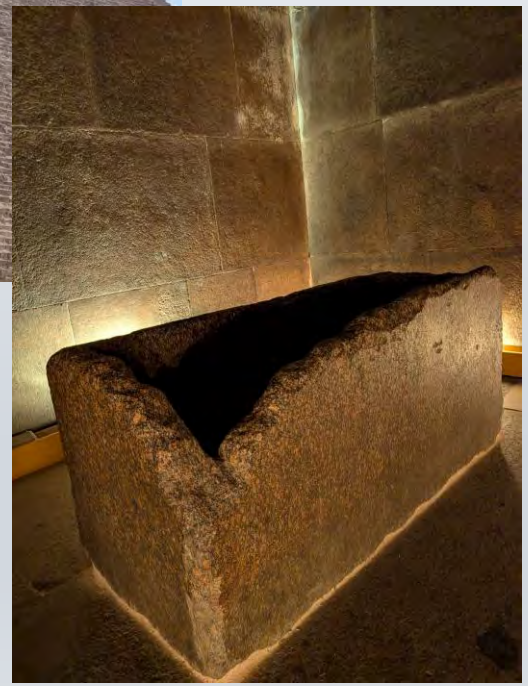
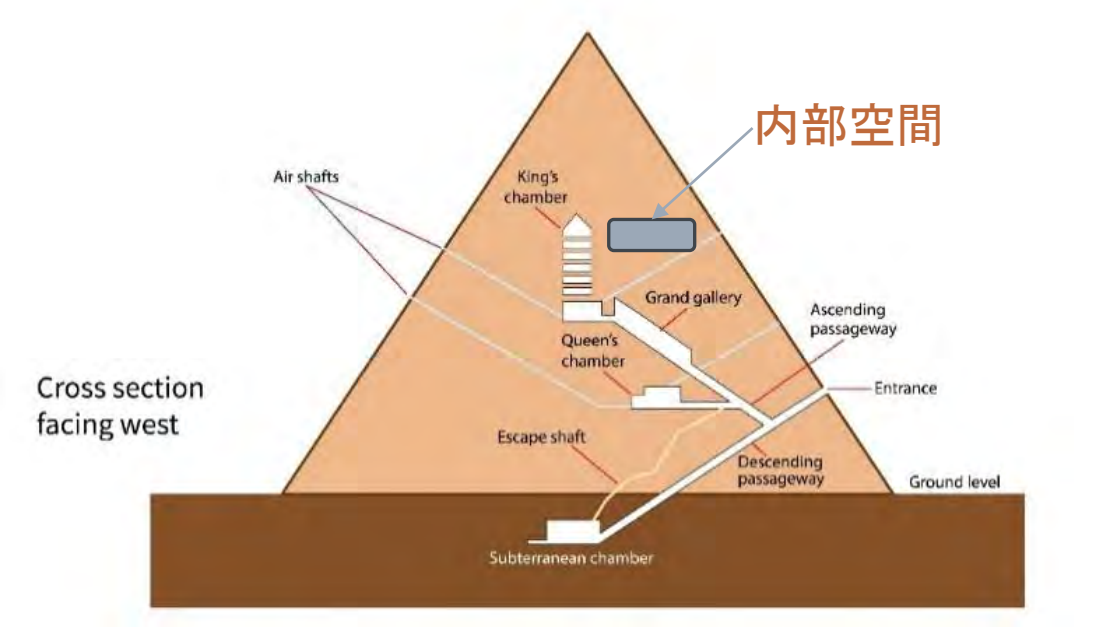
持続可能な未来を見据えた
コンクリート構造物の維持管理

株式会社CORE技術研究所

真鍋英規

クフ王のピラミッド





巨大構造物の内部を透視

- 非破壊技術により内部空間を発見
- 宇宙線素粒子“ミューオン”を原子核乾板で捉える
- 従来の100倍高速でデジタルデータ化できる独自の超高速自動読み取り装置を開発
- 名古屋大学　中村光廣教授ら

