

網目状ひび割れの発生パターンに関する解析的研究

その1 収縮型ひび割れの発生パターン

213-048 河野 陸

1. はじめに

英国人芸術家 Andy Goldsworthy は、土壁に無数の収縮ひび割れを意図的に発生させて模様化している。しかし、このようなひび割れパターン形成を制御する技術はほとんどない。



図1 収縮ひび割れの例

本研究は、網目状ひび割れの発生パターンを、弾性バネネットワークモデルにより解析的に検討する。その1では、収縮型のひび割れパターンを検討する。

2. 解析方法の概要

2.1 弾性バネ要素の3次元ネットワークモデルの概要

収縮あるいは膨張に起因した網目状ひび割れパターン形成を、フックの法則に基づく弾性バネ要素による3次元ネットワークモデルで表現する解析手法を構築した。

図2に弾性バネ要素の概要を示す。節点、外力 f 、変位 u 、バネ定数 k を設定した。

節点1, 2における力の釣合いは、式(1),(2)となる。

$$f_1 = k(u_1 - u_2) \quad (1)$$

$$f_2 = -k(u_1 - u_2) \quad (2)$$

式(1),(2)をまとめて行列表現すると、式(3)になる。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \{f\}, \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \rightarrow [K], \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \{u\} \quad (3)$$

多数のバネ要素を連成させてネットワーク化した剛性マトリックスは、式(4)となる。

$$\{f\} = [K] \{u\} \quad (4)$$

図3に3次元ネットワークでの立体トラスを示す。3次元化するにあたって、基本構造を、節点8個、構造バネ12本、せん断バネ12本のバネ要素数が計24本構成の立体トラスとした。

2.2 ひび割れ発生パターン解析の手順

解析前に、すべての弾性バネ要素数のうち、空隙を表現するため、一定数を乱数で抽出し、バネ弾性係数を0にして、空隙を考慮した材料不均一性を与えている。

図4にひび割れ発生パターン解析の手順を示す。最初に、収縮あるいは膨張の変形量をバネ要素に与えて、バネ要素の作用応力をチェックし、バネ要素の引張強度を超えたバネの弾性係数を0にしてバネの切断を表現し、切れるバネがなくなるまで、応力再分配とそれに従う変形状態の解析を繰り返す。切れるバネがなくなったら、次の解析ステップとして、収縮あるいは膨張の変形量を与えて、新たな解析ステップを始める。

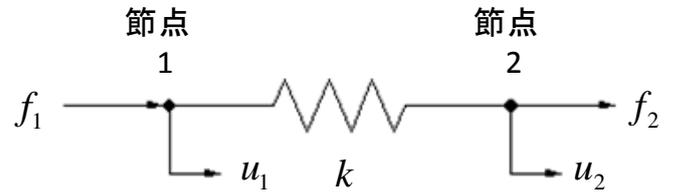


図2 弾性バネ要素の概要

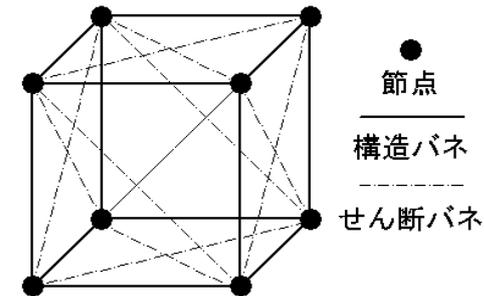


図3 3次元ネットワークでの立体トラス

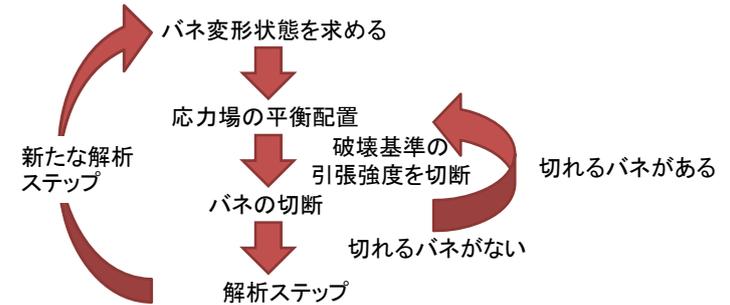


図4 ひび割れ発生パターン解析の手順

3. 解析条件の設定

解析対象モデルは、 x, y, z 方向で $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 10\text{mm}$ の3次元平板とし、 $z=0$ の x, y 平面が表面で、 $z=10\text{mm}$ の x, y 平面を裏面とする。

