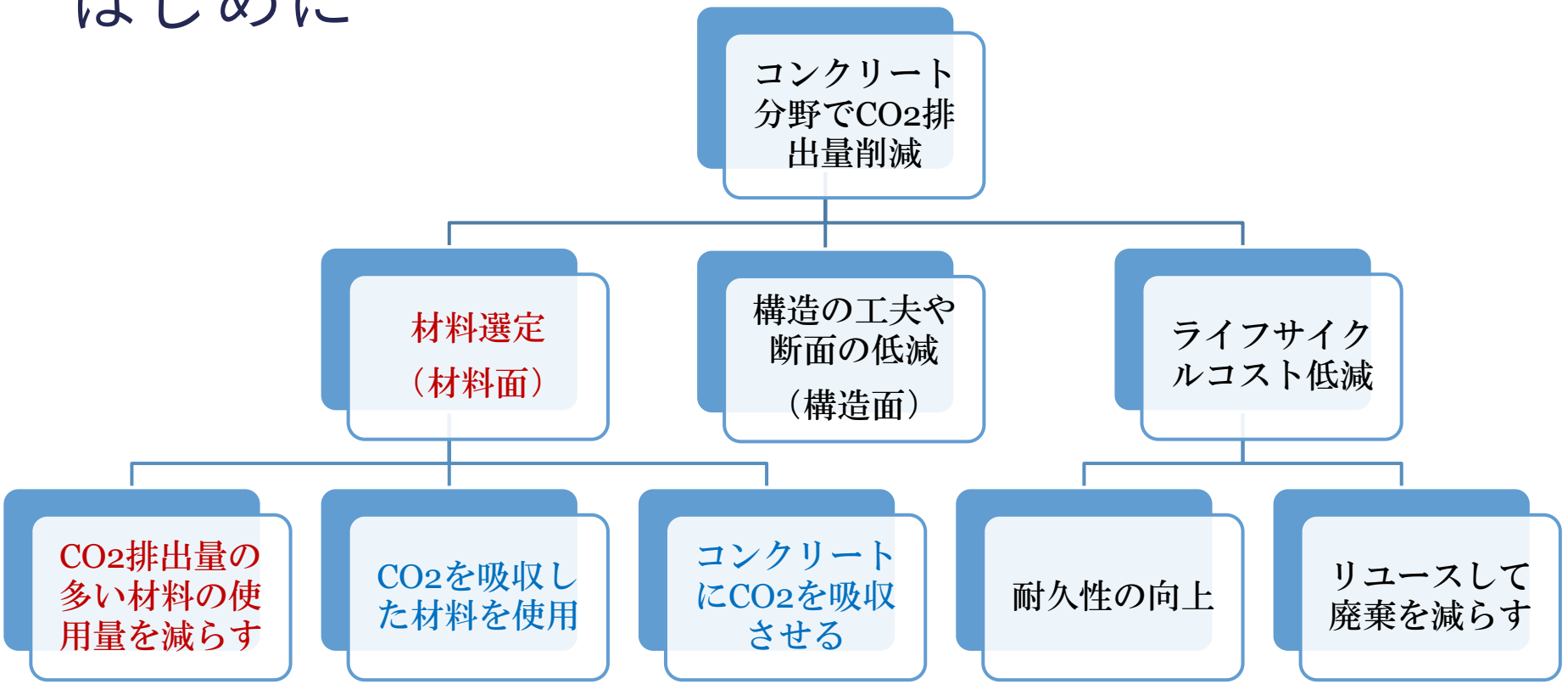
低炭素型セメント結合材を用いた コンクリート構造物の設計・施工ガイドライン

（国研）土木研究所
先端材料資源研究センター
櫻庭　浩樹

はじめに

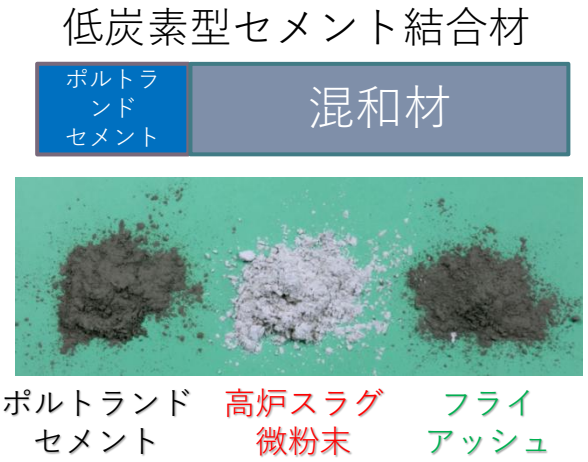


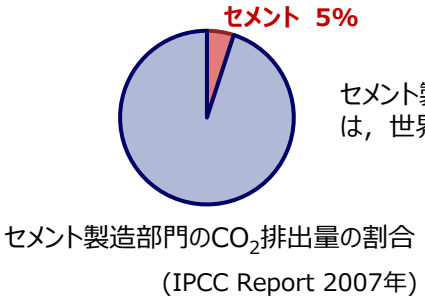
2030年ごろの実用化を目指して様々な開発が加速
これから実証が必要な段階

今日の話はココ（すでに実証されている）

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CO_2排出量の削減が可能



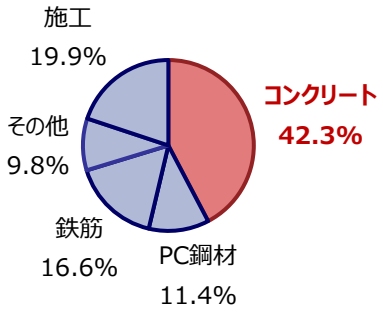


セメント製造時のCO_2排出量は，世界の排出量の約5%

セメント製造部門のCO_2排出量の割合

