

## 湿気状態の影響を考慮したPC橋脚のASR膨張性状評価

名古屋大学大学院 正会員 博(工) ○上田 尚史  
 名古屋大学大学院 正会員 博(工) 中村 光  
 名古屋大学大学院 正会員 博(工) 国枝 稔

Abstract : In this study, moisture diffusion analysis and ASR expansion analysis were combined in order to evaluate ASR expansive behavior of PC structure under different ambient conditions. ASR expansion of PC pier under wetted condition and drying condition were simulated by means of developed method. As a result, it was confirmed that ASR expansion of PC pier was strongly affected by not only structural factor such as prestress but also distribution of relative humidity. By considering effects of ambient conditions, both surface and inner expansion could be evaluated reasonably.

Key words : ASR expansion, Diffusion equation, Ambient condition, Relative humidity

## 1. はじめに

近年、高架橋をはじめとしたPC構造物において、アルカリシリカ反応（以下、ASR）により劣化が生じた事例が多数報告されている。ASRにより劣化したPC構造物を維持管理していくには、現状のASR劣化の程度を評価するとともに、将来にわたる劣化進展を適切に評価する必要がある。

PC構造物のASR劣化は、プレストレスの影響により方向性を持ったひび割れが生じることが特徴的であり、構造的な要因に大きく影響を受けることが知られている。一方、ASR膨張はコンクリートの温度や相対湿度の影響を受けることから、自然環境下のPC構造物においては、環境条件の違いによりASR劣化性状は異なるものと考えられる。

そこで本研究では、環境条件として温度や湿度等の物質移動問題を扱うことができるASR膨張解析手法を構築した。そして、特に湿気状態がPC構造物のASR膨張挙動に及ぼす影響について検討した。具体的には、水分移動解析を行うことで構造物内部の相対含水率分布を評価するとともに、ASR膨張解析において相対含水率の大きさに依存した自由膨張ひずみを与えることで、異なる環境条件下のPC橋脚のASR膨張性状の評価を試みた。

## 2. 解析概要

### 2.1 ASR膨張予測モデル

本研究では、3次元有限要素解析により、PC構造物のASR膨張解析を行った。ASR膨張挙動の評価には、著者らが提案しているASR膨張予測モデル<sup>1)</sup>を用いた。モデルの構築においては、小型の一軸拘束供試体を用いたASR膨張試験の結果を基にしており、湿潤状態下におけるASRを前提としたモデルである。本モデルは、膨張に伴い剛性が低下する割線型の構成モデルであり、自由膨張ひずみ  $\varepsilon_0(t)$  が生じた場合のコンクリートの応力  $\sigma(t)$  は、次式により算定される。

$$\sigma(t) = (1 - \Omega) E_{c0} \cdot (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_0(t) - \varepsilon_{creep}(t)) \quad (1)$$

ここで、 $E_{c0}$  はコンクリートの弾性係数、 $\varepsilon_c(t)$ 、 $\varepsilon_{creep}(t)$  は、それぞれ時刻  $t$  におけるコンクリートのひずみ、プレストレス等の能動的な応力により生じるクリープひずみである。また、 $\Omega$  は損傷を表すパラメータであり、無損傷の場合を 0 とし、膨張により損傷が蓄積されることで 1 へと漸近する単調増加関数として、次式のようにモデル化した。

$$\Omega = 1 - \left( \frac{1}{1 + 1000 \cdot \sqrt{\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{cr} - \varepsilon_{creep}(t)}} \right) \quad \varepsilon_c(t) > \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{creep}(t) \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{cr}$  はひび割れ発生ひずみであり、本研究では、 $\varepsilon_{cr} = 100 \mu$  を仮定した。

本モデルは、鉄筋等による拘束下の ASR 膨張挙動を精度良く評価できるモデルであり、これまでに RC ならびに PC 構造に対して適用性が示されている<sup>2)</sup>。

## 2.2 水分移動解析による相対含水率の評価

コンクリートの相対湿度は相対含水率と等しいものと仮定し、水分移動解析として次式に示す非定常の拡散方程式を解くことにより相対含水率を求めた。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla R) \quad (3)$$

