

改質セメントによる コンクリートの高耐久化技術

土木研究所 寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ 耐寒材料チーム
吉田 行

<共同研究:北海道大学、日鐵セメント株式会社、日本サミコン株式会社>

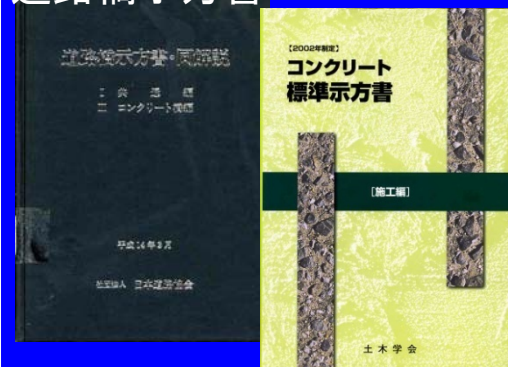
コンクリート構造物の劣化が顕在化



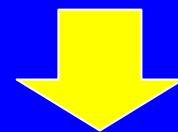
- ・維持管理費、補修費等LCCの増加
- ・補修・改築工事に伴う環境負荷の増大

性能規定型設計体系への移行

道路橋示方書



耐久性の確保



目標期間100年



長期的な耐久性の確保が重要

近年のコンクリートの要求性能

- ・長期的な耐久性の確保(長寿命)
- ・維持管理費の削減(LCCの削減)
- ・環境に及ぼす影響の低減

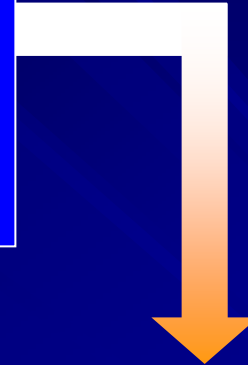


コンクリート構造物の高耐久化

- ex; 道路橋示方書では
塩害対策区分S、所定かぶり+
- ・塗装鉄筋の使用
 - ・コンクリート塗装などを併用



初期コスト等の増加



コンクリート自体の高耐久化

- ・効率的なLCCの削減
- ・環境負荷の低減も可能



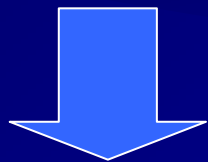
セメント(結合材)の改質
各種セメントと混和材の積極的な利用

セメント(結合材)の改質

コンクリートに求められる性能
(性能設計 耐用年数100年)

橋梁下部工、擁壁等

- ・耐久性(耐塩害性、耐凍害性等)
- ・ひび割れ抵抗性(乾燥収縮)
- ・低発熱性(大規模、温度ひび割れ)



- ・低熱セメント(ビーライト系セメント)
- ・高炉スラグ微粉末

橋梁上部工(PC)

- ・耐久性(耐塩害性、耐凍害性等)
- ・ひび割れ抵抗性(乾燥、自己収縮)
- ・早期強度



- ・早強セメント(早期強度の確保)
- ・各種混和材の組合せ
(高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフューム)

ビーライト系セメントとは？

■ビーライト($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)が多いセメント

- ・長期強度発現に優れる
- ・水和熱が小さい
- ・球形に近く流動化しやすい



各鉱物の特性 (相対比較)		エーライト (C_3S)	ビーライト (C_2S)	アルミネート相 (C_3A)	フェライト相 (C_4AF)
強度 発現	初期(1日程度)	中	小	大	小
	早期(3~28日)	大	中	小	小
	長期(28日以降)	中	大	小	小
水和熱		中	小	大	中
化学抵抗性		中	大	小	大

セメントの鉱物組成

セメント (※比表面積: cm ² /g)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通セメント(OPC) : 3320 ※	54%	21	9	9
ビーライト系セメント(B3) : 3340 ※	25%	52	4	12

一般的なもの(市販品)

低熱ポルトランドセメント (JIS R 5210)

- ・初期強度発現が小さい
- ・耐久性は？(中性化、耐凍害性)

高炉スラグ微粉末とは？

■ 製鉄所の溶鉱炉で銑鉄と同時に生成される溶融高炉スラグを急冷精製した高炉水砕スラグを乾燥微粉碎したもの

潜在水硬性： $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などのアルカリ存在下で水と反応硬化

- ・水和熱の抑制
- ・アルカリシリカ反応の抑制
- ・硫酸塩や海水に対する化学抵抗性の向上
- ・塩化物イオンや酸素の浸透に対する抵抗性の向上
- ・初期強度発現が小さい
- ・乾燥収縮が大きい？（高炉B種セメント）

使用結合材

◎シリーズ1(下部工対応)

ベースセメント	ビーライトセメント(B3):比表面積 3,170 (cm ² /g)
	ビーライトセメント(B6): 6,410 (cm ² /g)
	普通ポルトランドセメント(OPC): 3,270 (cm ² /g)
	高炉B種セメント(BB): 4,280 (cm ² /g)
混和材	高炉スラグ微粉末 4000(S4), 6000(S6), 7200(S8) (cm ² /g)

◎シリーズ2(上部工対応)

ベースセメント	早強ポルトランドセメント(HP): 4,770 (cm ² /g)
混和材	高炉スラグ微粉末6000(HBS60): 6,020 (cm ² /g)
	フライアッシュⅡ種(HF20): 3,710 (cm ² /g)
	シリカフューム(HSF10): 130,000 (cm ² /g)

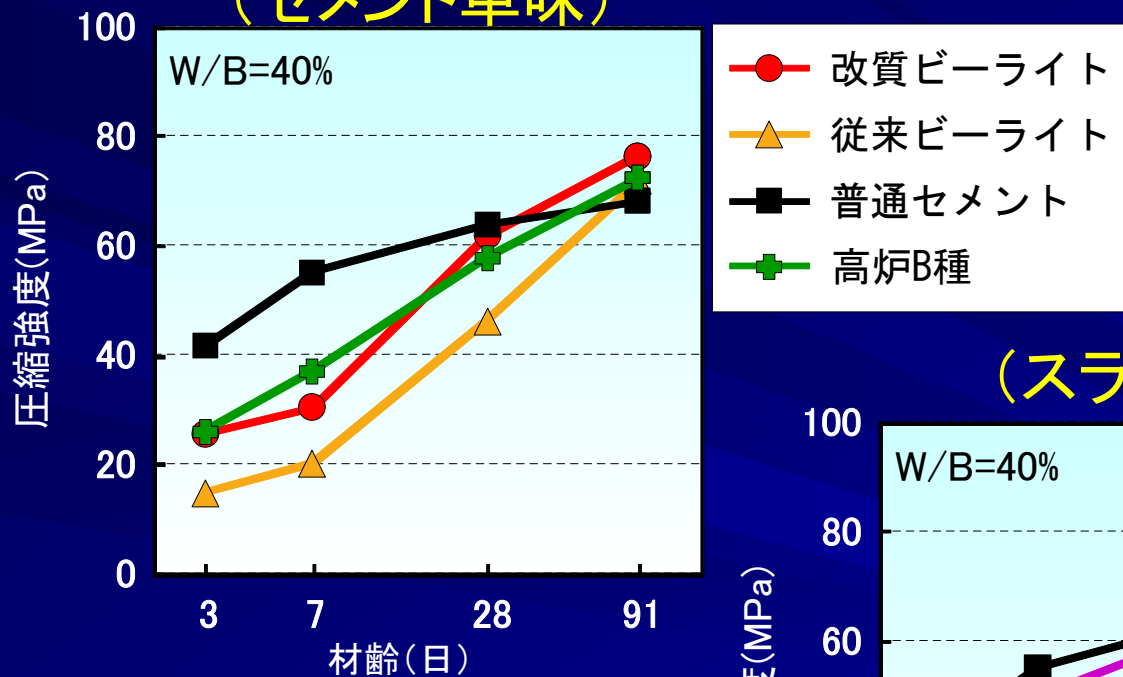
物性

(強度、発熱、収縮特性)

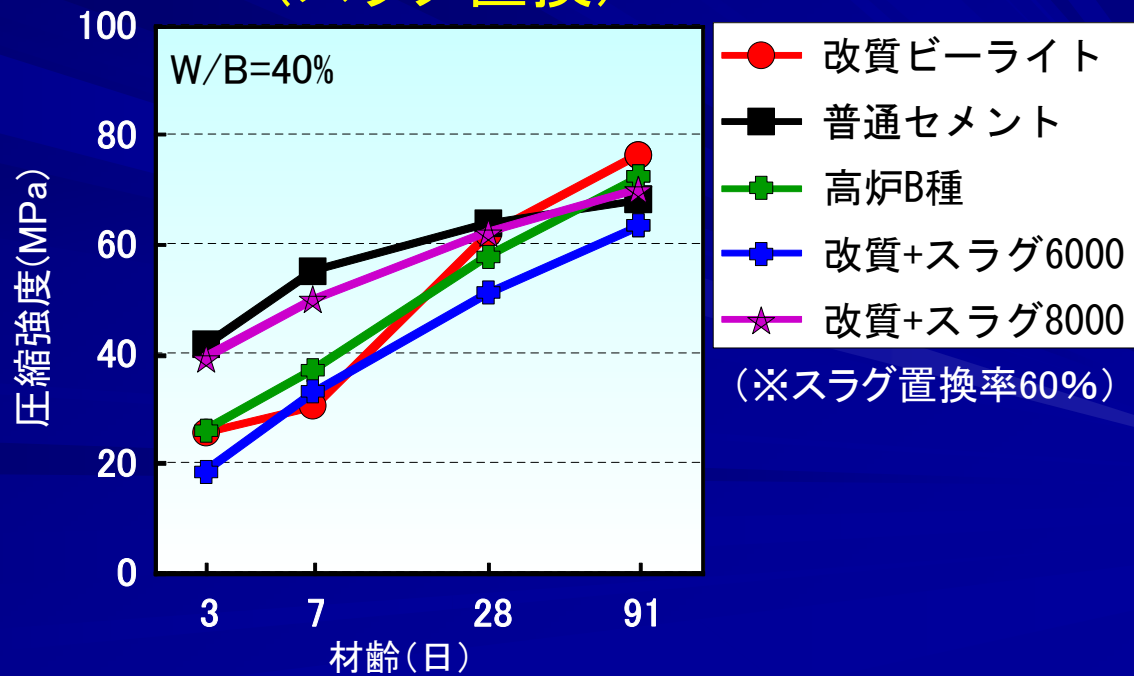
圧縮強度発現

シリーズ1 (橋梁下部対象: W/B=40%)

