

反応性骨材を使用した大型PC桁供試体の性状評価

住友大阪セメント(株)
九州工業大学 正会員 Ph. D.
九州工業大学
九州工業大学

○上原 伸郎
幸左 賢二
原口 政仁
上園 祐太

Abstract : Large-scale PC specimens using reactive aggregates were made and exposed to outdoor condition in order to investigate the behaviour variations of PC structure induced by Alkali-silica reaction. According to the crack condition and the concrete properties obtained by test pieces a year later, it is estimated that the degradation degree of specimens is in the interval between incubation stage and early progressive stage. Currently, the reducing of pre-stress is steadily presented as about 7% while the main rebar and stirrups performed the trend to swell slowly. Particularly, cracks develop intensively on the upper of PC specimens, due to the eccentric load of the pre-stress. In future, the degradation is predicted to be developed notably.

Key words : Prestressed Concrete, Alkali-Silica reaction, existing stress, rebar strain

1.はじめに

アルカリシリカ反応が生じた PC 部材の長期的な性状変化を評価するために、反応性骨材を使用した大型の PC 桁供試体を製作し、屋外暴露を実施している。本研究では、プレストレス導入初期において供試体の性能を評価した後、PC 鋼より線定着部に設置したロードセルによって緊張力の経時変化を計測するとともに、ひび割れ性状、鉄筋ひずみ、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数などから PC 桁供試体に生じた劣化状況の評価を5年間行うことを予定している。研究フローを図-1に示す。本稿では、打設後約1年が経過した ASR 劣化初期に相当する PC 桁供試体の変形挙動、緊張力経時変化などの途中経過について報告する。

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、厚さ550mmの長方形充実断面からなる供試体を4体作製した。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による鉄筋損傷を再現する目的で、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)鉄筋で一部の帯鉄筋を置き換えて使用した。軸方向鉄筋は10本、帯鉄筋は125mm間隔で35本使用した。図-2にNo.3およびNo.4供試体の縦断面図およびひずみゲージ貼付位置、図-3に同じく供試体横断面図を示す。なお、供試体端部には緊張力導入時の応力集中によるひび割れを防止する目的でグリッド筋を配置した。

[目的] ASRが生じたPC部材の長期的な性状確認					
[試験項目] ①プレストレス導入初期性能 ②プレストレス量の経時変化 ③暴露試験に伴う部材変状 ④ASR劣化時のプレストレス	項目	供試体No.			
		1	2	3	4
	①	○	○		
	②		○	○	○
	③			○	○
	④			○	○
[評価方法] ①推定初期ひび割れ荷重によるプレストレス量の推定 ②ロードセルによる緊張力変化の直接計測 ③ひび割れ性状、鉄筋ひずみ、外観変形、たわみ量計測 ④劣化後供試体の載荷試験によるプレストレス評価					
[本稿報告事項] 打設後約1年経過した劣化初期のPC桁供試体を対象に上記(評価)の①~③に関する計測経過について報告					

