論文 反応性骨材を用いた PC 部材の劣化挙動

矢野 佑輔*1・幸左 賢二*2・益田 紘孝*3

要旨:反応性骨材を使用した PC 桁供試体の暴露試験に対して、ASR による材料劣化と膨張ひずみを考慮し た FEM 解析, 乾燥収縮を考慮した試算を実施した。その結果, 反り返り変形は実測値 1.50mm に対して, 解 析と試算を合計した反り返り量 1.04mm と概ね一致した。また、要因分析を行った結果、反り返りの主要因 は材料劣化であると推察された。一方, PC 鋼線ひずみの実測値に対して予測値と比較した結果, 材齢 300~ 1500 日にかけて 250μの差が生じた。それに対して、膨張量を考慮した解析では 444μとなり、絶対量に差は あるが、引張側へ推移する傾向としては一致した。

キーワード:ASR, PC, 暴露試験, FEM, 乾燥収縮, 反り返り, プレストレス

1. はじめに

著者らは、ASR が生じた PC 部材の長期的な劣化性状 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) を作製した。表-1 に No.1~4 供試体の試 験項目を示す。表に示すように,各劣化度における載荷 試験, ひび割れ観察やプレストレス計測などによる長期 的な部材変状の計測を行っている。

そこで、本稿では、材齢 1500 日が経過した No.4 供試 体の屋外暴露試験に伴う ASR 劣化性状について, FEM 解析,試算を用いて検討を行った。具体的には,FEM 解 析では、劣化が生じはじめた材齢 300 日以降を対象に、 ASR による材料劣化, 膨張ひずみを考慮した弾塑性モデ ルを用い, No.4 供試体に生じた部材変形, プレストレス 変化の再現,そのメカニズムについて評価を行った。一 方, 試算では, 乾燥収縮, クリープにより供試体に生じ る挙動を推測し,解析結果と併せ,部材変形,プレスト レス変化に与える要因分析を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-1 に供試体概要を示す。本研究では、長さ 4500, 幅 350, 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、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。No. 3.4 供試体は

表-1 試験項目

		供試体 No.				
		1	2	3	4	
載荷試験	初期	0	0			
	劣化度中	\triangle		\bigtriangleup		
	劣化度大		\triangle		\bigtriangleup	
ひび割れ観察		0	0	0	0	
膨張量計測				0	0	
変形量計測				0	0	
プレストレス量計測				0	0	
変形挙動の解析的検討					0	
	\cap	・実施済	計測中	へ ・ 値	2 施予定	



*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)

打設から約100日間,空調のない室内で養生した後,現 在の材齢1500日まで屋外暴露を実施している。

表-2 にコンクリート配合を示す。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% (=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%使用した。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 8 kg/m³となるように NaCl を添加した。

2.2 計測概要

本研究では、緊張力の経時変化、長期的な膨張量、お よび部材変形などを計測している。緊張力の計測方法と しては、図-1中に示すロードセルを下段片方の PC 鋼線 の定着部に設置することで、直接計測している。

図-2 に計測方法を示す。部材変形の計測方法として は、図中に示すディプスゲージを用いて、供試体周りに 設置した固定アングルを基準として、供試体上縁との距 離を断面の4箇所を計測した。なお、対象断面は、供試 体端部から250mmを基点に、1000mmピッチで断面A~ Eの計5断面とした。

2.3 ひび割れ劣化状況

図-3 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。図には、No.4 供試体の各幅の ひび割れ密度の推移を併せて示した。No.4 供試体のひび割 れ密度は、材齢 300 日から 380 日にかけて 0.45m/m² から 2.70 m/m² と急激に増加した。その後、経過日数に伴いほ ぼ単調に増加していき、材齢 1300 日で 10.78 m/m², また、 幅 0.20mm 以上のひび割れ密度では 3.16 m/m² となった。 また、No. 3 供試体の幅 0.20mm 以上のひび割れ密度は、 No. 4 供試体と概ね同様な劣化傾向を示していた。

