

ASRを生じた大型PC桁供試体の変形挙動の評価

九州工業大学

九州工業大学 正会員 Ph. D.

住友大阪セメント(株)

○上園 祐太

幸左 賢二

上原 伸郎

Abstract : Large-scale PC specimens using reactive aggregates were made and exposed to outdoor condition in order to investigate the variation of behaviors for PC structure induced by Alkali-silica reaction. Cracks develop intensively on the upper of PC specimens, due to the eccentric load of the pre-stress. Further, the arch deformation toward the upper of specimen is confirmed. For the time variation of pre-stress, the behavior between prediction and measurement is different. After the decrease caused by creep and drying shrinkage, pre-stress keeps almost invariable. As one possible reason, the ASR-induced expansive effect in the axial direction is considered to offset the decrease of pre-stress.

Key words : Prestressed Concrete, Alkali-Silica Reaction, Deformation, Loss of Prestress

1. はじめに

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たが, 一方で, 30mm 以上のたわみが生じ, 耐荷力, および使用性能の低下が懸念される事例もあり, ASR 劣化は, PC 部材のメンテナンス上の大きな問題のうちの一つとしても位置づけられている。本研究では, ASR を生じた PC 部材の長期的な変形挙動を評価するために, 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, PC 桁供試体の ASR 劣化性状を 5 年間に渡って評価することを全体計画としている。なお, 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 劣化性状評価を行っている。本稿では, 図-1 に示すように, 打設後約 2 年間が経過した No.4 供試体の部材変状, および緊張力の計測結果より, 劣化性状の評価を行った。

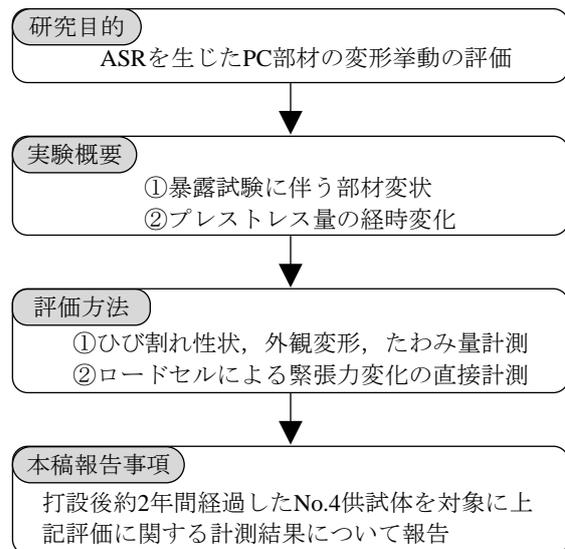


図-1 研究フロー

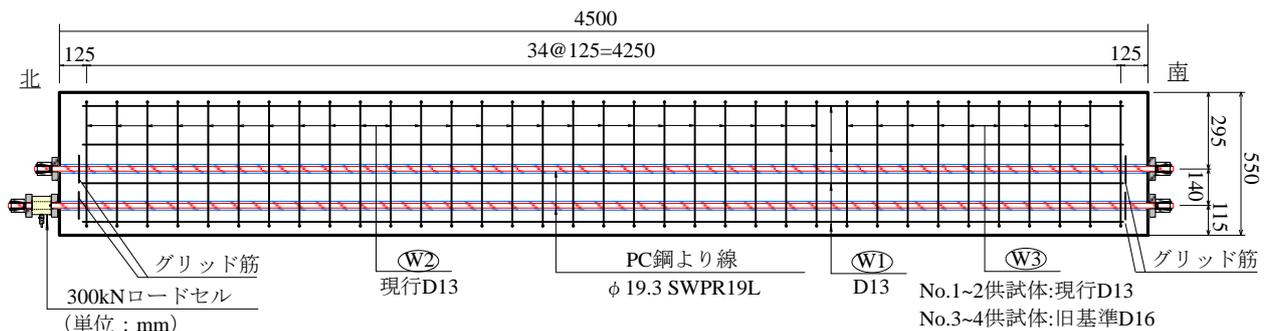


図-2 供試体側面図

2. 供試体概要

2.1 供試体形状

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-2 に供試体側面図、図-3 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。また、本供試体のモデルとした PC 軌道桁を参考にし、帯鉄筋量を決定した。