図-1 研究フロー

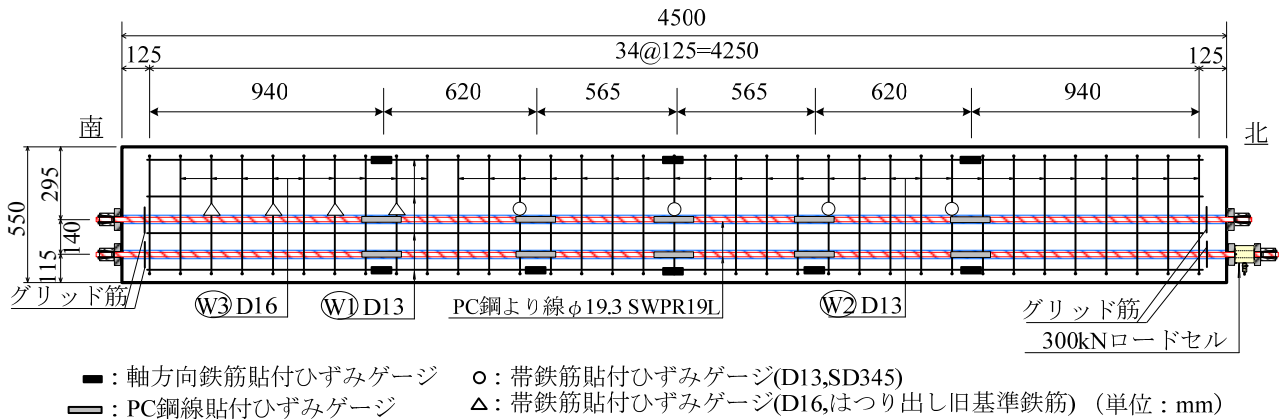


図-2 供試体縦断面およびひずみゲージ貼付位置図

2. 2 使用材料

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 4 体の供試体 (No.1~No.4) では、圧縮強度で $32.8 \sim 51.5\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数で $2.71 \sim 3.59 \times 10^4\text{N/mm}^2$ の差が生じているが、コンクリート標準示方書などで示された圧縮強度と静弾性係数の関係式などから考えればその関係は妥当と考えられる。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。

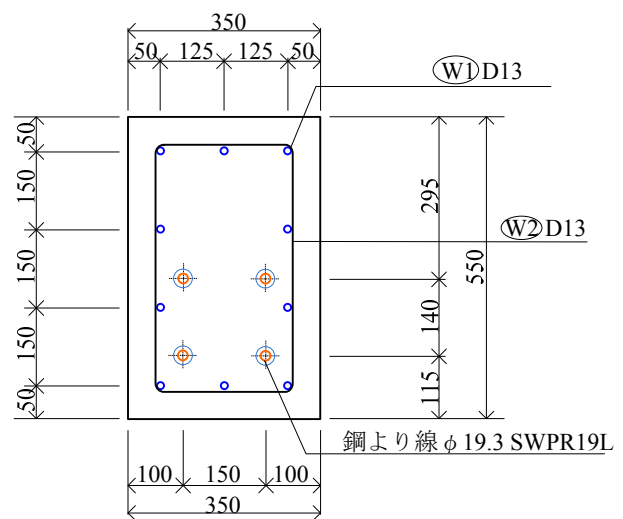


図-3 供試体横断面図

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	非反応性	反応性	非反応性		
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		
	項目	値	単位
コンクリート (材齢28日)	圧縮強度 (N/mm ²)	No.1	32.8
		No.2	35.4
		No.3	51.5
		No.4	48.0
静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	No.1	2.71	
	No.2	2.92	
	No.3	3.59	
	No.4	3.23	
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	

3. 供試体初期性能の確認

3. 1 緊張力導入

本研究では、PC鋼より線4本の内の下側の1本にセンターホール型のロードセル (容量300kN) を設置し、緊張力の直接計測を行った。また、緊張力の長期計測を行うため、No.2~No.4供試体では、シース管へのグラウト注入を行っていない。No.2供試体の緊張力導入時においてロードセルで計測された緊張力の変化を図 - 4 に示す。設計272kN (1116N/mm^2) に対して315kN (1292N/mm^2) まで緊張作業を行ったが、セットロスや4本の緊張材を順次緊張する際のコンクリートの弾性変形による緊張力の減少によって、緊張作業終了時 (約50分後) における緊張力は、導入力から約16.2%減少し、264kN (1083N/mm^2) となった。

3. 2 プレストレス量の評価

ロードセルによる緊張力の直接計測と併せて、部材全体に作用しているプレストレス量を評価するため、有効プレストレス推定法の一つである初期ひび割れ荷重推定法によって有効プレストレス量の推定を行った。なお、荷重試験における支点間距離は4100mmとし、等曲げ区間500mmの2点荷重とした。荷重方法は荷重制御片側繰返しで行い、変位は支間中央下縁に設置した変位計により計測した。推定法の概要を図-5、No.2 供試体での試験結果を図-6に示す。

曲げ荷重試験でひび割れが初めて目視確認されたのは約300kNであり、この時の荷重サイクルにおける荷重変位関係から一次勾配(0~200kN)と二次勾配(350~400kN)の近似直線を算出し、その交点における荷重を求めた結果、推定初期ひび割れ荷重は315kNとなった。このときの荷重荷重によって生じた供試体下縁応力、自重、および供試体の断面設計値から想定されるPC桁下縁の合計応力度のつり合い(図-5)から有効プレストレス量を逆算した結果、推定値は1159N/mm²となった。この値は、ロードセルの計測値から算出したプレストレス量(1083N/mm²)と7%程度の差であった。このことから、本研究で作製したPC桁供試体は、想定したプレストレスが部材全体に良好に作用していると判断された。

