

プレストレストコンクリート構造の 維持管理

はじめに

1. PC構造物の維持管理
2. PC構造物の変状
3. PC構造物の調査
4. PC構造物の診断
5. 対 策

おわりに

はじめに

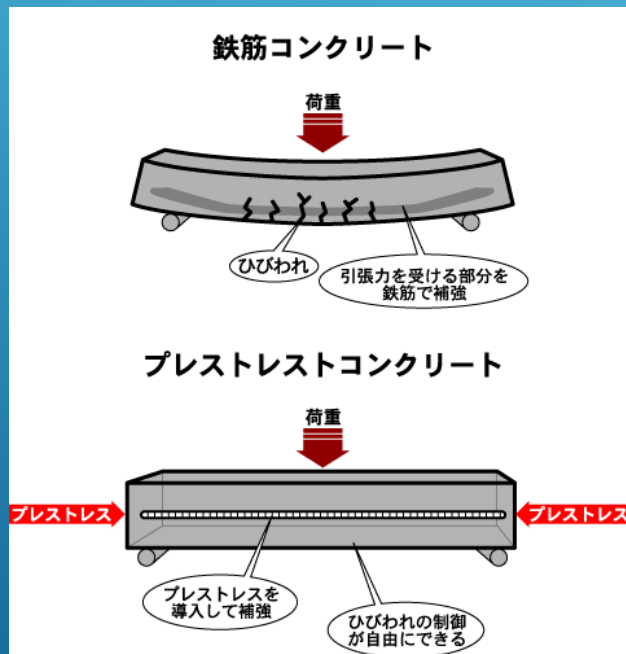
2013年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編

- ▶ **維持管理編：標準 10章「プレストレストコンクリート」**として新設された。
- ▶ PC構造物特有の劣化に着目する。
- ▶ PC構造物の維持管理においては、構造物の重要度、構造形式、要求性能、予定供用期間、環境条件および**PC技術の変遷**を考慮する。
- ▶ 診断においては、PC構造物特有の劣化過程を考慮する。
- ▶ プレストレストコンクリート工学に関する知識と経験を有する**PC構造専門の技術者**が行う必要がある。
- ▶ PC構造物特有の劣化に対応した補修・補強工法を選定する。

1. PC構造物の維持管理

1.1 PC構造物の維持管理

プレストレストコンクリート PRESTRESSED CONCRETE



- ▶ ひび割れを発生させない（制御できる）
- ▶ W/Cの低い密実なコンクリートに圧縮力を導入する⇒外部からの劣化因子に対し高い抵抗性を有している。【高耐久性】
- ▶ 疲労破壊に対しても十分な安全性を有する。

1.2 PC構造物に特有な劣化

PC構造はRC構造とは異なる特性を有するため、PC構造に特有な劣化が生じることがある。

特徴1：プレストレスの導入

特徴2：PCグラウトの必要性（ポストテンション方式）

特徴3：施工目地の存在

PC構造に特有な劣化

- ①PC鋼材と定着部および偏向部に関する劣化
- ②ポストテンション方式のPCグラウト充填不良等に伴うPC鋼材の劣化
- ③施工目地を起点とした劣化

1.3 PC構造物の特徴

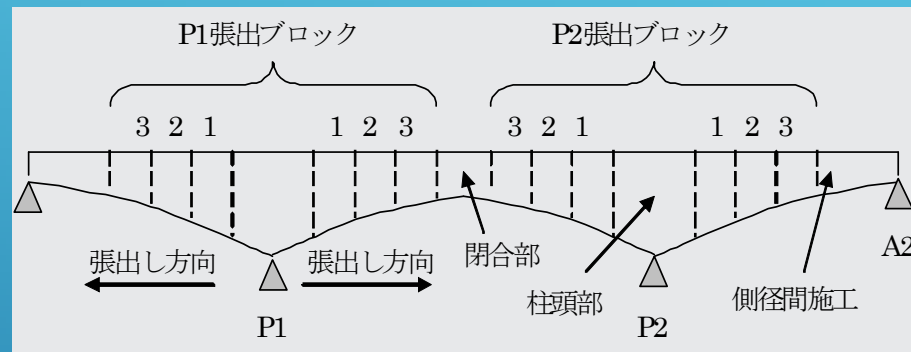
- ▶ 対象となるPC構造物の建設された時代の技術的特徴を理解した上で維持管理を行う。
- ▶ PC技術の変遷を考慮
 - プレストレストレベル ●技術指針類 ●材料
 - JIS規格 ●標準設計 ●施工技術 ●解析技術

旧建設省標準設計の変遷(ポストテンション方式PCTげた橋の例)

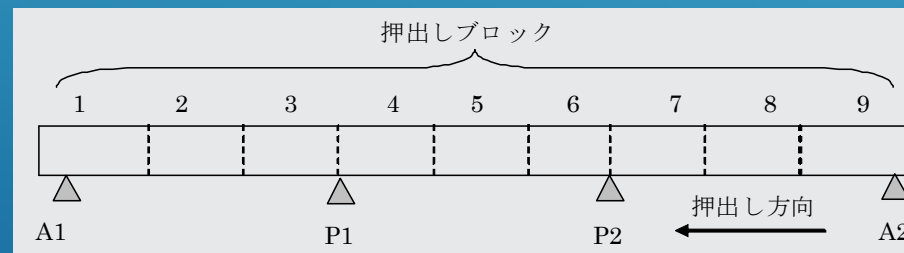
	昭和44年（1969年）制定	昭和55年（1980年）制定	平成6年（1994年）制定
主桁断面			
設計自動車荷重	20tf(195kN), 14tf(135kN)	20tf(195kN), 14tf(135kN)	245kN
適用支間	14~40m	20~40 m	20~45m
PC鋼材の種類*1	SWPR1 5mm (12本組) SWPR1 7mm (12本組)	SWPR1 7mm (12本組) SWPR7A 12.4mm (12本組)	SWPR7B 12.7mm (7本組) SWPR7B 12.7mm (12本組) SWPR7B 15.2mm (12本組)
場所打ち床版幅	60cm以下	65cm以下	73cm以下

1.3 PC構造物の施工方法

a) 張出し架設工法



b) 押出し架設工法



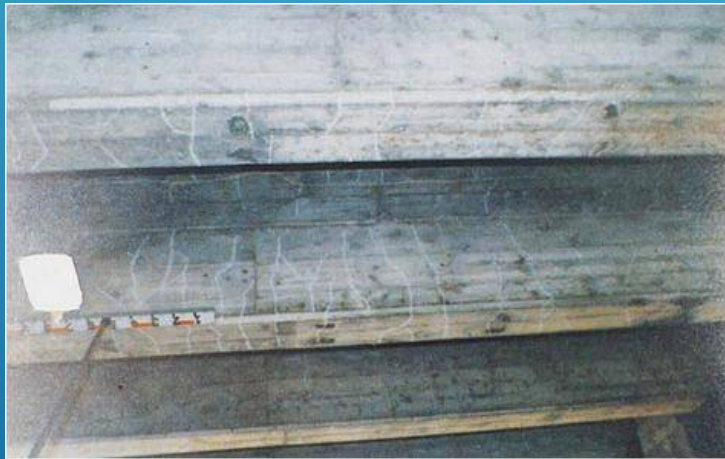
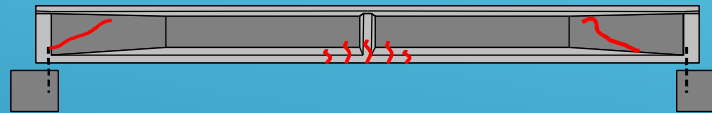
施工目地から判断される架設工法の例

2. PC構造物の変状

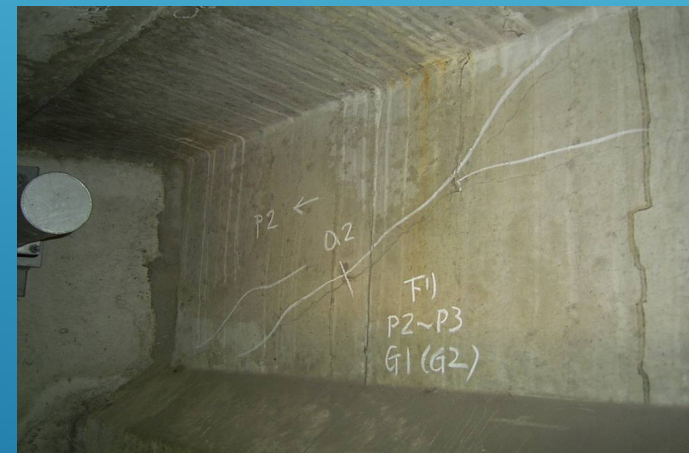
2.1 PC構造物の変状

①PC部材に発生する曲げ、せん断ひび割れ

プレストレスの減少？、耐荷力の低下？



過大な荷重載荷により
生じた曲げひび割れ



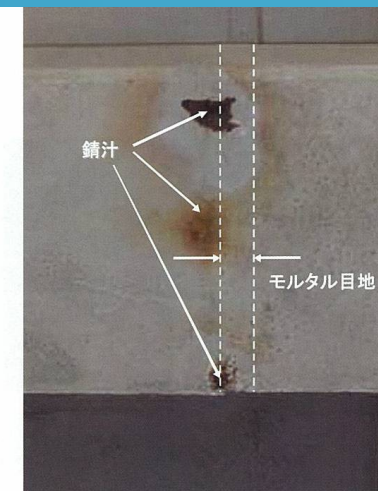
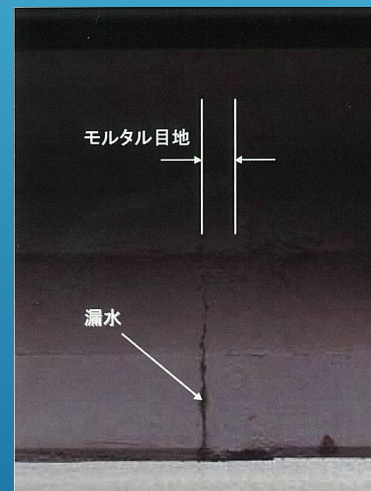
せん断ひび割れが生じたPCT桁

