

ASR 促進暴露試験による高炉スラグ微粉末を用いた PC 梁の耐荷力特性

國富 康志*1・石井 豪*2・辛 軍青*3・鳥居 和之*4

2013 年に「メンテナンス元年」の宣言が出されるなど、近年では高齢化した社会基盤整備の延命化とともに新設構造物の高耐久化を求める声が高まっている。また、環境への配慮や資源の有効利用が社会的に求められており、副次的に生成される高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材料の活用は有効な対策手段の一つとして捉えられている¹⁾。そのようななか、塩害、ASR の劣化抑制対策および環境負荷低減として、鉱物質混和材料を PC 構造物へ適用する事例が出てきている。

本研究では、高炉スラグ微粉末 6000 を混和材として利用した場合の ASR 抑制効果を確認する目的で、結合材および骨材の種類を変えて PC 梁部材を製作し、屋外にて長期暴露試験を実施した。本稿はその成果を報告するものである。

キーワード：高炉スラグ微粉末、プレストレストコンクリート、ASR 抑制効果、屋外暴露試験

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 構造物は、プレストレスによりひび割れを制御できることや、高強度のコンクリートが使用されていることから、一般的に耐久性が高い構造物であるといわれている。しかし、構造物の設置される環境条件や用いられる材料によっては劣化を生じる場合がある。そのため、近年では PC 構造物の耐久性向上を目的として、塩化物イオンの浸透や ASR を抑制することが知られている高炉スラグ微粉末の適用事例が増えつつある。

ここで、高炉スラグ微粉末による ASR 抑制の機構は、セメント量の低減、ポゾラン反応生成物によるアルカリイオンの固定化、組織の緻密化、水酸化カルシウムの減少などにより説明²⁾ されているが、明確には解明されていない。また、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ため、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ことを目的として、反応性骨材を使用した PC 梁試験体の屋外長期暴露試験を開始した。本来、ASR は長い年月をかけてゆっくり進展するものであるが、本試験では短期間に ASR を促進させる目的で、事前の試験により反応性が高いと確認³⁾ された安山岩の碎石と砕砂を使用し、多量のアルカリ (NaCl を 18.9 kg/m³ (等価 Na₂O 量で 10 kg/m³)) を練混ぜ時に添加した。そのため、実際の構造物より厳しい劣化環境である。

暴露期間は計画当初 3 年目までとしていたが、膨張が収束傾向を示した 8 年 8 ヶ月まで延長した。本報告では、ASR 抑制効果の検証として実施した、PC 梁試験体の膨張量・そり量・超音波伝播速度の計測を定期的に行った定期計測結果と、ASR 劣化に伴う性状変化に合せて 4 回の

時期に実施した曲げ載荷試験による耐荷力の検証結果について報告する。

2. 試験体の概要

2.1 使用材料

暴露試験体に使用した結合材は、① 早強ポルトランドセメント (密度：3.14 g/cm³、比表面積：4 510 cm²/g) と、② 粉末度 6000 の高炉スラグ微粉末 (密度：2.91 g/cm³、比表面積：5 800 cm²/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 A 1145 アルカリシリカ反応性試験 (化学法) にて事前に確認³⁾ 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。化学法による使用骨材の反応性試験結果を表 - 1 に示す。

表 - 1 使用骨材の反応性試験結果 (化学法)

	反応性骨材*		無害骨材	
	碎石、砕砂	碎石	碎石	砕砂
Sc (mmol/l)	688	32	32	33
Rc (mmol/l)	78	45	45	64
Sc/Rc	8.8	0.7	0.7	0.5
判定	無害でない	無害	無害	無害

* 主要な反応性鉱物はクリストパライトとトリディマイトである

2.2 コンクリート配合

本試験では、高炉スラグ微粉末を用いた配合での ASR 抑制効果を確認することを目的としているため、前述した 2 種類の結合材 (① 早強ポルトランドセメントのみ (以下「H」と記載) ② 高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントの質量比が 1:1 (以下「B」と記載)) に対して、前述の 2 種類の骨材 (反応性骨材と無害骨材) を用いるこ

