

# PC 構造物の ASR 膨張性状に関する解析的評価

上田 尚史\*1・中村 光\*2・国枝 稔\*3

本研究では、著者らが開発した ASR 膨張予測モデルを用いて、PC 構造物の ASR 膨張性状に及ぼす種々の要因について検討を行った。ASR による劣化が確認された異なる 2 つの実 PC 橋脚を対象として ASR 膨張解析を行った結果、一様な自由膨張ひずみを仮定した場合であっても膨張ひずみが卓越する領域は構造物ごとにそれぞれ異なること、また、解析結果は実構造物において顕著な劣化が観察された領域をおおむね評価していることを示した。さらに、水分移動解析により構造物内部の湿気状態を評価し、相対含水率に依存した自由膨張ひずみを仮定した解析の結果、膨張ひずみが卓越する領域は必ずしも自由膨張ひずみが大きい領域とはかぎらないことを示した。とりわけ、構造物内部の膨張が大きい場合は、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する場合があることを示した。これらの結果から、PC 構造物において ASR 劣化する領域は構造的な要因により影響を受けるとともに、湿度等の環境条件によりその影響は顕在化することが解析的に示された。

キーワード：ASR 膨張解析、湿気移動解析、構造的要因、環境条件

## 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<sup>1,2)</sup>。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。

これまでに、ASR によるコンクリートの膨張性状や劣化進展挙動を評価するために、実験的な研究が数多く行われており、ASR に関するさまざまな知見が蓄積されつつある<sup>3~5)</sup>。しかし、実構造物を対象とした場合には、対象が大きいことや、配筋や境界条件が複雑であることから、実験的な評価は必ずしも容易でなく、解析的な検討が望まれる。

本報告では、ASR 劣化が確認された実 PC 橋脚を対象として、著者らが開発した ASR 膨張予測解析手法<sup>6~8)</sup>により ASR 膨張性状の評価を行うとともに、膨張性状に及ぼす構造的な要因ならびに環境条件の影響について考察を行った。

## 2. 解析概要

### 2.1 ASR 膨張モデル<sup>6)</sup>

ASR 膨張の特徴は、鉄筋等の拘束により膨張が大きく抑制される点である。また、ASR 劣化した PC 構造物においては、プレストレス導入方向に対して並行方向のひび割れが顕著に生じることも確認されていることから、解析に

おいては方向性を持った ASR 膨張挙動を評価することが重要である。

著者らは、図 - 1 に示すようにコンクリートと鉄筋（拘束体）の並列ばね系の力学モデルを考え、コンクリートのばねに対して次式に示す損傷理論に基づいた割線型の構成モデルを適用することにより、ASR 膨張予測モデルを提案している<sup>6)</sup>。

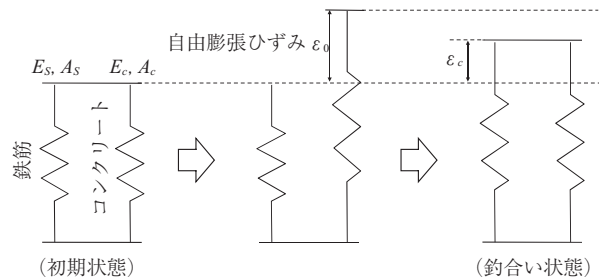


図 - 1 並列ばね系による力学モデル

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

ここで、 $\sigma(t)$  はコンクリートの応力、 $E_{c0}$  はコンクリートの弾性係数、 $\varepsilon_c(t)$ 、 $\varepsilon_0(t)$ 、 $\varepsilon_{creep}(t)$  は、それぞれ時刻  $t$  におけるコンクリートのひずみ、自由膨張ひずみ、および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

\*1 Naoshi UEDA：名古屋大学大学院 工学研究科 助教

\*2 Hikaru NAKAMURA：名古屋大学大学院 工学研究科 教授

\*3 Minoru KUNIEDA：名古屋大学大学院 工学研究科 准教授

た。

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

ただし、 $\varepsilon_c(t) > \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{creep}(t)$

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

本モデルの特徴は、膨張による損傷を直交異方性材料に適用することで、拘束力と方向性を考慮して拘束の影響を評価できることである。ただし、本モデルはクリープ等の時間依存性の変形も含んだマクロな膨張モデルであり、損傷パラメータ  $\Omega$  は実際の損傷を直接表現するものではない。また、ひび割れそのものの挙動も考慮しておらず、ひび割れの発生やひび割れ幅を直接評価することはできない。