10

2.1 PC構造物の変状

③施工目地（セグメント目地）からの漏水

- PC鋼材の腐食~破断の危険性
- プレキャストセグメントの目地部は連続鉄筋が配置されていないため、PC鋼材の破断により落橋に至る場合がある。



セグメント目地部の劣化

2.1 PC構造物の変状

②PC鋼材に沿ったひび割れやエフロレッセンス
PCグラウト充填不良？

PC鋼材の腐食～破断への危険性



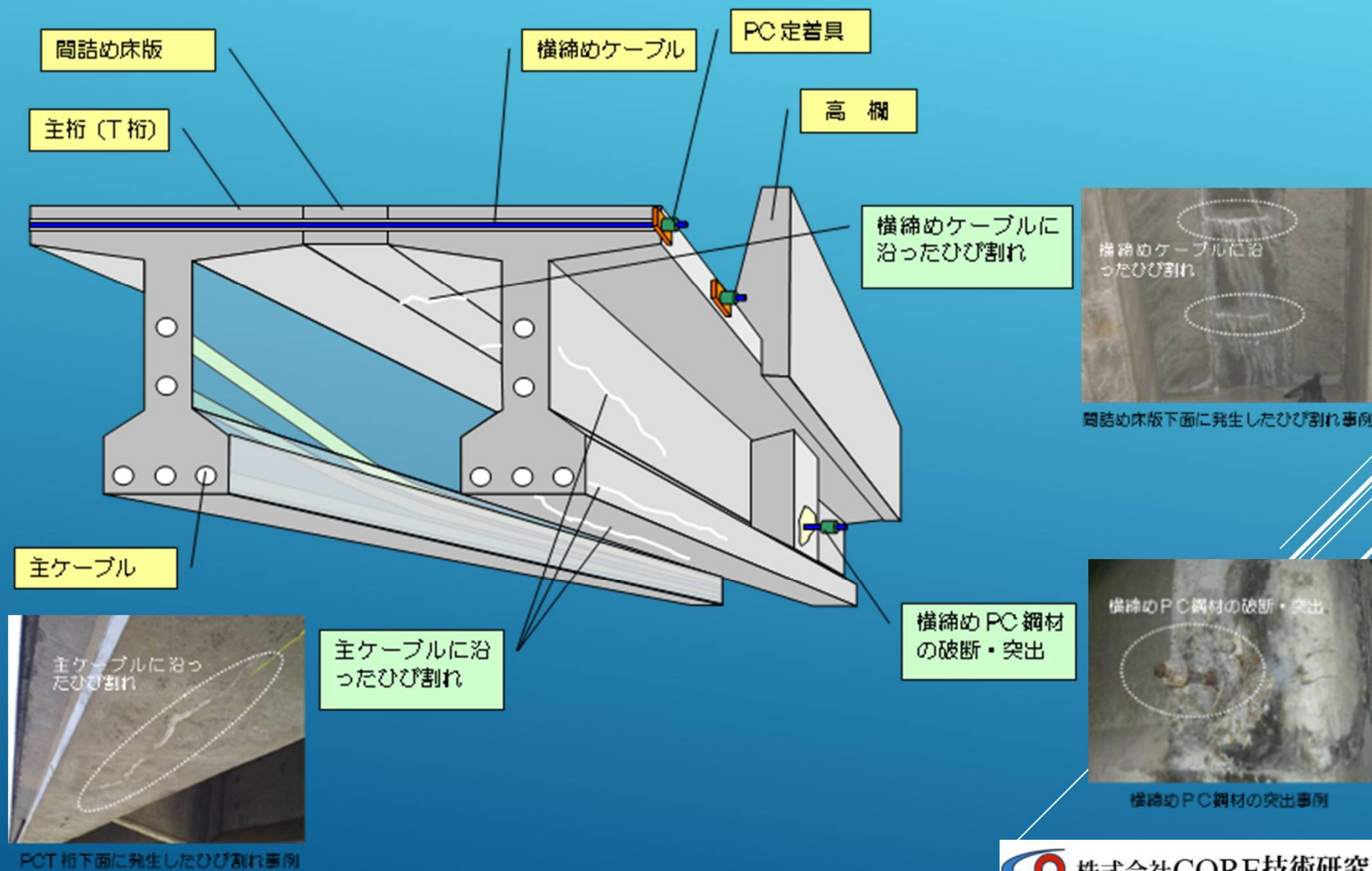
グラウト充填不良により生じたPC鋼材
に沿ったひび割れとエフロレッセンス



ポストテンション方式T桁の下フランジに
生じたひび割れの事例

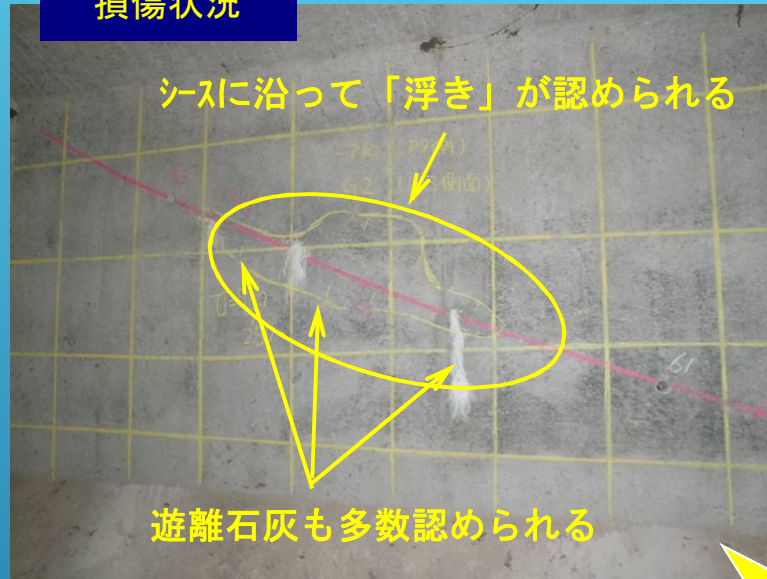
12

2.1 PC構造物の変状



2.2 主ケーブルの破断事例

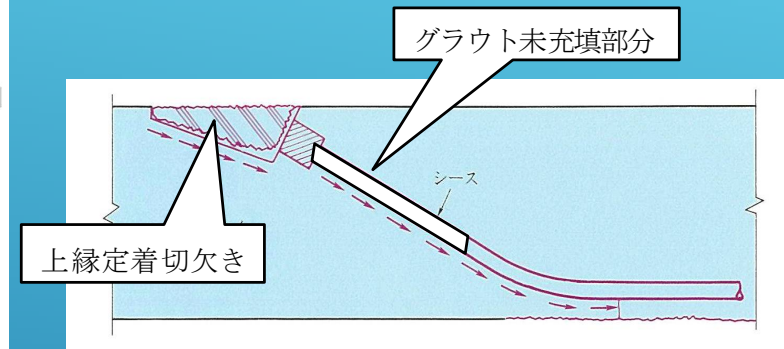
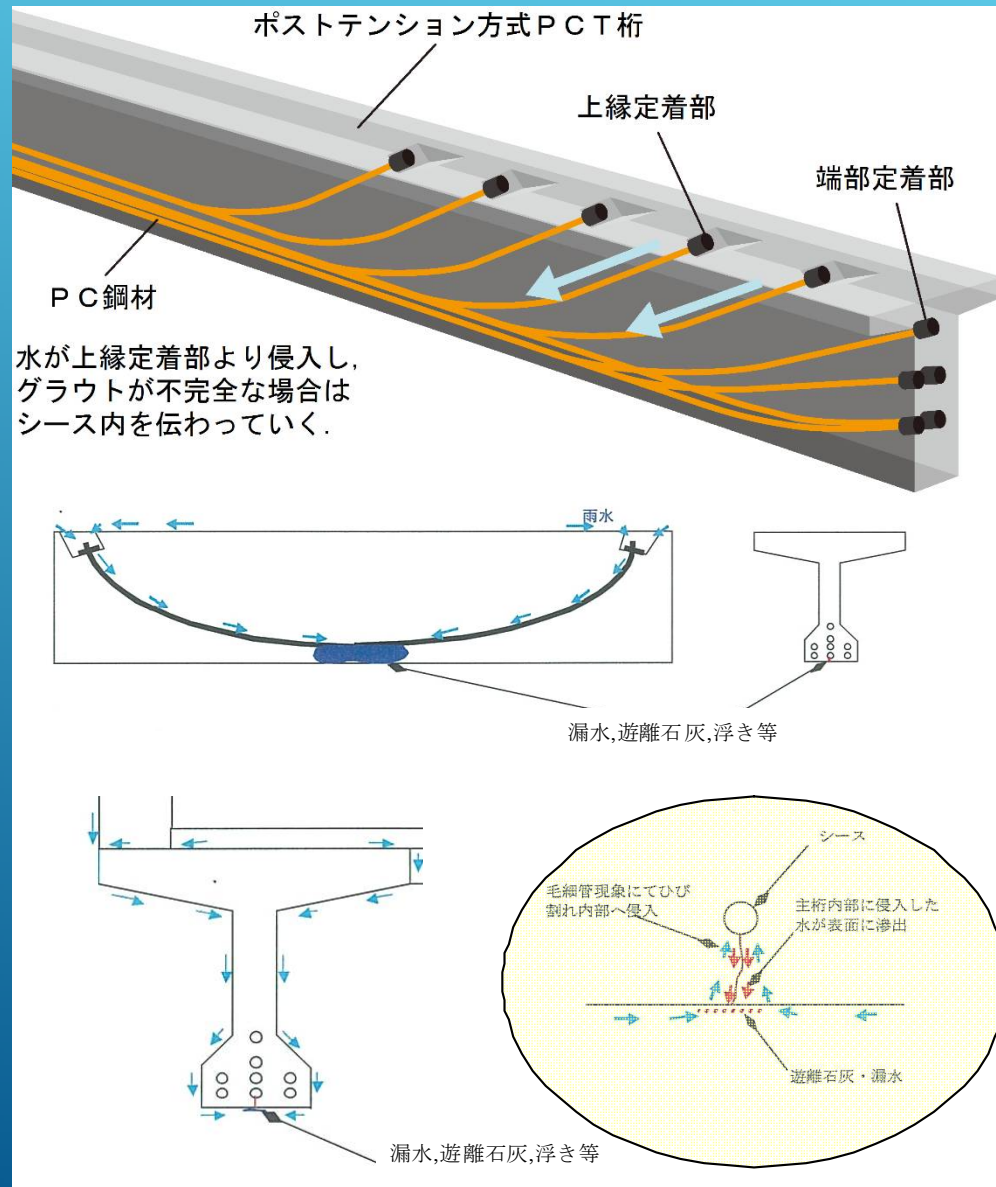
損傷状況