4. 暴露試験に伴う部材の変化

ここでは、No.4 供試体の部材の経時変化を4体の代表例として報告する。No.4 供試体は平成24年3月末に作製し、4ヶ月間空調のない屋内で養生した後、同年8月から現在まで9か月間、屋外暴露を行っている。以下に、ひび割れ性状、PC鋼より線の緊張力、軸方向および帯鉄筋ひずみの経時変化、およびPC桁供試体作製時に採取したテストピースの圧縮強度、静弾性係数の試験結果について報告する。

4. 1 ひび割れ性状

(1) ひび割れ密度

平成25年5月に行った屋外暴露期間9ヶ月のひび割れ観察結果を図-7に示す。本研究では、クラックゲージによってひび割れ幅を比較的容易に判断できる幅0.1mm以上のひび割れを基本的な分析対象としているが、今後生じるひび割れの傾向を示すと考えられる幅0.05mmのひび割れも併せて図中に表記している。

平成25年3月初旬(暴露後7ヶ月)に行ったひび割れ観察では、幅0.1mm以上のひび割れは認められなかった。2か月後の5月の観察では、図-7に示す通り、幅0.1mm以上のひび割れが各側面で認められるようになった。ここで、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会(以下、PC建協)が行った試験結果¹⁾を

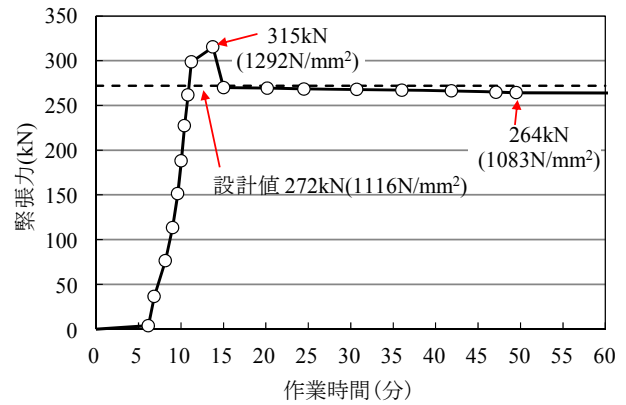
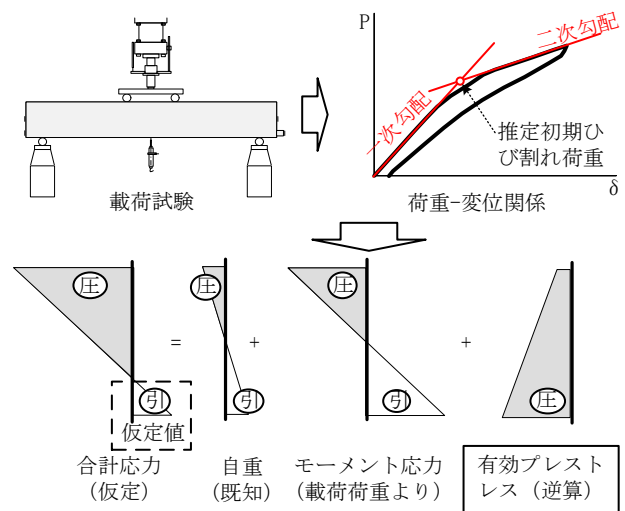


図-4 ロードセルによる緊張力計測結果



コンクリート応力のつり合いより有効プレストレスを逆算

図-5 初期ひび割れ荷重による推定法の概要

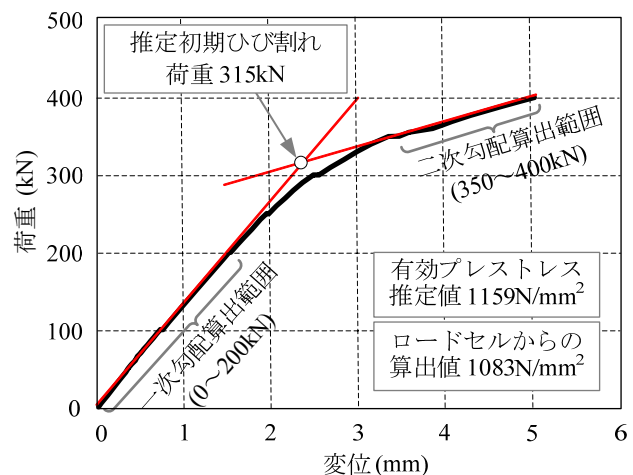


図-6 初期ひび割れ荷重推定結果(No.2供試体)

