, 除荷, 破断)が考慮され, 各状態は $\sigma - \varepsilon$ 関係に対応している。なお, 本研究では, 圧縮挙動は弾性と仮定し, 圧縮での破壊は考慮しない。

粒子モデルを用いたひび割れ解析を実施する場合, 2次元解析と3次元解析のうちどちらが適切であるか判断するべきである。コンクリートのひび割れ挙動に及ぼす粗骨材の影響等を適切に考慮する場合, 3次元解析の方が適していると思われるが, 計算時間は膨大である。また, 鉄筋腐食モデルなど他の数値解析技術との統合を考えた場合, 2次元解析の方が容易であると思われる。以上の点から, 本研究では2次元粒子モデルを用いることにする。

4.2 微視材料パラメータの同定

複相構造を模擬する粒子モデルでは, 母材であるモルタル要素の微視材料パラメータが解析結果を左右する。本研究では, モルタル供試体を対象にして E_m , σ_p および G_{FM} に関するパラメトリック解析を行い, 解析結果から巨視材料パラメータを評価することによって微視材料パラメータと巨視材料パラメータの関係式を導いた⁸⁾。式(1)に導かれた関係式を示す。

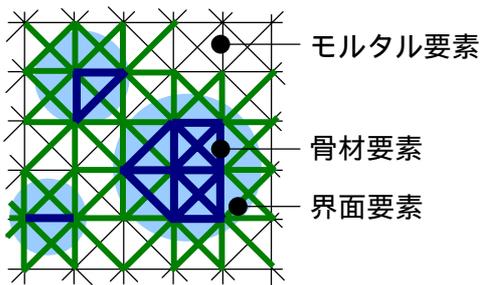


図 - 7 要素ネットワーク

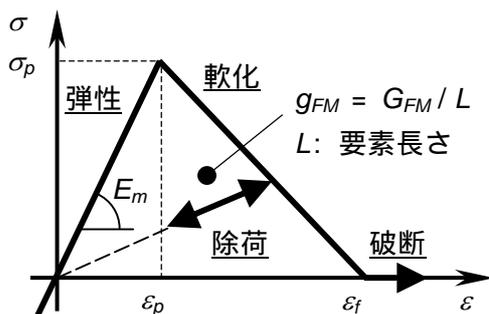


図 - 8 応力 - ひずみ関係

$$\begin{aligned} E_m &= 8.1 \times 10^{-6} K^2 + 0.45 K \\ G_{FM} &= 0.55 G_F \\ \sigma'_p &= -0.85 \sigma'_f{}^2 + 1.83 \sigma'_f \end{aligned} \quad (1)$$

$$(\sigma'_p = \sigma_p / \sigma_{p \max}, \sigma'_f = \sigma_f / \sigma_{f \max})$$

ここで, K は $P - CMOD$ 関係の最大荷重時における割線剛性である。 σ_f は曲げ強度であり, 曲げ強度算定式における有効断面としてリガメント断面を用いている。また, パラメトリック解析では σ_f に頭打ちが見られるまで σ_p を変化させており, σ_f および σ_p の最大値をそれぞれ $\sigma_{f \max}$ および $\sigma_{p \max}$ とした。

一方, 骨材要素の微視材料パラメータは, 橋高ら⁹⁾が実施した粗骨材に関する試験結果に基づいて同定した。なお, 本研究で使用した粗骨材は硬質砂岩砕石である。また, 界面要素の微視材料パラメータは, 界面相の巨視材料パラメータを推定することによって同定した。まず, 水和反応モデルから求められるセメントの水和反応曲線に基づいて界面の水和反応曲線を推定し, 式(2)に示す Shutter 式¹⁰⁾を利用して界面相の巨視材料パラメータを評価した⁸⁾。

$$\frac{P(\alpha)}{P(\alpha=1)} = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^n \quad (2)$$

ここで, α : 水和度, $P(\alpha)$: 水和度が α のときの物性値, α_0, n : 定数。

先に示したとおり, 本研究では2次元粒子モデルを用いてひび割れ解析を実施する。この場合, 平面状に分布させることが可能な骨材量が限られているため, 粗骨材の架橋等の影響を過小評価する可能性がある。本研究ではこれらの点に対応するために, 界面の微視材料パラメータを補正する。まず, 骨材の粒度分布(表-3)に従って骨材径毎の骨材量を決定する。このとき, 円形骨材を仮定し, 平面上に配置する骨材に重なりが生じないという条件を満たす最大骨材量を算出した。次に, 粗骨材の抵抗機構の過小評価を補うために, 界面要素の微視材料パラメータを補正する。ただし, この補正によって

界面破壊が生じにくくなるなど、実際の破壊挙動と異なる挙動を示す可能性があり、2次元解析の問題点の1つであると考えられる。本研究では、界面要素の微視材料パラメータを補正するにあたり、補正係数に関するパラメトリック解析を実施した。その結果、補正係数は σ_p に関して2.02、 ε_f に関して1.98となった。表-4および表-5に各相の巨視材料パラメータおよび同定した微視材料パラメータを示す。

