

ASR による膨張とひび割れ進展を考慮した解析モデルの提案

立命館大学 正会員

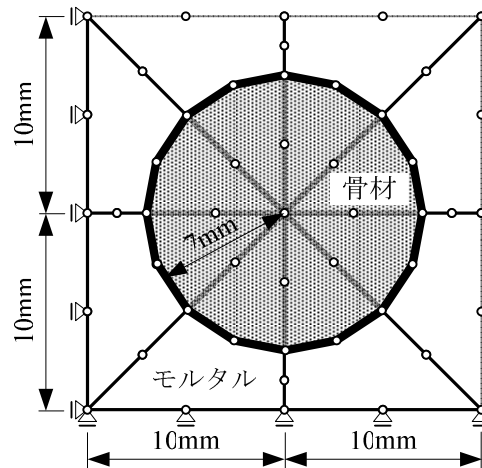
立命館大学 学生員 ○武田 裕之
水田 真紀 正会員 児島 孝之— モルタルひび割れ要素
--- 骨材ひび割れ要素 — リング要素

図1 ASRモデル

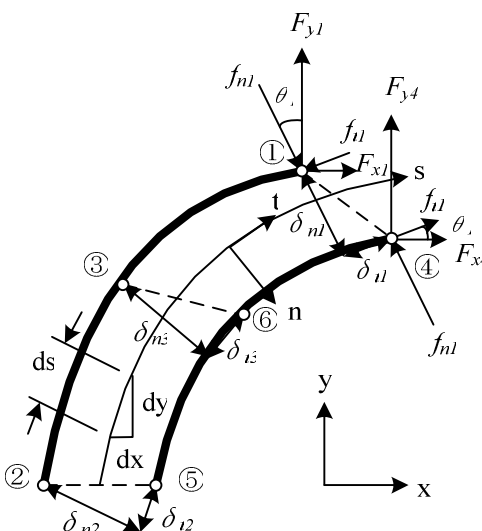


図2 接触要素の詳細図

1. はじめに

コンクリートは様々な外的・内的要因に影響されてひび割れが発生し、それによりコンクリート構造が予想以上に早く劣化する場合がある。このようなひび割れは、発生当初は微細であっても、外部環境（湿度、温度等）の影響を受けて、部材を貫く大きなひび割れへと発達することもある。そこで、本研究ではASRによって劣化したコンクリートを対象に、ASRによる膨張作用とひび割れ発生・進展を考慮したモデルを提案し、2次元有限要素解析を行うことにした。

2. ASRモデルの提案

2.1 ASRモデルの概要

本研究で提案したASRモデルを図1に示す。本モデルでは、コンクリートを骨材とモルタル、そして、全ての要素間にあらかじめ挿入した接触要素からなる複合材料として表現した。また、接触要素は骨材周辺に生成するアルカリシリカゲルの膨張作用とそれによるひび割れ進展を表現するために挿入したものであり、2.2で詳細に述べる。

図1に示すように、骨材は6節点からなる2次アイソパラメトリック三角形要素、モルタルは8節点からなる2次アイソパラメトリック四辺形要素で表現した。そして、これらの要素は全て線形弾性体と仮定し、接触要素に非線形な特性を導入することによって、コンクリートの非線形挙動の表現を試みた。

2.2 接触要素

図2に接触要素の詳細図を示す。接触要素は図2に示したように、モルタル要素間に発生するひび割れを表現するモルタルひび割れ要素、骨材を貫くひび割れを表現する骨材ひび割れ要素、そして骨材周辺に生成するアルカリシリカゲルの膨張作用を表現する骨材-モルタル界面に挿入したリング要素に区別した。

接触要素は、3節点からなる2つの2次アイソパラメトリック線要素として表現した。接触要素の節点は、骨材要素やモルタル要素とそれぞれ節点を共有している。また、接触要素は①-③-②と④-⑥-⑤の2つの曲線からなっており、ひび割れが発生するまでは節点①と④、②と⑤、③と⑥は空間上同じ位置を占めている。

まず、接触要素を表す2つの曲線の相対変位を2次元で表すため、接触要素の中心線に対して接線方向を t 、垂直方向を n とした t - n 座標を考える。そして、接線方向の相対変位を δ_t 、垂直方向の相対変位を δ_n で表す。また、ひび割れを介して伝達される応力を、ひび割れ面に対して垂直方向に σ_n 、接線方向に τ_t とする。このとき、ひび割れを介して伝達される応力と変位を関連づけるマトリクス $[C]$ を用いて、式(1)のような関係式が得られる。

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{nn} & C_{nt} \\ C_{tn} & C_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{bmatrix} = [C] \{\delta\}, \quad C_{nn} = E_c / t \quad (1)$$

ここで、応力ベクトル $\{\sigma\}$ は接触要素の任意点での応力である。また、マトリクス $[C]$ の係数 C_{nn} には非線形性を導入し、 C_{tt} は $C_{tt} = G/t$ (G :せん断弾性係数(N/mm^2), t :厚さ10(mm))、その他の係数は $0(\text{N/mm}^2)$ とした。それぞれの接触要素のヤング係数 E_c は、骨材ひび割れ要素 $E_{ca} = 20.0 \times E_{cb}$ 、リング要素 $E_{cr} = E_r \times E_{cb}$ 、モルタルひび割れ要素には引張軟化特性を

キーワード ASR, 有限要素法, アルカリシリカゲル, ひび割れ

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 電話 077-566-1111 (内線 6873)

