

プレキャストPC部材への高炉スラグ微粉末の適用に関する基礎実験

川田建設(株) 正会員 工修 ○川口 千大
川田建設(株) 正会員 北野 勇一
川田建設(株) 堀池 一男

Abstract : In this study, we focus application of precast prestressed concrete member using ground granulated blast furnace slag, initial or long term age concrete strength and the appearance (color and micro cracks) with this concrete performed steam curing were experimentally investigated. Through these investigations, various influence (specific surface area and SO_3 content, effect of concrete volume) for this concrete were clarified.

Key words : Prestressed concrete , Ground granulated blast furnace slag , Steam curing

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PCと略す）は、強度の高いコンクリートを用い、しかもプレストレスの導入によりひび割れが制御されるため、耐久性に富む社会基盤構造物を創出することができる。一方、塩害環境下でのさらなる耐久性向上や環境負荷の軽減といった新たな社会的要請から、近年、プレキャストPC部材を中心に高炉スラグ微粉末の適用が広まりつつある^{1), 2)}。しかしながら、例えば道路橋示方書³⁾には「高炉セメントについては、初期強度の発現が要求される上部構造に使用された実績が少なく、クリープや乾燥収縮特性について必ずしも明確になっていない」と明記され、PC構造物への高炉スラグ微粉末の適用が拡大されていない現状にある。今後とも、PC技術が社会基盤の発展に貢献するには、高炉スラグ微粉末を用いる場合の各種特性を把握し、今以上に確かな技術であることを証明する必要がある。そこで本研究では、蒸気養生を行い工場製作される設計基準強度50N/mm²のプレキャストPC部材を対象とし、以下に示す点について実験的に検討することにした。

【実験A】高炉スラグ微粉末の種類や SO_3 量がプレストレス導入時強度に及ぼす影響（2章）

【実験B】高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの初期養生が長期強度に及ぼす影響（3章）

【実験C】高炉スラグ微粉末使用がプレキャストPC部材の外観に及ぼす影響（4章）

また、得られた実験結果は「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」⁴⁾（以下、スラグ指針と略す）等と対比することで考察を加えた。

2. 高炉スラグ微粉末の種類や SO_3 量がプレストレス導入時強度に及ぼす影響（実験A）

2. 1 実験方法

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントは初期強度を確保する観点より早強ポルトランドセメントを、高炉スラグ微粉末は初期強度の発現に及ぼす影響を検討するためJIS A6206に適合する3種類の高炉スラグ微粉末を用いた。高炉スラグ微粉末に含まれる三酸化硫黄の量（以下、 SO_3 量と略す）は、高炉スラグ微粉末4000で1水準（2.1%）、高炉スラグ微粉末6000と高炉スラグ微粉末8000で3水準（0%、2.3%、3.6%）とした。

コンクリートの配合条件を表-2に示す。本実験では、初期強度の発現を確保しつつできるだけ環境への配慮を行う観点より、早強ポルトランドセメントをベースとして高炉スラグ微粉末の置換率（以下、置換率と略す）を50%とした3種類の配合（表中にて“スラグ4”、“スラグ6”および“ス

ラグ8”と示している配合)について主に検討することにした。比較として、置換率0%である配合(表中にて“早強のみ”と示している配合)も実験を行った。また、水結合材比はプレストレス導入時(材齢1日)で $\sigma_{1S}=35\text{N/mm}^2$ 、PC部材出荷時(材齢7日)で $\sigma_{7S}=50\text{N/mm}^2$ の圧縮強度を確保できる強度回帰式を求めるため、3ないし4の水準を設けた。

