

高炉スラグ微粉末を混合したPC梁部材のASR抑制効果と劣化挙動について

(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 松山 高広
 (株)安部日鋼工業 大村 一馬
 金沢大学大学院 工学博士 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報告されている¹⁾。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、PC 構造物に対する ASR 抑制効果に関する報告は少ない^{2), 3)}。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 月から屋外における促進暴露試験を実施した。本報告は、過去 2 回の経過報告に続き最新の報告を行うものである。

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 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 PC 梁試験体の ASR による膨張挙動は、PC 鋼材による拘束、日射や雨水の影響を受けることが確認された。さらには 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、ヤング係数の低下や有効緊張力の増加などを考慮することで検証することができた。

2. 暴露試験および曲げ載荷試験の概要

2.1 試験体概要

本試験では、表-1 に示した配合のコンクリートにより 4 種類の試験体を用意した。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、等価 Na₂O 量で 10kg/m³ と多量の NaCl を添加した。

PC 梁試験体の概要を図-1 に示す。プレテンション方式にてプレストレスを導入し、約 2 週間経過した後、に当たりの良い屋外に 2 点支持で設置し暴露した。暴露位置の降水量と日照時間は、年間約 1800mm、約 2000 時間である。

2.2 暴露試験概要

コンタクトストレインゲージを用い梁試験体の膨張量の計測を行った。計測位置は、側面 6 箇所および反応性骨材使用のものについては上面についても計測を行った。また、超音波伝播速度の計測を、軸直交方向について 6 箇所と、同時に円柱供試体 (φ100×200) についても行った (図-2)。その際、梁支間中央部の

表-1 試験体を使用したコンクリート配合

配合種類	W/B* (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)					科学混和剤 (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	
			W	C	BFS	S	G				添加アルカリ
H-R	38	44	150	395	---	839	1048	18.9	1.2	10±2.5	2±1
B-R	38	44	150	198	198	833	1040		0.7		
H-N	35	41	146	417	---	731	1045	---	0.55		
B-N	34	41	142	209	209	723	1048		0.55		

* : B=C+BFS

H-R : 早強ポルトランドセメント+反応性骨材 (Reactive aggregate)

B-R : 早強ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末6000+反応性骨材 (Reactive aggregate)

H-N : 早強ポルトランドセメント+無害骨材 (Non-Reactive aggregate)

B-N : 早強ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末6000+無害骨材 (Non-Reactive aggregate)

添加アルカリ: 等価Na₂O量で10kg/m³になるようにアルカリ (NaCl) を添加した

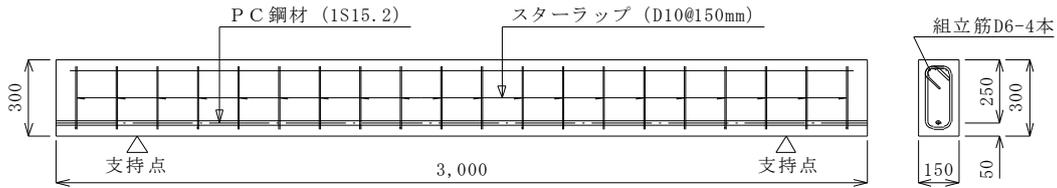
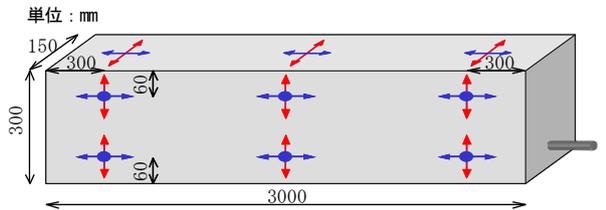