引用：科学技術振興機構H.P.　宇宙線ミューオンによる透視技術の開発

Contents

１．PCグラウト調査　超音波パルスエコー法

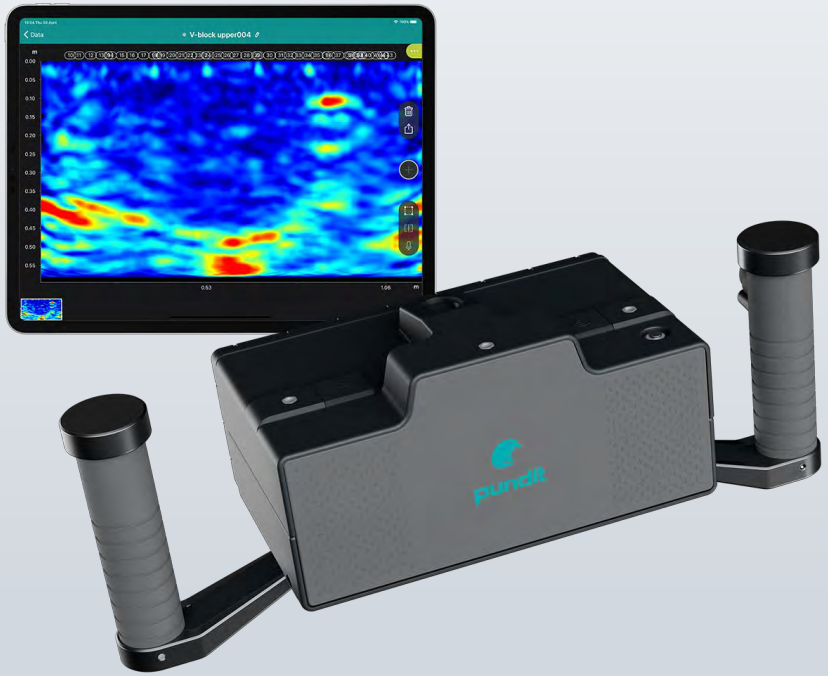
２．電磁石式漏洩磁束による鋼材破断調査

３．ドローン空撮によるたわみ測定

４．ミリ波レーダーを用いた計測

５．J-ティフコム

１．PCグラウト調査
超音波パルスエコー法



- PCグラウト充塡不良
- PC鋼材破断の影響
- PCグラウトの調査
- 超音波パルスエコー法

1-1. PCグラウト充填不良

PCグラウト充填不良による変状

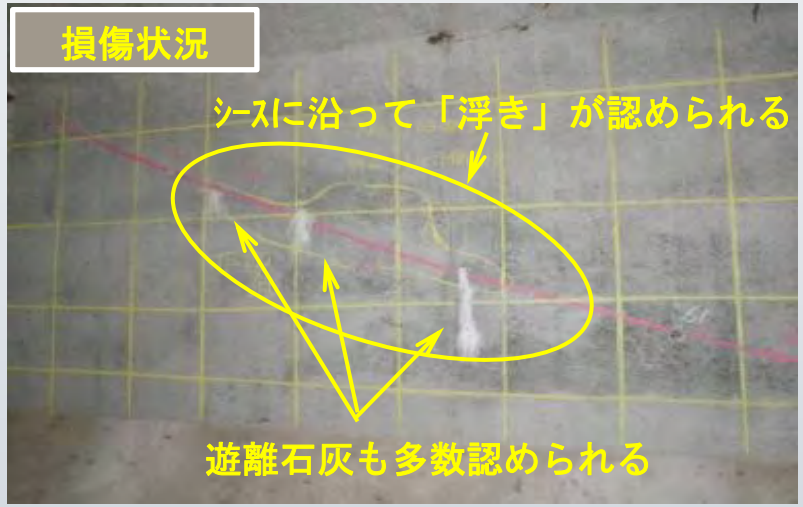
PC鋼材の腐食～破断への危険性

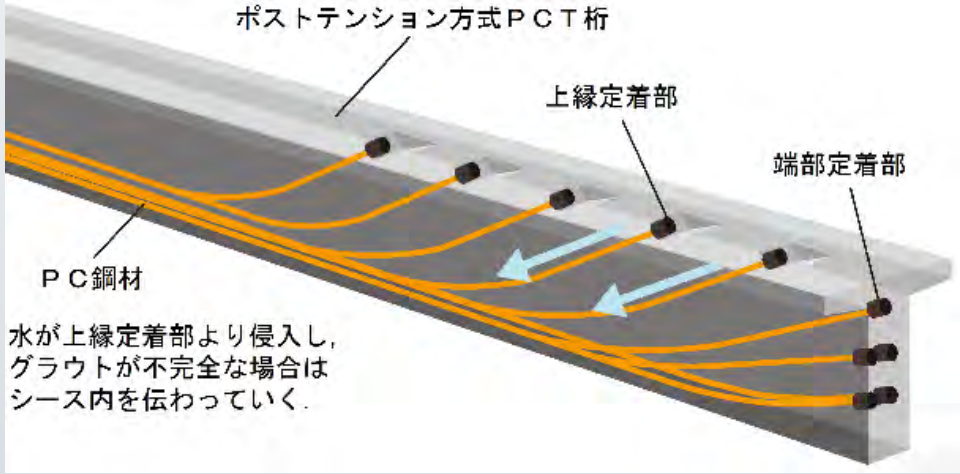
グラウト充填不良により生じたPC鋼材に
沿ったひび割れとエフロレッセンス

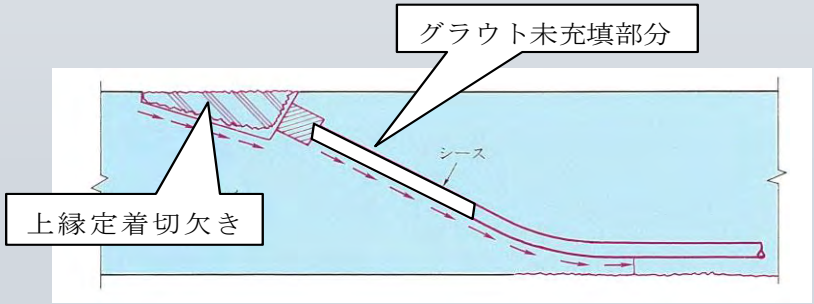
ポストテンション方式T桁の下フランジに
生じたひび割れの事例

1-1. PCグラウト充填不良

主ケーブルに沿ったひび割れ事例(ウェブ)





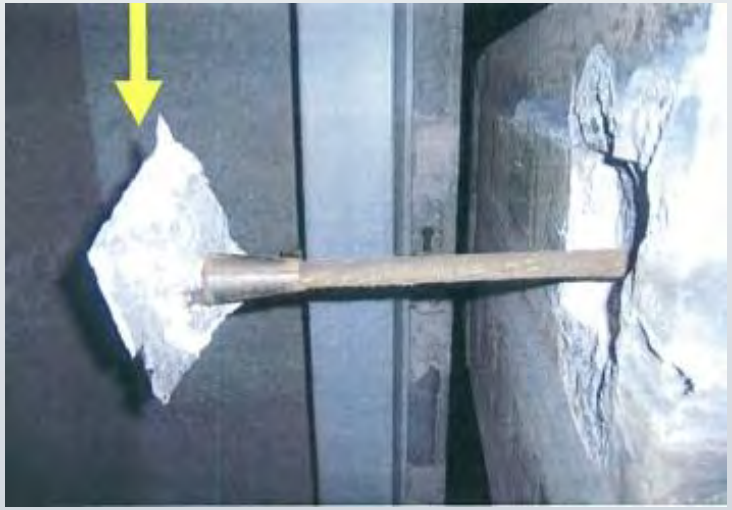


1-2. PC鋼材の破断の影響

PCグラウト充填不良→腐食因子の浸入→PC鋼材の破断

PC鋼棒　床版横締

PC鋼より線　横桁



PCマルチストランド　主桁

1-2. PC鋼材の破断の影響

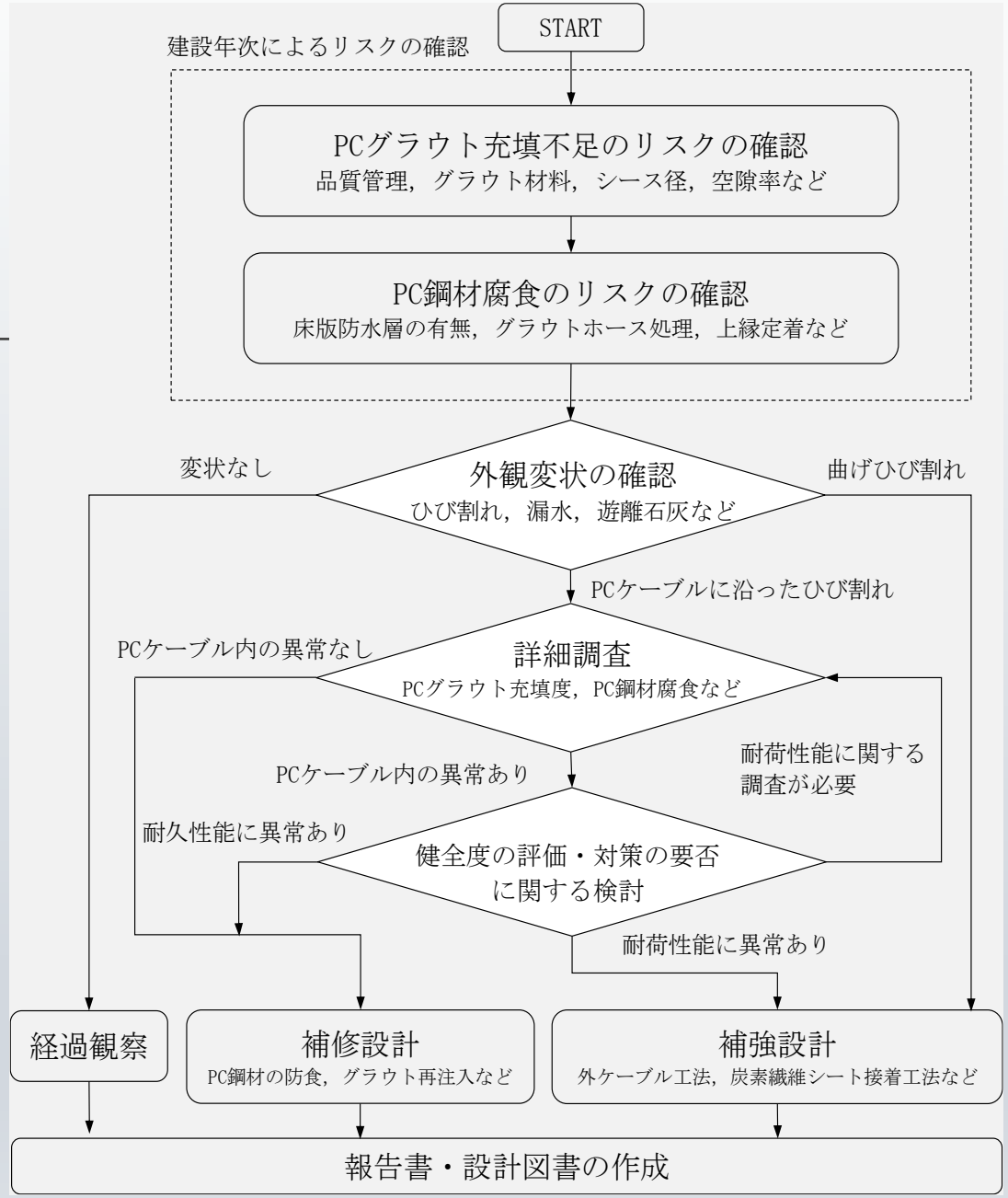
- **安全性能**
  - ① 曲げ応力度
  - ② 曲げ破壊耐力
  - ③ せん断耐力　プレストレス鉛直分力の消失
  - ④ ブロック目地部（鉄筋は不連続）
  - ⑤ 横分配（横締め）
- **使用性能**
  - ① たわみ
  - ② 振動
- **耐久性能**
- **第三者への影響**