*1 Yasushi KUNITOMI : (株) 安部日鋼工業 技術工務本部

*2 Tsuyoshi ISHII : (株) 安部日鋼工業 技術工務本部

*3 Gunsei SHINN : (株) 安部日鋼工業 技術工務本部

*4 Kazuyuki TORII : 金沢大学 理工研究域

表 - 2 コンクリート配合

試験体種類	W/B [*] (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)					化学混和材 (B × %)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	高炉スラグ 微粉末	S	G			
H + 反	38	44.0	150	395	-----	839	1 048	18.9	10 ± 2.5	2 ± 1
B + 反	38	44.0	150	197.5	197.5	833	1 040			
H + 無	35	41.1	146	417	-----	731	1 045	-----	0.55	
B + 無	34	41.4	142	209	209	723	1 048			

※) : 結合材量 (早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末)
 H + 反 : 早強ポルトランドセメント + 反応性骨材
 B + 反 : 早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末 + 反応性骨材
 H + 無 : 早強ポルトランドセメント + 無害骨材
 B + 無 : 早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末 + 無害骨材

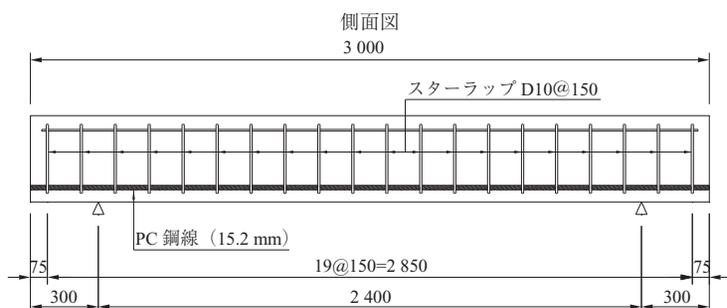


図 - 1 PC 梁試験体の形状寸法



写真 - 1 PC 梁試験体

とで結合材2種類×骨材2種類=合計4種類の配合とした。

本試験では ASR 膨張を早期に発現させるために添加したアルカリとして NaCl を用いており、これは NaOH を多量に添加した場合、強度性状に悪影響を与えることが懸念されたためである。また、早強ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末のアルカリ量は考慮していない。コンクリートの配合を表 - 2 に示す。反応性骨材を用いた配合は、過去の検討にて高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果が確認されたものと同様とした³⁾。また、無害骨材を用いた配合は、PC 工場にて実績がある配合とし、各配合の設計基準強度は 50 N/mm² に統一した。

2.3 試験体の製作

PC 梁試験体は、断面 150 mm × 300 mm、長さ 3 000 mm の長矩形部材であり、1S15.2 の PC 鋼材 1 本を下側に偏心配置させたプレテンション部材である (図 - 1)。試験体の打設後に蒸気養生を実施した。蒸気養生は、前置き時間として打設後 3 時間は静置し、その後、1 時間あたり 15 °C の上昇量で昇温を行い、60 °C 到達後の 6 時間は保温状態とした。保温終了後は 1 時間あたり 15 °C で降温を実施した。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 : 1 261 N/mm²) を導入して 2 週間の屋内保管を行った後、日陰の影響が少ない場所で屋外暴露を開始した。暴露時の PC 梁試験体は 2 点支持とし、暴露位置の環境条件は、年間平均の降水量が 1 800 mm、日照時間が約 2 000 時間である。また、載荷試験時の圧縮強度と静弾性係数を確認するための円柱供試体 (φ 100 × 200) も、PC 梁試験体と同位置にて暴露を行った。屋外暴露の状況を写真 - 1 に示す。

円柱供試体に関して、前述した通り暴露期間を延長した関係から 8 年 8 ヶ月時の円柱供試体は残っていなかったため、PC 梁試験体からコア採取によって圧縮強度と静弾性

係数の確認を行った。

3. 計測概要

3.1 定期計測

定期計測では、暴露期間中における各 PC 梁試験体の ASR 膨張にともなう材料劣化の進行状況を確認する目的で、膨張量とそり量、超音波伝播速度の計測を定期的を実施した。計測の実施時期は、暴露開始時と、その後 1 ヶ月までは 1 週間ごと、さらに材齢 3 年目までは 3 ヶ月ごととし、それ以降は 1 年ごとを目安に行った。計測位置は、支点部 (両端より 300 mm の位置) および支間中央の 3 箇所とし、各位置での側面 (南側面) を対象として、上縁側および下縁側より 60 mm 内側に入った位置で計測を行った (図 - 2)。各計測概要を以下に示す。

