

論文 ASR を生じた PC 桁のプレストレス変化の評価

上園 祐太*1・幸左 賢二*2・上原 伸郎*3・鄭 玉龍*4

要旨 : ASR を生じた PC 部材の長期的な劣化挙動を評価するため、反応性骨材を使用した大型の PC 桁供試体を用いて、暴露試験を実施している。本稿では、打設後約 3 年が経過し、ASR の発生が確認されている供試体を対象に、FEM 解析を実施した。プレストレスの実測値とクリープ解析値の間に差が生じた材齢 300 日以降について、膨張、および材料劣化を考慮した解析を実施した。解析結果より、ASR によるコンクリート膨張と材料劣化の 2 つの要因によって、材齢 300 日以降、実測値はほぼ一定のプレストレスを保持している可能性が考えられた。

キーワード : ASR, PC, プレストレス, ASR 膨張, 材料劣化, FEM 解析

1. はじめに

従来の研究によると、アルカリシリカ反応(以下、ASR)が PC 部材の耐荷力に及ぼす影響は少ないとされている。しかしながら、近年、30mm 以上の反り返りが生じ、耐荷力、および使用性能の低下が懸念される事例¹⁾²⁾もあり、ASR 劣化は、PC 部材のメンテナンス上における大きな問題の 1 つとしても位置づけられている。したがって著者らは、ASR が生じた 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の PC 桁供試体を 4 体 (No.1~4) 製作し、No.1~2 供試体を用いて ASR 劣化前における載荷試験による耐荷力の評価、No.3~4 供試体を用いて PC 部材の ASR 劣化性状評価を 5 年間にわたって評価することとしている。

本稿では、打設後約 3 年が経過した No.4 供試体を対象に、ASR 劣化が PC 桁供試体のプレストレス量に及ぼす影響について、FEM 解析を用いた比較により検討を行った。具体的には、まず、プレストレスの実測値とクリープ解析値の比較を行い、次いで、実測値とクリープ解析値の間に差が確認された材齢 300 日以降に着目し、ASR による材料劣化、および膨張ひずみを考慮した解析を行い、実験により得られた挙動と比較することで、PC 桁供試体に及ぼす ASR の影響について考察を加えた。

2. 実験供試体

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。図-1 に供試体側面図、図-2 に供試体断面図を示す。緊張方法は、φ19.3mm 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

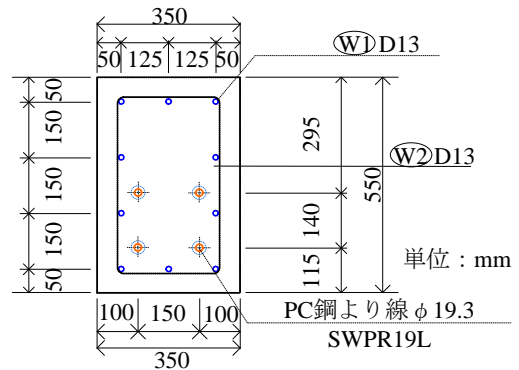


図-2 供試体断面図

表-1 コンクリート配合

		単位量 (kg/m ³)					
水	セメント	細骨材		粗骨材		促進剤	AE 減水剤
		反応性	非反応	反応性	非反応		
175	381	459	289	509	501	11.6	1.14

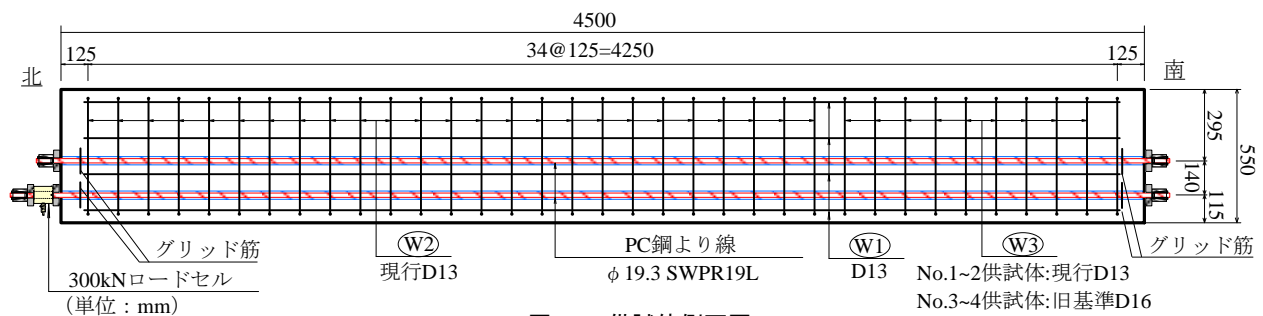


図-1 供試体側面図

*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 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

