報告 低ブレーン高炉スラグを用いた高炉セメントのコンクリート橋脚へ の適用事例

佐溝 純一*1·安藤 亮介*2·近藤 良啓*3·久保田 賢*4

要旨:低ブレーンの高炉スラグを用いた高炉セメントを橋脚へ適用するにあたり、コンクリートの基礎物性を把握した。橋脚の部材内部のコンクリートの温度上昇およびひずみを計測してその特性を確認した。低ブレーン高炉スラグを用いた高炉セメントのコンクリートの物性は、強度および静弾性係数は高炉セメント B 種とほぼ同等のものが得られ、断熱温度上昇および収縮は高炉セメント B 種よりも抑制される結果であり、低ブレーン高炉スラグを用いた高炉セメントは、拘束状態における長さ変化率試験でも材齢の初期に膨張する特性を確認した。実橋脚においても温度上昇と収縮の抑制に有効である傾向を示した。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 高炉セメント, 低比表面積, 温度上昇, 収縮ひずみ, 橋梁, 橋脚

1. はじめに

西日本高速道路(株)関西支社では新名神高速道路の建設事業を実施中であり、そのうち、高槻 JCT (大阪府高槻市) から神戸 JCT (兵庫県神戸市) の区間は急峻な山地部を通過するため、高橋脚を有する橋梁等、大規模なコンクリート構造物を多数建設する計画である。

昨今,橋脚のようなマスコンクリートにひび割れ発生 が確認されている。原因のひとつに使用材料である高炉 セメントが起因しているといわれており,近年の高炉セ メントが初期強度の増進を目指して高炉スラグの微粉 末化を図った結果,初期の温度応力や乾燥収縮の影響が 大きくなったためであると考えられている。本来,高炉 セメントは水密性やアルカリ骨材反応抑制効果に優れ る性能を有しており,環境負荷低減にも貢献できる材料 であることから,マスコンクリートに対しても初期ひび 割れの発生なく適用できることが望まれる。

近年、低ブレーンの高炉スラグを用いることにより温度上昇および自己収縮が抑制される ¹⁾との報告があり、このセメントを壁厚 800mm、壁長 35m の浄水場の壁部材に適用した例が報告 ²⁾されている。また、低ブレーンの高炉スラグを JIS R 5211 の高炉セメント B 種に適合した低発熱・収縮抑制型高炉セメントを橋梁に適用した場合に環境影響負荷が低減するとの提案 ³⁾がなされているが、低発熱・収縮抑制型高炉セメントを橋梁の大断面橋脚のようなマスコンクリートに使用された事例 ⁴⁾は少ない

今後工事が本格化する新名神高速道路においても,高 品質,高耐久なコンクリート構造物の構築を目指してお り,その一環として低ブレーン高炉スラグの使用を検討 している。そこで、本報告では、橋脚への適用性を検証するために実施したコンクリートの基礎物性試験の結果と、現在建設中の京都縦貫自動車道の高架橋において橋脚の部材内部の温度上昇およびひずみの計測から整理した考察を示す。

2. コンクリートの基礎物性

2.1 実験

(1) 使用材料

使用した低発熱・収縮抑制型高炉セメント(以下 LCR) は、普通ポルトランドセメントと比表面積 3200cm²/g、SO3 量が 4.66%の高炉スラグ微粉末を表-1 の特性となるように混合したものであり、混合後のスラグ量は 58%である。比較として高炉セメント B 種(以下 BB)を用いた。コンクリートの配合を表-2 に示す。設計基準強度は30N/mm²,目標のスランプは 8±2.5cm である。細骨材は京都府城陽産山砂(粗粒率 2.75)、粗骨材は大阪府高槻産の 1505 と 2015 の混合砕石(混合後の粗粒率 6.79)、減水剤は AE 減水剤を使用した。

表-1 セメントの特性

	スラク゛	密度	比表面積	化学成分(%)			
	割合 (%)	伍/文 (g/cm ³)	(cm ² /g)	ig.loss	MgO	SO_3	
LCR	58	2.98	3300	0.55	4.10	3.93	
BB	40-45	3.04	3830	1.28	3.24	2.13	
JIS 規格	30~ 60	_	≥3000	≦3.0	≦ 6.0	≦ 4.0	

^{*1} 西日本高速道路(株) 関西支社 構造技術グループリーダー (正会員)