(セメント単味)

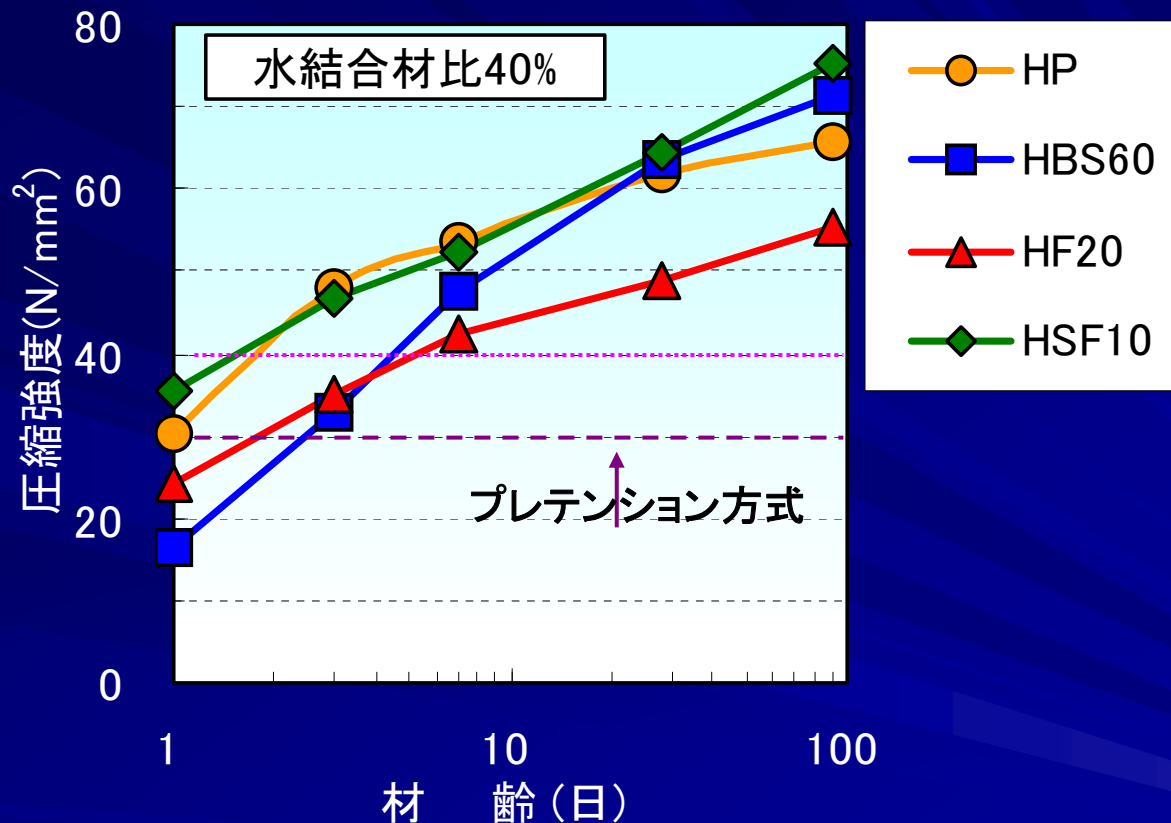


(スラグ置換)



圧縮強度発現

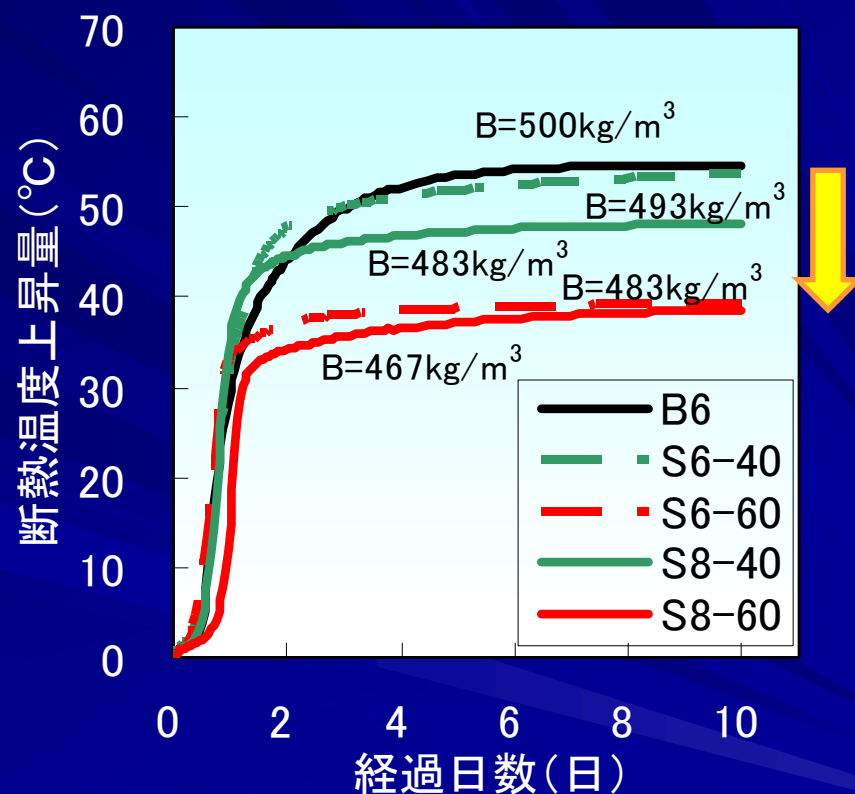
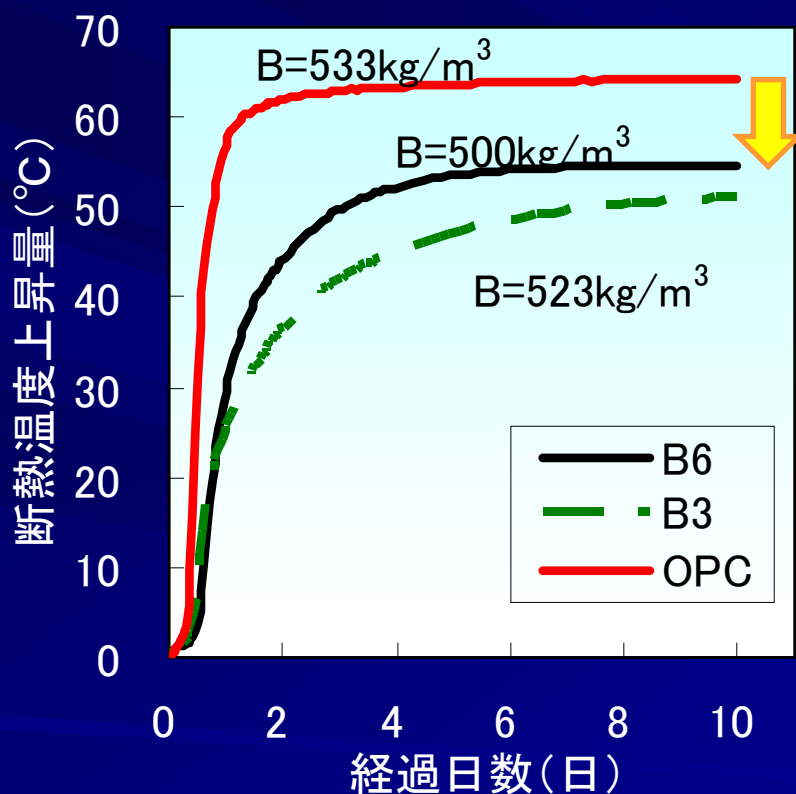
シリーズ2 (上部工対象: W/B=40%)



- ・いずれも一般的な設計基準強度 ($\sigma 28$) 40N/mm^2 以上
- ・シリカフェームを用いたケースは材齢初期より強度大
- ・高炉スラグは、材齢28日以降シリカフェームと同程度

断熱温度上昇特性

シリーズ1 (W/B=30%: 高流動コンクリート)