はつり後



2.3 ポステンT桁の上縁切欠き部と水の浸入経路



2.4 横締めPC鋼材の破断

Prestressing steel bar



Prestressing steel bar



Prestressing steel bar



Prestressing steel strand



2.5 P C 橋梁の落橋(その1)

Ynys-y-Gwas橋(1953年竣工)
1985年10月 落橋 英国南ウエールズ



参考写真3:PC構造物の維持保全 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

- ・ポストテンション方式のセグメント橋(ブロック桁)
- ・セグメント目地にはモルタルを使用
- ・凍結防止剤の使用、内在塩分によりPC鋼材が腐食・破断

2.5 PC桥梁の落橋(その2)

島田橋(1963年竣工)

1990年7月落橋 岐阜県町道下田瀬1号線



- ・ゲルバー式PC斜張橋
- ・PC斜材の腐食・破断により落橋
- ・点検を実施していなかった

写真: 岐阜大名誉教授小柳先生

3. PC構造物の調査

3.1 PCグラウト調査

		削孔法	IEWP法	インパクトエコー法	X線透過法	広帯域超音波法
非破壊／破壊		破壊	非破壊	非破壊	非破壊	非破壊
判定		目視	波形解析		写真	波形解析
適用		主ケーブル・横締めケーブル	横締めケーブル	主ケーブル・横締めケーブル	主ケーブル	主ケーブル・横締めケーブル
長所		・正確	・簡便に実施できる	・簡便に実施できる	・判定が正確	・簡便に実施できる
短所		・ドリル削孔を必要とする	・判定に技術を要する ・横締めケーブル専用	・判定に技術を要する ・深さ、シース径に適用限界がある	・長時間 ・部材厚さに適用限界がある	・判定に高度な技術を要する ・装置が大きい ・高コスト
評価	Main girder	Good	Notgood	Excellent	Acceptable	Acceptable
	Cross beam	Good	Excellent	Acceptable	Acceptable	Not good
	Bridge deck	Good	Excellent	Acceptable	Not good	Not good



Drilling method



X-ray radiography



Ultrasonic method



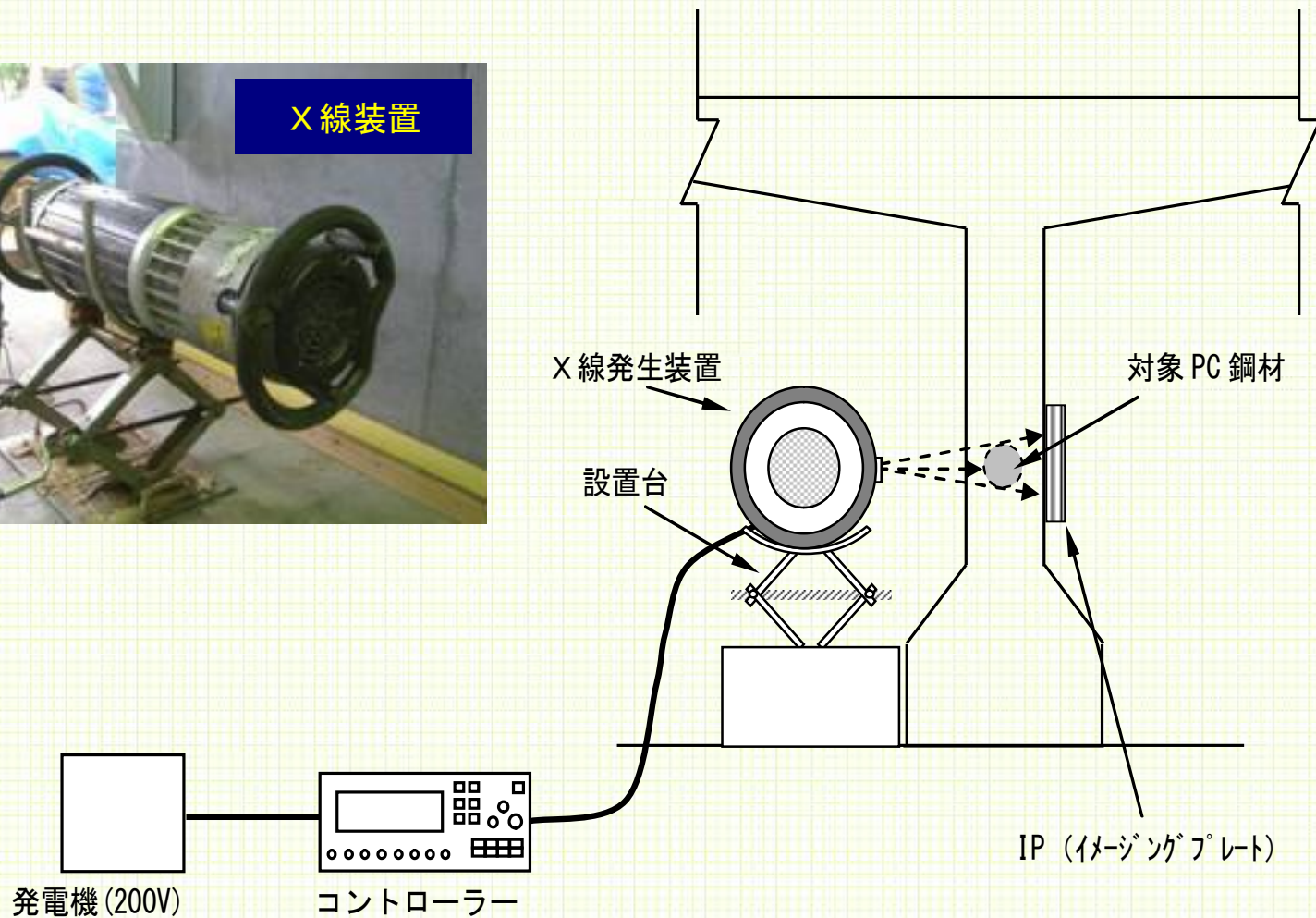
Impact elastic-wave method



Impact-echo method

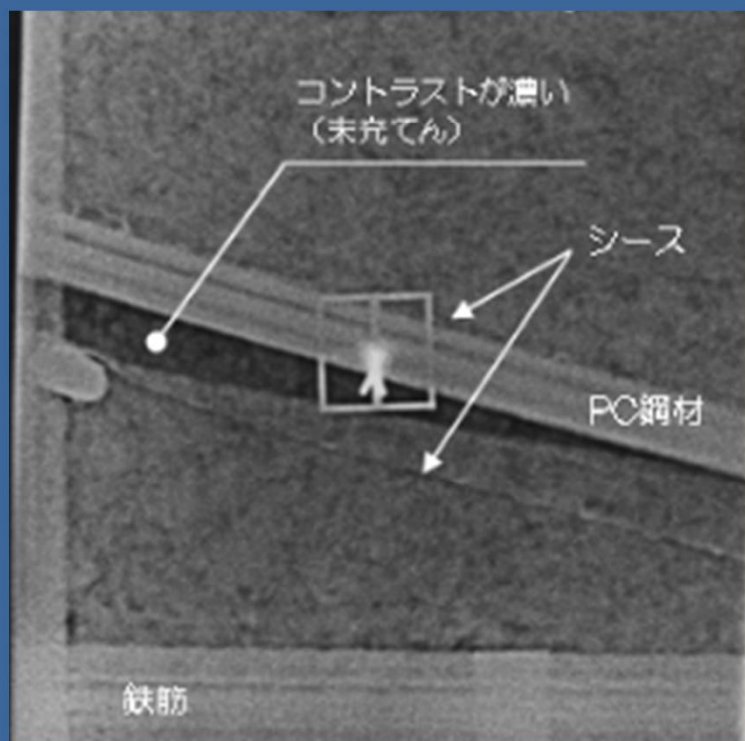
3.1 PCグラウト調査 X線透過法

X線透過法概念図



3.1 PCグラウト調査 X線透過法

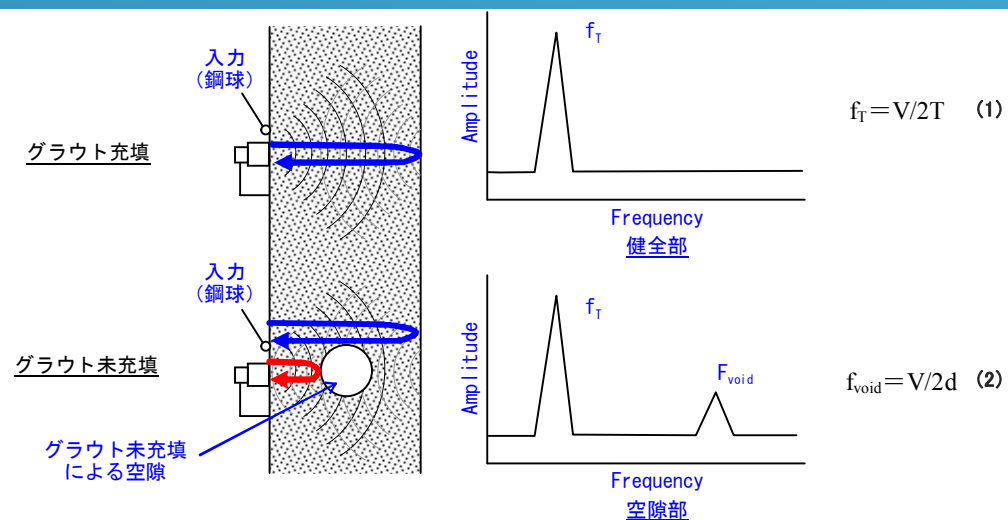
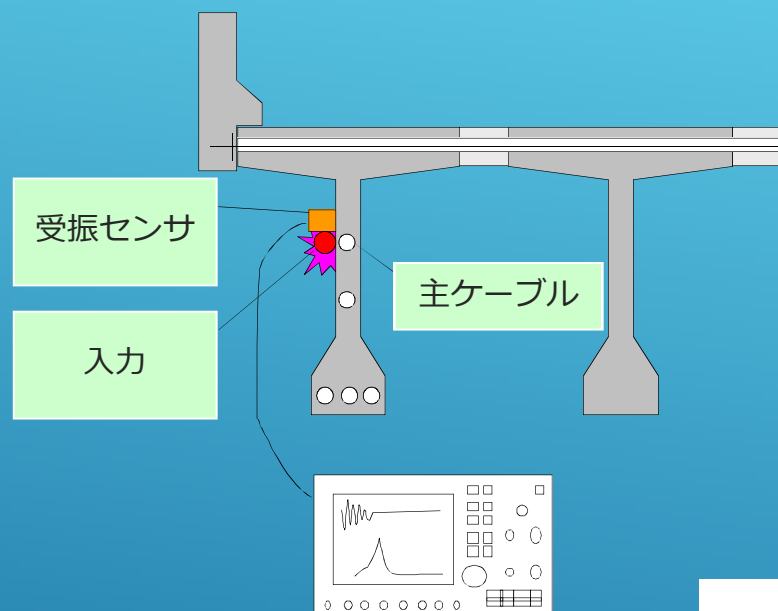
グラウト充填不足