4.3 ひび割れ幅の定量的評価および考察

図-9にモルタル供試体のひび割れ幅の測定結果および解析結果を示す。 $CMOD = 0.10$ mmの場合、測定されたひび割れ幅は0.01 mm程度である。本手法の測定精度はおよそ1/100 mmであり、測定されたひび割れ幅は信憑性に欠けると思われる。解析結果との比較も行うべきではないだろう。ここでは、ひび割れ長さに着目する。ひび割れ長さの測定値は切欠き上部から20 mmに達しているのに対し、解析結果では5 mmである。本解析では、要素の状態は応力-ひずみ関係によって定義されており、要素のひずみが限界ひずみを超えて破断した時にひび割れと認識される。ひび割れ発生時の照査という観点から考えた場合には、要素に付与する応力-ひずみ関係について検討が必要であると思われる。一方、 $CMOD = 0.50$ mmの場合、解析結果は概ね測定値を模擬しており、1/10 mmの精度で見れば、誤差はないと判断できる。ひび割れ長さにも差異は見られず、本手法によるひび割れ幅の予測は可能であろう。

表-3 粗骨材の粒度分布

通過重量百分率 (%)				
25 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm
100.0	97.9	22.4	1.8	0.3

表-4 各相の巨視材料パラメータ

	E (kN/mm ²)	G_F (N/mm)	σ_f (N/mm ²)
モルタル	24.0	0.042	3.43
骨材	39.3	0.113	17.7
界面	21.9	0.039	3.19

表-5 各相の微視材料パラメータ

	E_m (kN/mm ²)	G_{FM} (N/mm)	σ_p (N/mm ²)
モルタル	66.3	0.023	1.32
骨材	331.6	0.048	3.07
界面	60.5	0.021	1.31
界面(補正)	60.5	0.093	2.64

図-10に $CMOD = 1.50$ mm時におけるコンクリート供試体のひび割れ幅の測定結果および解析結果を示す。解析結果は概ね測定結果を模擬しているが、No.1供試体の切欠き上部5 mmの部分において差異が大きい。この位置ではひび割れが迂回しており、部分的にひび割れ幅が細くなっている。このような局所的な変化は解析によって模擬することが困難である。重要なことは、ひび割れ幅を予測する上でこのような局所的な変化までも予測対象とするべきかという点である。RC構造物の性能評価を目標とする場合、最大ひび割れ幅や許容最大ひび割れ幅として定義される0.1~0.3 mm程度のひび割れの予測に最も注意を払うべきであろう。また、予測結果から分かるように、ひび割れの伸展方向は試験結果と異なっている。コンクリート供試体のひび割れ伸展方向は、実験・解析ともに内部に包含する粗骨材の影響を受ける。解析によるひび割れの伸展方向を実験の観察結果に適合させるためには、解析に用いる骨材配置を実供試体と一致させなければならない。しかし、2次元解析では骨材量を優先して粗骨材分布を決定しているため困難である。今後の課題として、骨材配置がひび割れ幅の予測精度に及ぼす影響を把握しておく必要があると思われる。

5. まとめ

スキャナを用いたコンクリートのひび割れ幅の計測手法を提案するとともに、ひび割れ解析によるひび割れ幅の予測の可能性について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) スキャナを用いてひび割れ幅を計測する場合、読取り解像度が重要である。本研究で設定し

た解像度 2400 dpi の場合，約 1/100 mm の精度でひび割れ幅を測定できる。

- 2)モルタルのひび割れ幅予測結果は，概ね実験結果を模擬しており，1/10 mm の精度であれば差異は生じないと判断できる。
- 3)コンクリートのひび割れ幅予測結果は，粗骨材の影響による局所的なひび割れ幅の変化を考慮することができないため，部分的に差異が大きくなる場合がある。
- 4)ひび割れ幅を予測する場合，予測目的を明確にし，目的に対する適切な予測精度に関して検討する必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたり，東急建設技術研究所を利用させていただいた。さらに実験試料の提供と研究遂行上の数々の助言も受けた。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。また，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：大津岩夫）」の一環として実施したものであり，一部は 2003 年度竹中育英会建築助成金の助成を受けて行われたものである。また，本研究を行うにあたりご協力頂いた中村隆大氏（日本大学大学院）に感謝の意を表す。

