

低炭素型セメント結合材の活用による コンクリート構造物の耐久性向上

(国研) 土木研究所
先端材料資源研究センター
古賀裕久

目次

1. 低炭素型セメント結合材とは
2. 低炭素型のコンクリートの特性
3. 技術基準等の対応

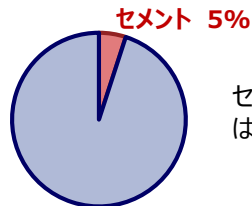
低炭素型セメント結合材とは

- 混和材（高炉スラグ微粉末，フライアッシュ等）を従来よりも多量に使用した結合材
- コンクリートの製造に関連するCO₂排出量の削減が可能

低炭素型セメント結合材

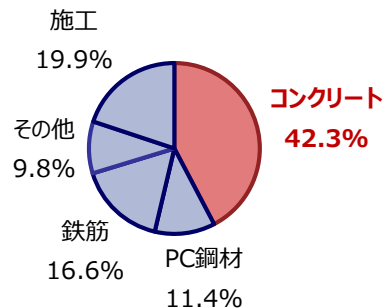


ポルトランドセメント 高炉スラグ微粉末 フライアッシュ



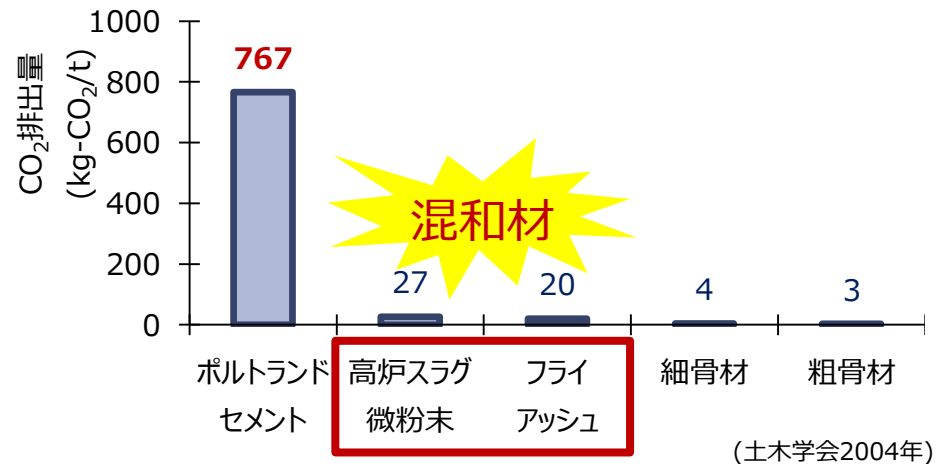
セメント製造時のCO₂排出量は、世界の排出量の約5%

セメント製造部門のCO₂排出量の割合
(IPCC Report 2007年)



材料に起因するCO₂排出量が多い

PC上部工建設時のCO₂排出割合
(コンクリート工学2010年9月号)



各材料の製造時のCO₂排出量

(土木学会2004年)

低炭素型セメント結合材を使用したコンクリート

部材の種類	想定する範囲
・プレストレストコンクリート	早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換
・鉄筋コンクリート ・無筋コンクリート	高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等を含めた混和材の置換率を高炉セメントC種の上限值以上（70%以上）

従来のセメント

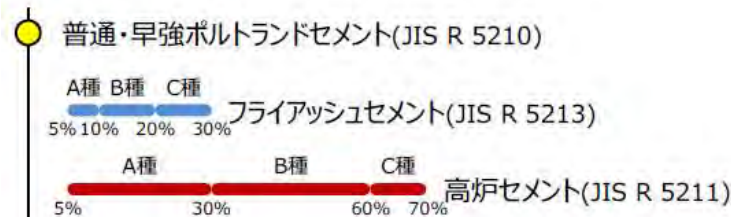
ポルトランドセメント 100%

VS.

低炭素型セメント結合材

ポルトランド
セメント

混和材



低炭素型セメント結合材

- ・プレストレストコンクリート：
早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリート
- ・鉄筋コンクリート・無筋コンクリート：
混和材の置換率を高炉セメントC種の上限值以上(70%以上)としたコンクリート