グラウト充填

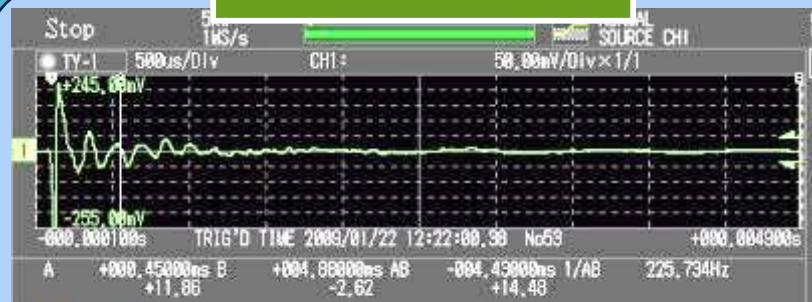


3.1 PCグラウト調査 インパクトエコー法



3.1 PCグラウト調査 インパクトエコー法【評価】

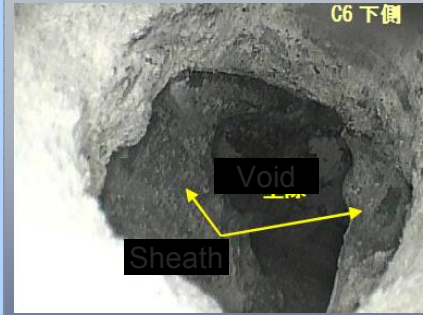
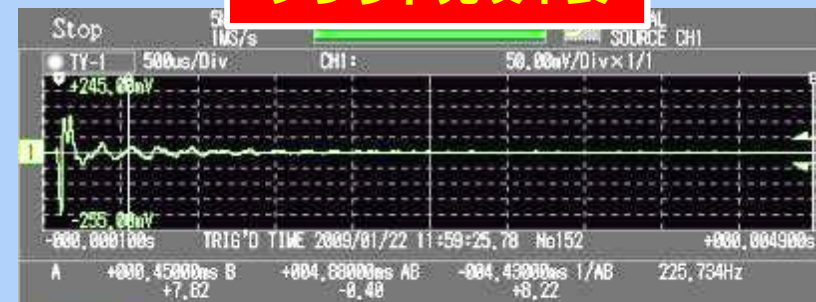
グラウト充填



削孔+CCD 充填確認

卓越したピークが1つ認められる

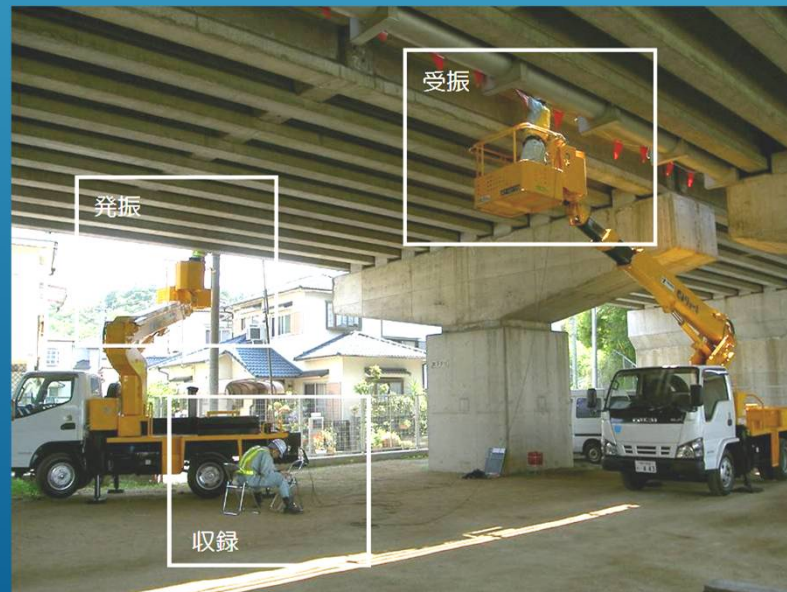
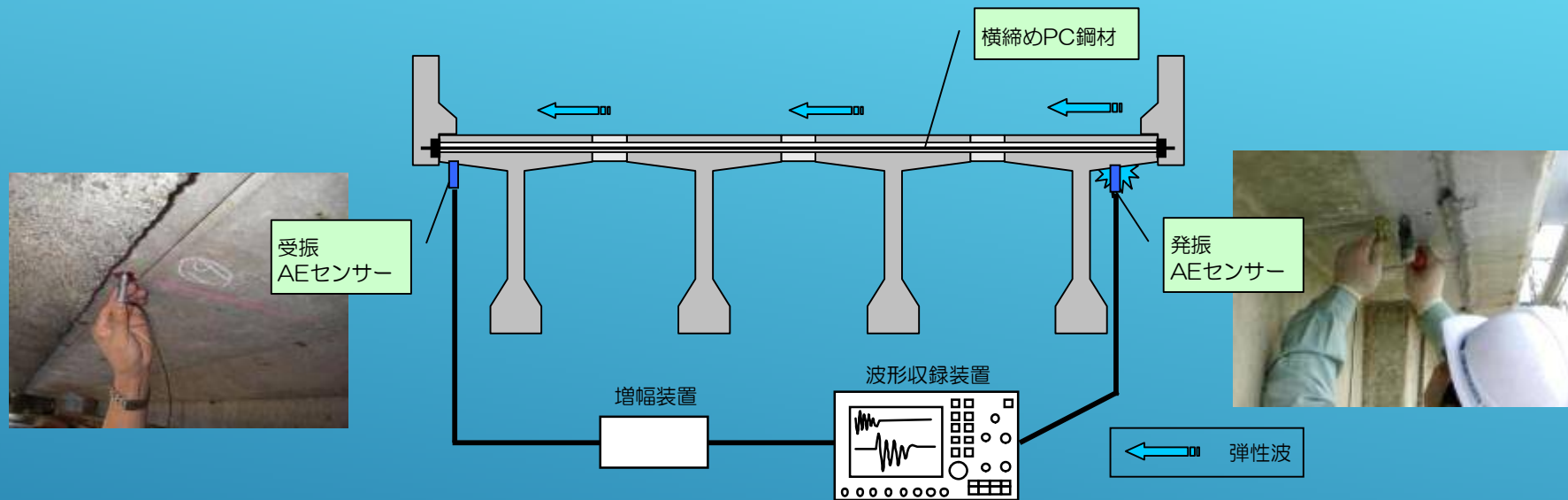
グラウト充填不良



削孔+CCD 充填不良

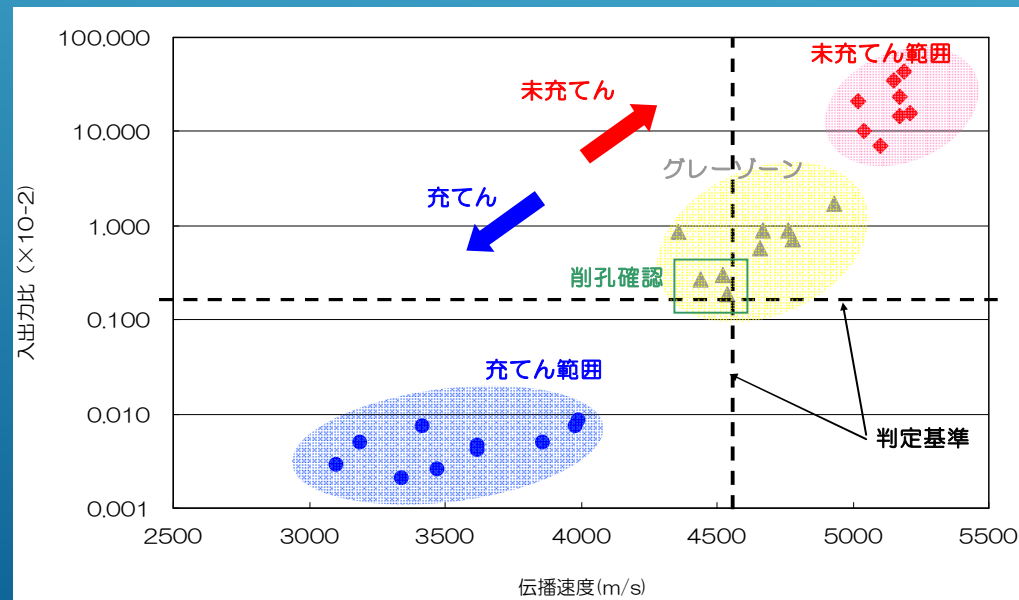
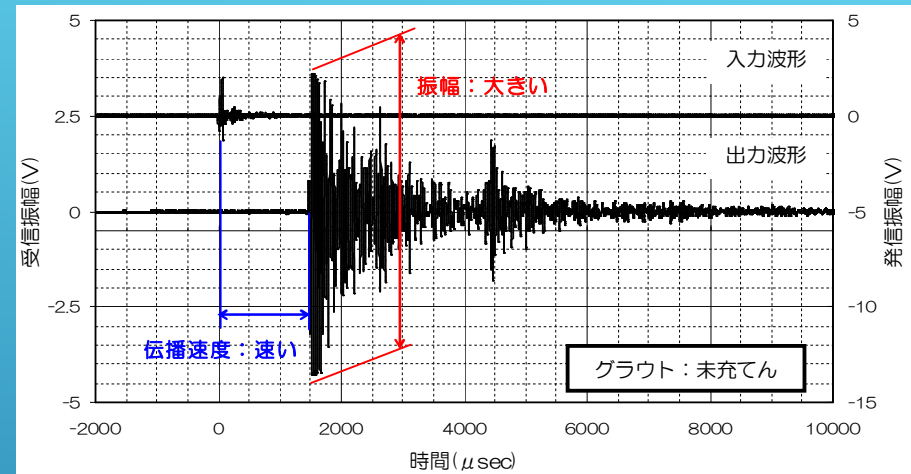
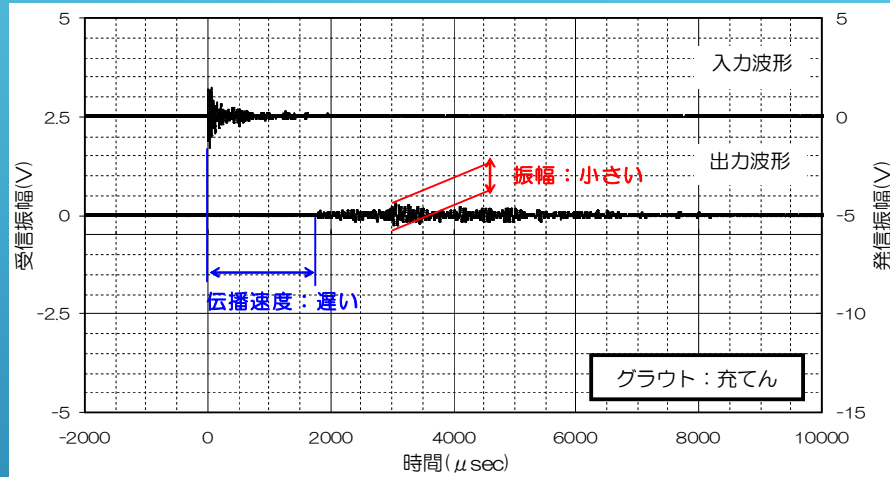
卓越したピークが2つ認められる

