

# 論文 数値解析による ASR 劣化した PC 部材の変形挙動評価

上園 祐太\*1・幸左 賢二\*2・鄭 玉龍\*3・矢野 佑輔\*4

**要旨：** ASR 劣化した PC 部材の変形挙動を評価するため、ASR 劣化が確認された供試体を対象に、膨張ひずみ、および材料劣化を組み合わせた 3 ケースについて FEM 解析を実施した。両者を考慮した case1 では、実測値と解析値における変形挙動は概ね一致した。解析結果より、反り返りは軸方向ひずみの上下差により発生すると考えられ、膨張ひずみのみを考慮した case2 では鋼材比の差異により  $34\mu$ 、材料劣化のみを考慮した case3 ではプレストレスの偏心に伴い  $190\mu$  の軸方向ひずみの上下差が生じた。以上より、今回の解析条件においては、材料劣化が反り返り発生の主要因であると推察された。

**キーワード：** ASR, PC, 暴露試験, FEM, 変形, 材料劣化, 反り返り

## 1. はじめに

供用 30 年が経過したモノレール PC 軌道桁において、アルカリシリカ反応（以下、ASR）による劣化が認められた。現在までに反り返り量は、40mm 以上に達しており、耐荷性能、および使用性能の低下も懸念されている。また、ASR 劣化に伴い PC 部材の耐荷性能が低下したという事例<sup>2)</sup>も報告されている。しかしながら、現在までに、ASR が生じた実構造物レベルの PC 部材を用いて耐荷性能、および変形性状を評価した事例は僅少である。したがって著者らは、ASR を生じた PC 部材の長期的な劣化挙動の評価を目的に、反応性骨材を使用した大型 PC 桁供試体(No.1~4)を用いて、PC 部材の ASR 劣化性状を 5 年間にわたって評価することを全体計画とし、各材齢における載荷試験、および長期的な反り返り等の変形挙動の計測を行っている。表-1 に研究の全体計画を示す。No.1, 2 供試体については、ASR 劣化初期における載荷試験による耐荷力の評価、No.3, 4 供試体につ

いては、PC 部材の ASR 劣化性状評価を行っている。No.3, 4 供試体はほぼ同様の劣化傾向であることが確認されており、本稿では、より詳細な計測を行っている No.4 供試体を対象に検討を行った。

本稿では、材齢 1100 日が経過した No.4 供試体を対象に、ASR による材料劣化、および膨張ひずみを考慮した FEM 解析を行うことにより、ASR 劣化が PC 桁供試体の変形挙動に及ぼす影響、特に実験供試体で確認された反り返り挙動の発生メカニズムについて一考を加えた。

表-1 全体計画

試験項目		供試体No.			
		1	2	3	4
載荷試験	初期	●	●		
	劣化度中	△		△	
	劣化度大		△		△
暴露試験に伴う部材変状			○	○	○
変形挙動の解析的検討					○

●：実施済 △：実施予定 ○：実施中

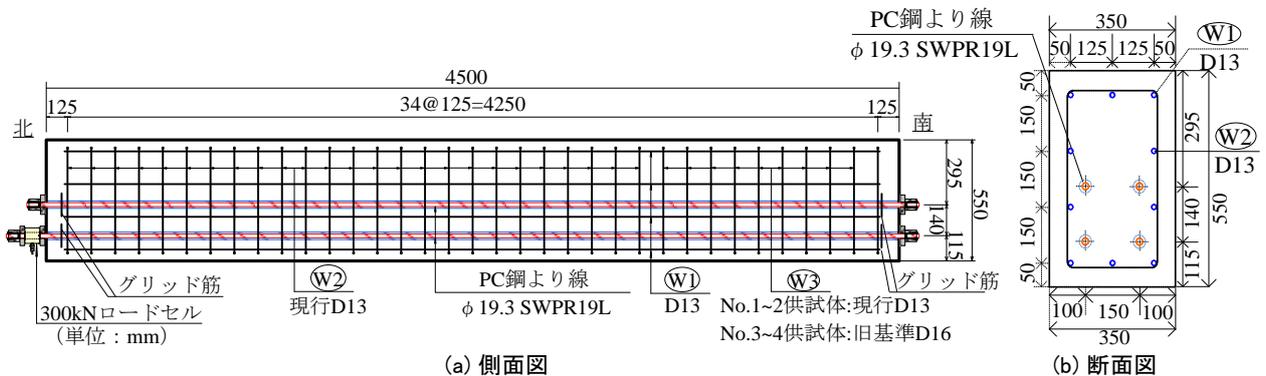


図-1 供試体概要

\*1 九州工業大学大学院 工学府 建設社会工学専攻 (学生会員)  
 \*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)  
 \*3 九州工業大学大学院 工学府 建設社会工学専攻 (学生会員)  
 \*4 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 (非会員)