また、せん断バネの弾性係数は、構造バネの弾性係数の $1/2$ とした。

表1にひび割れ発生パターン解析条件を示す。拘束条件は、拘束無しで収縮自由変形を求めるための $z=10\text{mm}$ の裏面中央部の1点拘束、裏面のみ拘束した1面拘束、裏面と周囲側面を拘束した5面拘束の3種類とした。

空隙条件は、乱数発生抽出によるバネ弾性係数0配置を、空隙率と合致させることとして、5%と20%の2種類とし、また、同じ空隙率でも乱数発生の状況を a タイプと b タイプの2種類に変えた。図5に設定概要を示す。

要素分割は、 z 方向は11分割のまま、 x 方向と y 方向を11分割の粗分割と21分割の細分割とした。

図6に解析で導入した収縮ひずみを示す。解析ステップ1~3にて、表面から水分蒸発に由来する乾燥収縮を想定し、表面側の収縮ひずみを多く導入した。

表 1 ひび割れ発生パターン解析条件

解析	拘束条件	空隙条件	要素分割
①	1点拘束	5%A	粗
②	1面拘束	5%A	粗
③	5面拘束	5%A	細
④	5面拘束	5%A	粗
⑤	5面拘束	5%B	細
⑥	5面拘束	20%A	細
⑦	5面拘束	20%B	細

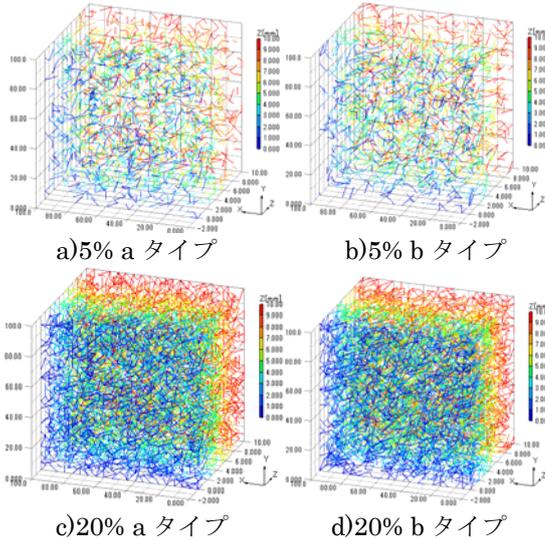


図 5 空隙率 5%と 20%のバネ弾性係数 0 配置の設定

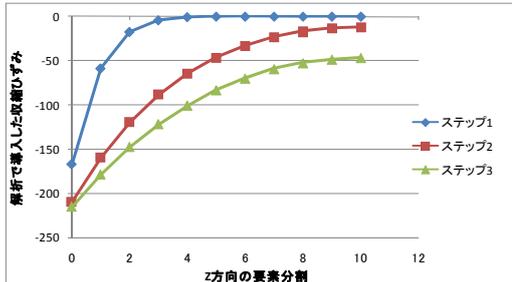


図 6 解析で導入した収縮ひずみ

4. 解析結果および考察

4.1 解析①一点拘束と解析②1面拘束での変形結果

図 7 に解析①と解析②の変形倍率 1000 倍の変形結果を示す。解析①の変形結果は、平板を拘束せずに、裏面よりも表面の収縮が大きいので、反りが解析できた。解析②は、解析ステップ 3 の変形結果であるが、裏面のみを拘束したため、ひび割れは発生せず、裏面よりも表面が大きく収縮しているのがわかる。