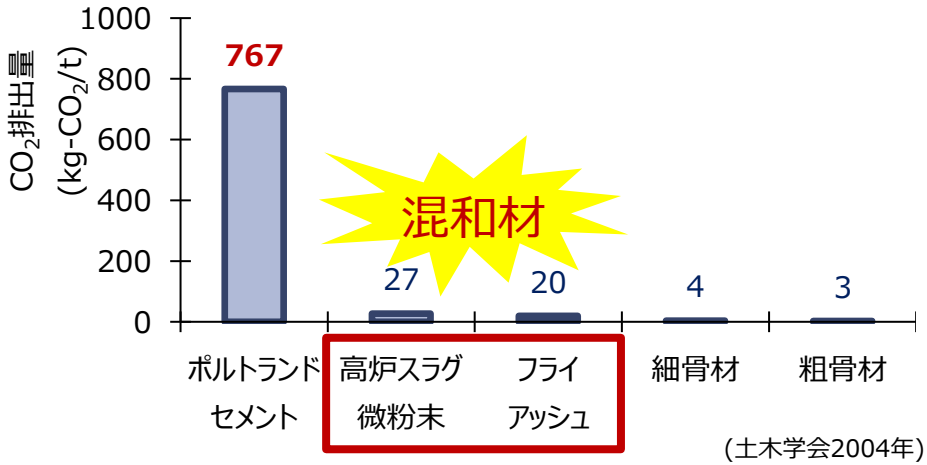
(IPCC Report 2007年)

材料に起因するCO_2排出量が多い



PC上部工のCO_2排出割合

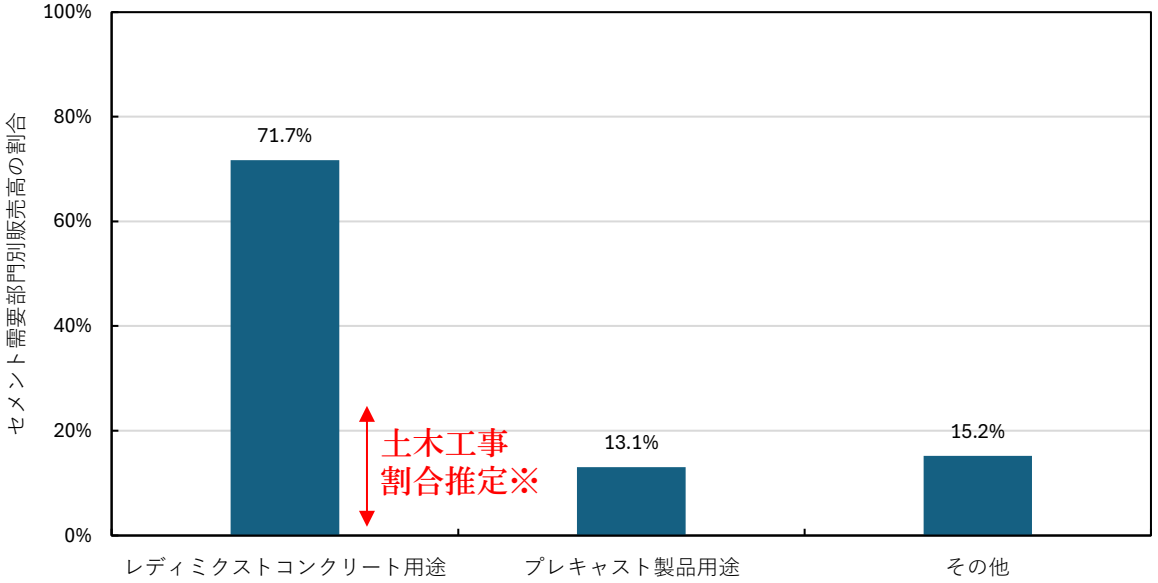
(コンクリート工学2010年9月号)



(土木学会2004年)

各材料の製造時のCO_2排出量

セメントの用途



全国のセメント販売高の割合（セメント協会統計データ2026.8）

※レディミクストコンクリート出荷量全体では，約3割が土木工事向けと推定（地域によって，割合は異なる）

- セメントは，レディミクストコンクリート（生コン），プレキャスト製品の製造用途で80%以上使用されている
  - プレキャスト製品：プレストレストコンクリート，護岸ブロック，道路用側溝等
- セメントの代わりに低炭型セメント結合材を使用することで，CO_2の削減につながる

