

論文 混和材を大量使用した環境配慮コンクリートの冬期施工

宮原 茂禎*1・荻野 正貴*2・岡本 礼子*3・大脇 英司*4

要旨: ポルトランドセメントを使用せずに高炉スラグ微粉末のみを結合材とする環境配慮コンクリートを開発している。強度発現の遅れ等が懸念される冬期に、水和熱の放散が顕著な土間部材に適用した。施工時期の最低気温は氷点下であったが、環境配慮コンクリートはピストン式のコンクリートポンプで良好に圧送できること、初期の一週間のみ加温養生を行うことで初期から長期に至り十分な強度発現性を示すなど、期待する性能が得られることを実証した。また、高炉スラグを大量に用いるとアブサンデン現象（表層の脆化）の発生が懸念されるが、現地での透気試験等により、表層は堅牢で物質移動抵抗性に優れることを確認した。

キーワード: コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 冬期施工, ポンプ圧送, 加温養生, 硬化物性

1. はじめに

建設産業においても他産業と同様にCO₂を主とする温室効果ガスの排出量を削減する技術が求められている。建設資材の基幹であるコンクリートは、1m³製造すると約250kgのCO₂を排出し、そのうち90%以上はポルトランドセメントの製造に起因する¹⁾。ポルトランドセメントの使用量を減じることでコンクリートのCO₂排出量が削減できるため、グリーン購入法では高炉セメント（B種、C種）が特定調達品目として指定されている²⁾。

著者らは一層の環境負荷の低減を目指してポルトランドセメント使用量が“ゼロ”のコンクリート（環境配慮コンクリート）を開発した^{3), 4)}。蒸気養生を必要としない現場打ち可能なコンクリートであり、呼び強度24の高炉セメントB種を用いたコンクリート（BB）と同等の性能を有する。CO₂排出量は通常のコンクリートの約1/4に、グリーン購入法の特定調達品目であるBBの約1/2に削減できる。また、製鉄副産物である高炉スラグの大量使用により、3R（リデュース、リユース、リサイクル）の推進に貢献できる。

本論文では、環境配慮コンクリートを施工条件が厳しいと考えられる冬期に土間構造物に適用した事例と硬化後のコンクリートの性能について報告する。コンクリートポンプを用いた打込みが必要であったことや、ポルトランドセメントを含まないため通常のコンクリートよりも水和反応の温度依存性が強いことが想定されたことから、事前検討を通してポンプ圧送性や加温養生による強度発現性について確認したうえで⁵⁾、本施工を実施した。また、施工後の土間コンクリートの非破壊試験や別途製作した試験体の試験によりコンク

リートの性能を把握した。その結果、環境配慮コンクリートはレディーミクストコンクリート工場での製造、ポンプ圧送が問題なく実施でき、寒冷期においても打込み後に適切な加温養生を施すことで良好な強度発現性と性能が得られることが実証された。今後の適用の進展と、それによる温室効果ガスの排出抑制や3Rの推進が期待できる。

2. 環境配慮コンクリートの特徴と冬期施工における課題

2.1 環境配慮コンクリートの特徴

環境配慮コンクリートの使用材料および配合を、表-1および表-2に示す。環境配慮コンクリートはポルト

表-1 使用材料

材料名	記号	仕様	
水	W	水道水	
高炉スラグ微粉末	BFS	無水石こう添加品, 密度 2.89 g/cm ³ , ブレーン値 4460cm ² /g	
特殊刺激材	膨張材	St	石灰系, 密度 3.14g/cm ³ , ブレーン値 3500cm ² /g
	消石灰		密度 2.20g/cm ³ , 600μm 篩全通, 150μm 篩上 ≤5%, CaO ≥72.5%
	石灰石微粉末		密度 2.65g/cm ³ , 75μm 篩 80%通過, CaCO ₃ 含有量 ≥97.5%
細骨材	S	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.54%, 粗粒率 3.78	
粗骨材	G	砕石, 表乾密度 2.64g/cm ³ , Gmax20mm	
高性能 AE 減水剤	Ad①	ポリカルボン酸エーテル系化合物	
遅延型 減水剤	Ad②	変性リグニンスルホン酸化合物	