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。

材料物性値を表-2 に示す。本研究で作製した供試体の材齢 28 日における圧縮強度は、No.3, No.4 供試体それぞれ 51.5N/mm^2 , 48.0N/mm^2 となり、目標強度 35N/mm^2 を上回る強度が得られた。また、静弾性係数は $3.59 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $3.27 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ である。PC 鋼より線、鉄筋の材料物性値は引張試験により求めた。なお、PC 鋼より線の初期緊張力の設計値は 1116N/mm^2 であり、0.2%降伏強度の約 63%となっている。

2.2 計測手法の概要

本研究では、ロードセルを定着部に設置することで、緊張力の経時変化を直接計測することとした。また、PC 供試体の長期的な断面変形やたわみ量などを全体変形として捉えた。具体的には、PC 桁供試体に生じた部材の変位は、図-4 に示すように、コンクリート床版にアンカー固定され、格子状に緊結したアングルを基準として、経時的に計測した。なお、各測定項目の具体的な方法については、各章で説明する。

3. ASR劣化性状

3.1 ひび割れ状況

図-5 に材齢 690 日におけるひび割れ状況を示す。

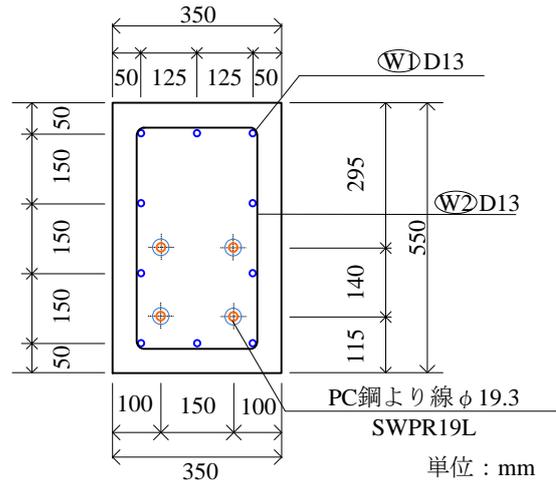


図-3 供試体断面図

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		促進添加剤	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

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 (N/mm ²)	No.3	51.5
		No.4	48.0
	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	No.3	3.59
		No.4	3.27
PC鋼より線	0.2%降伏強度 (N/mm ²)	1773	
	設計初期緊張力 (N/mm ²)	1116	
	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	19.12	
鉄筋 (W1,W2)	降伏強度 (N/mm ²)	365	
	引張強さ (N/mm ²)	554	