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 種の上限値以上（70%以上）

従来のセメント

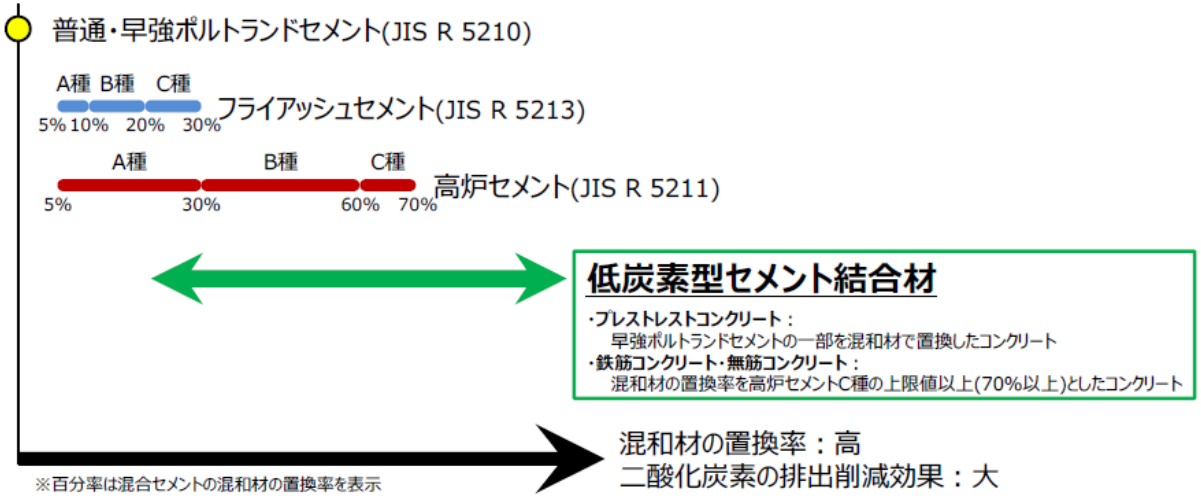
ポルトランドセメント 100%

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

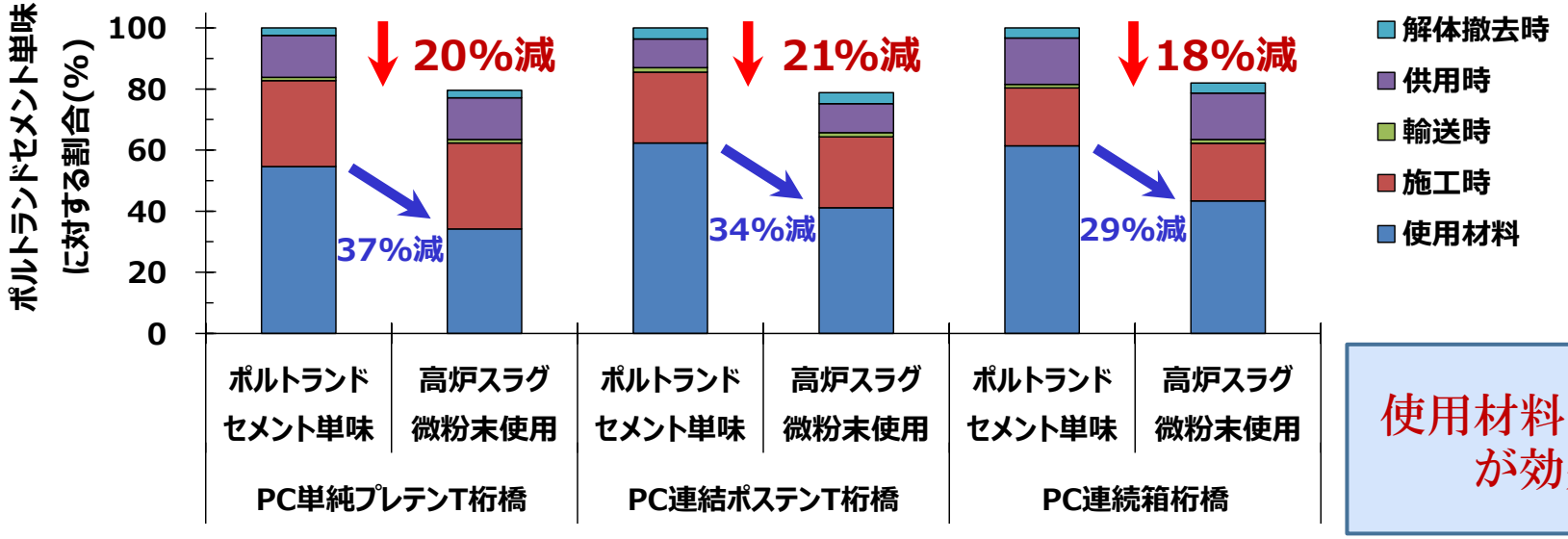




二酸化炭素排出削減効果の試算例

- 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したCO_2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T桁橋	早強セメント単味 vs 高炉スラグ微粉末 50%混合	直接基礎 橋脚高10m	普通セメント単味 vs 高炉スラグ微粉末 70%混合
2	PC連結ポステンT桁橋			
3	PC連続箱桁橋			



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？
  - コンクリートとしての物性変化？
    (中性化抵抗性，初期強度，養生期間延長，etc.)

構造物の設計にあたって，
要求される特性を有することをどのように説明すればよいか？

- ガイドラインとして，検討すべき項目を提示
- 実験等で検証した範囲では，蓄積された知見として活用可能
- 新たに実験する場合も，ガイドラインの項目に沿って検討可能

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）**
  - 共同研究の成果：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
  - 上記ガイドラインに関連する内容として下記の共同研究の内容も紹介

- **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～R3）**

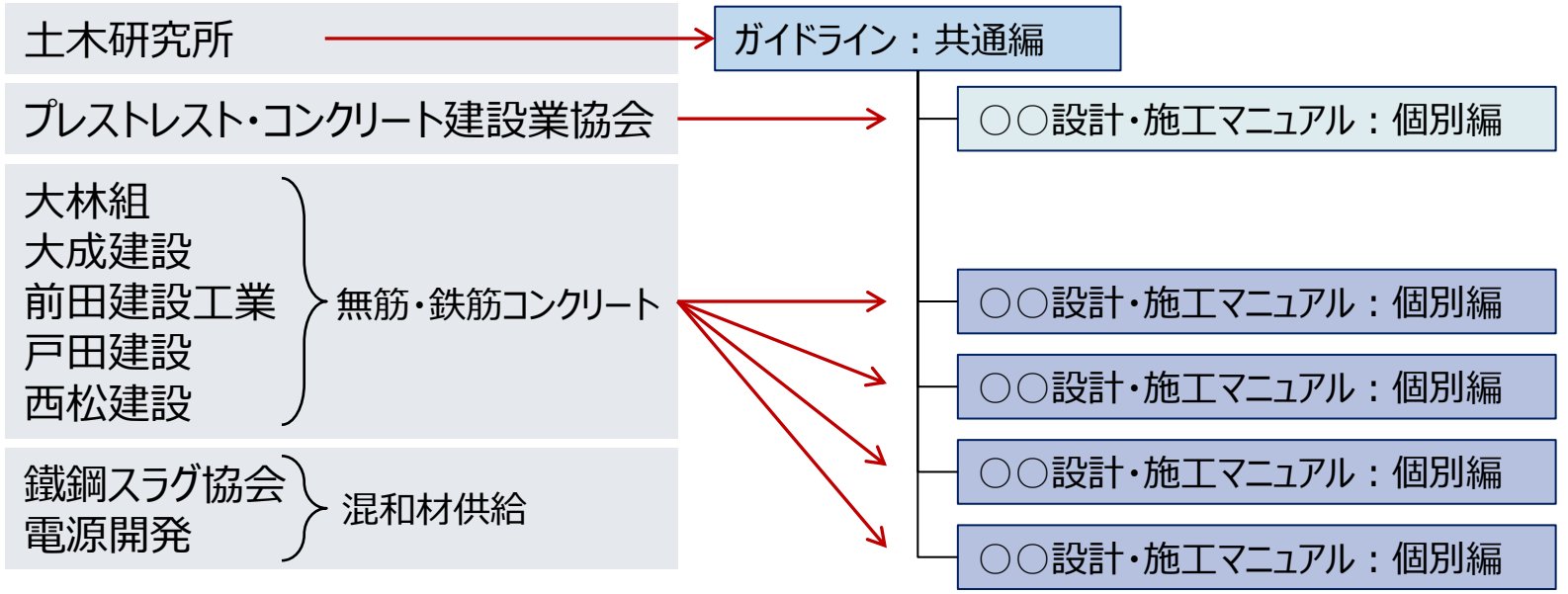
- **長期間塩害環境下にあった高耐久コンクリートの物性評価に関する共同研究（R4～R5）**