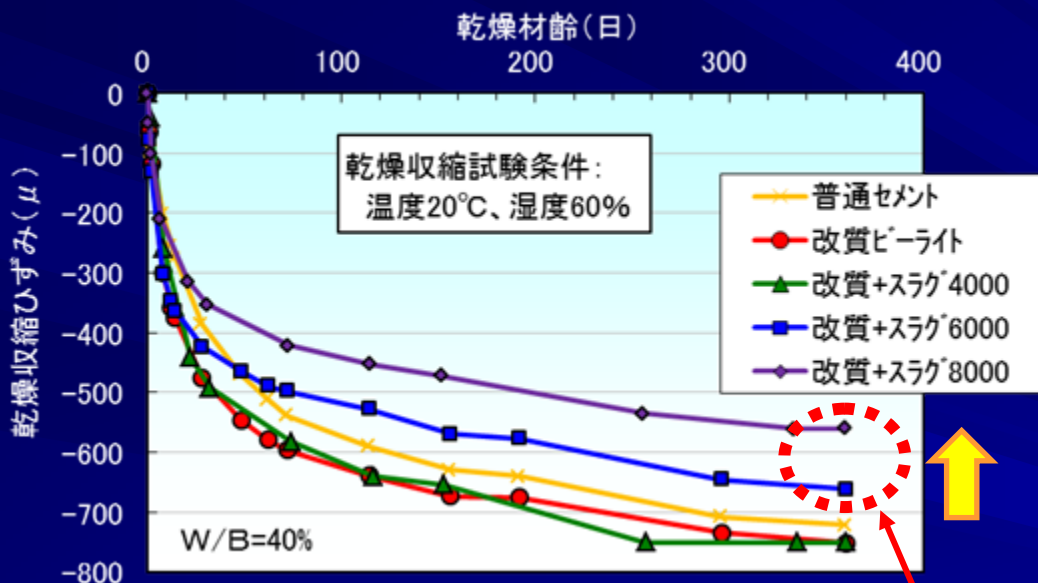


・低熱セメントとスラグの使用による水和熱の抑制

収縮特性(乾燥収縮)

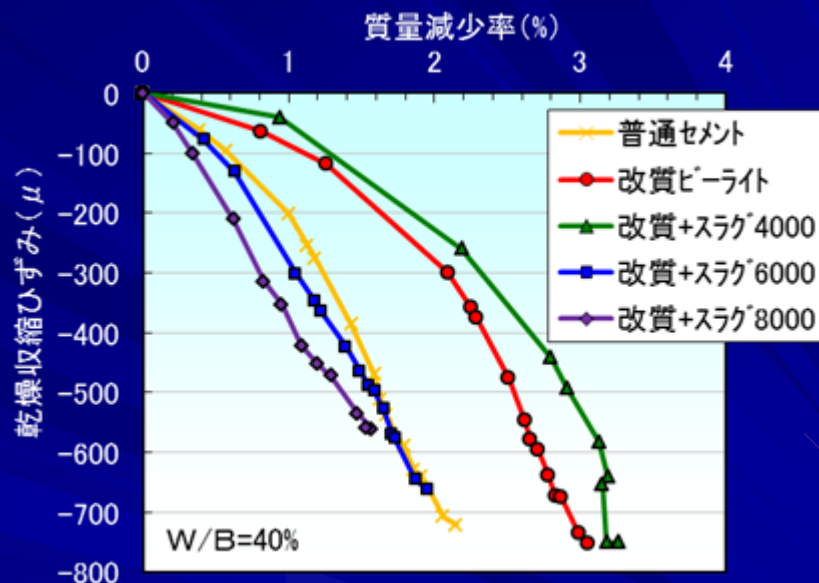
シリーズ1:(W/B=40%)

乾燥収縮ひずみ



粉末度6000以上の
高炉スラグ混入

ひずみと質量減少率の関係



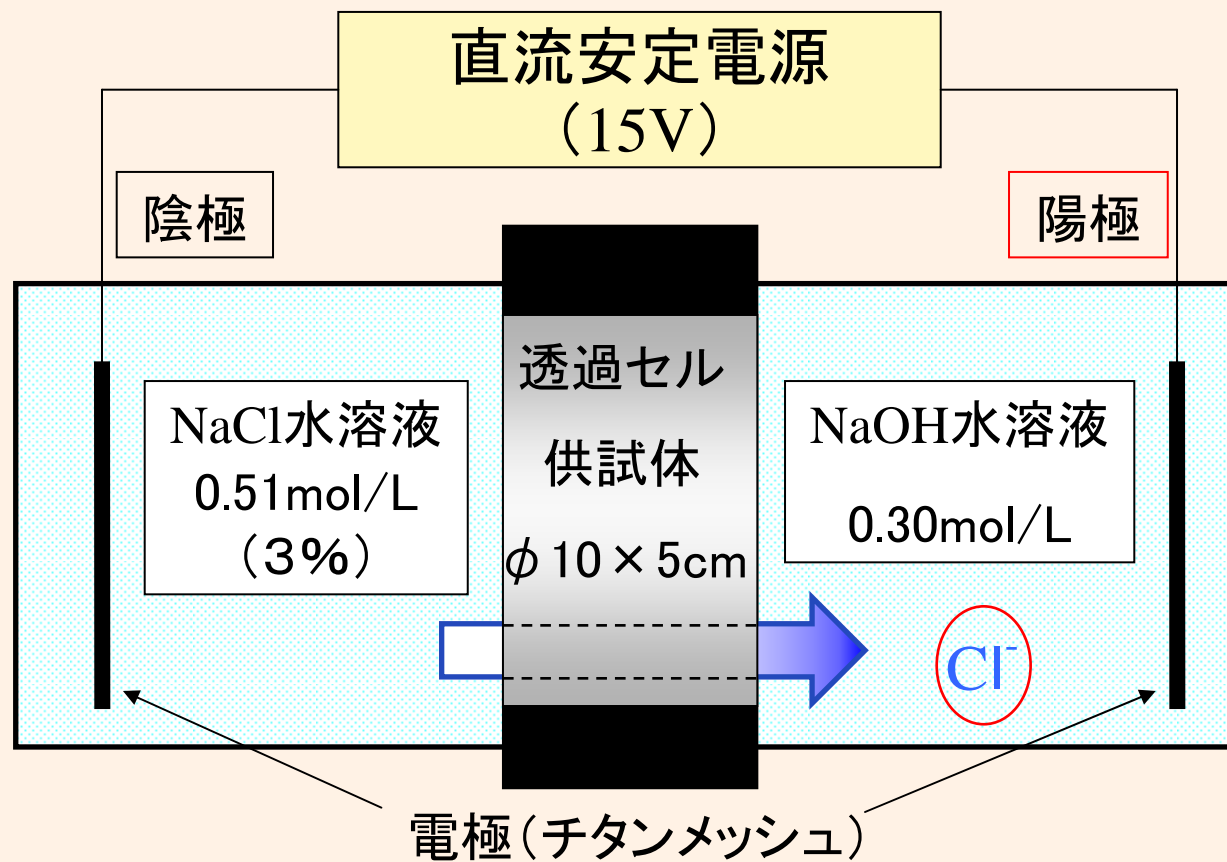
- ・高炉スラグ微粉末6000ブレン以上で収縮が抑制される傾向
- ・質量減少が小さいものほど収縮は小さい傾向

耐久性試験結果

(塩分浸透、中性化、凍結融解、
スケーリング抵抗性、化学的抵抗性)

電気泳動によるコンクリート中の 塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)

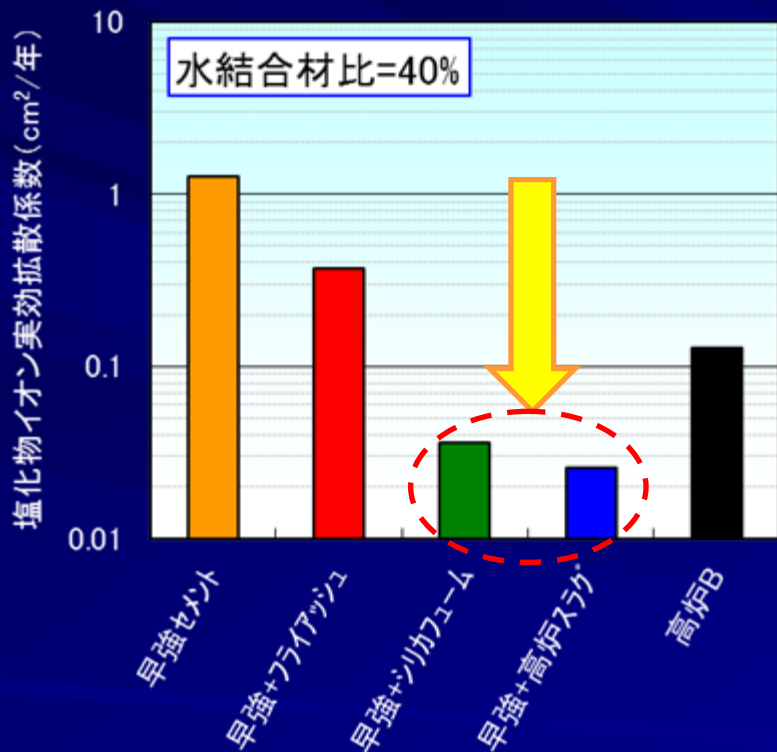
(JSCE-G571-2003)