本モデルを3次元FEMに適用した結果の例を図-2、3に示す。図-2は鉄筋比の異なる一軸拘束供試体のASR膨張挙動の実験結果<sup>9)</sup>との比較である。鉄筋比の違いにより膨張ひずみが抑制される挙動を妥当に評価できている。また、図-3は、PCはり部材のASR膨張挙動の実験結果<sup>10)</sup>との比較であるが、膨張の方向性や、プレストレスの大きさの違いによる膨張挙動を妥当に評価している。

このように、本モデルは、RC、PCのいずれに対しても、膨張挙動を妥当に評価できることが分かる。詳細については、参考文献(6)、(11)を参照されたい。

なお、本モデルは、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。

## 2.2 湿気状態の影響を考慮したASR膨張<sup>8)</sup>

### (1) 水分移動解析による相対含水率の評価

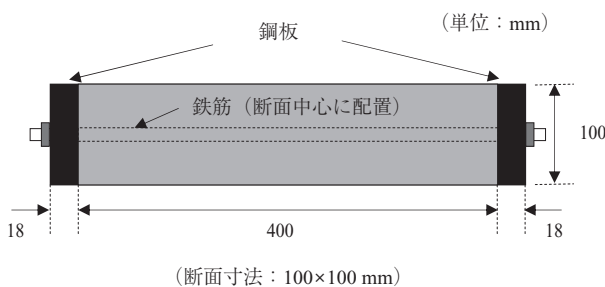
コンクリートの相対湿度は相対含水率と等しいものと仮定し、水分移動解析として次式に示す非定常の拡散方程式を解くことにより相対含水率を求めた。

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

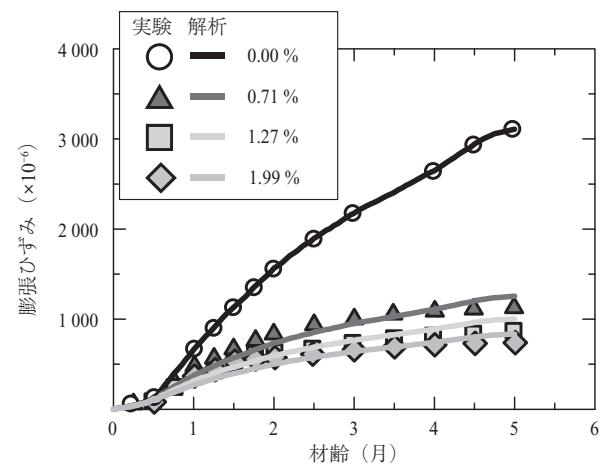
ここで、 $R$  は相対含水率、 $D$  は水分伝導率、 $\nabla$  は微分演算子である。式(3)は次の境界条件のもとに解くことができる。

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

ここに、 $a$  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内の相対湿度 (= 相対含水率) である。また、水分伝導率  $D$  は、次式<sup>12)</sup>により相

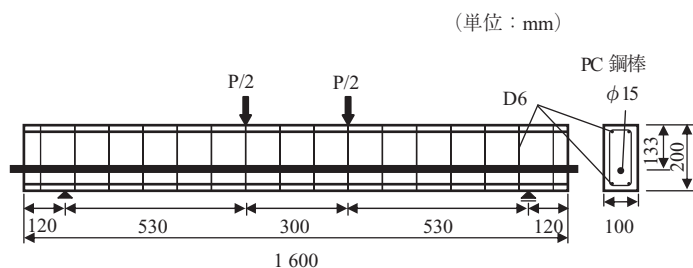


(a) 供試体概要

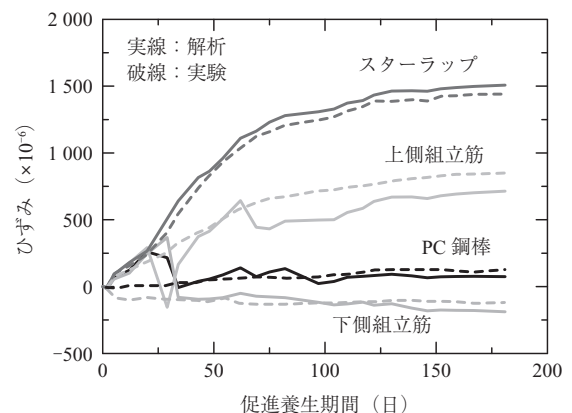


(b) 膨張ひずみの経時変化

図 - 2 一軸拘束供試体のASR膨張挙動の評価



(a) PC はりの概要図



(b) 各種補強筋のひずみの経時変化

図 - 3 PC はりのASR膨張挙動の評価

## ○ 研究報告 ○

対含水率依存性を考慮した。

$$D/D_1 = 1/\{2(1-R/100)+1\}^{1.4} \quad (5)$$

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化す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) 自由膨張ひずみの相対含水率依存性