*1 大成建設 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設 土木技術研究所 土木構工法研究室 研究員 工修 (正会員)

*3 大成建設 土木技術研究所 土木構工法研究室 研究員 (正会員)

*4 大成建設 土木技術研究所 土木構工法研究室 主席研究員 工博 (正会員)

表-2 環境配慮コンクリートの示方配合

スランプ (cm)	Air (%)	s/a (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	BFS	St	S	G	Ad①+Ad②
15±2.5	6±1.5	43.3	35.4	155	338	100	714	944	P×0.88%

注：表中の材料の記号は表-1を参照。

ランドセメントの代わりに高炉スラグ微粉末を結合材に用いて、CO₂排出量を大幅に削減する。一方、高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有するが自硬性ではないため、カルシウム系の化合物から構成される特殊刺激材を添加する。これにより、同一強度レベルの高炉セメントB種コンクリートと同等の耐久性を実現できることは既に報告している⁴⁾。実施工においては、冬期であることと、高炉スラグ微粉末を大量に使用することから、主に以下に示す点に着目して検討を行った。

2.2 強度発現性の確認

高炉スラグ微粉末の水和反応はポルトランドセメントと比較して温度依存性が高く、一般に、高炉スラグ微粉末を混和すると強度発現性は周囲の温度の影響を受けやすくなる。環境温度が5℃の場合には、20℃の場合と比べて材齢28日までの強度が低下することが知られている⁶⁾。強度の低下や初期凍害を防ぐため、コンクリートが所定の温度となるように事前検討で養生方法を検討した。

2.3 ポンプ圧送性の確認

環境配慮コンクリートは表-2に示す通り、通常のコンクリートと比較して粉体量(BFS+St)が多い。そのため、圧送圧が高くなることが懸念されたため、事前の検討を行った。

2.4 アブサンデン現象による表面劣化

魚本らは、高炉スラグ微粉末が80~85%のスラグ石こう系セメントについて検討し、コンクリート表面が脆弱になりペーストや細骨材が剥離するアブサンデン現象が生じやすいことを報告した^{7,8)}。開発した環境配慮コンクリートはこの問題を克服しているが^{例え3)}、冬期においては結合材の水和反応性が異なることが想定されるため、施工が完了した構造物を用いて長期的なモニタリングを行うこととした。

3. 冬期における実構造物への適用

3.1 施工概要

環境配慮コンクリートは、大成建設技術センター内に新設した実験棟の土間コンクリートの一部に適用した。表-3に施工概要を示す。土間は厚さ約20~40cmの鉄筋コンクリート構造であり、環境配慮コンクリートは図-1に示す約9m³に使用した。

冬期の施工で外気温が低いため、強度発現が遅いこ

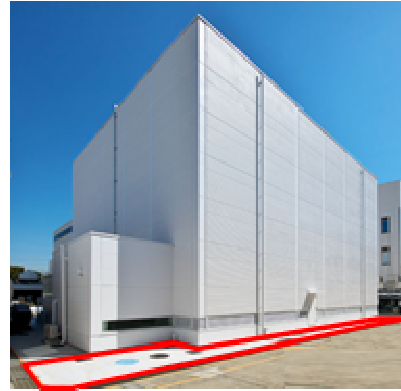


図-1 環境配慮コンクリートの適用範囲

表-3 土間コンクリートの施工概要

適用箇所	研究実験棟の土間コンクリート
適用時期	2013年2月
施工時の外気温	11~12℃ (加熱養生期間の最低気温は0℃以下)
施工数量	約9m ³
打込み方法	ピストン式ポンプで圧送 (水平換算長103m, 配管径5B)
コンクリートの仕様	呼び強度 24
	スランプ 15±2.5cm
	空気量 6.0±1.5%