Ynys-y-Gwas橋 （1953年竣工）
英国　南ウエールズ

写真：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

1-3. PCグラウトの調査

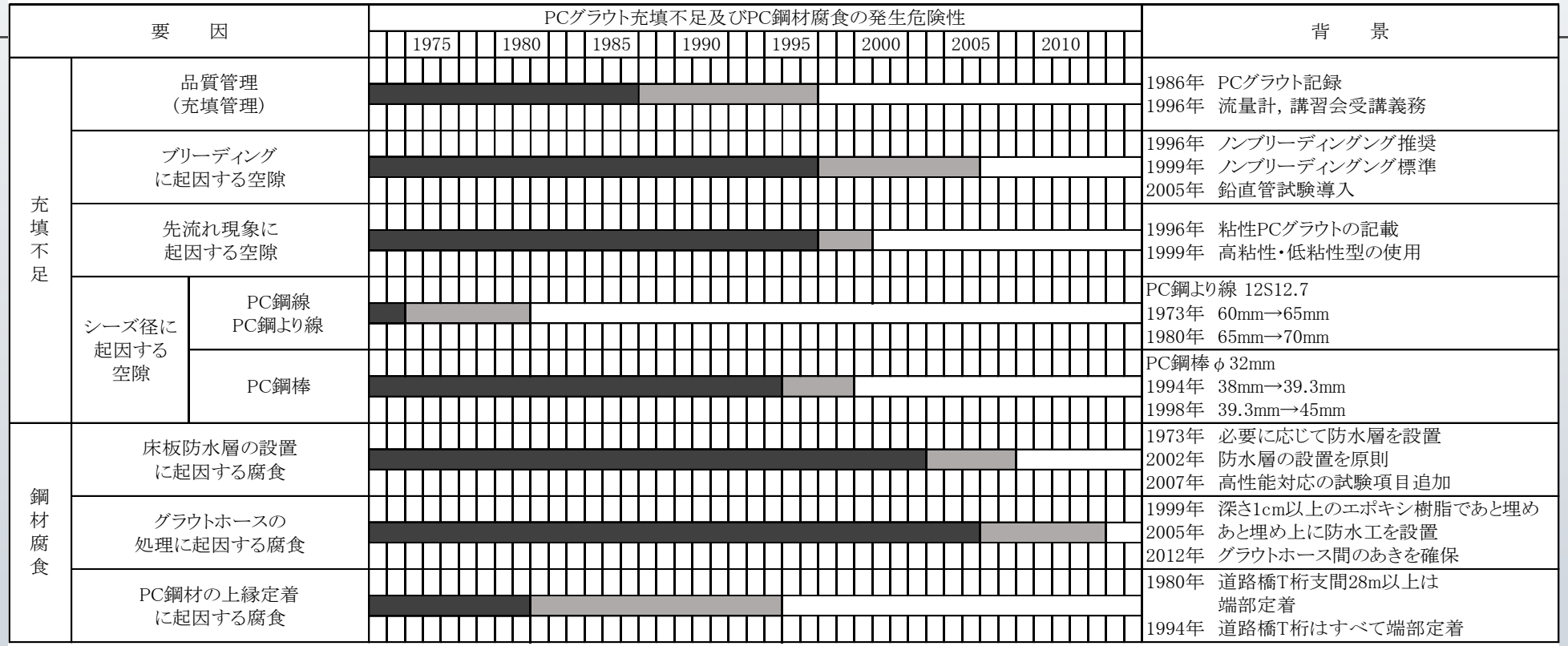
PCグラウト充填度調査と対策のフロー



1-3. PCグラウトの調査　　PCグラウト充填不良のリスク

PCグラウト充填状況及びPC鋼材腐食状況の把握が重要

表 - 2　適用基準類の変遷に基づく鋼材変状の発生の危険性



注）発生危険性 ■：対象とする要因に対して規定がない，もしくは対策に不備があった。

■：要因対策が実施されているが，途中経過的な対策であった。

□：要因対策が完了しており，PCグラウト充填不足やPC鋼材腐食が発生する可能性が低い。

引用：土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】

1-3. PCグラウトの調査　PCグラウト調査手法一覧

項目		削孔調査	衝撃弾性波法		X線法	超音波法
検査手法		削孔調査	衝撃弾性波法	インパクトエコー法	X線透過法	超音波法
確認方法		目視確認	応答波形による確認		目視確認	応答波形による確認
長所		確実性がある	検査が簡易に可能	検査が簡易に可能	・確認が容易	検査が比較的簡易
短所		・全調査に削孔が必要	・判断に技術力が伴う ・横締めPC鋼材しか適用できない	・判断に技術力が伴う ・PC鋼材の間隔により使用範囲が限定される	・調査時間が長い ・部材厚により使用範囲が限定される	・判断に技術力が伴う ・機器が大きい ・コストが高い
費用(万円/本)		約1.6	約1.7	約5	約10	約5-20
評価	主ｹｰﾌﾞﾙ	○	×	○	○	○
	横締め	○	○	△	△	△