コンクリートはスランプ $12\pm 2.5\text{cm}$ と空気量 $4.5\pm 1.5\%$ (ただし、 $W/B=30\%$ 以下の配合はスランプ $18\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $3.0\pm 1.5\%$)を確保するよう混和剤の量を調整し、温度 $20\pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度60%以上に保った試験室にて練混ぜを行った。また、 $\phi 10\times 20\text{cm}$ の供試体を作製し、試験室にて3時間以上の前置きを行った後、最高温度 45°C を6時間保持する方法にて蒸気養生を行った。蒸気養生を終えた供試体は、所定の材齢まで、前述の試験室にて封をしない状態(以下、養生条件“蒸気のみ”と略す)で保管した。

上記の手順にて作製した供試体を用い、所定材齢(ただし、材齢1日は注水から 24 ± 1 時間)でJIS A1108に従い圧縮強度試験を実施した。

2. 2 実験結果および考察

(1) 高炉スラグ微粉末の種類の影響

図-1は材齢1日における圧縮強度試験の結果を水結合材比との関係として整理したもので、 SO_3 量はスラグ4の配合で2.1%、スラグ6とスラグ8の配合で3.6%とした。まず、高炉スラグ微粉末を用いた配合を比較すると、同じ水結合材比で得られる圧縮強度は、スラグ4<スラグ6<スラグ8の順に大きくなるのがわかる。また、早強のみの配合と比較すると、スラグ6とスラグ8の配合は早強のみの圧縮強度に漸近するが、スラグ4の配合では水結合材比が小さくなるほど早強のみの圧縮強度と乖離した。このことから、スラグ指針「初期強度の発現は高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど大きくなる」との記述と同様の傾向を示すことが確認された。

次に、図-1の結果から結合材水比と圧縮強度との関係を線形回帰式として求め、プレストレス導入時に必要な圧縮強度(配合強度 42.1N/mm^2)から各配合の水結合材比を算出した結果を図-2に示す。これによると、導入時強度から決定される水結合材比

表-1 コンクリート使用材料(共通)

材料名	記号	種類と主な品質
水	W	地下水, 密度 1.00
セメント	HPC	早強ポルトランドセメント 密度 3.14, 比表面積 $4550\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	BF4	高炉スラグ微粉末 4000, 密度 2.91, 比表面積 $3920\text{cm}^2/\text{g}$, SO_3 量 2.1%
	BF6	高炉スラグ微粉末 6000, 密度 2.91, 比表面積 $6200\text{cm}^2/\text{g}$, SO_3 量 0.2, 3.3, 3.6%
	BF8	高炉スラグ微粉末 8000, 密度 2.91, 比表面積 $8200\text{cm}^2/\text{g}$, SO_3 量 0.2, 3.3, 3.6%
細骨材	S	砕砂, 表乾密度 2.64
粗骨材	G	砕石 2005, 表乾密度 2.66
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 (I種)
	AE	AE 剤 (I種)

表-2 コンクリート配合条件(実験A)

配合名	スラグ種別	置換率 (%)	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m^3)
スラグ4	BF4	50	29, 34, 39	165
スラグ6	BF6		28, 33	
スラグ8	BF8			
早強のみ	---	0		

