

進展期の ASR 膨張による表面ひび割れの発生に関する基礎解析

○中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 正会員 石川裕一
金沢大学名誉教授 フェロー会員 川村満紀
ジャパン測量 フェロー会員 青山實伸

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) により劣化したコンクリート構造物を適切に補修して維持管理するためには、ASR による膨張 (ASR 膨張) で構造物の表面に生じるひび割れの発生過程を把握することが重要と考える¹⁾²⁾。

既往研究により ASR 膨張は湿度に依存することや湿度が 80% 以下になるとその膨張は停止することが知られ³⁾、コンクリートのヤング係数も低下させる⁴⁾。さらに鍵本らのコンクリート円柱 ($\phi 45\text{cm} \times 90\text{cm}$) の ASR 膨張の実験では、表面から約 5cm まではコンクリートが乾燥するため ASR 膨張が少ない層 (非膨張層) があり、5cm 以上ではコンクリートの湿度が高く維持されるため ASR 膨張が継続する層 (膨張層) が存在することが報告されている⁵⁾。自然環境における構造物の ASR 膨張は、図-1 のコンクリートを打設し乾燥収縮を経て徐々に ASR 膨張が進行していく。構造物の維持管理上の問題である ASR 膨張の表面ひび割れは、乾燥収縮と ASR 自由膨張の和、見掛けの ASR 膨張の影響を受け、ASR 膨張のひび割れは進展期、加速期、劣化期と変化する。

本研究は進展期における ASR 膨張の表面ひび割れ発生の過程を数値解析する基礎を得るため、鍵本らの実験を対象にモデル化し有限要素解析 (FEA) を実施する。さらに、進展期の ASR 膨張に伴うヤング係数の低下が、表面のひび割れに及ぼす影響度合いを把握する。

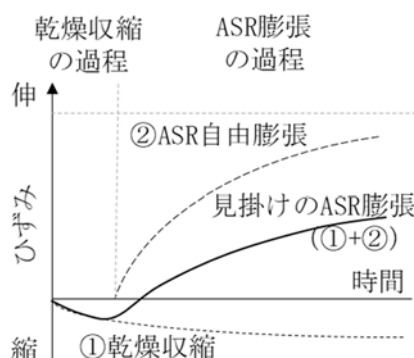


図-1 実構造物で問題とされる見掛けの ASR 膨張

キーワード：ASR、見掛けの ASR 膨張、ひび割れ発生過程

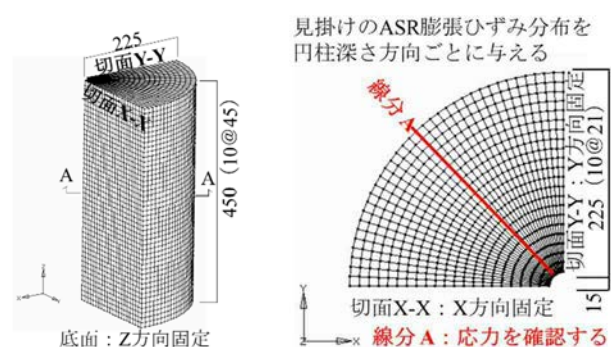
連絡先：〒918-8218 福井県福井市河増町 28 字 1-1 電話 0776-58-2720

2. 進展期の ASR 膨張を再現する弾性解析モデル

解析モデルは図-2 のようにコンクリート円柱 ($\phi 45\text{cm} \times 90\text{cm}$) の 1/4 とする。表面から 50mm を非膨張層、表面 50mm から 225mm を膨張層として表-1 の材料諸元を与える。なお、引張強度は圧縮強度の 1/10、ポアソン比 0.17 と仮定する。解析で考慮する進展期の ASR 膨張は鍵本らの実験⁵⁾より材齢 50, 100, 150, 200 日の円柱内部の見掛けの ASR 膨張の分布を図-3 の近似曲線でモデル化し、円柱深さごとに条件を与える。

表-1 進展期の ASR 膨張の解析に用いる材料の諸元

	圧縮強度 N/mm^2	ヤング係数 N/mm^2
非膨張層	32	2.9×10^4
膨張層	17	2.1×10^4



(a) 解析モデルの概図 (b) A-Aにおける要素分割

図-2 弾性解析モデル

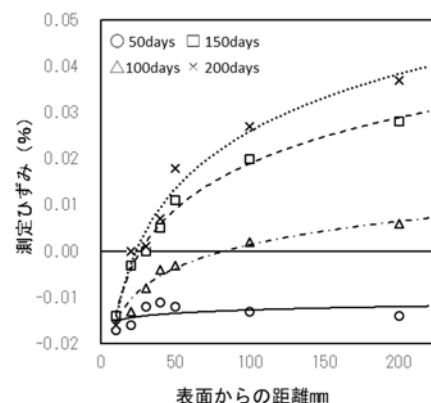


図-3 進展期の ASR 膨張の解析に用いる見掛けの ASR 膨張ひずみ分布

3. 進展期の ASR 膨張を再現する弾性解析の結果

(1) 円柱内部の最大主応力

材齢 50, 100, 150, 200 日における見掛けの ASR 膨張を作用させた FEA の最大主応力 (図-2b の線分 A) の分布を図-4 に示す。なお、図中の点線は引張強度の補助線であり、最大主応力が引張強度を超過するとひび割れが発生するとみなす。結果、最大主応力の分布が引張強度を超過し始める材齢は 100 日となる。材齢 100 日以降は時間経過に伴う見掛けの ASR 膨張により表面から 50mm の領域で最大主応力が増加し、引張強度を超過する最大主応力の範囲は深くなり、進展期の ASR 膨張により表面のひび割れは進展すると考える。

