

高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物



所属名：(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会
(株)安部日鋼工業

発表者：堀尾 哲也

1. まえがき

プレストレスト・コンクリートは、鉄筋コンクリートに比べ水セメント比が小さく高強度であることやひび割れを制御できるなどの特性から耐久性に優れている。しかし、プレストレスト・コンクリート構造物が建設されてから50年以上経過し、沿岸部での塩害や、道路に散布される凍結防止剤に含まれる塩分による塩害などが報告されている。(図-1、参照)

このような状況において、耐久性に優れたプレストレスト・コンクリート構造物も、条件によっては劣化することが明らかとなっている。このような背景のもとで開発された、高耐久性、環境負荷低減効果、ライフサイクルコスト縮減に優れた高炉スラグ微粉末を用いたPC構造物について報告する。



図-1 塩分飛来概要図



写真-1 塩害事例 (プレテンション方式 P C T 桁)

2. 高炉スラグ微粉末とは

高炉スラグ微粉末は、高炉で銑鉄を製造する際に副産される高炉スラグを粒度調整粉末にしたものであり、表-1 に示すようにコンクリート用高炉スラグ微粉末 JIS A 6206 として規格化されている。

表-1 「コンクリート用高炉スラグ微粉末 JIS A 6206」規格値と実績事例

種類	比表面積 cm^2/g	活性度指数 (%)		
		材齢7日	材齢28日	材齢91日
高炉スラグ微粉末4000	3000 ~ 5000 (4320)	55(68)	75(101)	95(117)
高炉スラグ微粉末6000	5000 ~ 7000 (6160)	75(88)	95(111)	105(120)
高炉スラグ微粉末8000	7000 ~ 10000 (8310)	95(107)	105(128)	105(130)

注：()内は実績値を示す。

3. 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物の概要

高炉セメントは歴史ある材料であり、海洋構造物やダムなどに多く使用され、塩害やアルカリ骨材等に対して耐久性が高いことは知られている。しかし、高炉セメントは初期強度発現性が小さいため、若材齢時に高強度を必要とするPC構造物には適用が困難であった。この問題を解決すべく、高炉セメントの優れた耐久性を確保しつつ初期強度発現性を改善することを目的として、PC構造物で通常用いられている早強ポルトランドセメントと、初期強度発現性が期待される比表面積 6000cm²/g の高炉スラグ微粉末の組み合わせによる研究がなされた。その結果、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 を 50% ずつ配合する（図-2 参照）ことで、従来と同等の価格で、耐久性と初期強度発現性に優れたコンクリート（図-3 参照）が実現された。また、高炉セメントでは問題となる場合がある中性化について、高強度コンクリートであるため問題とならないことも確認されている。