## 2. 実験および解析概要

### 2.1 供試体概要

図-1に供試体側面図, 断面図を示す。本研究では, 供試体長さ 4500mm, 幅 350mm, 高さ 550mm の長方形充実断面からなる供試体を製作した。緊張方法は,  $\phi 19.3\text{mm}$  の PC 鋼より線を 4 本配置したポストテンション方式とした。鉄筋は SD345, D13 を軸方向鉄筋, 帯鉄筋にそれぞれ用いたが, No.3, No.4 供試体については, ASR による鉄筋損傷が発生した実構造物を模擬する目的で, 鉄筋損傷が確認された実構造物からは取り出した旧基準 (1985 年以前) 鉄筋で一部 (W3) の帯鉄筋を置き換えて使用している。なお, 帯鉄筋量は, 本供試体のモデルとした PC 軌道桁を参考に決定した。

セメントには普通ポルトランドセメントを使用し, 水セメント比は 46% (=W/C=175/381) とした。反応性骨材の岩種はいずれも安山岩とし, 細骨材に長崎県産砕砂を 60%, 粗骨材には北海道産砕石を 50%それぞれ使用した。また, ASR の促進を目的として, コンクリート中における等価アルカリ量が  $8\text{kg/m}^3$  となるように NaCl を添加した。なお, 実験供試体で用いた材料の物性値を表-2 に示した。

### 2.2 解析モデル

初期の荷重条件として, PC 鋼より線をモデル化した埋め込み鉄筋要素に引張応力を与えることにより, プレストレスを作用させた。また, コンクリートの要素寸法は,  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  とした。境界条件は, 端部から 250mm の位置とし, 一方は固定支承, もう一方は可動支承とした。なお, 解析は汎用解析コード DIANA9.4.4 を使用した。

実施した解析ケースの一覧を表-3 に示す。本稿で実施した解析 case は, 後述する材料劣化, および膨張ひずみの有無を組み合わせた計 3 ケースとした。材料劣化と膨張ひずみの両者を考慮したものを case1, 膨張ひずみのみを考慮したものを case2, 材料劣化のみを考慮したものを case3 とし, それぞれ解析を実施した。

### 2.3 鋼材モデル

図-2 に鋼材の応力-ひずみ関係を示す。構成則は Von-Mises の条件とし, 埋め込み鉄筋要素とした。鉄筋はバイリニア, PC 鋼材はトリリニアとして, 表-2 に示した鋼材の物性値を用いてモデル化を行った。なお, コンクリートが劣化した場合における付着の低下については, 本稿では考慮していない。

### 2.4 コンクリートモデル

図-3 にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。引張側については, 最大主応力基準を用い, 圧縮側については, Drucker-Prager を用いた。また, ひび割れモデルは, 多方向固定ひび割れモデルとした。

表-2 材料物性値

使用材料	材料物性値	
コンクリート (材齢28日)	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	48.0
	静弾性係数 ( $\times 10^4 \text{N/mm}^2$ )	3.27
PC鋼より線	0.2%降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	1773
	設計初期緊張力 ( $\text{N/mm}^2$ )	1116
	弾性係数 ( $\times 10^4 \text{N/mm}^2$ )	19.12
鉄筋 (W1,W2)	降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	365
	引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	554

表-3 解析ケース一覧

case No.	材料劣化		膨張ひずみ	
	圧縮強度	弾性係数	軸方向	鉛直方向
case1	50%低下		$700 \mu$	$2000 \mu$
case2	健全		$700 \mu$	$2000 \mu$
case3	50%低下		$0 \mu$	$0 \mu$