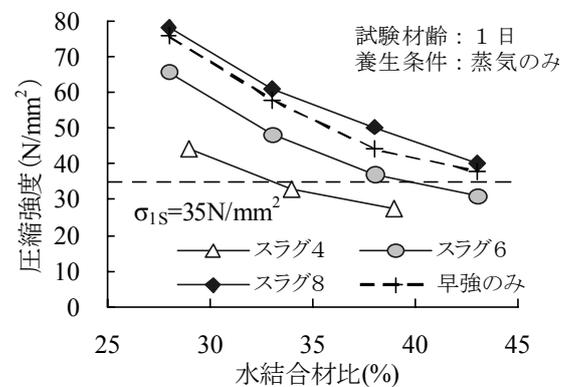


図-1 スラグ種別が初期強度に及ぼす影響

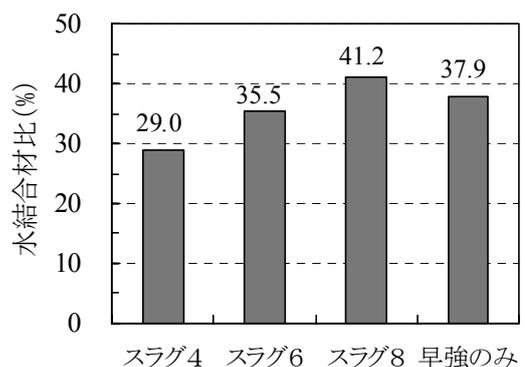


図-2 所要強度より決定される水結合材比

は、スラグ4<スラグ6<スラグ8の順に大きくなり、それぞれの差は概ね6%程度となった。この内、スラグ4の配合の水結合材比は、早強のみと比べ9%ほど小さくなっている。このような水結合材比の著しい低下は、水和熱や自己収縮ひずみの増大を招き、初期ひび割れの発生を助長するおそれがある。

以上より本検討の条件では、高炉スラグ微粉末4000を用いた場合は初期強度が低くなり所定の強度を得るための水結合材比も小さくなること、一方、高炉スラグ微粉末6000や高炉スラグ微粉末8000を用いた場合は早強のみの配合に近い水結合材比で初期強度の発現が得られることが確認された。

(2) 高炉スラグ微粉末中のSO₃量の影響

高炉スラグ微粉末の原料である高炉水砕スラグのSO₃量は0.3%程度以下であり、これを超える分はせっこうの添加を行っている⁴⁾。また、市販の高炉スラグ微粉末にはせっこうを添加しているものとそうでないものがあり、せっこうを添加しているものでもSO₃量が大きく異なることがあり得る。そこで、ここではSO₃量を変化させた場合の初期強度の発現に及ぼす影響について検討を進める。

図-3は、上記(1)項にて初期強度の発現が良好であることが確認されたスラグ6とスラグ8の配合に着目し、強度発現の推移を整理した結果である。これによると、スラグ6とスラグ8の両配合ともSO₃量の増加に伴い、初期強度の発現が大きくなることがわかる。とくに、スラグ8の配合でSO₃量を3.6%とした場合には、材齢7日までにほぼ最大強度に達している。また、材齢28日時点の圧縮強度はスラグ6とスラグ8の両配合ともSO₃量の違いによらず、概ね同程度となっている。

さらに、図-3中の材齢1日の結果に着目し、早強のみの配合に対する圧縮強度の比を算出した結果を図-4に示す。これより、高炉スラグ微粉末を用いていない“早強のみ”の配合と同等以上の初期強度を確保するのはスラグ8でSO₃量を3.6%とした配合のみである。一方、スラグ8の配合でもせっこうを添加しないものはスラグ6でSO₃量を2.3%や3.6%とした配合と同程度の強度にとどまる結果となった。

以上より、今回の検討範囲においては、SO₃量が初期強度の発現に及ぼす影響は比較的大きく、初期強度を大きくするにはSO₃量を増やすことが有効であること、また、SO₃量を増しても材齢28日時点の強度を著しく損なうことがないことが確認された。

