

コンクリート橋梁の耐久性向上に関する最近の技術開発動向

 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

1

(1) PC構造物の高耐久性化技術

これまでの劣化事例の問題点から学んだコンクリートの高耐久性技術を紹介する。

材料（鋼材、コンクリート、鉄筋など）の面から、現在および現在進行形の技術を紹介し、コンクリート構造物の高耐久性化を実現する。

①エポキシ塗装鋼材・非鉄シース

- ・エポキシ鉄筋
- ・エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線
- ・非鉄シース

②セメント混和材料・高強度コン

- ・高炉スラグ微粉末、フライアッシュ
- ・膨張材、収縮低減剤、高性能AE減水剤
- ・超高強度コンクリート

③非鉄鋼材

- ・炭素繊維補強材、炭素繊維緊張材

2

1. エポキシ塗装鋼材

- 塩害地区における劣化の特長として、コンクリート中の鋼材（鉄筋およびPC鋼材）の腐蝕が挙げられる。
- その鋼材の直接的な耐久性向上対策として、以下の2件を報告する。

1-1. エポキシ塗装鉄筋

1-2. エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線(1)

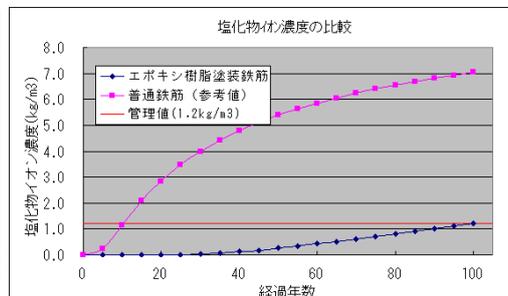
1-2. エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線(2) (プレグラウトPC鋼材)

3

1-1. エポキシ塗装鉄筋

- 塩害地区における標準鉄筋として、採用済み。
- 付着性能の高いタイプ(塗装表面の粗面仕上げ)も、開発済。

かぶり位置における 塩化物イオン濃度計算例



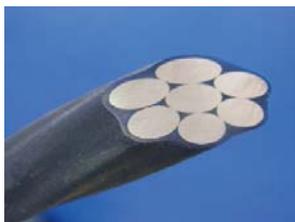
コンクリート表面における塩化物イオン濃度 9.0kg/m³
W/C=43%
かぶり位置 70mm とした算出例 4
(土木学会式に準拠)

1-2. エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線(1)

- 塩害地区におけるPC構造物で、さらなる高耐久性を実現。
- 道示標準(PEシース+裸鋼材)以上の耐久性に対する要求に対応。
- NEXCO物件の外ケーブル構造で、採用多数あり。



標準型



付着型

塩害地域のプレテンション用や
内ケーブルへの適用



PE被覆型

紫外線を直接受ける部位や
厳しい塩害地域への適用

1-2. エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線(2)



プレグラウトPC鋼材
(シングルストランド鋼材で適用)

連続的に形成された**高密度ポリエチレンシース**と**エポキシ樹脂**により高耐食性、高耐久性を実現

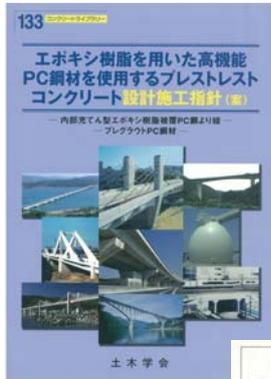
土木学会 コンクリートライブラリー「エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案)」(2010年8月)に適合



プレグラウトPC鋼棒
(PC鋼棒)
施工実績あり

プレグラウトPC鋼材の今後の課題
主ケーブルとして一般的に使用頻度の高い
12s12.7、12s15.2ケーブルに未対応

1-2. エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線(3)



プレグラウトPC鋼材のプレテンション桁への適用

→土木学会よりH22年8月発刊

→鋼材を「付着定着」させる場合について
明文化

→コンクリートの温度管理を行えば、使用可能に。

5.9.2.4 緊張作業

(1) 示方書〔施工編：特殊コンクリート〕12.6.4 に準じて普通 PC 鋼材と同様の緊張管理を行い、緊張材に与えられる引張力が所定の値を下回らないように緊張の管理を行わなければならない。また、緊張力の解放は、緊張材周辺のコンクリート温度が 65℃以下となった後に行うことを原則とする。