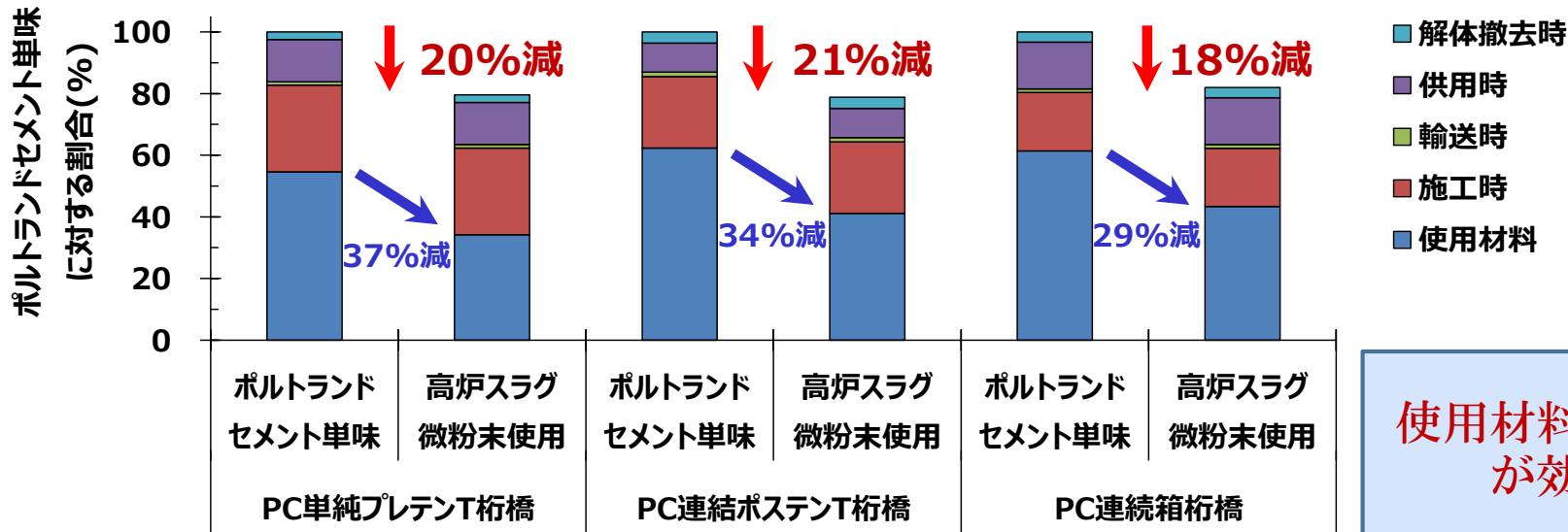
混和材の置換率：高
二酸化炭素の排出削減効果：大

※百分率は混合セメントの混和材の置換率を表示

二酸化炭素排出削減効果の試算例

- プレストレストコンクリート道路橋で、ライフサイクルを通じたCO₂排出量を約2割削減可能

No.	上部構造	下部構造
1	PC単純プレテント桁橋	早強セメント単味 VS 普通セメント単味
2	PC連結ポステント桁橋	直接基礎 橋脚高10m VS 高炉スラグ微粉末 50%混合
3	PC連続箱桁橋	高炉スラグ微粉末 70%混合



使用材料での対策が効果大

低炭素型セメント結合材の特長と課題

- **特長**

- CO₂排出量の削減
- 産業副産物の有効利用
- コンクリートの品質向上
(塩分浸透, ASR抑制, 長期強度, 温度上昇量, etc.)

- **課題**

- 従来品と大幅に異なるコンクリートを使用可か？
- 既存の試験／設計／施工方法で対応が可能か？
- コンクリートの品質低下？
(中性化抵抗性, 初期強度, 養生期間延長, etc.)

既存の技術基準では想定されていない新材料をどう使っていくか

既往の規・基準類における課題

道路橋示方書 Ⅲ編 コンクリート橋編 (日本道路協会) H24

- 上部構造に使用するコンクリート材料は、JIS規格に適合するものを用いることを標準とする
- 高炉セメントについては、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ため、原則としてコンクリート橋の上部構造の材料としては使用しない

コンクリート標準示方書 (土木学会)

- セメント及び混和材はJISに適合するものを用いるのが標準
ただし、養生日数など施工方法の規定は混合セメントB種相当まで



- 混和材を高含有したコンクリートでの対応方法？
- 普通セメント以外のセメントと混和材を組み合わせたコンクリートでの対応方法？
- 3種類以上の混和材を同時に用いたコンクリートでの対応方法？

土木研究所の研究状況

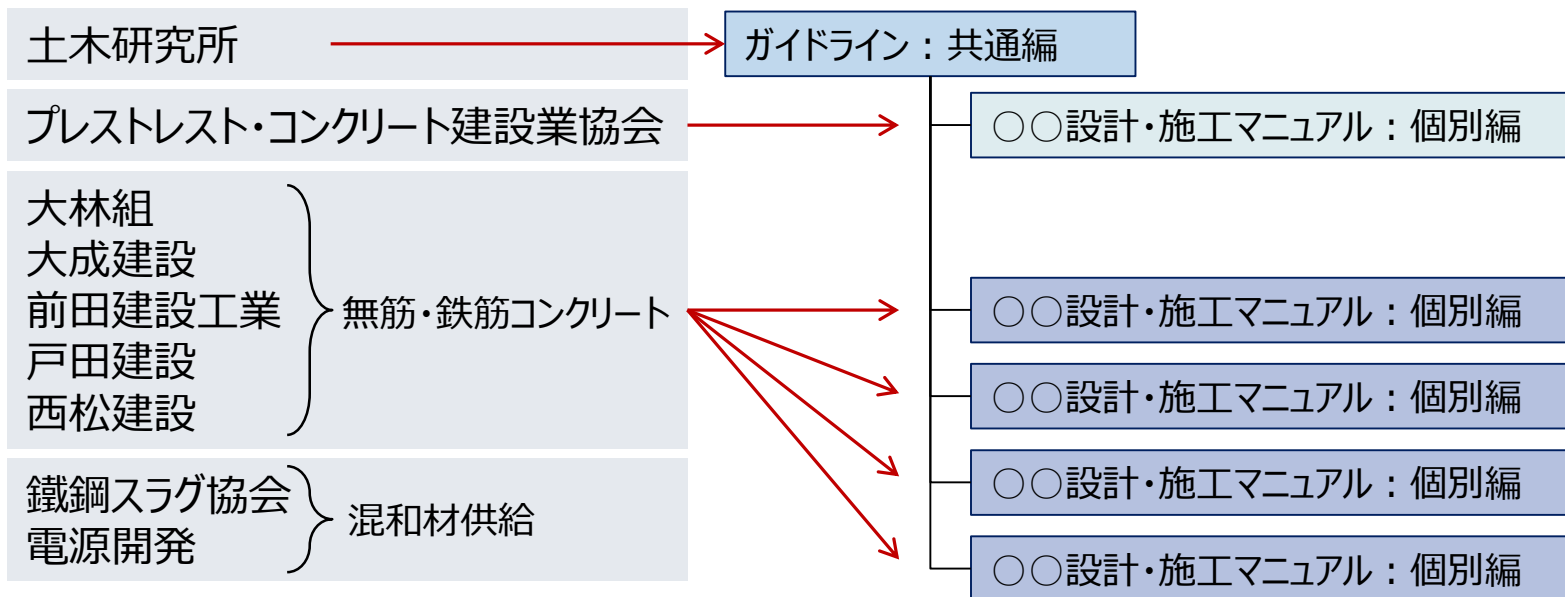
- 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究
(H23～H27)
- 新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上
方法の構築に関する共同研究 (H29～R2)