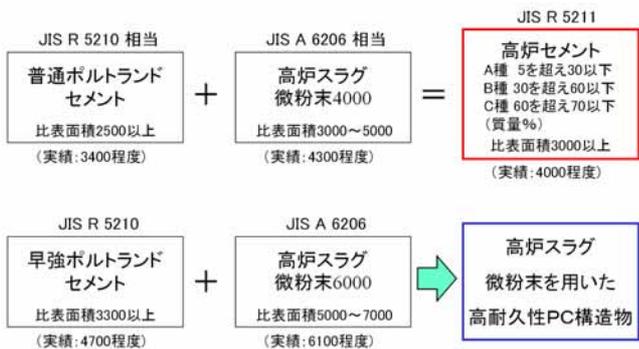


図-2 高炉セメントと高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物の違い

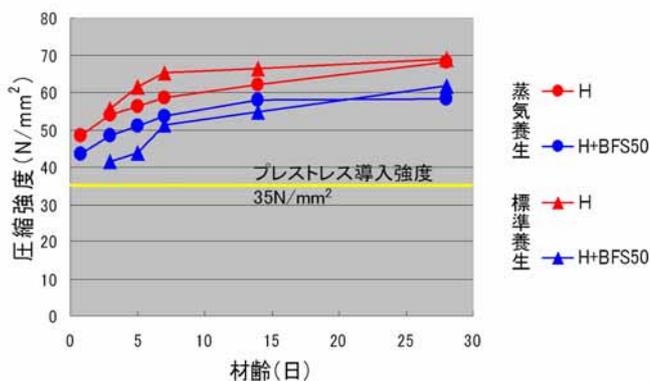


図-3 圧縮強度

4. 塩害に対する耐久性

沿岸部では飛来塩分により外部から塩化物イオンが供給される。この塩化物イオンが、コンクリート内部の鋼材位置まで侵入すると、鋼材は腐食しやすい状態となる。比表面積 6000cm²/g の高炉スラグ微粉末を配合することで、コンクリートを緻密にし、外部からの酸素や水の供給も抑えられ鋼材の腐食を抑制することができる。その例として、写真-2 に沖縄県の沿岸部に5年間暴露された供試体の塩化物イオン浸透状況を示す。写真-2 は角柱供試体の断面の分析結果であり、左側が早強ポルトランドセメントのみの配合で右側が高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物である。白っぽい部分が塩化物イオンの浸透を示しており、両者を比較すると高炉スラグ微粉末を用いた右側が塩化物イオンの浸透を抑制していることが分かる。

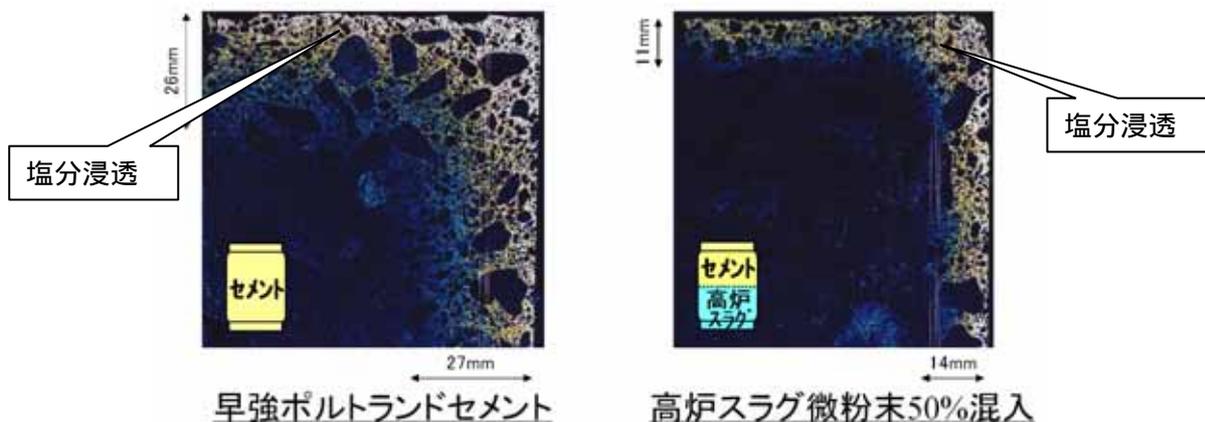


写真-2 暴露試験供試体（5年間）の塩分浸透

5. 凍結防止剤に対する優位性

塩化カルシウムやアセテート系の凍結防止剤がコンクリートに侵入すると、コンクリート硬化体中の水酸化カルシウムが容脱し、コンクリートを劣化させる。高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物は、高炉スラグ微粉末の効果により、水酸化カルシウムの量が少なく緻密な状態であることから、劣化しにくい。