とが予想された。また、ポンプ圧送して打ち込むため、圧送性を確認する必要があり、事前検討を実施した。

3.2 事前検討

(1) 実験方法

本施工で使用するレディーミクストコンクリート工場(以降、プラント)で試し練りを行い、化学混和剤の添加量を決定した。結合材には、将来の大量製造に対応できるように、高炉スラグ微粉末と特殊刺激材を予め粉体混合器で混合したプレミックス粉体を用いた。プラントは通常の製造設備を有しており、予め粉体運搬車で輸送してプラントのサイロに貯蔵しておいたプレミックス粉体を用いて、コンクリートを製造した。コンクリート製造量は1バッチあたり2m³とした。

表-4に事前検討における試験・測定項目を示す。本施工では表-3に示した通り、ポンプ圧送により105mの場内運搬を行うため、圧送性について事前に検討した。試験実施日の最高気温は13℃、練上りのコンクリート温度は11~13℃であった。製造したコンクリート

表-4 事前検討における試験・測定項目

試験項目	試験方法
実施時期	2012年12月
スランプ、 空気量試験	JIS A 1101, 1128 に準拠し、 ポンプ圧送の前後に測定。
ポンプ圧送時の 吐出圧、 ストローク数	圧送速度約 15, 30, 45 m ³ /hr での 主油圧から管内圧力損失を計算。 (水平換算長 50.5m, 配管径 5B) ストローク数とシリンダ容積から 圧送速度を算出。
圧縮強度	現場封緘, 室内封緘, 加温養生後, JIS A 1108 に準拠して試験。

をアジテータ車に排出してプラント内を運搬した後、最大吐出圧力が 8.2Mpa のピストン式のコンクリートポンプ車を用いて約 15, 30, 45m³/hr の圧送速度で圧送した。事前検討での圧送は水平換算距離で 50.5m であり、ポンプ車に付帯する圧送ホースを用い、配管は使用しなかった。圧送時は、ポンプの主油圧やストローク数を計測し、管内圧力損失や吐出量の計算に用いた。また、圧送前後のフレッシュ性状を測定した。

圧送前のコンクリートでφ10×20cm の円柱試験体を作製し、所定の強度発現性を得るための養生方法について検討した。アジテータ車から採取したコンクリートを型枠に整形し、試験体をビニール袋に入れて封緘したのち、次の3つの方法で養生し、強度発現性を調べた。

- 1) 外気環境で静置 (以降, 現場封緘)。
- 2) 20°C, RH80%の恒温の室内で静置 (以降, 室内封緘)。
- 3) 60°C以下まで温度が上がる加熱養生マットで覆い7日間加温後、試験材齢まで外気環境で静置 (以降, 加温養生)。

加温養生は、強度発現の促進に加えて、本施工の時期に最低気温が氷点下となり初期凍害が懸念されたこと、本コンクリートの発熱量が小さいため水和熱で温度を保持するのが難しい可能性があることを考慮して検討に加えた。養生後に脱型して圧縮強度試験を行った。あわせて、ポンプ圧送後のコンクリートについても、室内封緘と加温養生後の強度試験を行った。

(2) コンクリートのポンプ圧送性と強度発現性

表-5 に圧送時の計測結果から求めた環境配慮コンクリートの吐出量と管内圧力損失および、圧送前後のフレッシュ性状の変化を示す。圧送前後のスランプは、圧送速度 15m³/h では変化がみられなかったが、30m³/h では 1.7cm, 45m³/h では 3cm, 圧送後に減少した。特に圧送速度 45m³/h で圧送した後のスランプは目標値を下回った。圧送速度を 45m³/h とすると、圧送圧の増加や、スランプの低下が顕著であったが、30m³/h 程度までに抑えることで十分に施工できることが示された。

環境配慮コンクリートの管内圧力損失は、圧送速度 15~45 m³/h において 3~8×10⁻²MPa/m であった。コンクリートのポンプ施工指針⁹⁾によると、圧送速度 15~45m³/h の普通コンクリートの管内圧力損失が 0.8~1.3×10⁻² MPa/m, スランプフロー600~700mm の高流動コンクリートの管内圧力損失が 2~8×10⁻²MPa/m であることから、環境配慮コンクリートの管内圧力損失は高流動コンクリートと同程度であった。本施工での圧送距離は水平換算長で 103m であり (表-3), 圧送速度が 15 と 30 m³/h の時、必要理論吐出圧力は 3.8 および 4.8MPa となる。これらに基づき、本施工では、最大理論吐出圧力が 8Mpa 程度のポンプを用い、圧送速度を 30m³/h 以下として行うこととした。