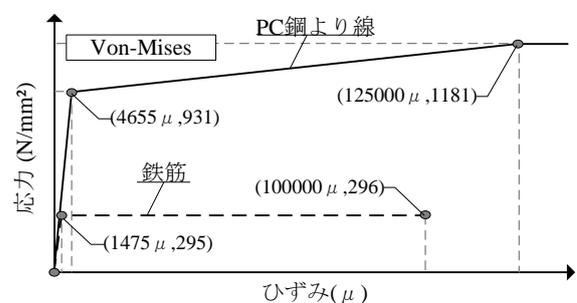


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

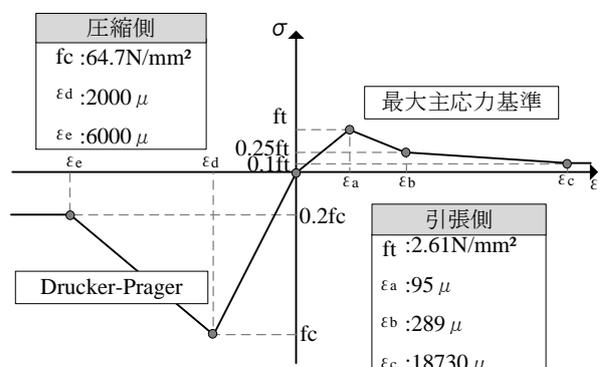


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

### 2.5 材料劣化モデル

解析では, ASR による材料劣化を考慮するため, PC 桁供試体と同時期に作製したテストピースによる強度試験結果を参考にモデル化を行った。コンクリート物性の経時変化を図-4 に示す。なお, 同図には, No.3 供試体の計測結果も併せて示した。図に示すように, 材齢 28 日の圧縮強度は No.3 で  $51.5\text{N/mm}^2$ , No.4 で  $48.0\text{N/mm}^2$  となっている。材齢 300 日ではそれぞれ  $70.0\text{N/mm}^2$ ,  $62.9\text{N/mm}^2$  となっており, 約 1.3 倍の強度増進が認められた。静弾性係数も同様であり, No.3 で  $3.59 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

から  $3.86 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ , No.4 では  $3.23 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  から  $3.70 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  に増加している。しかしながら、材齢 300 日から材齢 730 日までの期間で、圧縮強度は No.3 供試体では 14%, No.4 供試体では 29% の低下が認められた。また、静弾性係数も同じく No.3 供試体では 26%, No.4 供試体では 44% の低下が認められた。

以上より、材齢 730 日までの試験結果を参考に、材齢 300~1100 日における強度特性の経時変化を以下のように定めた。健全状態での圧縮強度、および弾性係数はそれぞれ  $64.7 \text{N/mm}^2$ ,  $3.24 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  とし、最終的な劣化状態では、同じく  $32.4 \text{N/mm}^2$ ,  $1.62 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  まで 50% 低下すると仮定し、劣化が開始した材齢 300~1100 日にかけて、単調に変化させた。

## 2.6 膨張モデル

本稿の解析で与える膨張ひずみ量は、No.4 供試体と配合、暴露条件がほぼ同様であり、供試体寸法  $340 \times 340 \times 900 \text{mm}$  で RC 供試体の屋外暴露試験結果を参考にした。なお、軸方向鉄筋比 2.97%, 帯鉄筋比 0.41% である。ここで、軸方向鉄筋比が大きい理由としては、参考とした RC 供試体は、PC 橋脚の梁部を模擬しており、鋼材の拘束条件を RC 単純梁に置き換えている。PC 梁の初降伏時の曲げ耐力が同等となる RC に換算した引張主鉄筋比 0.95% を基準とし、供試体 4 面で同様に鉄筋を配置したことから主鉄筋比は 2.97% となっている。図-5 に参考とした RC 供試体の鉛直方向、および軸方向ひずみの計測結果を示す。図中には、計測位置を併せて示した。計測値は、100 日ごろから膨張ひずみが発生し、その後、経時的に膨張ひずみは増加し続け、最終計測値である材齢 950 日では鉛直方向、軸方向それぞれ  $3000 \mu$ ,  $1000 \mu$  程度の膨張ひずみが計測された。

本稿では、材齢 300~1100 日を対象としたため、図-5 の結果を参考とし、以下に示す補正を行うことで、膨張ひずみを仮定した。図-5 中(A)に示すように、膨張傾向を模擬した近似直線の x 切片を図-6 中(B)に示すように、解析対象とした材齢 300 日に補正した。さらに、材齢 1100 日まで延長すると、鉛直方向、軸方向それぞれ  $2000 \mu$ ,  $700 \mu$  となった。以上より、本稿の解析では、材齢 300~1100 日にかけて、鉛直方向へは  $2000 \mu$ , 軸方向へは  $700 \mu$  の膨張ひずみを単調に与えることとした。なお、コンクリート要素に温度を与えることにより、膨張ひずみを与えた。

