

論文 断面修復補修における境界条件がひび割れ性状に与える影響

小倉 大季^{*1}・国枝 稔^{*2}・上田 尚史^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：断面修復材の収縮ひび割れは，断面修復材の収縮量や材料特性，境界条件等の複数の要因が複雑に絡み合っ発生するため，定量的に予測することは難しいのが現状である。本研究では，断面修復部の境界条件の違いが，断面修復材のひび割れ性状に及ぼす影響について明らかにするため，均一な収縮ひずみを入力した場合，および水分移動に基づく収縮ひずみを入力した場合のそれぞれについて，3次元 Rigid-Body-Spring Model (RBSM) により解析的に検討した。特に，内部に鉄筋が配置されている場合には，鉄筋に沿ったひび割れが卓越することが確認され，3次元解析の重要性が検証された。

キーワード：断面修復材，収縮ひび割れ，3次元 RBSM，トラスモデル，寸法安定性

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物に適用される断面修復材には，力学特性，付着特性および寸法安定性などが要求される。特に，断面修復材の収縮によって生じるひび割れは，有害物質の侵入を促進し，鉄筋の腐食を助長するため，寸法安定性を適切に評価する必要がある。ただし，同一の寸法安定性を有する材料であっても，拘束の程度が異なればひび割れの程度も異なるため，断面修復部の境界条件などがひび割れ発生に及ぼす影響について明らかにし，さらにはそれらを予測するツールの整備が必要である。

断面修復材の寸法安定性がそれ自身のひび割れ発生に与える影響に関しては，実験的，解析的な検討が数多くなされているが，従来までの実験や解析では，2次元的にモデル化されたものが多いのが現状である^{1)~3)}。

本研究では，断面修復部の境界条件の違いが断面修復材の収縮に伴って生じるひび割れ性状に与える影響について，3次元 RBSM を用いて数値解析的に評価した。また，収縮のモデル化には均一な収縮ひずみを導入する場合と，トラスモデルを用いて水分移動を考慮した場合とを考え，ひび割れ性状について比較をした。

2. 解析手法

2.1 RBSM の概要

RBSM は，川井⁴⁾により開発され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解析への適用性が確認されている。近年では，RBSM の3次元化に向けた改良が行われ⁵⁾，2次元では再現できなかったコンクリートの破壊現象が捉えられるようになってきた。

また，RBSM では，コンクリートのひび割れをばねの破壊によって表現するため，ひび割れは要素境界边上に沿って発生する。このため，ひび割れの発生，進展がコンクリートの要素分割に大きく依存する。そこでランダムに配置された母点を基にヴォロノイ分割することで，要素分割依存性を低減した。

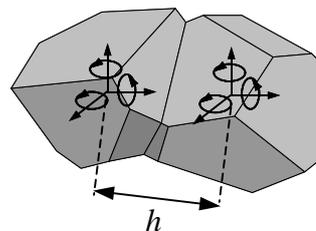


図 - 1 ヴォロノイセルと母点での自由度

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 学生 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教授 博士(工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 研究員 工修 (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士(工) (正会員)

図 - 1 に、3次元 RBSM において、要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 3、回転 3 の 6 自由度を設定した。各セルの境界面上には、境界と垂直、平行ならびに回転方向に 3 種類のばね (垂直ばね 1 個、平行ばね 2 個、回転ばね 3 個の計 6 個) 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、母点間距離 h を基準としたクラックバンドを用いて評価を行った。

2.2 均一な収縮ひずみを導入した解析

各時間 (解析ステップ) において全要素の垂直ばねに対して一様にひずみを与え、初期ひずみ問題として解析を行った。与えるひずみについては、日本材料学会補修用樹脂小委員会にて実施された共通試験の結果⁶⁾ならびに、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] にて提案されている乾燥収縮ひずみの式を参考に図 - 2 に示すひずみ性状を仮定した。

2.3 水分移動に基づく収縮ひずみを導入した解析

(1) トラスモデル

水分移動解析は、トラスモデルにより行なった。図 - 3 に示すように、各ヴォロノイセルの母点を結ぶトラスネットワークを考え、各トラスは、ヴォロノイセル境界面の面積に対応した面積を持つとした。トラスモデルには、一次元の拡散方程式を考え、物質移動解析を行った。

(2) 水分移動

コンクリート中の水分移動は拡散則に従うとし、以下の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial R}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで、 R : 相対含水率、 t : 時間、 D_w : 水分伝導率である。これを初期条件と以下の境界条件のもとに解いた。