図-1 PC 梁試験体概要



●: 超音波伝播速度 ↑: 膨張量(軸直交方向) ←→: 膨張量(軸方向)
図-2 膨張量・超音波伝播速度測定位置

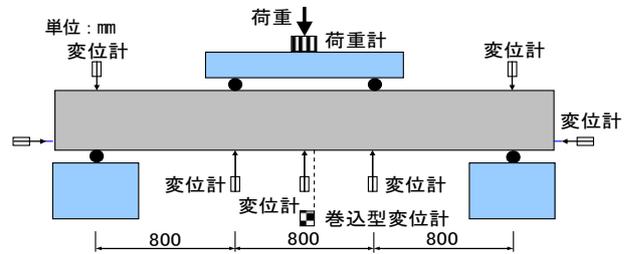


図-3 PC 梁試験体載荷概要

そり量の計測も合わせて実施した。なお、本研究では試験体のプレストレス導入方向を部材軸方向としている。

2.3 曲げ載荷試験概要

図-3 に PC 梁試験体の載荷試験概要を示す。

3. 暴露試験による劣化進行状況

3.1 膨張量とそり量

PC 梁試験体の膨張率の変化を図-4 に、そり量を図-5 に示す。膨張率の測定結果は、試験体種類ごとの部材側面上部、下部および部材軸方向、直交方向のそれぞれの平均値である。H-R は、暴露開始直後から膨張が生じ、特に部材上部において顕著に現れている。部材軸方向および部材軸直交方向の膨張量は、上部と下部で大小はあるが、全体的に部材軸直交方向は部材軸方向の 1.4 倍程度の値を示している。部材上部と下部の膨張挙動の違いは、PC 鋼材の配置が下縁に偏心しており、試験体下部の膨張が拘束されていることや、試験体上面は、特に日射や雨水の影響を受けやすく ASR が促進されていることによると考えられる⁴⁾。

B-R については、暴露開始後 300~400 日頃に側面上部において若干の膨張が認められ、その後、側面上部軸方向および直交方向ともに H-R の場合と大きく異なり、1 年遅れて緩やかな勾配で膨張が進行した。その後、H-R、B-R ともに膨張が進行したが、1500 日以降は膨張の増加は収束し、部位により異なるが、B-R は H-R の 1/6~1/2 の膨張量であった。そり量の変化は、梁上部の膨張量の変化と同様の傾向を示した。

3.2 超音波伝播速度

PC 梁試験体の超音波伝播速度を図-6 に示す。測定方向は、PC 梁試験体は部材幅 (150mm) 方向、円柱供試体は高さ方向 (200mm) である。PC 梁試験体における H-R の超音波伝播速度は、暴露開始直後から低下し、その後 4000m/sec 程度で安定している。伝播速度の低下の時期は膨張の発生時期とよく対応しているが、その後の挙動は異なる。内部の鋼材やひび割れの発生位置などの影響が考えられる。

一方 B-R に関しては、H-N、B-N と同様に暴露開始時より 4500m/sec 程度を維持し、PC 梁上部に膨張の進行は確認されたが、PC 梁全体の超音波伝播速度の平均値は大きな変化は見られなかった。

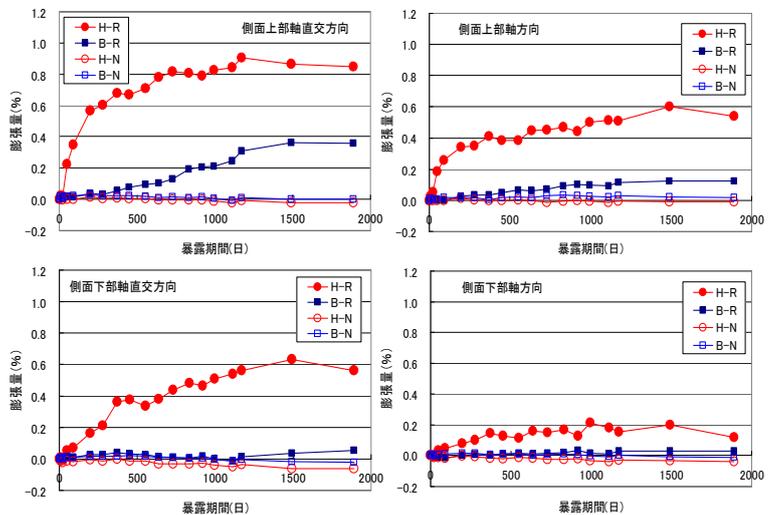


図-4 PC 梁試験体膨張量

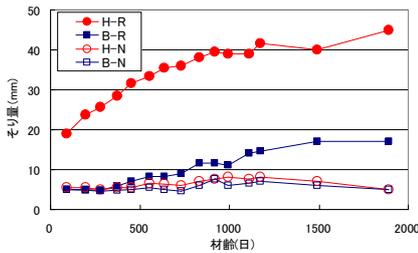


図-5 PC 梁そり量

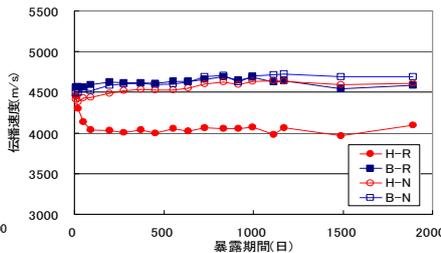


図-6 超音波伝播速度 (PC 梁)