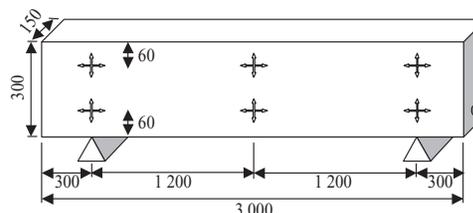


図 - 2 膨張量と超音波伝播速度の計測位置

(1) 膨張量

コンタクトストレインゲージを用いて計測を実施した。計測は対象とする 3 箇所の断面に対し、上縁と下縁付近の 6 箇所について、部材軸方向および鉛直方向の計測を実施した。本稿での部材軸方向とは、プレストレスの導入方向としている。

(2) そり量

PC 梁試験体下面の両端部に水糸を張り、支間中央位置

での水糸と PC 梁試験体下縁の距離を計測した。

(3) 超音波伝播速度

英国 C.N.S. INSTRUMENTS LTD 製パンジットを用いて計測を実施した。計測方向は、部材側面 6 箇所の部材厚 (150 mm) 方向である。

3.2 曲げ荷重試験

曲げ荷重試験は 3 等分点荷重にて実施した。荷重方法は、ひび割れ発生荷重までの荷重と除荷を 3 回繰り返した後、初期降伏荷重および破壊荷重までの荷重を行う手順とした。試験時期は、ASR 劣化にともなう性状変化に合せ、以下に示す 4 回のタイミングで実施している。① 材齢 28 日 (初期値を確認) ② 材齢 1 年 3 ヶ月 (H + 反の PC 梁試験体のみひび割れが顕著に発生。B + 反の PC 梁試験体でも ASR 膨張が発生し始める) ③ 材齢 3 年 3 ヶ月 (B + 反の PC 梁試験体でも ASR 膨張が進行し、H + 反の PC 梁試験体では ASR 膨張が収束しつつある) ④ 材齢 8 年 8 ヶ月 (B + 反の PC 梁試験体で ASR 膨張が収束傾向)。なお、荷重試験を実施した各タイミングにおいて対象とした PC 梁試験体は、反応性骨材の入手の関係で使用可能な数量的制約もあったことから、おのおのの目的に対応した試験体のみを用いて実施している。具体的には、最初の荷重試験で初期値を確認することが目的であったことから、無害骨材を用いた PC 梁試験体 (H + 無と B + 無) のみを対象に実施した。2 回目の荷重試験では、H + 反の PC 梁試験体のみ ASR 膨張にともなうひび割れが発生したため、早強ポルトランドセメントのみの配合である PC 梁試験体 (H + 反と H + 無) を対象に実施した。その後の 3 回目と 4 回目の荷重試験では、すべての PC 梁試験体を対象に実施しており、荷重試験の実施時期と、対象とした PC 梁試験体の組み合わせを表 - 3 に記載する。また、荷重試験で行った計測は、荷重荷重、PC 梁試験体の変位、PC 鋼材の引き込み量であり、各計測機器の設置位置を図 - 3 に示す。

表 - 3 各試験体の荷重試験実施時期

材齢	試験体種類			
	H + 反	B + 反	H + 無	B + 無
28 日			○	○
1 年 3 ヶ月	○		○	
3 年 3 ヶ月	○	○	○	○
8 年 8 ヶ月	○	○	○	○

○印：試験実施時

荷重試験終了後には各 PC 梁試験体からコア供試体を採取し、φ55 × 110 mm に成形後、圧縮強度試験と静弾性係数試験を実施しており、各試験は「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」、「JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験」に準拠して計測した。コア供試体は、PC 梁試験体の部材軸方向、部材軸直角方向の 2 方向から採取しており、採取位置は荷重試験時の試験体破壊による影響を回避するため、PC 梁試験体の荷重範囲より外側 (部材端側) としている。また、部材軸方向のコア供試体については、プレストレスによる影響を確認するため、PC 鋼材が配置されていない部材上部と、PC 鋼材が配置されてい

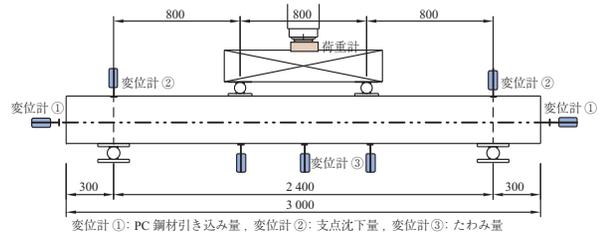


図 - 3 計測機器設置概要図

る付近となる部材下部のそれぞれから採取した。さらに、材齢 8 年 8 ヶ月で荷重試験を実施した PC 梁試験体のうち、反応性骨材を使用した PC 梁試験体 (H + 反と B + 反) では、促進養生試験 (カナダ法、1N (規定) の NaOH 溶液 (80 °C) に浸漬) による残存膨張量の確認を実施した。