以上のひび割れ状況より No. 4 供試体では, 材齢 300 日頃から ASR 劣化が進展し続けていることが確認され, No. 3 供試体と概ね同様の劣化傾向を示していた。

3. 解析手法

3.1 解析モデル

解析は、2次元弾塑性 FEM 解析によって実施した。解 析モデルは No. 4 供試体を対象に、コンクリートのメッ シュを 50×50mm とし、軸方向に 90 分割、高さ方向に 11 分割した。コンクリートは平面応力要素とし、鋼材は埋 め込み鉄筋要素とした。支承は端部から 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。

コンクリートの応力-ひずみモデルは引張側で最大 主応力基準,圧縮側で Drucker-Prager を用い,鋼材の応 力-ひずみモデルは Von-Mises を用いており,詳細は文

表-2 コンクリート配合

単位量 (kg/m ³)									
水	水 セメント	細骨材		粗骨材		促進		AE	
175	381	<u> </u> 反応性 459	非反心 289	<u> 反応性</u> 509	<u> </u> 非反応 501	称刀	^山 介	<u> 佩</u> //利 114	



図-2 計測方法





献¹⁾に示す。初期の荷重条件として,PC 鋼線をモデル化 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,No.4 供試体に生じた材齢 300 日時点のプ レストレスを作用させた。

実施した解析ケースは、材料劣化モデル、膨張ひずみ モデルの有無を組み合わせた計 3 ケースとした。case1 では材料劣化と膨張ひずみの両者を考慮したもの, case2 では膨張ひずみのみを考慮したもの, case3 では材料劣化 のみを考慮したものとし、それぞれ解析を実施した。

3.2 材料劣化モデル

材料劣化のモデル化は、No. 3,4 供試体と同時期に作製 したシリンダーの圧縮試験結果を基に行った。図-4 に コンクリート物性の経時変化を示す。図中より、No. 3,4 の圧縮強度,静弾性係数はともに材齢 300 日まで増加し, 材齢 300 日以降に劣化進展が確認された。材齢 1500 日 における No. 4 シリンダーの圧縮試験は実施していない ため、No.3シリンダー結果を参考に、No.4の圧縮強度, 弾性係数を予測した。図中(A)より、No.3の圧縮強度, 静弾性係数は材齢 300~1500 日にかけて,両者とも約 50%低下している。よって,図中(B)より,材齢 1500 日 における No.4の圧縮強度は 31.5N/mm²(=62.9×0.5),静 弾性係数は 18.5kN/mm²(=37.0×0.5) と予測し,圧縮強度, 静弾性係数ともに 50%低下させるモデルとした。

3.3 膨張ひずみモデル

膨張ひずみのモデル化は、本供試体と配合、形状が概 ね同様であるプレストレスト・コンクリート建設業協会 (以下, PC 建協)の供試体の膨張計測結果を基に行った³⁾。 PC 建協では、ASR 供試体と健全供試体の2 種類の供試 体を作製している。この2 種類の供試体のひずみの差分 は乾燥収縮、クリープ因子によるひずみを除いた ASR 因子のみによるひずみとなると考えられ、その値を本解 析で与える膨張ひずみとした。なお、乾燥収縮、クリー プによる影響は、後述する試算によって考慮している。 以下に、鉛直方向、軸方向ひずみモデルを示す。

(1) 鉛直方向ひずみモデル

図-5 に鉛直方向ひずみの計測結果を示す。健全供試体はほぼ0の値を保っているのに対し,ASR供試体では材齢100日頃からASRにより膨張し続け,材齢1300日で3200µとなっている。よって、本供試体でも同様な膨張が生じると仮定し、材齢300日で0µ、材齢1500日で3200µとなるように、鉛直ひずみを与えるモデルとした。(2)軸方向ひずみモデル