*4 九州工業大学大学院 工学府 建設社会工学専攻 (学生会員)

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つり出した旧基準（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。また、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。

コンクリート配合を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、反応性骨材には、細骨材に長崎県産砕砂、粗骨材には北海道産砕石をそれぞれ使用した。なお、反応性骨材の岩種はいずれも安山岩である。また、ASR の促進を目的とする添加剤として、コンクリート中における等価アルカリ量が 8kg/m^3 となるように NaCl を添加した。

3. 実験結果

供試体は、緊張力導入初期の状態の確認のため、90 日間空調のない屋内で養生した後、底のない屋外に 800 日暴露している。なお、暴露条件としては、年平均の気温、降水量、日照時間はそれぞれ 16.5°C 、 1772.5mm 、 1770.2 時間（暴露試験期間 2012 年～2014 年における平均値）となっている。

3.1 ASR ひび割れ劣化状況

本研究では、上面と両側面の計 3 面を評価対象面とし、クラックスケールで計測可能な幅 0.05mm 以上のひび割れを対象とした。なお、No.3, 4 供試体は同様のひび割れ進展傾向を示していた。図-3 に No.4 供試体の材齢 690 日におけるひび割れ状況を示す。同図は供試体軸方向の北側から 2250mm を示した。図中ではひび割れ発生傾向を明確にするため、幅 0.10mm 以上のひび割れを表記している。図-3 を概観すると、緊張力方向のひび割れが卓越しており、ASR 劣化した PC 部材の特徴が現れている。また、ひび割れは、供試体の上部に多く発生する傾向が認められた。

図-4 に No.4 供試体のひび割れ密度（対象ひび割れ総延長/評価対象面積）の経時変化を示す。材齢 330 日以降、ひび割れ密度は急激に増加し、材齢 690 日時点では、 5.14m^2 と大きく劣化が進展した。また、図中にはひび割れ幅の推移も併せて示した。材齢 380 日時点で、幅 0.10mm 以上のひび割れについても確認され、材齢 690 日現在では、40% 近くのひび割れが幅 0.10mm 以上となっている。以上より、材齢 380 日から 690 日にかけて、本供試体は ASR 劣化の進展期であると推察される。

3.2 プレストレス計測結果

緊張力の経時変化は、PC 鋼より線の定着部に設置したセンターホール型ロードセルによって計測した。ロードセルは、No.3 供試体、No.4 供試体ともに下段西面の PC 鋼より線に設置した。また、緊張力の経時的な変化を計測することから、シース管へのグラウト注入は 4 本すべ