既往の研究<sup>13)</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、 $\Delta \varepsilon_{0n}$  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。

## 3. 構造の違いが ASR 膨張性状に及ぼす影響

本章では、実際に ASR が確認された異なる2つの PC 橋脚を対象として、構造の違いが ASR 膨張性状に及ぼす影響について検討する。

### 3.1 解析対象と劣化性状の比較

解析の対象は、関西圏内の都市高速道路内の T 型 PC 橋脚 (A 橋脚)<sup>1)</sup> と中部圏内の都市高速道路内の T 型 PC 橋脚 (B 橋脚) である。それぞれの寸法ならびに配筋図を図-4に示す。A 橋脚では、はりの主筋は 21-D29 で PC 鋼材として V-110E が 36 本配置されており、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 300 mm 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 815 kN である。B 橋脚では、はりの主筋は、17-D32 で PC 鋼材として SWPR7B が 54 本配置されており、PC 鋼材を含めた断面の鉄筋比は、はり付根において 0.86% である。スターラップは 3-D19 が 200 mm ピッチ (最大モーメント位置は 100 mm ピッチ) で配置されており、せん断補強筋比は 0.32% (細密位置 0.64%) である。導入プレストレスは、1 本あたり 690 kN である。B 橋脚は A 橋脚と比較すると、全体として鉄筋量が多くプレストレスも大きいいため、ASR に対する拘束が大きい構造であるといえる。

図-5にそれぞれの橋脚で観察されたひび割れ性状を示す。A 橋脚では、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、① はり付根付近の側面中央、② はり側面上端側、③ 上面の中央ならびに橋脚上部張出し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。一方、B 橋脚では、はり上面において軸方向に多数のひび割れが確認されており、ひび割れ幅の大きなひび割れが中央に1本生じていた。側面にも若干のひび割れが観察されているが、A 橋脚と比較してひび割れの数は少ない。下面は、一部でコンクリートのはく離が確認されたが、ひび割れはほとんど生じていなかった。

### 3.2 解析モデル

図-6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。鋼材はすべてトラス要素により離散的にモデル化し、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 鋼棒に初期ひずみを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。その後、ASR 自由膨張を作用させることで 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