(2) 緊張後、ECF ストランドの切断面に対しては 5.10.2 に示す補修材料を用いて防錆処理しなければならない。

7

1-2. エポキシ樹脂被覆・塗装PC鋼より線

■使用例

- 塩害S地区のT桁橋に、耐久性向上対策として、
「PEシース+裸PC鋼材」 → 「PEシース+エポ鋼材」
「主ケーブル定着体」 → 「エポキシ粉体塗装定着体」



←エポキシ粉体塗装仕様定着体



←PEシース

エポ鋼材緊張完了後→
余長切断後



8

2. セメント混和材料・高強度コンクリート

•コンクリートそのものを、耐久性の高い密実なコンクリートとする為の方策を、以下に4件報告する。

2-1. 高炉スラグ微粉末

2-2. フライアッシュ

2-3. 膨張材、収縮低減剤、高性能AE減水剤

2-4. 超高強度コンクリート

9

2-1. 高炉スラグ微粉末(1)

•橋梁上部工では、普通セメントおよび早強セメントの使用を標準とし、**結合材**として用いることの出来る混和材として、膨張材やフライアッシュとともに**高炉スラグ微粉末**が示された。

～「九州地区における土木コンクリート構造物の設計・施工指針(案)」平成20年4月

•JIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)は、粉末度に
応じ、以下の3種類が規定されている。

高炉スラグ微粉末4000(比表面積3000~5000cm²/g),

高炉スラグ微粉末6000(比表面積5000~7000cm²/g),

高炉スラグ微粉末8000(比表面積7000~10000cm²/g)

•混和材としてセメントを置換し、生コン工場で練り混ぜる。

•橋梁上部工については、**高炉スラグ微粉末6000を50%置換**
した使用実績が最も多い。

•NEXCO西日本 PC床版では、上記を標準配合としている。

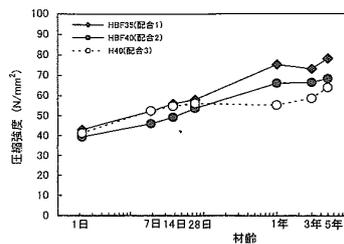
10

2-1. 高炉スラグ微粉末 (2)

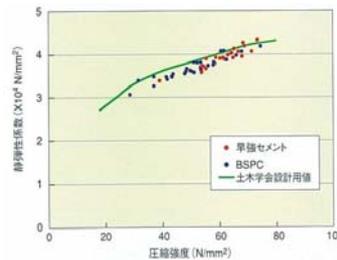
■ 特長 (高炉スラグ微粉末6000 置換時)

・圧縮強度・弾性係数

高炉スラグを混和した場合、水和反応が徐々に進行するため、早強セメント単味のコンクリートに比べ、初期強度は若干低いですが、**長期強度は高くなる**。弾性係数については、差異はほぼ無い。



(a) 暴露5年 (試験I-2)
圧縮強度の経時変化



圧縮強度と弾性係数の関係

11

2-1. 高炉スラグ微粉末 (3)

・クリープ・乾燥収縮

クリープは、早強単味と同等である。

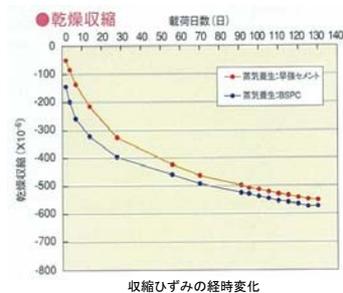
コンクリートの収縮(自己収縮+乾燥収縮)は、早強単味に比べ、**自己収縮が大きくなるため、初期の収縮は大きくなるが、長期的には同程度となる**。

● クリープ係数

配合	材齢(日)	7	28	91
早強セメント		1.3	1.6	1.7
BSPC		1.1	1.4	1.6

記号の説明

早強セメント：早強ポルトランドセメント
BSPC：早強ポルトランドセメント+
高炉スラグ微粉末6000(50%置換)



収縮ひずみの経時変化

12

2-1. 高炉スラグ微粉末 (4)

・塩化物イオンの浸透抑制効果

5年間の暴露試験結果から100年後の塩化物イオンの浸透深さを試算すると、早強単味に比べ、**約60%**であった。



暴露試験結果と浸透深さの試算

13

2-1. 高炉スラグ微粉末 (5)