図-2 に、現場封緘と加温養生試験体に埋め込んだ熱電対による温度を示す。試験体がφ10×20cm と小型であったため、7日間の加温期間中の試験体温度は 30°C 以上まで上昇した。現場封緘の温度は初期の7日は 10~15°C で推移したが、材齢3日で一時的に 20°C まで上

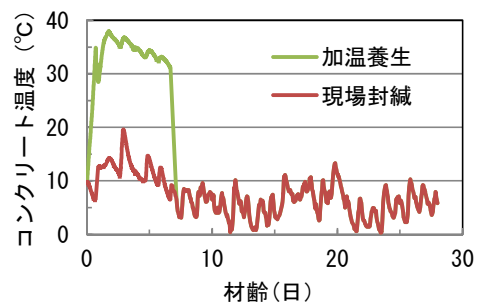
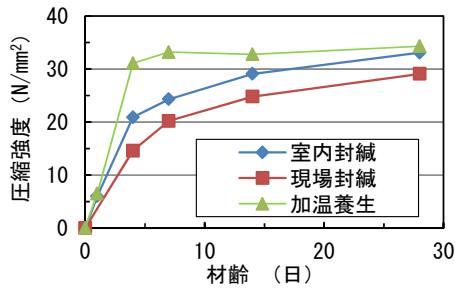


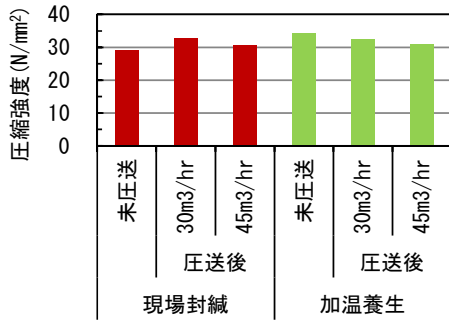
図-2 試験体の温度

表-5 ポンプ圧送後のフレッシュ性状, およびポンプ圧送性

圧送速度 (計算値)		15.5 m ³ /hr		29.6 m ³ /hr		42.7 m ³ /hr	
分類	試験項目	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
圧送前後の フレッシュ性状	スランプ	14.1 cm	14.6 cm	15.5 cm	13.8 cm	14.8 cm	11.8 cm
	空気量	5.3%	5.1%	5.5%	5.1%	7.0%	5.5%
ポンプ圧送性	ポンプ主油圧	8 MPa		10MPa		22 MPa	
	ポンプ前面圧	1.5 MPa		1.9 MPa		4.1 MPa	
	水平管 1m あたりの 管内圧力損失	3.0×10 ⁻² MPa/m		3.7×10 ⁻² MPa/m		8.2×10 ⁻² MPa/m	



a. 養生方法別



b. 圧送の有無 (材齢 28 日)

図-3 圧縮強度試験結果 (事前検討)

昇したのは気温上昇のためである。図-3 に養生方法別および、圧送前後の試験体の材齢 28 日における圧縮強度を示す。28 日までの同一材齢の強度は加熱養生 > 室内封緘 (20℃一定) > 現場封緘の順に大きくなった (図-3 a)。材齢 1 日では、現場封緘した試験体の強度は 1N/mm² 以下であったのに対し、加熱養生した試験体は 5N/mm² であった。ただし、28 日での圧縮強度は養生方法による大きな差は小さく、現場封緘でも目標とする呼び強度 24 相当を得られた。圧送後のコンクリートで作製した試験体の強度は圧送していないものと遜色なかった (図-3 b)。

土間構造物では比表面積が大きいこと水分逸散量も大きいこと、実構造物ではテストピースよりも加温により温度が上がりにくいことを考慮し、本施工においては、上記の強度試験結果を参考に、安全をみて加熱養生マットによる加温養生を 7 日間行うこととした。