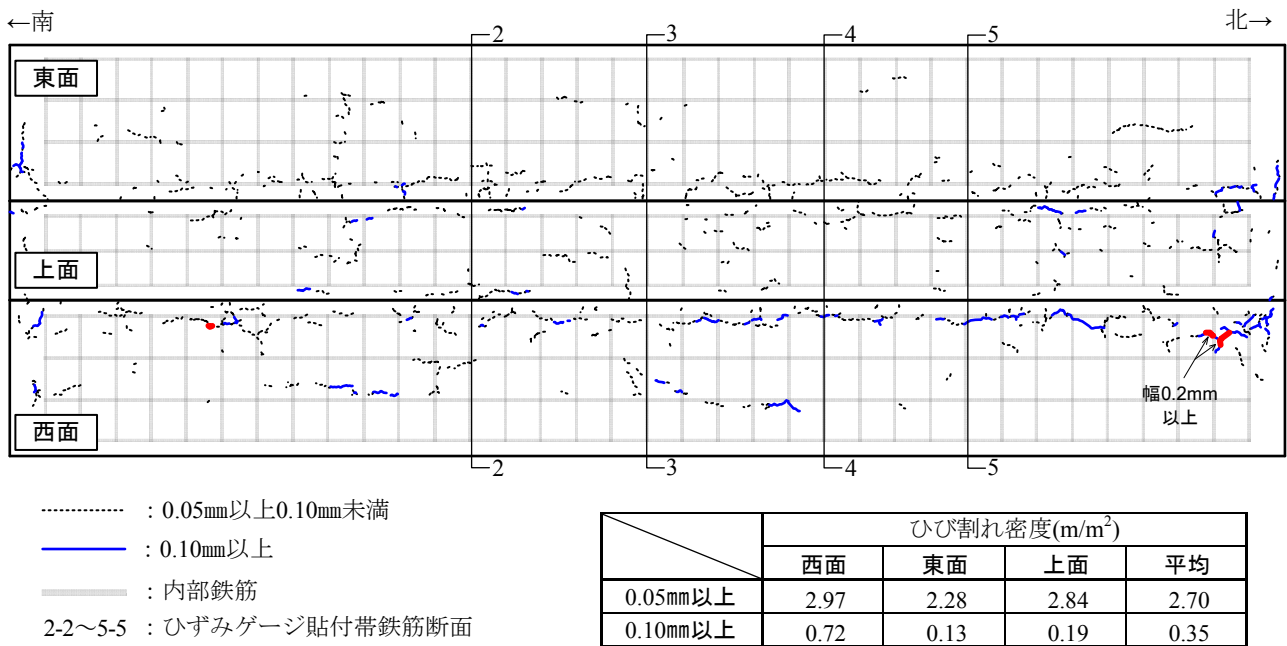


図-7 ひび割れ状況展開図(No.4供試体)

参考にすると、幅 0.05mm 以上を対象としたひび割れ密度(対象ひび割れの総延長/評価対象面積)は、材齢 150 日 (2~7 月) で 1.07m/m², 240 日 (2~10 月) で同じく 7.51m/m²と報告されている。本研究の No.4 供試体では、本年 5 月の観察において幅 0.05mm 以上のひび割れ密度が、3 面の平均として 2.70m/m² (東 2.28, 西 2.97, 上 2.84m/m²) であった。暴露後 7 ヶ月 (8~3 月) から 9 ヶ月 (8~5 月) の 2 ヶ月で劣化が顕在化したことと、PC 建協の試験結果を合せて考えれば、本供試体は、ASR 劣化判定における状態 I (潜伏期) から状態 II (加速期) へ移行する段階と考えられる。

なお、No.4 供試体よりも半年早く作製した No.1 および No.2 供試体では、図 - 7 に示した上側主鉄筋近傍のひび割れが主に卓越する性状を示しており、今後も供試体上縁側でひび割れ進展は顕著になると考えられる。

(2) ひび割れ分布

図 - 7 に示したひび割れ図を概観すると、ひび割れは供試体上縁寄りに多く発生しており、軸方向鉄筋最上段近傍で顕著になる傾向が窺えた。図 - 3 で示したように、本研究で作製した PC 桁供試体は、下側に PC 鋼より線 4 本を配置した偏芯構造となっており、緊張力導入後の応力分布は、図 - 8 に示すようになっている。