^{*2} 西日本高速道路(株) 関西支社 構造技術グループ

^{*3 (}株) 浅沼組 大阪本店 土木部 工事課 所長

^{*4 (}株) デイ・シイ セメント事業本部 技術営業課 課長

表-2 コンクリートの配合

			単位量(kg/m³)					コンクリート性状			
配合名	W/C (%)	s/a (%)	水	セメント	細骨材	砕石 1505	砕石 2010	混和剤	スランプ [°] (cm)	空気量	温度 (°C)
			W	С	S	G1	G2	AD	(CIII)	(%)	(°C)
LCR	45.0	42.0	156	347	735	425	639	3.123	9.0	4.7	20.0
ВВ	48.0	42.0	154	321	748	378	705	2.889	9.0	5.0	19.9

(2) 実験項目

圧縮強度は JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」 に従った。静弾性係数は JIS A 1149「コンクリートの静 弾性係数試験方法」に、割裂引張試験は JIS A 1113「コ ンクリートの割裂引張強度試験方法」に従い、材齢は1 日,3日,7日,14日,28日で行った。直接引張試験は、 図-1に示す方法で行った。 ϕ 10cm×20cm の円柱試験体 を 20±1℃ (水中養生) で所定の材齢(1 日, 3 日, 7 日, 14 日, 28 日)まで養生し、上下面を研磨した後にエポキ シ接着剤にて試験用治具を接着し、引張応力によるひび 割れを断面欠損部で生じさせるため、予め試験体中央の 円周方向に深さ約5mm~10mmの断面欠損部を設けて試 験体を作製した。JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強 度試験方法」に準じて、引張応力の増加率を毎秒0.06± 0.04N/mm²として、軸方向に引っ張り試験体が破断する まで荷重を加え,最大引張荷重を断面積で除した値を直 接的引張強度とした。

熱膨張係数は、コンクリートの温度変化量とひずみの変化量が線形関係にあると仮定して以下の方法で求めた。角柱試験体($10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$)の内部に埋め込みひずみ計と熱電対を取り付け、この試験体全体を恒温水槽の水中に浸せきし、約 20° 、 30° 、 40° とおよび 50° の順で変化させ、各温度にて試験体全体の温度が一様となった後、温度変化量とひずみの変化量を測定した。これらの関係を一次式で近似し、近似式の傾きを熱膨張率とした。なお、自己収縮等の温度変化以外の影響が小さくなる材齢28日まで 20° C水中で養生後に試験を行った。

断熱温度上昇試験は、空気循環式の断熱を行い、コンクリートは 40 リットルで試験をした。打ち込み温度は、現場での実測値から決定し、LCR で 20 $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ とした。

長さ変化率は JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法一第 2 部:コンタクトゲージ方法」に従った。試験体の寸法は、 $10 \text{cm} \times 10 \text{cm} \times 40 \text{cm}$ とし、7日間 20 ℃の水中養生を実施した後、供試体を室温 20 ℃、相対湿度 60 %の恒温恒湿室に移し、ゲージプラグ間の長さを測定した。ただし、基長は材齢 1 日とした。拘束状

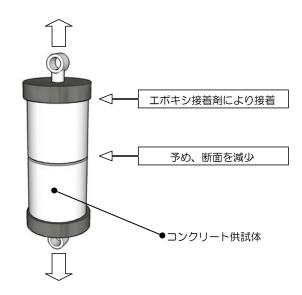


図-1 直接引張強度試験の概要図

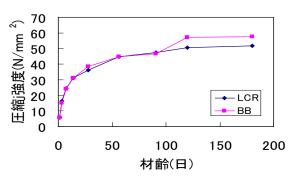


図-2 コンクリートの圧縮強度

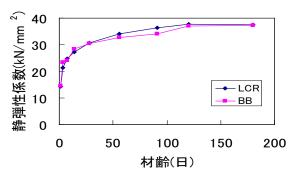


図-3 コンクリートの静弾性係数

態での長さ変化率は、JIS A 6202「コンクリート用膨張材」 付属書 2(参考)に示された B 法(膨張および収縮を対象とした試験方法)によった。養生条件は、JIS A 6202 の規定により、成型から 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで 20℃の水中で行い、基長はコンクリートを打設する前の拘束器具の測長とした。

これら一連の試験は、ひび割れ指数の検討やクリープ・収縮を含めた解析的検討のためのデータを蓄積する 目的で行ったものである。

2.2 実験結果

圧縮強度の試験結果を図-2 に示す。設計基準強度を そろえるため LCR の水セメント比を BB より 3%低下さ せたため、コンクリートの強度は同等の結果となってい