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

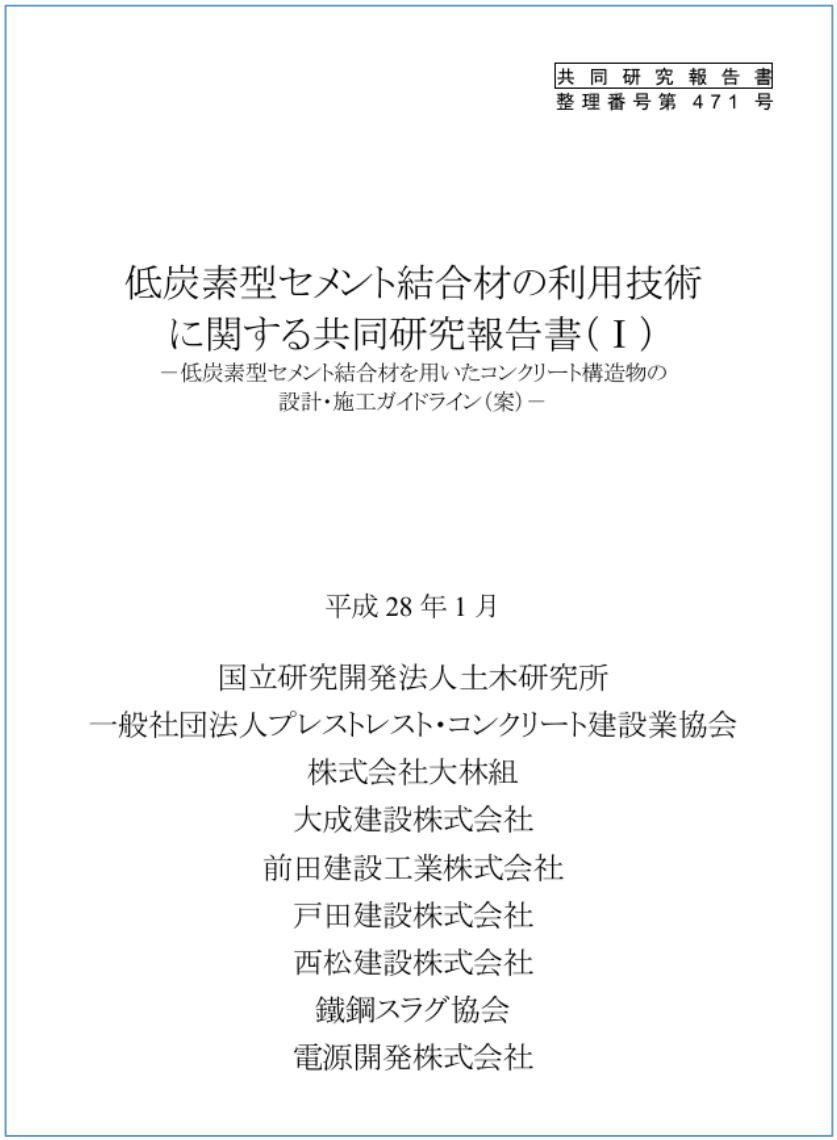
共同研究報告書　第476号　（土研＋大成建設）
高炉スラグ微粉末を結合材とした低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）
セメントの使用量を“ゼロ”として高炉スラグ微粉末と刺激材を用いた低炭素型のコンクリートの設計施工方法

➔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



共同研究報告書
整理番号第471号

低炭素型セメント結合材の利用技術
に関する共同研究報告書(Ⅰ)
－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)－

平成28年1月

国立研究開発法人土木研究所
一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会
株式会社大林組
大成建設株式会社
前田建設工業株式会社
戸田建設株式会社
西松建設株式会社
鐵鋼スラグ協会
電源開発株式会社

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）

2章の詳細：
品質に関する検討項目

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
2.1 一般
2.2 ワーカビリティ
2.3 強度
2.4 耐久性
2.5 ひび割れ抵抗性
2.6 環境負荷低減効果

品質において特に着目した事項

ワーカビリティー
- 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





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%CO_2

※大気中CO_2濃度 = 0.039%
(気象庁HP)