4. 計測結果

4.1 定期計測

(1) 膨張量

暴露開始時点初期値とした PC 梁試験体の膨張率の経時変化を図 - 4 に示す。図の凡例に記載する試験体種類に併記した記号は、それぞれ暴露期間を示しており、0 y

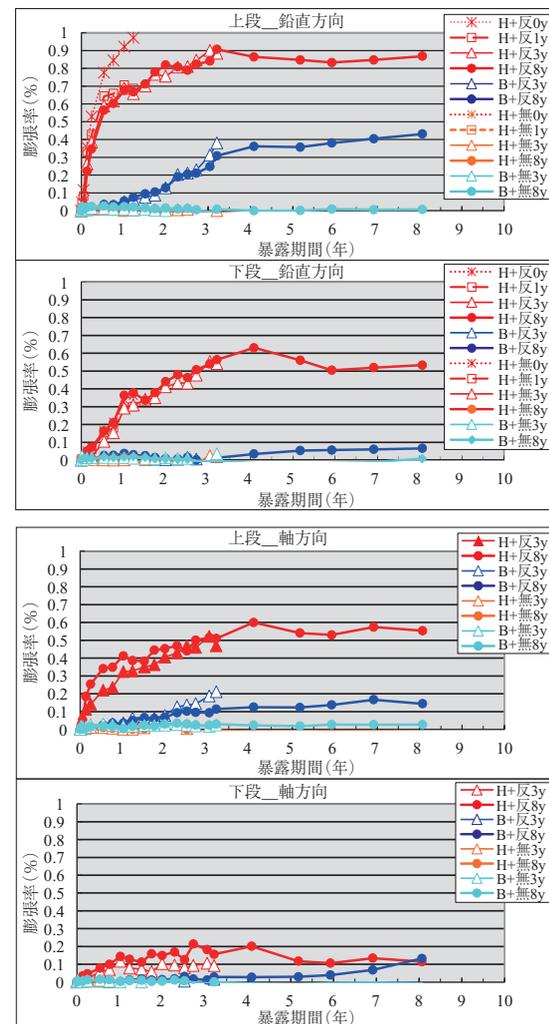


図 - 4 PC 梁試験体の膨張率計測結果

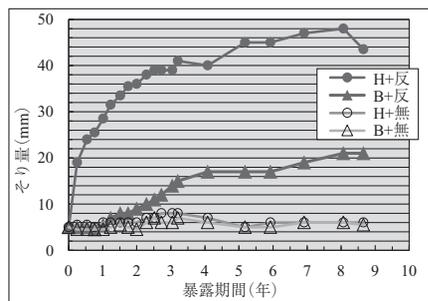


図 - 5 PC 梁試験体のそり量

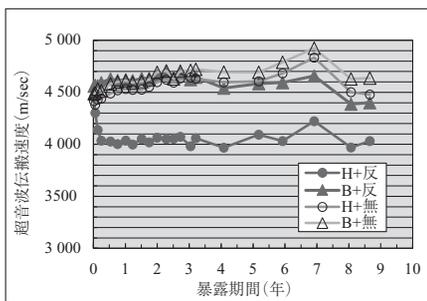


図 - 6 PC 梁試験体の超音波伝播速度

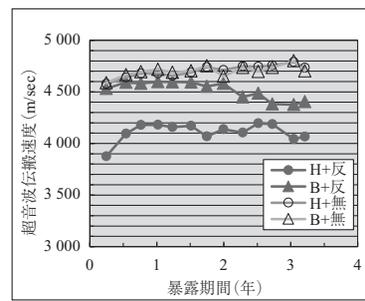


図 - 7 円柱供試体の超音波伝播速度

は材齢28日，1yが材齢1年3ヵ月，3yが材齢3年3ヵ月，8yは材齢8年8ヵ月を表している。また，図に示した値は，上段3測点の平均値と下段3測点の平均値を各計測方向ごとに示したものである。計測の結果，試験体種類に着目すると，各計測方向や計測位置によって膨張率の違いはあるものの，膨張率が上昇する時期や収束する時期はおおむね同様の結果であり，H + 反は暴露開始直後から顕著な膨張を，B + 反は暴露1年を経過した頃から徐々に膨張を，残りの試験体は膨張を生じていない結果となった。また，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。

上段と下段の結果を比較すると，下段より上段での膨張量が大きく，さらに下段の膨張は上段より遅れて進行する結果であった。これは，部材上面は日射や降雨の影響特に受けやすく，ASRによる膨張が促進されたためと推測される。