削孔調査

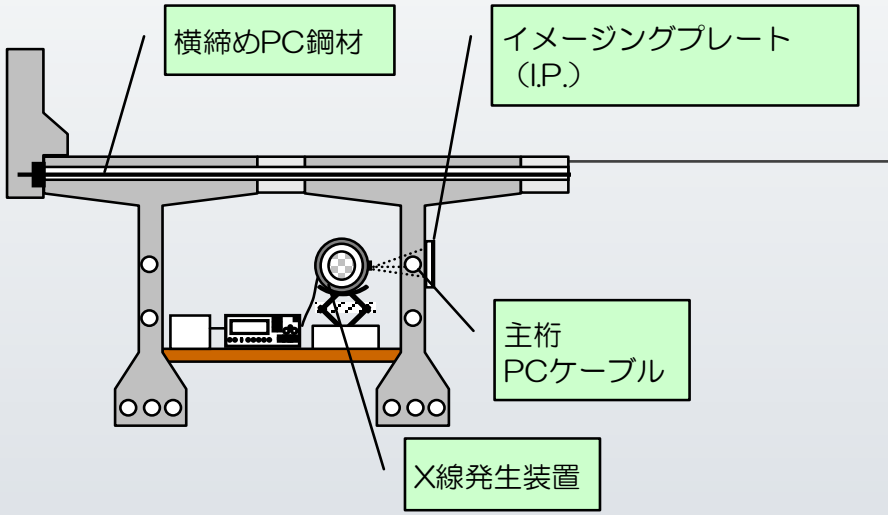
X線撮影

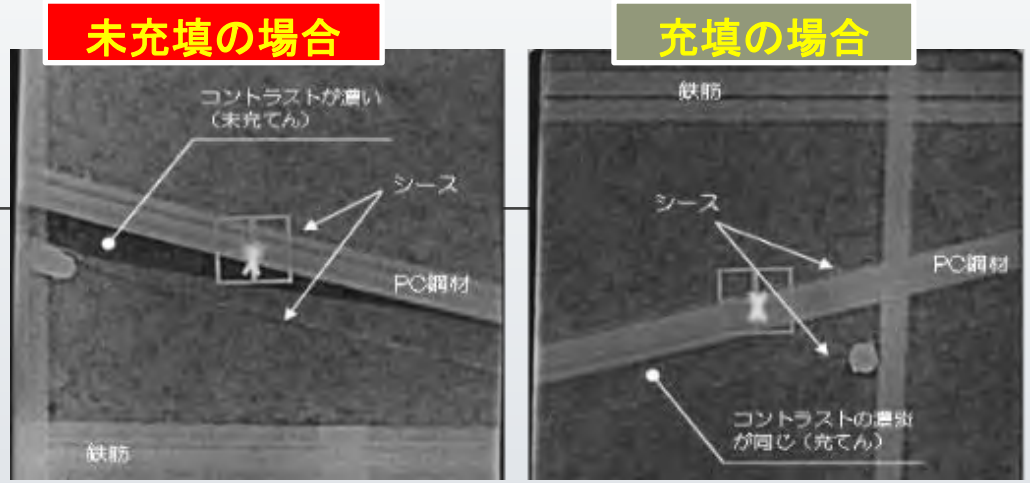
超音波法

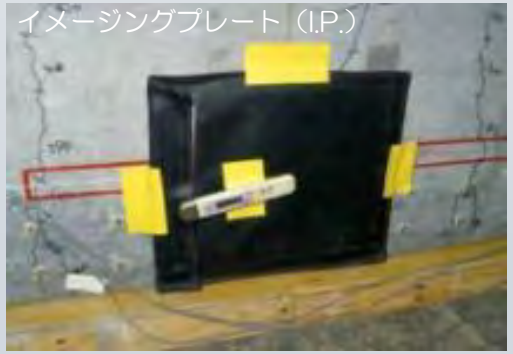
衝撃弾性波法

インパクトエコー法

1-4. 放射線（X線）透過法　従来型







加速エネルギー	0.30eV
総重量	約50kg
X線ヘッド重量	37kg
X線ヘッドサイズ	約300×300×900mm
最大板厚	400mm程度
照射時間	400mm：60分程度
検出器	イメージングプレート
資格	X線作業主任者
法令	労働安全衛生法

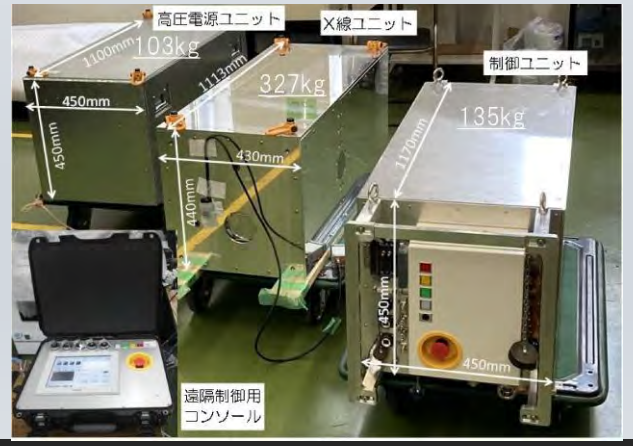
1-4. 放射線（X線）透過法　高出力型

低出力タイプ

加速エネルギー	0.95 MeV
総重量	約180kg
X線ヘッド重量	45kg
X線ヘッドサイズ	約500×500×680mm
最大板厚	500mm程度
照射時間	400mm：20分程度
検出器	フラットパネルディテクター スキャニング型イメージングディテクター
資格	X線作業主任者
法令	労働安全衛生法

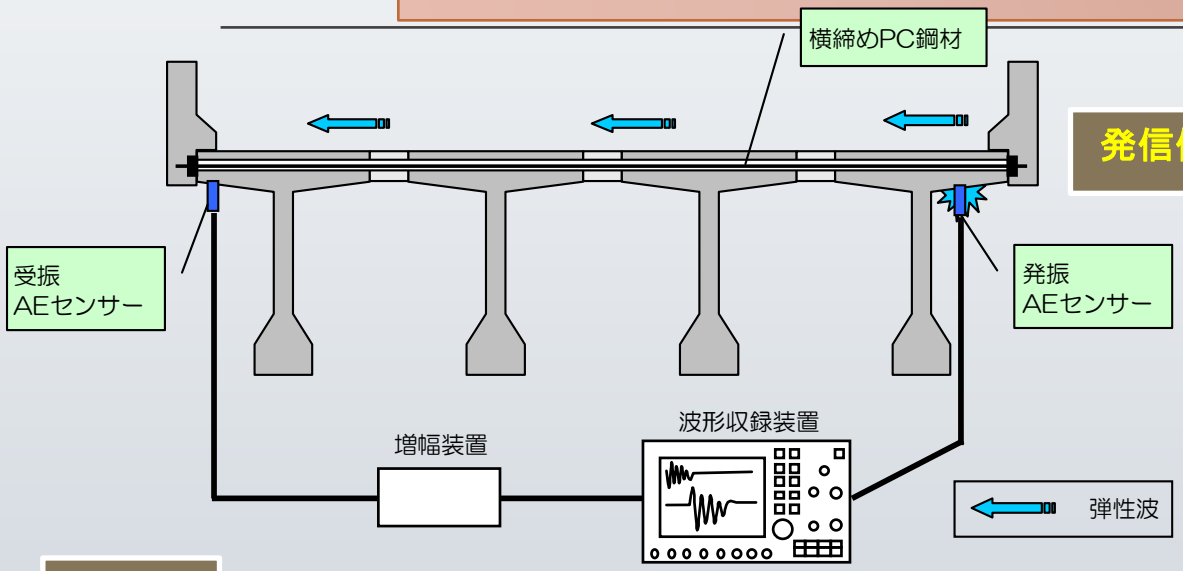
高出力タイプ

加速エネルギー	3.95MeV
総重量	約400kg
X線ヘッド重量	142kg
X線ヘッドサイズ	約500×500×820mm
最大板厚	1000mm程度
照射時間	1000mm：30分程度
検出器	フラットパネルディテクター スキャニング型イメージングディテクター
資格	放射線取扱主任者
法令	放射線同位元素等の規制に関する法律