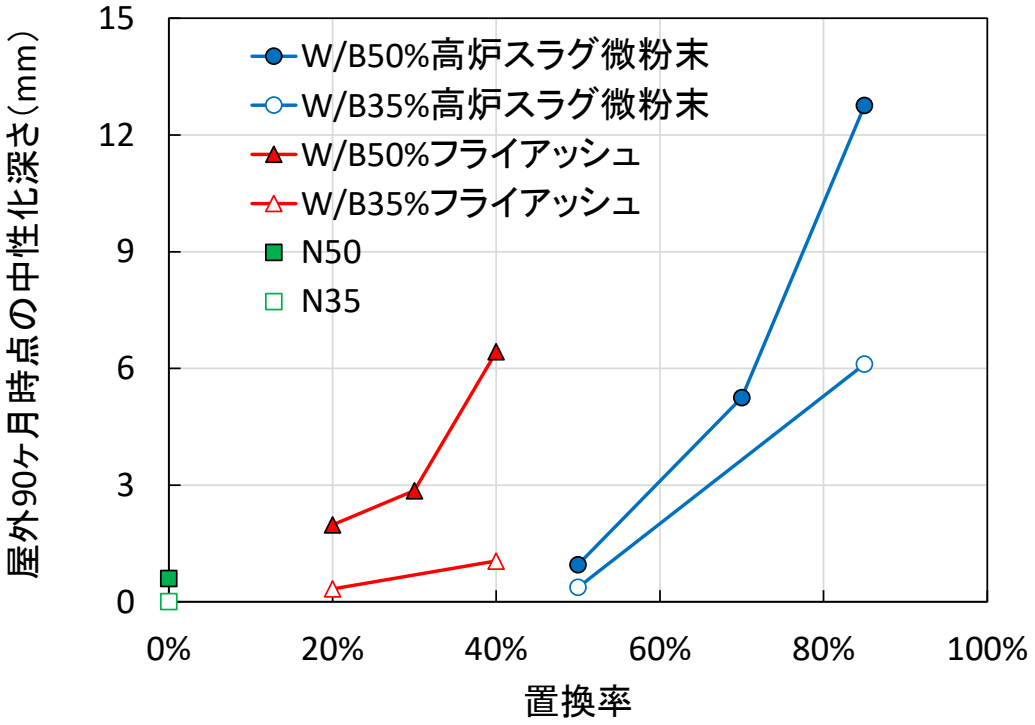


沖縄

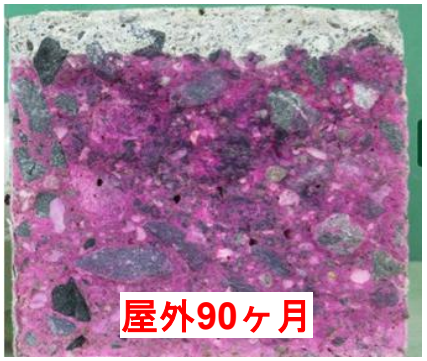
23.3°C
75.5%RH
4,085mm

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%

暴露後の中性化深さと暴露期間の関係



中性化深さと置換率の関係の例

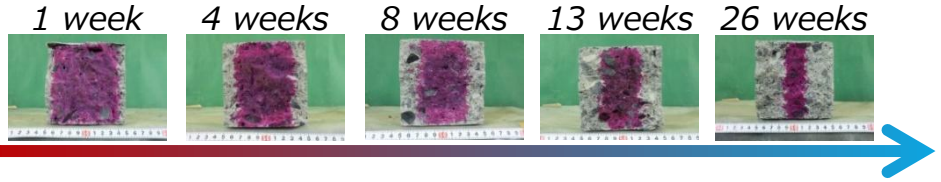


高炉スラグ微粉末85%置換供試体
中性化の状況

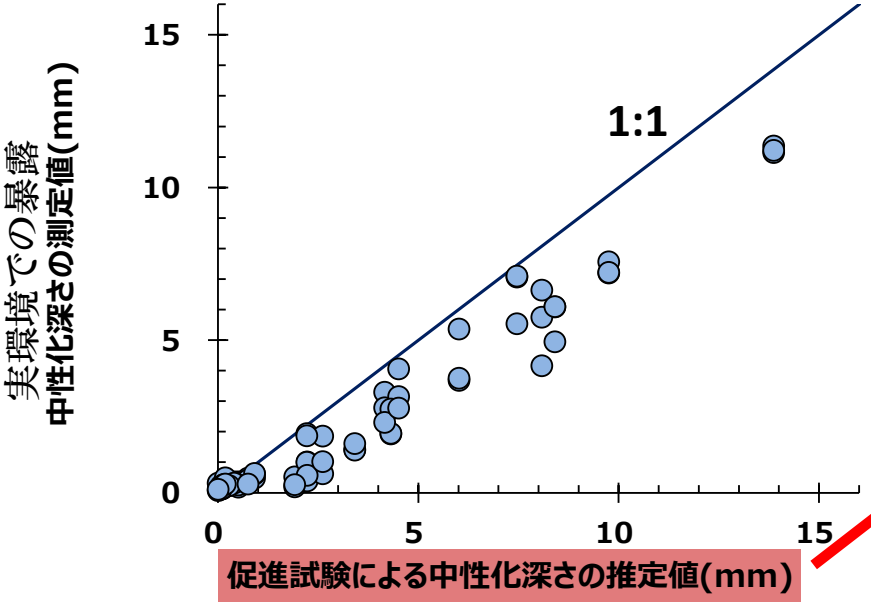
- ポルトランドセメントの使用量が少なくなると，水酸化カルシウムの含有量も少なくなるため，混和材を使用しない場合の配合に比べると，中性化抵抗性は低下
  - 中性化抵抗性の低下自体は問題でなく，想定される範囲内で用いる

中性化深さの推定

促進中性化試験 (JIS A 1153)
5±0.5%CO_2, 20±2℃, 60±5%RH



中性化深さの測定値と推定値



中性化深さの推定値

$$C = A_{ACT}\sqrt{CO2 / CO2_{ACT}}\sqrt{t}$$

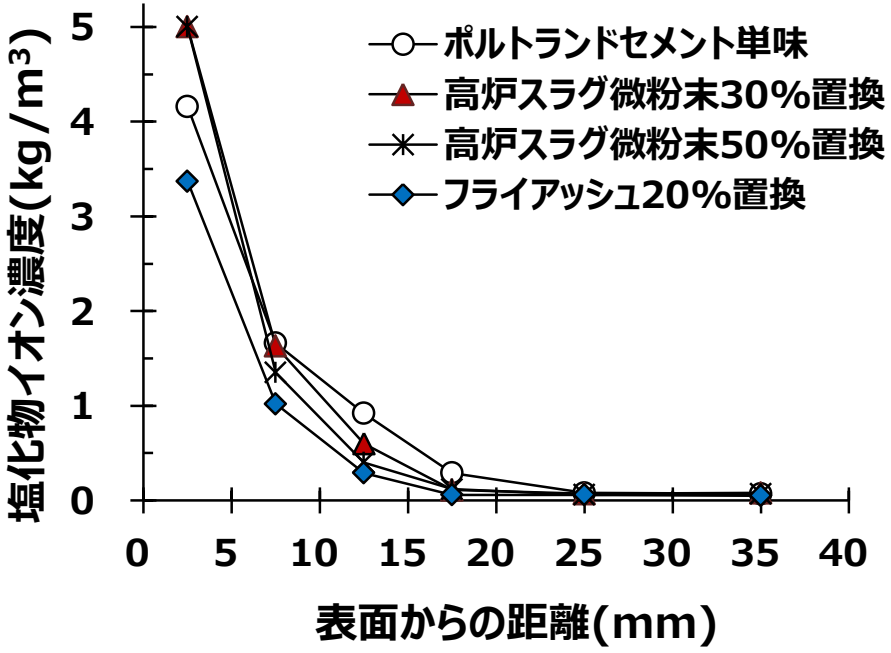
- C: 促進試験による中性化速度係数
- $CO2$: 実環境≒0.04%
- $CO2_{ACT}$: 促進試験=5%
- t: 暴露期間