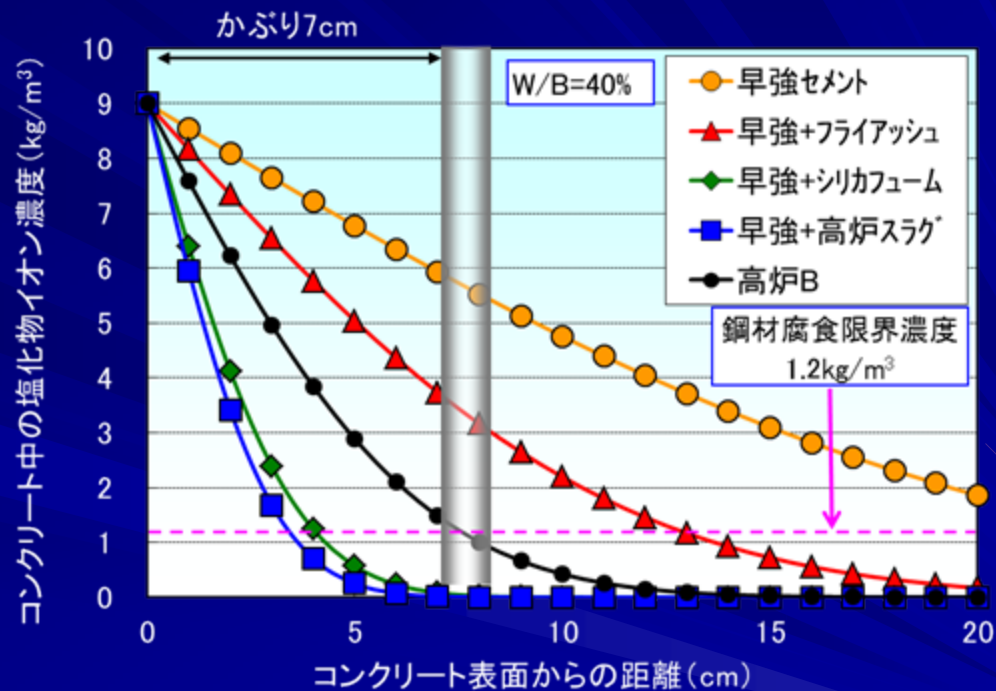
試験装置

塩分浸透抵抗性評価

塩化物イオンの実効拡散係数



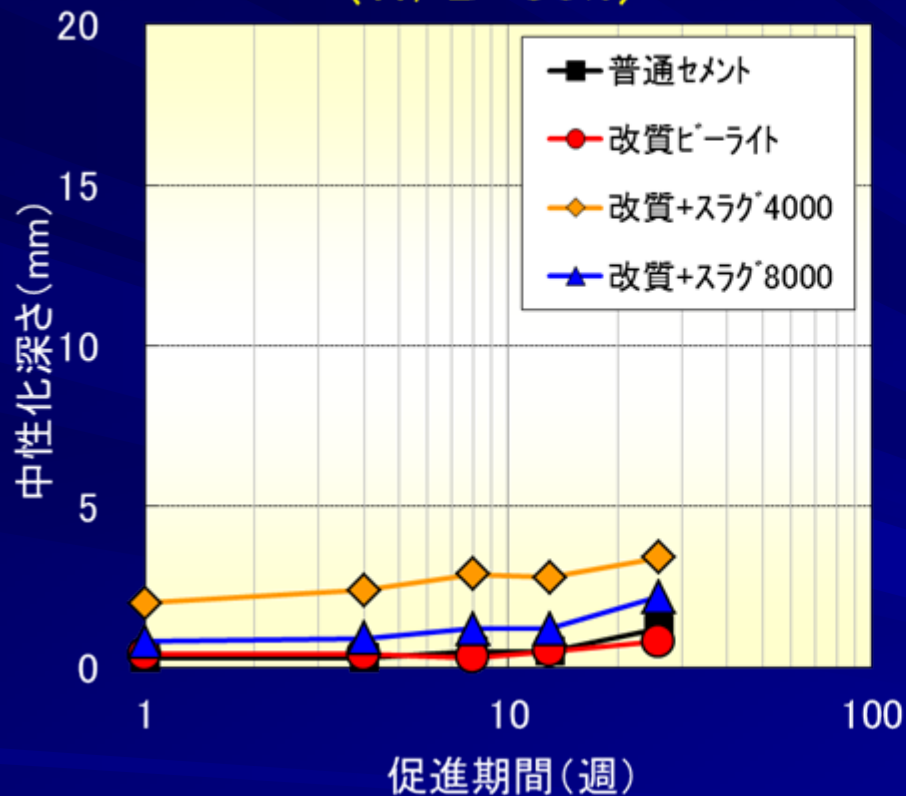
塩分の浸透予測(100年後) (表面塩分量9kg/m³(汀線)で試算)



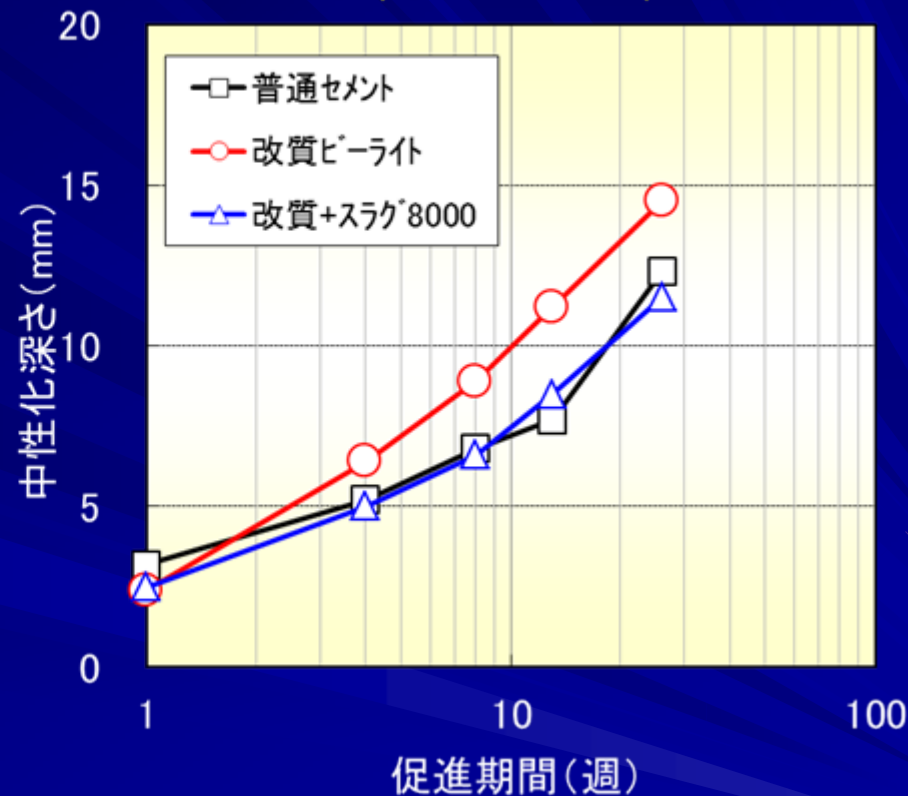
- 高炉スラグとシリカフュームを用いた配合は実効拡散係数が極めて小さい

促進中性化試験結果

(W/B=30%)



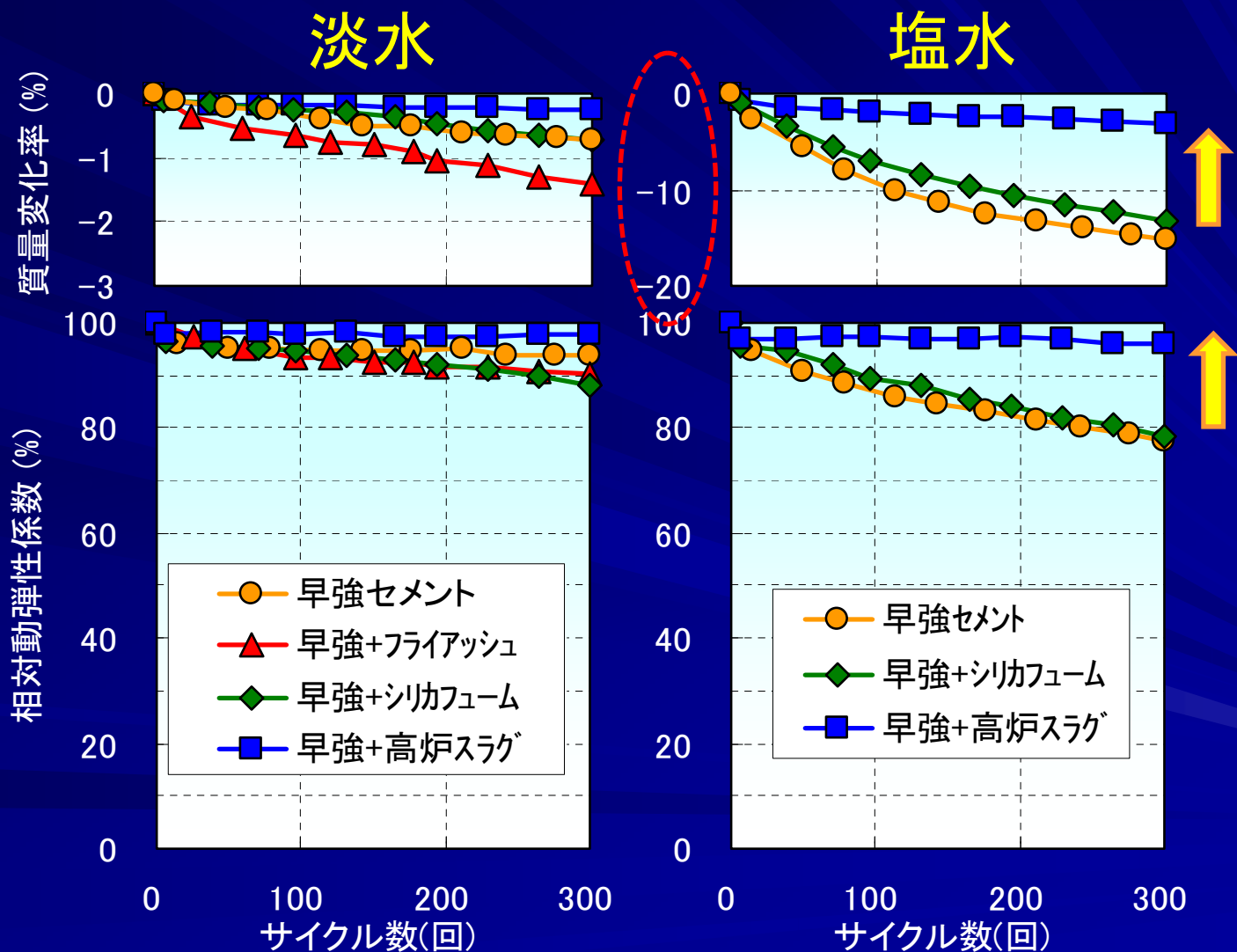
(W/B=40%)