図-6 に軸方向ひずみの計測結果を示す。健全供試体 はクリープ等による影響により収縮し続け,材齢 1300 日で-600µとなっている。一方,ASR供試体では材齢 100 日頃は-400µの収縮ひずみが確認されたが,ASR 膨張に より材齢 1300 日で-50µとなっている。よって,本供試 体でも同様な膨張が生じると仮定し,材齢 300 日で 0µ, 材齢 1500 日で 550µ(=600µ-50µ)となるように,軸ひずみ を与えるモデルとした。

4.反り返り

4.1 乾燥収縮の影響

解析では、前述したように、ASR による材料劣化と膨 張ひずみをモデル化し、ASR の影響について検討した。 一方、乾燥収縮による影響については、試算を用いて検 討することとした。試算過程は、以下の1)~3)に示す。 1)まず、No.4供試体に生じる乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129試験値を参考とした式(1)より求められる³。

$$\varepsilon'_{sh}(t,t_0) = \frac{\frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \cdot \varepsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)}$$
(1)



図-4 コンクリート物性の経時変化



図-5 鉛直方向ひずみの経時変化2)





表-3 計算要素と収縮の想定値

骨材の吸水率w(%)	2.0
骨材の品質係数α	4
乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数β	40
乾燥収縮ひずみの終局値ε'sh,inf(μ)	928
有効部材厚d(mm)	225
緊張力導入時の材齢t ₀ (日)	28
相対湿度RH(℃)	70

ここに, ε_{sh}:部材の収縮ひずみ, ε'_{sh,inf}:乾燥収縮ひずみ の終局値, RH:相対湿度(%), t,t₀: コンクリートの材齢 および乾燥収縮開始材齢(日), d:有効部材厚(mm), β: 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数 **表**-3 に計算要素と収縮の想定値を示す。まず,標準 的な骨材の値を参考に,骨材の吸水率 w は 2.0,品質係 数αは4と仮定した。それらの値を用いて,コンクリー ト標準示方書³⁾より算出した結果,本供試体の収縮ひず みの終局値ε'sh,inf は 928µ,経時変化を表す係数βは40と なった。また,相対湿度は北九州市の年平均相対湿度70%, 有効部材厚は断面の平均部材厚 225mm (=(550+350)/2) とした。以上から,式(1)より,表-3の値を用いて,供 試体に生じる乾燥収縮ひずみを算出すると,図-7のよ うな経時変化になった。図-7より,乾燥収縮ひずみは 材齢 300日頃まで急激に増加し,その後は漸増している。 部材変形の計測を開始した材齢 500~1500日までの乾燥 収縮ひずみの変化量は 123µ (=614-491)となった。

2) 次に,反り返り量を求めるために,先ほど算出した乾燥収縮ひずみが PC 鋼線の偏心によって,供試体上下で 生じる軸方向ひずみ差を求めた。図-8 に乾燥収縮に伴 う収縮挙動の模式図,図-9 に上下縁のひずみの算出を 示す。図-8 から,自由収縮ひずみɛ1 に対して鋼材によ る拘束があるため,実際に生じる収縮ひずみɛ2 は,力の 釣合と変形の適合条件を満たす式(2)より求められる。

$$\varepsilon_2 = \frac{E_c * \varepsilon_1}{(p * E_s + E_c)} \tag{2}$$

ここに, ε₁:自由収縮ひずみ-123μ, ε₂:拘束条件下での 収縮ひずみ, p:鋼材比, Es:鋼材の弾性係数 2.0×10⁵ N/mm², Ec:健全時のコンクリートの弾性係数 3.24×10⁴ N/mm²

上下半分の鋼材比は、図-9(a)に示すように、断面を 上下に 2 等分し、それぞれの図心位置で算出した結果、 上側で 0.66%、下側で 1.67%となった。よって、式(2)よ り、供試体上下の図心位置のひずみ量は、図-9(b)に示 すように、上側で-118µ、下側で-112µ となる。さらに、 この 2 点のひずみ量に対して、直線を延長し、上下縁の ひずみ量を算出した結果、上縁で-120µ、下縁は-108µ と なり、上下縁の軸方向ひずみ差-12µ が確認された。