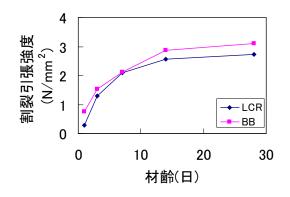


図-4 コンクリートの割裂引張強度

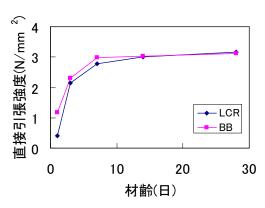


図-5 コンクリートの直接引張強度

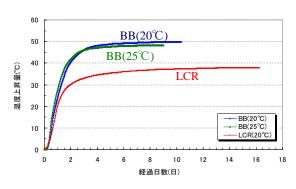


図-6 コンクリートの断熱温度上昇

る。静弾性係数の試験結果を図-3 に示す。圧縮強度と同様に LCR と BB のコンクリートの静弾性係数は変わらなかった。

割裂引張強度の試験結果を図-4に示す。LCRよりBBの方が割裂引張強度がやや高めである。直接引張強度の試験結果を図-5に示す。LCRとBBで直接引張強度は

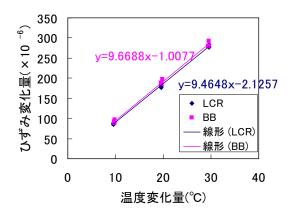


図-7 コンクリートの温度変化量とひずみの関係

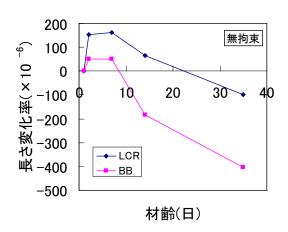


図-8 無拘束状態でのコンクリートの長さ変化率

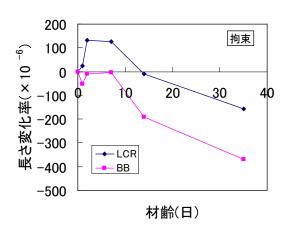


図-9 拘束状態でのコンクリートの長さ変化率

変わらなかった。割裂引張強度と比較して直接引張強度の方が初期の材齢では強度が高めとなった。

断熱温度上昇の試験結果を図-6 に示す。BB の場合では、打ち込み温度差 5 でを考慮しても、温度上昇量はほぼ 50 でと殆ど差がなく、一方、LCR では 40 で以下となり、LCR は BB より断熱温度上昇量で 10 で以上低くなった。

温度変化量とひずみ変化量の関係を図-7 に示す。温度変化量とひずみの変化量の一次線形関係の傾きから求めた線膨張係数は、LCR で 9.46×10^{-6} 、BB で 9.67×10^{-6} となった。

無拘束条件での長さ変化率を図-8 に示す。ただし、材齢 1 日を基長としているため材齢 7 日までの水中養生による膨張も含まれている。BB が材齢 7 日までに水中で最大 50×10^{-6} 程度膨張し、材齢 35 日(乾燥後 28 日)では -400×10^{-6} の長さ変化率となった。LCR では材齢 7 日までに水中で最大 163×10^{-6} 膨張し、材齢 35 日(乾燥後 28 日)では -100×10^{-6} 程度の長さ変化率となった。乾燥後からの長さ変化率は、LCR で -250×10^{-6} 程度、BB で -450×10^{-6} 程度となった。この結果から、LCR は BB より収縮が小さいといえる。

拘束状態における長さ変化率を図-9に示す。ただし、コンクリートを打設する前の拘束器具の測長としているため材齢 7 日までの水中養生による膨張も含まれている。BB は材齢 7 日で最大 0×10^{-6} 程度であり、材齢 35 日(乾燥後 28 日)では -360×10^{-6} の長さ変化率となった。LCR では材齢 2 日で最大 132×10^{-6} 膨張し、材齢 35 日 乾燥後 28 日)では -150×10^{-6} 程度の長さ変化率となった。材齢初期の膨張は無拘束の場合より小さい値であるが、拘束状態でも認められた。乾燥後からの長さ変化率は、LCR で -300×10^{-6} 程度、BB で -360×10^{-6} 程度となった。これより、拘束状態においても LCR は BB より収縮が小さいといえる。

LCR のコンクリートの物性は、強度および静弾性係数は BB とほぼ同等のものが得られた。LCR の断熱温度上昇および収縮は BB よりも抑制される結果となった。と