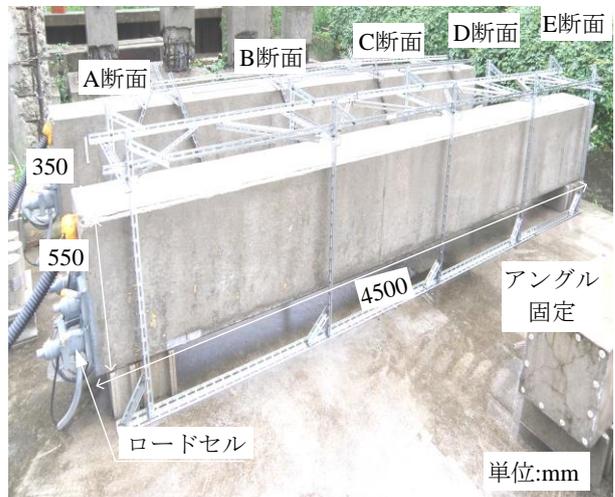


図-4 供試体状況および計測位置

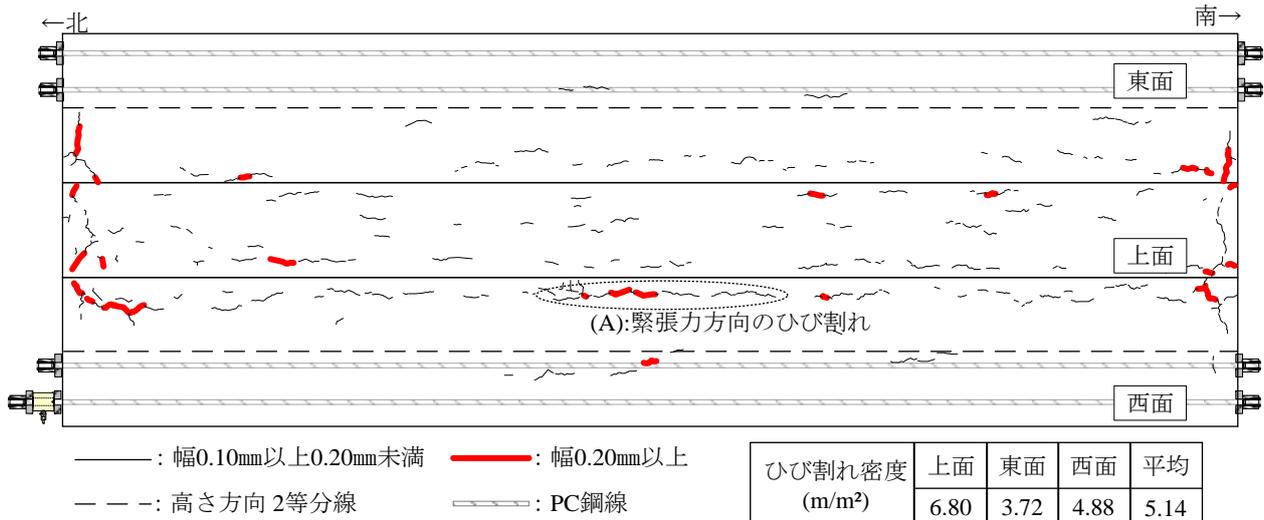


図-5 材齢690日におけるひび割れ状況

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ているが、図中ではひび割れ発生の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-5を概観すると、図中の(A)に示すように、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-6にひび割れ密度(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170日以降、ひび割れの発生が確認され、そのひび割れ密度(幅0.05mm以上対象)は0.19m/m²であった。その後、材齢330日以降、ひび割れ密度は急激に増加しており、材齢690日の現在では、5.14m/m²と大きく劣化は進展したことが確認された。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ており、材齢690日現在では、40%近くのひび割れが幅0.10mm以上のものとなっている。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 側面変形

図-7に側面変形、およびたわみの計測方法を示す。側面変形と次節に示すたわみは、屋外暴露当初から供試体周囲に固定したアングルと供試体との距離を計測することで求めた。なお、材齢170日時点をもととし、それ以降の変化量について計測を行った。図-8

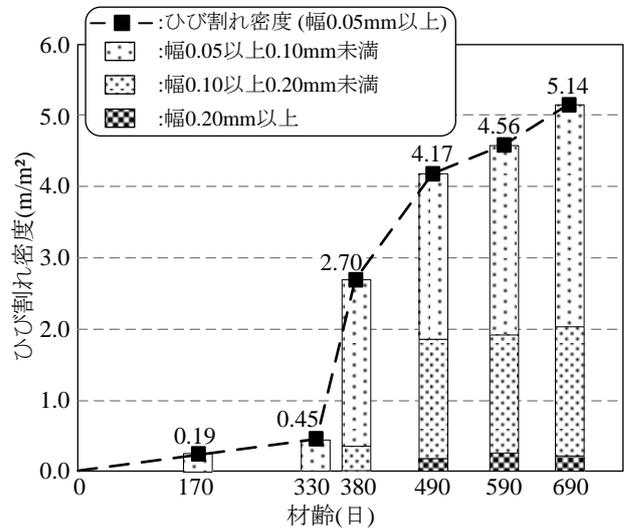
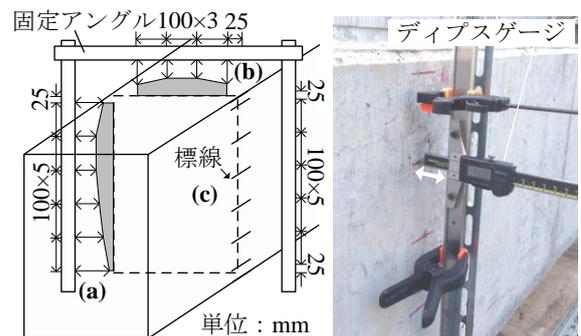