低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究（H23～H27）

目的: 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン(案) および、個別の構造や配合に特化した設計・施工マニュアル(案)の提案

期間: 2011年度～2015年度（5年間）

参加機関:



ガイドラインとマニュアルの構成

共同研究報告書 第471号 (全9機関)

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン (案)

→ **共通編：低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則を規定**

共同研究報告書 第472号 (土研+PC建協)

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル (案)

早強セメントの一部を混和材で置換したコンクリートを用いたプレストレストコンクリート橋の設計施工方法

共同研究報告書 第473号 (土研+大林組)

混和材を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

セメントの70~90%を1~4種類の混和材で置換した低炭素型のコンクリートの設計施工方法

共同研究報告書 第474号 (土研+大成建設+前田建設工業)

多成分からなる結合材を用いた低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

セメントの75%あるいは90%を2~3種類の混和材で置換した低炭素型のコンクリートの設計施工方法

共同研究報告書 第475号 (土研+戸田建設+西松建設)

高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

セメントの70~90%を高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型のコンクリートの設計施工方法

共同研究報告書 第476号 (土研+大成建設)

高炉スラグ微粉末を結合材とした低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

セメントの使用量を“ゼロ”として高炉スラグ微粉末と刺激材を用いた低炭素型のコンクリートの設計施工方法

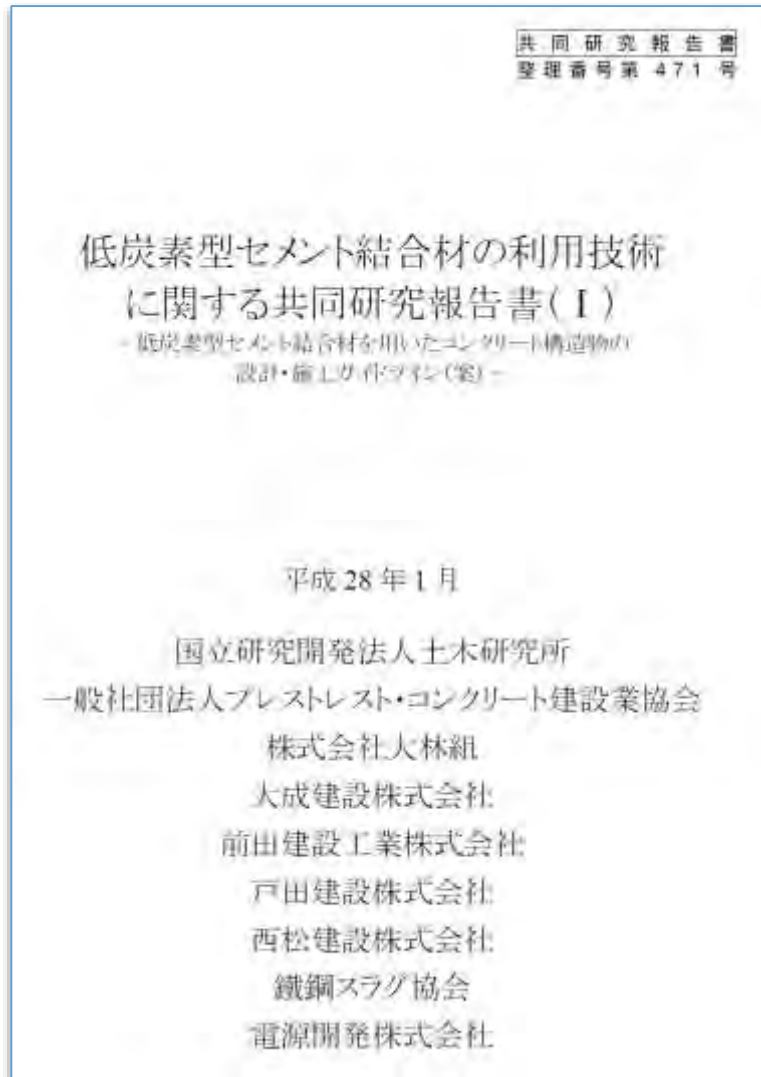
→ **個別編：構造物の種別や配合ごとに5種類の低炭素型のコンクリートの設計及び施工の方法を規定**

他に、共同研究報告書 第487号
フライアッシュに関する試験結果

※2016年1月発刊

※土木研究所ホームページでダウンロード可

ガイドラインの構成



- 1章 総則
- 2章 低炭素型セメント結合材を用いた
コンクリートの品質
- 3章 材料
- 4章 配合
- 5章 設計
- 6章 製造及び施工
- 7章 品質管理
- 8章 検査
- 9章 記録
- 付録資料 (実験及び解析の結果)

品質において特に着目した事項

ワーカビリティ

- ・フレッシュコンクリートの特性，経時変化に対する配慮

強度

- ・湿潤養生期間の影響，温度の影響

クリープ・収縮

- ・プレストレストコンクリートへの適用

耐久性

- ・中性化に対する抵抗性
- ・塩化物イオン浸透に対する抵抗性
- ・凍結融解に対する抵抗性
- ・化学的侵食，アルカリシリカ反応，長期的な安定性

ひび割れ抵抗性

- ・若材齢時の温度変化，自己収縮ひずみに起因するひび割れ

環境負荷低減効果

- ・二酸化炭素排出削減効果

検討例1：暴露試験による耐久性の評価

国内3ヶ所に暴露



新潟

14.8°C
77.3%RH
4,830mm



沖縄

23.3°C
75.5%RH
4,085mm



つくば(屋外)

15.5°C
72.9%RH
2,580mm



つくば(室内)

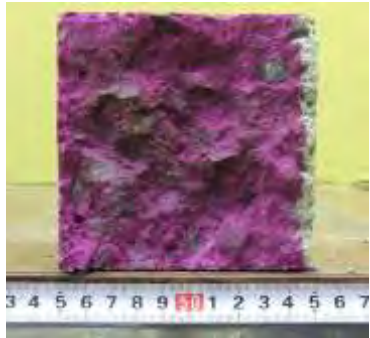
23.9°C
41.8%RH
0.051%CO₂

※大気中CO₂濃度 = 0.039%
(気象庁HP)