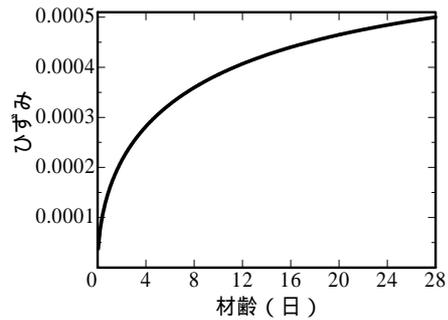


図 - 2 仮定した収縮モデル

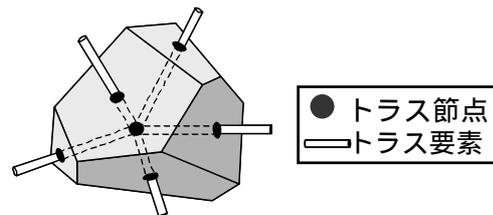


図 - 3 トラスモデル

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m (H_s - H_o) = 0 \quad (2)$$

ここで、 n : 乾燥面の法線ベクトル、 α_m : 水分伝達率、 H_s, H_o : 乾燥表面および雰囲気の相対湿度である。

表面に生じたひび割れに関しては、ひび割れ発生後、ひび割れ間のトラス節点に雰囲気と同一の条件を与えることでひび割れ部の物質移動を考慮した。

(3) 算定される収縮ひずみ

トラスモデルにより求めたコンクリート中の相対含水率と自由乾燥収縮ひずみは線形の関係であると仮定して、乾燥収縮ひずみ増分を以下の式より求めた。

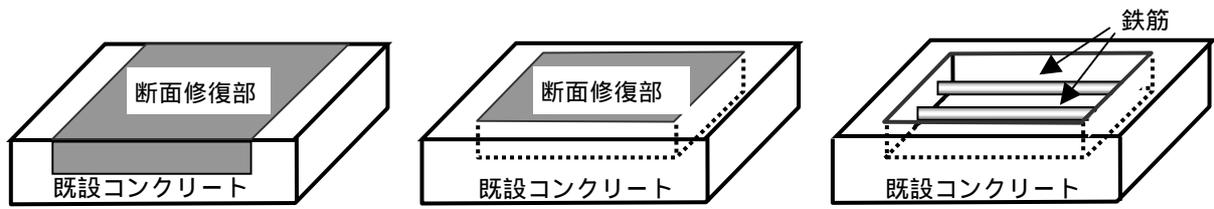
$$\Delta \varepsilon_n = \alpha_{sh} \Delta R \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_n$: 乾燥収縮ひずみ増分、 α_{sh} : 収縮係数、 ΔR : 母点における相対含水率変化、である。 $\Delta \varepsilon_n$ を RBSM における垂直ばねの初期ひずみとし、初期ひずみ問題として解析をした。

3. 解析概要

3.1 供試体のモデル化

図 - 4 に断面修復補修における境界条件の例を示す。図 - 4 (a) は、下面と鉛直面 (2 面)



(a) 2次元的な境界条件の例 (b) 3次元的な境界条件の例 (c) 3次元的な境界条件の例

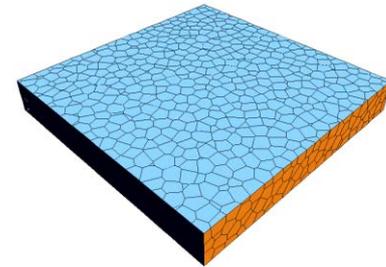
図 - 4 断面修復補修における境界条件の例

の計3面が拘束される2次元的な境界条件であり、既往の研究で対象とされてきた断面修復材の2次元ひび割れ解析モデルに類似している。一方、図 - 4 (b), (c)では、図 - 4 (a)の境界条件に加えて、さらに鉛直面(2面)や鉄筋による拘束が付加される境界条件である。このように、断面修復補修の境界条件には様々なものが想定され、同じ特性の断面修復材を適用した場合でも、ひび割れ性状が異なる可能性が考えられる。従って、本研究の解析ケースでは、図 - 4 (a)に示すように端部2面と下面を固定する2次元的な境界条件、図 - 4 (b)に示すように、端部4面と下面を固定する3次元的な境界条件、図 - 4 (c)に示すように内部に鉄筋が存在する(1本と2本の場合を想定、鉄筋と断面修復材とは完全付着)境界条件の3種類を考慮することとした。なお、鉄筋は円形断面のものを、かぶり厚さ30mmとして配置した。