図-6 ひび割れ密度の経時変化



(1) 計測方法 (2) 計測器具

図-7 部材変形の計測方法

図-8に材齢690日時点における側面変形の計測結果を示す。測定点は、供試体の下面の隅角部から25mmの位置を基点に100mm間隔で計6点とした。また、供試体の南端を基準として、250mm(A断面)、1250mm(B断面)、2250mm(C断面)、3250mm(D断面)、4250mm(E断面)の5断面について計測を行った。図中には、A-Eの全断面の平均値を示した。供試体側面は概して丸く膨らむような変形状態となっており、ASR膨張に

よる円弧状の断面変形が生じたと考えられる。しかしながら、本研究の PC 供試体では上部で 0.51mm、下部で 0.14mm 程度の膨張変形となっており、中央部、および上部付近が最も膨張する傾向が確認された。本研究の PC 桁供試体は、下側に PC 鋼より線を 4 本配置した偏心構造となっており、緊張力定着時の応力分布は図-9 に示すように、上方に向かうほど相対的に圧縮応力は小さくなっている。これより、ASR 膨張に対する拘束力は、供試体上部ほど小さいため、側面変形、および前節で示したひび割れで認められた供試体の上下の差異が生じたと考えられる。

3.3 たわみ

図-10 に材齢 690 日時点におけるたわみの計測結果を示す。図-7 で示したように、たわみは 2 つの方法で計測しており、図-7 (1) 中の (b) の方法により上面の変化量を、および図-7 (1) 中の (c) の方法により側面に描いた標線の鉛直方向の変化量を計測した。測定点は、上面の変化量については、供試体の西面の隅角部から 25mm の位置を基点に 100mm 間隔で計 4 点、標線の鉛直方向の変化量については、上下の隅角部の 2 点、および下面の隅角部から 25mm の位置を基点に 100mm 間隔で計 8 点とし、A~E の 5 断面について計測を行った。各高さの計測値は概ね同様の傾向を示していた。図中には、それぞれの方法で、各断面の平均値をプロットした。

上面の変化量に着目すると、端部の断面で 0.58mm、0.32mm の変化量に対し、中央部の断面では 1.80mm の変化量が計測され、上面は中央部の断面ほど大きく変形していることが確認された。次に、標線の変化量に着目すると、端部の断面では 0.11mm、0.21mm の変化量に対し、中央部の断面では 1.38mm の変化量が計測された。以上の 2 つの計測結果より、供試体は上面のみではなく、全体的に上方に反り返っていると考えられる。ひび割れ性状、および変形性状に現れているように、供試体の上下で ASR 膨張に対する拘束力の差異があり、下部と比較し、上部の膨張量が大きく生じたことが、図-10 のようなたわみが発生した要因の 1 つとして考えられる。