3) 最後に,乾燥収縮によって生じる反り返り量を,先ほ ど算出した上下のひずみ差(曲率)から求めた。反り返り 量は,曲率に対して供試体長さを積分したものであり, 式(3)より求められる。

$$v = \varphi \int_0^{L/2} x dx = \varphi \times \frac{L^2}{8}$$
(3)

ここに、v:反り返り量(mm)、φ:曲率(1/mm)、L:ス パン長 4000mm

よって、乾燥収縮による反り返り量は、上下のひずみ 差-12μ(φ=-2.18×10⁻⁸)から、-0.04mm となった。

4.2 実験および解析結果

図-10 に材齢 500~1500 日における実験と解析 case1



の部材変形の比較を示す。実験値は、図-2 に示すディ プスゲージを用いて計測し、各断面につき計測点2箇所 の a 点, b 点の平均値を用い、解析値は、計測位置に相 当する各断面上縁の変位量を用いて比較した。図中より、 実験では、端部の断面 A, E で平均 1.39mm の変形量, 中央の断面 C で 2.89mm の変形量が確認され、反り返り 量は 1.50mm となった。一方、解析 case1 では、端部の 断面 A, E で 1.52mm、中央部の断面 C で 2.50mm と確認 され、反り返り量は 0.98mm となった。以上より、解析 の部材変形の再現は、一様変形は 90%(=1.39/1.52)の値 となり、反り返り変形は65%(=0.98/1.50)の値となった。

次に,解析結果 0.98mm に対して,試算で算出された 乾燥収縮による反り返り量-0.04mm を足し合わせると, 反り返り量は 0.94mm となり,実験値 1.50mm に対し 63% の値となる。ここで,反り返り量の実験値と解析 casel で差異が生じた要因の一つとして,図-4 中の材齢 1500 日時点の静弾性係数の値をやや大きく評価したことが 考えられる。なぜならば,材齢 1500 日時点の静弾性係 数は,応力ひずみ曲線において弾性域が直線的な挙動を 示さなかったため,ピークと原点を結んだ傾きで評価し た。そのため,弾性係数は健全値に対し 50%の値となっ た。一方,反り返り変形は初期勾配の影響が大きいこと から,1/3 割線弾性係数の定義を用いると,材齢 1500 日 の弾性係数は健全値に対し 30%程度の値となり,より大 きな反り返り量となる。

4.3 反り返りの影響度

図-11に材齢500~1500日における各因子による反り 返り量と軸方向ひずみを示す。図中(a)は膨張ひずみのみ を考慮した case2 の結果で, PC 鋼線の偏心により供試体 下部で膨張ひずみが拘束され,上下のひずみ差30µとな り,反り返り量0.12mmが生じた。図中(b)は材料劣化の みを考慮した case3 の結果で,プレストレスにより供試 体下部で収縮ひずみが卓越し,上下のひずみ差182µと なり,反り返り量0.74mmが生じた。図中(c)は4.1節で 示したように,上下のひずみ差-12µとなり,反り返り量 -0.04mm が生じた。これらの反り返り量の総和は, 0.82mmとなり,前述した case1と試算結果を合計した反 り返り量0.94mmと概ね一致する。以上より,各因子の 反り返り量の比率から,反り返り量の主要因は材料劣化 と考えられる。

5. プレストレス変化

5.1 実験結果

緊張力は、図-1に示すように、No.3、4供試体ともに、 PC 鋼より線の定着部に設置したロードセルによって継 続的に計測した。図-12 に PC 鋼線のひずみ変化を示す。



計測は材齢0日から開始したものの,材齢100日で屋外 暴露を開始したため,ロードセルのリセットを行ってい る。そのため,同図(a)に材齢0~100日におけるPC 鋼線 のひずみ変化,同図(b)に ASR が生じ始めた 300~1500 日におけるPC 鋼線のひずみ変化を分けて示した。 0~100日のひずみは、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を除して算出 し、300~1500日は、ロードセルで計測されたひずみの 値を用いた。また、No.4 予測値は、クリープ、および乾 燥収縮については、コンクリート標準示方書の式³⁾を用 い、PC 鋼より線のリラクセーションについては、PCI の式⁴⁾を組み合わせて算出した。