ここで、 $R$  は相対含水率、 $D$  は水分伝導率、 $\nabla$  は微分演算子である。式(3)は次の境界条件のもとに解くことができる。

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha(H - H_\infty) = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\alpha$  は水分伝達率、 $n$  は乾燥面の法線ベクトル、 $H$ 、 $H_\infty$  はそれぞれ乾燥面および雰囲気相の相対湿度 (= 相対含水率) である。また、水分伝導率  $D$  は、次式<sup>3)</sup>により相対含水率依存性を考慮した。

$$D/D_1 = 1 / \{22(1 - R/100) + 1\}^{1.4} \quad (5)$$

ここに、 $D_1$  は初期水分伝導率である。なお、ASR劣化したコンクリートでは水分伝導率が変わることが考えられるが、本研究では、健全なコンクリートと同様であると仮定した。

本研究では、式(3)、(4)を差分法により時間に関して離散化し、陰解法により解を求めた。

## 2.3 自由膨張ひずみの相対含水率依存性

既往の研究<sup>4)</sup>より、ASR膨張はコンクリートの相対湿度が高いほど大きくなり、相対湿度が80%を下回ると膨張は生じないことが確認されている。本研究では、拡散解析から得られた相対含水率  $R$  を用いて、次式に示す低減係数  $\mu$  を乗ずることにより、自由膨張ひずみ  $\varepsilon_0(t)$  の低減を行った。

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_{0n} = \sum_n \mu_n \cdot \Delta \varepsilon_{0n} \quad (6)$$

ここに、下添え字の  $n$  はステップを表している。 $\mu$  は相対含水率100%で1.0、80%で0.0とし、線形補完した。ただし、相対含水率80%以下では  $\mu$  は0.0とした。また、 $\Delta \varepsilon_0$  は相対含水率100%における自由膨張ひずみ増分である。

解析では、まず式(3)の拡散方程式を解くことでコンクリートの相対含水率分布を求め、得られた相対含水率から式(6)を用いて自由膨張ひずみの大きさを算定し、ASR膨張解析を行う。

## 4. 実構造物のASR膨張性状の評価

### 4.1 解析対象とASR劣化性状

本章では、実際にASR劣化が確認された実構造物を対象として、環境条件の違いが膨張性状に及ぼす影響について検討する。解析の対象は、

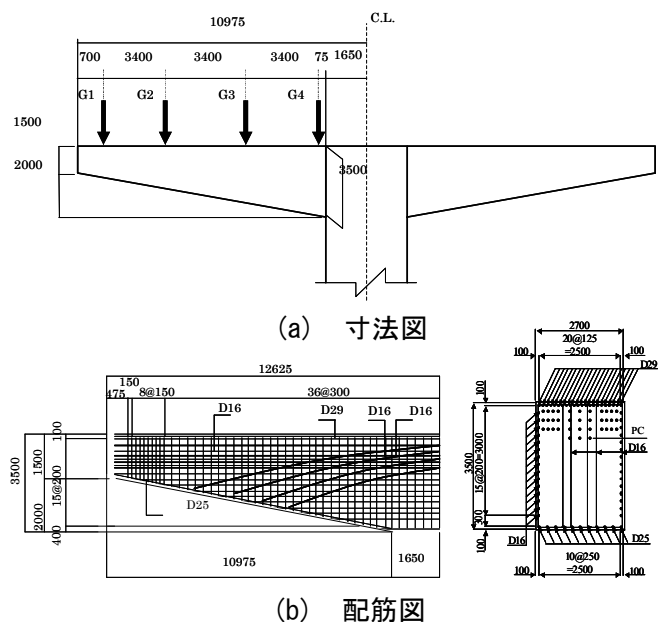


図-1 PC橋脚の概略図

都市内高速道路のT型PC橋脚である<sup>5)</sup>。対象橋脚の寸法および配筋図をそれぞれ図-1に示す。はりの主筋は21-D29でPC鋼材としてV-110Eが36本配置されている。PC鋼材を含めた断面の鉄筋比は、はり付根において0.61%である。スターラップは、3-D16が300mmピッチで配置されており、せん断補強筋比は0.15%である。導入プレストレスは、1本あたり815kNである。図-2にひび割れ性状を示す。はり全体に多数のひび割れが観察されているが、発生位置は大きく分けて、(A)はり付根付近の側面中央、(B)はり側面の上端側、(C)上面の中央ならびに橋脚上部張出部に分類することができる。また、下面においてもひび割れが確認されている。