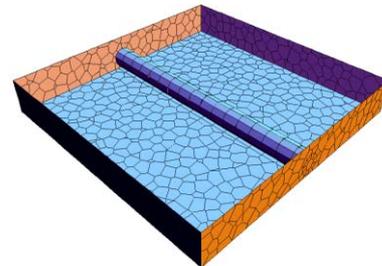
対象とする供試体は、母材コンクリートの一部をはつり取り、断面修復材を厚さ50mmで埋め戻すものである。ただし、解析時間の短縮を目的とし、コンクリート部分は解析対象とせず、埋め戻された断面修復材のみを対象とした。解析モデルは、図 - 5に示すように、断面修復部の大きさを500mm×500mmの正方形とし、 h の平均寸法を20mmとして要素分割を行った。なお、固定境界は、最外縁セルの自由度(6自由度)を全て固定することで再現した。

3.2 使用した材料特性

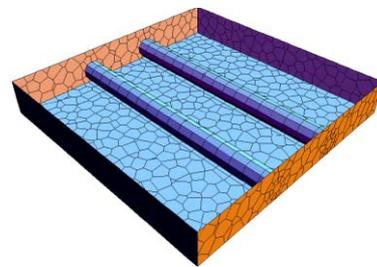
断面修復材の材料特性は、材齢に依存するものとし、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]による算定式を参考にし、図 - 6のようなヤング係数発現のモデルを仮定した。引張強



(a) 鉄筋なし



(b) 鉄筋1本を配置(内部のみ表示)



(c) 鉄筋2本を配置(内部のみ表示)