4. 緊張力の経時変化

4.1 計測方法および計測結果

緊張力の経時変化は、PC 鋼より線の定着部に設置

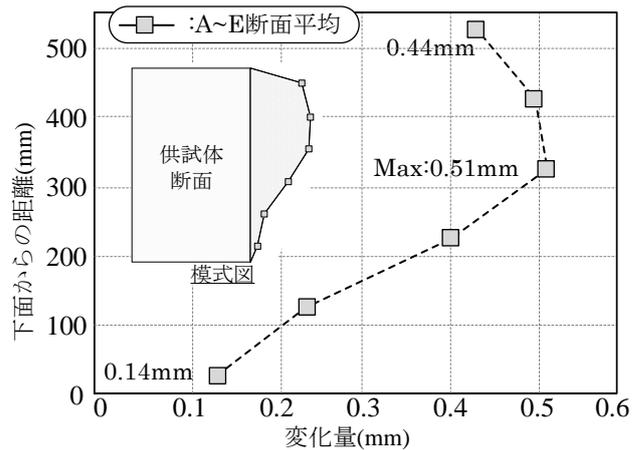


図-8 側面変形の計測結果

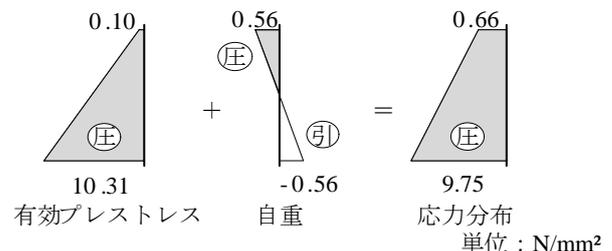


図-9 応力分布(緊張力導入時)

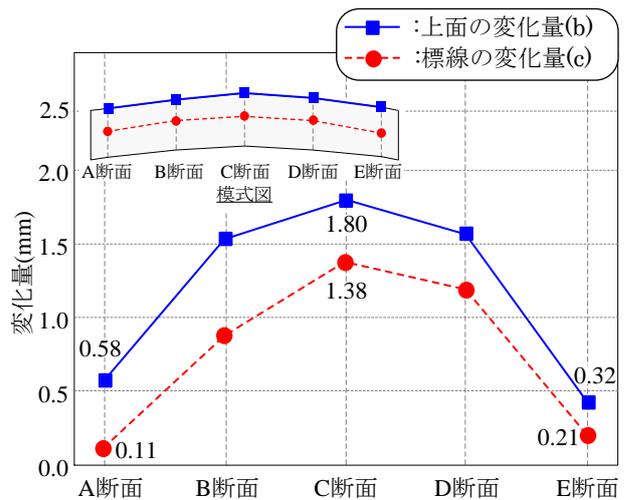


図-10 たわみの計測結果

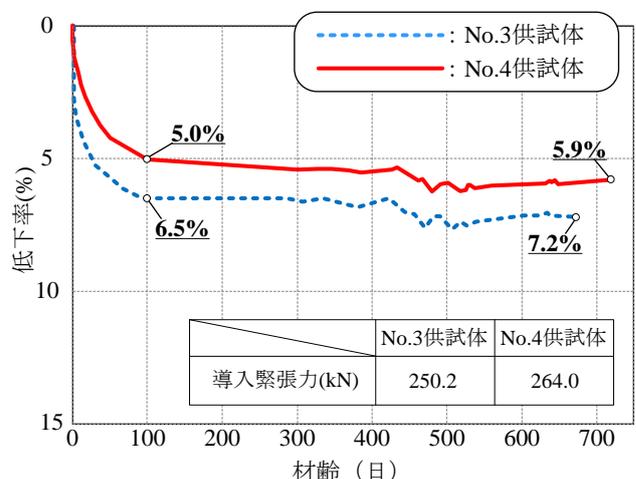


図-11 緊張力の経時変化

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行わないこととした。なお、グラウト注入は、4本すべてにおいて実施していない。

緊張力の経時変化を図-11に示す。図中では、PC鋼より線定着時を基準材齢とし、700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ている。導入直後の緊張力は、No.3 供試体で264.0kN、No.4 供試体で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 供試体それぞれ緊張直後と比較し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になっており、初期の導入緊張応力に対し、No.3、No.4 供試体それぞれ7.2%、5.9%の低下が確認されている。

4.2 予測値との比較

図-12にNo.4 供試体のロードセルで計測した緊張力を基に、PC鋼より線の弾性係数と公称断面積から算出したPC鋼より線のひずみ変化量を示した。また、クリープ、および乾燥収縮については、1978年制定プレストレストコンクリート標準示方書¹⁾、および2012年コンクリート標準示方書²⁾の式とPC鋼より線のリラクゼーションについては、PCIの式³⁾を組み合わせて算出した2つの予測値、それらの平均値を示した。予測値算出の際に、仮定した環境条件、および骨材の状態については、表-3に示した。図-

