

# コンクリート構造物の 補修・補強のポイント



## 用語の定義

- ・補修  
耐久性を回復するための対策  
【耐荷力を回復するための対策は含まない】
- ・補強  
耐荷力の向上を図るための対策

## 今日話題

- ・コンクリート構造物の補修  
構造物の詳細調査  
劣化原因の把握と補修法  
中性化、塩害、ASR
- ・コンクリート構造物の補強  
補強が必要となる原因の確認  
補強方法について

## 1. 構造物の点検調査



# 1. 構造物の点検調査

## ・橋梁点検

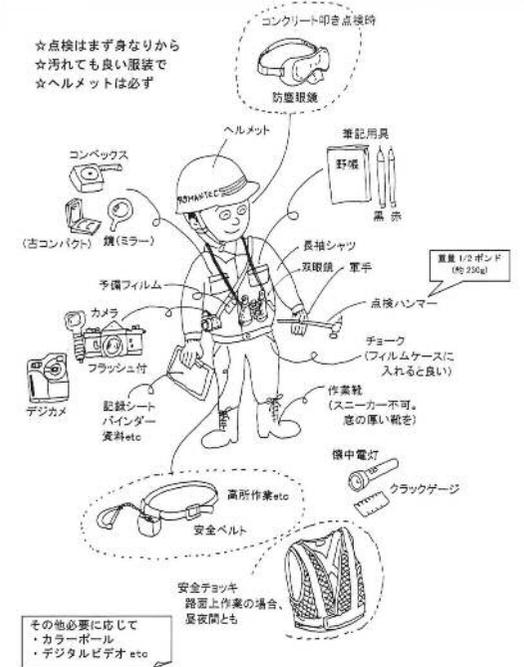
橋梁の変状などを把握、診断を行い補修・補強の必要性および対策時期の判断をするために  
行う

## ・詳細調査

補修補強を行うための劣化・損傷状況を把握  
するために行う

# 調査準備

まずは  
近接目視点検  
・変状から詳細  
調査、試験項目を計画



## 計画・準備

既往資料の整理  
調査・点検・補修補強設計

## 現地調査

- 外観調査
- はつり調査
- コア採取
- 各種非破壊試験
- 構造物内部観察
- ひび割れの変化
- 変位、応力等計測
- その他

## 室内調査

- 圧縮強度・静弾性係数試験
- 塩分分析
- X線回折
- 電子顕微鏡観察
- 電子線マイクロアナライザー (点、線、面分析)
- 中性化測定
- その他

## 評価・解析

- 劣化原因の検討
- 劣化予測

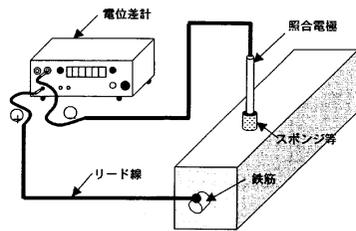
## 維持管理計画

- 対策の要否検討
- 補修・補強設計

## 非破壊検査方法と得られる情報

調査方法	得られる情報
反発度の基づく方法 反発硬度法	・コンクリートの圧縮強度
弾性波を利用する方法 打音法 超音波法 衝撃弾性波法 アコースティック・エミッション (AE法)	・コンクリートの圧縮強度・弾性係数などの品質 ・ひび割れ深さ ・うき、剥離、内部欠格 ・厚さなどの部材寸法 ・グラウトの充填状況
電磁波を利用する方法 X線法 赤外線法 (サーモグラフィ法) 電磁波レーダ法	・鋼材の位置、径、かぶり ・うき、剥離、空隙 ・ひび割れ分布状況 ・グラウトの充填状況
電磁誘導を利用する方法 鋼材の導電性および磁性を利用 コンクリートの誘電性を利用	・鋼材の位置、径、かぶり ・含水状態
電気化学的方法 自然電位法 分極抵抗法 四電極法	・鋼材の腐食傾向 ・鋼材の腐食速度 ・電気抵抗
ファイバースコープを用いる方法	・グラウトの充填状況

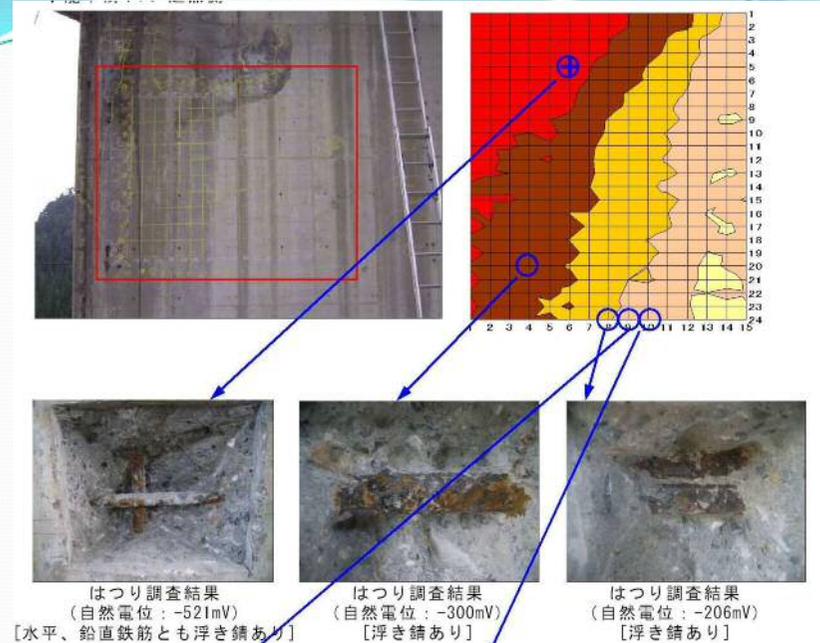
# 自然電位測定法



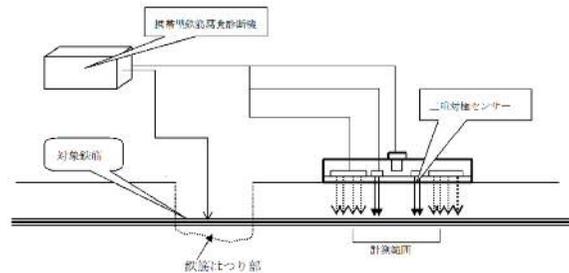
測定結果の評価基準

自然電位Emv	腐食の確立	備考
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食無し	
$-350 < E \leq -200$	不確定	
$-500 < E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり	

# 自然電位法の事例



# 分極抵抗の測定



CEBIによる腐食速度の判定基準

腐食速度測定値 $i_{corr} (\mu A/cm^2)$	腐食速度の判定	分極抵抗 R $K \Omega cm^2$	腐食速度 Mm/年
0.1~0.2未満	不働状態(腐食無し)	130~260より大	0.0011~0.0023未満
0.2以上 0.5未満	低~中程度の腐食速度	52以上130以下	0.0023以上0.0058以下
0.5以上 1.0未満	中~高程度の腐食速度	26以上 52以下	0.0058以上0.0116以下
1.0より大	激しい、高い腐食速度	26未満	0.0116より大