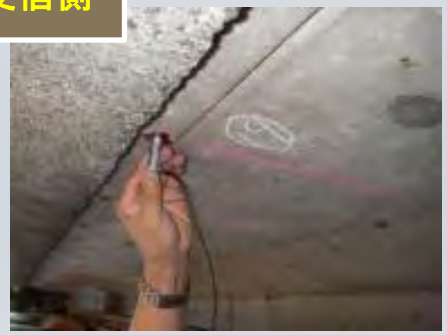
1-5. 衝撃弾性波（適用範囲：横締め）

・床版や横桁に配置された**横締めPCケーブル**が対象
・横締めPCケーブル**1本全体**のグラウト充填度の判定を行う

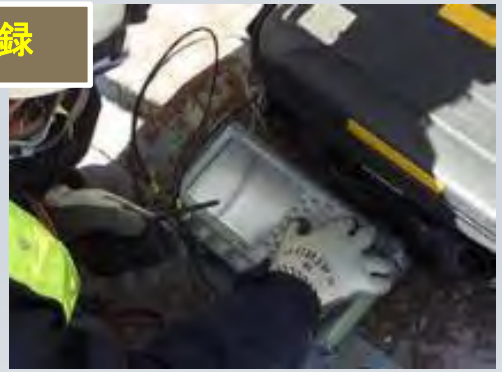


発信側

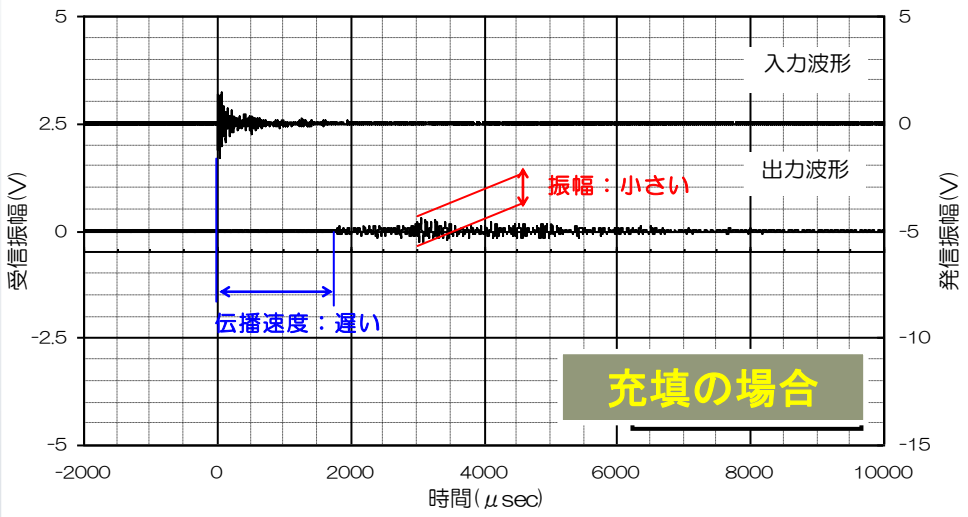
受信側

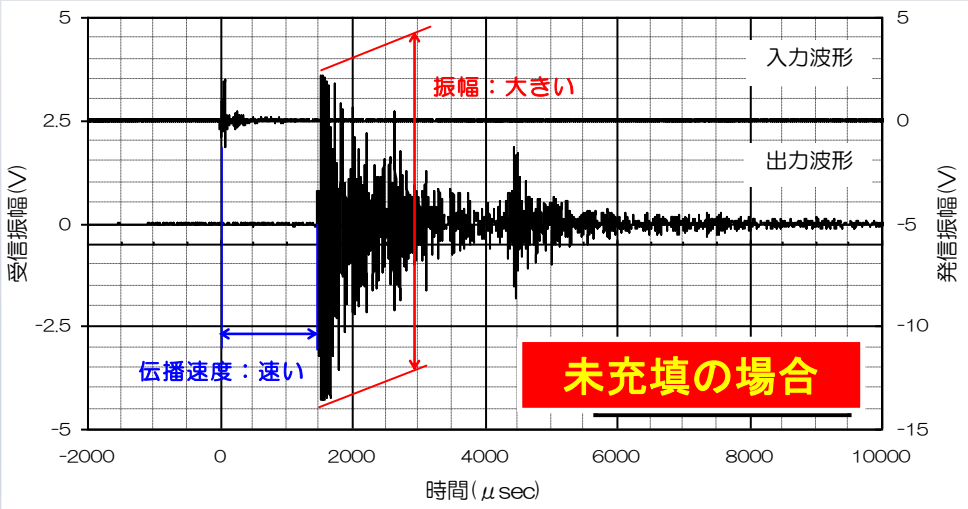


波形収録

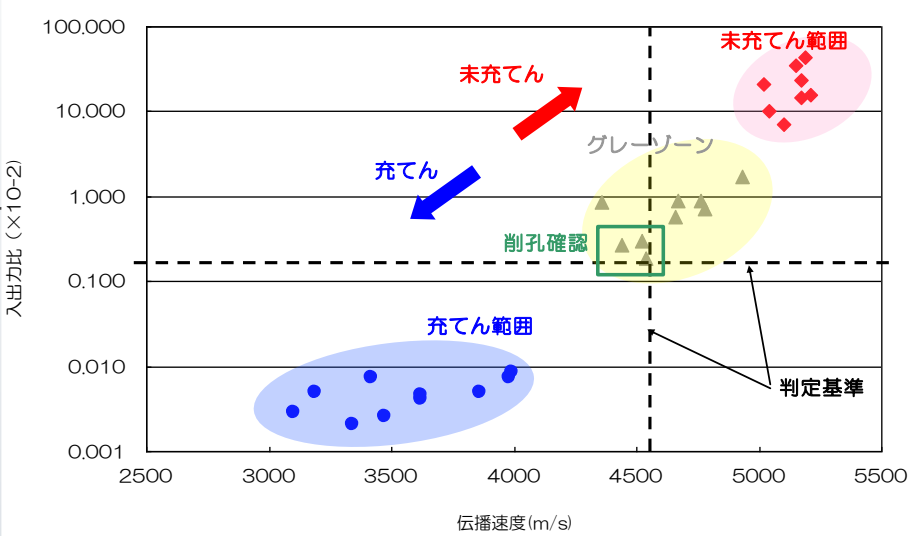


1-5. 衝撃弾性波（評価方法）





測定波形例

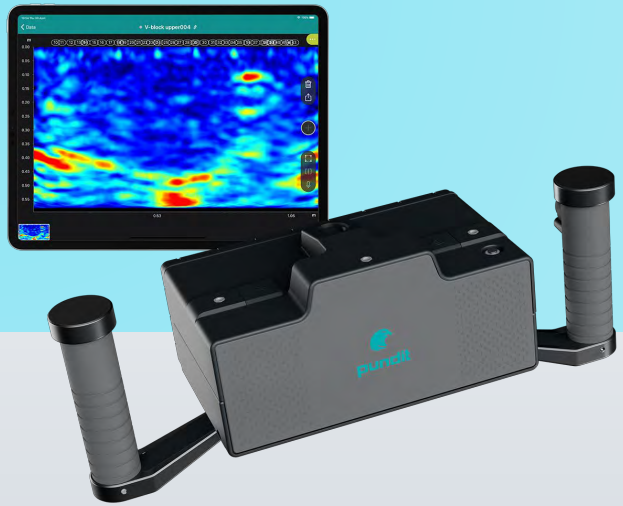


・PC鋼材を伝わった弾性波の**伝播速度**、および伝わった**エネルギー**(入出力比:[受信振幅/入力振幅])の2つの指標で評価

○グラウトが**充填**されている場合
→グラウトの拘束によってPC鋼材を伝播するエネルギーが減衰するために出力波が**小**さくなる。伝播速度は見掛け上遅くなる。

