

## 高炉スラグ微粉末 6000 を混和した PC 梁部材の ASR 劣化に対する耐荷力特性

(株) 安部日鋼工業 正会員 博 (工) ○國富 康志  
 (株) 安部日鋼工業 正会員 工修 石井 豪  
 (株) 安部日鋼工業 正会員 工修 辛 軍青  
 金沢大学大学院 正会員 工博 鳥居 和之

## 1. はじめに

近年、高炉スラグ微粉末を用いて耐久性を向上させた PC 構造物の建設事例が増えつつある。高炉スラグ微粉末は、塩化物イオンの浸透や ASR を抑制する効果があることが知られているが、本試験を開始した 2005 年当時は、PC 構造物に着目した ASR 抑制効果に関する報告が多くなかった。このことから、高炉スラグ微粉末を含有した PC 構造物の ASR 抑制効果を明らかにするため、2005 年 7 月から屋外にて促進暴露試験を実施した。本報告は、ASR 劣化が進行した PC 梁試験体の載荷試験結果を報告するものである。

試験の結果、早強ポルトランドセメントのみの配合に比べ、早強ポルトランドセメントの質量比 50% を高炉スラグ微粉末 6000 に置換した配合では ASR の抑制に効果があることを確認した。また ASR 劣化を生じた PC 梁試験体の曲げ載荷試験による荷重-変位の挙動は、材料特性値の低下や PC 鋼材の腐食にともなう引張強度の低下を考慮することで検証することができた。

## 2. 試験概要

## 2.1 使用材料

本試験で使用した結合材は、①早強ポルトランドセメント (密度: 3.14 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 4510cm<sup>2</sup>/g) と、②粉末度 6000 の高炉スラグ微粉末 (密度: 2.91 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 5800cm<sup>2</sup>/g) を早強ポルトランドセメントの質量比 50% に置換した材料である。また、骨材は JIS A1145 「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (化学法)」にて事前に確認<sup>1)</sup>して顕著な ASR 膨張を示した北海道産の反応性骨材 (安山岩の碎石と砕砂) と、比較のための無害骨材を使用した。反応性骨材の主要な反応性鉱物はクリストバライトとトリディマイトである。

## 2.2 コンクリート配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。表の試験体種類に記載する各記号に関して、「H」と「B」は結合材の種類を表しており、「反」と「無」は骨材の種類を表す。「H」は早強ポルトランドセメント単味、「B」は高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランドセメントの質量比 50% を置換した結合材である。また、「反」は反応性骨材、「無」は無害骨材を表している。各配合の設計基準強度は 50N/mm<sup>2</sup>とした。なお、反応性骨材を用いた配合については、骨材の ASR 膨張を早期に確実に発生させ、比較試験が進められるように、添加アルカリとして、等価 Na<sub>2</sub>O 量で 10kg/m<sup>3</sup> と多量の NaCl を添加した。

## 2.3 PC 梁試験体の概要

PC 梁試験体の概要を図-1 に示す。断面 150mm×300mm、長さ 3000mm に、1S15.2 の PC 鋼材 1 本を下側に偏

表-1 PC 梁試験体に使用したコンクリート配合

試験体種類	W/B <sup>※</sup> (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )					化学混和剤 (B×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	
			W	C	高炉スラグ 微粉末	S	G				添加 アルカリ
H+反	38	44.0	150	395	-----	839	1048	18.9	1.20	10±2.5	2±1
B+反	38	44.0	150	197.5	197.5	833	1040	0.70			
H+無	35	41.1	146	417	-----	731	1045	0.55			
B+無	34	41.4	142	209	209	723	1048	0.55			

※) : 結合材量 (早強ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末)