暴露期間	2, 4, 10, 20年 (2012.2開始)
配合	26種類
ベースセメント	普通(RC配合), 早強(PC配合)
高炉スラグ 微粉末	普通ベース 50, 70, 85% (4000) 早強ベース 30, 50, 70% (4000, 6000)
フライアッシュ	普通ベース 20, 30, 40% (Ⅱ種) 早強ベース 10, 20, 30% (Ⅱ種)
水結合材比	普通ベース: 35, 50%, 早強ベース: 40%

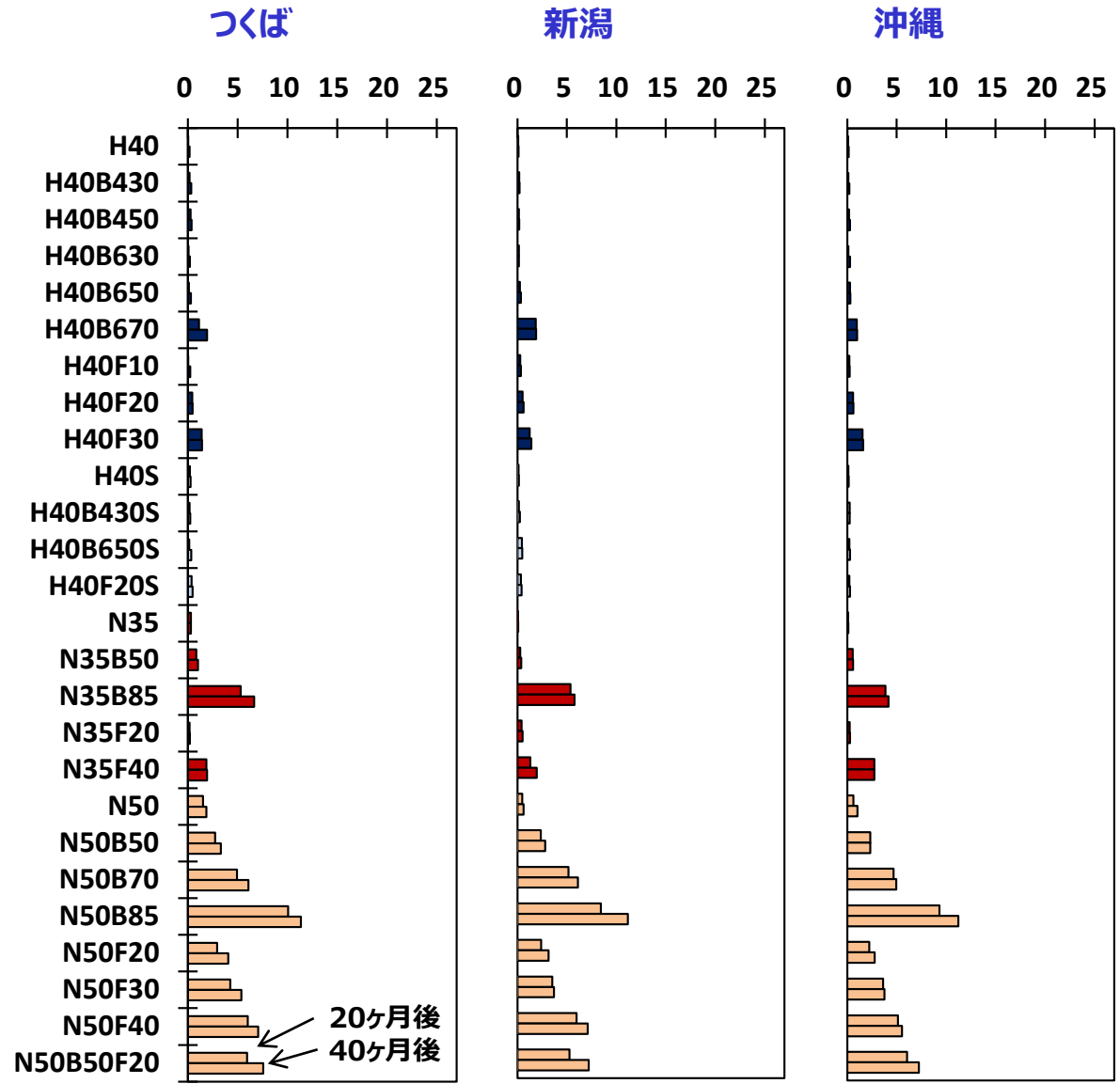
中性化

暴露後の中性化深さ



Note:

- H : 早強ポルトランドセメント
- N : 普通ポルトランドセメント
- B, B4 : 高炉スラグ微粉末4000
- B6 : 高炉スラグ微粉末6000
- F : フライアッシュⅡ種



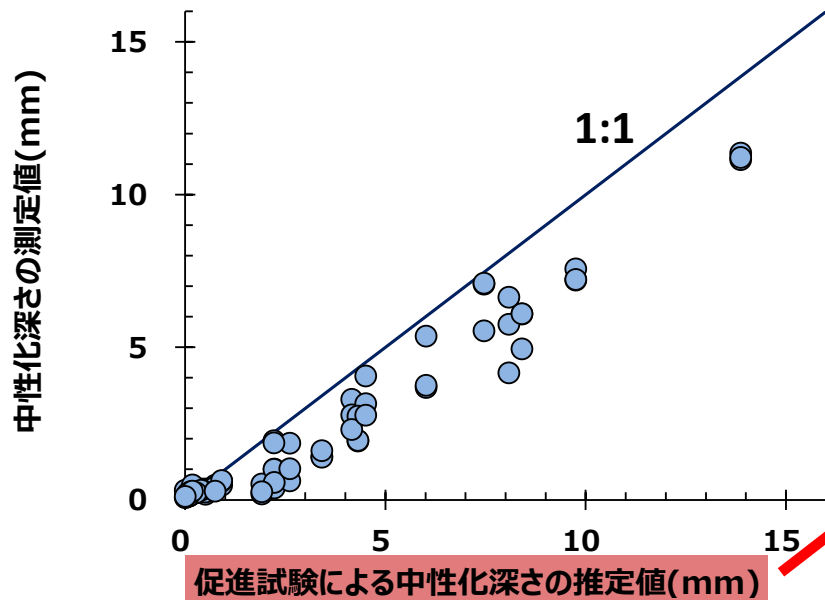
中性化深さの推定

促進中性化試験 (JIS A 1153)