計測方向で比較すると，部材軸方向よりも鉛直方向の膨張率が大きい結果であった。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。さらに，PC鋼材が下縁側へ偏心配置されていることも，上段と下段の膨張率の差に影響を与えていると考えられる。

PC梁部材の膨張挙動の結果から，PC梁部材でのASR膨張特性を把握することができたとともに，高炉スラグ微粉末の使用によりASR膨張の抑制効果を確認できた。

(2) そり量

そり量については，屋外暴露が終了となった材齢8年8ヵ月のPC梁試験体の計測結果を図-5に，載荷前のそり状況を写真-2に示す（載荷試験時期の異なる同一配合の各試験体に関して，そり量の挙動が同様であったことを確認している）。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年を経過した時点で39mmのそり量が生じ，8年経過時まで微増して最大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年を経過した時点で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

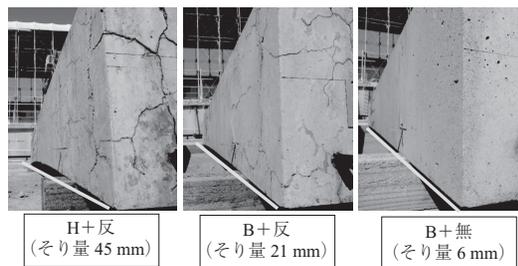


写真 - 2 暴露終了時のPC梁試験体そり状況

を抑制する効果があることを確認できた。

(3) 超音波伝播速度

超音波伝播速度の結果についても，材齢8年8ヵ月に載荷試験を実施したPC梁試験体の結果を図-6に示す。計測値は図-2に示す6箇所の計測位置における平均値である。

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，4000 m/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。

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4500 cm/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にと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によるASR抑制効果により，内部のひび割れ密度がH + 反より小さく抑えられ，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。

次に，材齢3年3ヵ月まで実施した円柱供試体の計測結果を図-7に示す。円柱供試体は高さ方向の計測結果である。円柱供試体のB + 反は200 m/sec程度の低下が認められることから，プレストレスの有無が超音波伝播速度の計測結果に影響していると推測する。

超音波伝播速度の結果では，膨張量やそり量の挙動とは異なっているものの，PC梁部材へ高炉スラグ微粉末を用いることで，ASR劣化を抑制する効果が確認できた。

(4) 圧縮強度と静弾性係数

材齢28日，1年3ヵ月，3年3ヵ月の円柱供試体から計測した圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係を図-8に，

○ 研究報告 ○

材齢3年3ヵ月時のH+反とB+反の円柱供試体を写真-3に示す。図中の矢印は計測結果の経時変化を示すものであり、矢印開始位置のプロットが材齢28日、矢印終了位置のプロットが材齢3年3ヵ月を示している。また、この図では健全なコンクリートを示す曲線⁴⁾から原点に近づくほど、ASRによる劣化が大きいと判定される。計測の結果、無害骨材を用いた供試体はおおむね健全なコンクリートを示す曲線付近に分布しているのに対し、H+反は時間の経過とともに原点に近づいており、暴露開始直後からASR劣化が進行していることが確認できる。また、材齢1年3ヵ月から3年3ヵ月に掛けて静弾性係数/圧縮強度が急激に低下しているが、これは圧縮強度の低下が初期に大きく、材齢1年3ヵ月を経過した後は低下が緩やかになるのに対し、静弾性係数は材齢28日から3年3ヵ月まで同様の割合で低下していることに起因しており、ASR劣化による物性値の低下は、圧縮強度よりも静弾性係数において継続的に影響を受ける結果となった。

一方、B+反については、暴露開始から材齢1年3ヵ月にかけて圧縮強度は増加するものの、静弾性係数/圧縮強度は低下しており、材齢1年3ヵ月経過後には圧縮強度も低下している。これは膨張量の結果よりB+反では、材齢1年頃まではASR劣化はわずかで、材齢1年を経過した頃から膨張量が増加している。そのため、材齢1年頃まではコンクリートの硬化にともなう圧縮強度の微増が勝っているが、膨張の影響が大きくなる材齢1年経過後からは、圧縮強度と静弾性係数ともに低下したと考えられる。