0~100 日における PC 鋼線のひずみは,実測値および 予測値ともに材齢0日から低下し始め,材齢100日にお いては,実測値,計測値それぞれ-335µ,-466µであり, 概ね同じ値となっていた。300~1500日において PC 鋼線 のひずみの予測値は,材齢の経過とともに減少していた ことに対して,計測値は,ひずみ変化は見られなかった。

材齢1500 日において,計測値と予測値で250µの差が 生じていた。この差は,ASRによる膨張の影響が考えら れるため,次節で計測値と解析結果と比較し検討する。

5.2 解析結果との比較

図-13 に ASR 因子によるひずみ変化について実験結 果と解析結果の比較を示す。図中での PC 鋼線ひずみの 実験結果とは、図-12 中の実験値から予測値を差引いた ものである。図中より、実験結果は引張ひずみが生じ、 材齢 1500 日で 250µ となっている。casel も、実験結果 と同様に引張ひずみが生じ,材齢 1500 日で 444µ となり、 絶対量に差はあるものの、PC 鋼線ひずみが引張側へ推移 する傾向としては、一致したと考えられる。また、case2 では 706µ と非常に大きな引張ひずみが生じており、 case3 では-216µ の圧縮ひずみが生じた。case2,3 を重ね合 わせると 490µ (=706µ-216µ) となり、casel の 444µ と概 ね一致していることから、casel では材料劣化と膨張ひず みの両者が釣合って生じていると考えられる。

実験値と casel で差異が生じた要因の一つとして, 4.2 節でも述べたように, 材齢 1500 日の静弾性係数の値を やや大きく評価したことだと考えられる。

6. まとめ

材齢1500日が経過し,ASR劣化したPC桁供試体の実 験結果と,ASRによる材料劣化と膨張ひずみを考慮した 解析結果,乾燥収縮とクリープを考慮した試算結果より, 以下の知見を得た。

- 材齢 500~1500 日にかけて、実験、解析ともに反り 返り挙動が確認され、実験値では 1.50mm、解析値 では 0.98mm となった。さらに、乾燥収縮による反 り返り量を考慮すると、1.04mm(=0.98+0.06)となり、 実験値に対して 70%の値となった。
- 反り返りは、上下の軸方向ひずみ差により発生する と考えられる。解析結果より、膨張ひずみのみを考



図-13 解析結果との比較

慮した case2 では鋼材比の差異により 30µ, 材料劣 化のみを考慮した case3 ではプレストレスの偏心に より 182µ, 試算結果より, 乾燥収縮では鋼材比の差 異により 12µ の上下の軸方向ひずみ差が生じた。そ の結果, 反り返り量は case2 で 0.12mm, case3 で 0.74mm, 試算で 0.06mm となり, No. 4 供試体に生 じた反り返り変形は, 材料劣化が主要因であると推 察された。

3) PC 鋼線ひずみの実測値に対して予測値と比較した 結果,材齢 300~1500 日にかけて 250µ の差が生じ た。それに対して,解析 casel では 444µ となり,絶 対量に差はあるが,引張側へ推移する傾向としては, 一致したと考えられる。また, case2 では 706µ, case3 では-216µ となり,それらを重ね合わせると 490µ と なり, case1 と概ね一致することから, casel では材 料劣化と膨張ひずみの両者が釣合って生じている と考えられる。

参考文献

- 上園祐太,幸左賢二,鄭玉龍,矢野佑輔:数値解析 による ASR 劣化した PC 部材の変形挙動評価,コン クリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.699-704, 2016.
- (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.62-68, 2009
- 3) 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.
- PCI Committee on Prestress Losses: Recommen dationsfor Estimating Prestress Losses, Journal of PCI, Vol.20, No.7, pp.44-67, 1975.