○グラウトが**未充填**の場合
→伝播エネルギーの減衰が小さくなるため、出力波が**大**きくなる。伝播速度は見掛け上速くなる。

1-6．超音波パルスエコー法



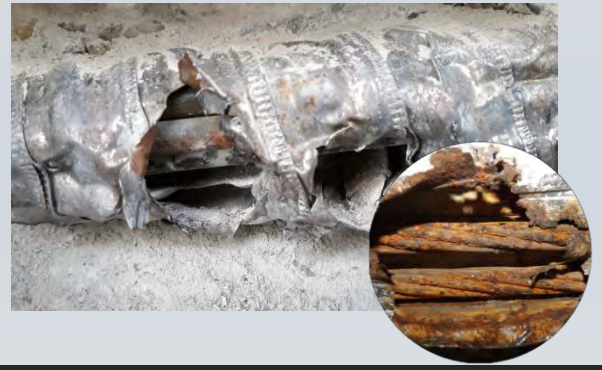
超音波パルスエコー法とは、横波の超音波(音速1800～2500m/s)を用いて、コンクリートの反対面や内部欠陥からの反射エコーを測定することで、空隙や豆板、シース内のグラウト充填度を評価する非破壊検査手法である。

空隙・剥離調査

空洞や欠陥を検出が可能であり,トモグラフィ同様に視覚的に確認することができる

グラウト調査

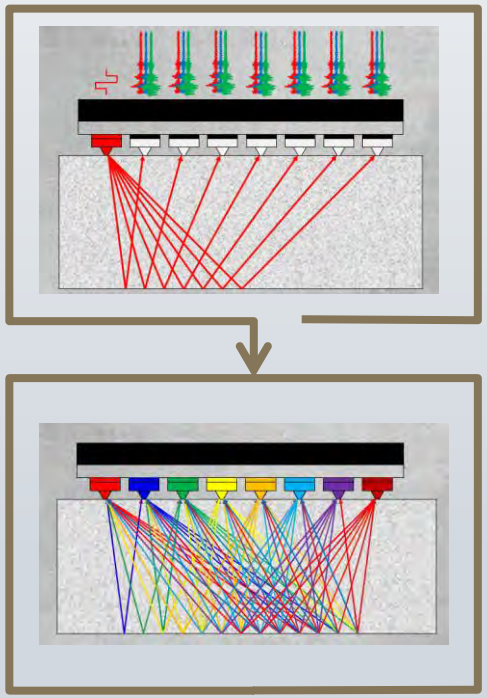
超音波パルスエコー法はグラウト欠陥を検出することが可能であり,現場評価がすることができる



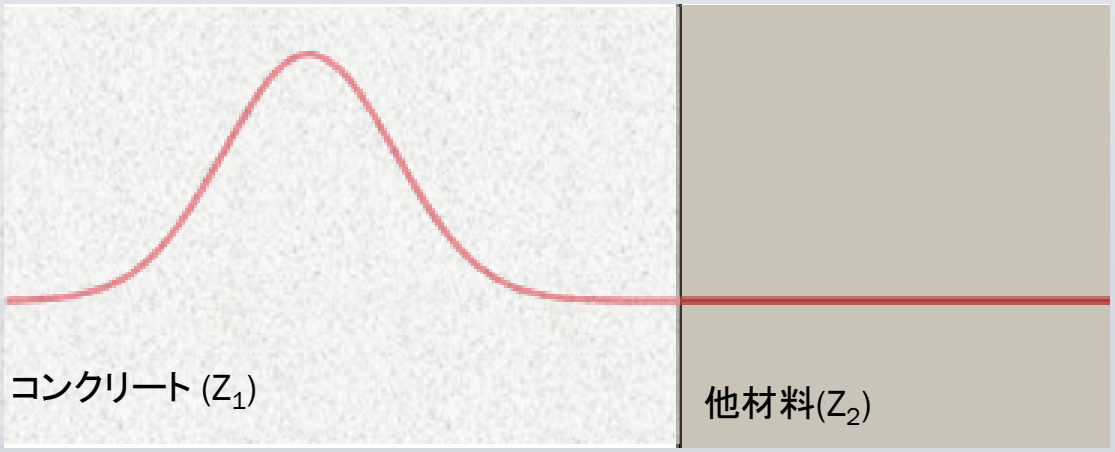
豆板調査

豆板を検出が可能であり,トモグラフィ同様に視覚的に確認することができる

1-6．超音波パルスエコー法　装置の概要



・装置底面に24個（3行×8列）のドライコンタクトセンサアレイを具備
・横波の超音波(音速1800～2500m/s)を使用
・パルスが1列目から順に発信し、残りのセンサで受信する
・本装置の超音波の使用周波数帯域は20～80kHzの範囲
・測定分解については0.1μs
・空洞部では、大きな反射が生じる
・内部の状態を音響インピーダンスの変化、多重反射で評価する