$5 \pm 0.5\% \text{CO}_2$, $20 \pm 2^\circ \text{C}$, $60 \pm 5\% \text{RH}$



中性化深さの測定値と推定値



中性化深さの推定値

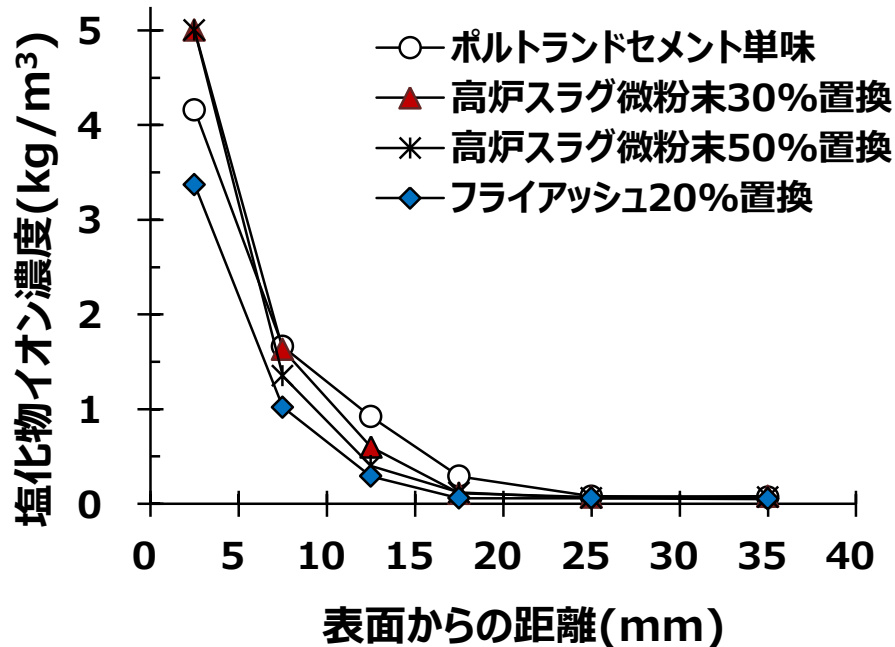
$$C = A_{\text{ACT}} \sqrt{\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_{2\text{ACT}}}} \sqrt{t} \rightarrow \text{暴露期間}$$

促進試験による中性化速度係数 \rightarrow A_{ACT}
 実環境 $\approx 0.04\%$ \rightarrow CO_2
 促進試験 = 5% \rightarrow $\text{CO}_{2\text{ACT}}$

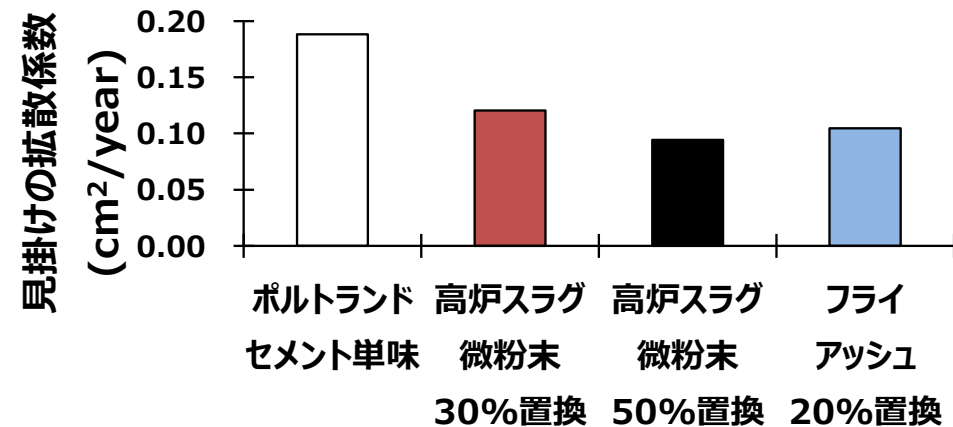
塩化物イオン浸透

中性化深さの小さい供試体：W/B=40%

塩化物イオン浸透量



塩化物イオンの見掛けの拡散係数



$$C(x, t) = \left((C_0 - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right] \right)$$