参考文献

- 1)武田篤史，山田守，大内一：RC 構造実験におけるひび割れ計測の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1178-1182，2001
- 2)Schlangen, E. and Van Mier, J.G.M.: Experimental and Numerical Analysis of Micro-mechanics of Fracture of Cement-based Composites, Cement and Concrete Composites, Vol.14, pp.105-118, 1992
- 3)Jirasek, M. and Bazant, Z.P.: Macroscopic Fracture Characteristics of Random Particle Systems, International Journal of Fracture, Vol.69, pp.201-228, 1994/1995
- 4)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
- 5)長井宏平，佐藤靖彦，上田多門，角田 與史雄：Numerical Simulation of Fracture Process of Concrete Model by Rigid Body Spring Method，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp. 163-168, 2003
- 6)日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001.5
- 7)田嶋和樹，白井伸明，渡部憲：水セメント比と材齢の異なるコンクリートの引張軟化特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.169-174，2002
- 8)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
- 9)小野，橘高他：高強度コンクリート複合モデルの破壊性状 - 多相複合材モデルのひび割れ伸解析析 - ，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），A-1 分冊，pp.871-872,1994
- 10)De Schutter, G. and Taerwe, L. : Degree of Hydration -based Description of Mechanical Properties of Early Age Concrete , Materials and Structure Vol.29 , 335-344 , 1996

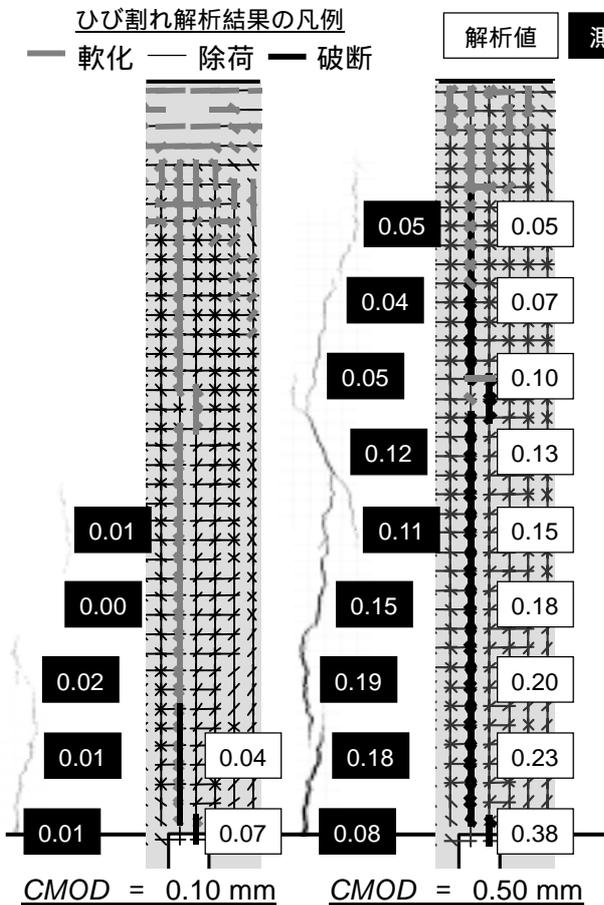


図 - 9 ひび割れ幅の解析結果（モルタル）

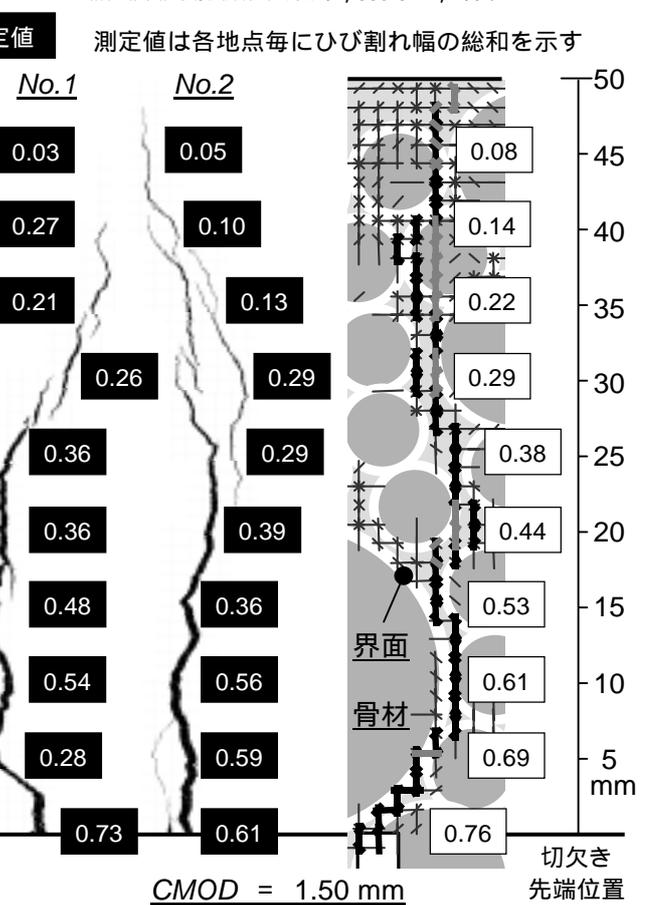


図 - 10 ひび割れ幅の解析結果（コンクリート）