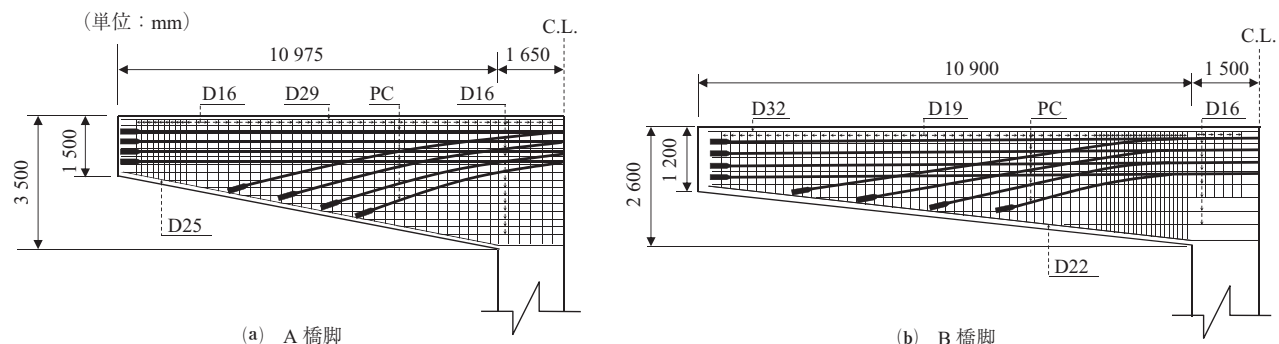


図-4 PC 橋脚の寸法と配筋図

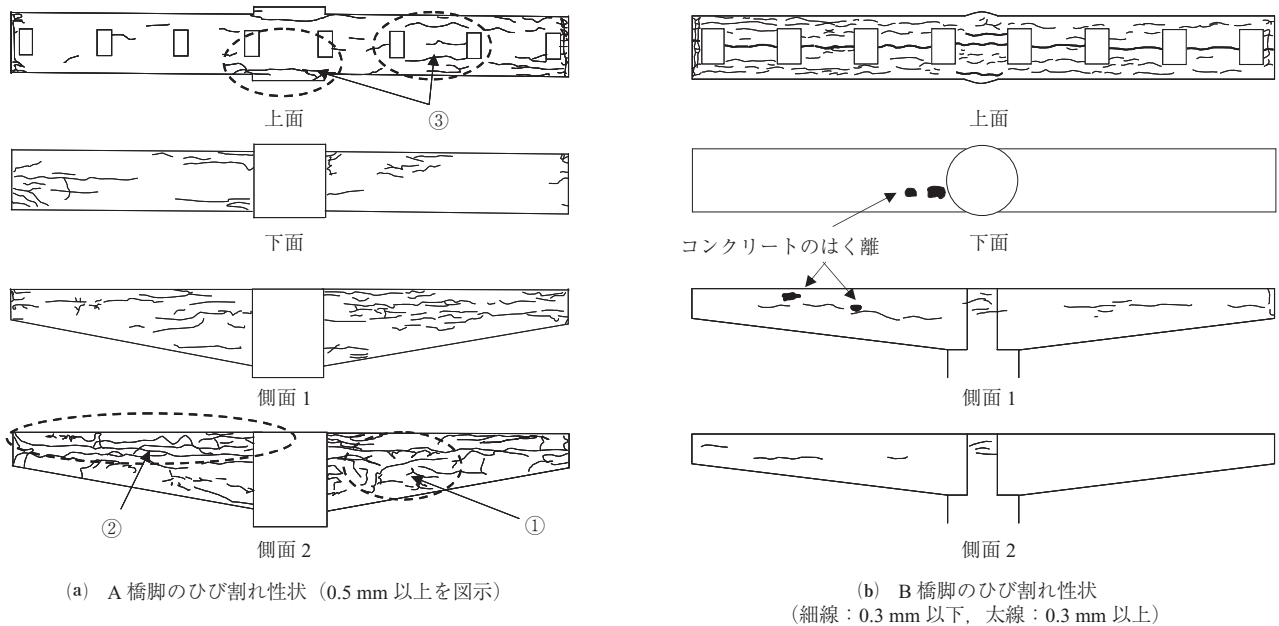


図 - 5 観察されたひび割れ性状

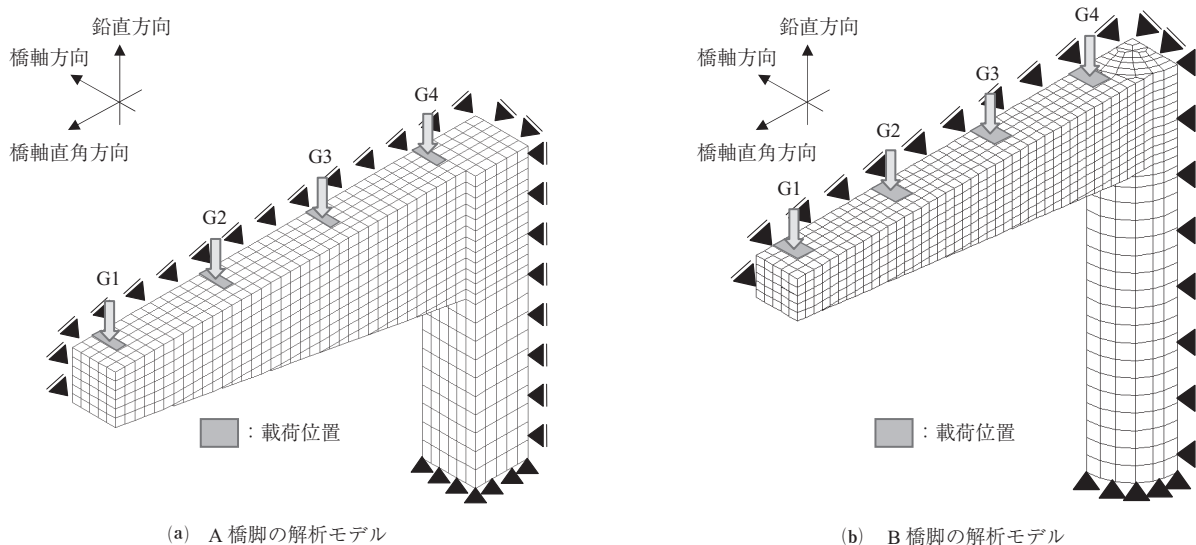


図 - 6 解析モデル

重は、図 - 6 の G1～G4 に対してそれぞれ、A 橋脚では、750 kN, 812 kN, 660 kN および 720 kN, B 橋脚では、410 kN, 737 kN, 736 kN および 800 kN である。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。

なお、本章では、構造の違いが ASR 膨張性状に及ぼす影響に着目するため、構造物全体で一様な自由膨張ひずみを仮定した。自由膨張ひずみは、1 000 日で 5 000  $\mu$  となるように線形的に漸増させ、全てのガウス点に一様に与えた。また、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。

### 3.3 解析結果

図 - 7 に、解析より得られた膨張ひずみ分布を示す。

側面のひび割れ性状を比較することを目的として、膨張ひずみは鉛直方向成分を示し、図中には実験で観察されたひび割れ性状を併記した。