(2) 表面ひびわれ深さ

材齢 200 日の見掛けの ASR 膨張における線分 A (図-2b) の主応力ベクトルを図-5 に示す。円柱の最外縁 (図-5 要素 A) の主応力ベクトルは円周方向に外向き、引張応力 10.6N/mm^2 、垂直方向に引張応力 9.7N/mm^2 となる。いずれも引張強度を超過しており表面のひび割れは 2 方向と推定する。また表面から 50mm で円周方向に外向きの主応力ベクトルが分布し、引張強度を超過する範囲からひび割れ深さは約 30mm で生じると考える。

別途、FEA と実験結果を比較し、進展期の ASR 膨張による表面ひび割れの方法や深さはほぼ同じ傾向であることを確認している。以上から進展期における ASR 膨張の解析モデルの基礎を得たと考える。

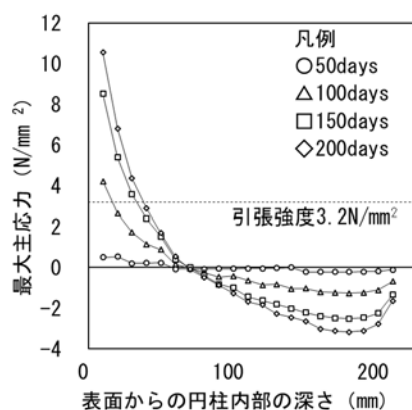


図-4 ASR 膨張による円形内部の最大主応力分布

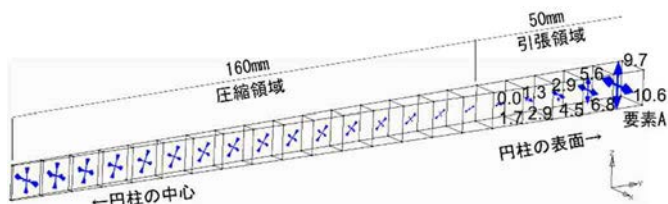


図-5 材齢 200 日、線分 A の主応力ベクトル分布

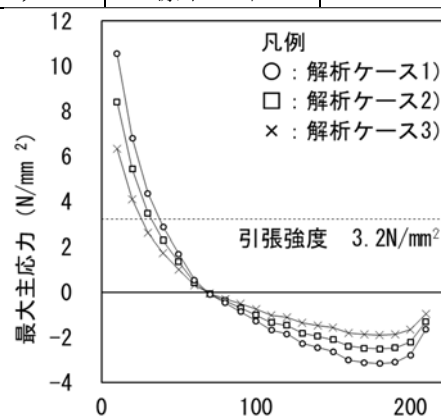
(3) ヤング係数の低下による表面ひび割れの影響

ASR 膨張はコンクリートのヤング係数を低下させる。進展期の ASR 膨張におけるヤング係数の低下が表面ひび割れに及ぼす影響を把握するため、図-2 の材齢 200 日における解析モデルを表-2 に変化させ、最大主応力の変化を調べる。なお、表-2 のヤング係数の標準は表-1 の値とし、引張強度、ポアソン比は前項と同様にする。

図-6 に結果を示す。ヤング係数が低下により表面の最大主応力は小さくなる。またヤング係数が低下すると引張強度も低下することが想定されることから、表面ひび割れの深さはあまり影響しないと推察される。

表-2 ヤング係数の低下による表面の最大主応力

解析ケース	ヤング係数	表面の最大主応力
1)	標準	10.6 N/mm^2
2)	標準×80%	8.4 N/mm^2
3)	標準×60%	6.3 N/mm^2



表面からの円柱内部の深さ (mm)

図-6 ヤング係数の変化による最大主応力の変化

4. まとめ

- (1) 進展期の ASR 膨張の解析により表面から 50mm の範囲で最大主応力が増加し、ひび割れは深くなった。
- (2) 実験と FEA を比較することで、進展期の ASR 膨張の解析モデルの基礎を得たと考えた。
- (3) ヤング係数低下は進展期の ASR 膨張に伴う表面ひび割れ深さにあまり影響しないと推察された。

今後は、加速・劣化期の ASR 膨張に伴うモデル化や、実構造物のモデル化を対象に研究していく予定である。

【参考文献】

- 1)有馬ら, 実際の ASR 劣化部材におけるひび割れ発生過程, コンクリート工学年次論文集 Vol.35, No.1, 2013
- 2)青山ら, ASR 劣化した無補強コンクリート部材の表面ひび割れの進行過程, コンクリート工学年次論文集 Vol.37, No.1, 2015
- 3)Stark, The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity, ACI-SP-126, 1991
- 4)Hobbs, Alkali-silica reaction in concrete, Thomas Telford Ltd., 1988
- 5)鍵本ら, 大型コンクリート円柱における ASR 表面ひび割れの発生メカニズム, コンクリート工学論文集, 第 25 巻, 2014