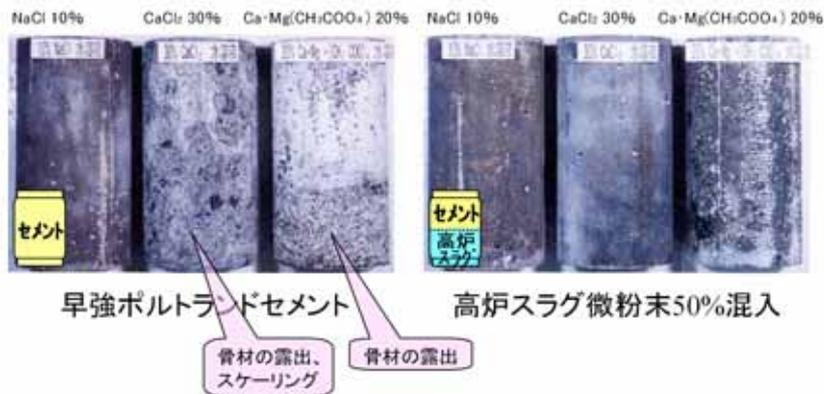


写真-3 凍結防止剤水溶液に1年間浸漬した結果（外観）（蒸気養生）

凍結防止剤溶液を用いた浸漬

試験の例を写真-3に示す。左側の3本が早強ポルトランドセメントのみの配合で右側の3本が高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物である。それぞれ左から塩化ナトリウム10%水溶液、塩化カルシウム30%水溶液およびカルシウムマグネシウムアセテート20%水溶液に1年間浸漬したものである。早強ポルトランドセメントのみの配合は表面のペースト分が剥離し、骨材が露出している。一方、高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物は溶液の析出物が見られるものの骨材の露出などはなく、凍結防止剤による劣化に対して優れていることが分かる。

6. アルカリ骨材反応の抑制効果

高炉スラグ微粉末がアルカリ骨材反応抑制効果を有することは知られている。高炉スラグ微粉末のPC構造物に対するアルカリ骨材反応抑制効果を検証する目的で各種の実験が行われており、その中で現在実施中のPC梁試験体を用いた暴露試験について紹介する。

PC梁試験体には、顕著な反応を示すことが確認された反応性骨材を粗骨



写真-4 そり上がり状況

材、細骨材の両方に用いた。さらに反応を早期に生じさせるために、塩化ナトリウムを用いて、コンクリートにアルカリ分を大量に練り込まれた。この条件で早強ポルトランドセメントのみの場合と高炉スラグ微粉末6000を置換率50%で混和した場合とを比較している。写真-4にPC梁試験体の変形状況を示す。写真撮影時期は暴露試験開始後6ヶ月ごろである。左の早強ポルトランドセメント単味の試験体はアルカリ骨材反応による膨張により20mm以上のそり上がりを生じているが、高炉スラグ微粉末を用いた試験体は5mm程度のそり量であり、一般の構造計算より得られる設計値と同等である。また、早強ポルトランドセメント単味の試験体は、計測位置によっては0.3%以上の膨張率を示しているのに対して、高炉スラグ微粉末を用いた試験体は、膨張を生じていない。このように顕著な反応を有する反応性骨材にアルカリを大量に添加するという一般環境では考えられない過酷な条件であるにもかかわらず、高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物はアルカリ骨材反応を抑制している。

7. 環境負荷低減効果

高炉スラグ微粉末は、製鉄所で副産される高炉スラグを原料としており、セメントのように製造工程で大量のエネルギーを使うことがない。これを早強ポルトランドセメントの50%に置換するため、コンクリート材料としての二酸化炭素排出量が大幅に低減される。また、セメントの使用量が減少することでセメントの原料である石灰石の使用量も同時に削減できるため、天然資源の保護にも有効である。図-4は、ポストテンション方式PC3径間単純セグメントT桁橋(橋長92.56m,有効幅員9.5m,主桁5本/径間)をモデルとし、CO₂の排出量を算定したグラフである。高炉スラグ微粉末を採用することにより、59,628kgの二酸化炭素を削減する。これは、53,000m²の山林に相当し、東京ドームの建築面積(46,755m²)より広くなる。

高炉スラグは、環境負荷の低減に役立つ製品「環境物品」を用いることになるとともに、グリーン購入法が目的とする環境負荷の少ない持続可能な社会の構築を図ることに貢献できる。