## 3. 実験および解析結果

### 3.1 変形挙動

図-6 に変形状況の計測方法を示す。供試体周りに設置した固定アングルと供試体上面の距離を、ディプスゲ

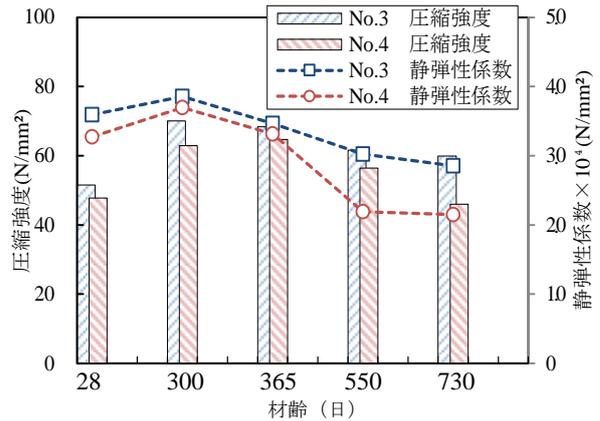


図-4 コンクリート物性の経時変化

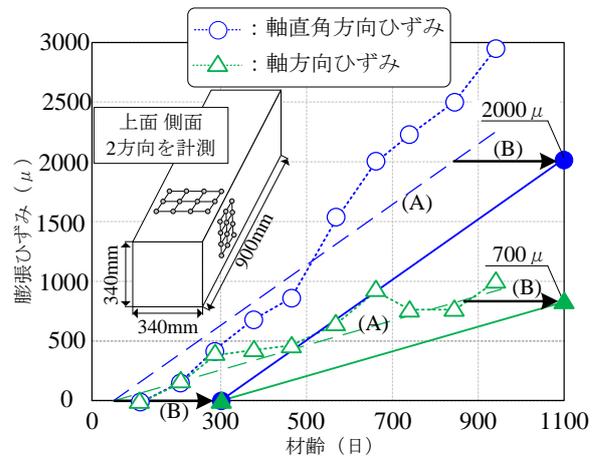


図-5 膨張ひずみの経時変化

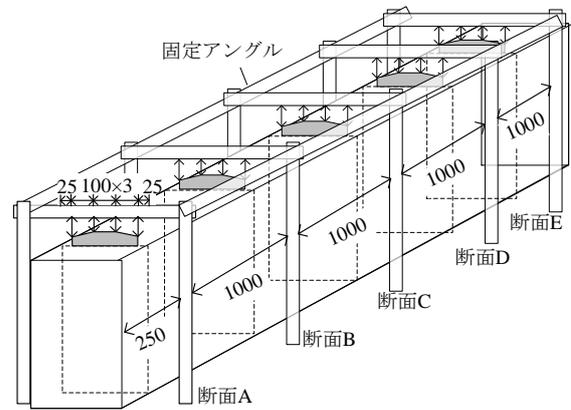


図-6 変形の計測方法

ージを用いて計測した。計測箇所は、隅角部より 25mm の位置を基点とし、100mm ピッチで計 4 点を断面 A~E の 5 つの断面を対象に計測した。また、変形状況の評価は、各断面につき 4 点の実測値の平均値を用いた。なお、計測は、材齢 400 日である。

図-7 に No.4 供試体(以下、実験供試体という)、および解析モデルの変形状況を示す。図には、中央部上面における鉛直方向、および上下の端部における軸方向の最大変位を示した。図中(a)に示した計測結果では、支点直

上の断面で 0.9mm, 1.1mm であり, 供試体中央部ほど大きな変位となり, 中央では 3.2mm の変形が生じた。次に, 図中(b)に示した case1 においては, 支点直上で 1.2mm であり, 実験供試体と同様に中央部ほど大きな変位となり, 中央部では 3.1mm の変位が生じた。また, 軸方向には, 上部で 1.6mm, 下部で 0.5mm の伸びが生じた。実験供試体では軸方向の変位が計測されていないが, 鉛直方向の変位から判断すると, case1 では実験供試体と同様の変形挙動を概ね再現できたと考えられる。次いで, 図中(c)に示した膨張ひずみのみを考慮した case2 では, 鉛直方向へは中央部において 2.2mm の変位が生じ, 軸方向へは上部で 2.3mm, 下部で 1.7mm の伸びが生じた。次に, 図中(d)に示した材料劣化のみを考慮した case3 では, 鉛直方向へは中央部において 1.8mm の変形が生じ, 軸方向へは上部で 1.1mm, 下側で 2.1mm の収縮が生じた。