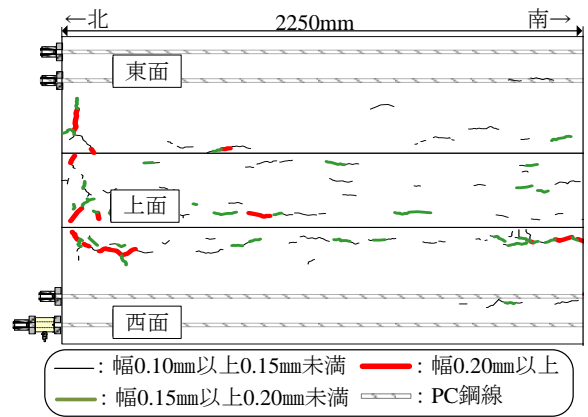


図-3 材齢690日におけるひび割れ状況

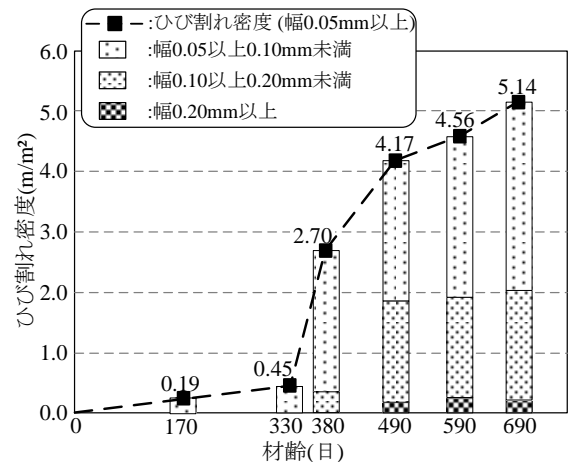


図-4 ひび割れ密度の経時変化

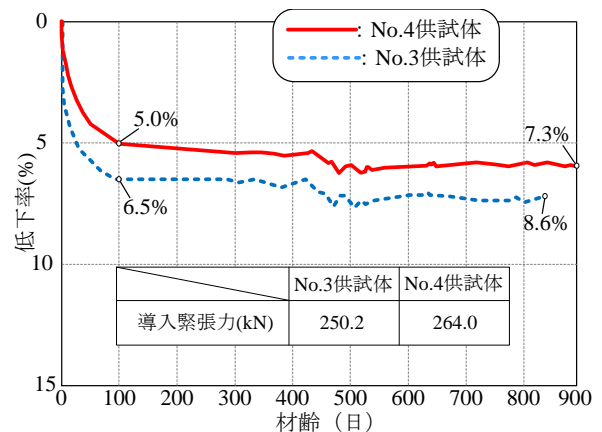


図-5 緊張力の経時変化

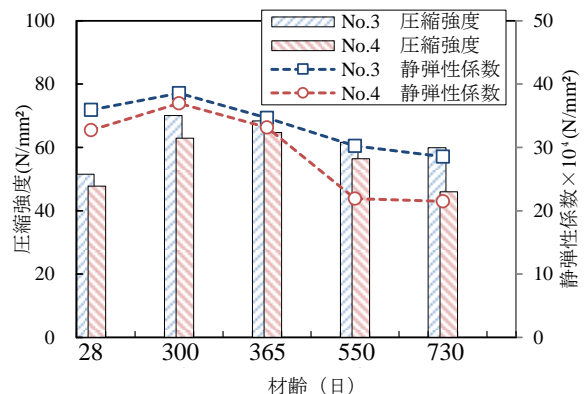


図-6 コンクリート物性

てにおいて行わないこととした。

緊張力の経時変化を図-5に示す。図中では、PC鋼より線定着時を基準材齢とし、900日程度までの期間におけるNo.3, No.4供試体の緊張力の低下率を示した。導入直後の緊張力は、No.3, No.4供試体それぞれ264.0kN, 250.2kNであった。その後、両者ともに緊張力は低下する傾向を示しており、材齢100日時点では、No.3, No.4供試体それぞれ6.5%, 5.0%の低下となった。材齢100日以降、両供試体ともにほぼ定常状態となっており、No.3, No.4供試体それぞれ7.3%, 8.6%の低下となった。

3.3 コンクリート物性

供試体同様に暴露したテストピースによる圧縮強度、および静弾性係数の経時変化を図-6に示す。同図には、No.3供試体の計測結果も併せて示した。

材齢28日の圧縮強度はNo.3で51.5N/mm²、No.4で48.0N/mm²となっている。材齢300日ではそれぞれ70.0N/mm²、62.9N/mm²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3.59×10⁴N/mm²から3.86×10⁴N/mm²、No.4では3.23×10⁴N/mm²から3.70×10⁴N/mm²に増加している。しかしながら、材齢365日の時点では、圧縮強度に大きな変化がないものの、静弾性係数は、No.3で3.47×10⁴N/mm²、No.4で3.31×10⁴N/mm²と両者とも10%程度の低下現象が確認された。続いて材齢730日では、静弾性係数はさらに低下し、圧縮強度についてもNo.3供試体では14%程度、No.4供試体では29%の低下が認められた。

4. 解析モデル

4.1 モデル化

実験結果を評価するため、PC桁供試体について2次元弾塑性FEM解析を実施した。初期の荷重条件に自重を与えた後、PC鋼より線をモデル化した埋め込み鉄筋要素に緊張力となる引張応力を与えることにより、供試体に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、50mm×50mmとし、軸方向に90分割、高さ方向に11分割した。なお、解析は汎用解析コードDIANA9.4.4を使用した。