・アルカリ骨材反応抑制効果

セメントの50%を、アルカリ分の少ない高炉スラグ微粉末に置換することによる**希釈効果**に加え、水溶液中のアルカリ分が反応性骨材より結合し易い高炉スラグと結合し、**非膨張性の反応性物質**が生成される。

反応性骨材を使用した5年間の暴露試験では、早強単味に比べ**約1/8の膨張量**であった。



暴露試験体の膨張量測定結果

14

2-1. 高炉スラグ微粉末(6)

・中性化深さ

中性化深さについては、**無混和に比べ多少大きく**、粉末度が低い(粗い)ほど、また置換率が高いほど大きくなる。

W/B57% の場合の置換率50%と無混和を比較すると、**約2倍の中性化深さ**とする報告がある。

ただし、一般的な上部工構造で使用するW/B43%の場合の100年後の中性化深さは、**5mm程度**であり、仮に2倍の**10mm**となったとしても、上記内容は、**耐久性上問題とならない範囲**である。

15

2-1. 高炉スラグ微粉末(7)

・養生

高炉スラグを用いたコンクリートは、初期養生が耐久性に影響するため、**無混和のコンクリートに比べ養生期間を長く必要とする**。(自己収縮ひずみは、早強セメント単味よりも大きいため、養生期間は長めに取る必要はある。)

(普通ポルトランドセメントと組み合わせた水結合材比が50%程度の場合)

置換率(%)	30~40		50		55~70	
	高炉スラグ微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 5000	高炉スラグ微粉末 8000	高炉スラグ微粉末 4000	
日平均気温(℃)						
17	6日以上	7日以上	7日以上	6日以上	8日以上	
10	9日以上	10日以上	9日以上	8日以上	11日以上	
5	12日以上	13日以上	12日以上	10日以上	14日以上	

養生日数の目安

16

2-1. 高炉スラグ微粉末 (8)

•環境に優しい(エコ)

高炉スラグ微粉末は、鉄鋼を製造する際に排出される副産物であり、資源のリサイクルという観点から有効である。

高炉スラグ微粉末はエコマーク対象商品である。



17

2-1. 高炉スラグ微粉末

•施工例(5径間連続中空床版橋)



•施工例(PC床版取り替え工事)



18

2-2. フライアッシュ(1)

•フライアッシュは、石炭火力発電所で微粉炭を燃焼した際の燃焼ガスから集塵機で採取される球状微粒子の石炭灰である。

•コンクリートに混和することで、

「流動性の改善及び単位水量の減少」

「水和熱による温度上昇の抑制」

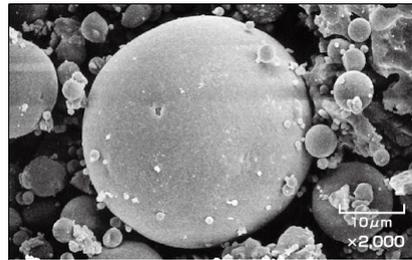
「長期強度の増進」

「乾燥収縮の減少」

「水密性および耐久性の向上
(塩分浸透抵抗性の向上)」

「アルカリ骨材反応の抑制」

などの効果があることが知られている。



フライアッシュ電子顕微鏡写真(2,000倍)
(日本フライアッシュ協会HPより)

19

2-2. フライアッシュ(2)

•橋梁上部工への適用という観点からは、「初期強度の発現が遅い」という特質も併せ持つため、それほど進んでいない。

•沖縄県伊良部大橋(写真)では、下部工にはFAC(フライアッシュコンクリート)が使用され耐久性向上に繋がっている。

上部工では、初期強度発現の関係上、FACは使用していないものの、ワーカビリティの向上を図るため、細骨材を22kg/m³だけFAに置換して用いられている。

•一方で、プレテンション桁(工場製品)へ適用するべく、開発・研究も進められている。工場では、蒸気養生を行う事が出来るため、養生方法によっては早期強度の改善を計る事が可能となりつつある。



20

2-3. 膨張材、収縮低減剤、高性能AE減水剤(1)

■膨張材

•膨張材の使用目的は、コンクリートの自己収縮などの初期の収縮を補完して**収縮自体の低減**やケミカルストレスを付与して収縮ひずみを低減することである。通常使用されている、コンクリート1m³当り、20kg/m³の使用で、**150μ程度**の収縮低減効果があると考えられる。