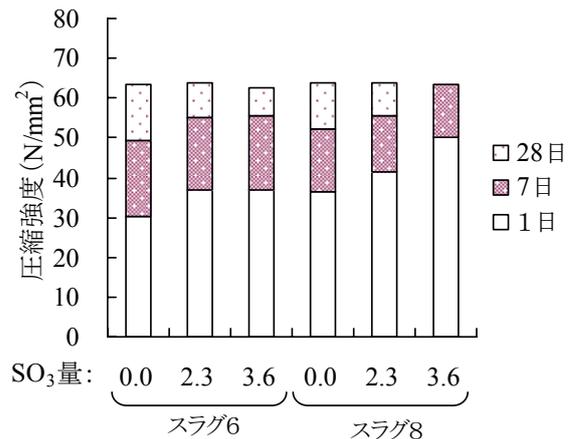


図-3 強度発現に及ぼす SO₃ 量の影響

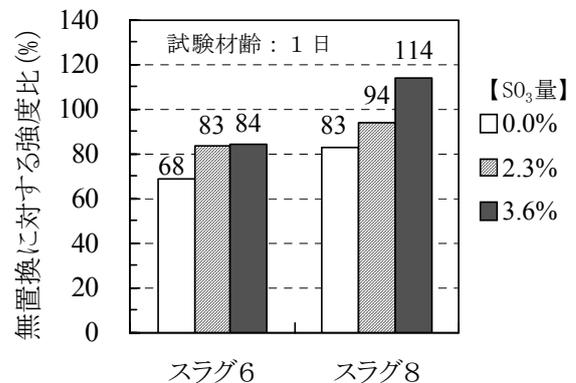


図-4 無置換コンクリートに対する強度比

3. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの初期養生が長期強度に及ぼす影響 (実験B)

スラグ指針には「高炉スラグ微粉末を用いた場合の強度発現は、養生中、特に初期の乾湿の影響を強く受ける傾向があり、乾燥すると強度発現が悪くなる」と記述されているが、蒸気養生を行うプレキャストPC部材を想定した検証はなされていない。そこで、プレキャストPC部材の供試体寸法や養生方法を考慮したコンクリート供試体を作製し、各種強度試験を実施することにした。

3.1 実験方法

コンクリートの使用材料は実験Aと同じものを用いた(表-1参照)。また、コンクリートの配合

条件は表-3に示す通りとし、スラグ種別をBF6とBF8の2種類、SO₃量を3.6%の1水準とした。スラグ6とスラグ8の配合の水結合材比はプレストレス導入時強度を確保するよう実験Aにて求めた値(図-2参照)とし、早強のみの配合は本実験を行ったPC工場の実績配合値を採用した。

コンクリートはスランプ12±2.5cm、空気量4.5±1.5%を確保するよう混和剤の量を調整し、PC工場に併設された実機プラントにて練混ぜを行った。このコンクリートを用い、表-4に示す供試体を作製した。ここでφ25供試体はJIS A5373附属書2橋りょう類に示されるプレキャストPC部材を念頭に体積表面積比V/S=50mmとした。φ10供試体はV/S=20mmである。養生方法は実験Aで実施した“蒸気のみ”に加え、蒸気養生後に表面が乾燥しないよう十分な散水を行う湿潤養生を材齢5日まで継続する“蒸気+湿潤”，材齢1日の脱枠後から所定の材齢まで20℃の水中で養生する“標準養生”の3方法とした。

上記の手順にて作製した供試体を用い、所定の材齢で圧縮強度試験(JIS A1108準拠)を実施した。

3.2 実験結果および考察

まず、φ10供試体の圧縮強度試験結果を図-5に示す。図より材齢91日の圧縮強度は、配合によらず、蒸気のみ<蒸気+湿潤<標準養生の順に大きくなるのがわかる。即ち、φ10供試体について言えば、蒸気養生後に湿潤養生を実施することで長期強度が増進する傾向にあることが改めて確認された。

次に、φ25供試体の圧縮強度試験の結果を図-6に示す。図より材齢91日の圧縮強度は、配合によらず、養生条件の違いがほとんど生じていないことがわかる。即ち、φ25供試体について言えば、蒸気養生後に湿潤養生を実施しない場合においても、長期強度の増進が期待できる結果が得られた。

さらに、標準養生28日に対する圧縮強度の比(以下、強度比SRと略す)を式(1)により求め、図-5、図-6を再整理した結果を図-7に示す。

$$SR = \sigma_{91s} / \sigma_{28N} \times 100 \quad (\%) \quad \dots (1)$$

σ_{91s} : 蒸気養生供試体の材齢91日の圧縮強度

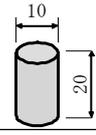
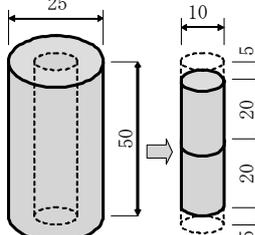
σ_{28N} : 標準養生供試体の材齢28日の圧縮強度