4.2 鋼材モデル

図-7に鋼材の応力-ひずみモデルを示す。構成則はVon-Misesの条件とし、埋め込み鉄筋要素とした。図に示すように、鉄筋はバイリニア、PC鋼材はトリリニアとしてモデル化を行った。なお、鋼材は完全付着とし、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こととした。

4.3 コンクリートモデル

図-8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

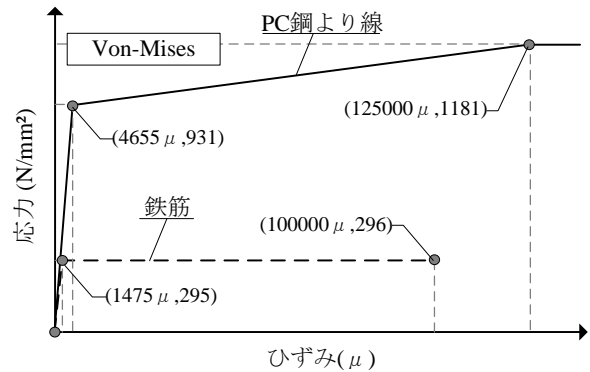


図-7 鋼材の応力-ひずみ関係

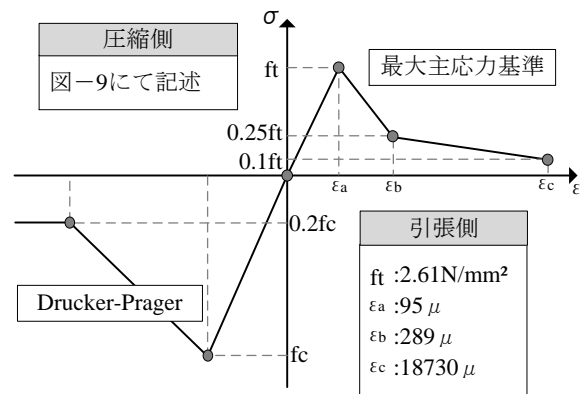


図-8 コンクリートの応力-ひずみ関係

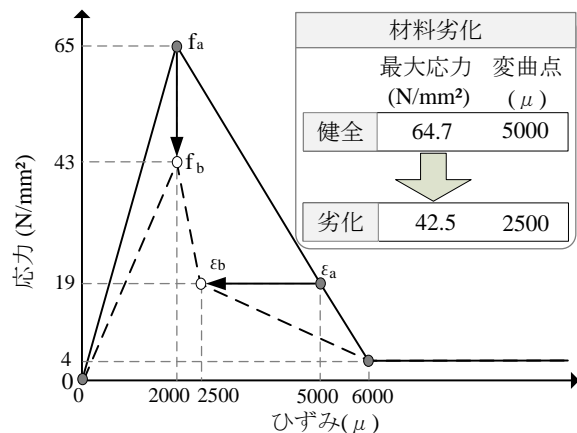


図-9 圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係

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。

図-9に圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係を示す。一般に、ASRが発生した場合、初期勾配については、最大応力が f_a から f_b へ低下し、軟化域では、変曲点が ϵ_a から ϵ_b へ変化することにより最大応力以降の応力低下に差が生じる。以上のようなASRによるコンクリート劣化の特徴を、PC桁供試体と同時期に作製したテストピース、および同一配合の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。図-9に示すように、圧縮側の応力-ひずみ関係は、初期勾配の最大応力が $f_a=64.7\text{N/mm}^2$ から $f_b=42.5\text{N/mm}^2$ へ低下し、軟化域では、

変曲点が $\epsilon_a=5000\mu$ から $\epsilon_a=2500\mu$ へ変化するモデルとし、劣化が開始した材齢 300~900 日にかけて、単調に変化させることとした。