3.1 PCグラウト調査 IEWPP法【横締め衝撃弾性波法】



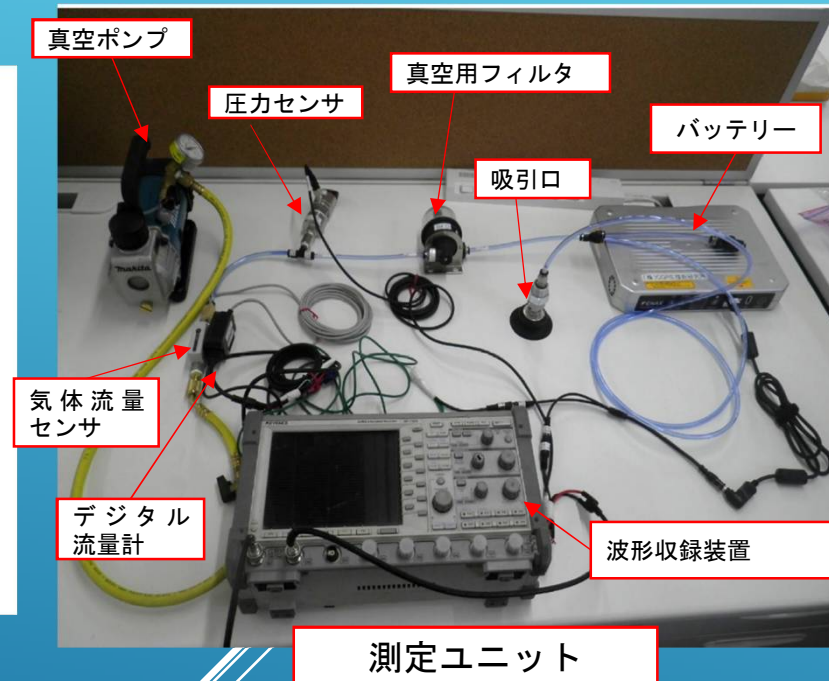
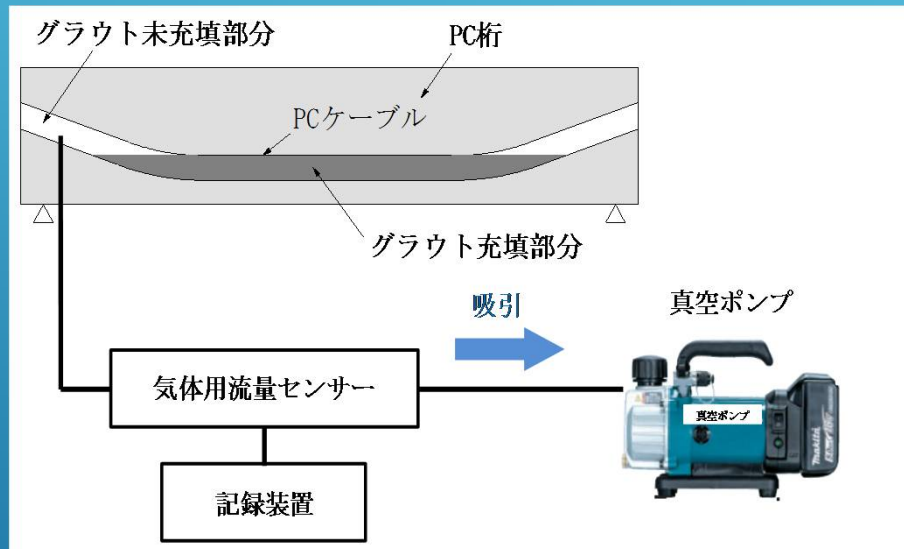
3.1 PCグラウト調査 IEWP法【横締め衝撃弾性波法】

評価方法



3.1 PCグラウト調査 真空法

目的：グラウト未充填部分の空隙体積を推定する



圧力補正

$$V = V_0 \frac{P_0}{(P + \Delta PT)}$$

漏気による補正（漏気が無い場合は“0”）

V：圧力補正後の空隙部の体積(ℓ)
V₀：流量計値(ℓ)
P：測定終了時のゲージ圧(MPa)
P₀：標準気圧(MPa)
ΔP：単位時間当たりの圧力上昇(MPa/s)
T：測定時間 (s)

3.1 PCグラウト調査 真空法

目的：グラウト未充填部分の空隙体積を推定する



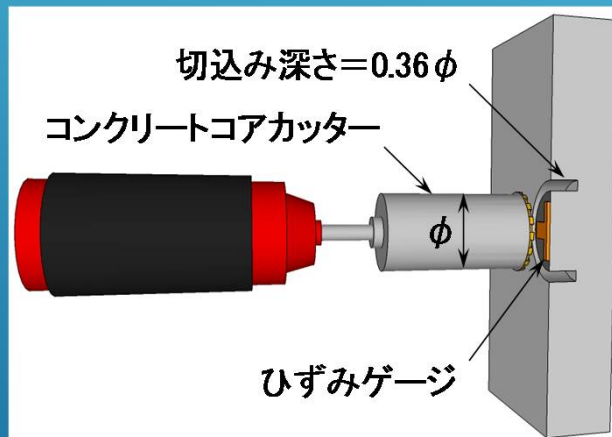
3.2 有効プレストレスの推定

調査項目	調査手法の例		評価内容の例
プレストレスの状態	コア切込み法	2方向のひずみゲージを貼り付け、コアを切り込むことによって解放されるひずみを測定する。	調査位置における乾燥収縮、クリープひずみの影響を消去し、応力を推定する。
	スリット法	コンクリートを部分的に切削し、応力解放した際のひずみを光学的ひずみ計測装置により測定する。	撮影した範囲内の任意の位置・方向のひずみを画像解析し、応力を推定する。
	フラットジャッキ法	PC部材に切削した溝にフラットジャッキを挿入し、応力の開放によって生じた変形量を復元させるために要する圧力を測定する。	調査位置におけるプレストレスを直接的に評価する
	鉄筋解放ひずみ法	プレストレスが導入されている方向の鉄筋を切断した時のひずみを測定する。	調査位置における鉄筋解放ひずみを応力に換算してプレストレスを評価する。

3.2 有効プレストレスの推定 コア切込み法

目的：既存PC構造物の応力状態を推定する

2方向にひずみゲージを貼り付け、コアを切り込むことによって解放されるひずみを測定する。



切り込み深さ = $\phi 50\text{mm} \times 0.36 = 18\text{mm}$
= $\phi 100\text{mm} \times 0.36 = 36\text{mm}$

$$\sigma_{x,e} = -E_{x,c} \cdot \Delta\varepsilon_{x,e}$$

$$\Delta\varepsilon_{x,e} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{1 + \nu} - \Delta\varepsilon_{x,cr} - \Delta\varepsilon_{x,sr} + \Delta\varepsilon_{y,sr}$$