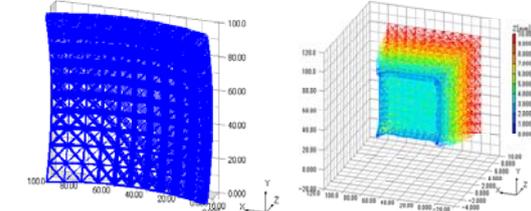
4.2 解析③④でのひび割れ局所化の形成過程結果

図 8 に解析③④でのひび割れ局所化の形成過程結果を示す。a)と b)が解析③でのステップ 1~2 のひび割れ形成過程結果を、また、c)が空隙 0%の空隙無しの解析結果を、d)が解析④の粗分割の解析結果になる。空隙モデルを設定していないと、均一構造のため、収縮拘束が強い表面の枠部分が上下左右対称に破壊するが、空隙モデルを導入すると不均一構造に伴い、破壊部分が局所化し、ステップ 1~2 の変化で、よりひび割れが局所化していく形成過程が解析できている。また、粗分割でも、ひび

割れの局所化の形成状況がある程度わかる。

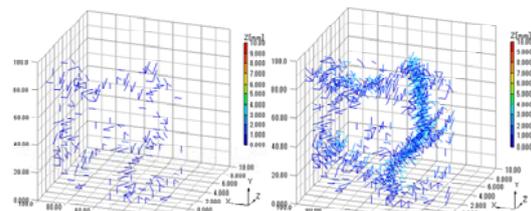
4.3 解析③⑤⑥⑦での空隙状況の違いによる結果

図 9 に解析③⑤⑥⑦での空隙状況の違いによる結果を示す。同じ空隙率でも空隙の配置を変化させると、同じ網目状ひび割れであるが、ひび割れの局所化状況が異なると、最終的な発生パターンに差が現れるのがわかる。

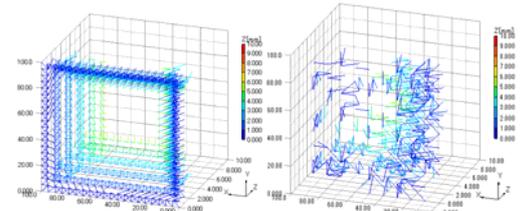


a) 解析①1点拘束 b) 解析②1面拘束

図 7 解析①と解析②の変形倍率 1000 倍の変形結果

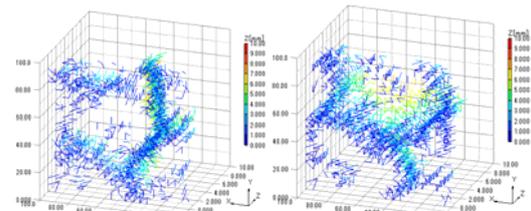


a)解析③ステップ 1 b)解析③ステップ 2

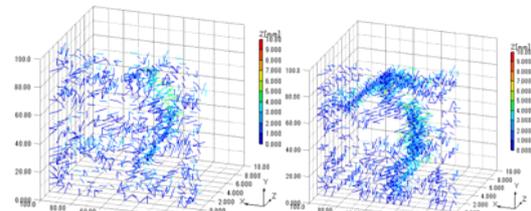


c)解析(空隙 0%) d)解析④ 粗分割

図 8 解析③④でのひび割れ局所化の形成過程結果



a)解析③ステップ 3 b)解析⑤ 5%B



c)解析⑥ 20%A d)解析⑦ 20%B

図 9 解析③⑤⑥⑦の空隙状況の違いによる結果

5. まとめ

本研究その 1 では、弾性バネネットワークモデルによる網目状ひび割れの発生パターンの収縮型を検討した。その結果、次が示された。1) 空隙モデルを設定しないとひび割れ局所化が表現できない。2) 乱数発生による空隙モデルを開発し、空隙の配置で、ひび割れ局所化が変わることを示した。

(中村研究室)