円柱供試体の結果より、高炉スラグ微粉末の使用により、ASR劣化にともなう材料特性値の低下を抑制する効果が確認された。

次に、材齢8年8ヵ月時の荷重試験体から採取したコア供試体での圧縮強度と静弾性係数の関係を図-9に示す。また、図にはASR劣化が開始する以前の結果と比較するために、材齢28日時の円柱供試体の結果も併記した。無害骨材を用いたPC梁試験体(H+無とB+無)は、おおむね健全なコンクリートを示す曲線近傍に分布している。これに対し、反応性骨材を用いた試験体(H+反とB+反)では、健全なコンクリートを示す曲線より原点側に位置しており、B+反に比べてH+反のコア供試体は圧縮強度が低く原点側に分布する傾向である。また、膨張量の結果と同様に、プレストレスの影響を受ける部材軸方向、さらには下側の計測値の方が、部材直角方向や部材上側よりも原点から離れる傾向を示している。

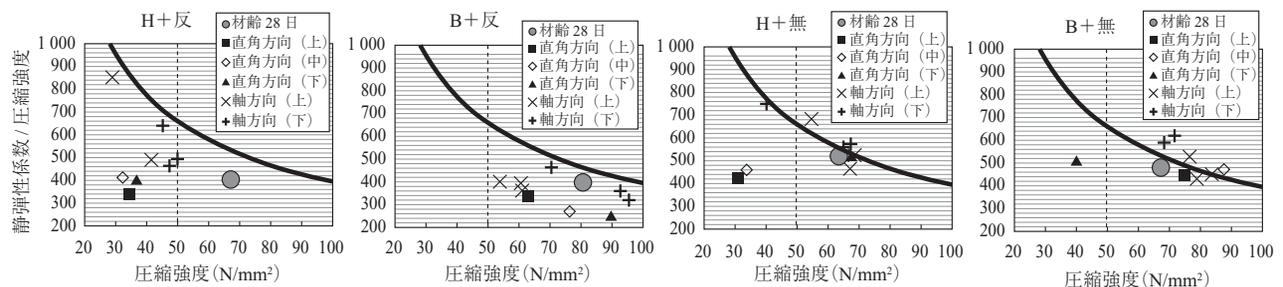


図-9 コア供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係

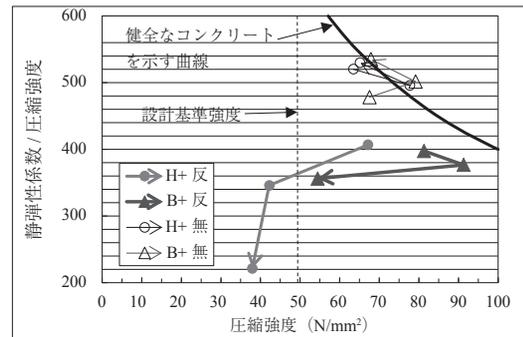


図-8 円柱供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係

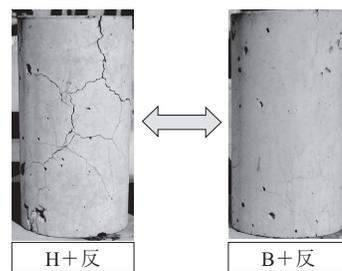


写真-3 3年3ヵ月経過時の円柱供試体

B+反以外の結果において、何点かの特異な結果が存在するが、これらは荷重時に偏心荷重となったり、表面に露出した骨材部から破壊が生じたためであることを確認している。

コア供試体の結果においても、円柱供試体の結果と同様に高炉スラグ微粉末の使用によるASR抑制効果を確認できた。

4.2 曲げ荷重試験

(1) 荷重と変位の関係

表-3に示した時期に実施した反応性骨材を使用したPC梁試験体の曲げ荷重試験結果を図-10に示す。なお、比較のため、無害骨材を使用した場合の結果も併記した。また、無害骨材を用いた試験結果については、材齢が経過しても、同程度の耐荷力を維持していたため、代表として材齢28日の結果を図示した。表-4には、試験種別ごとの破壊時荷重を示し、結合材種類ごとで無害骨材を用いた試験体(材齢28日)の結果との比率を求めた結果も併記する。H+反のPC梁試験体については、材齢28日のH+無における耐荷力と比較して、材齢1年3ヵ月時には5%の低下、材齢3年3ヵ月時には16%の低下、材齢8年