$$R = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2}$$

Rは反射されるエネルギーのパーセンテージ
Z1は、コンクリートの音響インピーダンス
Z2は、2番目の材料の音響インピーダンス

1-6. 超音波パルスエコー法

・調査方法（計測手順）について

STEP 01

PC鋼材の位置出し
測定範囲確定

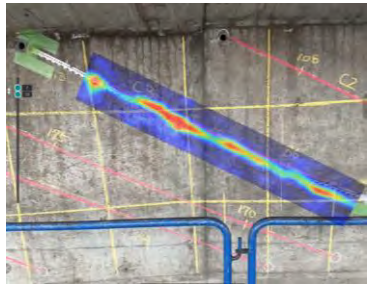
測定したい位置に,専用のラインテープを直上に取り付ける
（最大長さ1.5m）

STEP 02

計測

3～5cm間隔程度で、ラインテープ上を順に押し当てていく

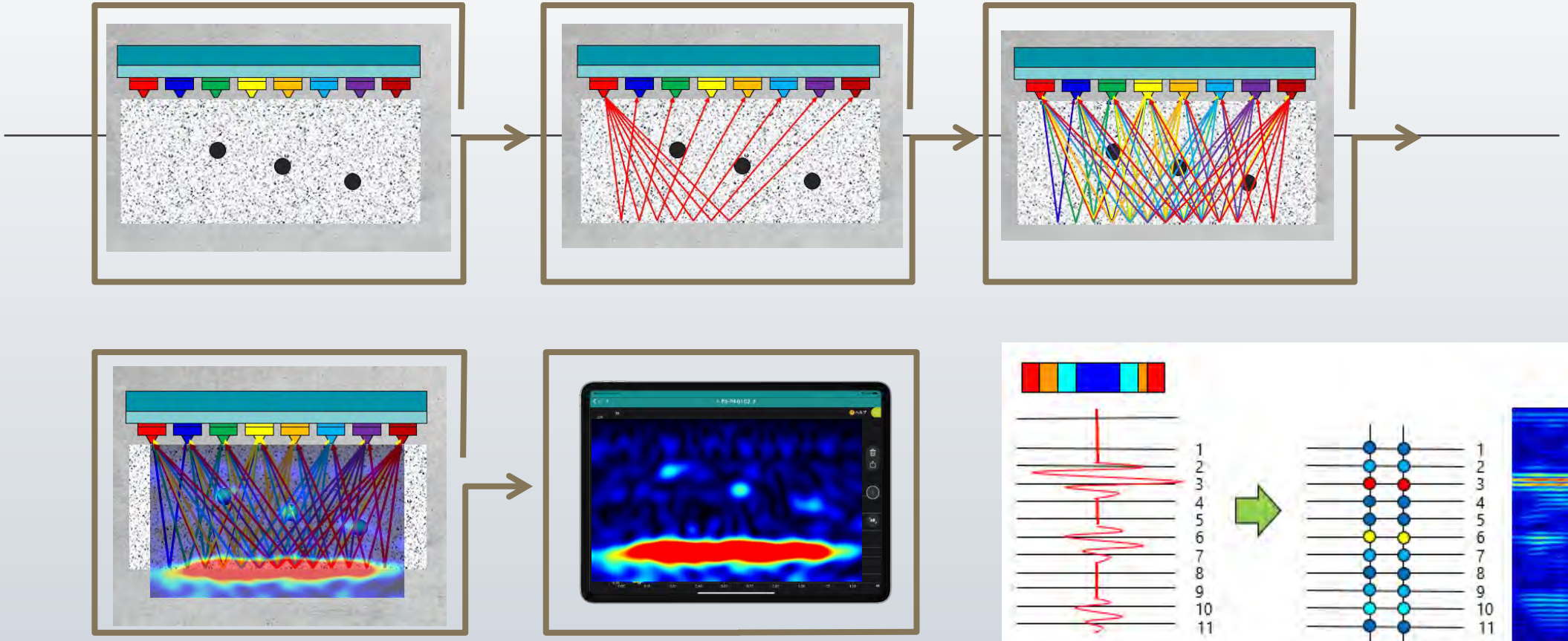
STEP 03



評価

評価方法はコンター図での評価となる。
※ただし、更に精度よく評価するには、コンター図以外での検討が必要

1-6. 超音波パルスエコー法　評価方法(コンター図)



・反射強度(振幅の大きさ)でコンター図が作成される

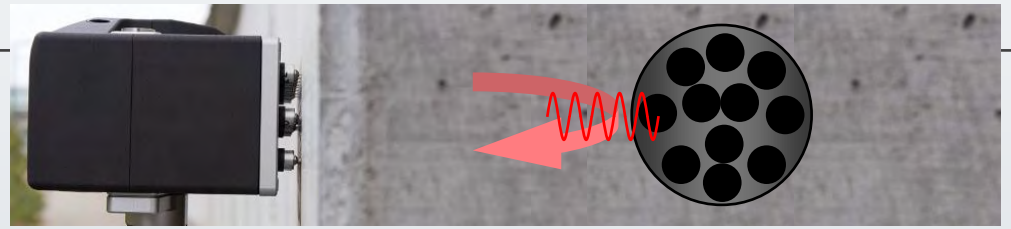
・空洞、鋼材、背面で反射強度が強くなり、　暖色系の色識別で表示される。

1-6. 超音波パルスエコー法　PCグラウト評価方法

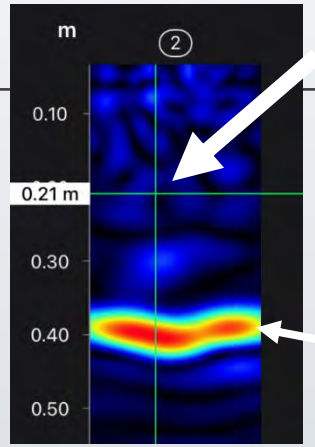
グラウト充填

※鋼材なし

シース位置での反射　**弱い**



断面図



シース位置での反射

弱い

（＝寒色表示）

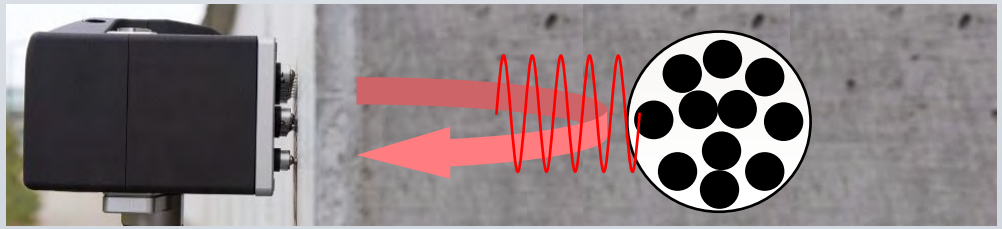
（＝充填）

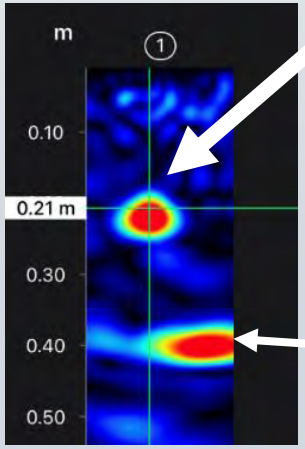
コンクリート背面の反射

グラウト未充填

※鋼材なし

シース位置での反射　**強い**





シース位置での反射

強い

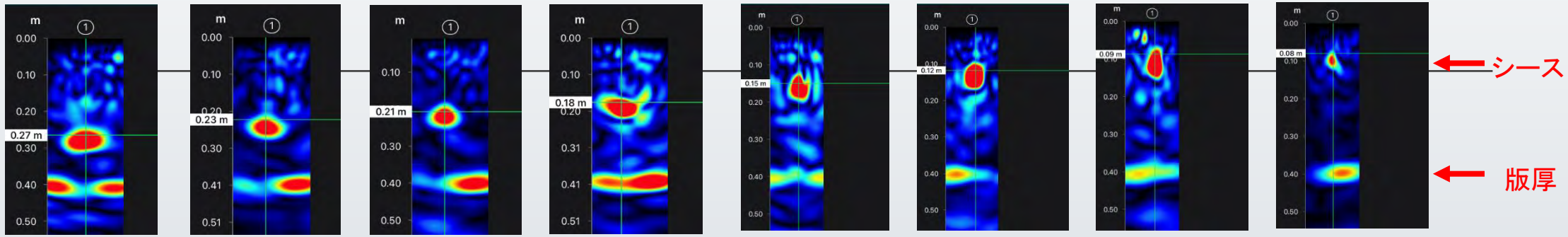
（＝暖色表示）

（＝未充填）

コンクリート背面の反射

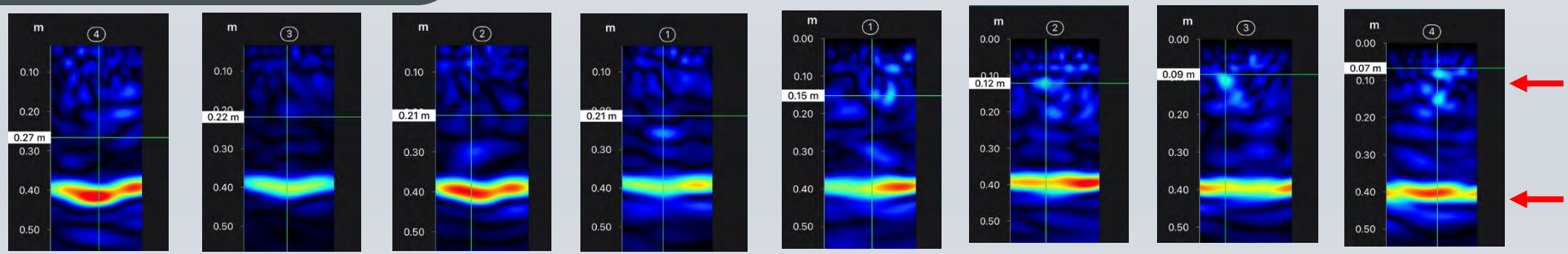
1-6. 超音波パルスエコー法　PCグラウト評価方法

未充填　PC鋼材無し



かぶり大　　かぶり中　　かぶり小

充填　PC鋼材無し



1-6. 超音波パルスエコー法　PCグラウト評価方法

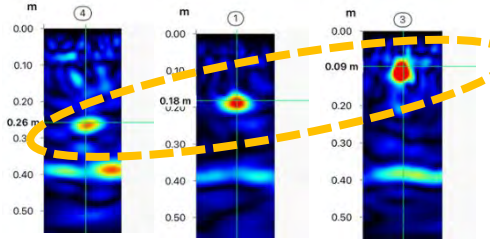
測定結果

未充填
PC鋼材有り

同様の色

シース

版厚



かぶり
(264mm)