12より、No.4 供試体の実測値と予測値を比較すると、材齢100日程度までは、予測値平均とほぼ同様の低下曲線であるが、材齢100日以降、予測値は低下し続けているのに対し、実測値はほぼ同程度の緊張力を保持しており、異なる低下曲線となっている。材齢700日時点では、100μ程度の差が生じる結果となった。

4.3 ASRによる影響の推定

図-6に示したひび割れ密度の経時変化より、材齢170日ごろでは、若干量のひび割れが生じており、ASR劣化は極めて初期の段階と推察される。材齢330日以降、劣化は加速し、材齢690日時点では、ひび割れ、部材変形ともに進展しており、ASR劣化は大きく進展していることがわかる。ここでは、ASR膨張が緊張力変化に与える影響を推察する1つの方法として、測線ひずみからPC桁供試体の膨張量を推定することとした。図-13に軸方向ひずみの算出方法を示した。図-6に示すように、ひび割れ幅は材齢490日以降、幅0.1mm以上のものも多く見られるようになってきていることから、各材齢における平均ひび割れ幅を用いることとした。また、水平方向のひび割れを対象とするため、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ることとした。以上より、側面のひび割れ密度がXm/m²の場合、1m²に幅0.05mmのひび割れがX本存在すると仮定し、Xに幅0.05mmを乗じて、供試体高さ550mmに対する測線ひずみを算出した。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

表-3 予測値の計算要素

	1978年示方書	2012年示方書
緊張力導入時の材齢(日)	28	28
気温(°C)	20	20
相対湿度(%)	70	70
骨材の吸水率(%)		2.0
骨材の品質を表す係数		4