# 2. コンクリートの補修について



池田へそっこ大橋

## 2. コンクリートの補修について

補修に当たって最も重要なことは劣化原因を明確にすることである

最近課題となっているコンクリートの劣化原因

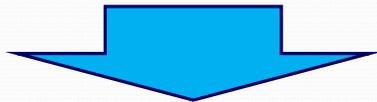
- ◆ 中性化
- ◆ 塩害
- ◆ アルカリ骨材反応【ASR】

### 2.1 中性化

- ◆ 適切にコンクリートが施工されていれば構造物の耐力に影響を与える主たる劣化原因にはならない
- ◆ 中性化が進行してもコンクリートの強度的な劣化は生じない
- ◆ 中性化の進行予測  
土木学会、岸谷式など  
セメントの種類、W/Bなどにより異なる

#### ◆ 中性化とは

コンクリート中の水酸化カルシウムが大気中の二酸化炭素と反応し炭酸カルシウムに変化【炭酸化】  
⇒アルカリ性が失われる。【pHの低下】



pHが低下することによって鋼材表面の不動態被膜が破壊され、鋼材の腐食が生じる

#### 中性化

フェノールフタレン溶液をコンクリートに噴霧することにより生じる赤色化反応から判断する

現地で調査する場合には新しく出現したコンクリート面で速やかに試験することが望ましい

フェノールフタレンのアルカリ反応

pH10.0~pH13.4⇒赤色反応

## コアを使用した試験

◆採取したコアを割裂させフェノールフタレインを噴霧



## ドリル法による調査



## 1932年に建設された 橋梁のコンクリートの中性化深さ

計測位置		中性化深さ	備考
上部工	P <sub>1</sub> ~P <sub>2</sub> アーチリブ下面	17.9mm	
	P <sub>4</sub> ~P <sub>5</sub> アーチリブ下面	19.3mm	
	P <sub>4</sub> ~P <sub>5</sub> アーチリブ上面	17.0mm	
下部工	P <sub>5</sub> 豎壁	19.0mm	

コンクリート材齢 72年



1932年建設 5径間連続RCアーチ橋

## 中性化に対する予防保全的対策

### ◆中性化の進行の抑制

表面被覆工法

表面含侵工法 ex : シラン系含侵材

### ◆中性化による鋼材の劣化抑止対策

#### ・再アルカリ化

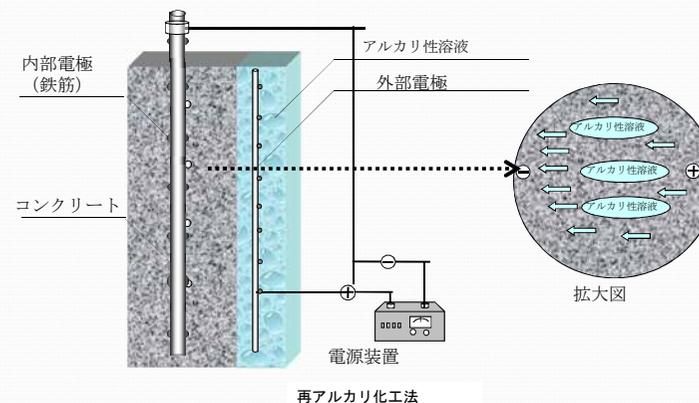
電気化学的対策による中性化した  
コンクリートの再アルカリ化

#### ・電気防食【外部電源方式、流電陽極方式】

コンクリート外部に配置した陽極と鋼材  
間に防食電流を流す

## 再アルカリ化

### 再アルカリ化工法の原理



## 再アルカリ化を行ったコンクリートの状態

所定の通電期間終了後、  
フェノールフタレインの  
噴霧によるコアの発色状態



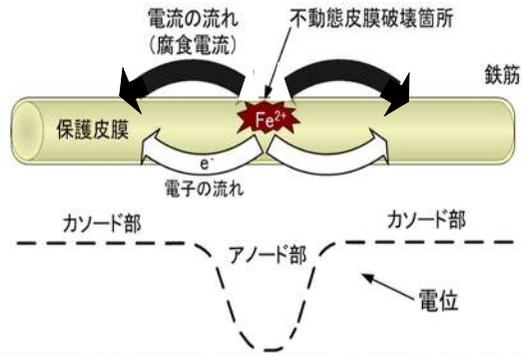
## ・中性化したコンクリート中の鋼材

鋼材の腐食には水と酸素が必要である



## 腐食反応で起っていること

不動態皮膜破壊箇所→腐食箇所  
腐食電流が流れる→腐食開始

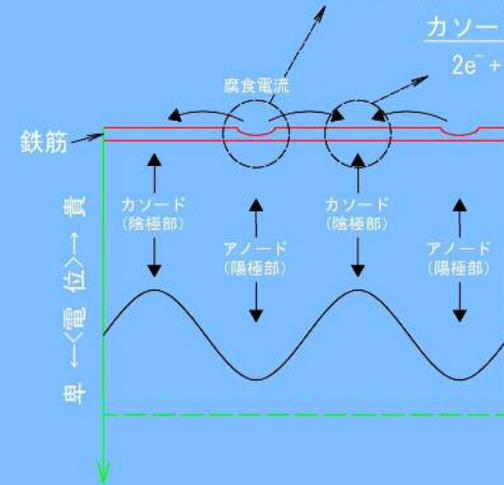


電気が流れている  
腐食反応を停止するには⇒電気を流そう!!

アノード反応



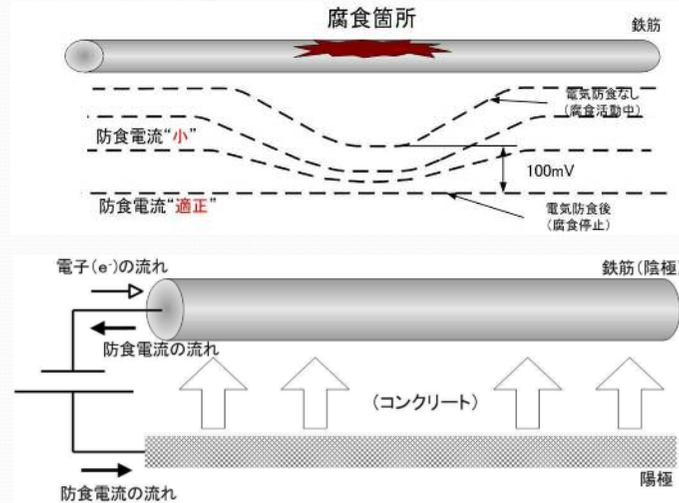
カソード反応



鉄筋腐食のメカニズム

## 電気防食の考え方

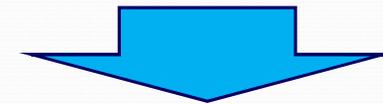
電位の高低さを無くす⇒電気防食



## 2.2 塩害

### ◆塩害とは

コンクリート中の塩化物イオンによって鋼材の不動態皮膜が破壊され鋼材が腐食する。



腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を生じさせたり、鋼材の断面減少が生じ、構造物の性能が低下する。