図 - 5 要素分割図

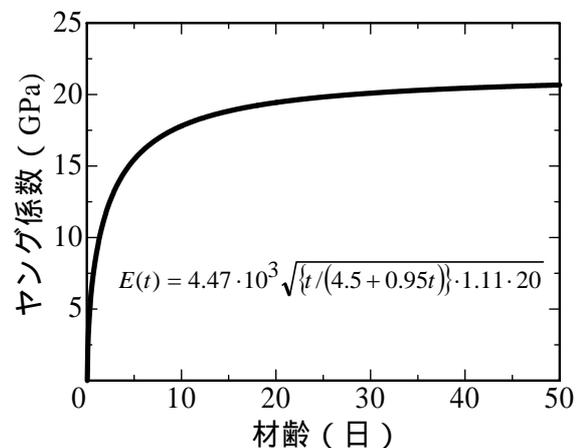


図 - 6 仮定したヤング係数発現のモデル

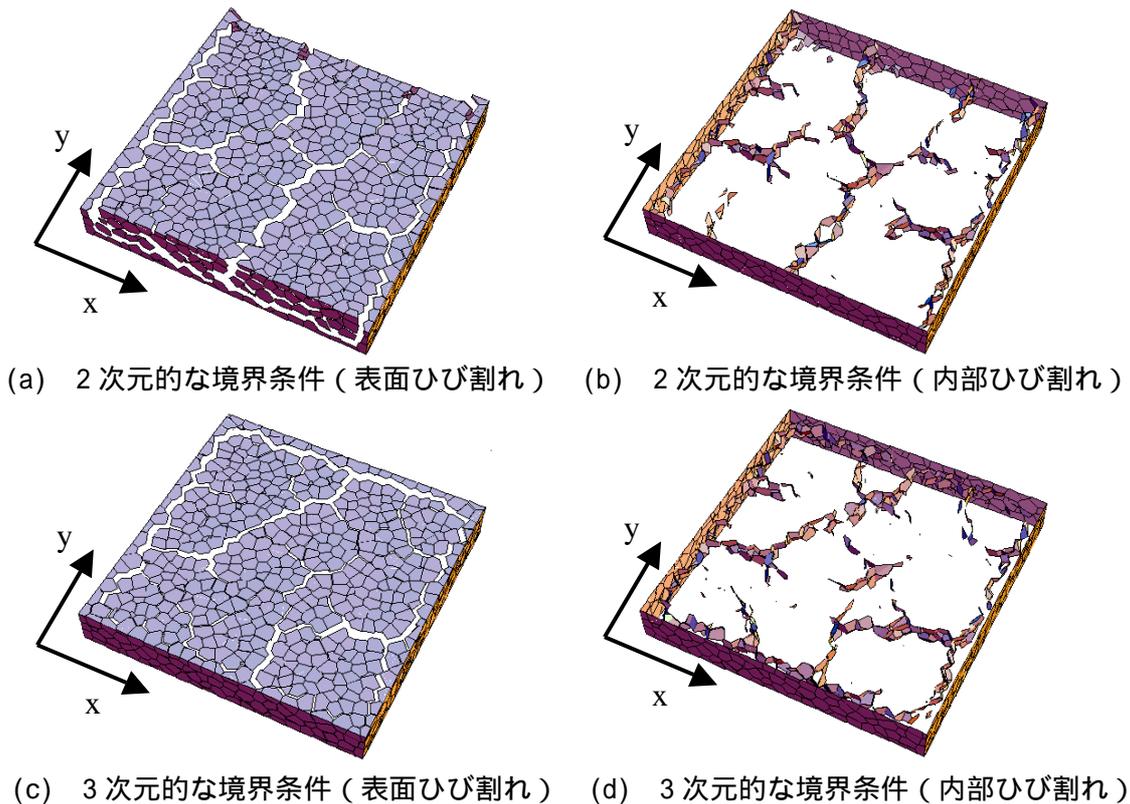


図 - 7 ひび割れ図 (400×10^{-6} のひずみ導入)

度、破壊エネルギーについても同様の関数形で、28 日後にそれぞれ 2.0MPa, 80.0N/m となるようなモデルを仮定した。なお、断面修復材におけるクリープ特性は、現状では不明な点が多いため、本研究では考慮しないものとした。ひび割れ発生後は、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、ここでは 1/4 モデルを使用）に基づく引張応力を伝達させた。なお、圧縮側は、線形弾性体と仮定した。

4. 解析結果

4.1 均一な収縮ひずみを導入した解析

(1) 端部境界条件の影響

図 - 7 に、約 400×10^{-6} の収縮ひずみ時点での供試体表面、及び内面のひび割れ図を示す。なお、ひび割れ幅 0.015mm 以上のひび割れを表示している。図から、発生したひび割れは、ランダムな要素分割のため、対称性を有していないことが分かる。また、いずれの場合においても、供試体表面部には網目状のひび割れが観察され

る。このようなひび割れ性状は、従来まで盛んに行われてきた 2次元 FEM などでは再現することができないため、今回の解析のように 3次元でしかも RBSM による解析のメリットが確認できた。また、これらのひび割れは、内部まで貫通して生じていることが、内部ひび割れを観察することにより確認できる（図 - 7 (b), (d) 参照）。

また、定性的ではあるが、2次元的な境界条件の結果である図 - 7 (b) の方が、3次元的な境界条件の結果である図 - 7 (d) に比べて y 方向のひび割れが卓越していることが伺え、拘束条件の影響が確認できる。

(2) 鉄筋の有無の影響

図 - 8 に 1 本と 2 本の鉄筋がそれぞれ配置された場合のひび割れ図を示す。鉄筋が配置された場合は、鉄筋に沿ってひび割れが生じていることが確認できる。これは、断面修復部が約 50mm 程度の厚さがあるのに対して、鉄筋部分では約 30mm と薄くなっており、断面修復材