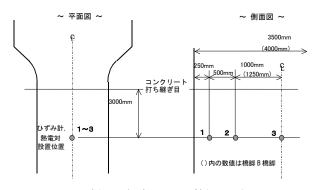


図-10 橋脚の概念図および橋脚の計測位置

くに、LCR は拘束状態においても初期の材齢で膨張する 結果となった。

3. 橋脚への適用

3.1 橋脚の温度およびひずみの計測方法

計測した橋梁の概念図と計測位置を図-10 に示す。橋脚 A に LCR を使用し、橋脚 B に BB を使用した。計測箇所は図-10 に示すようにコンクリート打ち継ぎ目から 3m の位置で、厚み方向に 3 箇所とした。

計測に用いる機器は埋め込みひずみ計(KM-100B)および熱電対(T型;径 ϕ 0.65mm)をデータロガ(TDS-303)に接続して温度とひずみを測定した。なお、有効応力計は、温度の影響で精度を欠く可能性が大きいため設置していない。

実橋脚での計測項目と計測インターバルを表-3 に示す。収縮ひずみは実ひずみから温度変化による温度ひずみを差し引いて求め、温度変化による温度ひずみに用いた線膨張係数は前項で求めた値を使用した。

橋脚 A の計測箇所のコンクリートは 10 月に,橋脚 B の計測箇所のコンクリートは 9 月に打設した。

表-3 計測項目と計測インターバル

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
計測項目	計測インターバル
コンクリート	打設直後0日~3日(3時間間隔)
ひずみ	3 日~7 日(6 時間間隔)
	7日~14日(12時間間隔)
コンクリート	14 日~28 日(12 時間間隔)
温度	28 日~56 日(12 時間間隔)
	56 日~120 日(1 日に 1 回)
外気温	120日~180日(3日に1回)
	計測は180日間継続する。
目視による	基本的には毎日。可能な日程まで
ひびわれ	

3.2 橋脚中のコンクリートの計測結果

橋脚 A (LCR) と橋脚 B (BB) の内部温度を図−11,図−12 にそれぞれ示す。

橋脚 A (LCR) の内部温度は、表面から 250mm で最大 50℃程度、表面から 750mm で最大 60℃程度、表面から 1750mm で最大 65℃程度となった。橋脚 B (BB) の内部 温度は、表面から 250mm で最大 65℃程度、表面から 750mm で最大 75℃程度、表面から 2000mm で最大 80℃程度となった。同一の表面深さにおいて橋脚 A (LCR) の内部温度は、15℃程度橋脚 B (BB) より抑制された。

橋脚 A (LCR) の鉛直方向の収縮ひずみを図-13 に示す。橋脚 B (BB) の鉛直方向の収縮ひずみを図-14 に

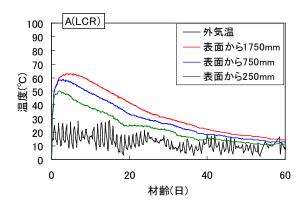


図-11 橋脚 A (LCR) の内部温度

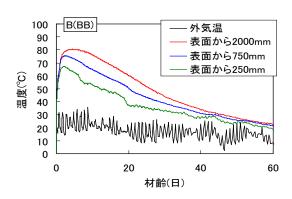


図-12 橋脚 B (BB) の内部温度

示す。収縮ひずみは埋め込みひずみ計で測定した実ひずみから温度ひずみを差し引いた。線膨張係数は前項で求めた値を用いた。橋脚 A (LCR) の水平方向の収縮ひずみを図-15 に示す。橋脚 B (BB) の水平方向の収縮ひずみを図-16 に示す。橋脚 A (LCR) のひずみの急激な低下による不連続点は梁部打設の影響である。

橋脚 A (LCR) の鉛直方向の収縮ひずみは、表面からの深さによらず初期で 50×10^6 の膨張ひずみが見られた。とくに、表面から深さ 250mm においては打設から 10 日程度まで膨張側のひずみであった。最大の収縮ひずみは、表面から 1750mm で- 150×10^{-6} 程度であった。

橋脚 B (BB) の鉛直方向の収縮ひずみは、橋脚 A (LCR) と異なり初期の膨張側のひずみはみられなかった。最大の収縮ひずみは、表面から 2000mm で- 250×10^{-6} 程度であった。

橋脚 A (LCR) の水平方向の収縮ひずみは、鉛直方向 と同様に表面からの深さによらず初期で 50×10^6 の膨張 ひずみが見られた。最大の収縮ひずみは、表面から 1750 mm で- 200×10^6 程度であった。

橋脚 B (BB) の水平方向の収縮ひずみは、鉛直方向と同様に初期の膨張側のひずみはみられなかった。最大の収縮ひずみは、表面から 2000mm で -250×10^6 程度であった。