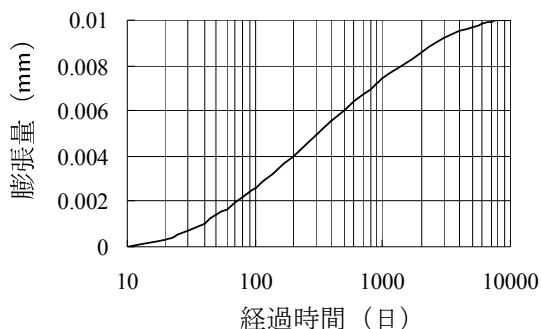


図3 膨張量－経過時間の関係

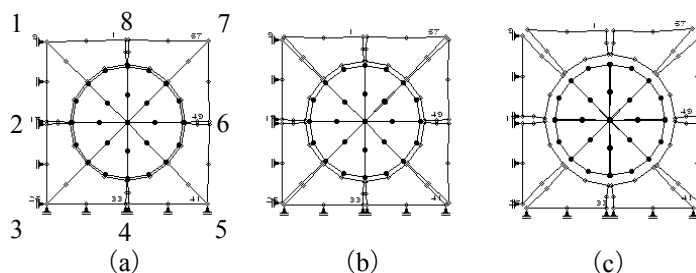


図4 ひび割れ進展過程

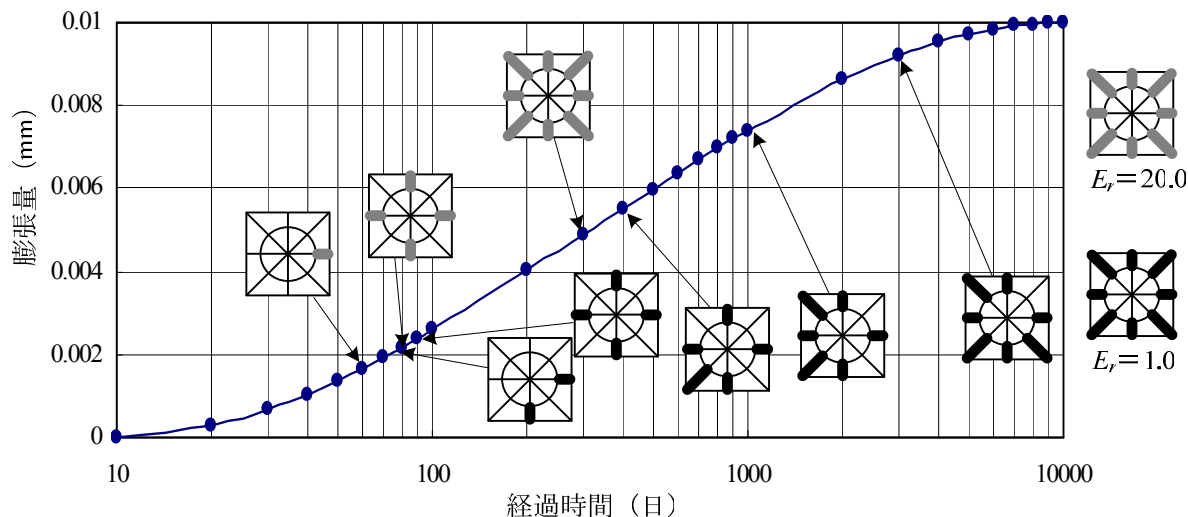


図5 ひび割れ発生時期

導入した（ここで、 $E_{c0}=3.0 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$ ）。

3. 解析結果および考察

3.1 解析概要

解析に伴い、リング要素には図3のような3次曲線の膨張量と経過時間の関係を導入した。時間の経過に伴い、リング要素の膨張量を増加させることで、ASRによる膨張作用を表現した。また、リング要素のヤング係数の E_r を変数として複数設定することにより、膨張作用に伴うひび割れ進展の違いを比較した。ここで、 E_r には、0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0の7水準を与え、それぞれ2000日まで解析を行った。

3.2 解析結果

ひび割れ進展過程の一例を図4に示す。これにより、リング要素の膨張に伴う((a)→(c))モルタルひび割れの発生・進展を確認することができた。さらに、モルタル要素間に発生するひび割れの発生順序を比較するため、図4(a)に示すようにモルタルひび割れ要素に番号を付けた。

E_r 値とひび割れ発生時期には相関関係が見られたため、比較した7水準中、代表的な $E_r=1.0$ と $E_r=20.0$ の2水準についてのひび割れ発生時期を図5に示す。これより、 E_r 値を高めるに伴い早い時期にひび割れが発生する傾向が見られた。また、各 E_r 値においての最初のひび割れが発生する箇所、その後ひび割れが発生する順序は不規則であった。しかし、モルタルひび割れ要素2, 要素4, 要素6, 要素8は早い時期に発生し、その後、順次、要素1, 要素3, 要素5, 要素7のモルタルひび割れが発生するという傾向は全ての E_r 値に共通して見られた。

本解析では、リング要素のヤング係数 E_r を変化させることにより、アルカリシリカゲルの剛性を増減させた解析を行った。リング要素の E_r 値を増加させると、アルカリシリカゲルの剛性は高まり、それに伴い、ひび割れ発生時期が早くなるという傾向を確認した。

4. まとめ

本研究では、コンクリートを骨材、モルタル、骨材－モルタル界面からなる複合材料として取り扱い、ASRによる膨張作用とそれに伴うひび割れの進展挙動を考慮した有限要素モデルを提案し、その基本特性について検討した。今後、本モデルをコンクリートのひび割れ進展に影響を与える湿度や温度等も考慮したモデルに発展させ、コンクリート構造の劣化進展の推測や耐久性の評価に役立てたい。