鉄筋腐食のメカニズム

## コンクリート中の塩化物イオンの供給

### ① 外来塩分

- ・海水飛沫：海岸線の形態、風の強さ
- ・凍結防止剤、融雪剤  
スパイクタイヤの使用禁止以降使用量が増加

### ② 初期塩分【内在】：未洗浄の海砂

- ・塩化物イオンの総量規制
- ・現場での塩化物イオン量の試験【カンタブ等】

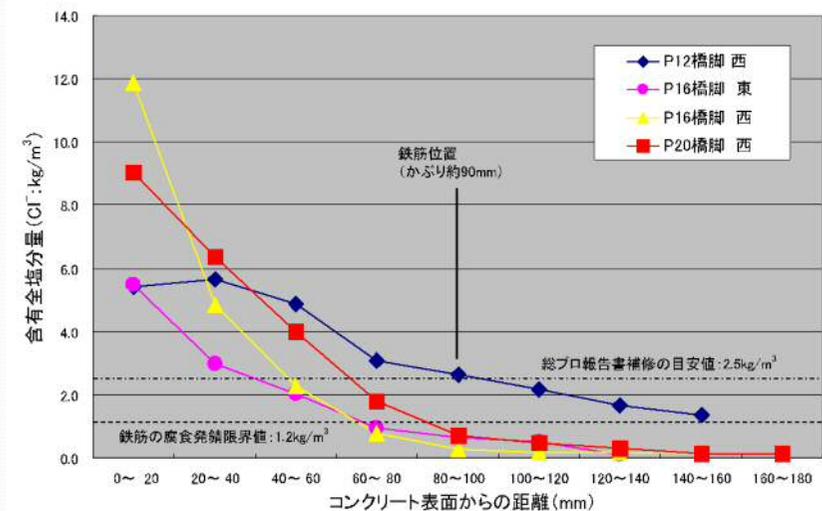
## ◆ 海水飛沫による塩化物イオンの浸透

海上横断道路として供用されている橋梁の下部工コンクリートへの塩化物イオンの浸透量はコンクリート表面で  $10 \text{ kg/m}^3$  を超える箇所もあった。

- ・対象道路：海上横断道路
- 場 所：
- 供 用：1992年
- 調査時期：2009年



## 塩化物イオンの分布 $\text{Cl}^- \text{ kg/m}^3$



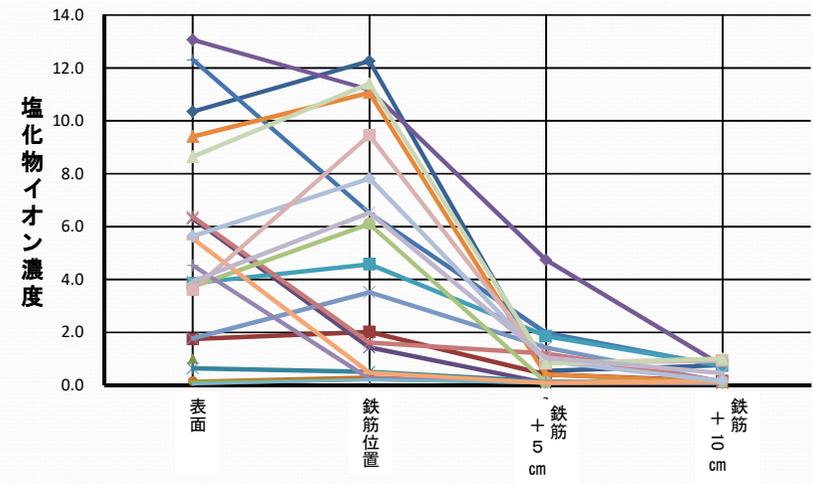
橋脚飛沫帯 コンクリート中の全塩分量分布

## ◆凍結防止剤による塩化物イオンの浸透

- 自動車専用道に使用された凍結防止剤、融雪剤によるコンクリートへの塩化物イオンの浸透量は鉄筋位置で $10\text{kg}/\text{m}^3$ を超える箇所もあった。

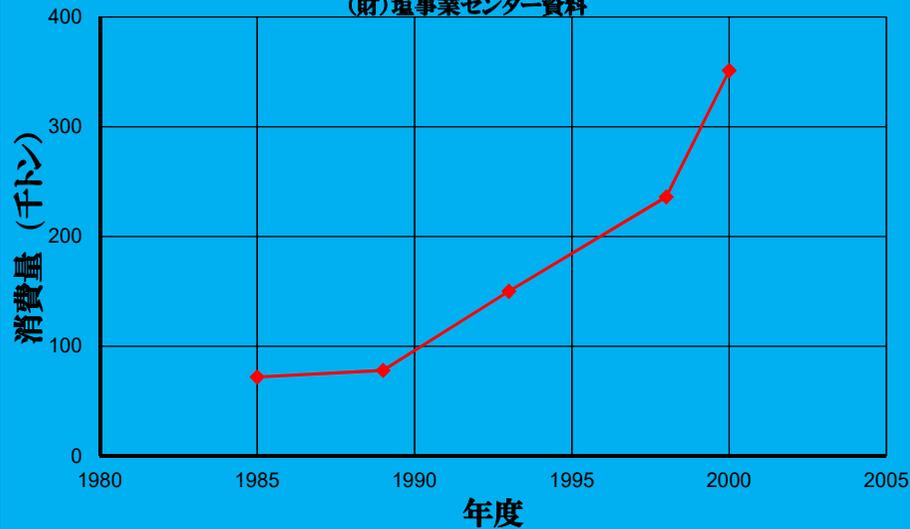
- 対象道路：自動車専用道路
- 場所：琵琶湖西部
- 供用：1980年代後半から供用
- 調査時期：2008年