$\epsilon_{ex,\infty}$: 膨張ひずみの終局値 (×10⁻⁶)

解説表-4.3.10 膨張ひずみの近似式の各係数

セメントの種類	$\epsilon_{ex,\infty}$	a_{ex}	b_{ex}	$t_{ex,0}$
普通ポルトランドセメント	150	0.69	1.11	0.30
中庸熟ポルトランドセメント	220	0.46	1.49	0.30
低熟ポルトランドセメント	315	0.21	2.51	0.35
早強ポルトランドセメント	165	0.45	1.38	0.20
高炉セメントB種	145	0.27	1.53	0.30

ひび割れ制御指針 2008(日本コンクリート工学協会)

21

2-3. 膨張材、収縮低減剤、高性能AE減水剤(2)

■乾燥収縮低減剤

•乾燥収縮低減剤とは、コンクリート内部の空隙水(毛細管内部の自由水)の表面張力を低下させる事によって、乾燥時に生じる収縮量を低減する事の出来る化学混和剤

•一般的に、収縮低減剤を使用しない場合より**15~30%**の収縮ひずみを低減する。

•凍結融解抵抗性に若干の不安がある。
→使用する地域を考慮

•圧縮強度が低下する場合もある。
→必ず試験配合により確認

22

2-3. 膨張材、収縮低減剤、高性能AE減水剤(3)

■高性能AE減水剤

- 高性能AE減水剤とは、「**空気連行性を持ち、AE減水剤よりも高い減水性能および良質なスランプ保持性能を持つ混和剤**」と定義されています。
- 「**密実**」で「**施工性の良い**」コンクリートを打設するための混和剤と言えます。
- 単位水量の大幅な減少
- コンクリートの粘性の低減
- スランプの保持
- 水密性の向上

23

2-4. 超高強度コンクリート(1)

■超高強度繊維補強コンクリート

- 超高強度コンクリートに関して、「**超高強度繊維補強コンクリート**」について報告する。
- 「**超高強度繊維補強コンクリート**」とは、圧縮強度の特性値が**150N/mm²以上**、ひび割れ発生強度の特性値が**4N/mm²以上**、引張強度の特性値が**5N/mm²以上**の繊維補強を行ったセメント質複合材であり、**高強度、高じん性、高耐久性**を実現している。
- 水セメント比が**20%以下**と小さいため、優れた**中性化抵抗性、凍結融解抵抗性**、および**塩分浸透抵抗性**が得られる。
- 粗骨材を使用しないことから、流動性がよく、施工性が優れており、優れた充填性を有している。

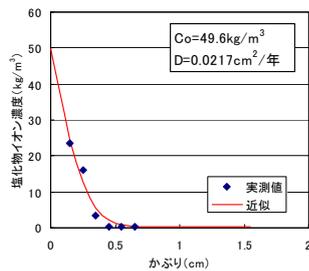


24

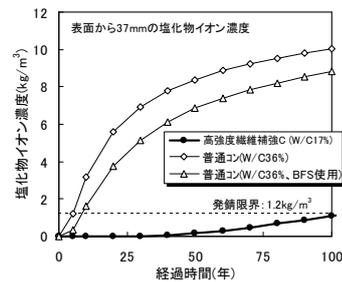
2-4. 超高強度コンクリート(2)

■ 塩化物拡散係数 (塩分浸透抵抗性)

- 実験結果による塩化物拡散係数 $D_d=0.0217\text{cm}^2/\text{年}$ となり、普通コンクリート使用($W/C=36\%$)の場合の $0.463\text{cm}^2/\text{年}$ の約 $1/20$ の結果となっている。
- 強度、じん性などとともに、特筆すべき耐久性能を表している。



塩化物イオン濃度の実測値と
回帰結果(浸漬期間1.08年)



塩化物イオン濃度の計算値

かぶりが
37mmあれば、
100年後に発
錆限界に達し
ない事を表し
ている。

25

3. 非鉄鋼材

- 非鉄鋼材として、炭素繊維補強材(緊張材)を紹介する。

3-1. 炭素繊維補強材、炭素繊維緊張材

26

3-1. 炭素繊維補強材、炭素繊維緊張材

- 炭素繊維複合材ケーブルとして、「錆びない材料」、「緊張可能」の特性を利用し、多様な用途に用いられている。



27

■非鉄鋼材の補強材としての使用(1)