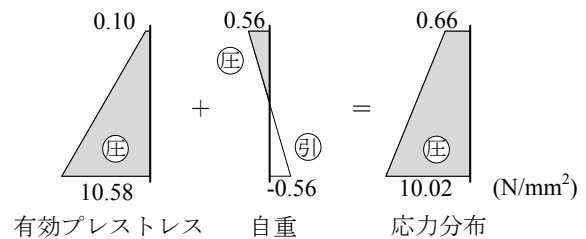


図-8 No.4供試体の応力分布(緊張力導入後)

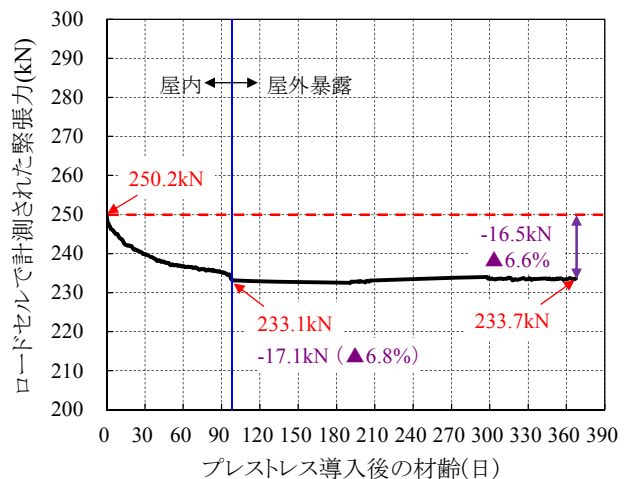


図-9 緊張力の経時変化

このため、導入された圧縮応力は上方に向かうほど相対的に小さくなっており、ASR で生じた膨張力に対する拘束力も供試体上部ほど小さいと考えられる。したがって、ひび割れの発生は、供試体上部において顕著になったと考えられる。なお、緊張方向と平行なひび割れが卓越しており、PC 構造で生じる ASR ひび割れの特徴が現れていることも確認される。

4. 2 緊張力の経時変化

No.4 供試体の緊張力導入後から約1年後までの緊張力の経時変化を図 - 9 に示す。

No.4 供試体では、緊張作業終了後に 250.2kN の緊張力がロードセルによって計測された後、屋外暴露までの間で 17.1kN の減少が確認され、屋外暴露後は、ほぼ一定の値が継続的に計測された。

ロードセルを設置した鋼線以外の 3 本を評価するため、それぞれの PC 鋼より線に貼付したひずみゲージの計測結果を図 - 10 に示す。図中にはロードセルで計測した緊張力を基に、公称断面積と弾性係数から算出した PC 鋼より線の推定ひずみ変化量 (LoadCell(WUexp)) も併記した。なお、凡例の ET(exp) などは、屋外暴露時に東側上段に位置することを示している。

PC-EU(exp)以外の 3 本は、ロードセルの緊張力計測値から推定したひずみ量とよく一致し、約1年間で 350 μ 程度の収縮傾向が確認された。PC-EU(exp) は 150 日頃から他と異なる傾向が認められているが、現在の時点で、コンクリート表面などに特異な変状は認められていない。今回得られた 7%弱の減少は、主にコンクリートのクリープによると推察される。

4. 3 鉄筋ひずみの経時変化

(1) ひずみゲージ貼付位置

軸方向鉄筋については、4つの隅角部に配筋された4本の鉄筋にひずみゲージを貼付した。帯鉄筋については、図 - 11 に示すように、2-2 から 5-5 断面の各箇所にはひずみゲージを貼付した。なお、供試体移動時の断線などによって欠測が生じたため、以後の評価は、比較的良好に計測されたひずみデータを用いて考察を行った。

(2) 軸方向鉄筋ひずみ

軸方向鉄筋ひずみの経時変化を図 - 12 に示す。

凡例の AR は軸方向鉄筋であることを示し、ET(exp) は屋外暴露時に東側上方に位置することを示している。

軸方向鉄筋のひずみは、緊張作業後から収縮方向のひずみが計測されたが、上方の鉄筋 (ET と WT) は 60 日頃から、下方の鉄筋 (EU と WU) では概ね 120 日頃から緩やかに膨張ひずみが計測されるようになった。この挙動から考えると、ASR が生じ始めたことで全体的に膨張力が作用したと推察される。

