

立命館大学大学院 学生員○岡田次郎

(株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 橋場 盛

立命館大学 正会員 高木宣章 正会員 児島孝之

1. はじめに

最近、ASR 損傷を生じた構造物の鉄筋破断が報告されており、その補強対策が緊急の課題となっている。ASR により損傷した構造物の補強の際、補強後の膨張性状に対応した補強設計が重要である。本研究は、ASR によるひび割れが生じている PC 梁を含む橋脚を対象として、水の移動解析および応力解析を 3 次元有限要素法に基づき行うことで、水の逸散に伴う膨張性状がひび割れに及ぼす影響について検討を試みたものである。

2. 解析概要

解析対象には、ASR により損傷した PC 梁を選定した。図-1 に鋼材配置図を示す。梁内の総鋼材量（主鉄筋、スターラップ、PC 鋼材）は、体積比で 0.92% である。図-2 にひび割れ変状図を示す。

本解析では、①水の移動解析による解析対象梁における水の逸散性状の把握、②解析対象梁内の含水率分布から膨張ひずみ分布の仮定、③応力解析により解析対象梁に生じるひび割れ変状の再現の順で解析を行った。水の移動解析と応力解析には、汎用 FEM コード（MARC）を用いた。

水の移動解析は秋田らの手法¹⁾を参考にした（表-1）。水の移動解析ではコンクリートのみを対象とし、六面体要素と一部五面体要素を用いた。境界条件はコンクリート表面全域に与えた。

本解析では、解析対象梁内に ASR に不可欠な反応性骨材と高アルカリ環境が内在しており、梁内の膨張量の差が主として水分に依存すると仮定し、久保ら²⁾の膨張ひずみと含水率の関係を参考にしてその関係を定式化した。図-3 に久保らの膨張ひずみと含水率の関係を示す。膨張ひずみと含水率の関係には線形関係が認められるため、膨張ひずみと含水率の関係を式（1）に示すように一次式で近似した。

$$\varepsilon = 93.576R - 6372.9 \quad \text{ただし、}\varepsilon > 0 \quad \text{式（1）}$$

ここで、 ε ：膨張ひずみ（ μ ）、 R ：含水率（%）

表-1 水の移動解析手法¹⁾

相対含水率	$R = \phi / \phi_s$	ここで、 R ：相対含水率（%） ϕ, ϕ_s ：任意および飽水時の含水率（%）
拡散方程式	$\frac{\partial R}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad} R)$	R_0, R_0 ：乾燥面および雰囲気 の相対含水率（%） D, D_i ：任意および飽水時の 拡散係数（mm ² /day） n ：乾燥面の法線ベクトル f ：表面係数（mm/day）
境界条件	$D \frac{\partial R}{\partial n} + f(R_s - R_0) = 0$	
初期条件	$R(x, y, z) = 100$	
D/D_i - R 関係	$D/D_i = 1 / \{ 29 (1 - R/100) + 1 \}^{1.4}$	

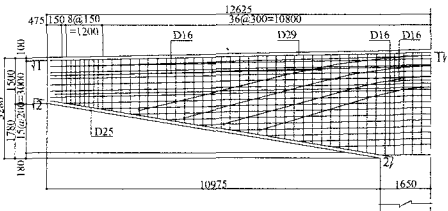


図-1 解析対象橋脚の鋼材配置図

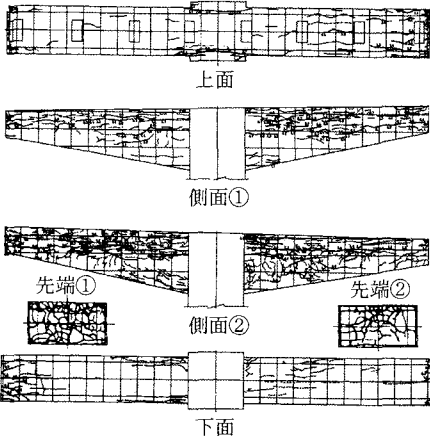


図-2 ひび割れ変状図

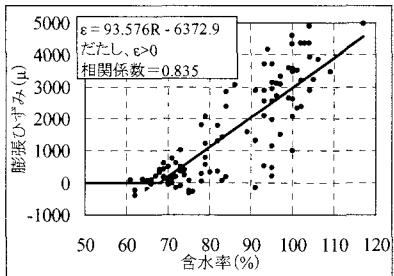


図-3 膨張ひずみと含水率の関係

プレストレスは、定着位置に節点力、自重は体積分布荷重に等価な節点力として与えている。上部工反力

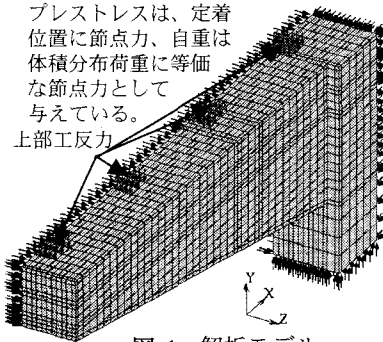


図-4 解析モデル

図-4 に解析モデルを示す。コンクリートと鋼材間は完全付着とした。表-2 に解析ケースを示す。コンクリートについて、ケースⅠは線形弾性とし、ケースⅡは引張軟化を考慮し、圧縮域は線形弾性として表現した。鋼材はバイリニアモデルとしている。