表-3 コンクリート配合条件(実験B)

配合名	スラグ種別	置換率(%)	水結合材比(%)	単位水量(kg/m ³)
スラグ6	BF6(3.6)	50	35.5	162
スラグ8	BF8(3.6)		41.2	
早強のみ	---	0	38.4	

注) スラグ種別の括弧内はSO₃量を示す。

表-4 コンクリート供試体の種類(実験B)

供試体名	供試体形状(単位:cm)	作製方法
φ10供試体		JIS A 1132に準じる。
φ25供試体		φ25×50cmの円柱供試体を作製、JIS A 1107に準じてφ10×20cmのコアを2本採取する。

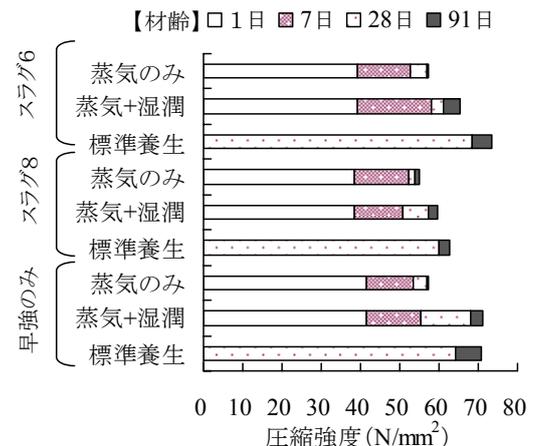
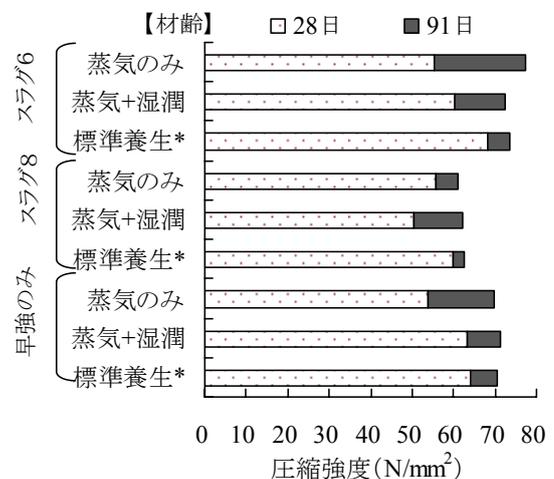