図-8 に変形状況の比較を示す。図には, 評価対象とした A~E の 5 つの断面の上面における鉛直方向への変位を示した。実測値では, 端部の断面で 0.9mm, および 1.1mm となり, 中央の断面ほど変形し, 断面 C では 3.2mm の変位が生じた。材料劣化と膨張ひずみの両者を考慮した case1 では, 端部の断面で 1.2mm, 中央の断面で 3.1mm の変位が生じ, いずれの断面においても実測値とほぼ同程度の変位量であることが確認された。次いで, 膨張ひずみのみを考慮した case2 では, 端部の断面は case1 と等しく 1.2mm であったが, 中央の断面では 2.2mm の変位であった。材料劣化のみを考慮した case3 では, case1, および case2 とは異なり端部の断面で 0.1mm となり, 中央の断面では 1.8mm の変位量であった。ここで, 実測値, および case1, case2 の端部の断面では 1.0mm 程度の変位が生じている。鉛直方向へ与えた膨張ひずみ  $2000\mu$  による変位は  $1.1\text{mm}(=550\text{mm} \times 2000\mu)$  であり, 同程度であることから, 端部の断面における変位は, 鉛直方向ひずみに起因した変形であると考えられる。

また, 図中には, 各々の反り戻り量を併せて示した。反り戻り量は, 中央の C 断面から, 端部の A, E 断面の平均値を差し引いた値と定義した。実測値は 2.2mm, case1 は 1.9mm, case2 は 1.0mm, case3 は 1.7mm となった。

### 3.2 各 case のひずみ変化

図-9 に各 case の軸方向ひずみ分布を示す。ひずみの抽出は, 中央断面の上下縁における要素のガウス点の平均とした。まず, プレストレス導入直後の初期状態では, 上縁で  $-32\mu$ , 下縁では  $-261\mu$  となった。膨張ひずみと材料劣化を考慮した case1 では, 上縁で  $597\mu$ , 下縁では  $118\mu$  となり, 下部のひずみ量が小さい状態となった。次いで, 膨張ひずみのみを考慮した case2 では, 上側で 648