## 塩化物イオンの分布 $\text{Cl}^{-}\text{kg}/\text{m}^3$



## 融氷雪用の塩消費量の推移

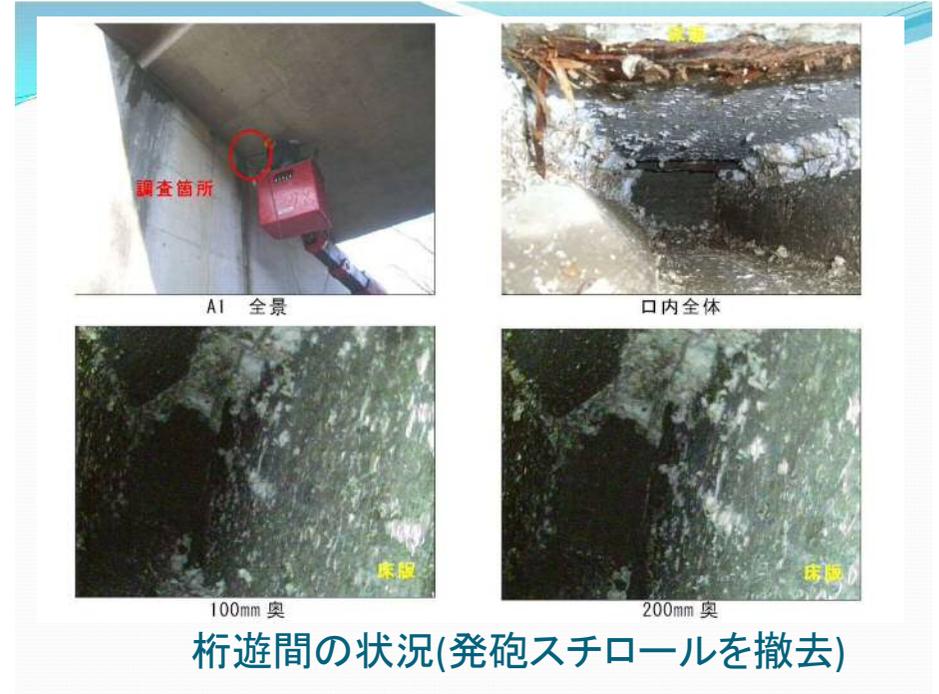
(財)塩事業センター資料

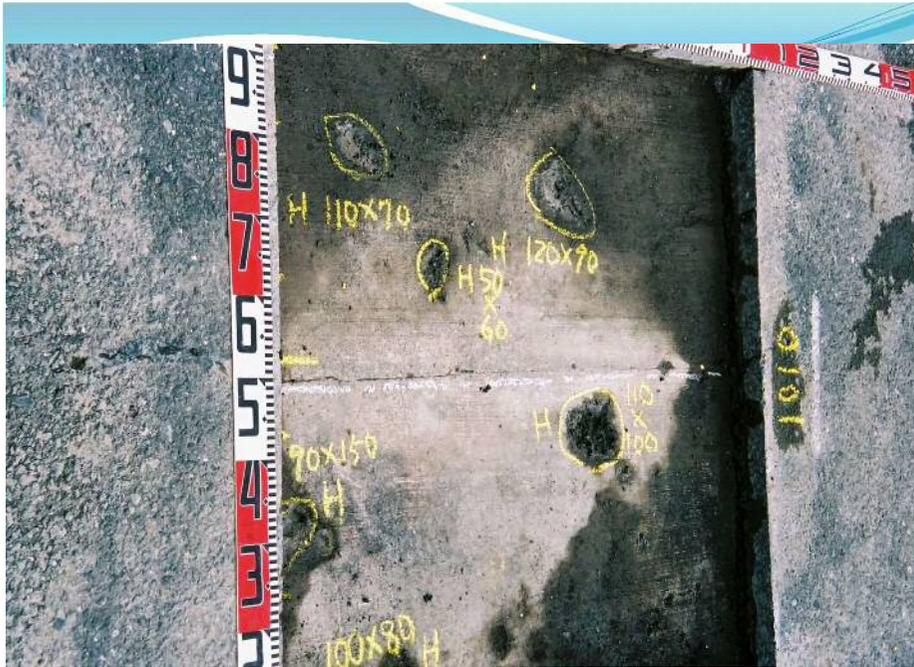


## 塩害による変状

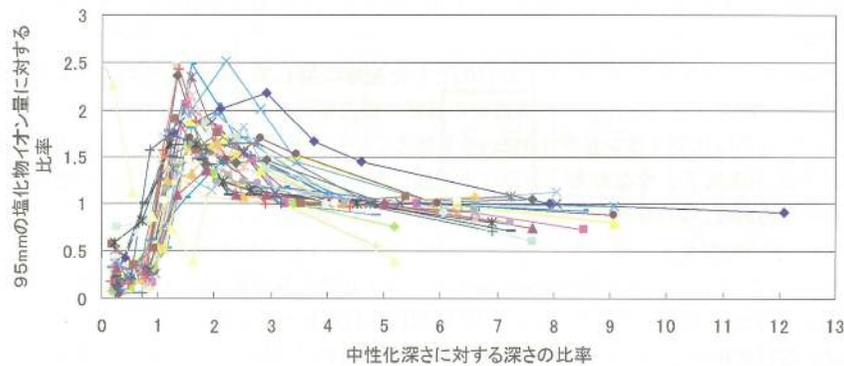
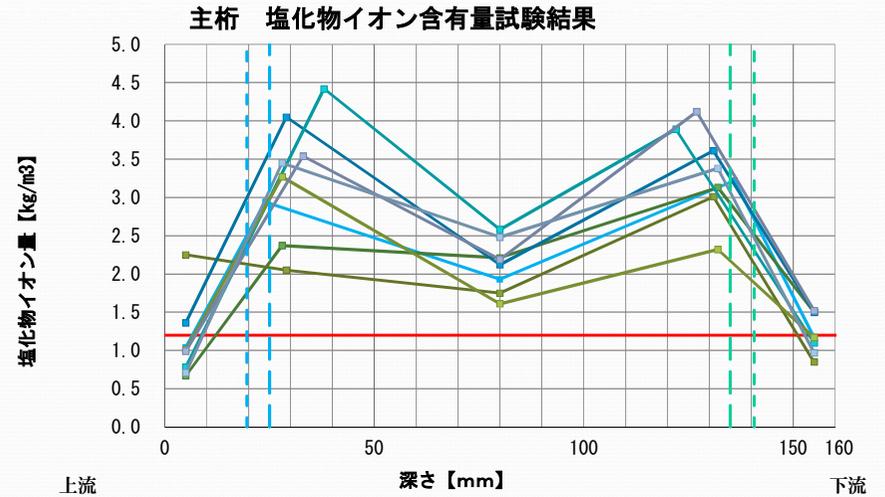








## PC桁の腹部の塩化物イオン分布



資料: 京都大学学位論文 北後 征雄

## ◆ 内在塩分の中酸化による塩化物イオンの分布の変化

- ①フリーデル氏塩が炭酸化する
- ②フリーデル氏塩中に固定されていた塩化物イオンが細孔溶液中に溶解する
- ③細孔溶液中の塩化物イオン濃度が上昇し、濃縮と拡散が繰り返し内部へと浸透していく