表-2 解析ケース

	目的	軟化
Ⅰ	応力分布の把握	無
Ⅱ	ひび割れの再現	有

3. 結果および考察

図-5 に3年経過時の含水率分布を示す。内部は高含水率状態となり、解析対象梁内には ASR の進行に十分な水が存在していることが確認できる。

本解析では、この含水率分布から式 (1) を用いて膨張ひずみを仮定した (図-6)。

図-7 にケースⅠの応力分布を示す。側面は Y 方向、上・下面は Z 方向の大きな引張応力が発生している。これは、梁内の膨張差が主として水分に依存している場合、梁断面に図-7 のような応力分布が形成され、表面の軸方向ひび割れが助長されることを示唆している。

図-8 にケースⅡから得られた梁表面の塑性ひずみの方向を示す。側面上部および上・下面の梁軸方向ひび割れ、側面下部の PC 鋼材配置方向のひび割れ、先端面の網目状のひび割れを形成する塑性ひずみが確認できる。これらの結果は、図-2 のひび割れと同様の傾向と考えられる。また、梁接合部上面 (図中の○印) では、相対的に大きな塑性ひずみが解析から確認されている。解析対象梁表面におけるひび割れの発生頻度を塑性ひずみの大きさから推定すると、梁接合部上面>先端面>側面上部、上・下面>側面 PC 定着位置となった。梁接合部上面において実測されたひび割れ幅は約 8mm と大きいことが報告されており、解析結果と一致する。

4. 結論

- (1) 水の移動解析を行い、本解析対象内の水分環境を予測した結果、内部は高含水率となり、ASR の進行に十分な水が存在することが確認された。
- (2) 解析対象梁内には、ASR に不可欠な反応性骨材と高アルカリ環境が内在している。梁内の膨張差が主として水分に依存している場合、梁断面には表面に引張応力、内部に圧縮応力が分布し、表面における軸方向のひび割れの発生が助長されることが考えられる。
- (3) 解析対象内の含水率分布に伴う膨張量に差をつけて解析することにより、実測されたひび割れ変状と一致するひび割れのパターンをほぼ再現できた。

謝辞：最後に、本研究を行うにあたり貴重な研究成果を御提供して下さった、金沢大学久保善司助手に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集, No.490, pp.101~110, 1994
- 2) 久保善司, 服部篤史, 栗原伸介, 宮川豊章: ASR により劣化したコンクリート構造物のシラン系表面処理による補修効果の検討, 土木学会論文集, No.690, pp.95~107, 2001

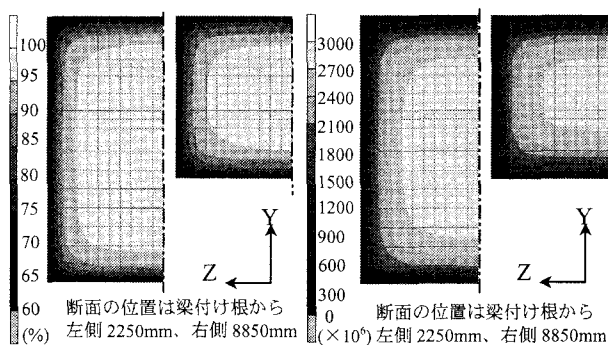


図-5 含水率分布 (3 年) 図-6 膨張ひずみ分布 (3 年)

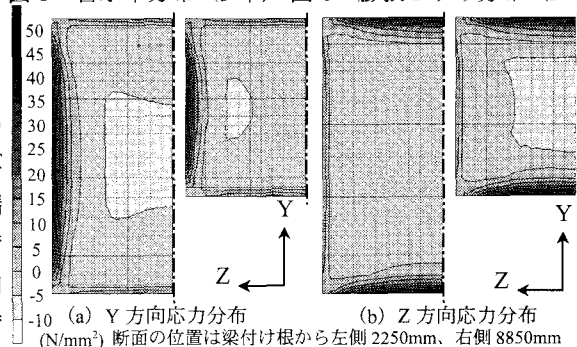
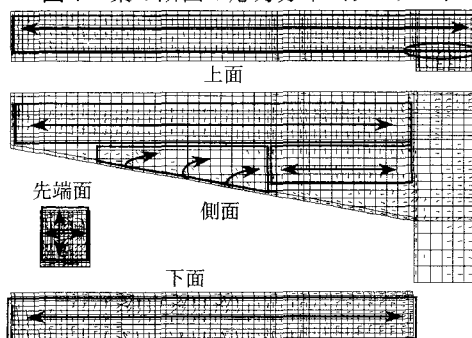


図-7 梁の断面の応力分布 (ケースⅠ)



注) 図中の矢印は、枠内の塑性ひずみの方向から予測したひび割れ方向

図-8 塑性ひずみの方向 (ケースⅡ)