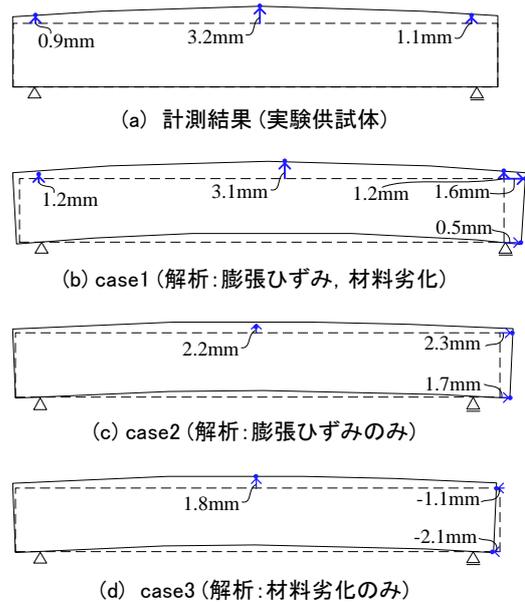


図-7 変形状況

※反り戻り量: C断面-A,E断面の平均値

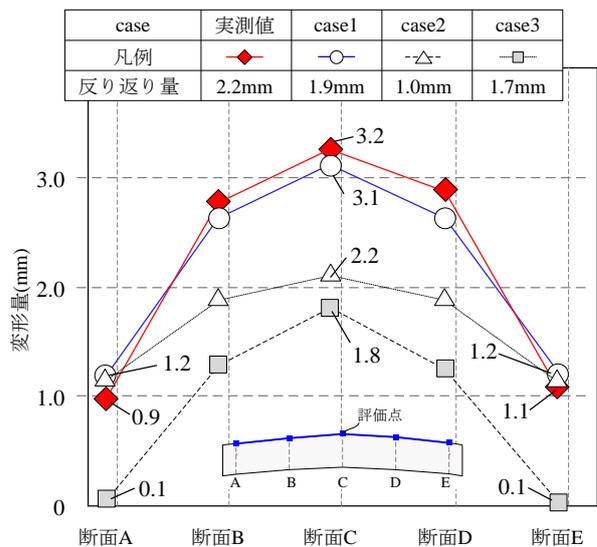


図-8 変形状況の比較

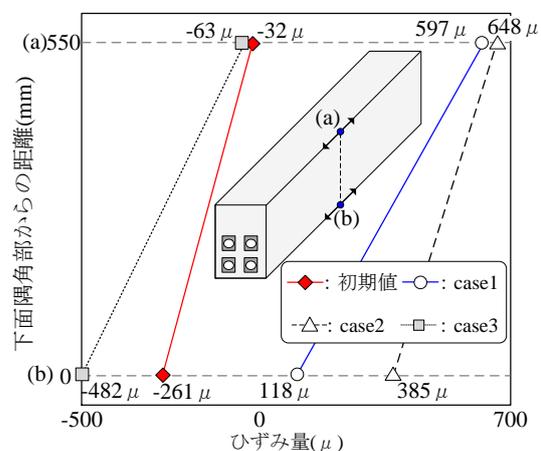


図-9 各caseの軸方向ひずみ

$\mu$ 、下縁では  $385 \mu$  であった。材料劣化のみを考慮した case3 では、上縁で  $-63 \mu$ 、下縁で  $-482 \mu$  となった。

#### 4. 反り返り発生要因の検討

材料劣化と膨張ひずみを考慮した解析を実施した結果、反り返り挙動の実測値を概ね再現できた。本稿では、材料劣化と膨張ひずみがそれぞれ反り返り挙動へ及ぼす影響について検討を行う。

##### 4.1 膨張ひずみに伴うひずみ変化

本節では、膨張ひずみのみを考慮した case2 のひずみ変化について検討を行う。図-10(a)に膨張挙動の模式図を示す。まず、初期状態に対し、自由膨張ひずみ  $\epsilon_0$  が与えられる。しかし、鋼材による膨張ひずみの拘束があるため、力の釣合と変形の適合条件を満たす以下の式(1)より、実際に生じる膨張ひずみ  $\epsilon_c$  を求められる。

$$\epsilon_c = \frac{E_c * \epsilon_0}{(p * E_s + E_c)} \dots (1)$$

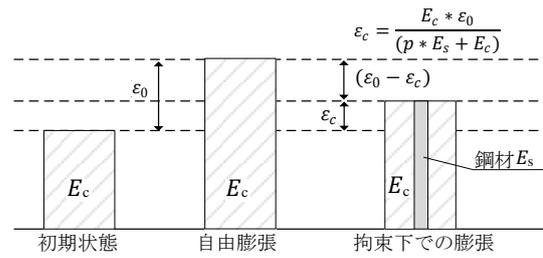
ここに、 $p$ ：拘束鋼材比、 $E_s$ ：鋼材の弾性係数、 $E_c$ ：コンクリートの弾性係数。

また、上下縁のひずみ量を算出するに当たり、鋼材比  $p$  を算出する必要があるため、本稿では上下縁における見かけの鋼材比を算出することとした。図-11に見かけの鋼材比を示す。まず、断面を上下に2等分し、それぞれの図心位置における鋼材比を算出した。上側で0.66%、下側で1.00%となり、この2点を結ぶ直線を延長し、上縁および下縁の鋼材比  $p$  を算出した。その結果、図に示すように、上縁で0.55%、下縁は1.19%となった。

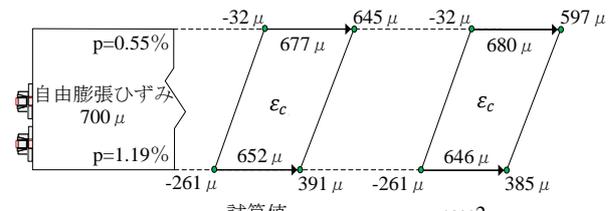
図-10(b)に膨張ひずみによる変化の試算値と解析値の比較を示す。膨張ひずみのみを考慮した case2 では、自由膨張ひずみ  $\epsilon_0$  は  $700 \mu$ 、弾性係数  $E_c = 3.24 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、鋼材比  $p$  については、前述の値であるため、上縁および下縁それぞれ式(1)より求めると、上縁で  $677 \mu$ 、下縁で  $652 \mu$  となった。鋼材による拘束が相対的に大きな下縁が上縁より  $25 \mu$  大きい結果となった。図-10(b)に示した case2 の解析値と比較すると、上縁では、試算値および解析値それぞれ  $677 \mu$ 、 $680 \mu$  であり、下縁では同じく  $652 \mu$ 、 $646 \mu$  となり、非常に近いひずみ変化量であった。以上より、膨張ひずみにより生じた現象は、図-10(a)に示した現象が生じたと考えられる。