- ・水比40%では改質ビーライトの中性化深さが若干大
- ・水比30%では中性化深さが極めて小さい

凍結融解試験結果

シリーズ2



スケーリング試験の概要

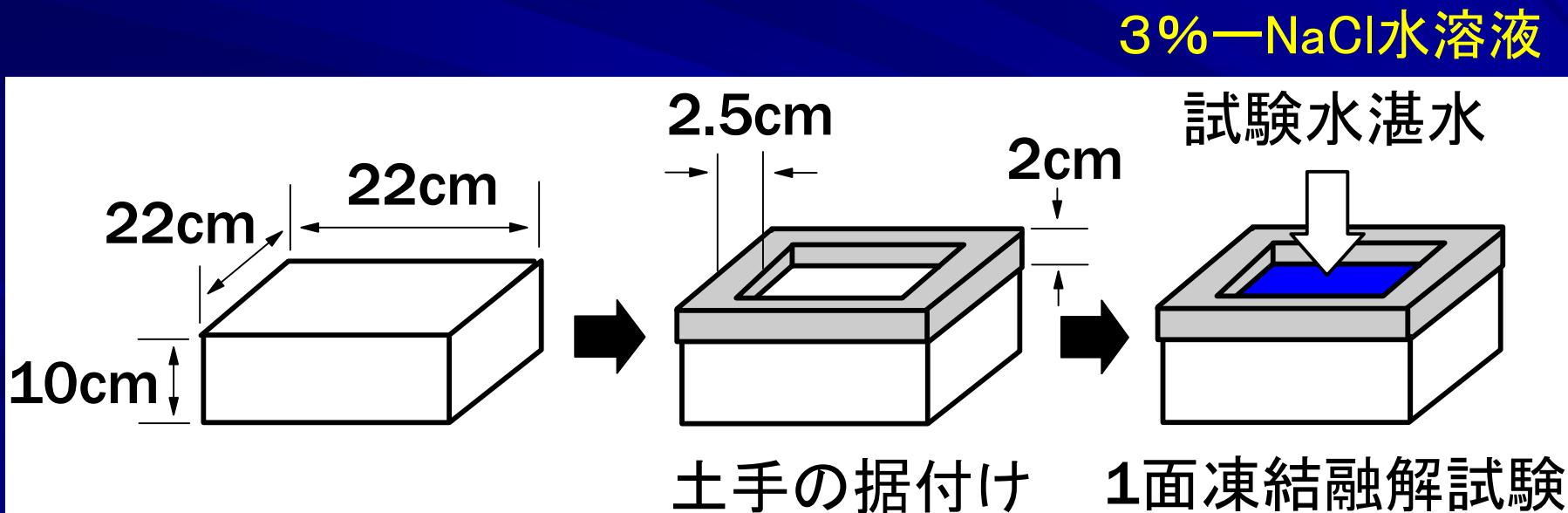
●ASTM C 672

温度履歴(1サイクル): -18°C (16時間) \sim 23°C (8時間)

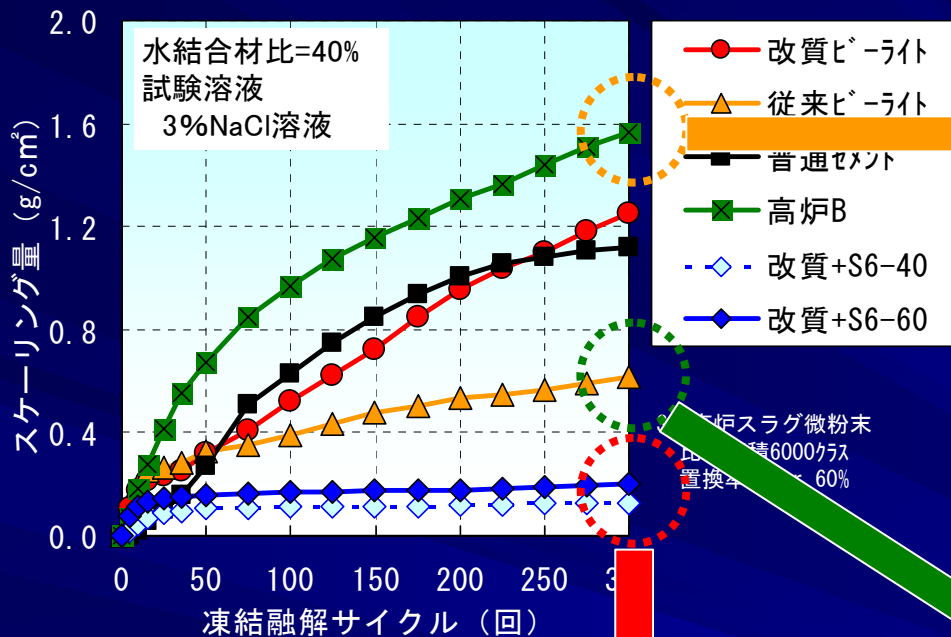
目視評価、スケーリング量、深さ測定

●養生:

7日間湿布養生 \rightarrow 28日まで気中養生 (相対湿度60%、温度 20°C)



スケーリング抵抗性



高炉B種セメント



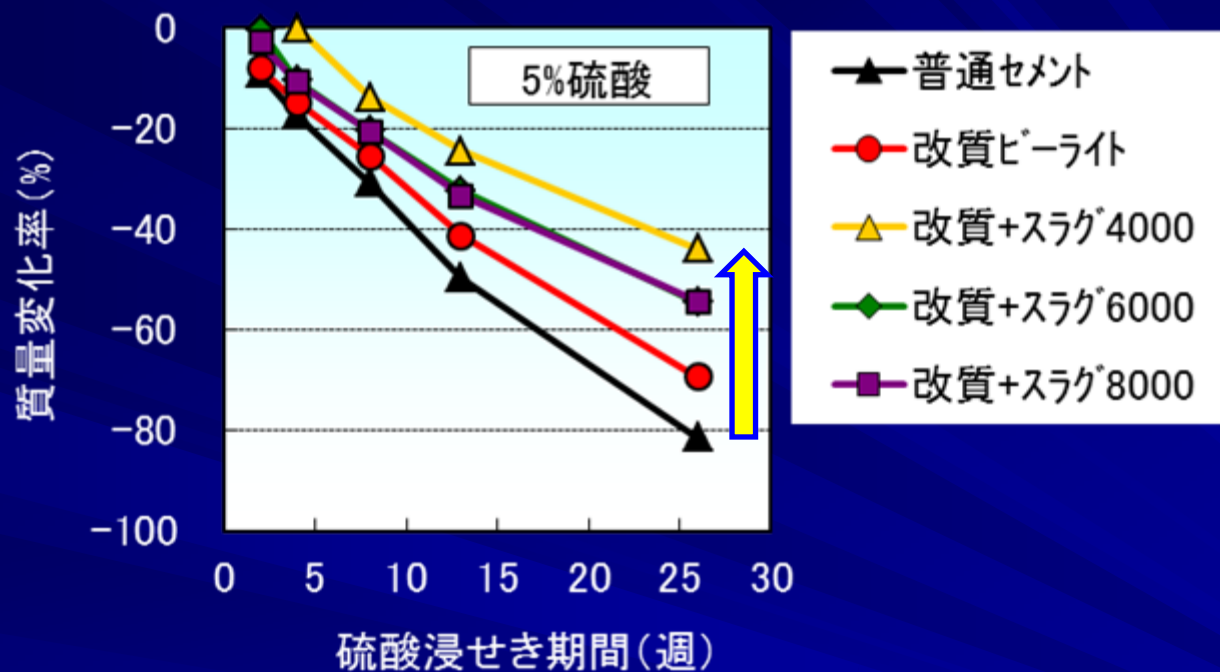
改質ビーライト+スラグ6000



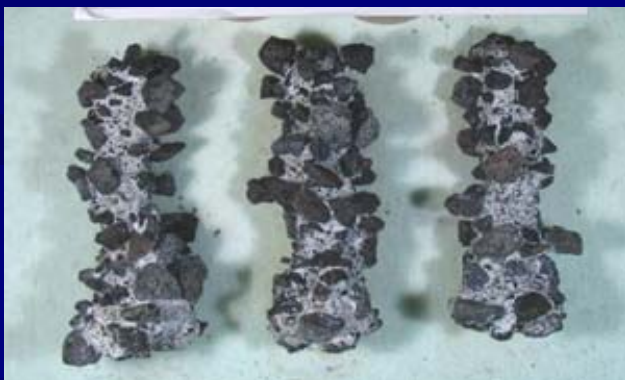
従来ビーライト(低熱ポルト)

化学的抵抗性

硫酸浸せき試験結果(硫酸濃度:5%(pH=約0.1))



普通セメント



改質+スラグ8000



改質+スラグ4000



性能一覧

シリーズ1

対象 構造物 (用途)	セメントの種類	強度発現特性			断熱 温度	収縮特性				耐久性							
		初期		中・長期強度		自己 収縮 (W/B30)	乾燥収縮		中性化		塩害		凍害 (空気量による)		スケーリング 抵抗性 (W/B40)	化学的 抵抗性	
		1~7	7~28	91以降			W/B 30以下	W/B 40以上	W/B 30以下	W/B 40以上	W/B 30以下	W/B 40以上	W/B 30以下	W/B 40以上			
一般 構造物	普通ポルトランドセメント	◎	◎	○	×	△	○	△	◎	○	△	△	◎	◎	△	×	
	高炉B種セメント	△	○	○	(△)	(△)	(△)	△	-	(△)	◎	○	(○)	○	×	○	
擁壁、橋脚、 橋台などの大 型構造物	改質ビークライト系セメント	○	◎	◎	○	△	○	△	◎	△	○	△	◎	△	△	△	
	低熱ポルトランドセメント	△	○	◎	○	○	△	△	-	-	△	△	△	△	○	△	
	改質ビークライト+高炉スラグ4000	×	△	○	○	△	△	△	○	-	◎	-	○	○	-	○	
	改質ビークライト+高炉スラグ6000	△	○	○	◎	◎(60%)	◎	○	-	-	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
	改質ビークライト+高炉スラグ8000	◎	○	○	◎	◎(60%)	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	-