見掛けの拡散係数

検討例2：クリープ

持続载荷試験

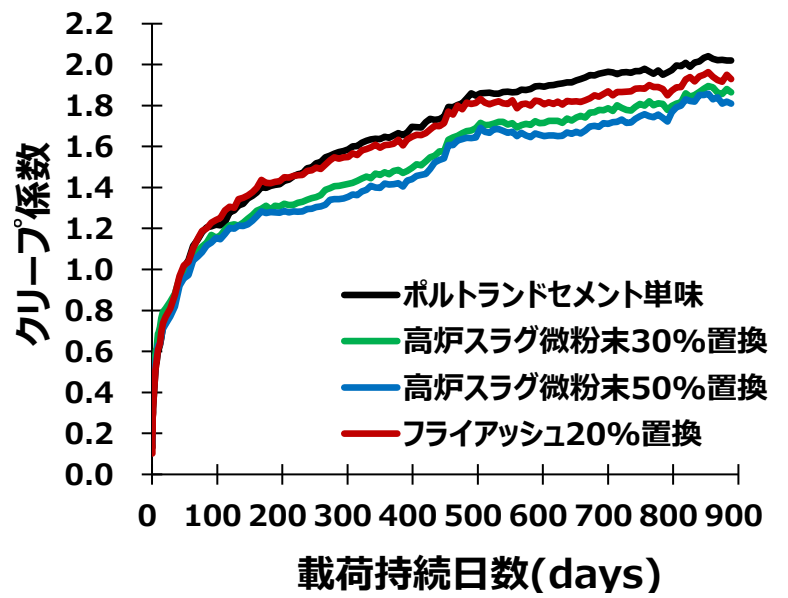


载荷開始材齡: 3, 7, 28, 365日
 载荷荷重: $0.2 f'_c$ (载荷開始材齡3日)
 $0.3 f'_c$ (载荷開始材齡7, 28, 365日)
 W/B: 40% (ポルトランドセメント単味)
 35% (混和材使用)
 ※材齡3日の圧縮強度を同等とするためW/Bを調整

载荷開始材齡3日のクリープ係数

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{sh} - \varepsilon_i}{\sigma_c E_{28}}$$

ε_c : 圧縮力を負荷した供試体のひずみ
 ε_{sh} : 同形状・同条件で製作した圧縮力を負荷していない供試体の収縮ひずみ
 ε_i : 载荷時の弾性ひずみ
 σ_c : 圧縮応力度
 E_{28} : 材齡28日まで水中養生した円柱供試体の静弾性係数



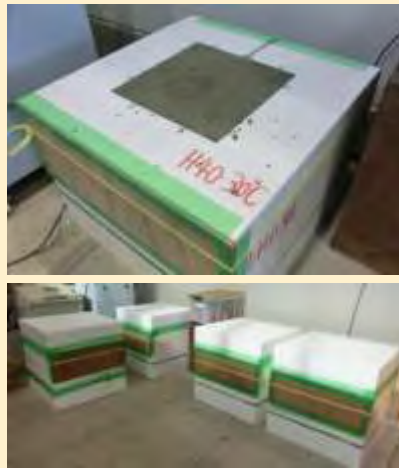
検討例3：乾燥収縮・自己収縮

長さ変化試験



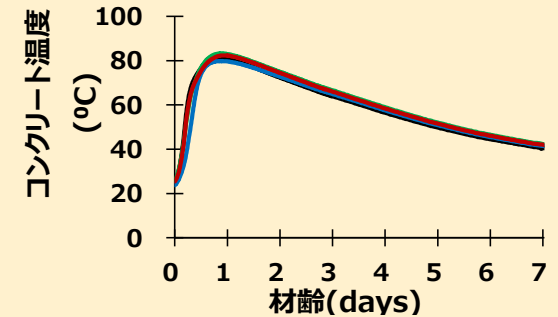
JIS A 1129-3
 20 ± 2 °C, 60 ± 5 %RH
 $100 \times 100 \times 400$ mm

自己収縮試験



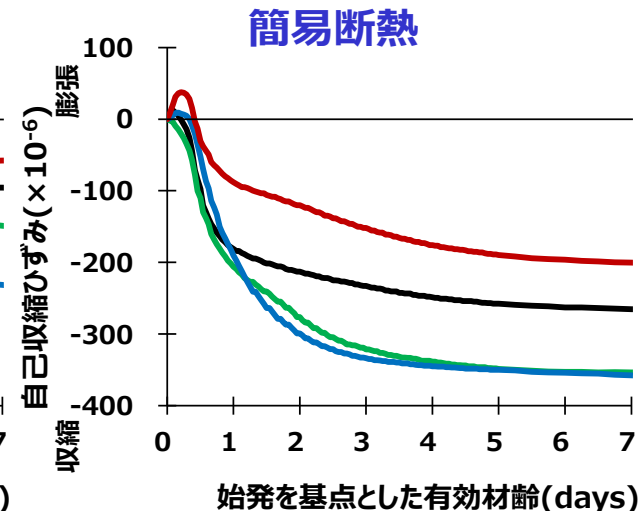
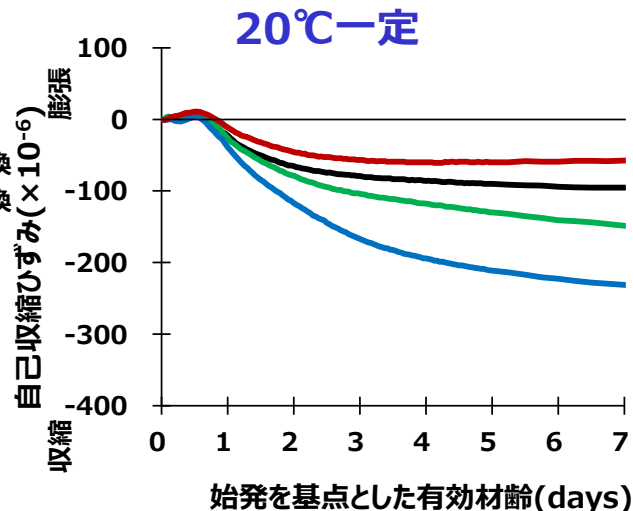
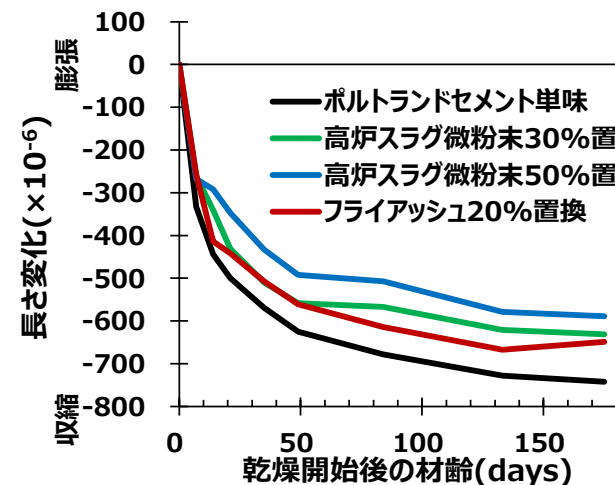
簡易断熱 (マスコンクリート模擬)