- 「鋼材の腐蝕」が懸念される箇所に、補強材として使用された例をしめす。

- 塩害地区における箱桁下床版部下面の補強材として使用した例。

塩害S地区は、エポ鉄筋を使用しているものの、純かぶりが70mmとRC床版厚(250mm程度—横方向設計)に対して、非常にかぶりの比率が大きい部材であり、ひび割れ防止対策として配置された。



28

■非鉄鋼材の補強材としての使用(2)

- 沓座モルタル内の補強筋の代用として使用された例。**
沓座モルタルは、水セメント比が比較的小さな無収縮モルタルで施工される為、耐久性は高いものの、純かぶりが20～30mmと小さいため、補強鉄筋の代わりに採用された例である。



29

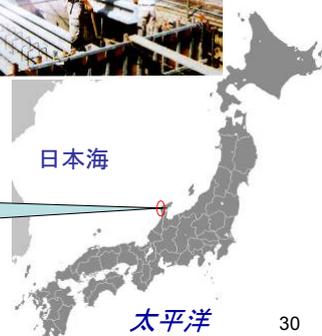
■緊張材としての使用

・プレテンション補強コンクリート橋



PC緊張材として使用された**世界初の実橋**
新宮橋 **1988年10月** (日本)

石川県
羽咋町



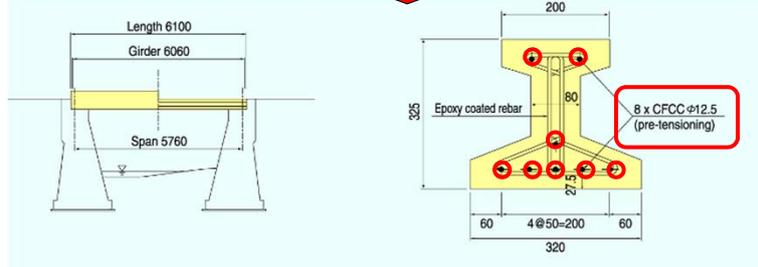
30

コンクリート橋における炭素繊維複合材ケーブルの適用
（従来のRC橋との比較）

架替え前のRC橋の状況 [建設後 20年経過]



新しいPC橋に架替え



31

コンクリート橋におけるCFCCの適用（従来のRC橋との比較）

架替え前のRC橋の状況 [建設後20年経過]



CFCCを適用した新しい新宮橋 [建設後20年経過]

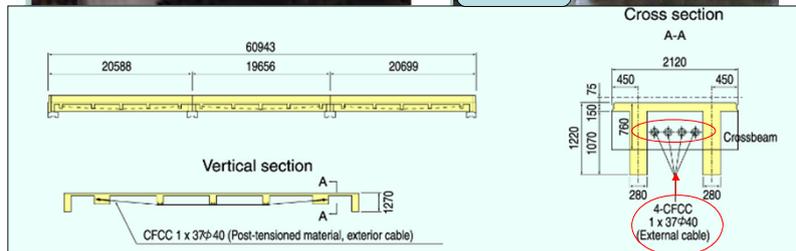


32

・外ケーブル・ポストテンションケーブルへの適用

Bridge Street Bridge 2002年5月 (米国ミシガン州サウスフィールド市)

凍結防止剤の影響により補強鋼材が錆びて早期劣化した既設橋の架け替えに、採用された。



33

・プレキャストPC床版への適用

第4港湾建設局 葛葉岸壁棧橋床版 1993年3月



使用材料

CFCC 1 × 7 12.5 φ、CFCC U5.0 φ

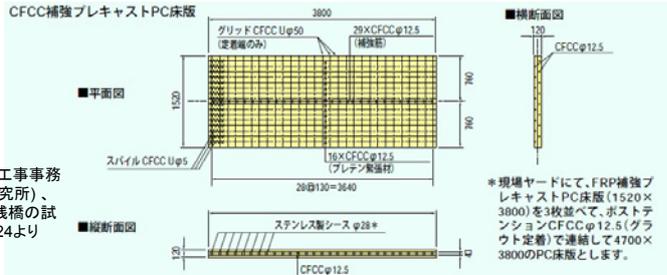
補強材用途

プレキャストPC床版のプレテンション緊張材
PC床版連結材 (ポストテンション緊張材、グラウト定着)
緊張材端部補強 グリット筋、スパイラル筋

腐食の心配が無く、かぶりを通常の70mmから38.5mmに小さく出来、支保工なしで施工の合理化を図ることが出来た



片岡真二(第4港湾建設局北九州港工事事務所長)、清宮理(運輸省港湾技術研究所)、他:「炭素繊維で補強されたCFRP棧橋の試験施工」、橋梁、1993.5、pp.19-24より