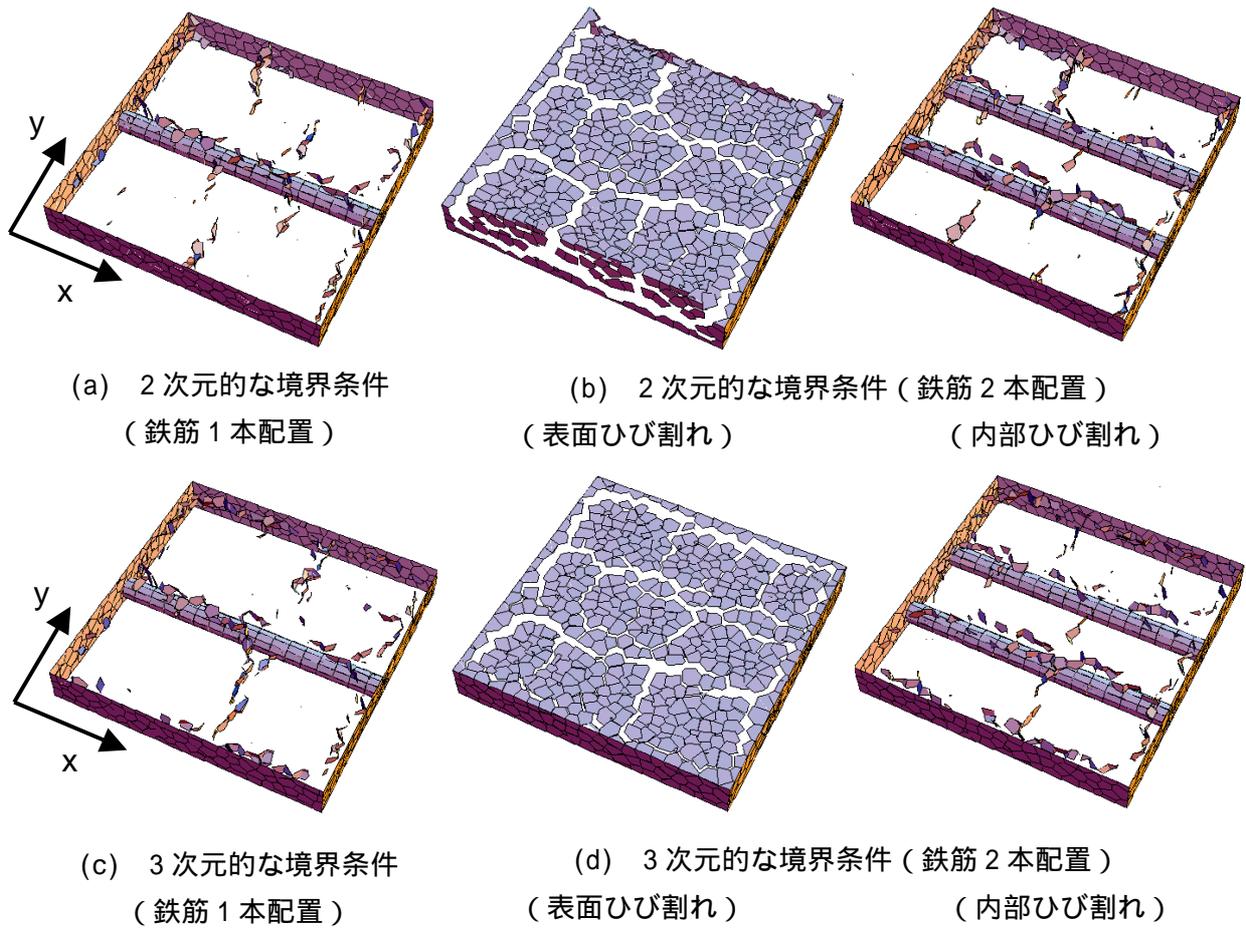


図 - 8 ひび割れ図 (400×10^{-6} のひずみ導入)

にとっては、鉄筋が切欠きの役割をしているものと予想される。特に、2次元的な境界条件でしかも鉄筋が1本配置された場合では、端部では鉄筋に直角方向 (y 方向) のひび割れが卓越し、鉄筋周辺では鉄筋に沿った方向 (x 方向) のひび割れが卓越するなど、3次元解析により、ひび割れの特徴が再現されている。また、実際の施工においては、断面修復材の剥落を防止する目的で、鉄筋の裏側まではつり出し、断面修復することが推奨される場合があるが、鉄筋の配置によっては、ひび割れの誘発原因になる可能性があることが分かった。

4.2 水分移動に基づく収縮ひずみを導入した解析

図 - 9 に、水分移動解析におけるひび割れ図を示す。図は、供試体上面 (表面) の収縮ひずみが約 400×10^{-6} の時点 (材齢 30 日) の状態である。修復部の初期条件には相対含水率 100%

表 - 1 トラスモデルに用いたパラメータ

| | |
|--------------------------------------|-------|
| 水分伝導率 $D_w(\text{mm}^2/\text{day})$ | 30.0 |
| 水分伝達率 $\alpha(\text{mm}/\text{day})$ | 2.0 |
| 収縮係数 α_{sh} | 0.001 |

を与え、外気条件は湿度 60% と一定とした。水分の逸散は供試体上面 (表面) のみから起こるものとした。水分移動問題におけるトラスモデルに用いたパラメータは、既往の研究⁷⁾を参考にし、表 - 1 のように設定した。

水分移動を考慮した解析は、均一なひずみを導入した解析結果 (図 - 8 (b), (d)) に比べ、鉄筋に沿ったひび割れがより卓越していることが確認される。これは、鉄筋の切欠きの効果に加え、鉄筋上面のコンクリート厚が薄くなった部分における水分逸散が、他の部分に比べ早く起こることによる影響であると考えられる。