(◎:極めて良好、○:良好、△:適用環境や要求性能による判断が必要、×:別途対策が必要、-:未実施)

シリーズ2

対象 構造物 (用途)	セメントの種類	強度発現特性			断熱 温度	収縮特性				耐久性										
		初期		中・長期強度		自己 収縮	乾燥収縮			中性化	塩害		凍害 (真水)		凍害 (塩水)		スケーリング 抵抗性			化学的 抵抗性
		1~7	7~28	91以降			W/B 40%	W/B 35%	W/B 40%	W/B 45%	未実施	W/B 40以下	W/B 45%	W/B 40以下	W/B 45%	W/B 40以下	W/B 45%	W/B 35%	W/B 40%	W/B 45%
PC構造物や 冬期施工	早強ポルトランドセメント	◎	◎	○	×	△	○	△	△	(◎)	△	△	◎	◎	○	△	△	△	○	(×)
	早強+高炉スラグ6000	△	○	◎	◎	△	○	○	△	(○)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△	(○)
	早強+シリカフェューム	◎	◎	◎	△	○	-	△	△	(○)	○	△	◎	◎	○	△	△	△	△	(△)
	早強+フライアッシュ	△	△	○	○	○	-	△	△	(○)	△	△	○	○	△	×	△	○	○	(△)

(◎:極めて良好、○:良好、△:適用環境や要求性能による判断が必要、×:別途対策が必要、-:未実施)

・要求性能およびLCCを考慮した適切な選択が重要

試験施工事例(1)

■改質セメントコンクリートの試験施工(橋梁地覆)

- ・早強セメントと高炉スラグ微粉末を組合せたコンクリート(W/B=40%)の性能評価

海岸線から50m程度の塩害対策S区分地域

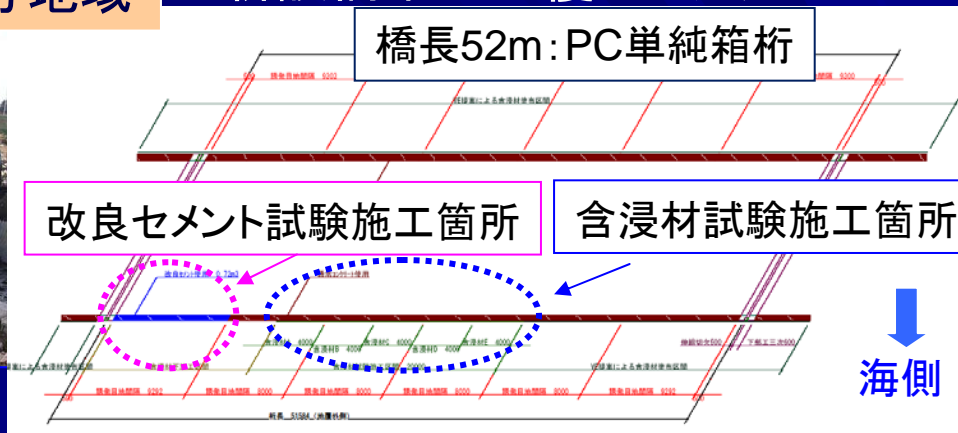


新設橋梁の地覆コンクリート

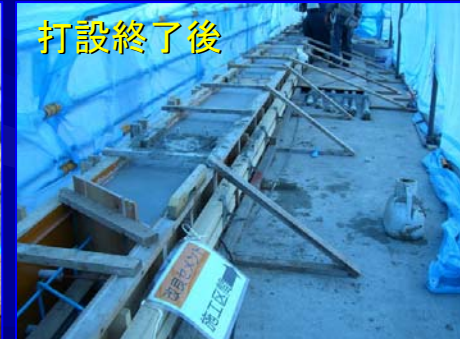
橋長52m: PC単純箱桁

改良セメント試験施工箇所

含浸材試験施工箇所



既設橋(供用38年)の地覆
コンクリート劣化状況



- ・ポンプ圧送性・・・脈動もなく良好(施工性の検証)
- ・耐久性に関する調査を継続

試験施工事例(2)

■改質セメントコンクリートの試験施工(皿形側溝)

- ・早強、普通セメントと高炉スラグ微粉末を組合せたコンクリートの性能評価

皿形側溝



U型トラフ



道路用縁石



護岸堤
模擬試験体



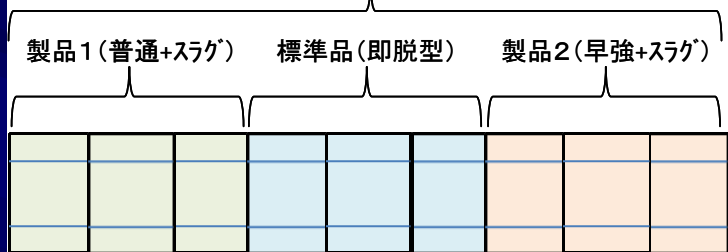
工場製品への適用性の確認

試験施工事例(2)

■改質セメントコンクリートの試験施工(工場製品)

- ・早強、普通セメントと高炉スラグ微粉末を組合せたコンクリートの性能評価

調査1回分(1年後回収)



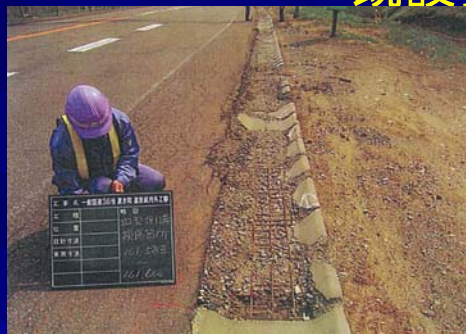
即脱製品

開発品



北海道の峠(6合目および7合目付近の登り車線側)

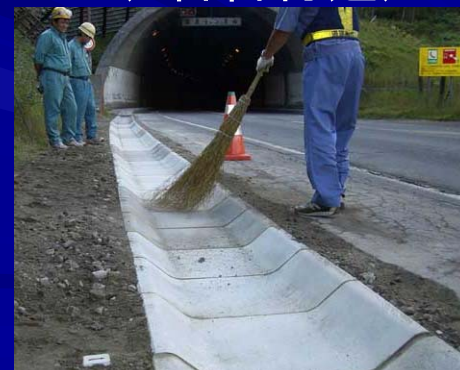
既設劣化状況



(6合目付近)



(7合目付近)



- ・耐久性に関する調査を継続(即時脱型製品との比較)