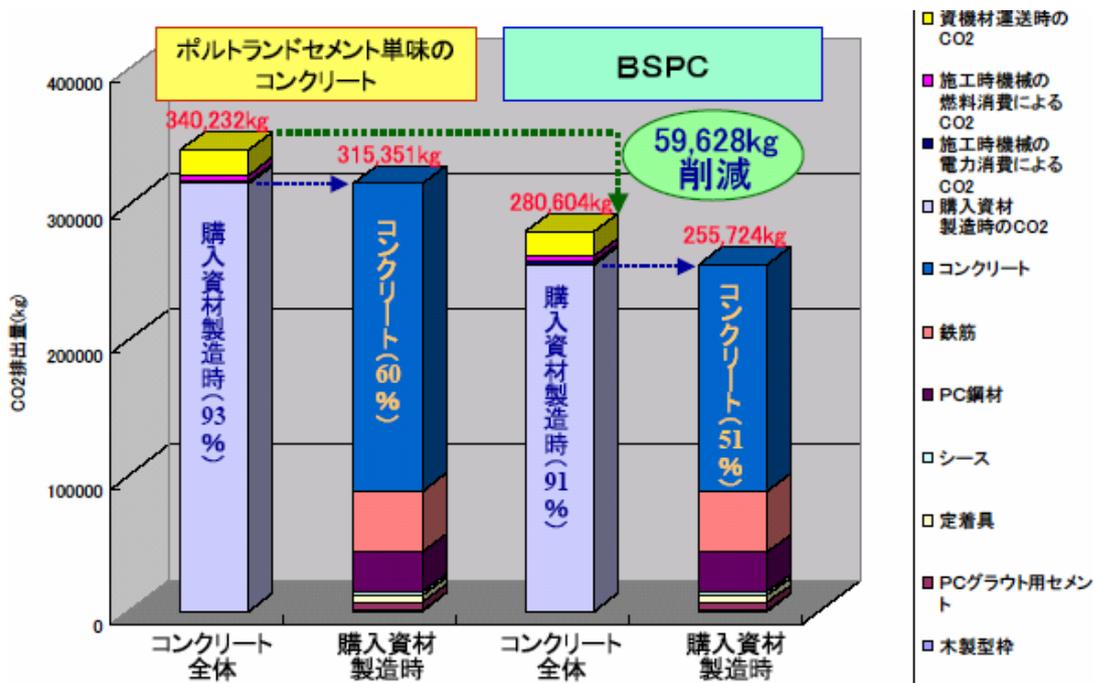


図-4 CO₂排出量

8. ライフサイクルコスト縮減

耐久性が高い構造物を建設することでこれによる社会資本の寿命が長くなり、ライフサイクルの観点から資源消費や廃棄物の排出を抑制することができる。図-5に、ライフサイクルコスト比較の1つの例を示す。この例によると、ライフサイクルコストが大きく縮減される。

橋梁概要

	PC橋	鋼桁
橋長	30.8m	30.8m
総幅員	11.5m	11.5m
構造形式	ポストテンション方式PC単純T桁	鋼単純非合成I桁
環境条件	海岸部	海岸部

表-1 比較対称 橋梁概要

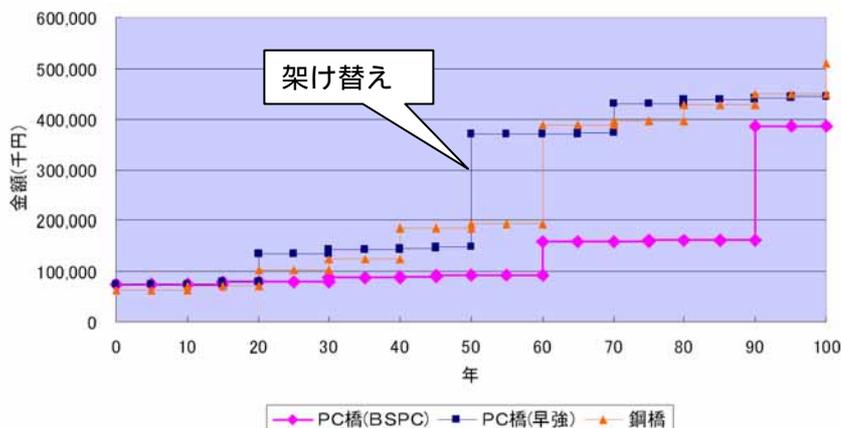


図-5 ライフサイクルコスト比較

9. 施工実績

平成 10 年に初めて高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 P C 構造物が橋梁上部工として施工されて以来、約 170 件の施工実績がある。高炉スラグ微粉末が採用された理由は沿岸部の飛来塩分や凍結防止剤による塩害対策などに加え、アルカリ骨材反応抑制などの耐久性向上、そして環境負荷低減などである。高炉スラグ微粉末が作用された構造物は橋梁上部工がほとんどであるが、最近では港湾関係に用いる矢板への採用も報告されている。図-6 は分布図を示す。着色部が分布を示し、鳥取県内では、橋梁 2 件、橋梁以外 1 件採用されている。