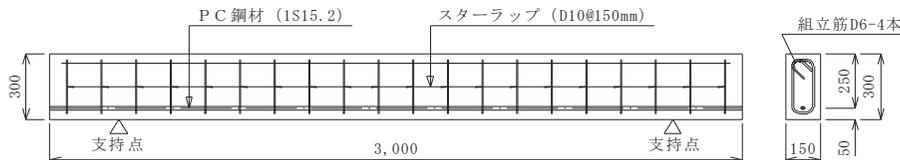


図-1 PC 梁試験体の概要

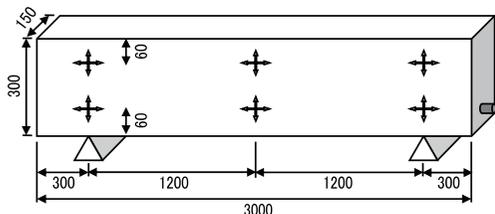


図-2 膨張量と超音波伝播速度の計測位置

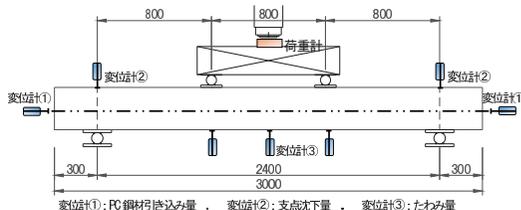


図-3 計測機器設置概要図

心配置させたプレテンション梁部材であり、蒸気養生終了後の材齢 18 時間にてプレストレス（導入直後の PC 鋼材応力：1261N/mm<sup>2</sup>）を導入した。その後、約 2 週間の屋内保管を行った後に、屋外に 2 点支持で暴露を開始した。屋外暴露を実施した地域の降水量は年間 1800mm、日照時間は 2000 時間である。

## 2.4 測定項目

PC 梁試験体の ASR 劣化性状を確認するための測定は、膨張率とそり量、超音波伝播速度を対象とした。膨張率と超音波伝播速度の測定位置を図-2 に示す。膨張率は、部材軸方向と部材鉛直方向の 2 方向測定した。また、そり量の測定は、PC 梁試験体がプレストレスや ASR 膨張の影響で上方へ反るため、試験体下面の両端部で水糸を張り、支間中央位置での水糸と PC 梁試験体下縁の距離を測定した。

PC 梁試験体の耐荷力を確認するための測定は、曲げ載荷試験（3 等分点載荷）による荷重と PC 梁試験体の変位を対象とした。曲げ載荷試験の概要を図-3 に示す。

## 3. PC 梁試験体の ASR 劣化性状

### 3.1 膨張率

PC 梁試験体の部材鉛直方向と部材軸方向の膨張率を図-4、図-5 に示す。測定値は、図-2 に示す測定位置のうち、上縁側 3 箇所での平均値である。測定の結果、反応性骨材を使用した配合のうち、H+反は暴露開始直後から顕著な膨張が発生し、B+反は暴露 1 年を経過した頃から徐々に膨張が進行し始めた。また、無害骨材を使用した配合では膨張を生じていない結果となった。ASR 膨張を示した PC 梁試験体において、3 年を経過した頃からは H+反と B+反の両試験体とも膨張が収束し、その後は安定した挙動を示しており、高炉スラグ微粉末を使用することで膨張量を 1/3~1/2 程度に抑制する効果が確認された。本試験において、反応性の高い骨材を使用しており、多量のアルカリを添加しているため、高炉スラグ微粉末 6000 を使用しても、ASR を完全に抑制することはできなかった。

一方、測定方向に着目すると、部材軸方向よりも鉛直方向の膨張率が大きい結果であり、これは部材軸方向に導入されているプレストレスおよび PC 鋼材の拘束による影響と推測される。

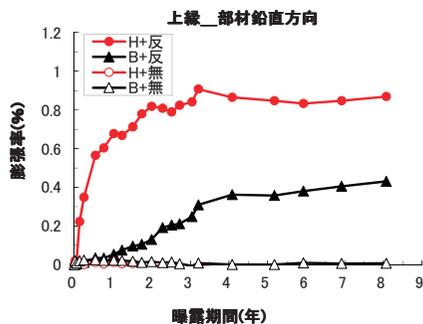


図-4 PC 梁試験体の膨張率 (鉛直方向)

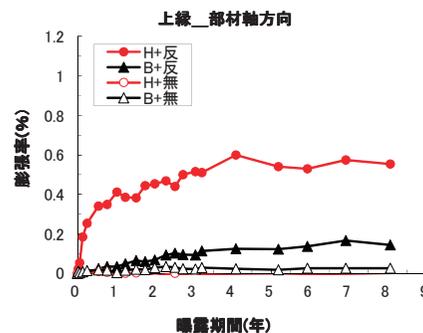


図-5 PC 梁試験体の膨張率 (軸方向)

### 3.2 そり量

PC 梁試験体のそり量の経時変化を図-6 に示す。測定の結果、H+反では、暴露開始時からそり量が急速に増加する傾向であり、暴露後3年が経過した時点で39mmのそり量が生じ、8年経過時まで増進して最大48mmに至った。一方、B+反については、暴露1年経過後の膨張開始時期からそり量の緩やかな増加が確認され、暴露開始後3年が経過した時点で14mmのそり量が生じ、8年経過時には最大21mmであった。8年経過時のB+反のそり量はH+反の4割程度であり、PC 梁部材での高炉スラグ微粉末使用は、ASR 劣化にともなう異常なそり量を抑制する効果があることを確認できた。