## 塩害に対する予防保全的対策

### ◆塩害の進行の抑制

- ・脱塩工法：塩化物イオンを電気化学的対策によりコンクリート中から排除

### ◆塩害による鋼材の劣化抑止対策

- ・電気防食【外部電源方式、流電陽極方式】  
コンクリート外部に配置した陽極と鋼材間に防食電流を流す

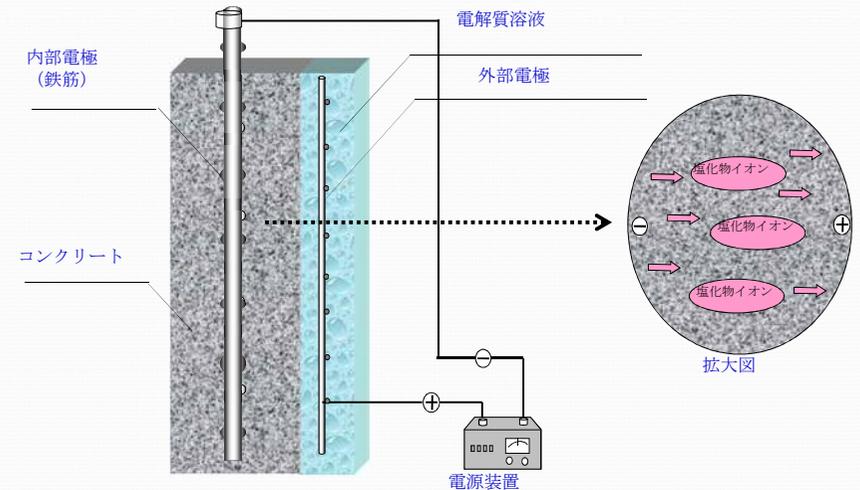
## 塩害に対する事後保全的対策

### ◆断面修復

劣化部分を撤去し断面修復材による修復

⇒再劣化対策

## 脱塩工法のシステム概要



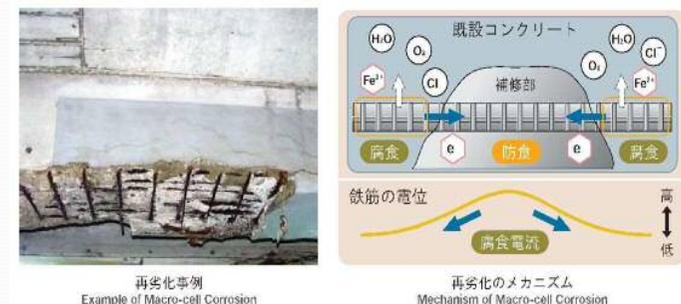
## ◆断面修復工法【事後保全】

### ①断面修復材の選定

- ・劣化に対する抵抗性：劣化原因の把握
- ・力学特性：強度、弾性係数など
- ・電気抵抗：電気化学的補修対策や調査方法を行う可能性  
⇒電気抵抗の小さい材料の選定
- ・再劣化対策：再劣化対策が可能な材料

## ◆補修箇所の再劣化【マクロセル腐食】

塩化物イオンが浸透しているコンクリートの部分補修を行うことによって、補修部分と補修を行わなかった部分の腐食環境が大きく異なりこの部分にマクロセル腐食が生じる。【再劣化】



マクロセル腐食による孔食



PC桁に生じた再劣化【電気防食後】  
原因:複数回行われた断面修復【異なる断面修復材を使用】



PC鋼材の腐食状況



## 再劣化対策

塩害による再劣化対策としては以下のような工法が行われている

### ①犠牲陽極材の配置

再劣化が生じると考えられる箇所に犠牲陽極を配置する

### ②腐食抑制剤を断面修復材に混入

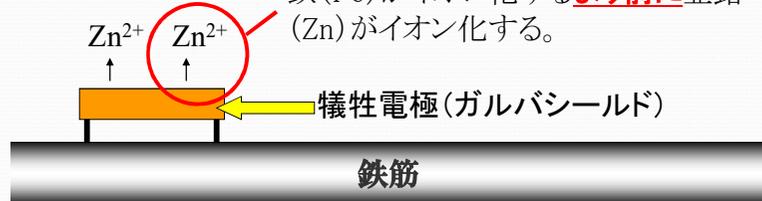
断面修復材に腐食抑制剤として亜硝酸塩を混入する。混入量は浸透している塩化物イオン量と同量とする【モル比1.0】

## 犠牲陽極の防錆機構

K, Ca, Na, Mg, Al, **Zn**, Fe, Ni, Sn, (H), Cu, Hg, Ag, Pt, Au

大 ← イオン化傾向 → 小

鉄 (Fe) がイオン化する **より前に** 亜鉛 (Zn) がイオン化する。



鉄筋腐食に対する役割

防錆剤 ⇒ ディフェンダー  
犠牲電極 ⇒ ゴールキーパー



## 2.3 アルカリ骨材反応

### ◆アルカリ骨材反応とは

- 反応性骨材中のシリカ成分とコンクリートのアルカリが反応し、骨材の周辺にアルカリシリカゲルを生成する。⇒ **アルカリシリカ反応**
- 生成されたゲルが、吸水膨張することでコンクリートに異常な膨張やそれに伴うひび割れを発生させる。

### ◆アルカリ反応骨材の反応性の判断

コンクリートに使用する骨材のアルカリシリカ反応性は以下の試験法によって評価している。

#### ①化学法

溶解シリカ (Sc) とアルカリ濃度減少量を化学分析によって求め「無害」または「無害でない」を判定する **判定グラフ**

#### ②モルタルバー法

骨材を粉砕し粒度調整を行い、モルタルバーを作成し 40±2℃、湿度95%で26週養生し膨張量を測定 **0.100%以上 無害でない**

### ◆化学法による評価

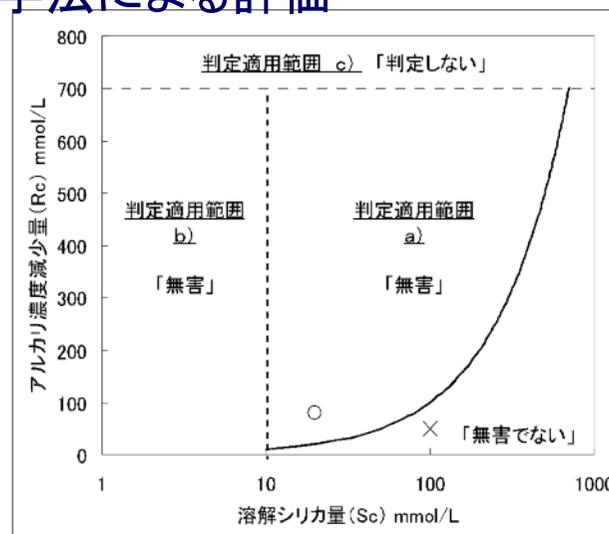


図1 判定図

## ◆モルタルバー法の課題

複数のアルカリシリカ反応性試験で試験した例

	化学法	モルタルバー法			構造物の劣化実態
		JIS A 1146	1NのNaOH水溶液に浸漬 80℃	飽和NaCl水溶液に浸漬 50℃	
骨材A	無害でない	無害	無害でない	無害でない	反応性あり
骨材B	無害でない	無害でない	無害でない	無害でない	反応性あり
骨材C	無害でない	無害でない	無害でない	無害でない	反応性あり
骨材D	無害でない	無害	無害でない	不明	反応性あり
骨材E	無害	無害	無害でない	無害	反応性あり
骨材F	無害	無害	無害でない	無害でない	反応性あり