#### 4.2 解析モデル

図-3に解析モデルを示す。軸方向、奥行方向の対称性を考慮して1/4モデルでモデル化した。鋼材はすべて離散鉄筋によりモデル化し、コンクリートとの付着特性を考慮した<sup>2)</sup>。なお、本研究ではASRによる付着特性の低下は考慮しないが、付着強度を低下させた解析を別途行った結果、付着強度が膨張挙動に及ぼす影響は小さいことを確認している。境界条件は、下端部を完全拘束とし、対象面は面外方向の変形を拘束した。

解析では、まずPC鋼棒に初期ひずみ与えることでプレストレスを導入した後、構造物の自重を要素ごとに節点力として作用させるとともに、上部工死荷重および活荷重相当の荷重を支承位置に作用させることで、初期状態を模した。なお、初期状態のひずみ分布性状は、ASR膨張によるひずみ分布性状の考察を行う際には、ほとんど無視できるものであった。その後、水分移動解析ならびにASR膨張解析を行った。PC鋼材に与えた初期ひずみは、それぞれのPC鋼材において所定の初期緊張力となるようにして決定した。上部工死荷重および活荷重として作用させた荷重は、図-3のG1~G4に対してそれぞれ、750kN、812kN、660kNおよび720kNとした。なお、初期プレストレスによるクリープ変形については、クリープ係数を2.0として考慮した。

水分移動解析ならびにASR膨張解析は、解析時間を1000日として行った。水分移動解析におけるパラメータは、構造物内部の湿度分布の違いが顕著に表れるように、初期水分伝導率  $D_1$  を  $5.0 \times 10^2$  mm<sup>2</sup>/day、水分伝達率  $\alpha$  を3.8 mm/dayとした。普通コンクリートと比較すると、初期水分伝導率は大きく、水分伝達率は小さい<sup>3)</sup>。ASR膨張解析では、相対含水率100%の状態における自由膨張ひずみ増分  $\Delta \epsilon_0$  を5  $\mu$ /dayと仮定し、全てのガウス点に一律に与えた。なお、本解析は、任意の自由膨張ひずみに対するASR劣化を評価するものであるため、実構造物の時間スケールとは必ずしも対応しないことに注意が必要である。

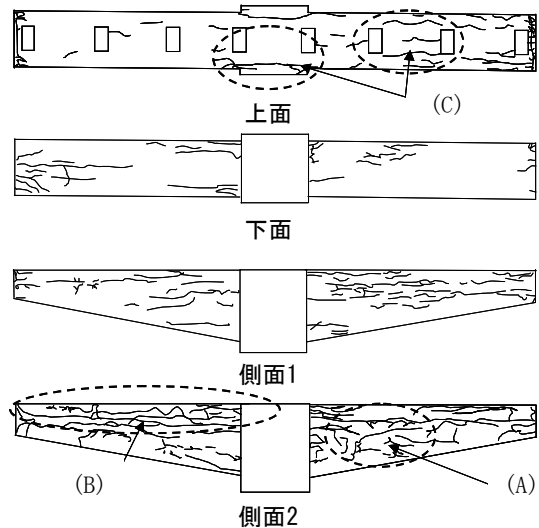


図-2 ひび割れ性状 (0.5mm 以上を图示)