(3) 帯鉄筋ひずみ

帯鉄筋のひずみは、4-4 断面 (SR-4T, SR-4TS) の値と 3-3 断面 (SR-3TS, SR-3U) の値を評価に用いた。帯鉄筋ひずみの経時変化を図 - 13 に示す。なお、括弧内の E あるいは W は暴露時の方位を示している。

帯鉄筋の上方は、暴露後の材齢 130 日頃から現在までに 200 μ 程度の膨張傾向を示し、下方についても同様に膨張傾向を示しているが、上方と比較するとその割合は小さくなっている。図 - 7 に示したように上方

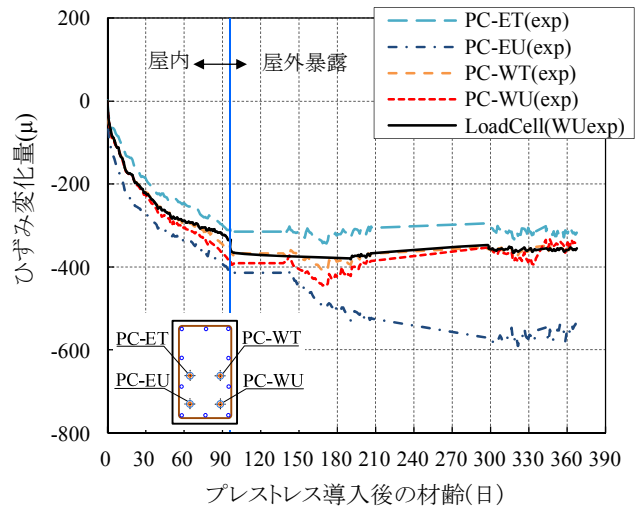


図-10 PC鋼より線ひずみの経時変化

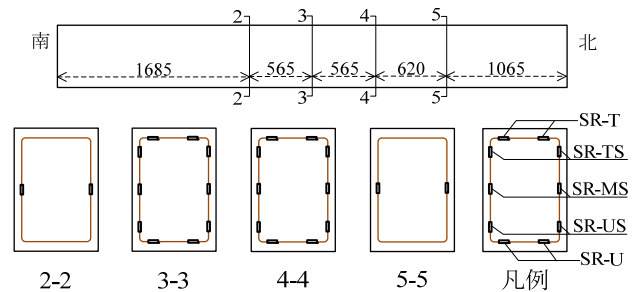


図-11 帯鉄筋ひずみゲージ貼付箇所 (D13)

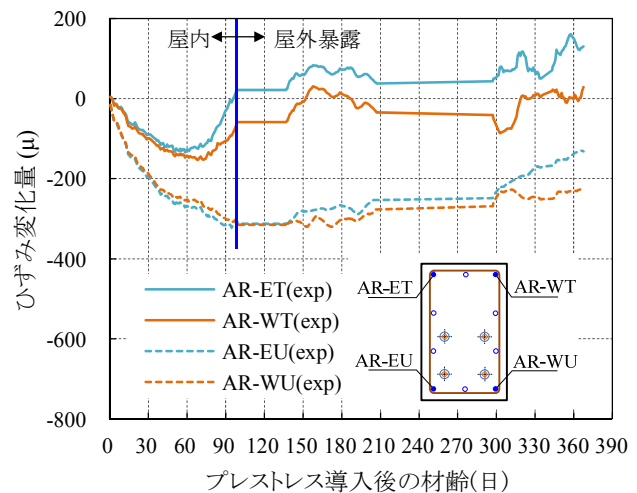


図-12 軸方向鉄筋ひずみの経時変化

においてひび割れが卓越していること、図-8の応力分布などを勘案すると、ASRによる膨張作用は主に上方側で顕著に生じていると考えられる。

4. 4 圧縮強度および静弾性係数の経時変化

圧縮強度と静弾性係数の経時変化を図-14に示す。なお同図には、傾向を明確にするためNo.3 供試体の計測結果も併せて示した。

材齢1ヶ月の圧縮強度は、No.3で51.5N/mm²、No.4で48.0N/mm²となっている。材齢10ヶ月ではそれぞれ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12か月の時点では、No.3の圧縮強度が68.4N/mm²、No.4が64.7N/mm²であり2ヶ月前と変化がなかったが、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。