ε_x : x方向ひずみ ε_y : y方向ひずみ

ν : コンクリートのポアソン比

$\Delta\varepsilon_{x,cr}$: クリープひずみの鋼材拘束によるx方向応力が解放されるときx方向の弾性ひずみ

$\Delta\varepsilon_{x,sr}$: 乾燥収縮ひずみの鋼材拘束によるx方向応力が解放されるときx方向の弾性ひずみ

$\Delta\varepsilon_{y,sr}$: 乾燥収縮ひずみの鋼材拘束によるy方向応力が解放されるときy方向の弾性ひずみ

$E_{x,c}$: x方向のコンクリートの弾性係数

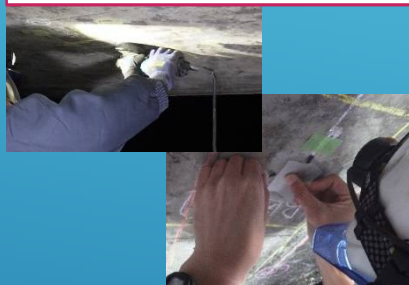
3.2 有効プレストレスの推定 コア切込み法

目的：既存PC構造物の応力状態を推定する

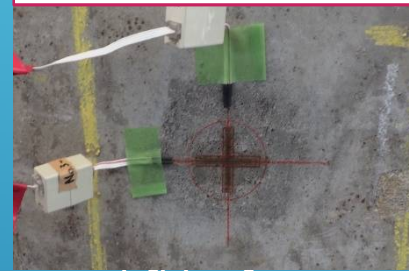
①鋼材探査及び位置決め



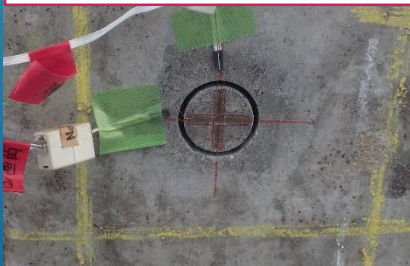
②ケレン及びゲージ貼付



③配線及び初期値計測



⑥配線及び解放ひずみ計測



⑤コア切込み

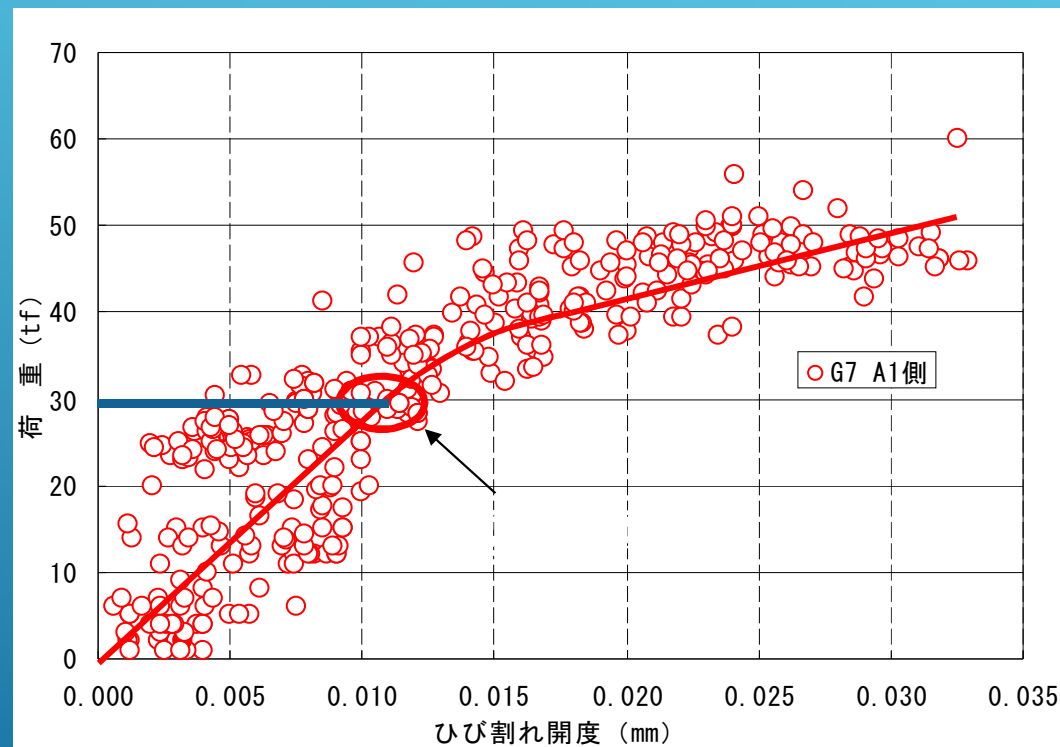
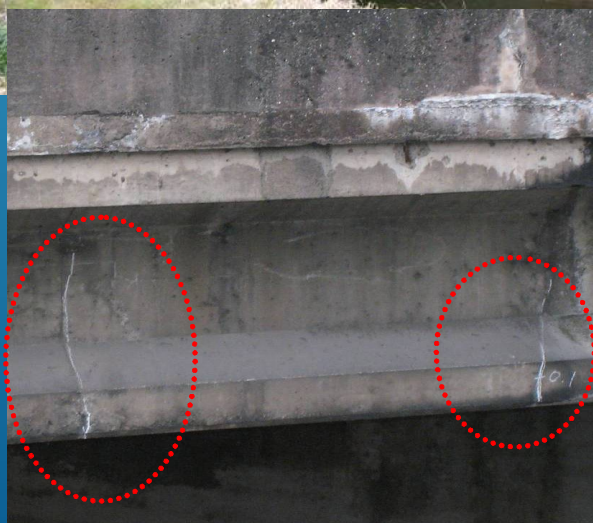


④配線取り外し



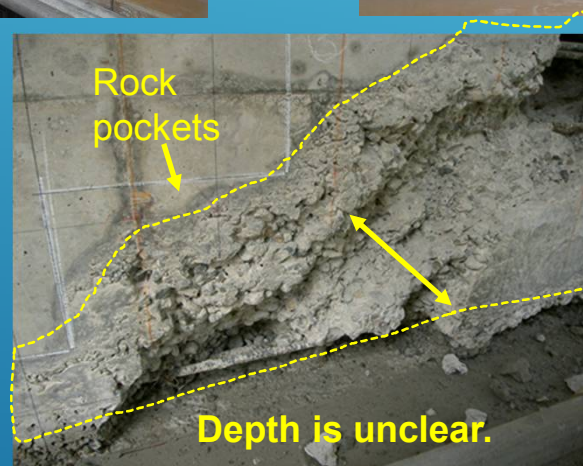
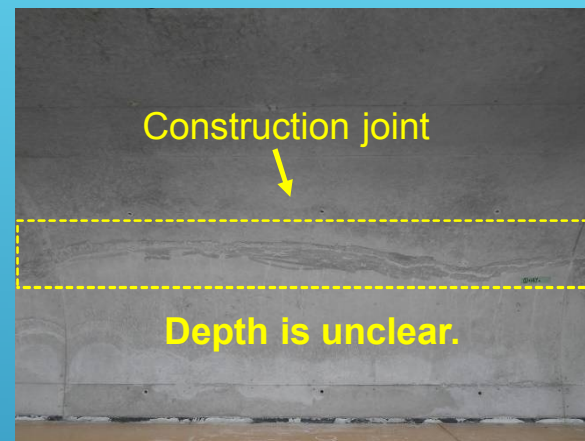
3.2 有効プレストレスの推定

実橋梁における調査 実車両走行時の挙動測定
荷重-ひび割れ開閉量



※車両重量はBWIMシステムを用いて計測した

3.3 コンクリート内部欠陥の調査



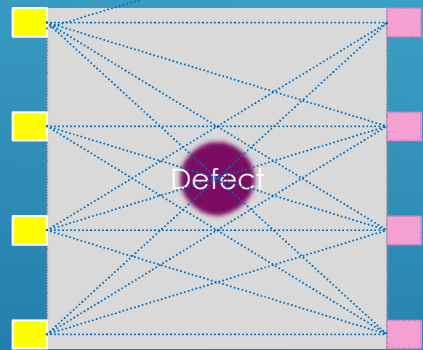
内部欠陥を非破壊検査で調査する必要がある
⇒ 超音波透過法により内部欠陥を評価する【可視化する】

弾性波に基づくトモグラフィ手法

- 空隙や劣化，損傷等の影響により弾性波の到達時間が健全時より遅くなるあるいは減衰が大きくなることを利用して損傷部を検知する。
- 材料の弾性波は損傷に対して敏感であるため，初期の損傷から検知可能な予防保全型の損傷評価が可能となる。

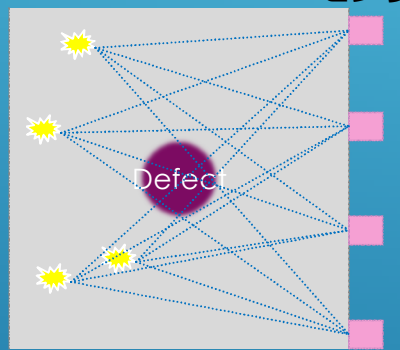
トモグラフィの種類と違い

【弾性波トモグラフィ】



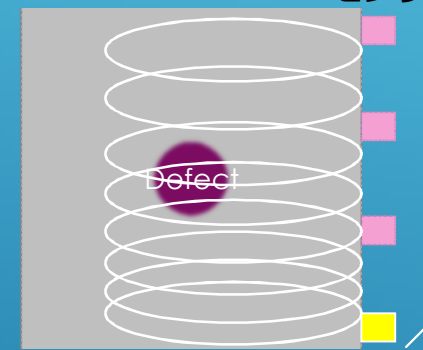
縦波の伝達時間から速度構造を評価
(入力位置および発信時間が必要)

【AEトモグラフィ】



縦波の伝達時間から速度構造を評価
(入力位置および発信時間が不要)

【表面波トモグラフィ】

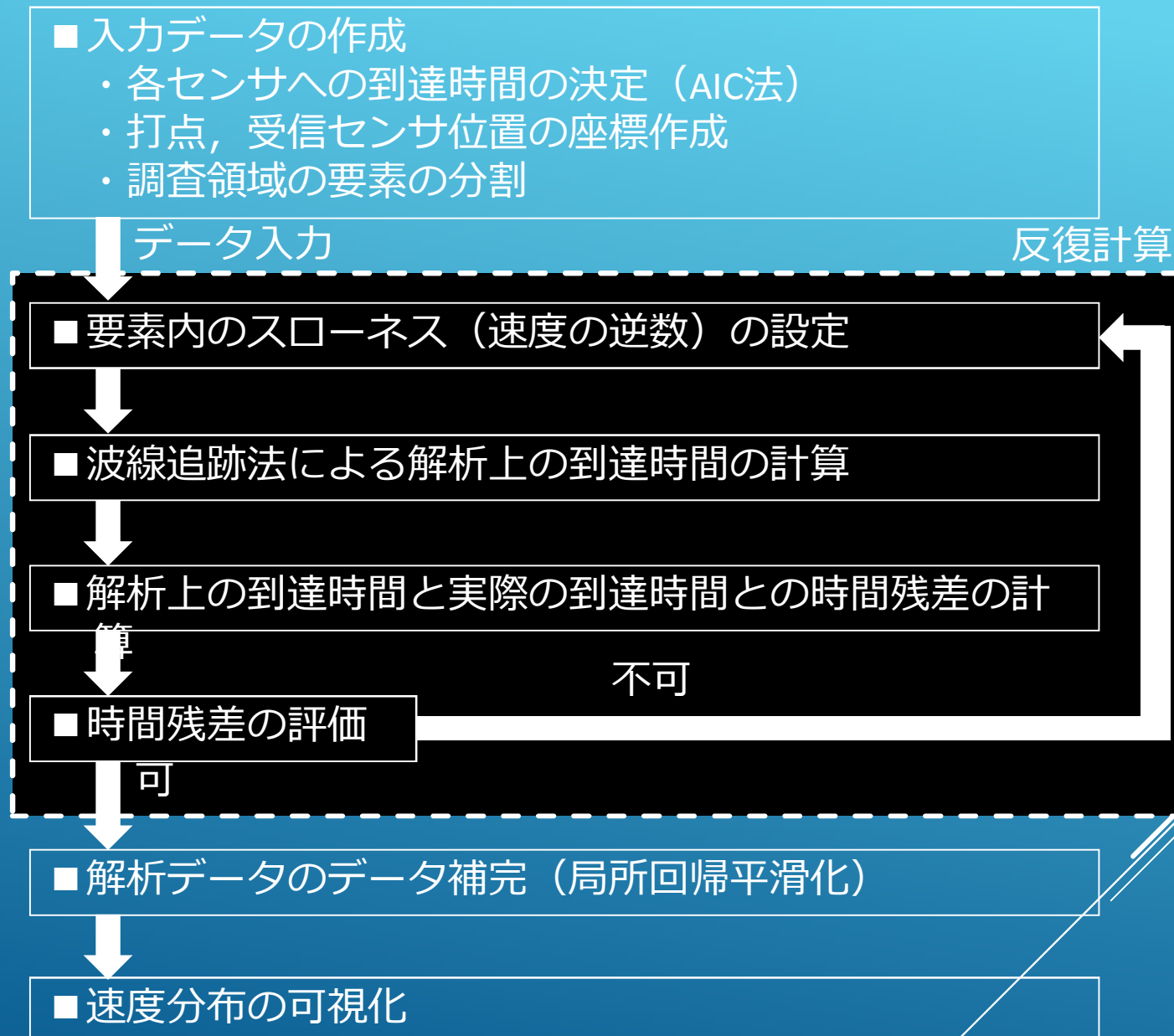


表面波伝達時間から入力周波数に応じた深さ部分の評価

AEトモグラフィでは，弾性波トモグラフィに加えて

- ✓ 波線追跡法を用いることにより，弾性波の発信時間，発信位置が未知でも，材料の速度構造を求めることが可能。
- ✓ 材料内部で生じるAEを利用可能なため，センサを片側のみに設置しての評価が可能。