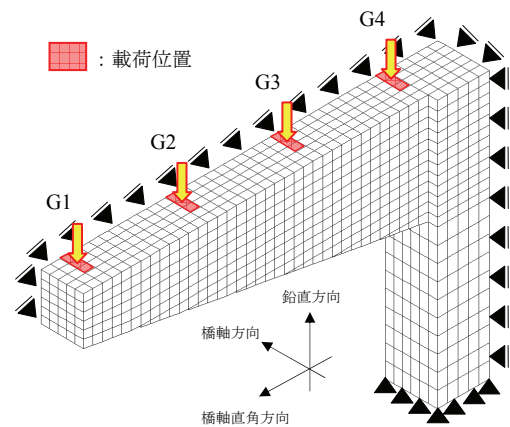


図-3 解析モデル

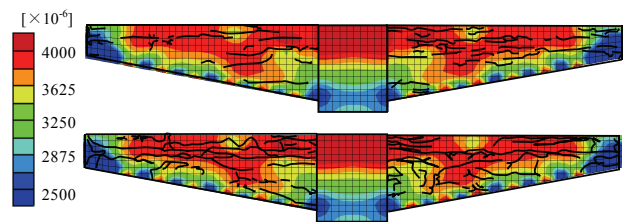


図-4 側面の鉛直方向ひずみ分布  
(一様な自由膨張ひずみを仮定)

### 4.3 一様なASR膨張を仮定した解析

図-4に、一様な自由膨張ひずみを仮定した場合の1000日目における側面の鉛直方向ひずみ分布をひび割れ性状と併せて示す。なお、ひずみ分布は対象性を利用して全体モデルとして示している。図より、側面の膨張は下縁で小さく上縁で大きくなっていることが確認できる。膨張が小さい領域は、PC鋼材が斜めに配置された領域と一致しており、PC鋼材が鉛直方向の膨張を拘束したものと考えられる。実際に観察されたひび割れ性状と比較すると、ひび割れが観察された領域において大きな膨張が生じており、特にひび割れ幅が大きい箇所では膨張が卓越する結果となった。

図-5に、はり断面内の橋軸方向ならびに鉛直方向のひずみの分布を示す。橋軸方向ひずみ分布からは、断面全体にわたり大きな膨張が生じていることが分かる。一方、鉛直方向ひずみ分布からは、側面で膨張が大きく生じているものの、断面中心においては、膨張が抑制される結果となった。鉛直方向はせん断補強筋による拘束の程度が大きいため、膨張は抑制されるのに対して、橋軸方向は拘束の程度が小さいため、断面内で自由膨張ひずみと同程度の膨張が生じたものと推察される。

以上のことから、一様な自由膨張ひずみを仮定した場合においても、側面の鉛直ひずみ分布により、表面のひび割れ性状を評価できることが示された。ただし、断面内のひずみ分布性状については、必ずしも実際の膨張性状を表現しているとはいえず、内部の膨張性状の評価を行うためには一様な自由膨張ひずみを仮定することは適切ではないと考える。

### 4.4 相対含水率に依存した自由膨張ひずみを仮定した解析

実構造物の環境条件は、日射や降雨の影響を受け複雑である。本研究では、構造物の環境条件として湿気状態のみに着目し、(1)側面から常に水分が供給されている場合(側面湿潤環境下)、(2)周囲の湿気状態が構造物内部に対して乾燥している場合(乾燥環境下)の2つの理想的な湿気状態を想定し、湿気状態が膨張性状に及ぼす影響を解析的に検討した。

#### (1) 側面湿潤環境下におけるASR膨張性状

水分移動解析における解析条件として、構造物内部の初期の相対含水率を90%とし、構造物表面を乾燥面として、側面の雰囲気相対湿度を100%、その他の面の相対湿度を80%と仮定した。図-6に100、500、1000日目における相対含水率分布を示す。図より、時間の経過に伴い側面の相対含水率が増加していくとともに、上下面の相対含水率は低下する傾向にあることが分かる。1000日目においては、側面は相対含水率は、ほぼ100%となっており、上下面では