皿形側溝の試験施工前後

施工箇所①付近



施工箇所②

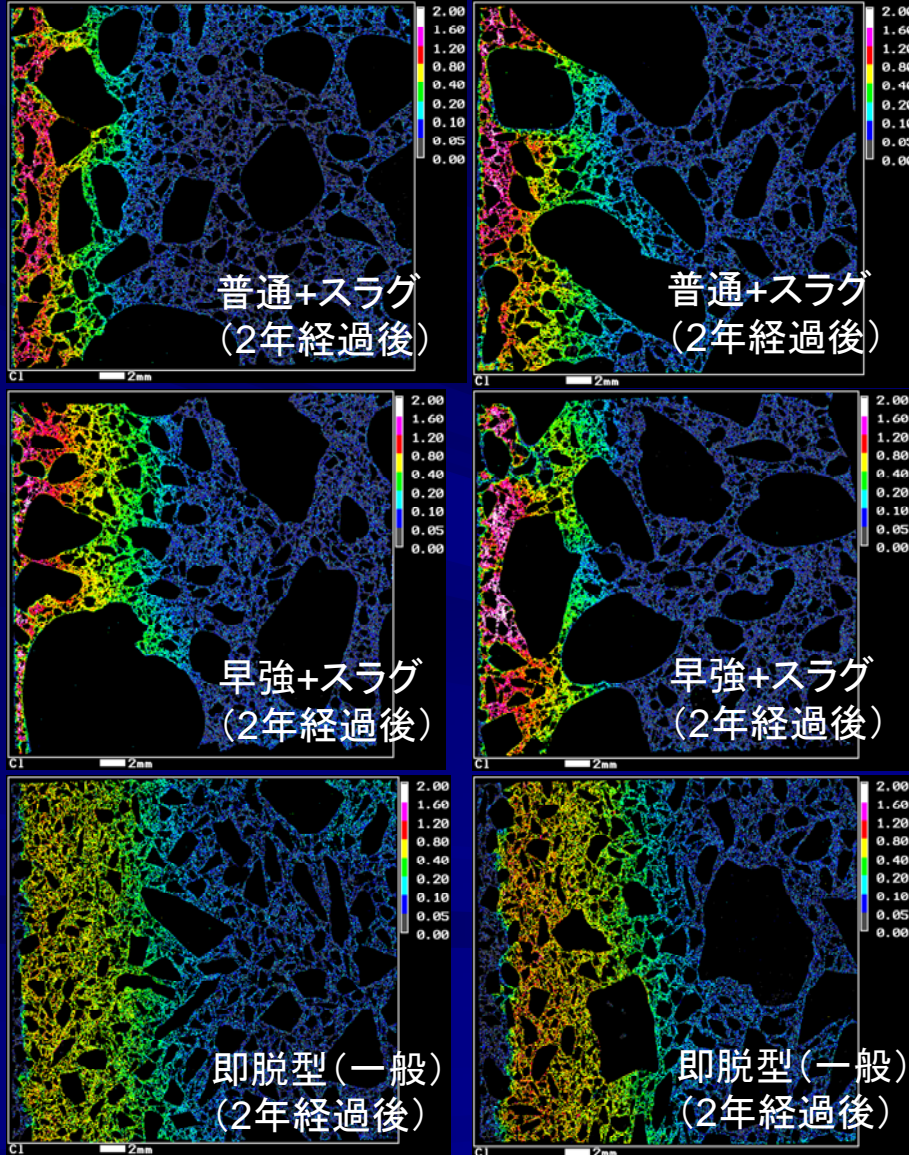


- ・冬期間は概ね雪に覆われている(雪の下は未確認)
- ・凍結防止剤の影響を受ける環境下にある

塩化物イオンの浸透状況（流込み型2年目）

7合目設置

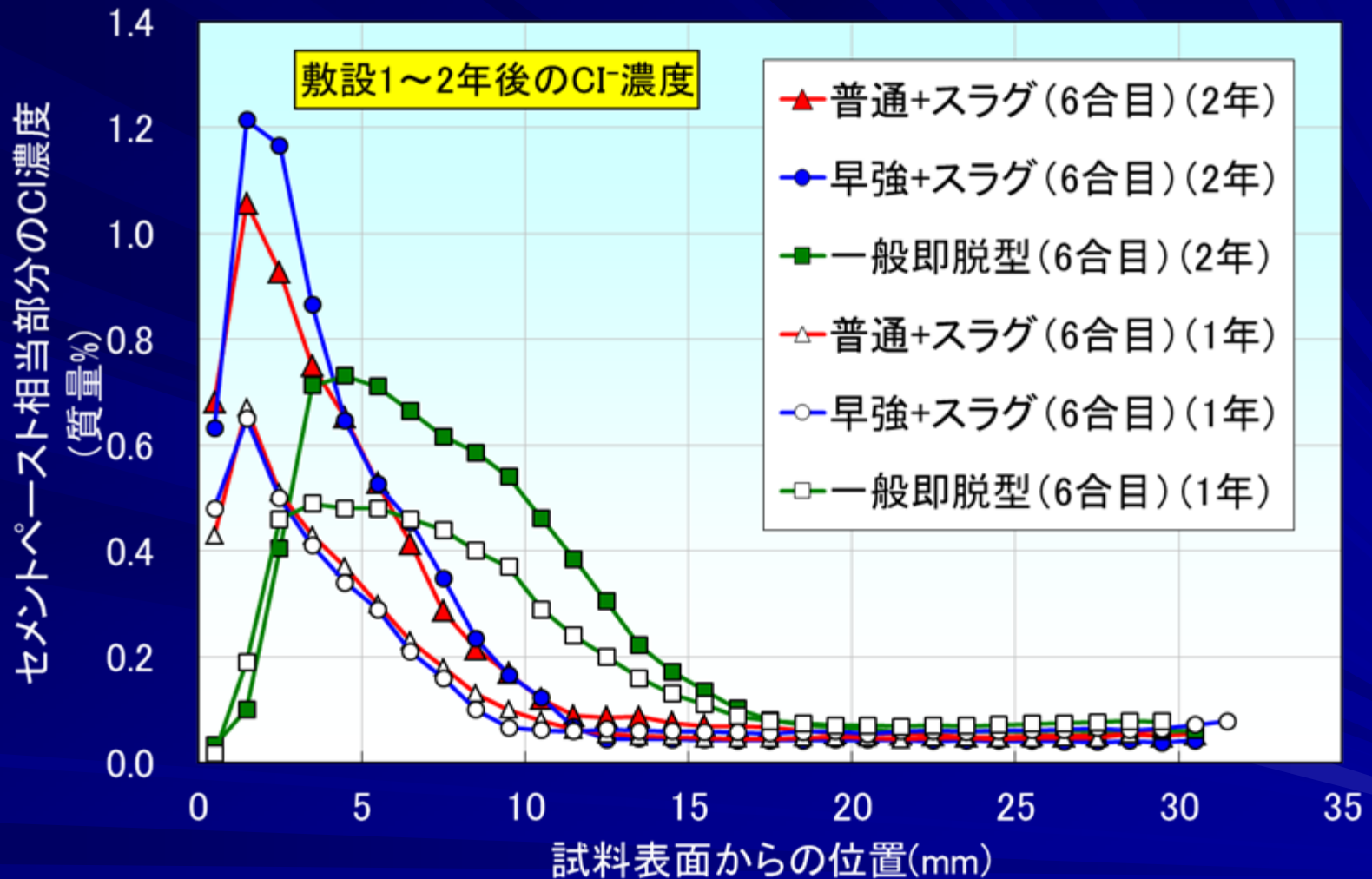
6合目設置



- 塩分浸透深さ
スラグ製品<即脱型
- 極表層部が低濃度
特に即脱型
→中性化の影響

皿形側溝製品上面(浸透面)

セメントペースト中の塩化物イオンの濃度分布²⁷



- ・経年的に表層部の塩分濃度が増加
- ・スラグ製品は一般即脱型より内部への浸透が少ない傾向

早強セメント+高炉スラグ6000(LCC試算例)

橋梁形式:ポストテンション方式Tげた橋(現場打ち施工)

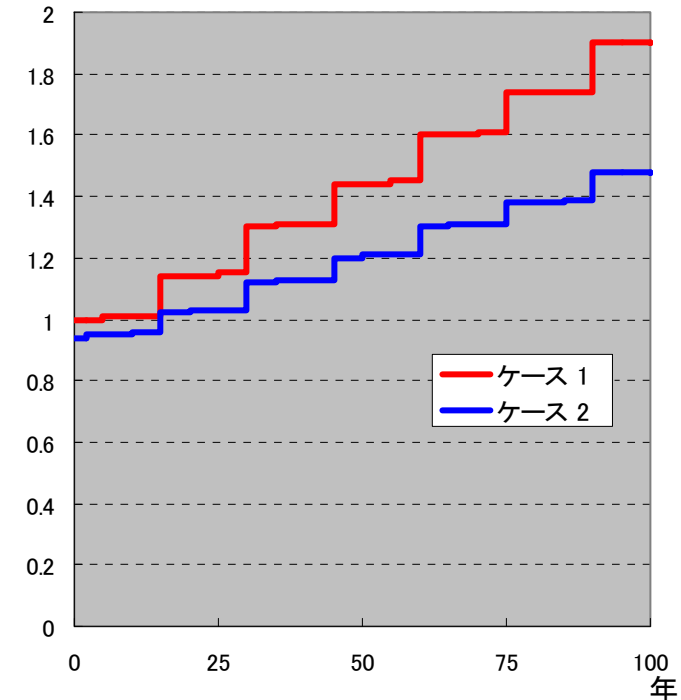
(改質セメントコンクリート単価:通常の1.2倍程度)

橋長	m	50
径間数	(-)	2
総幅員	m	10.7
排水柵の個数	個	2
計算期間	年	100

		ケース1(一部塗装併用)	ケース2(高耐久セメント)
環境区分		塩害対策区分S	塩害対策区分S
凍結防止剤		使用する	使用する
交通量		交通量普通	交通量普通
コンクリート強度 (N/mm ²)		$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$	$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$
コンクリート種類		標準(早強)コンクリート	改質セメント
かぶり (mm)		70mm	70mm
鉄筋		エポキシ鉄筋部分使用	普通鉄筋
PC鋼材縦締め		普通PC鋼材	普通PC鋼材
PC鋼材横締め		普通PC鋼材	普通PC鋼材
シース縦締め		ポリエチレンシース	ポリエチレンシース
シース横締め		ポリエチレンシース	ポリエチレンシース
表面塗装		桁端塗装	塗装無し
支承		ゴム支承 TYPEB	ゴム支承 TYPEB
地覆		高耐久地覆(ﾀｲﾌﾟ2)	高耐久地覆(ﾀｲﾌﾟ2)
高欄		コンクリート製壁高欄	コンクリート製壁高欄
舗装		普通アスファルト舗装	普通アスファルト舗装
橋面防水		シート防水	シート防水
排水柵		鋼製	鋼製

コスト係数

LCC試算結果



使用ソフト「新設PC橋のライフサイクルコスト」
 (株)CRCソリューションズ
 ((社)プレストレスト・コンクリート建設業協会監修)

初期コストで5%、100年後で20%程度のコスト縮減が可能

■改質セメントコンクリートの配合設計施工マニュアル（案）

第1章 総則

1.1 適用範囲

(1)この設計施工マニュアル(案)は、各種セメントおよび混和材の適切な組合せにより耐久性の向上を図る、改質セメントを用いたコンクリートの設計施工についての一般の標準を示すものである。このマニュアル(案)に示されていない事項は、土木学会コンクリート標準示方書および関連する施工指針等による。

(2)この設計施工マニュアル(案)における**混和材の置換率の範囲**は、各種混和材を用いた**混合セメントのB種相当を標準**とする。

1.2 用語の定義

改質セメント—各種セメントおよび各種混和材の種類および置換率を、コンクリートの要求性能に応じて適切に組み合わせ、従来の一般的なセメントよりも性能を向上させた結合材の総称