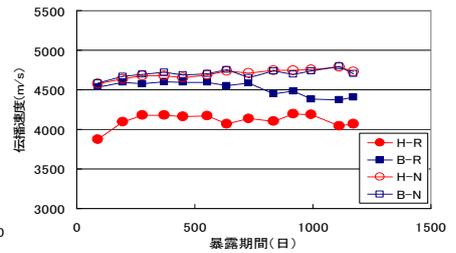


図-7 超音波伝播速度 (円柱)

表-2 超音波伝播速度 (材齢約 1200 日時)

試験体記号	超音波伝播速度 (m/s)			弾性係数 (kN/mm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)	
	梁	円柱	コア	円柱	コア	円柱	コア
H-R	3968	4066	4254	8.5	17.1	37.9	43.0
B-R	4541	4404	4518	18.6	27.4	54.4	88.7
H-N	4597	4733	4714	36.7	32.9	65.1	66.2
B-N	4695	4703	4767	36.2	37.9	71.6	72.1

この傾向は、荷重試験後に採取したコア供試体と同様の傾向であった(表-2)。超音波伝播速度の低下が内部劣化の程度を表していると考えられると、B-RのASRによる劣化は、コンクリートの比較的表面上に起こっており、曲げ耐力への影響は少ないと推測できる。また、図-7から、B-Rの円柱供試体については200m/sec程度の低下が認められ、PC梁についても上部側に着目すると若干の低下が見られた。これは、膨張と同様に、PC鋼材による拘束と日射・雨水によりASR劣化の状況が異なることを示している。

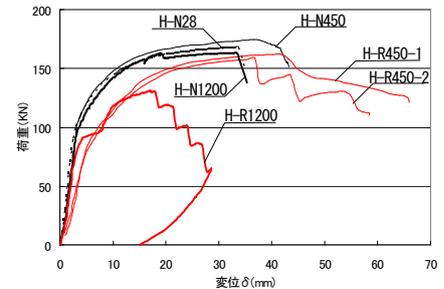


図-8 荷重-変位関係 (H-N, H-R)

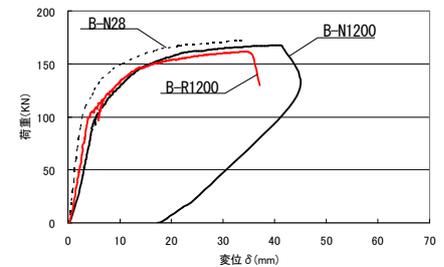


図-9 荷重-変位関係 (B-N, B-R)

4. 曲げ荷重試験への劣化の影響

4.1 荷重-変位

図-8にH-RおよびH-NのPC梁の荷重試験結果を示す。荷重材齢約1200日のH-R試験体(以下H-R1200と表記)については、曲げ荷重試験により、他のPC梁試験体より20%程度の耐力の低下を確認した。破壊形態については、H-R450-2およびH-R1200のみPC鋼材の破断であった。H-R1200のPC鋼材破断状況を写真-1に示す。一方、図-9に示したB-RおよびB-NのPC梁の荷重試験結果から、B-Rは、上部の膨張率進行が確認されたものの、H-NおよびB-Nと同等の耐力があることが判明した。このことから、本試験のようなPC梁部材においては、高炉スラグ微粉末6000を早強ポルトランドセメントの50%に置換した配合の場合、反応性骨材が使用されていても曲げ耐力が低下するほどの劣化には至らない可能性が考えられる。

4.2 試験結果の検証

コンクリートのヤング係数の低下、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鋼材の有効緊張力の増加分を考慮し、荷重-変位関係を算出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-3に、試験体の膨張による緊張力の増加分と荷重時のコンクリートひずみから求めたPC鋼材応力の増加分により推定したPC鋼材の

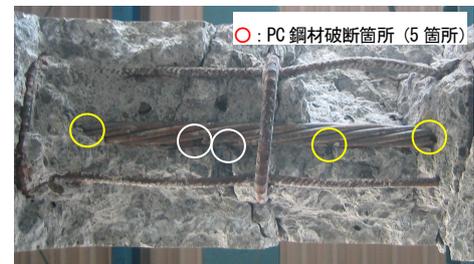


写真-1 PC鋼材破断状況 (H-R1200)