出典：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書 p. I-85 コンクリート工学協会

## ◆ASRの進行状態の差

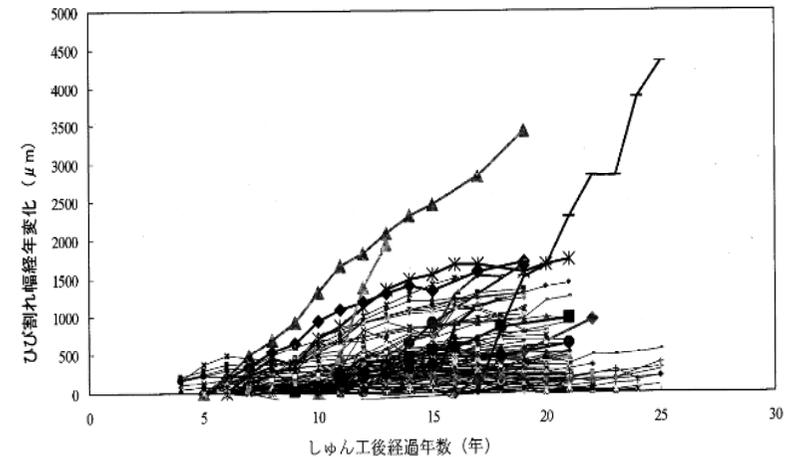


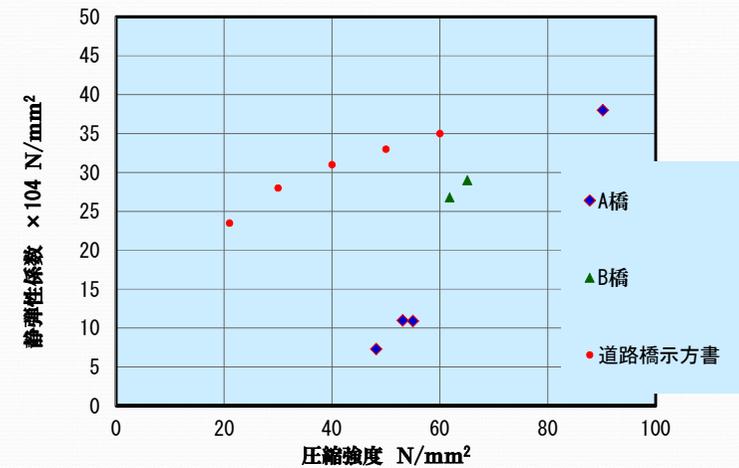
図 7.2.1 阪神高速道路公園の橋脚ごとのひび割れ幅の変化

出典：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書 p. I-68 土木学会

## ◆コンクリートにASRが生じると

- ①コンクリート、弾性係数が低下する
- ②コンクリートの強度と弾性係数の相関が変わってくる
- ③ひび割れが発生する  
 無筋コンクリート：亀甲状のひび割れ  
 鉄筋コンクリート：鉄筋の配筋が多い方向へのひび割れ  
 PC部材：プレストレスが導入されている方向へのひび割れ
- ④鉄筋の破断：曲げ加工した箇所での破断

## ASR劣化したコンクリート強度と静弾性係数 プレテンション桁 ( $\sigma_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ )







PC桁(ポストテンション)のASRによるひび割れ  
漏水の原因は、グラウト不良と考えられる



PC桁(ポステン)のASRによるひび割れ



ASRによる鉄筋の破断

## ASRに関する調査

硬化したコンクリートの変状がASRによるものか否かの判断

- ①コアの破断面の目視観察
- ②白色生成物のSEM-EDS観察
- ③骨材の偏光顕微鏡観察

残存膨張量の把握

コアの促進膨張試験

- ①JCI-DD法
- ②NaCl浸漬法(通称:デンマーク法)
- ③NaOH浸漬法(通称:カナダ法)