4.4 膨張ひずみ

次に、ASR に伴う膨張ひずみ量の推定を行う。ここで、本供試体とほぼ同スケールを用いた試験結果³⁾を参考にすると、コンクリート表面と内部のひずみは、1 割程度の差異であり、概ね同様の傾向を示していたことから、本稿では PC 桁供試体のひび割れ状況より膨張量を推定することとした。まず、鉛直方向へのひずみを算出するため、水平線とのなす角が 45° 以上のひび割れを除外した側面のひび割れ密度を用い、ひび割れ幅は、各材齢における平均ひび割れ幅を用いることとした。側面のひび割れ密度が Xm/m^2 の場合、 $1m^2$ に長さ $1m$ で幅 Ymm のひび割れが X 本存在すると仮定し、供試体高さ $550mm$ で除すことにより鉛直方向ひずみを算出した。鉛直方向ひずみの経時変化を図-10 に示した。図より、材齢 330 日までに 40μ 程度の微量のひずみが生じた後、材齢 330~380 日ごろまで急激に劣化が加速した。その後、劣化の進展は減速し、材齢 700 日までに 400μ のひずみが生じる結果となった。上記の結果を参考に、材齢 300 日をゼロと見なし、材齢 300 日と最新の計測結果である材齢 700 日の 400μ を直線で結んだ直線が、材齢 900 日と交差する値 640μ を材齢 900 日時点におけるひずみ量と見なした。ここで、既往の研究^{4), 5)}における試験結果を参考にすると、緊張力方向のひずみは、鉛直方向ひずみの $1/4$ 程度となっている。以上より、ひび割れ状況から推定した軸方向ひずみは、鉛直方向ひずみの $1/4$ の値と仮定し、本稿では、材齢 300~900 日の間で 160μ の自由膨張ひずみを単調に与えることと仮定した。

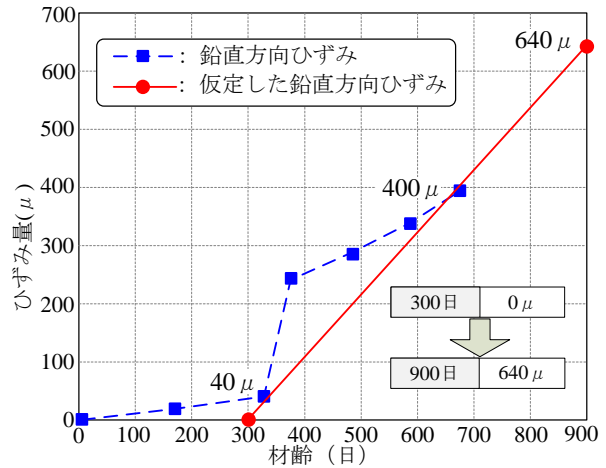


図-10 膨張ひずみの経時変化

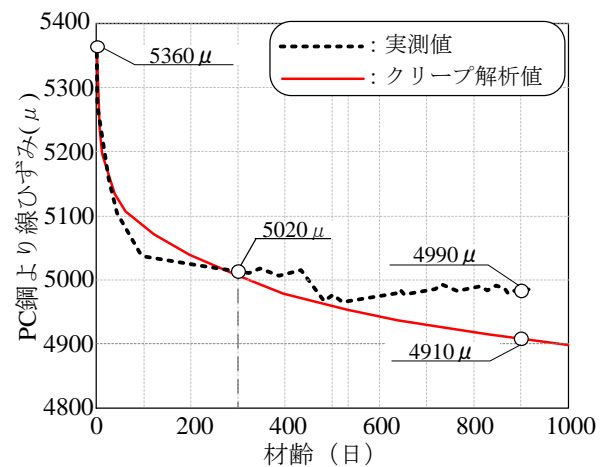


図-11 PC鋼より線ひずみの経時変化

表-3 解析値の計算要素

緊張力導入時の材齢(日)	28
気温(°C)	20
相対湿度(%)	70
骨材の吸水率(%)	2.0
骨材の品質を表す係数	4

5. 解析結果

5.1 クリープ解析

図-11 に PC 鋼より線ひずみの経時変化を示す。図中には、ロードセルにより計測した実測値、およびクリープ解析値を示した。実測値は、PC 鋼より線定着後に 5360μ が計測され、材齢 300 日時点では 5020μ となった。その後、材齢 900 日時点では 4990μ となり、実測値は概ね一定の値を保持する傾向が確認された。