3.3 本施工

(1) 施工方法

本施工では事前検討で定めた手順でコンクリートを製造し、現場までアジテータ車で運搬した。配合は当日の試し練りにより再調整し、表-2 に決定した。当日の最高気温は 12℃、コンクリート温度は 9~12℃であった。1, 2 台目のアジテータ車のスランブと空気量が目標値を満足することを現場にて確認したのち、ポンプ圧送して打ち込んだ。配管径 5B の圧送管を配し、事前検討の結果から速度を約 15 m³/h として圧送した。

コンクリートの施工は、通常のコンクリートと同様

に行った。圧送後のコンクリートを棒状バイブレータで締め固め、木ごてで均し、金ごてで仕上げた。その後、表面を湿潤養生マット、加熱シート、防災シートの順で覆い養生した。材齢 7 日に加熱シートと防災シートを取り除いて加温養生を終了し、材齢 14 日で養生マットによる湿潤養生を終了した。

なお、現地では、コンクリートの表面から 100, 200, 300mm の深さに熱電対を埋め込み、打込み後のコンクリートの温度を測定した。

(2) フレッシュ性状とポンプ圧送性

図-4 に現場着 (1,2 台目) および圧送後 (1 台目) のコンクリートのフレッシュ性状を示す。圧送前、圧送後のいずれの結果もスランブの目標値 15±2.5cm、空気量の目標値 6.0±1.5% を満足した。

図-5 に打込みの状況を示す。コンクリートは配管の閉塞などのトラブルは発生せず問題なく圧送された。ポンプの吐出圧は 2.6~4.0MPa、シリンダ容積とストローク数から求めた吐出量は 14~17m³/h であり、ほぼ事前検討の結果と一致した。環境配慮コンクリートは、高流動コンクリートと類似の管内圧力損失を有し、一般に使用されているピストン式のコンクリートポンプを用いて圧送できることが実証できた。

(3) 施工時および硬化後の現地計測結果

図-6 に土間コンクリートに埋め込んだ、熱電対による温度の測定結果を示す。温度は施工の翌日から加温養生を終了した材齢 7 日まで、未明に最低気温が 0℃

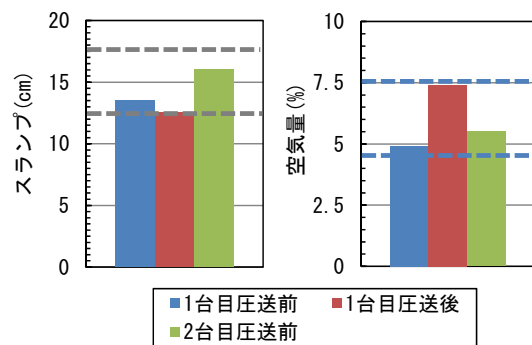


図-4 本施工における圧送前後のフレッシュ性状の変化



図-5 環境配慮コンクリートの打込み状況

を下回る環境においてもコンクリートの表面から内部までその温度を10℃以上に保つことができた。コンクリートの最大温度は20℃程度であった。養生終了後の表面は、凹凸やうねりがなく平滑に仕上がっていた。

高炉スラグ微粉末を多量に使用したコンクリートではアブサンデン現象が生じることが懸念されたため、材齢265日において現地のコンクリートの表面の堅牢さを、日本建築工学会式引っかかり試験器を用いて評価した。加圧力0.5kgと1.0kgでコンクリートの表面を引きかいて疵をつけ、その幅で表面の強さを評価した。図-7に引っかかり後の疵の状況を示す。疵の幅は加圧力0.5kgで0.1~0.2mm、1kgで0.3~0.5mmであった。疵跡に“ハゼ”はみられず脆弱層の存在が否定でき、強度に相応した堅牢な表面であることが確認できた。施工後2年弱が経過した現在も、表面は打設直後と同じように平滑な表面を保持しており、アブサンデン現象の兆候は見られない。