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 - 7 より、A 橋脚では、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ていることが分かる。一方、B 橋脚では、ひび割れが生じている高さ中央位置で膨張ひずみが卓越していることが分かる。それぞれにおいて膨張性状が異なる要因としては、B 橋脚は A 橋脚と比較して、せん断補強筋量が多いため側面の膨張が抑制されたものと考えられる。A 橋脚、B 橋脚ともに、膨張解析によりひずみが大きく生じている領域は実際のひび割れ性状とおおむね対応してい



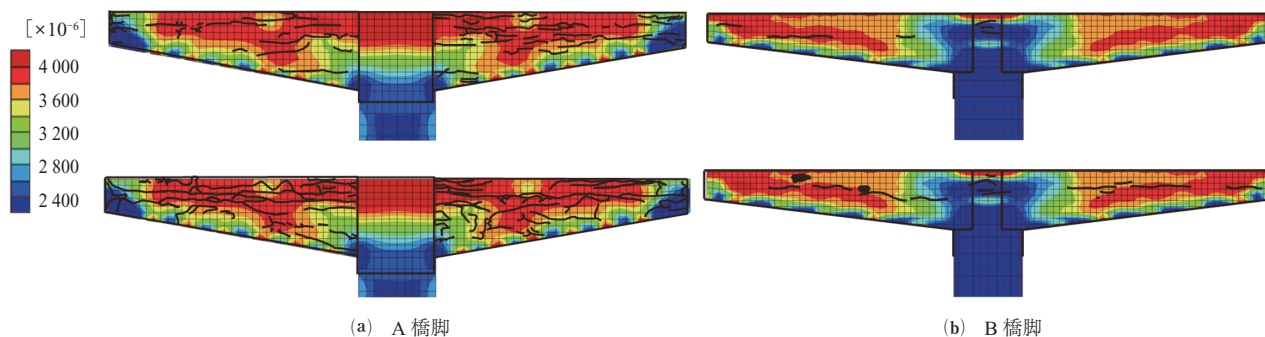


図 - 7 鉛直方向ひずみ分布とひび割れ性状の比較（側面図）

る。

本解析においては、自由膨張ひずみの与え方等の解析条件は、A橋脚、B橋脚ともに同様である。したがって、膨張ひずみの分布性状に違いが生じた理由としては、橋脚の形状や鉄筋やプレストレスによる拘束等の構造的な要因と推察される。解析上自由膨張ひずみをすべてのガウス点に等しく与えているにもかかわらず、解析より得られたひずみ分布性状が、実際のひび割れ性状と同様の傾向を示しているということを鑑みれば、ASRにより劣化損傷を生じる領域は構造的な要因に影響を受けることを示唆するものである。なお、ASRによるひび割れは、構造的な要因を基本として、温度や湿度、水分供給等の環境条件によりその影響が顕在化するものといえる。次章では、環境条件の影響として、湿気状態の影響がASR膨張性状に及ぼす影響について検討を行う。