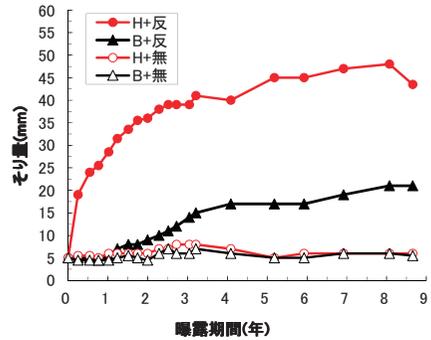


図-6 PC 梁試験体のそり量

### 3.3 超音波伝播速度

PC 梁試験体の超音波伝播速度を図-7 に示す。測定方向は、部材幅 (150mm) 方向である。測定の結果、H+反では、暴露開始直後から超音波伝播速度が低下しており、4000m/sec 程度で安定している。低下を示した時期は膨張の発生時期と一致しているが、その後の挙動は異なっており、これは、PC 梁試験体内部のひび割れ発生状況の影響などが考えられる。

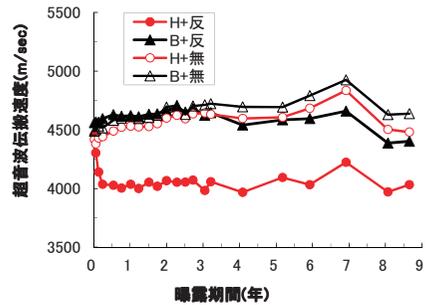


図-7 PC 梁試験体の超音波伝播速度

一方、B+反については、無害骨材を用いたPC 梁試験体 (H+無, B+無) と同様に暴露開始後から4500m/sec 程度を維持しており、その挙動は膨張量の計測結果と異なりASR にもなう劣化が反映されていない結果である。これは、B+反はASR による膨張を示したものの、高炉スラグ微粉末が混和されていることでのASR 抑制効果により、内部ひび割れ密度がH+反より抑えられ、PC 梁試験体全体の平均超音波伝播速度として大きな変化がみられなかったためと推察される。

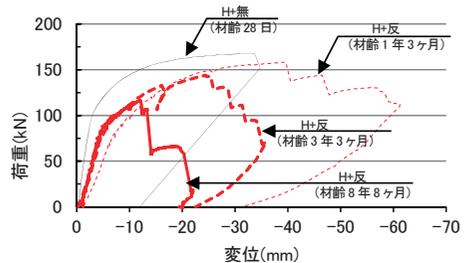


図-8 荷重変位関係係 (H+反, H+無)

## 4. PC 梁試験体の耐力

### 4.1 荷重-変位

図-8 と図-9 に、それぞれ「H+反と H+無」、「B+反と B+無」の載荷試験結果を示す。なお、無害骨材を用いた試験結果反応性骨材を用いた結果と比較するために記載するものであり、材齢が進行しても同程度の耐力を維持していたため、材齢28日の結果のみ図示する。図に記載する材齢 (1年3ヶ月, 3年3ヶ月, 8年8ヶ月) は、載荷試験を実施した時期であり、それぞれH+反のPC 梁試験体にひび割れが発生した時期、B+反のPC 梁試験体にもひび割れが発生した時期、H+反およびB+反のPC 梁試験体でASR 膨張が収束傾向を示した時期である。測定の結果、H+反のPC 梁試験体については、材齢28日のH+無における耐力と比較して、材齢1年3ヶ月時には5%の低下、材齢3年3ヶ月時には16%の低下、材齢8年8ヶ月時には31%の低下が確認された。一方、B+反の試験では、材齢3年3ヶ月でも健全な試験体 (B+無) の結果と同程度であり、十分に耐力を保有していることが確認でき、材齢8年8ヶ月経過時に9%程度と僅かに低下する結果であった。ここで、B+反に関する膨張率や反り量の結果では、材齢1年

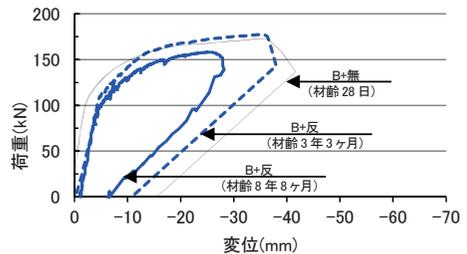


図-9 荷重変位関係係 (B+反, B+無)

を経過した頃から ASR 劣化の変状が確認された。これに対し、載荷試験での ASR 膨張による影響は材齢 3 年 3 ヶ月以降に確認されており、耐荷力に与える ASR の影響は外観の劣化性状の発生より遅れた時期となった。ここで、膨張率の変化が最も大きくなった「上縁\_部材鉛直方向」の結果 (図-4) に着目すると、B+反の材齢 3 年 3 ヶ月時点における膨張率が 0.3% 程度となっている。また、H+反でも同様に、載荷試験で ASR 膨張による影響が出ている材齢 1 年 3 ヶ月の時点では、膨張率 0.3% を大きく超えている。以上より、本試験においては、膨張率が 0.3% 以下であれば耐荷力の低下が確認されない結果であった。