弾性波トモグラフィのフロー



弾性波トモグラフィ手法の適用事例

■ PCグラウトの未充填部検知

プレストレストコンクリートのグラウトの未充填部の検出のため透過弾性波を利用した点検手法を開発，適用。

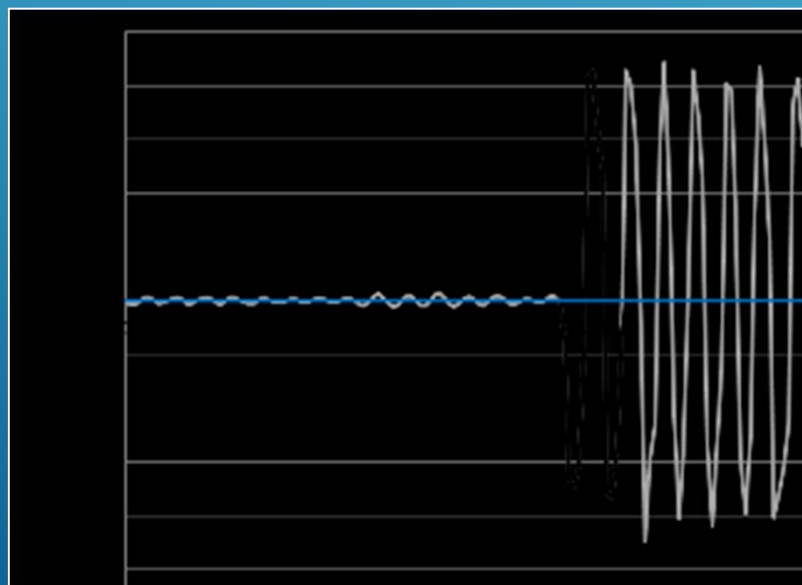
■ 着目弾性波パラメータ

- ✓ 到達時間（弾性波速度）
- ✓ パワースペクトル比（減衰）
- ✓ スペクトル重心

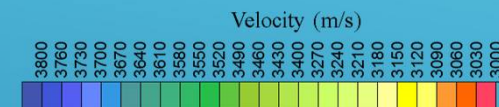
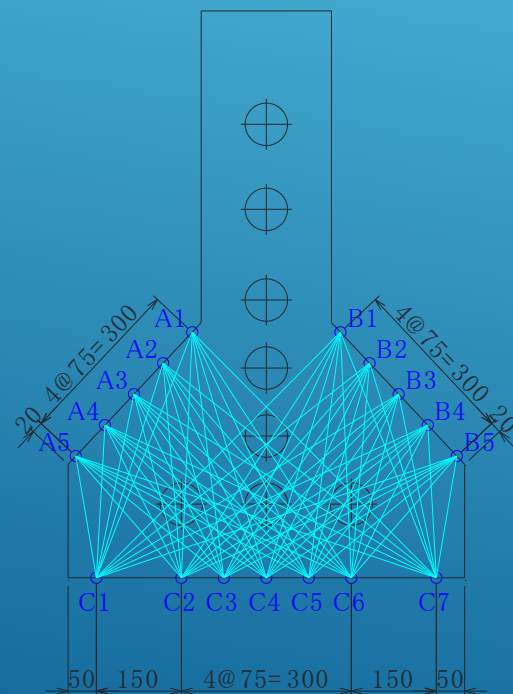


適用方法

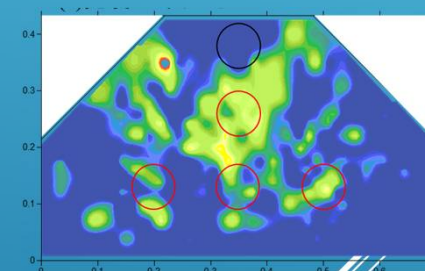
トモグラフィ結果



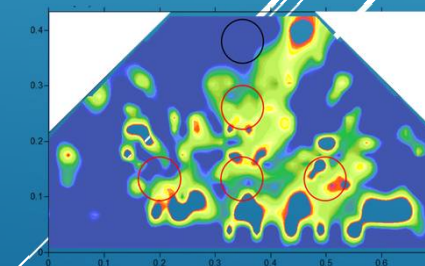
弾性波の初動の特性に着目



充填

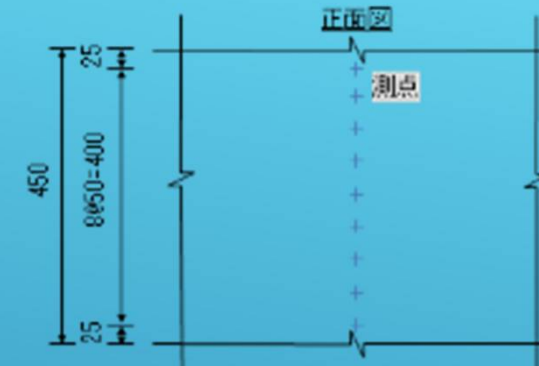


未充填



3.3コンクリート内部の調査 超音波トモグラフィ法

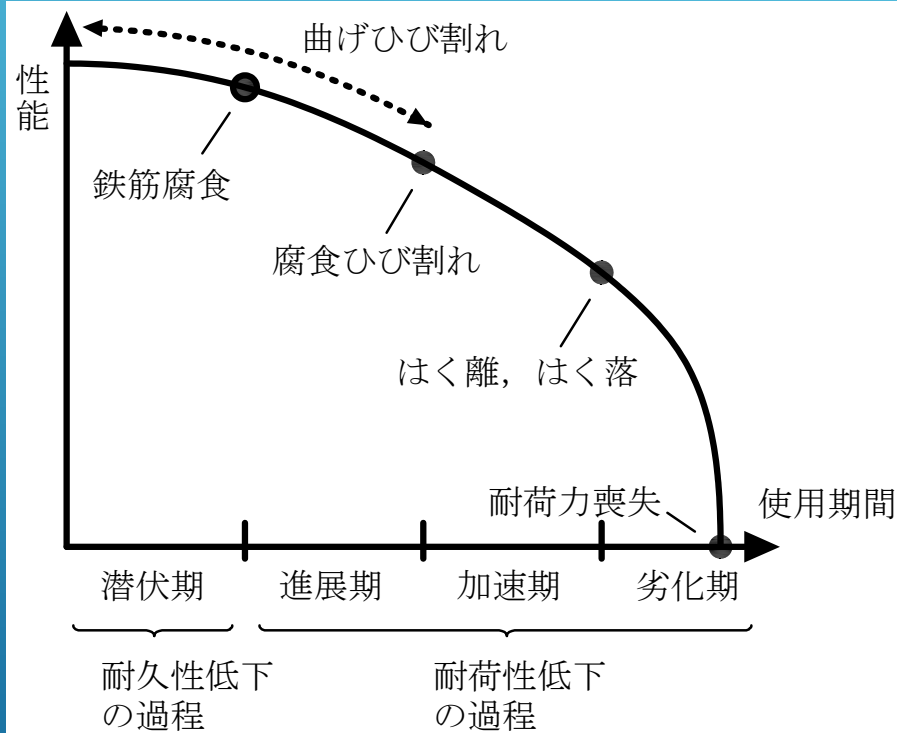
- ・ 施工目地に生じた欠陥の深さを評価する
- ・ 表面からの目視調査では、幅30 mm 深さ**75 mm**であった。
- ・ ウェブ垂直方向に測線に向け、超音波トモグラフィ法を実施した。



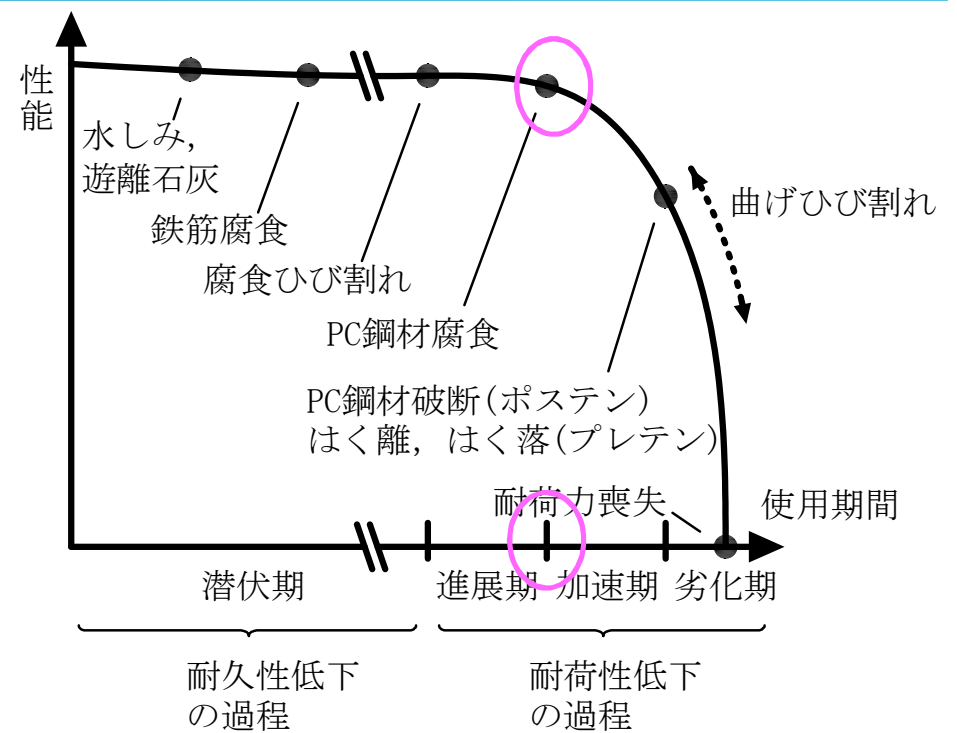
Location	Description	Schematic	Appearance	Tomography analysis result
Control area without defects	Dense concrete without defects	Construction joint		Front Back Propagation velocity was even across the plane. 4,500 3,500 (m/sec)
Defective area	A crack in the construction joint width: 30 mm depth: 75 mm	Crack Construction joint	Damage detected.	Front Back Propagation velocity decreased at the defect. 4,500 3,500 (m/sec)

4. PC構造物の診断

4.1 PC構造物の診断



(a) RC構造物の場合



(b) PC構造物の場合

RC構造とPC構造の劣化過程の概念図

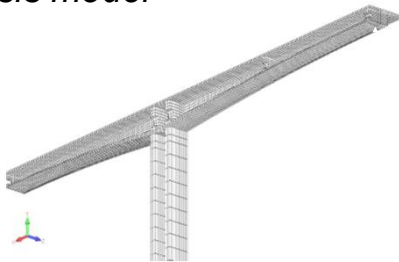
4.1 PC構造物の診断

- ▶ PC構造は、PC鋼材の腐食が生じると耐力の低下が急激に起きる.
- ▶ 安全性の定量的な評価が難しい.
- ▶ PCグラウト充填の良否を考慮に入れた評価を行う.