# コアの促進膨張試験

## ●JCI-DD2法

- 室温20℃、相対湿度95%以上→室温40℃、相対湿度95%以上

## ●NaCl浸漬法（通称：デンマーク法）

- 50℃飽和NaCl溶液中

## ●NaOH浸漬法（通称：カナダ法）

- 80℃ 1mol/l NaOH溶液中



- 判定基準
- 岩種による違い
- 試験方法、コア径
- 試験期間

# ASRに対する補修対策

## ◆ASRの進行の抑止対策

ASRを抑止する対策としては亜硝酸リチウムの注入工法が行われている。高強度のコンクリートには注入工法などに課題がある

## ◆ASRの進行の抑制対策

ASRに必要となる水分を遮断する

- シラン系の撥水材
- 表面保護塗装

# ◆表面処理工撤去後の長さの変化

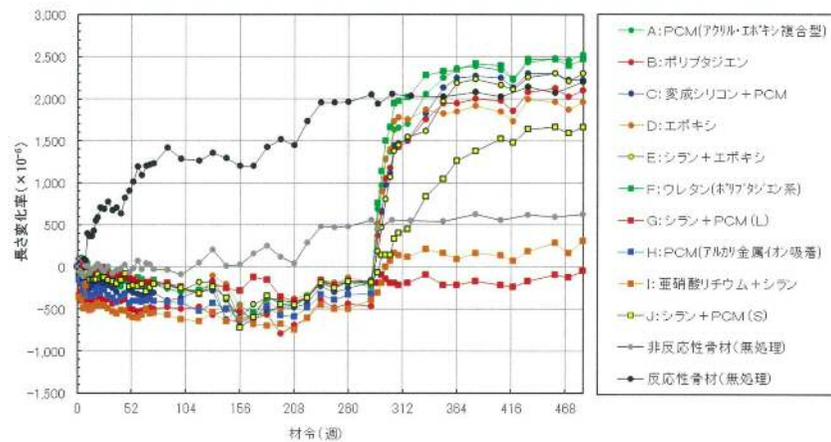


図 4.1.4 塗膜除去供試体の長さ変化率

資料: 京都大学学位論文 松本 茂

# 3. コンクリート構造物の補強



田尻スカイブリッジ

## 補強【補修】必要となる事項

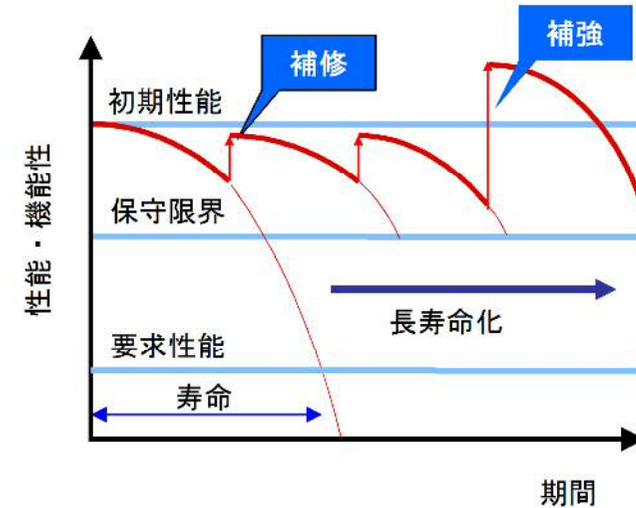
### ◆PC橋

- ・鉄筋の腐食によるコンクリート剥離
- ・PC鋼材の腐食による鋼材断面欠損【破断】
- ・荷重の増加【活荷重の増加、拡幅など】

### ◆RC橋

- ・鉄筋の腐食による圧縮縁のコンクリート剥離
- ・鉄筋の腐食による断面欠損
- ・荷重の増加【活荷重の増加、拡幅など】

## 補修・補強の概念と性能と寿命

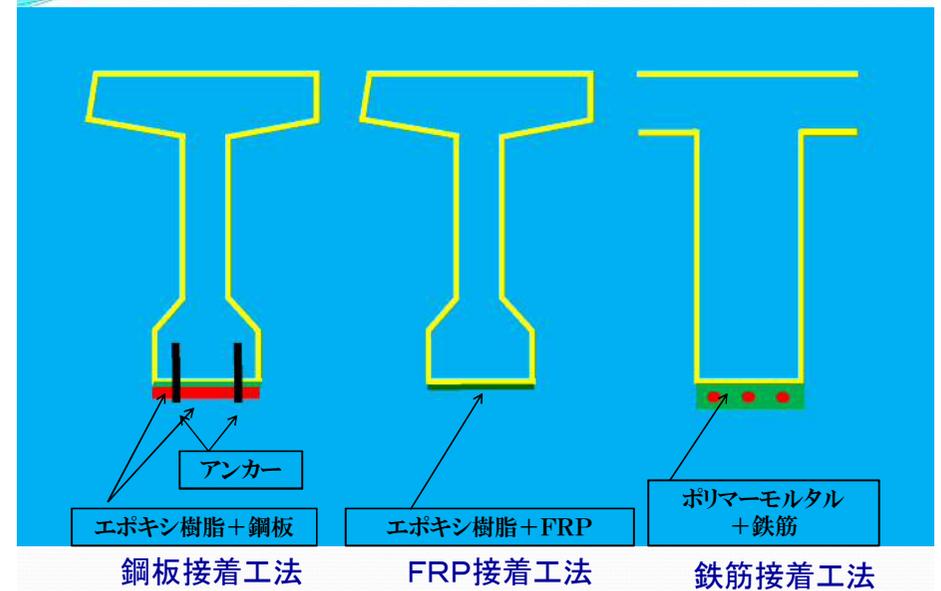


劣化曲線（概念）

## 3.1 橋梁の補強【補修】工法と対策

工法	補強方針	課題
接着工法 鋼板 FRP 鉄筋	部材引張縁に鋼板、FRPなどを接着し、主桁の剛性を高め補強後の断面力による応力の低減を図る。	既設構造物の剛性が高い場合には補強量が多くなる。 PC桁の部材引張縁への削孔。
上面増厚工法	部材上面に鉄筋コンクリートを増厚し、主桁の剛性を高め補強後の断面力による応力の低減を図る。	補強前の荷重は、既設部材で受けるため、既設部材に応力増が生じ、適用できる構造系は少ない。
プレストレス導入工法 ・外ケーブル ・CFRP 【アウトプレート】	PCケーブルやCFRPを用い主桁にプレストレスを与え応力改善を図る。	既設構造の応力改善が可能であるが、定着部、偏向部の設計・施工に高度な技術を要する。 アウトプレート工法はせん断応力が作用する箇所には適応できない