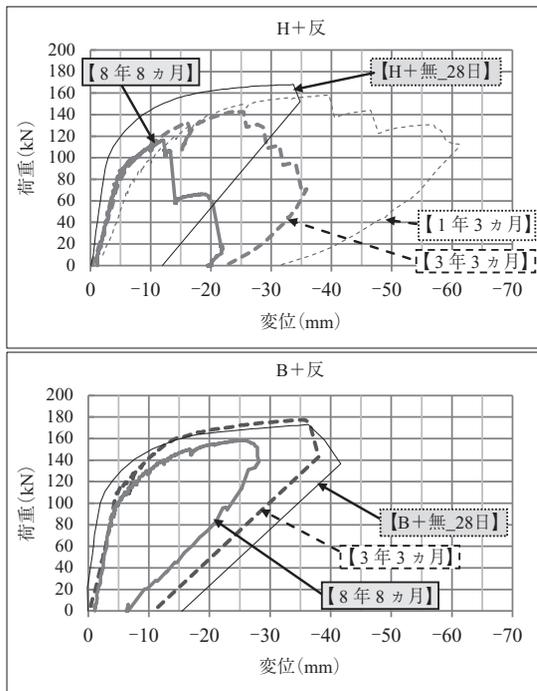


図 - 10 載荷試験における荷重変位関係図

表 - 4 破壊時荷重

試験体種類	材齢			
	28日	1年3ヵ月	3年3ヵ月	8年8ヵ月
H + 反 (H + 無との比)		158.3 (0.942)	143.9 (0.857)	115.7 (0.689)
B + 反 (B + 無との比)			177.4 (1.025)	157.9 (0.913)
H + 無	168 (1.000)	175.5 (1.045)	179 (1.065)	179.3 (1.067)
B + 無	173 (1.000)		183.5 (1.061)	175.5 (1.014)

注) 表内の () は材齢 28 日の結果との比率を示す。

8ヵ月時には31%の低下が確認された。これは、そり量の結果と同様の傾向であり、材齢3年経過後もASR膨張にともなう耐力低下が進行する結果であった。また、破壊形態は材齢1年3ヵ月、3年3ヵ月、8年8ヵ月のすべてのPC梁試験体で、PC鋼材が破断した。一方、B+反の試験では、破壊形態がすべてのPC梁試験体で上縁の圧壊であり、無害骨材を用いたPC梁試験体と同様であった。また、材齢28日のB+無と比較して弾性域での傾きがわずかに低下している。これは、圧縮強度と静弾性係数の関係でも示したとおり、材齢3年3ヵ月を経過した段階では、

圧縮強度と静弾性係数が低下しており、その結果にともなうものである。ただし、表 - 4 に示す材齢 28 日の無害骨材を用いた試験結果との比率に着目すると、耐力力に関しては、材齢 3 年 3 ヵ月では健全な試験体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 ヵ月経過時に 9 % 程度とわずかに低下する結果であった。膨張量やそり量の結果では、ASR 膨張にともなう性状変化は暴露 1 年経過頃から確認されたことに対し、載荷試験での ASR 膨張による影響は材齢 3 年 3 ヵ月以降に確認 (表 - 4 の結果より) されており、性状変化に対して耐力力に与える ASR の影響は遅れた時期に発生している。ここで、図 - 4 に示す結果のうち、膨張率をもっとも大きくなる「部材上段_鉛直方向」の結果では、B + 反の材齢 3 年 3 ヵ月時点での膨張率が本試験では 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 ヵ月の時点では、膨張率 0.3 % を大きく超えている。本試験においては、膨張率が 0.3 % 以下であれば耐力力の低下が確認されない結果であった。

B + 反の載荷試験結果についても、材齢 8 年 8 ヵ月時には耐力力の低下が確認され、高炉スラグ微粉末を用いた配合の PC 梁試験体においても ASR 膨張を完全に防止することは難しいと判断される結果ではあるが、前述したとおり、本試験では ASR 膨張を促進させるために多量のアルカリを添加しており、実際の構造物より相当厳しい劣化環境下での結果であることに注意を要する。

(2) 試験結果の検証

反応性骨材を用いた PC 梁試験体において、材齢 8 年 8 ヵ月時の載荷試験では耐力力の低下が確認された。これらの PC 梁試験体に対し、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 - 5 に、検証結果を表 - 6 に示す。検証の結果、H + 反の材齢 8 年 8 ヵ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、その試験結果を表 - 7 に、採取した PC 鋼材の腐食状況を写真 - 4 に示す。また、鋼材腐食を考慮した破壊荷重の計算結果も併せて記載する。PC 鋼材の腐食

