

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>

研究背景

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



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

研究背景

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)

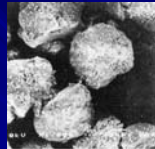
- ・耐久性(耐塩害性、耐凍害性等)
- ・ひび割れ抵抗性(乾燥、自己収縮)
- ・早期強度

- ・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_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
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熔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: Ca(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)
混和材	高炉B種セメント(BB): 4,280 (cm ² /g)
	高炉スラグ微粉末 4000(S4), 6000(S6), 7200(S8) (cm ² /g)

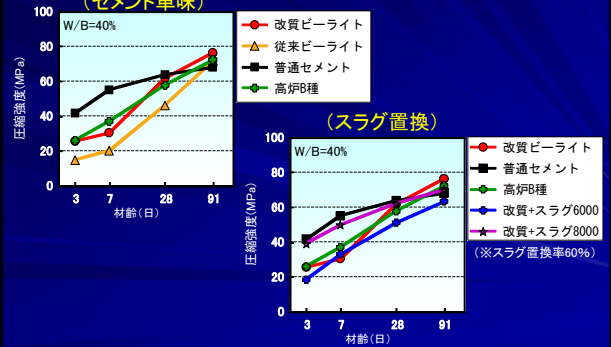
◎シリーズ2(上部工対応)

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)
	シリカフェューム(HSF10): 130,000 (cm ² /g)

物性 (強度、発熱、収縮特性)

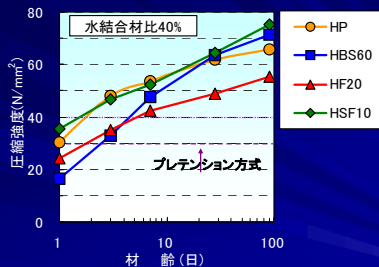
圧縮強度発現

シリーズ1(橋梁下部対象: W/B=40%) (セメント単味)



圧縮強度発現

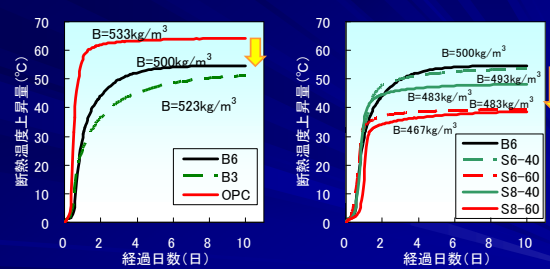
シリーズ2(上部工対象: W/B=40%)



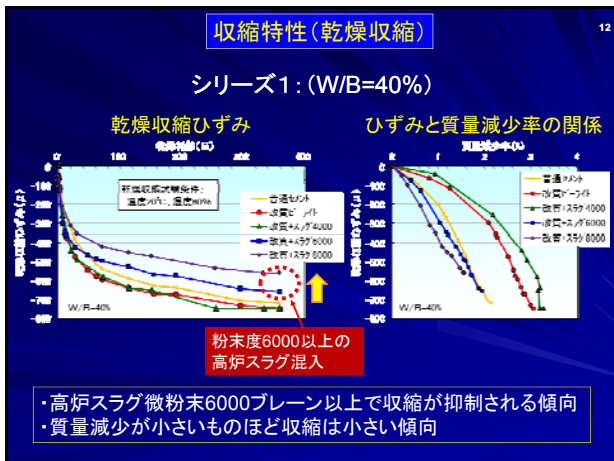
- ・いずれも一般的な設計基準強度(σ_{28}) 40N/mm²以上
- ・シリカフェュームを用いたケースは材齢初期より強度大
- ・高炉スラグは、材齢28日以降シリカフェュームと同程度

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)