(2) 長寿命化のための方策例

予定供用期間内での安全性, 使用性, 第三者影響度, 美観・景観を保持できる耐久性能を確保する

上記の耐久性能に対して、ライフサイクルコスト (LCC) を最小にするような構造計画を講じる

コンクリート自体の品質向上

- ・自己充てん型の高流動コンクリート
- ・膨張コンクリート(PCa床版の間詰め等)

維持管理(点検・補修)が容易

- ・外ケーブル構造
- ・多径間連続構造(ノージョイント)

劣化因子を侵入させない

- ・コンクリートの表面含浸材
- ・マルチレイヤープロテクション

劣化因子が侵入しても大丈夫

- ・ステンレス鉄筋
- ・連続繊維緊張材

35

(1) 耐久性を高め、維持管理に配慮した設計

- ・締固めを容易とし、飛来塩分の付着が少ない隅角部を少なくした**主桁形状**の採用
- ・**伸縮装置の少ない**連続構造の採用
- ・**支承数の少ない**ラーメン構造の採用
- ・**外ケーブル構造**の採用
- ・防水性、ひび割れ追従性、不陸に対する施工性に優れた**橋面防水**の設置
- ・**PCプレキャスト製品**の積極的な採用

36

(2) 耐久性を高め, 維持管理に配慮した事例

①劣化抵抗性のある材料の使用

■ステンレス鉄筋(1)

地覆部埋込鉄筋に**ステンレス鉄筋**を適用。

・古宇利(こうり)大橋



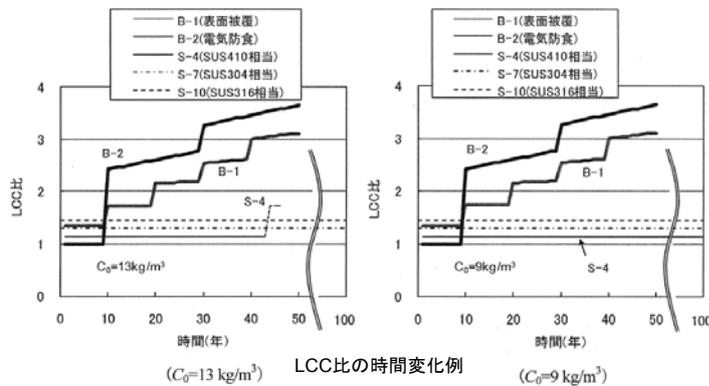
・伊良部大橋 (施工中)



■ステンレス鉄筋(2)

■ステンレス鉄筋 のLCC試算

ステンレス鉄筋の種類	腐食発生限界塩化物イオン濃度(推奨値)(kg/m ³)	鉄筋との価格比較(目安)
SUS304-SD	15	7倍
SUS316-SD	24	10倍
SUS410-SD	9	4倍

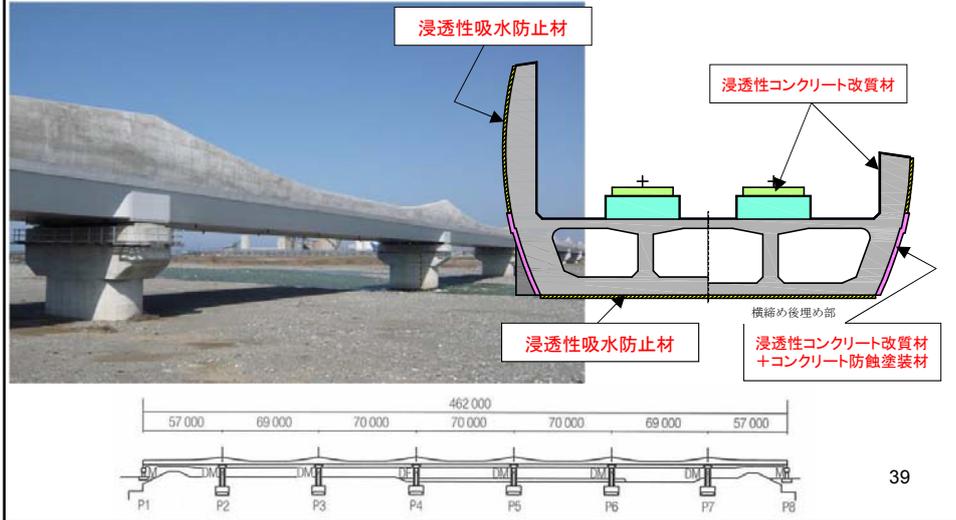


(土木学会:ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)より)