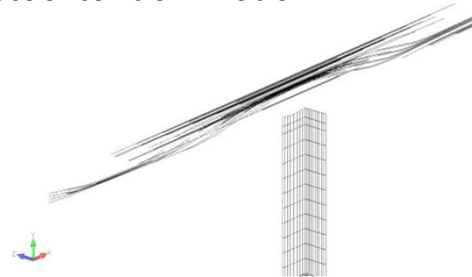
4.2 PC構造物の診断 【時間依存性解析】

- ・ 持続荷重（プレストレス、死荷重）によるクリープひずみを解析
- ・ 各施工ブロックのコンクリート材令の差を考慮した乾燥収縮ひずみを解析

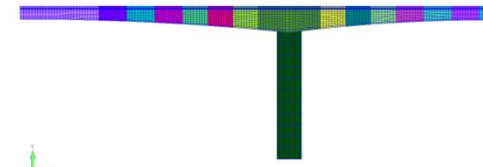
Analysis model



Steel tendon model

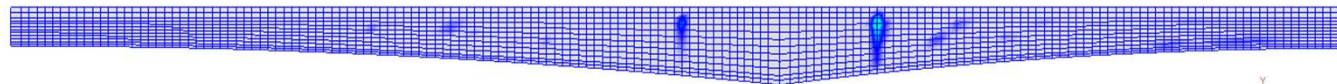


Creep and drying shrinkage settings

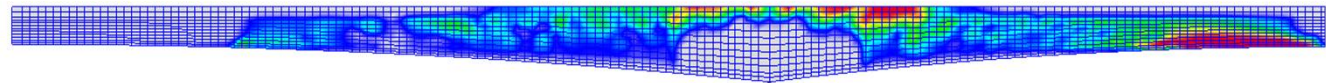


Analysis result (side of a web)

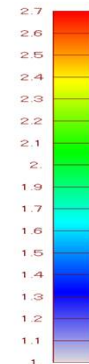
At completion



After 20 years

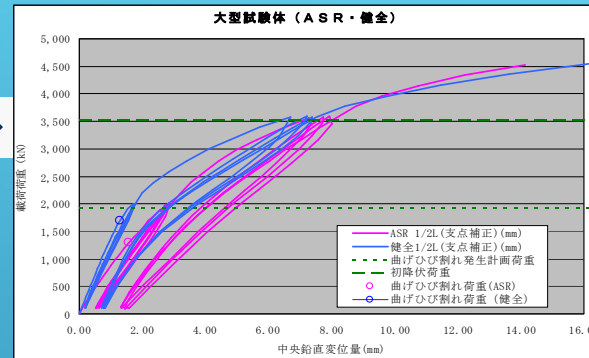


Output Set: 施工時(クリープ考慮)
Contour: Solid Max Prin Stress

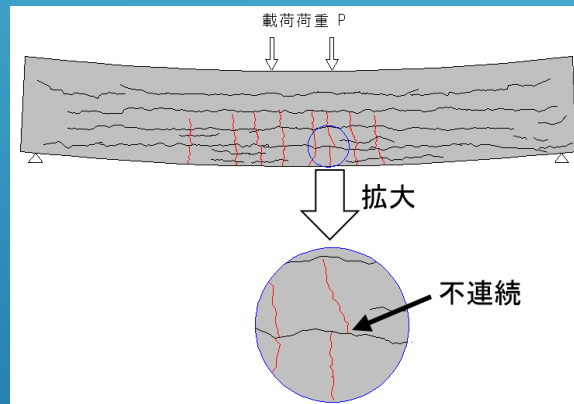


Checking the creep and drying shrinkage strain in the web 20 years after the completion

ASR大型暴露試験体載荷試験【参考】



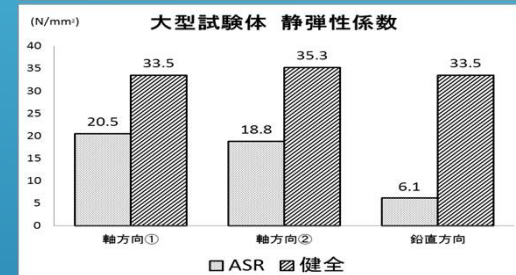
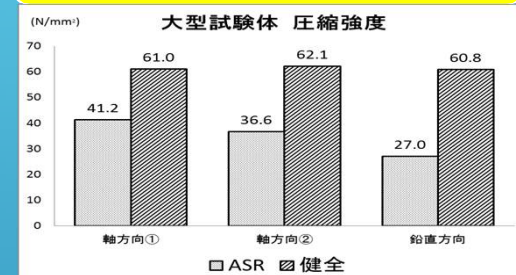
ASR試験体、健全試験体の曲げ破壊荷重はほぼ同様
「ASR/健全=0.996」



曲げひび割れの進展



切断面の状況



TPによる物性値

【曲げひび割れ挙動】

- ・曲げひび割れ進展不連続
- ・ひび割れ本数多い (分散性能)
- ・ひび割れ間隔狭い (")

⇒ ASR劣化による水平ひび割れの影響

【切断面】 ひび割れはかぶり部のみ

【TPによる物性値結果】 ASR/健全比にて

- ・圧縮強度 ≒ 45～68%
- ・静弾性係数：軸方向 ≒ 60%
- ：鉛直方向 ≒ 18%

(水平ひび割れの影響)

5. 対 策

43

5.1 補修および補強

PC構造物における対策の選定例(その1)

対策の種類		対策の方法	予防的な対策	事後的な対策
PC鋼材劣化に関する対策	塩害対策	表面保護	○	
		電気防食	○	
		脱塩工法	○	
		断面修復		○
	水の浸入対策	防水工	○	○
		排水工・漏水防止工	○	○
	モニタリング	塩分モニタリング	○	
		腐食(電位等)モニタリング	○	
耐久性に関する対策	防食対策	表面保護	○	
		PCグラウトの再注入	○	
	モニタリング	外観観察(コンクリートの表面状態等) ひび割れ観測	○	

5.1 補修および補強

対策の種類		対策の方法	予防的な対策	事後的な対策
耐荷力に関する対策	コンクリート部材の交換	打換え, 取替え工法	○	○
	コンクリート断面の増加	増厚工法 コンクリート巻立て工法	○	
	部材の追加	縦桁増設工法	○	○
	支持点の追加	支持工法	○	○
	補強材の追加	鋼板接着工法 連続繊維工法 鋼板巻立て工法 連続繊維巻立て工法	○	
	プレストレスの追加	外ケーブル工法	○	○
	耐震性の確保	落橋防止構造の設置など	○	
	支承機能の保全	鋼製支承の補修	○	
		支承の取替え	○	○
	モニタリング	たわみ, 振動, 支承の移動量, 車両大型化や車両通行量の増大の観測	○	

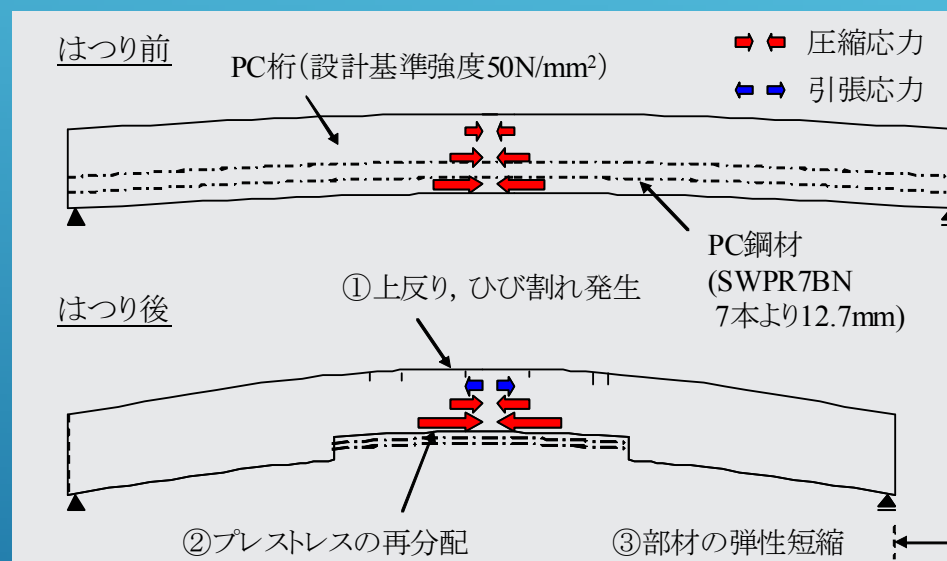
5.2 対策における留意点

- ▶ PC構造に適切な対策を選定する.
- ▶ 選択した補修・補強工法によっては、**プレストレスの分布が大きく変化**する事がある.
- ▶ 施工中の十分な管理と施工後の適切な検査が必要となる.

5.2 対策における留意点

①塩害対策における留意点

- 断面修復工法を適用する場合は、プレストレスの再分配に対する安全性の検討を行う。



断面はつりがPC部材の挙動に及ぼす影響

- 電気化学的補修工法を適用する場合は、電流量によるPC鋼材の水素脆化に対する考慮が必要。

おわりに

- ▶ PC構造物の維持管理にあたっては、PC構造特有の劣化の特徴を十分理解する必要がある。
- ▶ 維持管理に従事する技術者は、PC工学に関する知識と経験が必要である。
- ▶ 維持管理にはPC構造専門の技術者が従事する必要がある？
- ▶ PC構造専門の技術者とは？
 - 博士（PC工学）
 - 技術士（鋼構造及びコンクリート）
 - コンクリート診断士
 - コンクリート構造物診断士（PC工学会）

END
ご静聴有難うございました