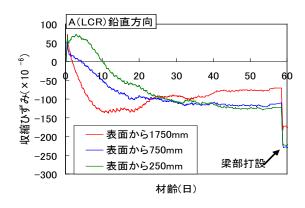


図-13 橋脚 A (LCR) の収縮ひずみ(鉛直方向)

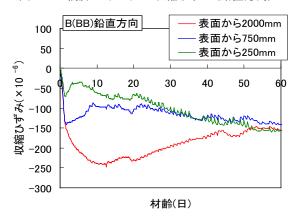


図-14 橋脚 B (BB) の収縮ひずみ(鉛直方向)

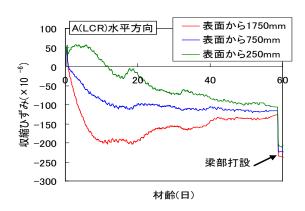


図-15 橋脚 A (LCR) の収縮ひずみ(水平方向)

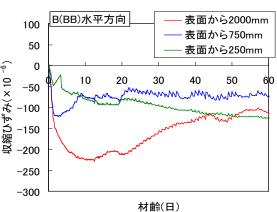
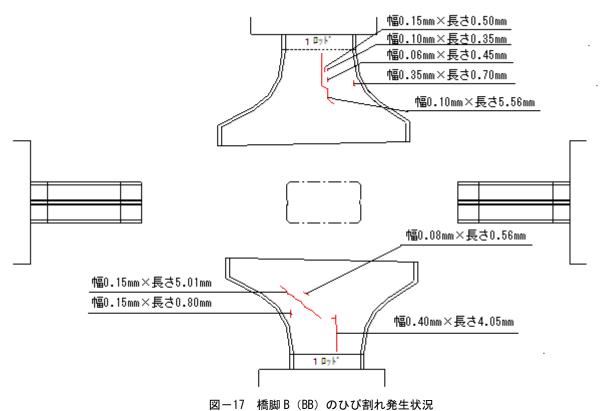


図-16 橋脚 B (BB) の収縮ひずみ(水平方向)



凶ーI/ 橋脚 D (DD) のひひ割れ発生仏流

橋脚の種類およびコンクリートひずみの測定方向によらず、部材中心付近では材齢 10 日以降に膨張する傾向を示した。材齢 10 日程度では石こうの反応により遅れ膨張の現象が起き難い。橋脚内部の水分移動等による影響か、あるいは部材としての施工時応力の移行影響か、あるいは拘束等による初期クリープ等の影響かは、現時点では把握できていない。今後の解析検討を含めた詳細検討に委ねたい。

結果として、表面からの深さおよび収縮ひずみの方向によらずLCRはBBより実橋梁においても収縮ひずみが抑制される傾向を示した。

コンクリート打設の約3ヶ月後のひび割れ発生状況を調査した結果,橋脚A(LCR)には沈降ひび割れが生じていたが、収縮によるひび割れは確認されなかった。橋脚B(BB)には $\mathbf{2}$ -17に示すひび割れが確認された。

4. まとめ

今回の検討から得られた結論を以下に述べる。

- (1) LCR の断熱温度上昇および収縮は BB よりも抑制 される結果となった。とくに、LCR は拘束状態において も材齢初期に膨張する結果となった。
- (2) 実橋梁において部材内部のコンクリート温度およびひずみを測定した。表面からの深さおよび収縮ひずみの方向によらず LCR は BB より実橋梁においても水和反

応による発熱量が抑えられ、収縮ひずみも抑制される傾向を示した。

今回の検証により低ブレーン高炉スラグを用いた高炉セメントの有効性が確認できた。今後は新名神高速道路への本格採用の可否を判断するために,塩害・アルカリ骨材反応の耐久性試験を実施するとともに,配合特性の把握のために他地域の工事への適用も計画している。

参考文献

- 二戸信和、羽原俊祐、菅野智晴、鯉渕清:トータルな性能を評価したマスコンクリート用高炉セメントの検討、セメント・コンクリート論文集、No.61、pp.255-261、2008.2
- 2) 廣島明男, 二戸信和, 大友健, 宮澤伸吾: スラグ粒度と化学成分を調整した高炉セメントを使用したコンクリートの壁状構造物内部での体積変化とひび割れ制御,第60回セメント技術大会講演要旨集,pp.238-239, 2006.5
- 3) 酒井秀昭:橋梁への高性能材料の採用による環境負荷低減, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.43-46, 2010.9
- 4) 河井健,篠田貴,須田久美子,渡辺義光:裏高尾工事における橋脚のマスコンクリート対策検討,コンクリート工学, Vol.48, No.6, pp.9-17, 2010.6