クリープ解析値は、2012 年制定コンクリート標準示方書⁶⁾の式より、表-3 に示す計算諸元を用いて、ある時間に対応するクリープ係数、および乾燥収縮ひずみを算出した。次いで、クリープ関数 $J(t, \tau)$ を求め、直接入力により、クリープ解析を行った。なお、Kelvin Chain のユニット数 n は 10 とした。また、用いた静弾性係数、および圧縮強度は、材齢の進展による強度増加、および ASR 進展による強度低下の両者を考慮し、平均的な物性

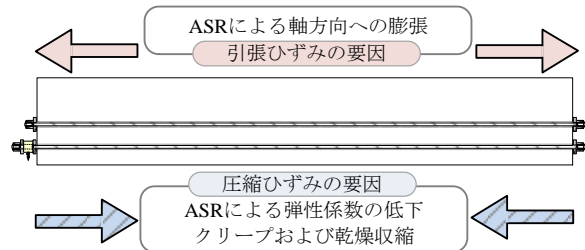


図-12 軸方向ひずみの発生要因

値を用いる目的で、材齢 28~800 日までにを行ったテストピースの圧縮試験の平均値を用いた。

材齢 300 日以降に着目すると、クリープ解析値は、低下し続け、材齢 900 日時点で 4910μ となり、材齢 900 日時点における実測値とクリープ解析値の間に 80μ ($4990\mu - 4910\mu$) の差が生じた。材齢 300 日以降、差が発生した要因として、図-6 に示したように、材齢 10 ヶ月以降から、コンクリート物性値が低下していることや、図-10

に示したように、材齢 300 日以降から、膨張ひずみが発生したことから、ASR による影響が考えられた。したがって、次節では、材齢 300 日以降における ASR 劣化を考慮した解析を行った。

5.2 膨張および劣化解析

本節では、材齢 300 日以降のプレストレス変化に着目した。軸方向への引張ひずみ、および圧縮ひずみの発生により、プレストレスの増減が生じる。図-12 に示すように、本節では、引張ひずみの要因として、ASR 膨張の発生、一方、圧縮ひずみの要因として、材料劣化の両者を考慮した解析を行うこととした。図-13 にプレストレス変化のイメージを示した。図中(A), (B)に示すように、各コンクリート要素に対し、材齢が経過した時点において、コンクリート膨張、および材料劣化を考慮した場合における PC 鋼より線、およびコンクリートのひずみ変化について検討を行った。ここで、材料劣化は、4.3 節において記述したように変化させた。また、膨張ひずみについては、4.4 節において記述したように、 160μ を温膨張により一様に増加させた。

図-14 に膨張および材料劣化の解析結果を示す。図中には、実測値、クリープ解析値、膨張解析値(=case1)、膨張+劣化解析値(=case2)を示した。なお、case1、および case2 の値は、クリープ解析とは別途行い、各材齢におけるクリープ解析値を基準に、case1、および case2 の変化量を重ね合わせた値を用いた。また、図中(A)に示すように、材齢 300 日時点におけるひずみ分布は、上縁で -135μ 、下縁で -701μ となっている。

材齢 900 日におけるクリープ解析値と各 case のひずみ量を比較すると、case1 では 149μ 引張側へ、case2 では 39μ 引張側へ変化する結果となった。ここで、実測値と case2 を比較すると、経時的に低下する同様の傾向となっており、結果的には、 $41\mu (=80\mu - 39\mu)$ の差となった。

5.3 解析結果の評価

(1) 膨張解析 (case1)

図-14 に示したように、case1 では、材齢 300~900 日において、 149μ 引張側へ変化した。図-15(a)に材齢 300~900 日におけるひずみ、および応力の変化を示す。 160μ の自由膨張ひずみを与えた場合、実際に生じたひずみは、上縁で 154μ 、下縁で 146μ となり、平均としては、 150μ 引張側へ変化した。このような変化が生じたのは、図-15(b)に示すように、鋼材による拘束条件下においては、鋼材の弾性係数、および鋼材量、コンクリートの弾性係数の影響を受けるためであると考えられる。図-15(b)中の式(1)を用いると、本稿で対象とした PC 桁供試体の場合では、鋼材比が 1.17% (主鉄筋: 0.66%, PC 鋼より線: 0.51%) であり、自由膨張ひずみの 93% が実際に生じるひずみと考えられる。一方、拘束された 7% のひ