図-8に、材齢265日において現地で実施したトレント式透気試験によるコンクリート表層の透気係数の測定結果を示す。測定値は、トレントらによる評価¹⁰⁾で「Good」と評価され、これまでに報告されている呼び強度24程度のコンクリート¹¹⁾と比較して、同等以上の物質移動抵抗性を有していることが確認された。これらから、環境配慮コンクリートは冬期施工においても、強度の確保や初期凍害の防止が可能な適切な養生によって良好に性能を発揮することを実証できた。

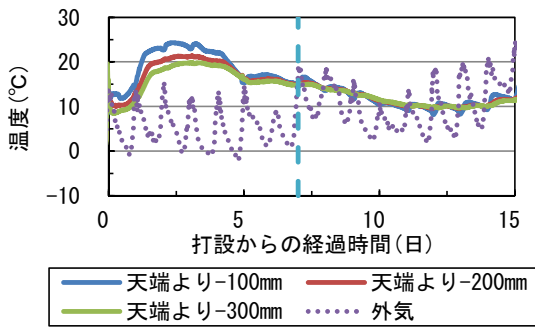


図-6 土間コンクリートの温度の推移

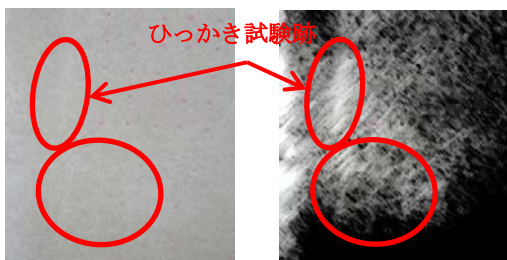


図-7 引っかかり試験による疵の状況

(4) コンクリート試験体の物性と耐久性

本施工時に採取したコンクリートの材齢1年までの圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度をそれぞれJIS A 1108, JIS A 1149, JIS A 1113に準じて試験した。養生方法は水中養生と、施工環境を模擬して材齢7日まで加熱シートを使用し、その後、屋外で封緘養生を行った加温養生の2種類である。

図-9に圧縮強度試験の結果を示す。水中養生、加温養生ともに、材齢28日の圧縮強度は約30N/mm²であり、呼び強度24を満足した。加温養生を実施した初期の7日間で圧縮強度は25N/mm²に達し、水中養生の20N/mm²よりも大きくなった。その後の増進は水中養生よりもやや小さい傾向であったが、材齢28日、さらには1年での強度まで、標準養生の場合と比べて遜色のない値が得られた。