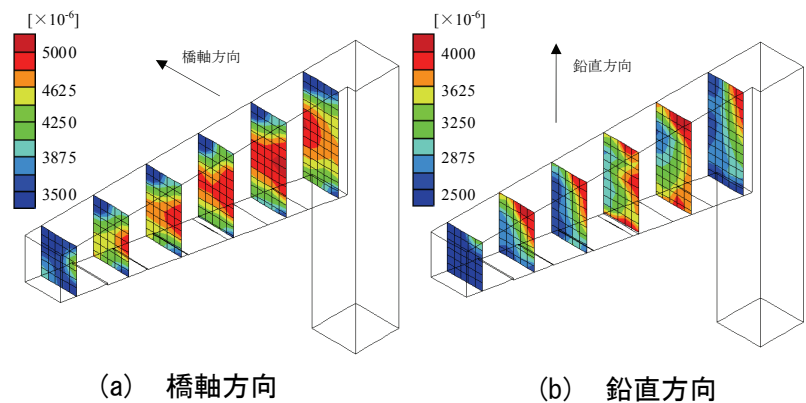


図-5 断面内のひずみ分布 (一様な自由膨張ひずみを仮定)

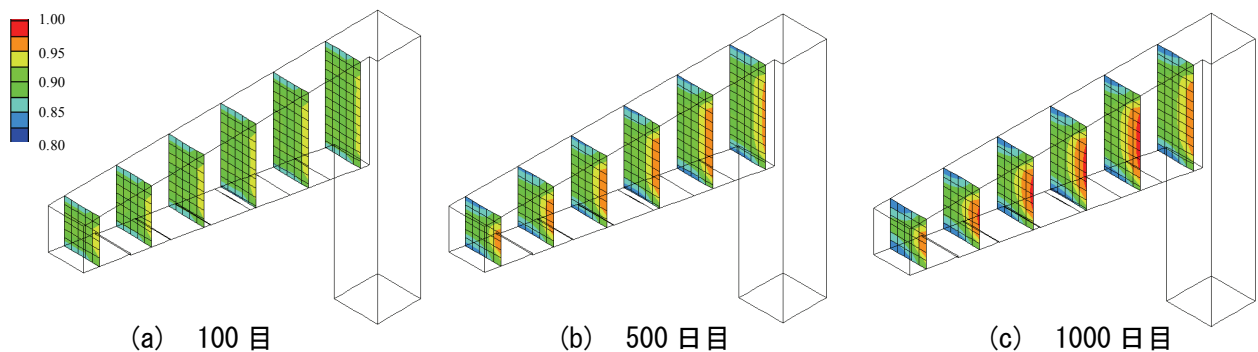


図-6 相対含水率分布の経時変化 (側面湿潤環境下)

80%近くまで低下する結果となった。

図-7に、1000日目における側面の鉛直方向ひずみ分布をひび割れ性状と併せて示す。側面の高さ中央の広範囲の領域において膨張が卓越していることが分かる。上縁近傍における膨張が小さいことを除けば、一様な自由膨張ひずみを仮定した解析と同様の膨張性状となっており、実際のひび割れ性状と良い一致を示している。

図-8に、はり断面内の橋軸方向ひずみならびに鉛直方向ひずみの分布を示す。橋軸方向ひずみ分布、鉛直方向ひずみ分布ともに、側面での膨張が卓越しており、上下面での膨張は小さくなっていることが分かる。この結果は、図-6の相対含水率分布から得られる自由膨張ひずみの違いが直接表れた結果であると考えられる。自由膨張ひずみを一様に与えた場合と比較して、断面中心での膨張が小さくなる結果となっており、相対含水率に依存した自由膨張ひずみを仮定することで、構造物内部に生じる膨張の分布性状を評価することができたものといえる。

(2) 乾燥環境下におけるASR膨張性状

水分移動解析における解析条件として、構造物内部の初期の相対含水率を100%とし、構造物表面を乾燥面として雰囲気相対湿度を80%と仮定した。図-9に100, 500, 1000日目における相対含水率分布を示す。上下側面ともに表面近傍では、100日目において既に相対含水率は90%程度まで低下しており、時間の経過とともに徐々に内部の相対含水率が低下していることが分かる。1000日目においては、断面中心では相対含水率は100%を維持しているが、表面では90%以下となっていることが分かる。