#### 4. 環境条件の違いがASR膨張性状に及ぼす影響

本章では、環境条件の違いがASR膨張性状に及ぼす影響について検討を行う。構造物の環境条件としては、湿気状態のみに着目し、断面内部と側面の自由膨張ひずみの大きさの違いが顕著となるような条件として、(1)側面からつねに水分が供給されている場合（側面湿潤環境下）、(2)雰囲気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つの仮想的な湿気状態を想定し、湿気状態が側面の膨張性状に及ぼす影響を解析的に検討した。

解析は、前章で示したA橋脚を対象として行った。解

析モデルならびに解析手順は、前章と同様である。ただし、相対含水率に依存した自由膨張ひずみを決定するために、水分移動解析を行った後にASR膨張解析を行った。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 $5.0 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{day}$ 、水分伝達率 $a$ を $3.8 \text{ mm}/\text{day}$ とした。これらの値は、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>12)</sup>。また、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 $\Delta e_0$ は $5 \mu/\text{day}$ と仮定した。

##### 4.1 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-8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。1000日目においては、側面の相対含水率は、ほぼ100%となっており、上下面では80%近くまで低下する。

図-9に、図-7同様に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、一般的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-10に、はり断面内の橋軸方向ひずみならびに鉛直

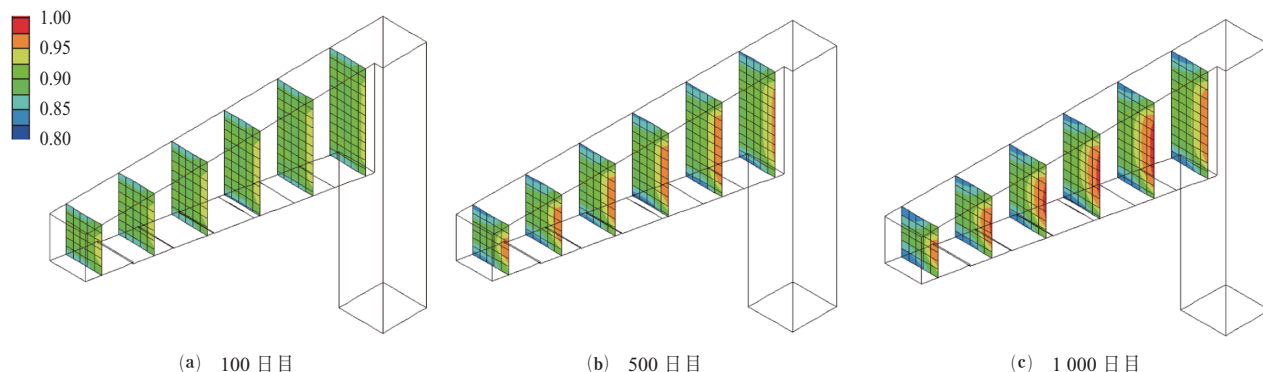


図 - 8 相対含水率分布の経時変化（側面湿潤環境下）

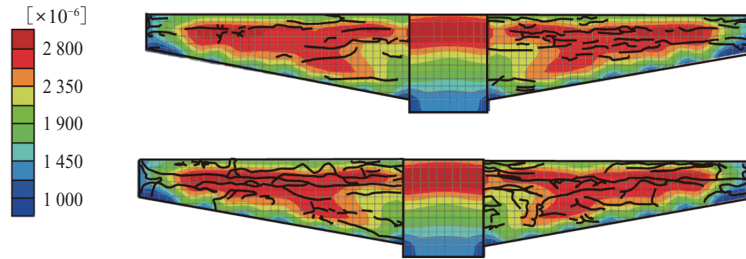


図 - 9 側面の鉛直方向ひずみ分布（側面湿潤環境下）

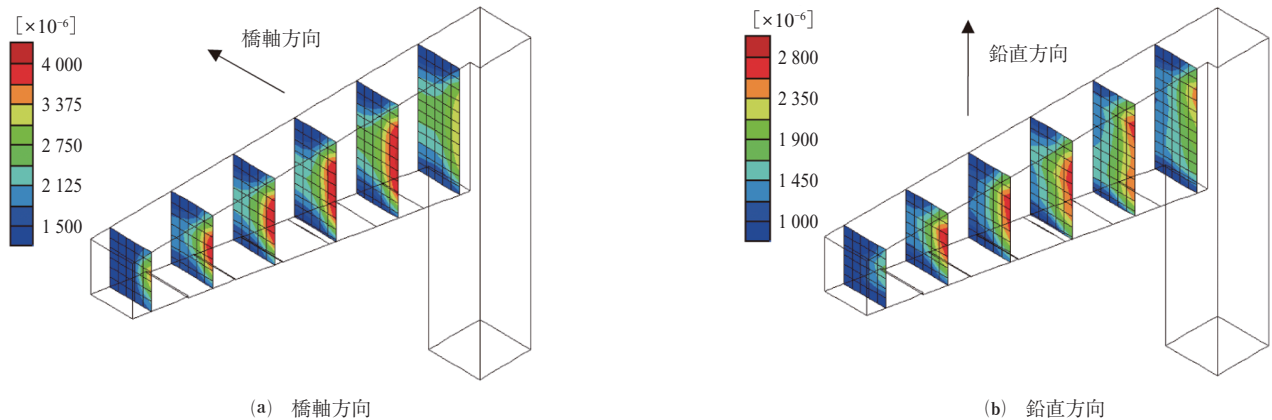


図 - 10 断面内のひずみ分布（側面湿潤環境下）

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 - 8 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。

#### 4.2 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 - 11 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 日目においてすでに相対含水率は 90 % 程度まで低下しており、時間の経過とともに徐々に

に内部の相対含水率は低下する。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 % 以下となる。

図 - 12 に、図 - 7, 9 同様に 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ひずみ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 - 13 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、前節同様に図 - 11 の相対

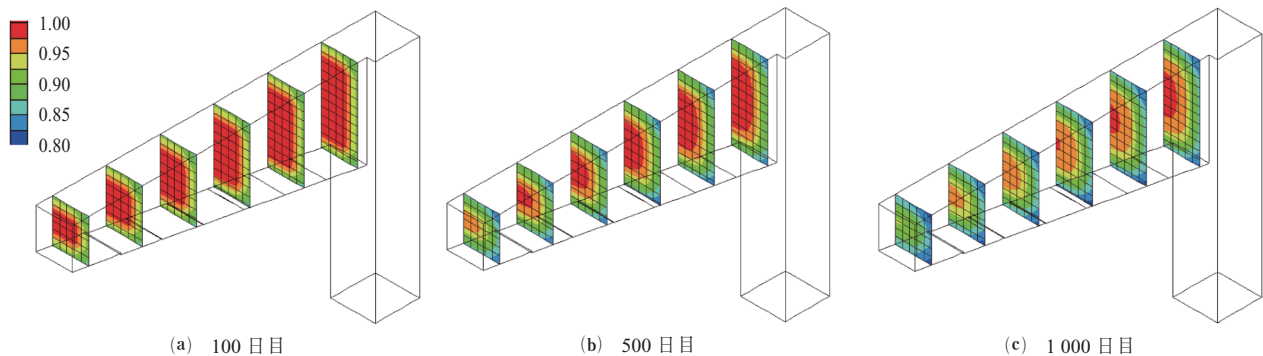


図 - 11 相対含水率分布の経時変化（乾燥環境下）

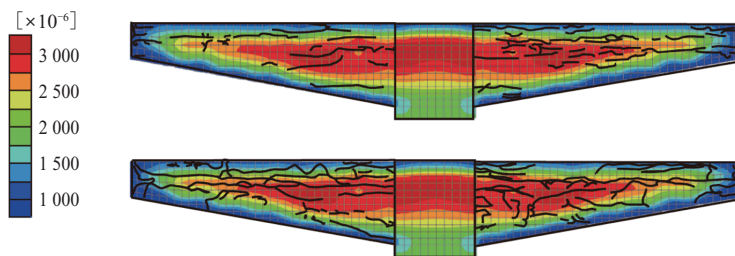


図 - 12 側面の鉛直方向ひずみ分布 (乾燥環境下)