立方体 $400 \times 400 \times 400$ mm



20°C一定 (JCI試験法)

角柱 $100 \times 100 \times 400$ mm



低炭素型のコンクリート（PC配合）特性

- H23～H27検討，代表的な配合
 - 高炉スラグ微粉末4000，置換率30%
 - 高炉スラグ微粉末6000，置換率50%
 - フライアッシュ，置換率20%※水結合材比35～40%（少し低くする）
- 養生期間は従来同様
- 中性化速度（促進環境）は無置換の場合より大きい，水結合材比が小さいため十分な抵抗性を有す
- 塩分侵入抵抗性が向上
- クリープ・乾燥収縮等は，従来と同様な特性値を用いることが可能
- 温度ひび割れが懸念される場合は，温度応力解析の結果等に基づき，温度ひび割れに対する抵抗性を評価

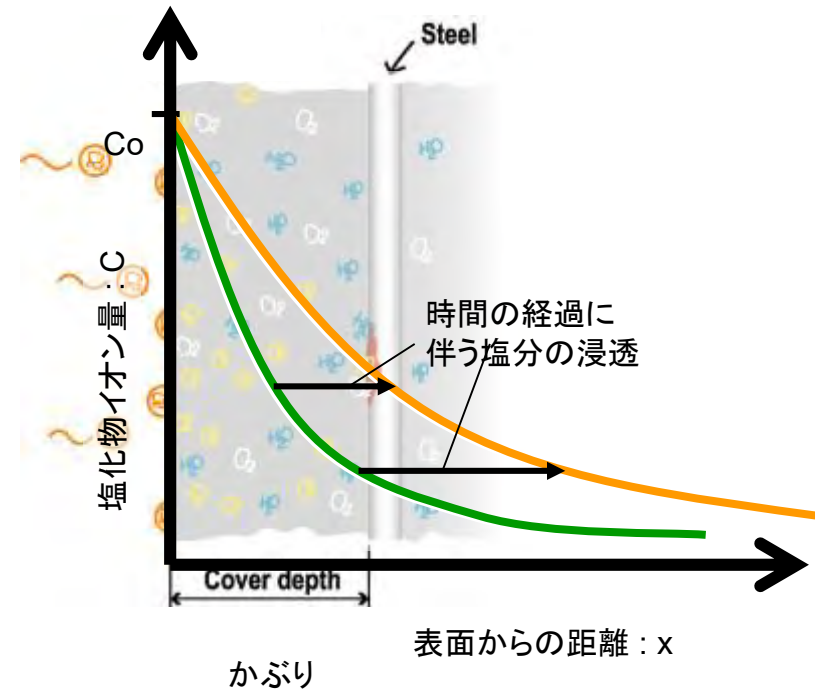
新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築に関する共同研究

- プレストレストコンクリートを想定した配合について
継続検討
 - 水結合材比が小さいと，中性化は顕著でない
- **塩分侵入に対する抵抗性**の高さを定量的に評価
- **プレキャスト部材・製品**は，硬化した状態で出荷されるため，高い品質を確認した上で活用可能