図-10に、1000日目における側面の鉛直方向ひずみ分布をひび割れ性状と併せて示す。前項で示した側面湿潤状態下における膨張性状と同様に、側面の高さ中央の領域において膨張が卓越する結果が得られている。ただし、膨張が卓越する領域は前項と比較して小さく、また、上下縁に向かうに従い膨張量はより小さくなっていることが分かる。これは、当該個所の相対含水率が前項の解析結果と比較して小さくなっているためである。図-11に、はり断面内の橋軸方向ひずみならびに鉛直方向ひずみの分布を示す。橋軸方向ひずみ分布は、断面中心において膨張が卓越しており、表面に向かうに従い膨張が小さくなっている。これは、図-9の相対含水率分布から得られる自由膨張ひずみの違いが直

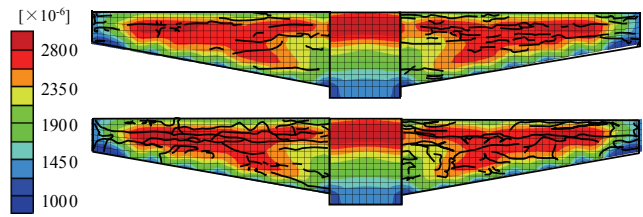


図-7 側面の鉛直方向ひずみ分布 (側面湿潤環境下)

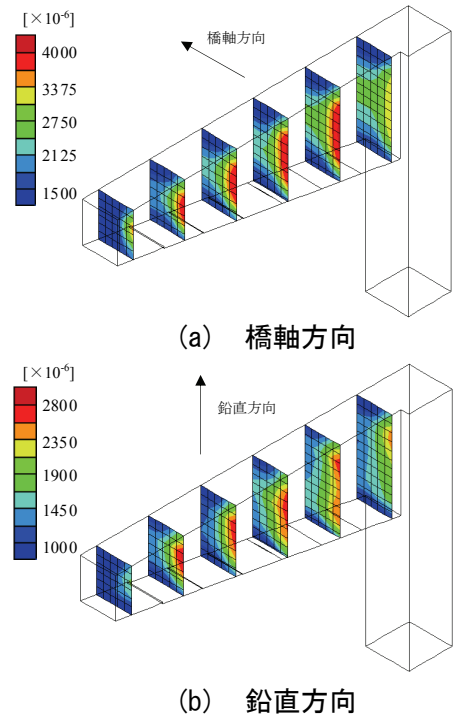


図-8 断面内のひずみ分布 (側面湿潤環境下)

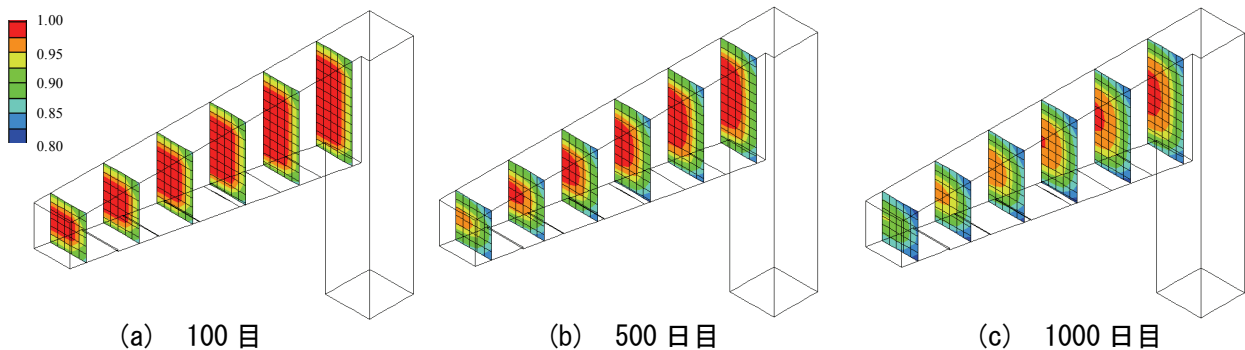


図-9 相対含水率分布の経時変化 (乾燥環境下)

接表れた結果であるといえる。一方、鉛直方向ひずみ分布は相対含水率分布とは異なる傾向にあり、側面の高さ中央位置において膨張が卓越し、断面中心では抑制される結果となっている。これは、断面中心の自由膨張ひずみは大きいものの側面における自由膨張ひずみは小さく、内部拘束が生じたためであると考えられる。すなわち、側面のコンクリートが拘束体となり、内部の膨張を抑制するとともに、それ自身が膨張に追従することで変形を生じ、表面に損傷が顕在化したものと推察される。