表-3 検証に用いた各種数値

試験体記号	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	断面欠損深さ (mm)	有効プレストレス (N/mm ²)
H-N28	33.0	63.4	0.0	1151.2
B-N28	32.3	67.5	0.0	1145.4
H-R450	14.6	42.2	26.8	1420.6
H-R1200	17.1	43.0	50.0	1483.6
B-R1200	27.4	88.7	16.3	1285.1

表-4 PC鋼材応力

試験体記号	導入緊張応力※ (N/mm ²)	ASRによる膨張		載荷荷重		合計応力 (N/mm ²)
		ひずみ (%)	増加応力 (N/mm ²)	ひずみ (%)	増加応力 (N/mm ²)	
H-R450	1245	0.0890	175.3	0.2467	486.0	1906.3
H-R1200	1238	0.1245	245.3	0.2394	471.6	1954.9
B-R1200	1241	0.0225	44.3	0.1927	379.6	1664.9

※リラクゼーション・クリープ・乾燥収縮の影響を含む

表-5 試験結果と計算値

試験体記号	実施時期	試験体名	試験結果			検証による計算		
			ひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	破壊時変位 (mm)	ひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	破壊時変位 (mm)
H-N	初期値	H-N28	85	168	34	79	170	36
B-N	初期値	B-N28	80	175	40	79	171	43
H-R	暴露450日後	H-R450	58	160	40	76	162	36
	暴露1200日後	H-R1200	63	130	35	68	145	37
B-R	暴露1200日後	B-R1200	81	161	37	83	170	44

引張応力を表-4 に示す。表-3 の数値を用いた計算値は、実測値と概ね一致する結果であった (表-5)。また、表-4 から、H-R 試験体の破壊時の PC 鋼材の引張応力は破断強度 (1900N/mm²) と同等であったと推測できる。

5. まとめ

本報告を要約すると、以下の通りである。

- (1) PC 梁試験体の ASR による膨張挙動は、PC 鋼材による拘束および日射や雨水の影響を受け、部材下部よりも上部の膨張が大きくなり、PC 鋼材配置方向よりも、拘束が少ない PC 鋼材直交方向の膨張が大きくなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランドセメントの 50% に置換した配合は、早強ポルトランドセメントのみの配合と比べ ASR による膨張を 1/6~1/2 程度に抑制する効果が確認された。
- (3) PC 梁における超音波伝播速度の平均値は、早強ポルトランドセメントのみの配合では、暴露開始当初の 4500m/sec 程度から 4000m/sec 程度まで低下し、低下時期は膨張の発生時期ともよく対応しているが、その後の挙動は対応していない。一方、高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランドセメントの 50% に置換した配合では、4500m/sec 程度を維持しており、試験体内部の劣化の程度は小さいと推察された。
- (4) 著しい ASR による劣化が生じた早強ポルトランドセメントのみの配合の PC 梁試験体は、他の PC 梁試験体より曲げ耐力が 20% 程度低下した。一方、高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランドセメントの 50% に置換した配合では、梁上部に劣化が生じてはいるが、曲げ耐力の低下は見られなかったことから、反応性骨材を使用しても耐力が大きく低下するには至らない可能性が考えられる。
- (5) 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、コンクリートのヤング係数の低下、上縁部の断面欠損および PC 鋼材の有効緊張力の増加を考慮することで概ね検証することができた。

6. おわりに

本暴露試験は、計画の暴露期間が終了し完了に至った。試験の結果、高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランドセメントの 50% に置換した PC 単純梁は、ASR による劣化およびこれに伴う耐力の低下を抑制できる、耐久性の高い構造部材であることが明らかとなった。

本試験を行うにあたり多大なご指導、ご協力をいただきました。金沢大学ならびに、BSPC 研究会 (オリエンタル白石 (株)、(株)ピーエス三菱、ピーシー橋梁 (株)、前田製管 (株)、三井住友建設 (株)、新日鐵高炉セメント (株)、(株)安部日鋼工業) 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) 小島孝昭, 豊福俊泰, 小林一輔: 塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の建設と性能評価に関する研究, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp235-253, 2005.
- 2) 城代和行, 真鍋英規, 廣井幸夫, 宮川豊章: ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状評価に関する報告, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, 第 6 巻, pp117-122, 2006.
- 3) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, 1996.
- 4) 蓑田理希, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: PC 梁部材の ASR 劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の効果の確認を目的とした暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, pp. 839-844, 2006.