##### 4.2 材料劣化に伴うひずみ変化

次に、材料劣化のみを考慮した case3 のひずみ変化について検討を行う。図-12(a)に材料劣化に伴う収縮挙動の模式図を示す。まず、初期状態では、コンクリートの弾性係数は  $E_1$ 、プレストレスである応力  $\sigma_{p1}$  による収縮ひずみ  $\epsilon_1$  が生じている。鋼材による拘束が無い場合において、健全状態からコンクリートの弾性係数が低下し



(a)膨張挙動の模式図



(b)解析値と試算値の比較

図-10 拘束条件下における膨張挙動

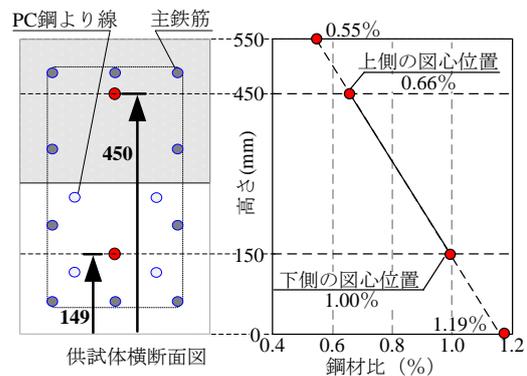
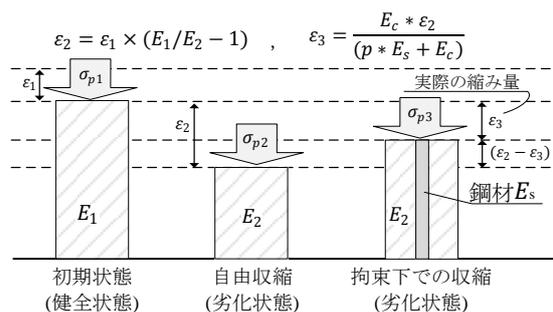
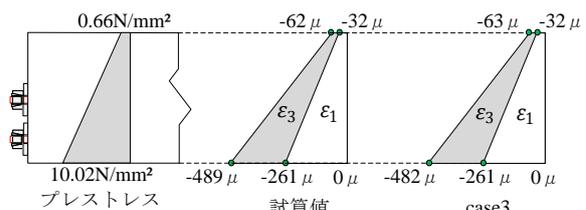


図-11 見かけの鋼材比



(a)収縮挙動の模式図



(b)解析値と試算値の比較

図-12 材料劣化による収縮挙動

$E_2$ となった時、さらに収縮ひずみ $\varepsilon_2$ が生じるが、この時、材料劣化の前後の応力 $\sigma_{p1}$ と $\sigma_{p2}$ は一定値となる。したがって、収縮ひずみの増加分 $\varepsilon_2$ は式(2)により求められる。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \times (E_1/E_2 - 1) \dots (2)$$

次に、鋼材による拘束が無い場合における自由収縮ひずみ $\varepsilon_2$ は、式(2)で算出できるが、実際には鋼材による自由収縮ひずみの拘束が考えられる。この場合における拘束後の実際の収縮ひずみ $\varepsilon_3$ は、力の釣り合いと変形の適合条件を満たすことで次式のように求められる。

$$\varepsilon_3 = \frac{E_c * \varepsilon_2}{(p * E_s + E_c)} \dots (3)$$

上記の考え方にに基づき、今回の解析条件での材料劣化によるひずみ変化の算出結果を以下に示す。まず初期状態では、偏心したプレストレスにより、上縁と下縁における収縮ひずみ $\varepsilon_1$ は、図-9よりそれぞれ $-32\mu$ 、 $-261\mu$ となる。次に、コンクリートの弾性係数が $E_1 = 3.24 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ から $E_2 = 1.62 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ まで低下すると、鋼材による拘束が無い場合においては、上縁と下縁における自由収縮ひずみ $\varepsilon_2$ は、式(2)よりそれぞれ $-32\mu$ 、 $-261\mu$ となる。次いで、鋼材による収縮ひずみの拘束がある場合のひずみ変化を式(3)より算出した。実際の収縮ひずみ $\varepsilon_3$ は、上縁で $-30\mu$ 、下縁で $-228\mu$ となった。case3の試算値と解析値を比較した結果を図-12(b)に示す。変化後の絶対値は、上縁では試算値および解析値それぞれ $-62\mu$ 、 $-63\mu$ であり、下縁では同じく $-489\mu$ 、 $-482\mu$ となり、非常に近いひずみ変化量であった。以上より、材料劣化により生じた現象は、図-12(a)に示す現象が生じたと考えられる。