混和材—セメントあるいは骨材の一部を代替して用い、セメントとの使用により、ポゾラン反応あるいは潜在水硬性を有する無機質粉末。なお、本マニュアル(案)では、**高炉スラグ微粉末、シリカフュームおよびフライアッシュに限定**する。(膨張材は収縮抑制対策として別途定義)

■改質セメントコンクリートの配合設計施工マニュアル（案）

第2章 コンクリートの品質

2.1 総則

改質セメントを用いたコンクリートは、**高性能減水剤**または**高性能AE減水剤**によって、品質のばらつきが少なく、作業に適するワーカビリティを有するとともに、硬化後は所要の性能を持つものでなければならない。

2.2 セメントと混和材の種類および混和材置換率の選定

セメントと混和材の種類および混和材置換率は、その使用目的に応じて要求されるコンクリートの品質を満足するように適切なものを選定しなければならない。

各種結合材を用いたコンクリートの性能

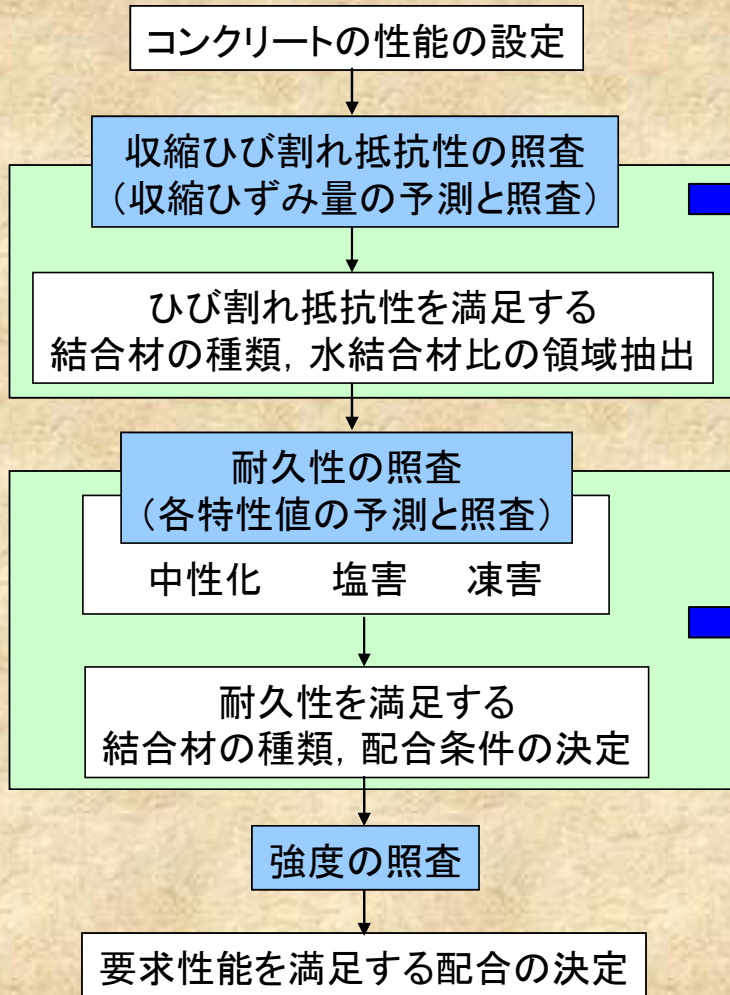
対象 構造物 (用途)	セメントの種類	強度発現特性			断熱 温度	収縮特性				耐久性										
		初期	中・長期強度			自己 収縮	乾燥収縮			中性化	塩害		凍害 (真水)		凍害 (塩水)		スケーリング ^g 抵抗性			化学的 抵抗性
		1~7	7~28	91以降			W/B 40%	W/B 35%	W/B 40%		W/B 45%	未実施	W/B 40以下	W/B 45%	W/B 40以下	W/B 45%	W/B 40以下	W/B 45%	W/B 35%	
PC構造物や 冬期施工	早強ポルトランドセメント	◎	◎	○	×	△	○	△	△	(◎)	△	△	◎	◎	○	△	△	△	○	(×)
	早強+高炉スラグ6000	△	○	◎	◎	△	○	○	△	(○)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△	(○)
	早強+シリカフェーム	◎	◎	◎	△	○	-	△	△	(○)	○	△	◎	◎	○	△	△	△	△	(△)
	早強+フライアッシュ	△	△	○	○	○	-	△	△	(○)	△	△	○	○	△	×	△	○	○	(△)

(◎:極めて良好、○:良好、△:適用環境や要求性能による判断が必要、×:別途対策が必要、※:検討中、-:未実施)

第3章 材料 → セメント、混和材(剤)に関する規定

■改質セメントコンクリートの設計施工マニュアル（案）

第4章 配合



配合設計フロー

ひび割れ抵抗性の照査

要求性能の決定
ひび割れ発生確率
ひび割れ指数の設定: I_{cp}

使用材料, 配合の選定
拘束応力, 引張強度の予測
→ひび割れ指数の算定: I_{cr}

No $I_{cr} \geq I_{cp} ?$
Yes

使用材料, 配合の抽出
耐久性の照査へ

拘束応力, 自由収縮ひずみ

$$\sigma_{st}(t) = \int \frac{E(t')}{(1+\phi(t,t'))} \lambda(t') d\varepsilon_r(t')$$

$$\varepsilon'_{as}(t) = \gamma \cdot \lambda \cdot \varepsilon'_{as0} [1 - \exp\{-k_1 a(t-t_s)^{k_2 b}\}]$$

$$\varepsilon_{ds}(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left(\frac{t-t_0}{\alpha + (t-t_0)} \right)^\beta$$

引張強度, ヤング係数

$$f_{tk} = 0.23 \times f'_{ck}{}^{2/3}$$

$$E_c(t) = k_1 \times k_2 \times 33500 \times (\gamma / 2.4)^2 \times (f_c(t) / 60)^{1/3}$$

耐久性の照査

中性化速度係数
 $a_p = k \cdot a_i$ (mm/√週) 屋外 k=0.08 屋内 k=0.14

$a_1 = -0.51\sqrt{f'(28)} + 4.92$ (mm/√週) ... 屋外25年, 屋内7年まで
 $a_2 = -0.14\sqrt{f'(91)} + 1.42$ (mm/√週) ... 上記以降

鋼材腐食発生限界深さ
 $y_{lim} = C_d - C_k$
 $y_d = \gamma_{cl} \cdot a_d \cdot \sqrt{t}$
 $a_d = a_p \cdot \beta_c \cdot \gamma_c$

$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0$
 y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ
 y_d : 中性化深さの設計値
 C_d : かぶりの設計値
 C_k : 中性化残り(mm) 10~25mm
 γ : 諸係数

ゴンペルツ曲線
 $DF = a \cdot b^x \exp(-c \cdot AIR)$

DF: 耐久性指数
 AIR: フレッシュコンクリートの空気量
 a: グラフのスケールに関する係数
 耐久性指数の上限値100とした
 b, c: グラフの形状を決定する係数
 $b = 1.0 \times 10^{-4}$, $C = 2.3$

耐久性指数85を満足する空気量
 5.8%以上 → 6%を目安
 耐久性指数70 → 4.7%以上
 耐久性指数60 → 4.2%以上

空気量と耐久性指数の関係

見かけの拡散係数への変換
 $D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e$

拡散係数による塩害照査
 $\gamma_{cl} \cdot C_d \cdot (1 - \exp(0.1 \cdot \alpha / 2 \sqrt{D_a \cdot t})) + C_{b,0} \leq 1.0$

D_e : 実効拡散係数(cm²/年)
 W/B: 水結合材比

■改良セメントコンクリートの配合設計施工マニュアル（案）

第5章 コンクリートの製造および打込み

貯蔵設備、計量、練混ぜ、運搬および打込みに関する基本的事項

第6章 養生

6.2 湿潤養生

混和材を用いたコンクリートは、特に、初期の養生が極めて重要
 →混合セメントB種の湿潤養生基準を標準とする

湿潤養生期間の標準

日平均気温	普通セメント	混合セメントB種	早強セメント
15°C以上	5日	7日	3日
10°C以上	7日	9日	4日
5°C以上	9日	12日	5日

第7章 工場製品

工場製品の製造および成形において、特に必要な事項

→コンクリートの品質(促進養生)、製造方法(流込み、即時脱型方式)

■特に留意すべき事項

- 各種セメントや混和材を用いたコンクリートの性能評価は、事前に試験練り等を行い確認することが原則
- 各種セメントや混和材の選定にあたっては、その供給量や品質を事前に確認するとともに、地域の状況により運搬や貯蔵に費用を要する場合もあるため、供給体制等も含めて確認しておく
- レディーミクストコンクリートや工場製品として実際に用いる場合には、あらかじめコンクリート工場との協議が必要（各種指定事項、製品の種類等）
- 高炉スラグ微粉末に添加される石こう量はJISの上限値の4%程度を推奨（初期強度発現および自己収縮の低減）
- 高性能（AE）減水剤あるいは（AE）減水剤の使用により凝結時間が遅れる傾向があるため、型枠や支保工にかかる圧力を考慮しておく
- 強度が早期に確保された場合でも、所定の養生期間は湿潤状態を保つ（特に寒中コンクリートとして施工する際は留意が必要）

改質セメントコンクリートの設計施工マニュアル(案)については、寒地土木研究所のホームページより無償で公開する予定(H24年度中)。

本技術に関するお問い合わせは、下記までお願いいたします。

寒地土木研究所 <http://www.ceri.go.jp/>

技術相談窓口

寒地技術推進室 TEL : 011-590-4050

FAX : 011-590-4048

MAIL : gi_jutusoudan@ceri.go.jp

研究チーム直通 (耐寒材料チーム)

TEL : 011-841-1719 (担当 : 吉田)