図-5 φ10 供試体の強度発現特性



注) 標準養生は図-5のφ10供試体の結果を再掲した。

図-6 φ25 供試体の強度発現特性

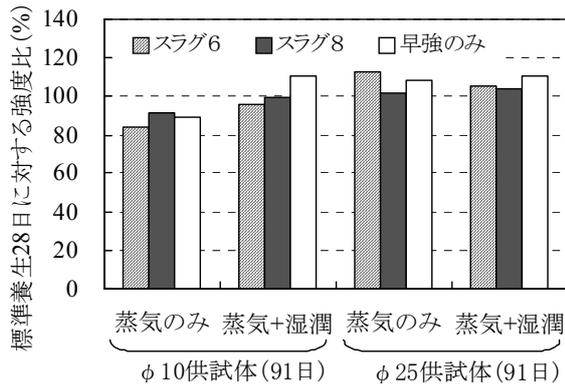


図-7 初期養生が長期強度に及ぼす影響

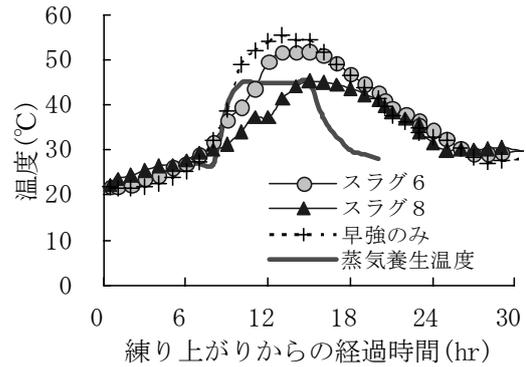


図-8 φ25 供試体の中心温度履歴

図より、φ10供試体では標準養生供試体の材齢28日の圧縮強度を下回る供試体を確認され、一方、φ25供試体ではいずれも標準養生供試体の材齢28日の圧縮強度を上回る結果が得られた。

以上より、φ10供試体のように体積表面積比が小さい場合には配合や蒸気養生後における乾燥が長期強度に影響を及ぼすこと、一方、φ25供試体のようにある一定以上の体積表面積比を有する場合には配合や蒸気養生後の乾燥による長期強度への影響はほとんど見られないことが確認された。

なお、φ25供試体中心部の最高到達温度は、スラグ8 (45°C) <スラグ6 (52°C) <早強のみ (55°C) の順に大きくなった (図-8 参照)。このようにφ25供試体は自己発熱が生じる分だけφ10供試体の養生条件と異なるものの、温度差で最大10°C程度であり、概ね同等に扱えるものと判断した。

4. 高炉スラグ微粉末使用がプレキャストPC部材の外観に及ぼす影響 (実験C)

ここでは、コンクリート表面に現れる発色 (高炉スラグ微粉末に含まれる硫化物に起因する⁵⁾ と考えられる) と微細ひび割れ (主に蒸気養生に起因する⁶⁾ と考えられる) について実験的に検討する。

4.1 実験方法

本実験では、実験Bと同じ3種類のコンクリートを用い、φ10供試体および1.0m角の供試体を作製した。養生方法はφ10供試体で“蒸気のみ”と“蒸気+湿潤”の2パターンとし、1.0m角の供試体については側面を鋼製型枠、上下面を厚さ15cmの発泡スチロールで断熱させた状態とし、材齢1日で脱枠を行った。発色に関しては1.0m角の供試体を用い、脱枠直後から材齢7日まで適宜、目視観察した。発色観察用に1.0m角の供試体を用いたのは、コンクリートの強度発現が大きいほど、すなわち高炉スラグ微粉末の水和反応が良好なほど一般的に発色が濃くなるためである⁵⁾。また、微細ひび割れはφ10供試体を用い、脱枠直後と材齢7日・28日・91日の時点でコンクリート表面に白色グリースを塗り込み、目視観察した。ここで、微細ひび割れ観察用にφ10供試体を用いたのは、コンクリートの乾燥進行速度が大きくなるほど、微細ひび割れの発生が促進されると考えられるためである⁶⁾。

4.2 実験結果および考察

コンクリートの外観観察の結果を表-5、発色状況を写真-1に示す。これらより、発色については、スラグ6とスラグ8の両配合とも脱枠直後に青みがかった色調を呈するものの、数時間から数日の間にほとんど退色した。ただし、スラグ8の配合では製品出荷時として想定している材齢7日においても発色の痕跡が若干残る結果となった。微細ひび割れについては写真-2に示すとおり、

表-5 コンクリートの外観観察結果

配合名	発色	微細ひび割れ
スラグ6	脱枠直後は青みがかった色調を呈するものの数時間で退色した。	蒸気のみ：材齢91日まで微細ひび割れなし
スラグ8	脱枠直後は青みがかった色調を呈し数日後に退色するものの、材齢7日でもその痕跡が若干残った。	蒸気+湿潤：微細ひび割れ発生 (材齢28日)
早強のみ	発色なし	