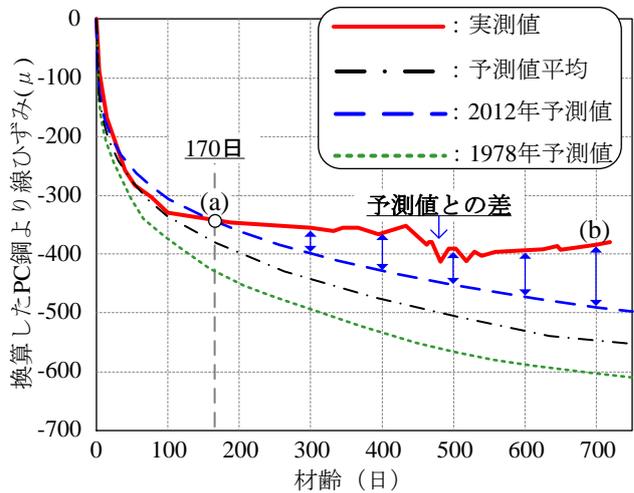


図-12 PC鋼より線ひずみの経時変化

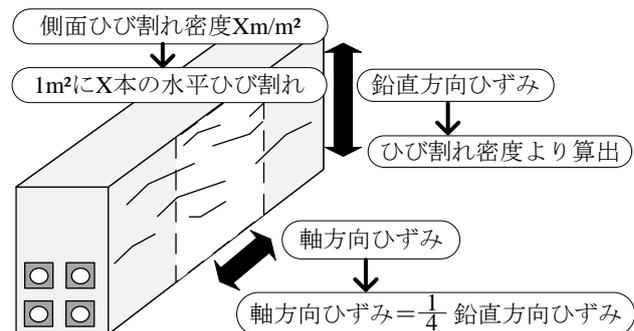


図-13 軸方向ひずみの算出方法

ずみの 1/4 程度となっている。以上より、今回比較する軸方向ひずみは、測線ひずみの 1/4 の値とした。

図-14に緊張力の実測値と予測値の差、および前述の方法で求めた軸方向ひずみの経時変化を示す。実測値と予測値の差は、材齢 170 日より生じ始め、ほぼ一定の傾きのまま増加し、材齢 690 日時点では、 100μ となっている。ひび割れ密度より算出した軸方向ひずみに着目すると、材齢 330 日まで緩やかにひずみが発生し、材齢 380 日までの期間に大きく増加している。この要因として、図-15に示すように、ASR によりコンクリートは膨張するが、膨張量が小さい場合、弾性体であると考えられ、そのひずみ量は、28 日圧縮強度、および 28 日静弾性係数より算出すると、 100μ 程度であると考えられる。材齢 330 日時点の測線ひずみは、 40μ ($10\mu \times 4$) であり、実際には、膨張は生じているものの、 100μ 以下の膨張量であった箇所が多く、ひび割れの発生が抑えられたため、約 30μ の差が生じたと推察される。材齢 380 日以降は、膨張量が進展し、ひび割れが発生することにより、弾性変形が解放され、実測値と予測値の差と軸方向ひずみは、概ね一致したと推察される。以上より、図-12に示すような緊張力の実測値と予測値の差が生じた要因として、ASR による膨張作用が 1 つの可能性として考えられた。

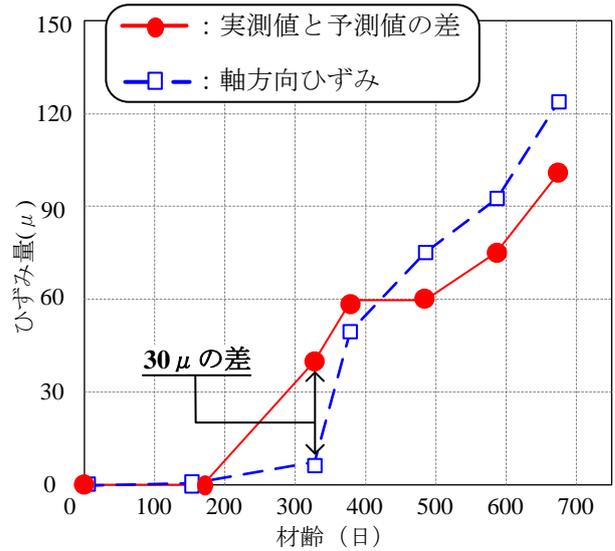


図-14 緊張力の差と軸方向ひずみの経時変化

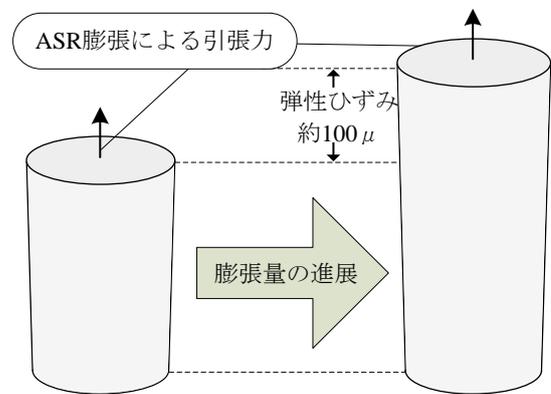


図-15 材齢330日における差の要因

5. まとめ

反応性骨材を使用した大型の PC 桁供試体を屋外暴露し、約 2 年間が経過した現在の緊張力変化、および部材変状を計測することで、以下の知見を得た。

- 1) PC 鋼より線を下側に配置した PC 桁供試体では、ひび割れ、および部材変形の計測結果より、ASR による劣化は、主に供試体上部で卓越していた。また、PC 桁供試体は、1.8mm 程度上方に反り返るような挙動が確認された。
- 2) 材齢 170 日以降、緊張力の実測値はほぼ一定の緊張力を保持しており、予測値との間に差が生じている。実測値と予測値との差は、測線ひずみより算出した軸方向ひずみと概ね一致しており、ASR による供試体軸方向への膨張作用が考えられた。

参考文献

- 1) 土木学会：昭和 53 年制定プレストレストコンクリート標準示方書，pp.7-26，1979
- 2) 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
- 3) PCI Committee on Prestress Losses: Recommendations for Estimating Prestress Losses, Journal of PCI, Vol.20, No.7, pp.44-67, 1975
- 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，金海鈺，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