ここで、圧縮強度試験前にテストピース側面(9本)で観察したひび割れ状況を展開図として図-15に示す。なお、図では平均的な3本(図中A, B, C)を代表例として図示した。図中に示したように、テストピースの幅0.05mm以上のひび割れ密度は9本の平均で0.32m²程度であった。しかしながら、静弾性係数の低下が確認されたことを考えると、表面上に変状が認められない初期の劣化状態でも、内部ではASR反応に起因する微細なひび割れが生成し始めている可能性を示唆すると考えられる。

5. まとめ

反応性骨材を用いたコンクリートでPC桁供試体(4500×350×h550mm)を屋外暴露に供し、緊張力、ひび割れ性状、鉄筋ひずみ、ならびに圧縮強度、静弾性係数の経時変化を計測した結果、以下の知見を得た。

- (1) 緊張作業終了後からの緊張力減少割合は、導入後約3ヶ月の時点において約7%(250.2kN→233.1kN)であり、その後が約1年経過した現時点においてもほぼ同程度の緊張力を保持していた。
- (2) 軸方向鉄筋、帯鉄筋のひずみ変化、ならびに圧縮強度、静弾性係数の測定結果から、No.4供試体は劣化状態I~II(初期)に相当すると判断され、供試体下方に偏心させたPC供試体では、ASRひび割れは部材上部に多く発生する傾向が確認された。

参考文献

1) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：ASR対策検討委員会報告書，2009.3

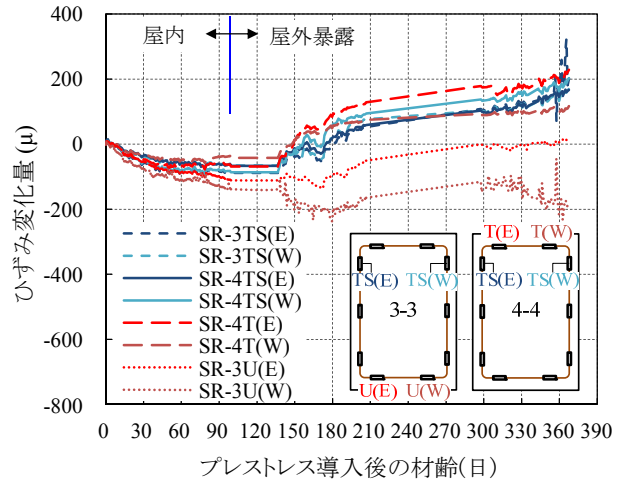


図-13 帯鉄筋ひずみの経時変化

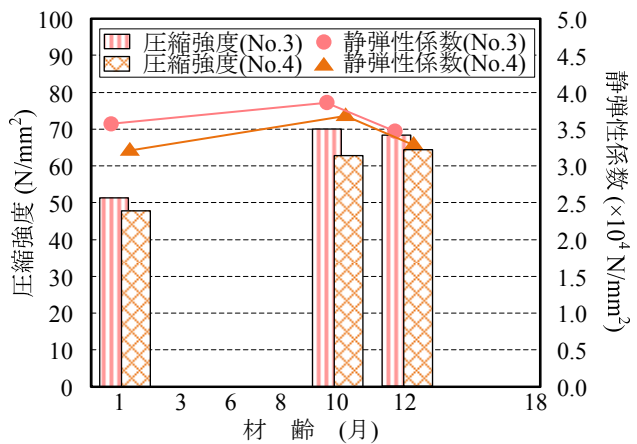


図-14 コンクリートの強度変化(テストピース)

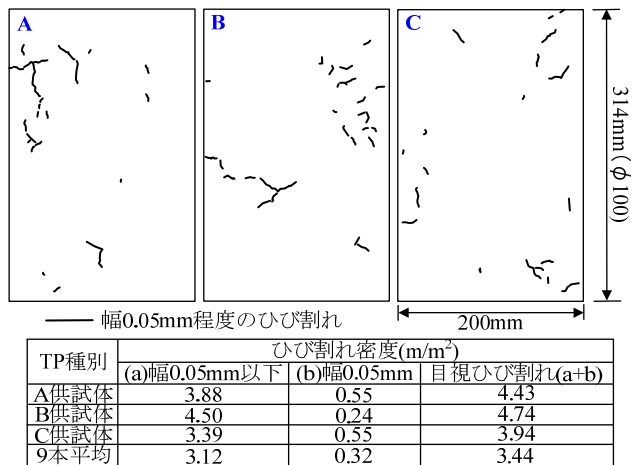


図-15 テストピース側面のひび割れ状況(展開図)