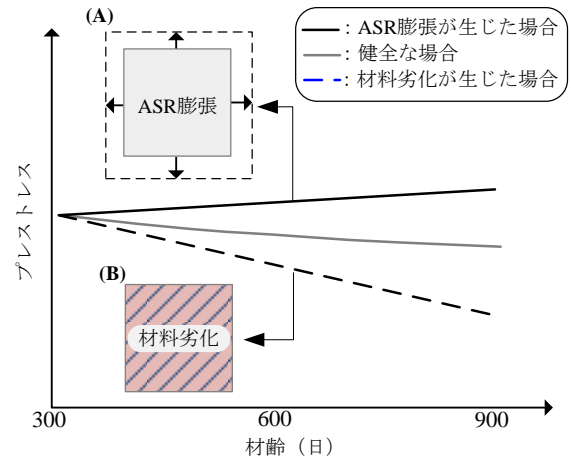


図-13 プレストレス変化のイメージ

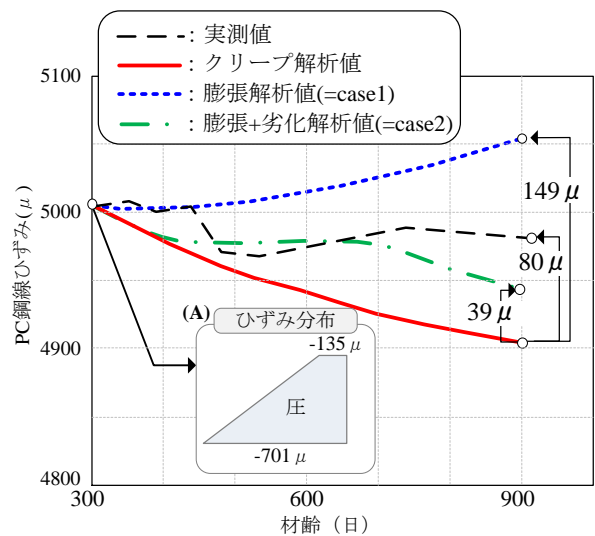
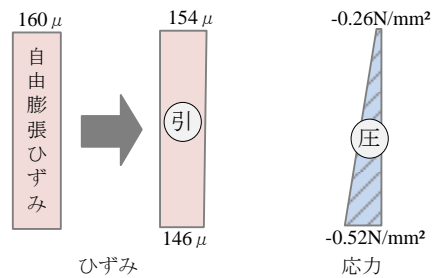
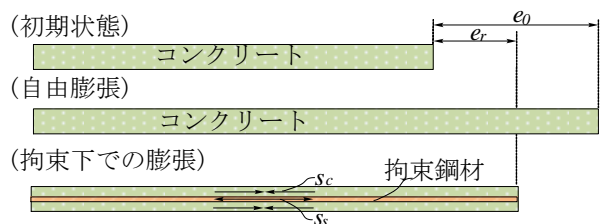


図-14 膨張および材料劣化の解析結果



(a) 材齢300~900日における変化量



$$\epsilon_r = \frac{E_c}{pE_s + E_c} \epsilon_0 \quad \dots(1)$$

(b) 鋼材による拘束

図-15 膨張を考慮した場合(case1)

ずみは、コンクリートに蓄積され、蓄積されたひずみにコンクリートの弾性係数を乗じた値が、圧縮応力としてコンクリートに発生し、図-14 に示したように、プレストレスが 149μ 増加したと考えられた。

(2) 膨張+劣化解析 (case2)

次に、膨張+劣化を考慮した場合のひずみ、および応力の変化を図-16(a)に示す。膨張、および材料劣化を考慮した case2 では、コンクリートのひずみは上縁で 133μ 、下縁で 5μ 、平均としては、 69μ 引張側へ変化した。また、応力は上縁で 0.27N/mm^2 、下縁で 0.15N/mm^2 、平均としては、 0.21N/mm^2 圧縮側へ変化した。case1 と同様の 160μ を与えたにも関わらず、case1 より 81μ ($150\mu - 69\mu$) 小さい結果となった。この要因として、図-16(b)に示すように、コンクリートの弾性係数が低下したことにより、コンクリート要素は軸方向への収縮が生じる一方、軸方向へのコンクリートの収縮に伴い、PC 鋼より線の緊張が緩み、コンクリートに作用する圧縮応力が減少した。その結果、図-14 に示したように、case1 と比較するとプレストレスの増加が 39μ に留まったと考えられた。