4.2 試験結果の検証

材齢 8 年 8 ヶ月の PC 梁試験体を対象に、コンクリートの静弾性係数の低下、上縁部の断面欠損およびコンクリートの軸方向膨張量から換算した PC 鋼材の ASR 膨張による増加応力を考慮した有効プレストレスとすることで試験結果の検証を行った。検証に用いた各種数値を表-2 に、検証結果を表-3 に示す。検証の結果、H+反の材齢 8 年 8 ヶ月時における破壊荷重は計算結果より大きく下回る結果となった。これは、H+反と B+反の PC 梁試験体には添加した多量のアルカリが内在しており、ASR 膨張量の大きい H+反では PC 鋼材の腐食による影響が原因と考えられた。そこで、載荷試験終了後に各 PC 梁試験体の PC 鋼材引張試験を実施しており、その試験結果と鋼材腐食を考慮した破壊荷重の計算結果を表-4 に示す。また、採取した PC 鋼材の腐食生成物除去を「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法 (JCI-SC1)」に従い実施しており、除去後の画像を写真-1 に示す。PC 鋼材の腐食にともなう引張強度の低下を考慮することで、載荷試験結果と概ね一致する結果となった。

表-2 結果検証に用いた物性値

試験体種類	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	断面欠損 深さ (mm)	導入緊張 応力※ (N/mm <sup>2</sup> )	ASRによる膨張 ひずみ (%)	増加応力 (N/mm <sup>2</sup> )	有効プレ ストレス (N/mm <sup>2</sup> )
H+無 (材齢28日)	33.0	63.4	0.0	1151.2	----	----	1151.2
B+無 (材齢28日)	32.3	67.5	0.0	1145.4	----	----	1145.4
H+反 (材齢8年8ヶ月)	21.2	38.1	50.0	1243.8	0.115	226.4	1470.2
B+反 (材齢8年8ヶ月)	30.4	54.9	19.4	1246.5	0.133	261.6	1508.1

※リラクゼーション・クリープ・乾燥収縮の影響を含む

表-3 載荷試験結果と計算結果

試験体種類	載荷試験結果		計算結果	
	ひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	ひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)
H+無 (材齢28日)	85	168	79	170
B+無 (材齢28日)	80	175	79	171
H+反 (材齢8年8ヶ月)	75	116	68	145
B+反 (材齢8年8ヶ月)	80	158	86	168

5. まとめ

本報告を要約すると、以下の通りである。

- (1) 膨張量やそり量では、反応性骨材に高炉スラグ微粉末を混和させることで、ASR にともなう膨張量を 1/3~1/2 程度に抑制する効果が確認された。
- (2) 超音波伝播速度では、反応性骨材に早強ポルトランドセメントのみ使用した場合、暴露初期に低下し、その後は一定であったのに対し、高炉スラグ微粉末を混和した配合は、概ね無害骨材を用いた PC 梁試験体と同程度の値を示した。
- (3) 載荷試験の結果では高炉スラグ微粉末を混和した配合は 3 年を経過した時点でも耐荷力の低下は確認されず、最大膨張率が 0.3% 程度以下であれば耐荷力に影響を与えない結果であった。

以上の結果より、本暴露試験によって早強ポルトランドセメント

の質量比 50% に高炉スラグ微粉末 6000 に置換した PC 部材は、ASR による劣化を十分に抑制できる耐久性の高い部材であることが確認された。

本試験は、金沢大学ならびに BSPP 研究会 (株)IHI インフラ建設, オリエンタル白石(株), (株)ピーエス三菱, 前田製管(株), 三井住友建設(株), 日鉄住金高炉セメント(株), (株)安部日鋼工業)のご指導とご協力を得て実施いたしました。関係者各位に紙面をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松村, 襄田, 蔡, 鳥居: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, 2006.

表-4 PC 鋼材引張試験結果と PC 鋼材の腐食を考慮した破壊荷重計算結果

試験体記号	引張試験結果	計算結果
	最大引張荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)
B+無 (材齢8年8ヶ月)	270	171
H+反 (材齢8年8ヶ月)	227	124
B+反 (材齢8年8ヶ月)	251	157

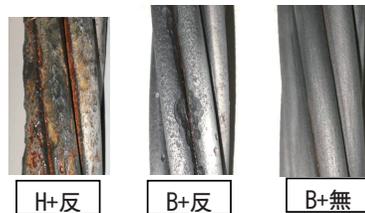


写真-1 PC 鋼材の表面形状