②劣化因子を入れない材料の使用

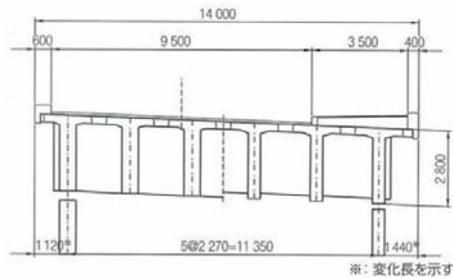
■コンクリートの表面含浸材

姫川橋りょうの防水工（新設時）

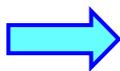


39

■多重防錆の適用事例 —土屋大橋—

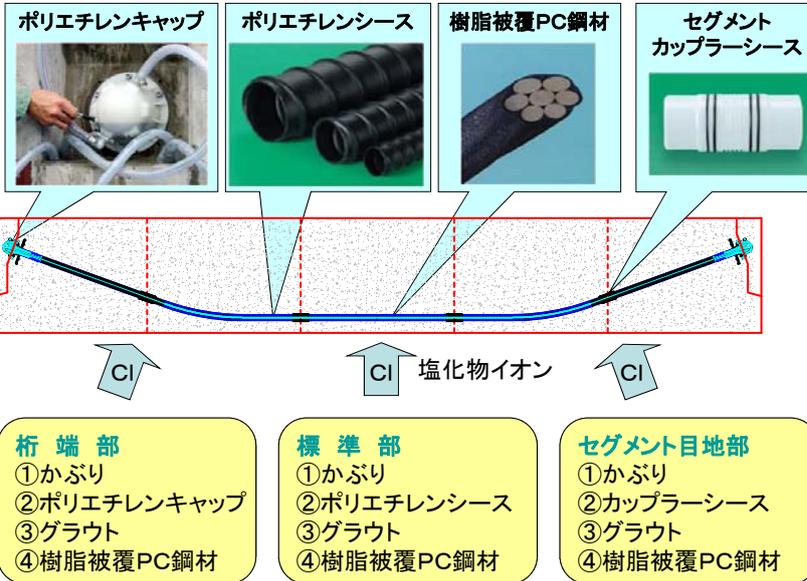


塩害対策区分
Sの海上橋



高耐久性材料を使用した
多重の塩害対策
(マルチレイヤープロテクション) 40

多重の塩害対策(マルチレイヤープロテクション)

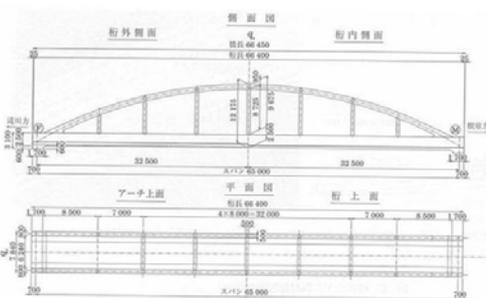


41

③高品質・高耐久性の材料の使用

自己充てん型高強度高耐久コンクリートの適用事例

—JR 根室本線 星が浦海岸通架道橋—



42

塩害対策 & 高耐久化 適用事例

塩害対策

- コンクリートの水セメント比: 40 % 以下に制限
- かぶり: 補剛桁(PC部材) 50 mm、
アーチリブ(RC部材) 60 mm
- 鋼製鉛直材: 溶融亜鉛メッキ + 塗装で、二重防錆

高品質な施工および高耐久化

- 自己充填型高強度高耐久コンクリートを採用
- 配合はASR抑制効果のある高炉セメントB種を基本
- 高炉セメントによる収縮の抑制のため膨張材を添加

43

■おわりに

様々な対策を施す事で、コンクリート橋は、さらなる耐久性の更なる向上をはかる事が可能であり、既に採用事例も存在している。

44