促進中性化試験（CO_2濃度5%）で安全側に評価可能

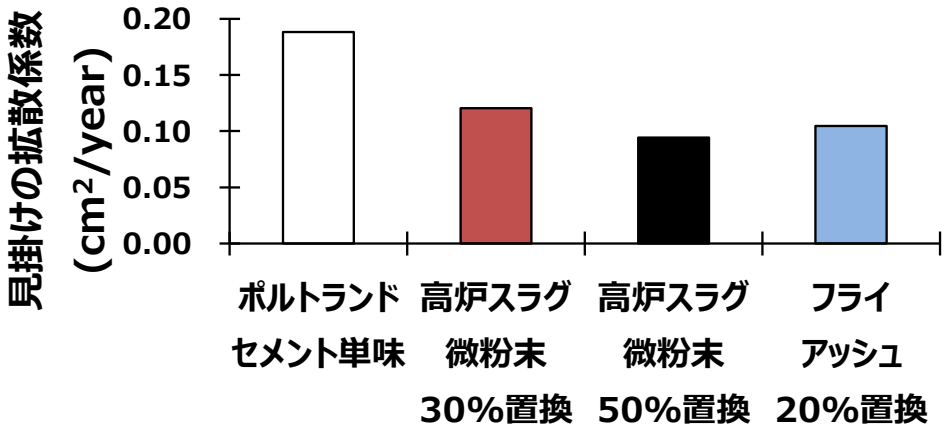
塩化物イオン浸透

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



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

D_{ap}：見掛けの拡散係数

混和材を使用しない場合と比較して
塩化物イオン浸透に対する抵抗性は向上

検討例2：クリープ

持続載荷試験

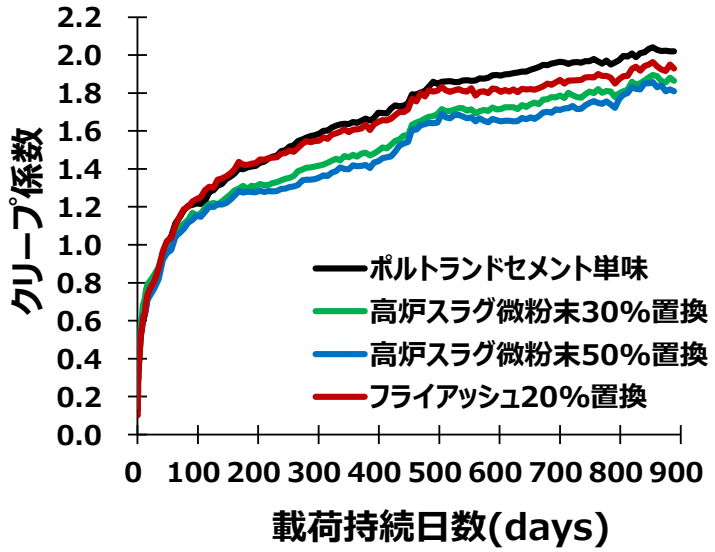


載荷開始材齢: 3, 7, 28, 365日
載荷荷重: 0.2 f'_c (載荷開始材齢3日)
0.3 f'_c (載荷開始材齢7, 28, 365日)
W/B: 40% (ポルトランドセメント単味)
35% (混和材使用)
※材齢3日の圧縮強度を同等とするためW/Bを調整

載荷開始材齢3日のクリープ係数

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

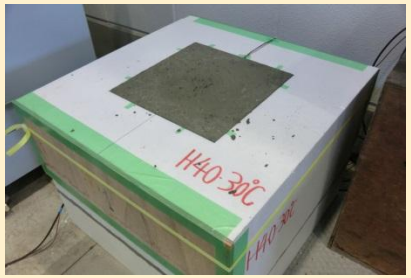
- ε_c：圧縮力を負荷した供試体のひずみ
- ε_{sh}：同形状・同条件で製作した圧縮力を負荷していない供試体の収縮ひずみ
- ε_i：載荷時の弾性ひずみ
- E_{28}：材齢28日まで水中養生した円柱供試体の静弾性係数
- σ_c：圧縮応力度