以上のことから、周囲の湿気状態が構造物内部に対して乾燥している場合においては、膨張性状は必ずしも相対含水率分布から判断はできず、鉄筋等の拘束の影響に加えて内部拘束の影響も考慮されなければならないといえる。

5. 結論

本研究では、水分移動解析を行うことで構造物内部の相対含水率分布を評価するとともに、ASR膨張解析において相対含水率の大きさに依存した自由膨張ひずみを与えることで、異なる湿気状態下のPC橋脚のASR膨張性状の評価を試みた。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 一様な自由膨張ひずみを仮定した場合、側面の鉛直方向ひずみから表面のひび割れ性状を概ね評価できるが、内部の膨張性状は適切に評価できないことを示した。
- (2) 側面から水分が供給される場合においては、相対含水率分布に依存した自由膨張ひずみの大きさの影響により、側面の膨張は卓越し、断面中心の膨張は小さくなることを示した。
- (3) 乾燥環境下においては、断面中心の自由膨張ひずみは大きいにも関わらず、側面の膨張が大きくなる傾向が得られた。これは、側面のコンクリートが拘束体となり、内部の膨張を抑制するとともに、それ自身が膨張に追従することで、表面に損傷が顕在化したためであると考えられる。

**謝辞**：本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発助成制度「政策課題解決型技術開発公募」の研究課題「ASR劣化構造物の力学性能推定技術の確立（研究代表者：宮川豊章）」の研究助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 上田尚史, 澤部純浩, 中村光, 国枝稔：アルカリ骨材反応によるRC部材の膨張予測解析, 土木学会論文集E, Vol. 63, No. 4, pp. 532-548, 2007.
- 2) 上田尚史, 中村光, 国枝稔, 前野裕文, 森下宣明, 浅井洋：コンクリート構造物におけるASR損傷と損傷後の構造性能の評価, 土木学会論文集E2, Vol. 67, No. 1, pp. 28-47, 2011.
- 3) 秋田宏, 藤原忠司, 小西俊之, 尾坂芳夫：コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 161-166, 1990.
- 4) 鍵本広之, 川村満紀：大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定によるASR表面ひび割れ発生過程の解明, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1225-1230, 2009.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー124, アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, 2005.

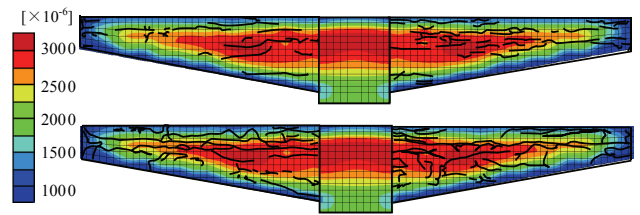


図-10 側面の鉛直方向ひずみ分布 (乾燥環境下)

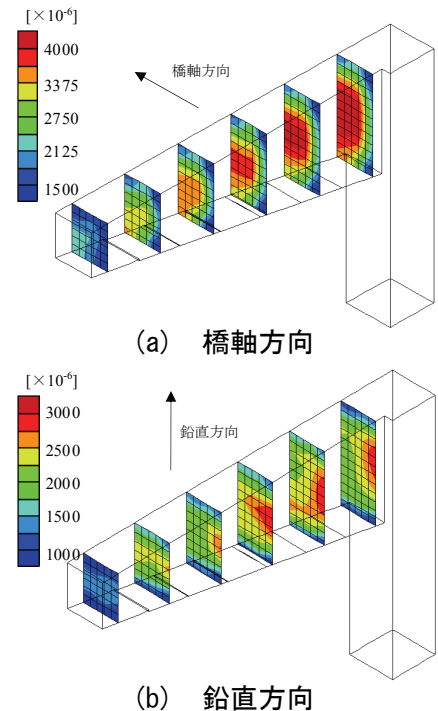


図-11 断面内のひずみ分布 (乾燥環境下)