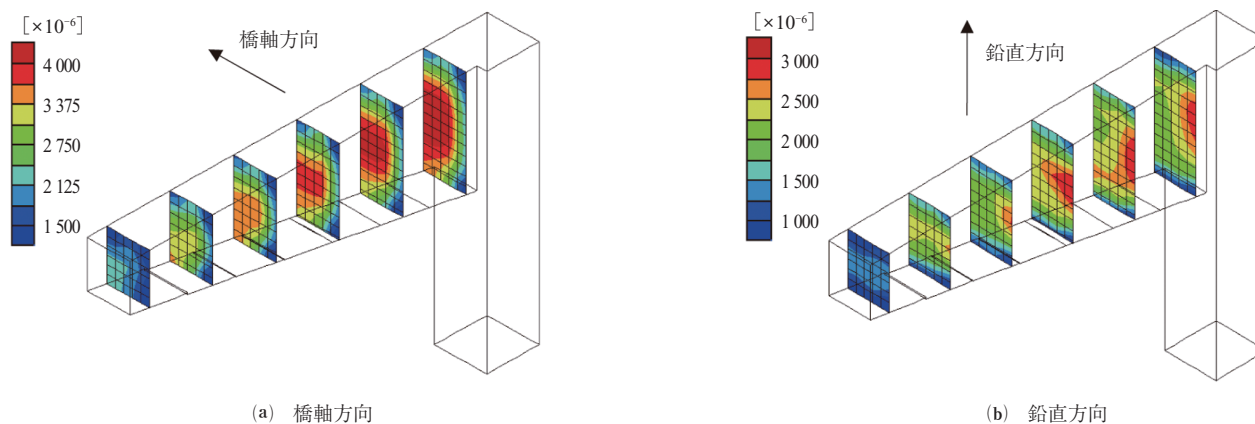


図 - 13 断面内のひずみ分布 (乾燥環境下)

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る。図 - 11 の相対含水率分布より、自由膨張ひずみは側面よりも断面中心の方が大きくなるが、図 - 13 (b) の解析より得られた膨張性状より、側面の高さ中央位置において膨張が卓越し、断面中心では側面よりも膨張が小さい結果となっていることが分かる。これは、側面の自由膨張ひずみが断面中心よりも小さいため、内部拘束が生じることで断面中心の膨張が抑制され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、雰囲気湿度が構造物内部に対して乾燥している場合には、より湿度の高い構造物内部において膨張が卓越すると考えられるが、本解析における膨張性状からは内部で膨張が卓越することはなく、必ずしも相対含水率分布から膨張性状を判断することはできないといえる。したがって、構造物の膨張性状を評価するためには、鉄筋等の拘束の影響に加えて相対含水率分布に起因する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. ま と め

本研究では、ASR 膨張解析を行うことにより PC 構造物の ASR 膨張性状に及ぼす各種の要因について検討した。以下に、本研究の結論を示す。

- (1) 異なる実 PC 橋脚を対象として一様な自由膨張を仮定した解析を行った結果、膨張性状がそれぞれ異なること

を示した。これは、形状や配筋、プレストレス等の構造的な要因の違いにより生じたものと考えられる。

- (2) 一様な自由膨張を仮定した解析であっても、膨張が卓越する領域は、実際の構造物において顕著な劣化が生じている領域をおおむね評価できていることを示した。
- (3) 側面から水分が供給される場合 (側面湿潤環境下) 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。
- (4) 構造物周囲の雰囲気が乾燥状態である場合 (乾燥環境下) においては、自由膨張ひずみは断面中心の方が側面よりも大きいにもかかわらず、構造物の膨張性状は側面の方が断面中心よりも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。

以上の結果から、PC 構造物において ASR 劣化する領域は、構造的な要因により影響を受けるとともに、湿度等の環境条件によりその影響が顕在化することが解析的に示された。

## 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) 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
- 2) 尾花祥隆, 鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008
- 3) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, 2008
- 4) 魚本健人, 古澤靖彦：アルカリ・シリカ反応によるモルタルバターの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.109-119, 1992
- 5) 川村満紀, 岩堀和馬：拘束下のモルタルにおいて発生するアルカリシリカ反応による膨張圧, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.3, pp.1-10, 2003
- 6) 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
- 7) 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 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.1, pp.28-47, 2011
- 8) 上田尚史, 中村 光, 国枝 稔：湿気状態の影響を考慮した PC 橋脚の ASR 膨張性状評価, 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.21, pp.69-74, 2012
- 9) 矢村 潔, 西村新蔵, 田中修一：鉄筋拘束がアルカリ骨材反応に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.135-140, 1989
- 10) 小林和夫, 井上 晋, 山崎應生, 中野錦一：アルカリ骨材反応を受けた PC はり部材の耐荷性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.615-620, 1987
- 11) 上田尚史, 中村 光, 国枝 稔：ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1261-1266, 2009
- 12) 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
- 13) 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

【2013年3月18日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

## コンクリート構造設計施工規準

### —性能創造型設計—

定 価 4,000 円／送料 500 円

会員特価 3,400 円／送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
技報堂出版