通常では目視が困難であり、ひび割れ幅はきわめて小さい。グリス塗布後に10mm程度の間隔で微細ひび割れが確認された。また、微細ひび割れの発生が予想された“蒸気のみ”の供試体には発生せず、養生方法を“蒸気+湿潤”とした供試体に微細ひび割れの発生（材齢28日以降）が確認された。本研究では、微細ひび割れの発生メカニズム解明のための詳細な検討を行っていないため、これ以上の踏み込んだ考察ができないものの、引用文献6)には蒸気養生供試体のみでなく、20℃の水中で1週間養生した厚さ10mmの板状供試体に関しても微細ひび割れの発生を確認していることから、コンクリート表層部の急激な温度変化に加え、急激な乾燥進行（湿度変化）も微細ひび割れ発生の大いなる要因になると考えられる。即ち、今回の実験においては、“蒸気のみ”の供試体の製作方法はプレキャストPC部材の製造に準じたため急激な温度・湿度変化が避けられたが、“蒸気+湿潤”を行った供試体は湿潤養生後の急激な湿度変化（水分逸散）を防ぐ処置を怠ったことが結果的に微細ひび割れ発生につながった可能性がある。

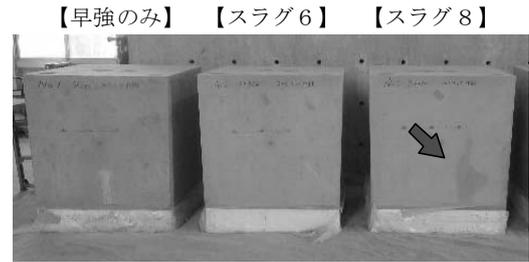
5. まとめ

蒸気養生を行い工場製作される設計基準強度50N/mm²のプレキャストPC部材を対象に高炉スラグ微粉末の適用に関する各種検討を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 高炉スラグ微粉末の比表面積やSO₃量が初期強度の発現に及ぼす影響は比較的大きく、初期強度を大きくするには比表面積やSO₃量を増すことが有効である。
- (2) プレキャストPC部材を想定したφ25供試体のようにある一定以上の体積表面積比を有する場合には蒸気養生後に乾燥を受けても長期強度は増進する。
- (3) 高炉スラグ微粉末8000を用いたコンクリートでは材齢7日においても発色の痕跡が残った。また、今回の実験条件では、蒸気養生後に散水養生を行った場合に微細ひび割れの発生が確認された。

【参考文献】

- 1) 国土交通省新技術情報提供システム：高炉スラグ微粉末6000cm²/gを用いた高耐久性PC構造物，NETIS登録No. QS-980177-V
- 2) 国土交通省新技術情報提供システム：環境に優しい高品質・高流動コンクリートを使用したプレキャストPC製品，NETIS登録No. CB-030101-A
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ編コンクリート橋編，pp. 332，2002. 3
- 4) 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. 6
- 5) 例えば，開発土木研究所材料研究室：高炉セメントを用いたコンクリート表面の青色斑点，開発土木研究月報No. 457，pp. 39-42，1991. 6
- 6) 阿波稔，大塚浩司，今野洋一：乾燥によりコンクリート表面に発生する微細ひび割れの性状，コンクリート工学年次論文集Vol. 15，No. 1，pp. 725-730，1995.



注) 写真は材齢7日で撮影したもの。

写真-1 1m角供試体の発色状況

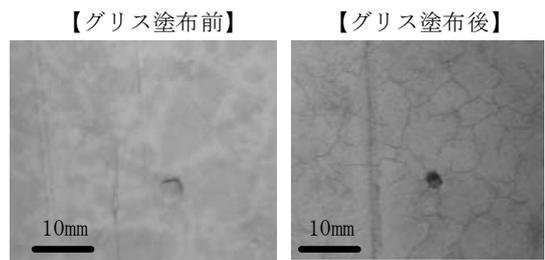


写真-2 微細ひび割れの発生状況