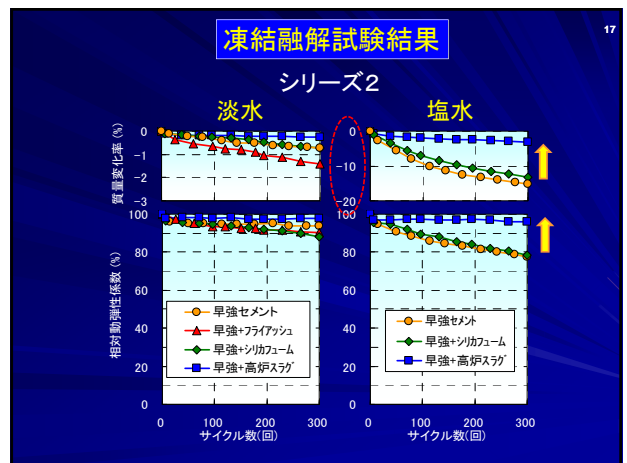
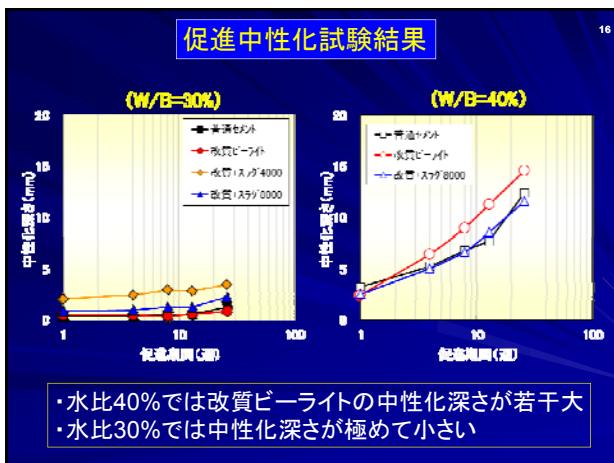
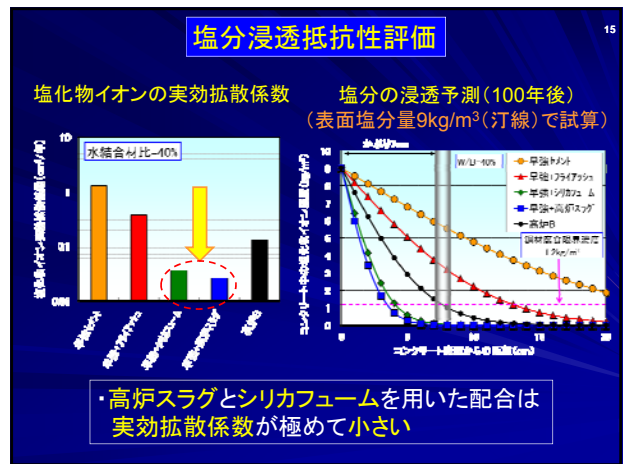
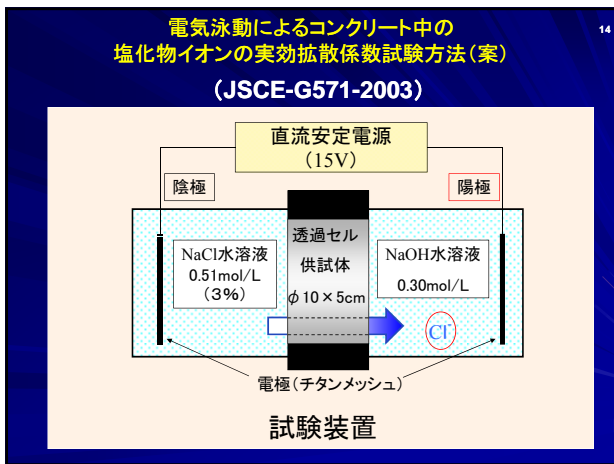


- ・低熱セメントとスラグの使用による水和熱の抑制



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)



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)~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→28日まで気中養生(相対湿度60%、温度20°C)

3% NaCl水溶液

試験水湛水

土手の据付け 1面凍結融解試験

スケーリング抵抗性

水結合材比=40%
 試験溶液
 3% NaCl溶液

● 改質ビークライト
 ▲ 従来ビークライト
 ■ 普通セメント
 ◆ 高炉B
 ▽ 改質+S6-40
 ◆ 改質+S6-60

高炉B種セメント

改質ビークライト+スラグ6000

従来ビークライト(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))