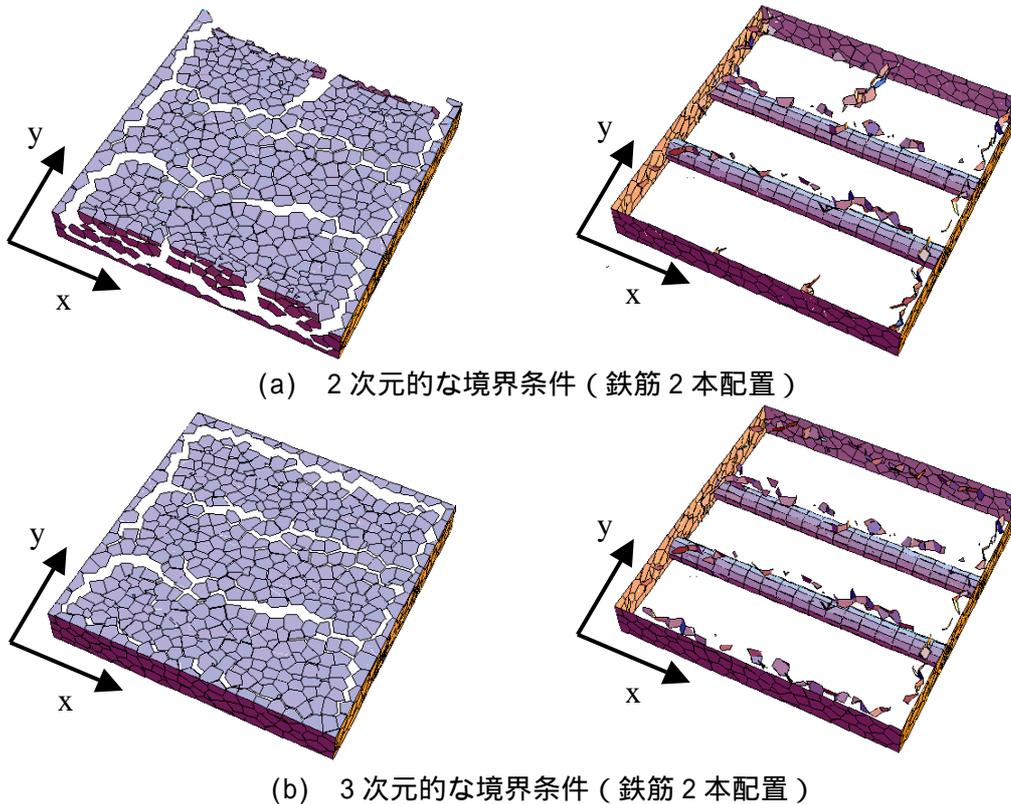


図 - 9 ひび割れ図 (表面に導入されたひずみが 400×10^{-6} の時点, 材齢 30 日)

5. まとめ

本研究で, 得られた知見を以下に示す。

- (1) 供試体表面部に網目状のひび割れが観察され, 3次元 RBSM のメリットを確認することができた。
- (2) 鉄筋を配置した場合, 鉄筋に沿った方向のひび割れが卓越する結果となった。このように, 鉄筋の配置によっては, 鉄筋がひび割れの誘発原因になる可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) Martinola, G. and Wittmann, F. H.: Application of Fracture Mechanics to Optimize Repair Mortar Systems, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. of FRAMCOS-3, AEDIFICATIO Publishers, pp.1481-1492, 1998.10
- 2) Bolander, J.E. and Berton, S.: Simulation of Shrinkage Induced Cracking in Cement Composite Overlays, Cement & Concrete Composites, Vol. 26, pp.861-871, 2004.10
- 3) 国枝稔, 栗原哲彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 引張軟化曲線による断面修復材の付着特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.407-412, 1998.6
- 4) 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
- 5) Bolander, J.E. and Berton, S.: Cohesive Zone Modeling of Fracture in Irregular Lattices, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. of FRAMCOS-5, pp.989-994, 2004.4
- 6) 国枝稔, 江口和雄, 宮川豊章, 小柳治: 断面修復材の寸法安定性ならびに線膨張率の試験方法に関する共通試験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.4, 2004.10
- 7) 小沢泰士, 斉藤成彦, 檜貝勇: 3次元剛体バネモデルによるコンクリートの収縮ひび割れ解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.477-482, 2004