## 接着工法

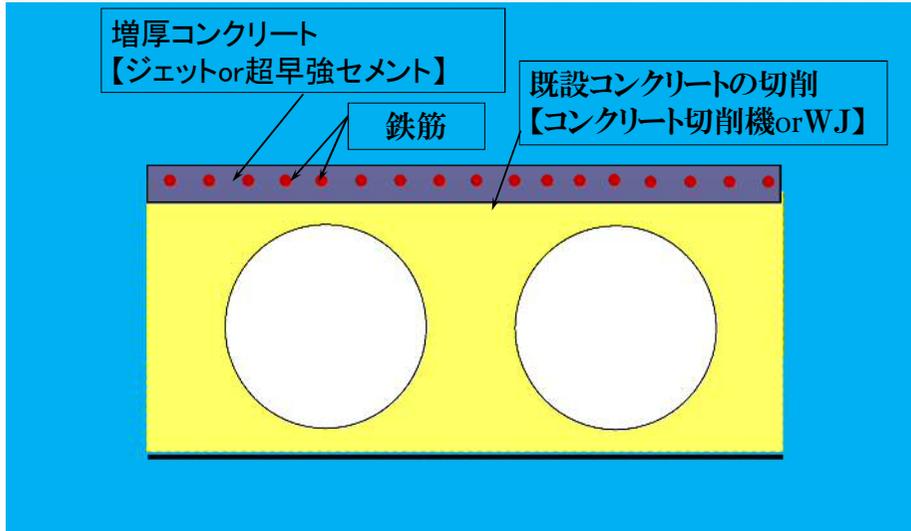


鋼板接着工法

FRP接着工法

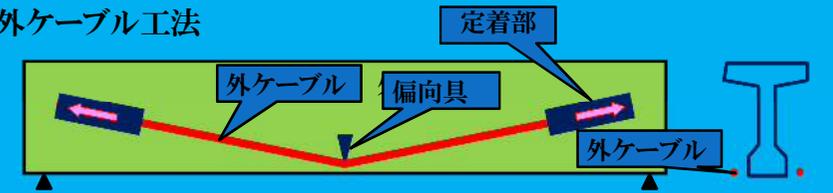
鉄筋接着工法

## 上面増厚工法



## プレストレス導入工法

### 外ケーブル工法



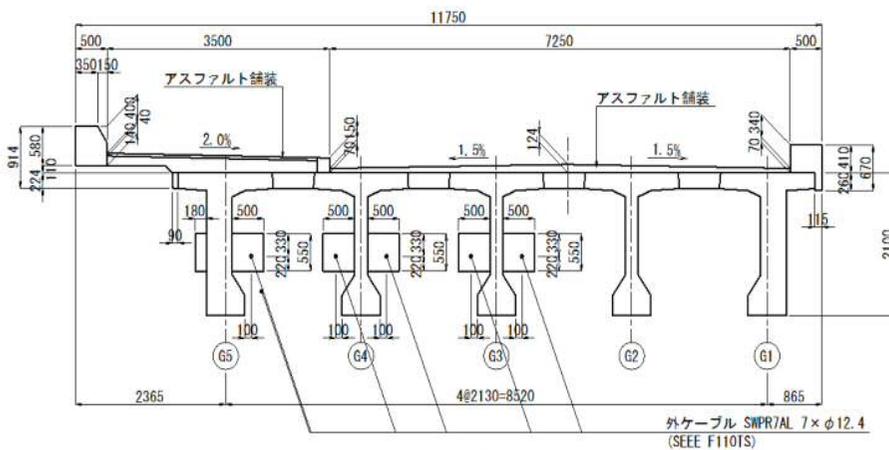
### アウトプレート工法



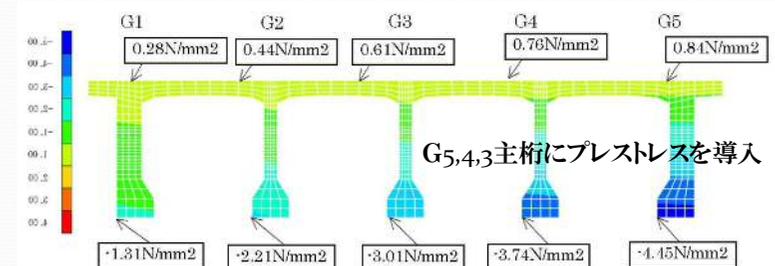
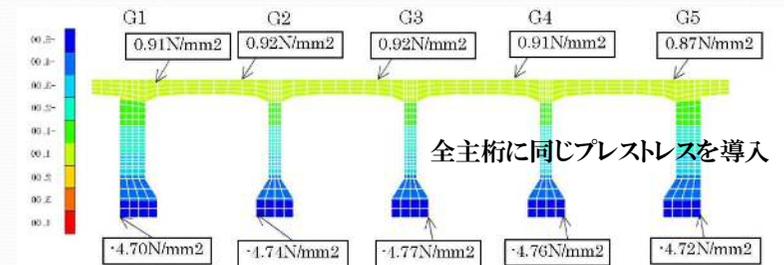
## プレストレスの分布

### 外ケーブルの配置事例

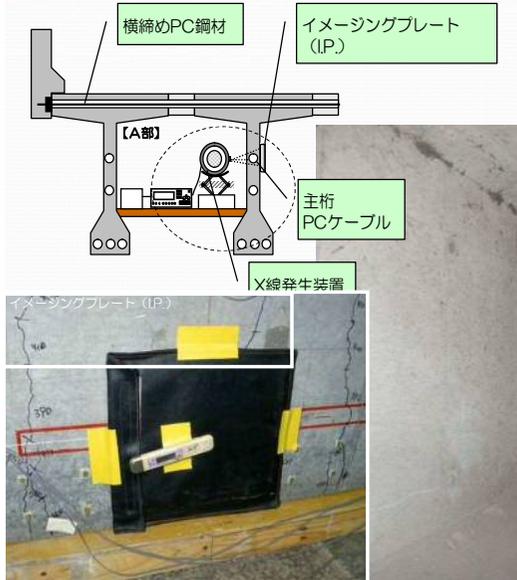
補強が必要な主桁に着目して外ケーブル補強【G5, G4】



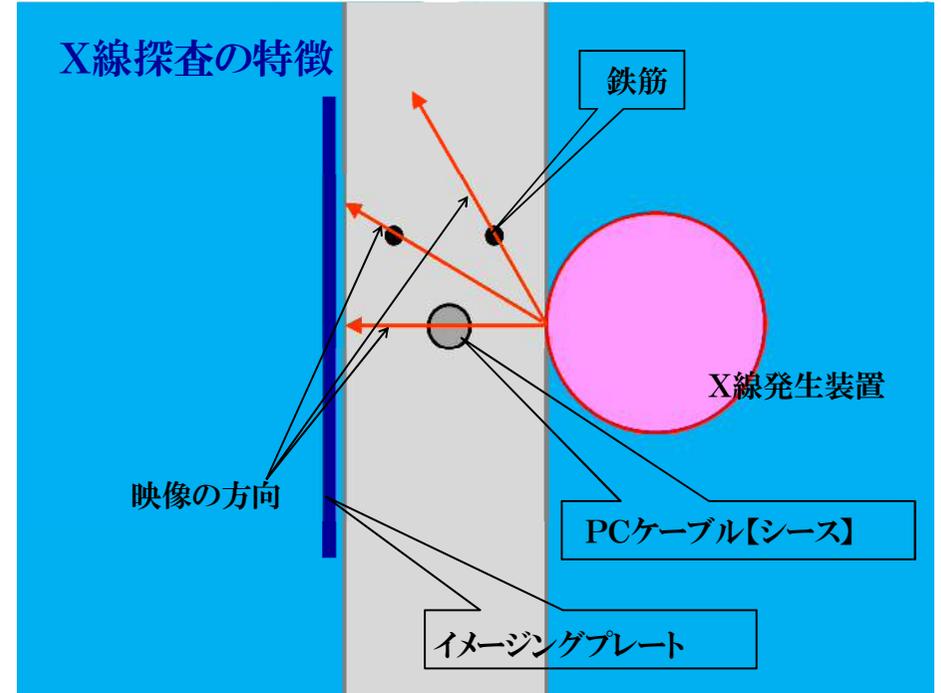
## 外ケーブルによるプレストレス分布



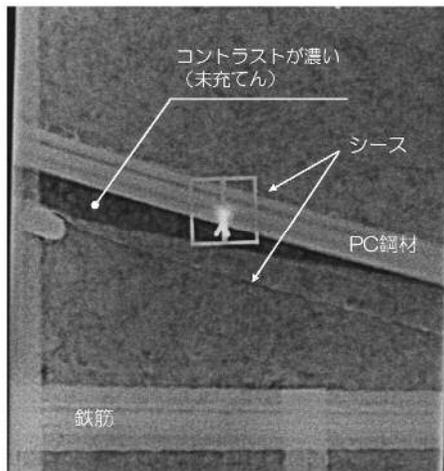
## PC鋼材の位置の調査 X線探査



## X線探査の特徴



## X線の撮影結果



グラウト未充填ケーブル部



グラウト充填ケーブル部

## 補強設計にあたっての課題

- ・道路橋示方書の変遷に伴い設計手法および構造細目に変化している  
【特にせん断力に対する設計手法】
- ・道路橋示方書は新設橋を対象としたものである  
【補修・補強設計に準用する時、道示に示される**みなし規定**がすべてではない】  
コンクリート標準示方書の適用
- ・外ケーブル補強に関する設計要領がない



ご清聴ありがとうございました