以上より、軸方向への引張、および圧縮ひずみの発生が、プレストレス増減の要因として考えられ、引張ひずみ発生を要因としては、ASR による軸方向への膨張、一方、圧縮ひずみの要因としては、ASR による弾性係数の低下に伴う軸方向への圧縮ひずみの発生が考えられる。材齢 300 日以降、実測値がほぼ一定のプレストレスを保持しているのは、上記の 2 つの要因による影響である可能性が考えられた。ここで、本供試体とほぼ同スケールを用いた既往研究^{3) 4)}の試験結果では、コンクリートの弾性係数は低下しているにも関わらず、プレストレスは大幅に低下しておらず、本供試体の実測値、および解析値と同様の傾向を示していた。

6. まとめ

打設後約 3 年が経過し、ASR 劣化が進展した大型の PC 桁供試体を対象に、2 次元弾塑性 FEM 解析を行うことにより、以下の知見を得た。

- 1) PC 桁供試体のひび割れ観察結果より、ひび割れ密度は、材齢 330 日以降で大きく増加傾向を示し、材齢 690 日時点では 5.14m^2 であった。また、ひび割れの 40% が幅 0.1mm 以上のひび割れであった。以上より、今回評価に用いた PC 桁供試体は、現時点において ASR 劣化が進展していると判断された。
- 2) ロードセルにより測定したプレストレスの実測値とクリーブ解析値を比較した結果、材齢 300 日以降、クリーブ解析値は低下し続けたのに対し、実測値は概ね一定のプレストレスを保持しており、材齢 900 日時点で 80μ (20N/mm^2) の差が生じる結果となった。

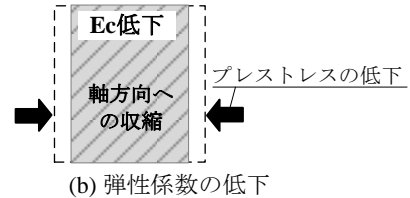
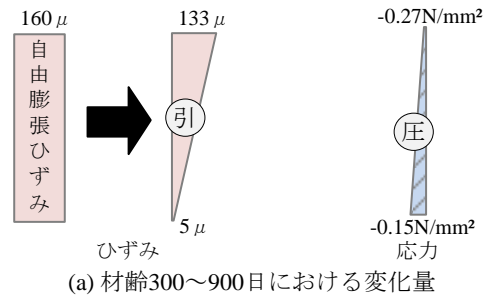


図-16 膨張+材料劣化を考慮した場合 (case2)

- 3) 実測値とクリーブ解析値の差が生じた要因を、ASR 膨張、および材料劣化と考え、実験結果から推定した膨張ひずみ、および材料劣化を考慮した解析を行った。膨張のみを考慮した場合には、断面の平均ひずみは 150μ 引張側へ変化した。次いで、膨張、および材料劣化の双方を考慮した場合には、断面の平均ひずみが 69μ 引張側へ変化した結果、プレストレスは 80μ 増加し、実測値と同様な傾向を示した。
- 4) 以上の結果より、材齢 300 日以降、プレストレスの実測値がクリーブ解析値のように低下せず、概ね一定の値を保持した要因として、ASR 膨張による引張ひずみの発生、および材料劣化による圧縮ひずみの発生が作用していると推察された。

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，2011.6
- 2) 石橋忠良：PC 鉄道構造物の劣化事例と対策，プレストレスト・コンクリート，Vol.45，No.1，pp.72-75，2003.1
- 3) 奥山和俊，大久保孝，井俣俊也，廣井幸夫：ASR により劣化した PC 試験体に関する実験報告(上)，プレストレスト・コンクリート，Vol.52，No.3，pp.61-70，2010.3
- 4) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：ASR 対策委員会報告書，pp.62-65，2009
- 5) 佐々木一則，松本茂，久利良夫，葛目和宏，金海鉦，宮川豊章：ASR 劣化が生じた PC はりの長期暴露試験における膨張挙動，材料，Vol.57，No.10，pp.973-980，2008
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書設計編，pp.105-108，pp.394-400，2013