塩分浸透抵抗性の向上

- 一般的な塩害のメカニズム
 - 拡散現象により，塩分が侵入
 - 緻密なコンクリートでは拡散を遅くできる
(拡散係数が小さい)
→いずれ侵入

- 極めて緻密なコンクリートでは，内部の水隙が少なく，塩分の侵入が停止する可能性

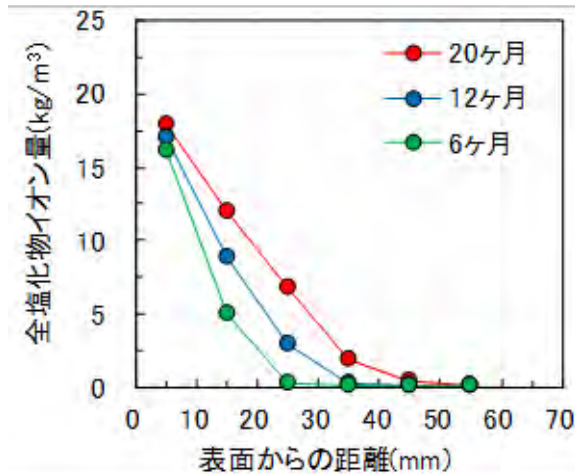


拡散による塩分侵入のイメージ

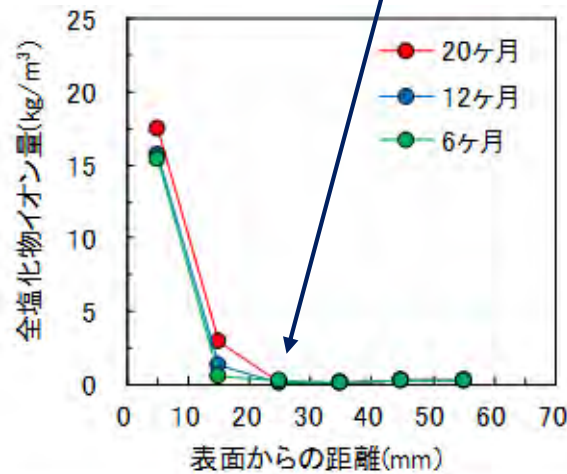
室内試験の結果

- 10%の塩水に長期間浸せき
- 最長20ヶ月

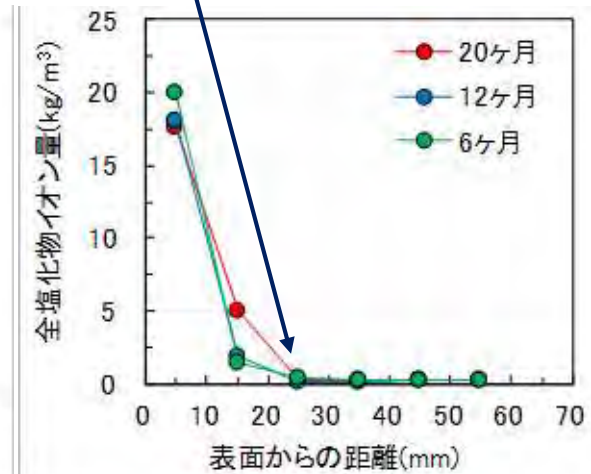
表面から20mmより深い位置には、
ほとんど拡散していない



早強セメント単味
水結合材比：40%



高炉スラグ微粉末で
50%置換
水結合材比：35%

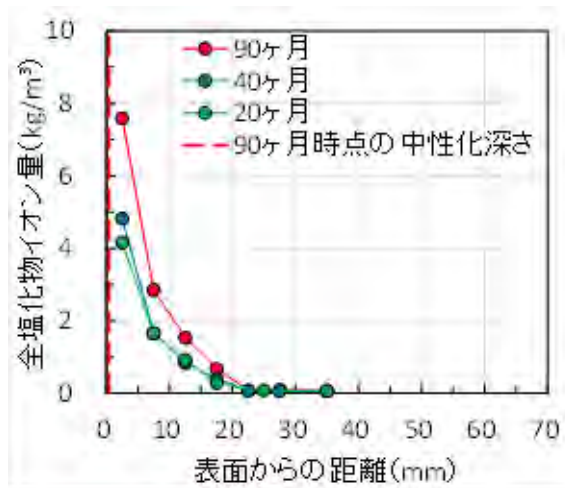


フライアッシュで
20%置換
水結合材比：35%

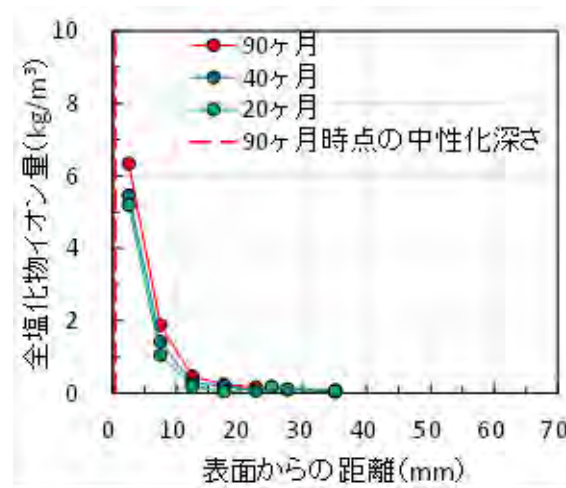
初期材齢での強度が同程度

塩害地域での暴露試験結果

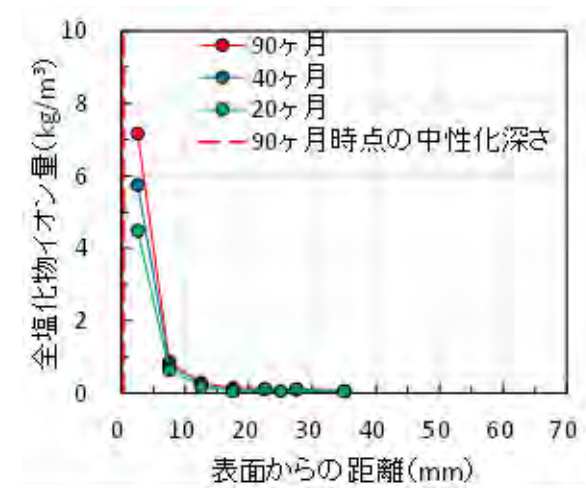
- 沖縄県沿岸
- 最長90ヶ月（継続中）



早強セメント単味
水結合材比：40%




高炉スラグ微粉末で
50%置換
水結合材比：35%



フライアッシュで
20%置換
水結合材比：35%

初期材齢での強度が同程度

技術基準等の対応（道路橋示方書）

- 平成24年 III編 20章 施工 20.4 材料
20.4.2 コンクリート（解説）
 - 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ため、原則としてコンクリート橋の上部構造の材料としては使用しないこととする。
- 
- 平成29年 III編 17章 施工 17.6 材料
17.6.2 コンクリート（解説）
 - 普通ポルトランドセメント及び早強ポルトランドセメント以外のセメントをコンクリート橋の上部構造に用いる場合には、クリープや収縮等コンクリートの種々の特性について確認する必要がある。なお、I編に示されていない材料でも、クリープや収縮等コンクリートの種々の特性について確認されたもの、多くの実績を持つものについては、その取扱いに十分注意し、使用してもよい。

技術基準等の対応（コンクリート道路橋設計便覧）

● 設計便覧 2.4 材料の選定

2.4.2 コンクリート

- 混和材の効果を一般論として記載
- 検討事例として、**低炭素型セメント結合材の共同研究報告書（プレストレストコンクリート部分）**を紹介
 - 早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000, 50%を高炉スラグ微粉末6000, あるいは, 20%をフライアッシュII種で置換したコンクリートでは, 水結合材比を低減した場合
 - 圧縮強度とヤング係数の関係は従来と同様
 - クリープ, 乾燥収縮は従来の式を用いることができる
 - 塩化物イオンの侵入が抑制される
 - 水結合材比40%以下とした場合, 中性化の進行は極めて遅い

これらの観点で, 道示への適合性が検証されている

まとめ

1. 材料の低炭素化は、CO₂排出抑制に効果的
2. 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの評価方法を共同研究報告書（471～476号）にとりまとめた
3. 低炭素型セメントを用いたPC用のコンクリートは、塩害に対し極めて高い抵抗性を有す
4. 新しい材料の技術基準への適合性を検討した事例

ガイドラインは、iMaRRC HPから無料でダウンロード：

<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/research/tech-info.html>