図-10および図-11に圧縮強度と静弾性係数および割裂引張強度との関係を示した。図には、コンクリー

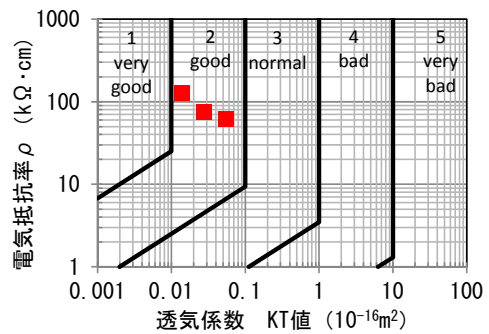


図-8 トレント式透気試験による土間コンクリートの表層透気係数

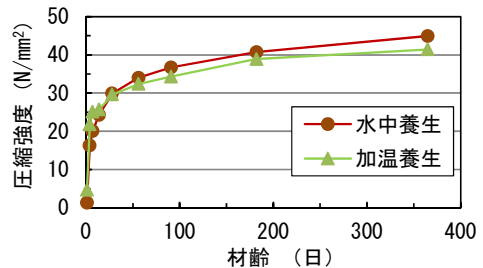


図-9 圧縮強度試験結果

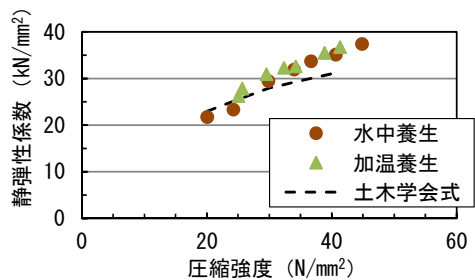


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

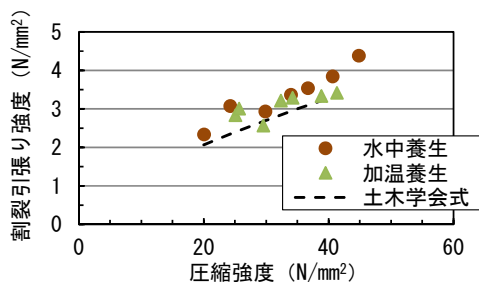


図-11 圧縮強度と割裂引張強度の関係

ト標準示方書に示される予測式¹²⁾で計算した特性値もあわせて示した。静弾性係数および引張強度ともにコンクリート標準示方書の式による特性値よりもやや高い値を示し、水中養生の場合だけでなく、加温養生した場合も既往の方法により求めた特性値を用いて設計してよいことが確認された。

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を結合材とする環境配慮コンクリートを、冬期に土間構造物へ適用した。事前検討によりポンプ圧送条件や養生条件を決定したうえで本施工を実施し、良好に完了することができた。また、施工したコンクリートは十分な品質が得られていることを、完成後の試験により実証した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 環境配慮コンクリートは、構成する粉体材料をブレミックス粉体として使用することができ、通常のレディーミクストコンクリート工場で製造が可能であった。
- (2) 環境配慮コンクリートのポンプ圧送時の管内圧力損失は高流動コンクリートと同程度であり、ピストン式のコンクリートポンプを用いることにより良好に圧送できた。
- (3) 施工したコンクリートは、建築仕上げ学会式引っかき試験やトレント式透気試験により、堅牢で高い品質を持つことが確認された。2年弱の供用期間ではアブサンデン現象も生じていない。
- (4) 寒冷期の施工であったが、初期の7日間について加熱シートを用いることで、初期のみならず材齢1年までの強度発現性が標準養生の場合と同等になり、呼び強度24を満足した。
- (5) 圧縮強度と静弾性係数および割裂引張強度の関係は、標準養生でも加温養生であっても通常のコンクリートと同様であり、圧縮強度から既往の予測式を使用して求めることが可能である。

以上より、環境配慮コンクリートは通常のコンクリートと同様に施工でき、冬期においても適切な養生を行うことにより、十分な品質が得られることを実証できた。今後、積極的に展開を図りたい。

なお、本研究は独立行政法人土木研究所が主催する共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の展開の一つとして実施したものである。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書，2010.
- 2) 国土交通省：平成25年度特定調達品目調達ガイドライン，2013.5
(<http://www.mlit.go.jp/tec/kankyou/green/pdf/201305guideline.pdf>)
- 3) 宮原茂禎，荻野正貴，岡本礼子，丸屋剛：高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成，コンクリート工学年次論文集，vol.35，No.1，pp.1969-1974，2013
- 4) 岡本礼子，宮原茂禎，坂本淳，丸屋剛：高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの物性について，コンクリート工学年次論文集，vol.35，No.1，pp.1981-1986，2013
- 5) 岡本礼子ほか：Ca系刺激材を用いた環境配慮型コンクリートのポンプ圧送性について，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，V-291，pp.581-582，2013
- 6) 鉄鋼スラグ協会，高炉セメント100年史，鉄鋼スラグ協会，p.21，2010
- 7) 魚本 健人，小林 一輔：高炉スラグ・排煙脱硫石こう系セメントを用いたコンクリートの圧縮強度，土木学会論文報告集，Vol.302，pp.125-138，1980
- 8) 魚本健人，小林一輔，星野富夫：高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化，コンクリート工学年次論文集，Vol.2，pp.69-72，1980
- 9) 土木学会：コンクリートライブラリー135，コンクリートポンプ施工指針【2012年版】，p.71，2012
- 10) R.J.Torrent and G.Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of concrete, Proceedings of International Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering, pp.985-992,1995
- 11) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会(335委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集，pp.30-36，2008
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】(2012年制定)，2013