5%硫酸

● 普通セメント
 ● 改質ビークライト
 ▲ 改質+スラグ4000
 ■ 改質+スラグ6000
 ▽ 改質+スラグ8000

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 検査項目 (用途)	セメントの種類	凍結融解特性			収縮特性			耐久性			S100P 抵抗性	化学的 抵抗性	
		前期 1~7	中期 7~28	後期 28以降	自己 収縮 (W/B35)	乾燥 収縮 (W/B40)	中性化 率	塩害 抵抗性 (W/B40)	凍害 抵抗性 (W/B40)	硫酸 抵抗性 (W/B40)			
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	△	◎	△	△	△	-	△	◎	◎	◎	×	◎
	改質ビークライト系セメント	◎	◎	◎	△	△	◎	△	◎	◎	◎	△	△
橋梁、橋脚、 埋立などの大 規模構造物	改質ポルトランドセメント	△	◎	◎	△	△	-	△	◎	◎	◎	△	△
	改質ビークライト+高炉スラグ6000	△	◎	◎	△	△	◎	-	◎	-	◎	◎	-
	改質ビークライト+高炉スラグ6000	△	◎	◎	△	△	◎	-	◎	◎	◎	◎	◎
	改質ビークライト+高炉スラグ8000	△	◎	◎	△	△	◎	-	◎	◎	◎	◎	◎

シリーズ2

対象 検査項目 (用途)	セメントの種類	凍結融解特性			収縮特性			耐久性			S100P 抵抗性	化学的 抵抗性	
		前期 1~7	中期 7~28	後期 28以降	自己 収縮 (W/B35)	乾燥 収縮 (W/B40)	中性化 率	塩害 抵抗性 (W/B40)	凍害 抵抗性 (W/B40)	硫酸 抵抗性 (W/B40)			
一般 構造物 の 主要部材	普通ポルトランドセメント	◎	◎	△	△	△	◎	◎	△	△	◎	△	△
	高炉B種セメント	△	◎	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	改質+高炉スラグ8000	△	◎	◎	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	改質+高炉スラグ4000	◎	◎	◎	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

● 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

改質セメント試験施工箇所

含浸材試験施工箇所

施工箇所

既設橋(供用38年)の地覆
 コンクリート劣化状況

試験施工状況

施工量1.8m³

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(血形側溝)
 ・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

血形側溝

U型トラフ

道路用縁石

護岸堤
 模倣試験体

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

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

製品1(普通+スラグ) 標準品(即脱型) 製品2(早強+スラグ)

即脱製品 開発品

(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

普通+スラグ(2年経過後) 普通+スラグ(2年経過後)

早強+スラグ(2年経過後) 早強+スラグ(2年経過後)

即脱型(一般)(2年経過後) 即脱型(一般)(2年経過後)

・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

セメントペースト中の塩化物イオンの濃度分布

・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
橋幅員	(m)	7
PC橋脚	本	10
橋水の長さ	m	2
計算期間	年	100

コスト係数 LCC試算結果

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

改質セメントー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

混和材ー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、ポズ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、シリカフェ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

評価項目 (単位)	セメントの種類	気象環境特性		収縮特性				耐久性				その他		
		初期	中長期強度	自由収縮	乾燥収縮	中性化	塩害	凍害	凍融	凍害	凍融		凍害	
PC構造用	早強ポルトランドセメント	◎	◎	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	早強高炉スラグ微粉	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	早強シリカフェース	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
RC構造用	早強ポルトランドセメント	◎	◎	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	早強高炉スラグ微粉	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

(◎:極めて良好, ◎:良好, △:適用環境や要求性能による判断が必要, ×:用途別適合が必要, ※: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

ひび割れ抵抗性の照査

コンクリートの性能の設定

収縮ひび割れ抵抗性の照査 (収縮ひび割れ量の予測と照査)

ひび割れ抵抗性を満足する結合材の種類、水結合比の領域抽出

ひび割れ抵抗性の照査 (各特性値の予測と照査)

中性化 塩害 凍害

耐久性を満足する結合材の種類、配合条件の決定

強度の照査

要求性能を満足する配合の決定

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

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

引張強度、ヤング係数
 $f_{ct} = 0.23 \sqrt{f_{cm}}$

使用材料、配合の抽出
耐久性の照査

耐久性の照査

中性化 塩害 凍害

ひび割れ抵抗性の照査

要求性能を満足する配合の決定

配合設計フロー

■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℃以上	5日	7日	3日
10℃以上	7日	9日	4日
5℃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: gijutusoudan@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)