高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物分布図
(H18.5現在施工実績 橋梁:156件 橋梁以外:13件)

注：着色部は分布を示す。

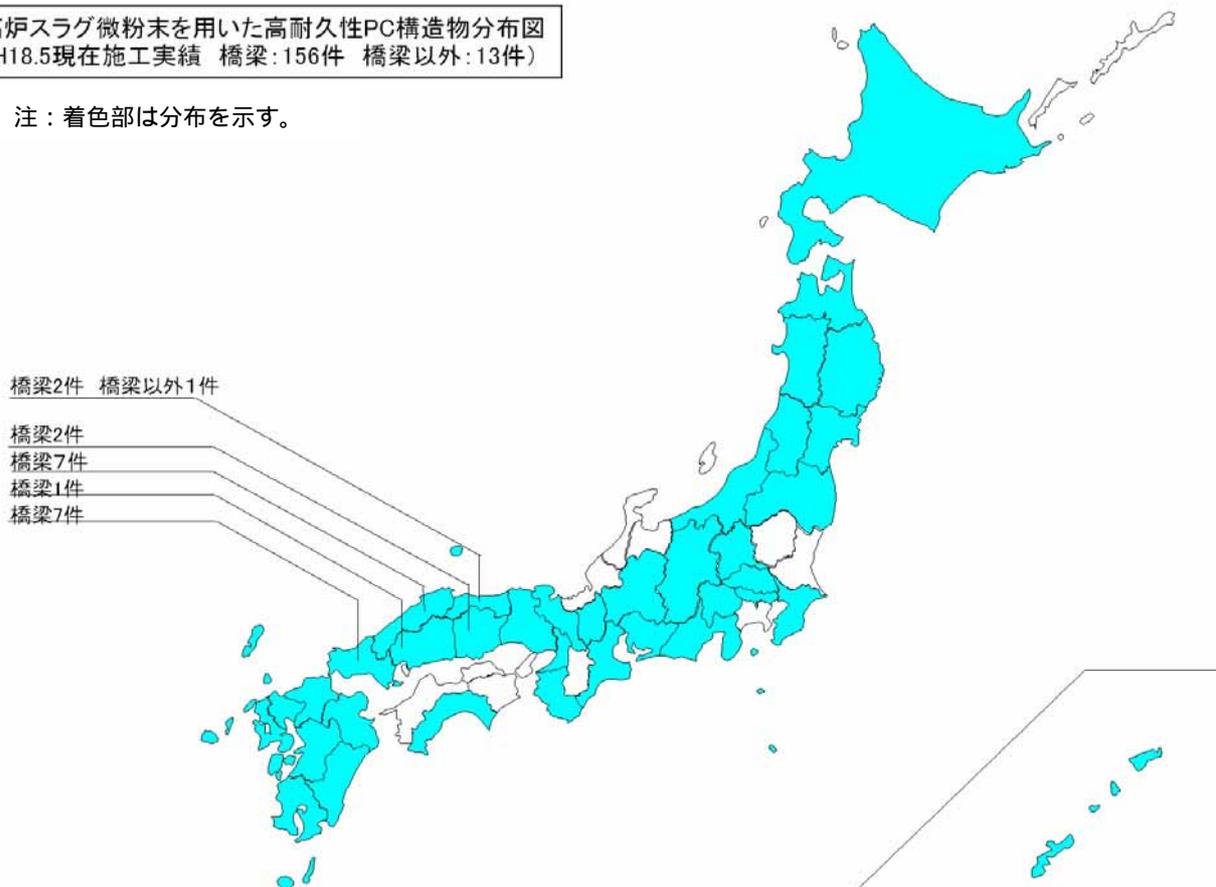


図-6 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物分布図 (平成 18 年 5 月現在)

10. おわりに

高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物は、塩害や凍結防止剤に対する耐久性、アルカリ骨材反応の抑制効果、環境負荷低減効果に優れていることに加えライフサイクルコストが縮減されるなど、優れた特徴を有している。

耐久性に優れた社会資本の整備として、今回の報告が高耐久性 P C 構造物の採用拡大の資料となれば幸いである。