### 4.3 反り反りへの影響度

反り反りは、軸方向ひずみの上下差、すなわち曲率によって発生すると考えられる。図-13に反り反り発生要因の模式図を示す。4.1節、および4.2節で説明した現象により、case2、case3それぞれ $34\mu (= 680\mu - 646\mu)$ 、 $190\mu (= -31\mu - (-221\mu))$ の軸方向ひずみの上下差が生じた。プレストレス導入による反り反り量 $1.0\text{mm}$ を差し引くと、case2では $0.2\text{mm}$ 、case3では $0.8\text{mm}$ となった。以上より、実験供試体および材料劣化と膨張ひずみを考慮したcase1に生じた反り反り量の80%は、材料劣化に起因した変形であると考えられた。また、試算結果より、ASRによる反り反りの主要因は、弾性係数の低下である可能性が推察された。

## 5 まとめ

材齢1100日が経過し、ASR劣化した大型PC桁供試体

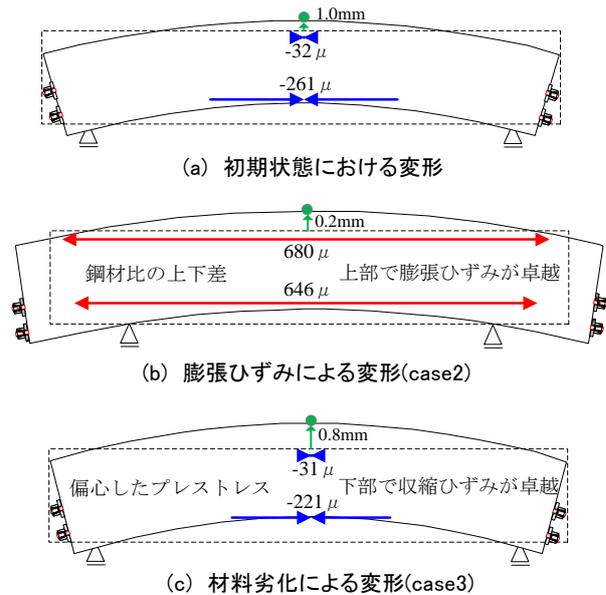


図-13 反り反り発生要因

の実験結果、およびASRによる材料劣化と膨張ひずみを考慮したFEM解析結果より、以下の知見を得た。

- 1) 供試体と同様に暴露したテストピースの圧縮試験結果より、材齢300日ごろから材齢700日までに、圧縮強度は $64.7\text{N/mm}^2$ から $46.0\text{N/mm}^2$ まで29%の低下、また、静弾性係数は $3.70 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ から $2.15 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ まで42%の低下が確認された。
- 2) 材齢1100日までに、実測値、および解析値ともに供試体が上方へ変形する挙動が確認され、実験値では $2.2\text{mm}$ 、材料劣化と膨張ひずみを考慮したcase1では $2.1\text{mm}$ の反り反りが生じ、実験供試体の変形状況を概ね再現できた。
- 3) 解析結果より、反り反り挙動は軸方向ひずみの上下差により発生すると考えられ、膨張ひずみのみを考慮したcase2では鋼材比の差異により $34\mu$ 、材料劣化のみを考慮したcase3ではプレストレスの偏心に伴う $190\mu$ の軸方向ひずみの上下差が生じた。その結果、case2で $0.2\text{mm}$ 、case3で $0.8\text{mm}$ の反り反りが発生した。したがって、今回の解析条件においては、ASRによるPC部材の反り反り挙動は、弾性係数の低下が主要因であると推察された。

## 参考文献

- 1) 北九州市：北九州モノレール長寿命化計画，北九州市建築都市局都市交通政策課，p.39，2011。
- 2) 藁田理希，古川柳太郎，尾花祥隆，鳥居和之：ASRによる劣化を生じたPC梁部材の耐力力性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp1305-1310，2007