混和材を使用しない場合と同様に設計で扱える

検討例3：高温履歴を受ける際のひび割れ抵抗性

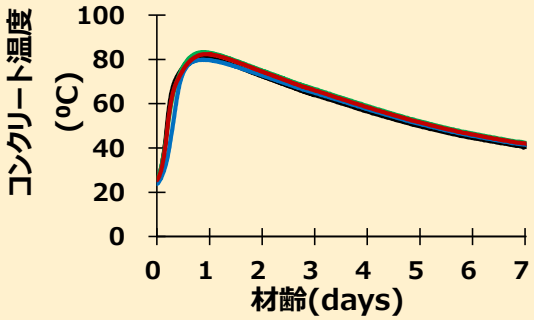
自己収縮試験





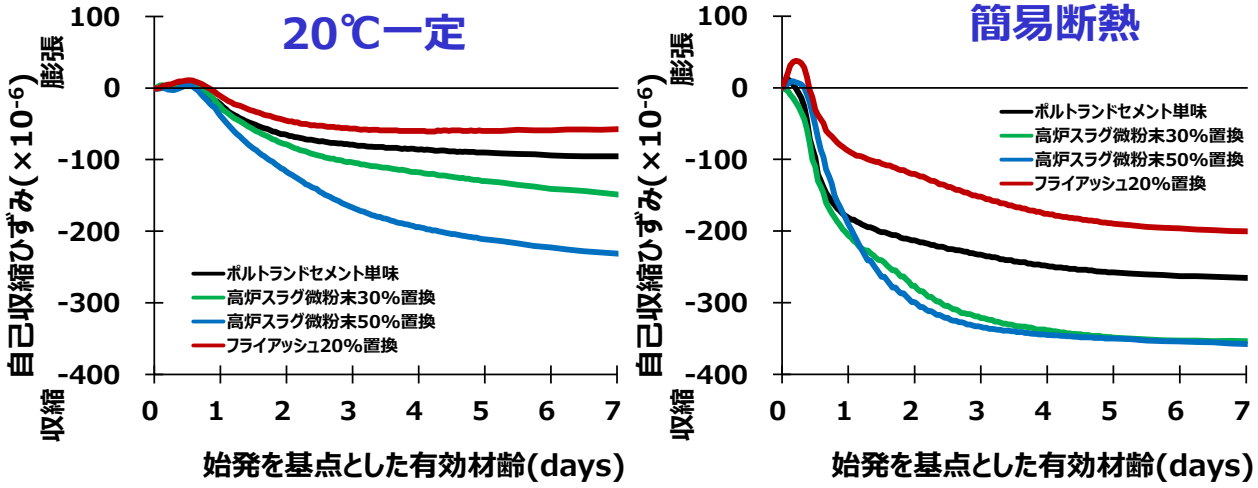
簡易断熱（マスコンクリート模擬）

立方体400×400×400mm



20℃一定（JCI試験法）

角柱100×100×400mm



実験に基づいた自己収縮の予測式を構築し，高温履歴を受ける場合の検討を可能にした

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％（混和材を用いた場合は低下させる）
- **養生期間は従来同様**
- **中性化に対する抵抗性（促進環境）は無置換の場合よりは小さいが，水結合材比が小さいため十分な抵抗性を有す**
- **塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上**
- **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**
- **高温履歴を受けた際のひび割れが懸念される場合は，自己収縮の影響を考慮してひび割れに対する抵抗性を評価**

低炭素型のコンクリート（PC配合）特性

（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）

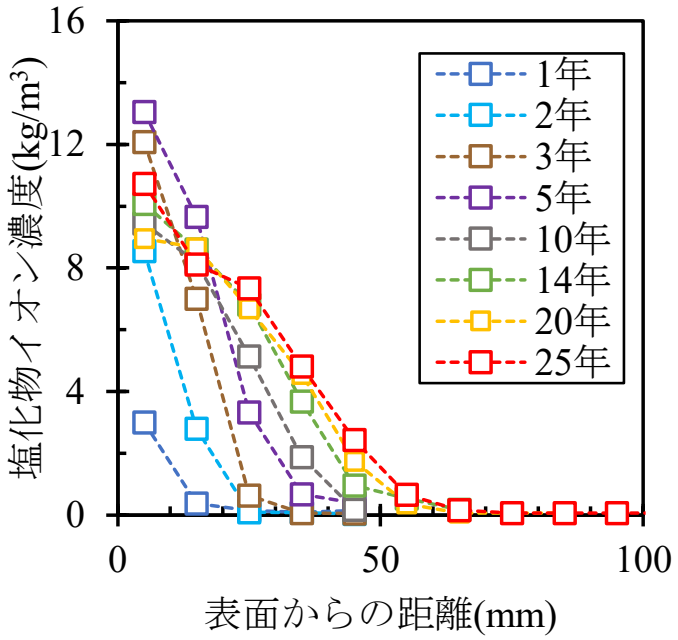
- **プレストレストコンクリートを想定した配合について継続検討**
  - 水結合材比が小さいと，中性化は顕著でない
- **塩化物イオン浸透に対する抵抗性の高さを定量的に評価**
- **プレキャスト部材・製品は，硬化した状態で出荷されるため，品質を確認した上で活用可能**