表 - 5 曲げ載荷試験結果検証用の物性値

試験体種類	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	断面欠損深さ (mm)	導入緊張応力* (N/mm ²)	ASR による膨張		有効プレストレス (N/mm ²)
					ひずみ (%)	増加応力 (N/mm ²)	
H + 無 (材齢 28 日)	33.0	63.4	0.0	1 151.2	----	----	1 151.2
B + 無 (材齢 28 日)	32.3	67.5	0.0	1 145.4	----	----	1 145.4
H + 反 (材齢 8 年 8 ヵ月)	21.2	38.1	50.0	1 243.8	0.115	226.4	1 470.2
B + 反 (材齢 8 年 8 ヵ月)	30.4	54.9	19.4	1 246.5	0.133	261.6	1 508.1

* リラクセーション・クリープ・乾燥収縮の影響を含む

表 - 6 曲げ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

表 - 7 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

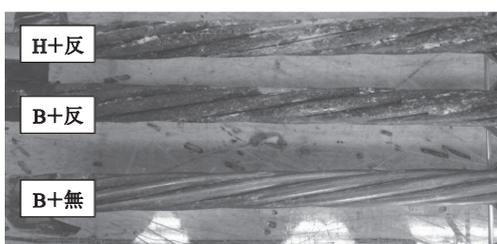


写真 - 4 PC 鋼材腐食状況

にともなう引張強度の低下を考慮することで、載荷試験結果とおおむね一致する結果となった。

4.3 残存膨張量

材齢 8 年 8 ヶ月の PC 梁試験体載荷試験終了後には、反応性骨材を用いた試験体を対象に残存膨張量試験結果を実施しており、その結果を図 - 11 に示す。試験に用いたコア供試体は、PC 梁試験体の東側と西側の両端面から部材軸方向に採取しており、図 - 11 の凡例に記載する（東）と（西）は、それぞれコア供試体の採取位置を示している。H + 反と B + 反の両試験体ともコア供試体の膨張が収束していない結果であり、これはコア供試体の採取方向が部材軸方向であるため、PC 鋼材の拘束やプレストレスの影響によって膨張が抑制されていたためと考えられる。また、東側に比べて西側のコア供試体が大きな膨張を示しているのは、暴露時の日当たりの影響で西側の方が東側よりも ASR 膨張が進行していなかったことが影響したと考えられる。ただし、同じ西側でも H + 反の方が B + 反よりも大きな膨張を示しており、これは高炉スラグ微粉末を用いたことによる ASR 抑制効果である可能性が考えられた。

5. ま と め

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 に置換した配合を用いた PC 梁部材において、長期暴露試験と曲げ載荷試験を実施することで、ASR 抑制に関する効果を確認することができた。ただし、計測内容によっては経時変化の挙動が異なっていた。

以下に、反応性骨材を使用した配合に多量のアルカリを

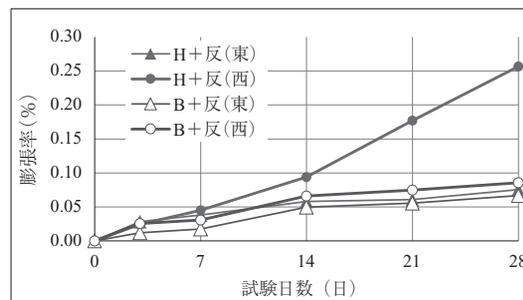


図 - 11 残存膨張量試験結果

内在させた配合について、得られた結果を列記する。

- ① 膨張量やそり量では、結合材が早強ポルトランドセメントのみの配合 (H + 反) では、暴露開始直後から急激に変化するのに対し、高炉スラグ微粉末を混和した配合 (B + 反) では 1 年程度遅れて緩やかに変化し、3 年経過頃から早強ポルトランドのみの配合と平行して微増する結果であった。
- ② 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。
- 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。
- ④ 超音波伝播速度の結果では、早強ポルトランドセメントのみの配合 (H + 反) においては暴露初期に速度が急激に低下し、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 (B + 反) では暴露期間全体にわたりおおむね無害骨材を用いた PC 梁試験体と同程度の値を示していた。

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 BSPC 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) 寒地土木研究所：改質セメントを用いた高耐久性コンクリートの設計施工マニュアル (案)、平成 26 年版
- 2) 川村満紀：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 (1)、コンクリート工学、Vol.32, No.4, pp.74-79, 1994
- 3) 松村、蓑田、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
- 4) 小林、森、野村：圧縮強度試験によるアルカリ骨材反応の診断方法、土木学会論文集、No.460, pp.151-154, 1993.2

[2015 年 3 月 2 日受付]