塩害環境での20年以上の暴露試験結果

（長期間塩害環境下にあった高耐久コンクリートの物性評価に関する共同研究）

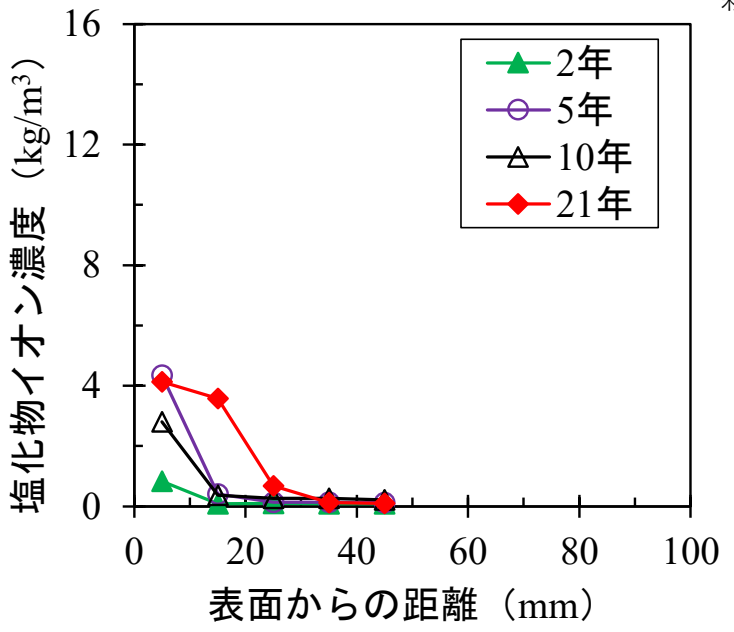


新潟県（関屋）



塩化物イオン濃度分布
（W/C＝40%，早強セメント）

従来のＰＣ用コンクリート



塩化物イオン濃度分布
（W/C＝40%，早強＋高炉スラグ）

混和材を活用したＰＣ用コンクリートの結果例

塩化物イオン浸透に対する抵抗性の高いコンクリートの分類

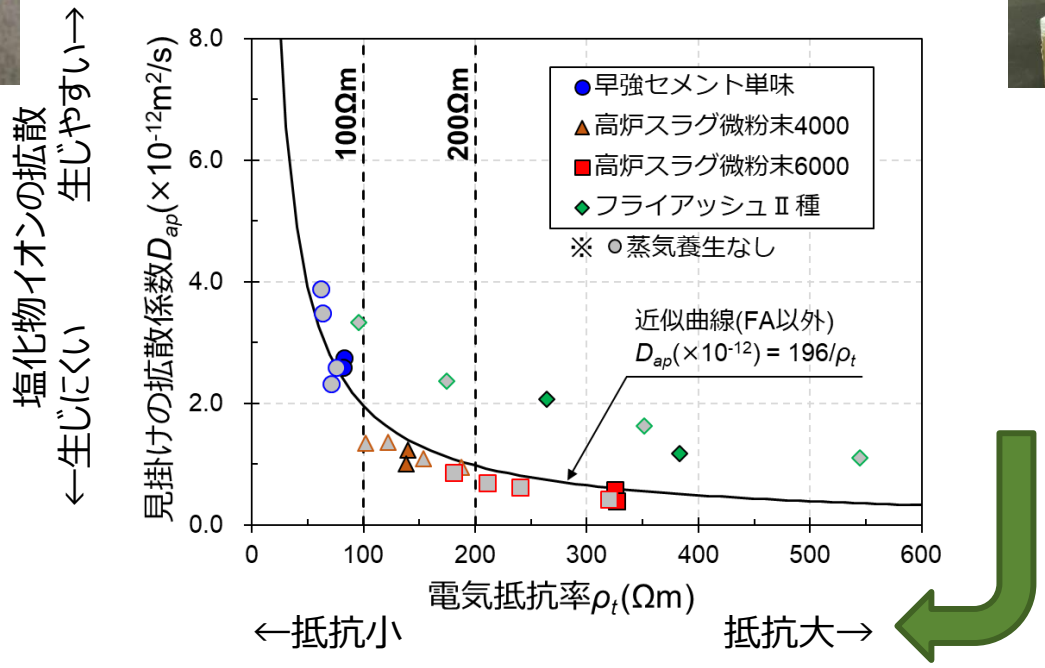
- 電気抵抗率による簡易な評価を提案



塩水浸せき試験



電気抵抗率試験



- 他の方法と比較し，短時間で実施可能
- 誤差は，圧縮強度試験と同程度
- 温度一定（20℃）の環境で測定
- 試料を乾燥させると電気抵抗率が上昇

塩化物イオン浸透に対する抵抗性の高いコンクリートの分類

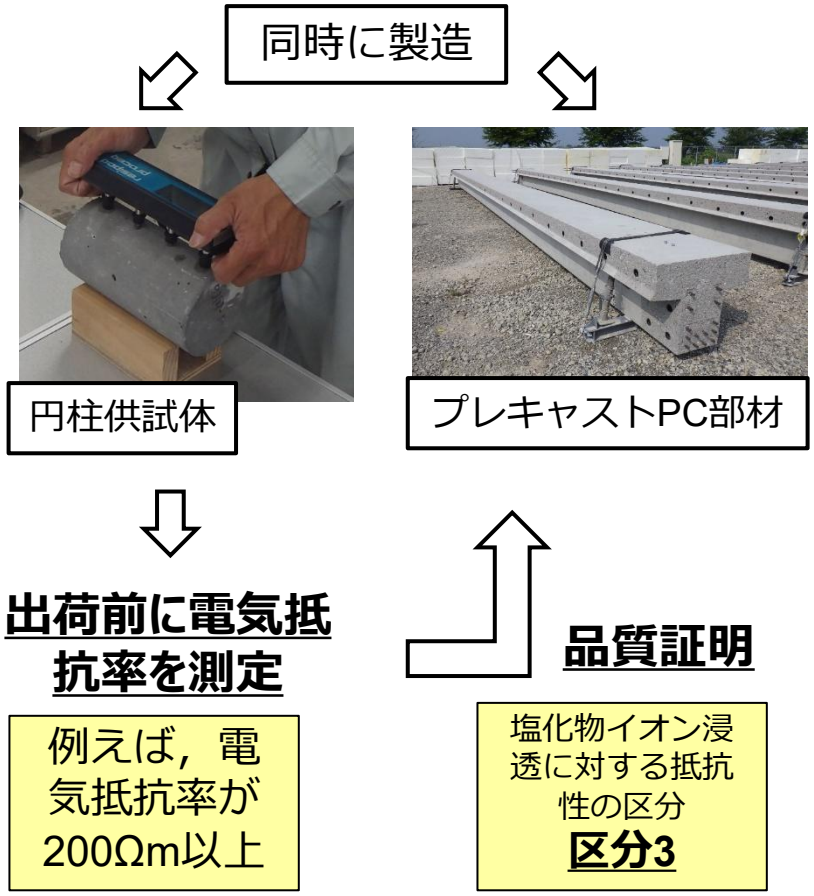
区分	電気抵抗率（Ωm）	各区分に対応する結合材の例 ※水結合材比：32～40%のとき
区分1 従来のPC用コンクリート	100未満	早強ポルトランドセメント単味
区分2 区分1と区分3の中間	100～200	高炉スラグ微粉末4000，30%置換
区分3 塩化物イオンの浸透が見かけ上停止するようなコンクリート	200より大	高炉スラグ微粉末6000，50%置換 フライアッシュII種，20%置換

従来より向上

従来より大きく向上

プレキャスト部材での活用

- **プレキャスト部材で塩分浸透抵抗性を確認する方法**
  1. プレキャスト製品の製造時に同時に円柱供試体を作成，蒸気養生後，水中に保管
  2. 出荷前に電気抵抗率を測定して，コンクリートの塩分浸透抵抗性を確認
- **製品の品質を直接確認**できるための信頼性の向上につながる
- 混和材を用いた部材でも安心して使用できるため，**耐久性向上効果を設計に反映できる可能性**
  - 想定される維持管理の条件に応じた材料の選定など



まとめ

共同研究報告書は、土木研究所 HPで公開中（無料でダウンロード可）
https://thesis.pwri.go.jp/

1. 材料の低炭素化は，CO_2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とりまとめ
   - 共同研究報告書471～476号，487号

3. プレキャストPC部材の場合，出荷時に従来より塩害に強いことを確認した上で用いることも可能
   - 共同研究報告書559号

4. 塩害環境下で20年以上暴露した検証結果もとりまとめ
   - 共同研究報告書600号



中国自動車道福崎新高架橋
写真提供：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会



新名神高速道路
神戸ジャンクション東工事
写真提供：（株）大林組