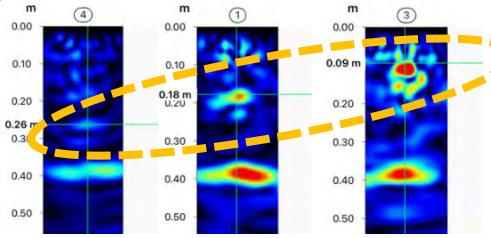
かぶり
(183mm)

かぶり
(94mm)

充填
PC鋼材有り

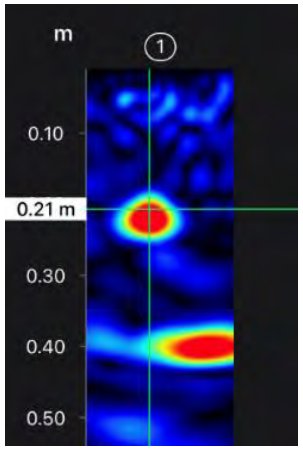
シース

版厚



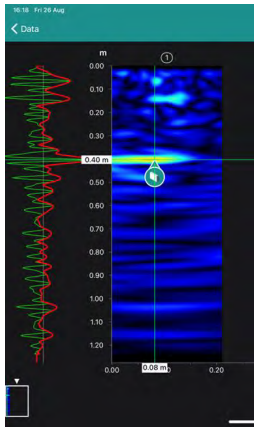
グラウトが充填している場合、鋼材からの反射を計測し、充填でも未充填と評価する可能性がある。

課題



コンターの色だけに着目して、充填度の判定をすることは難しい

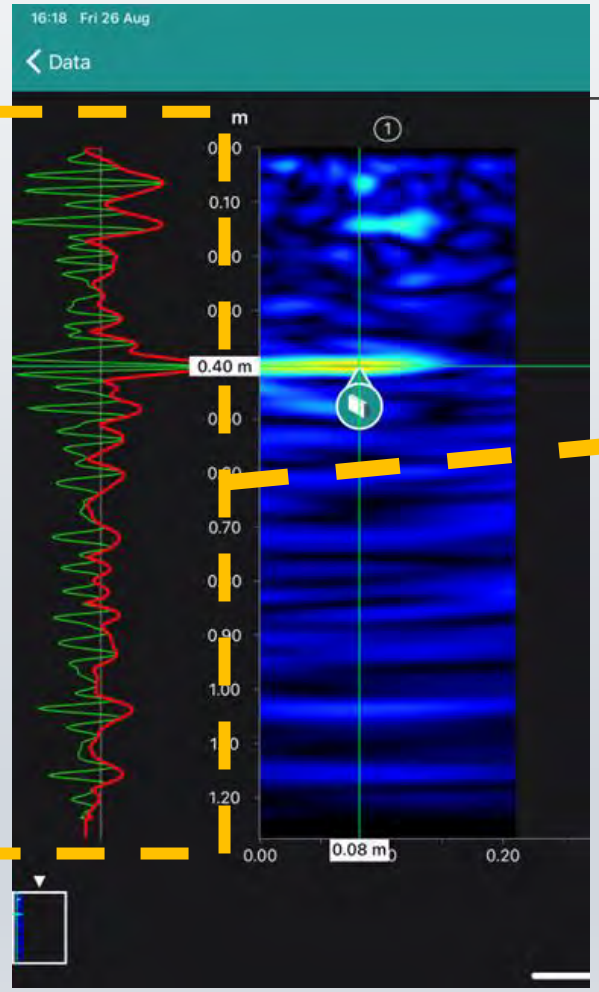
検討



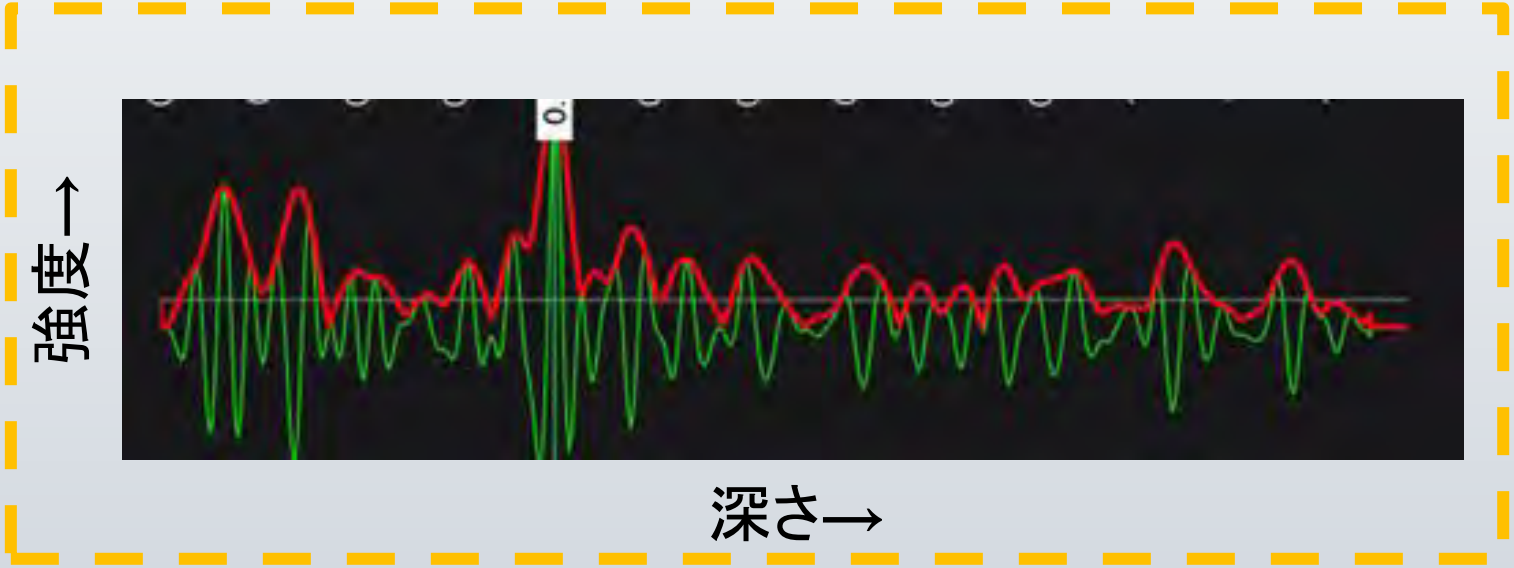
コンターによる充填判定のほかに、グラウトの充填評価方法について検討した。

1-6. 超音波パルスエコー法　PCグラウト評価方法

計測機器画面

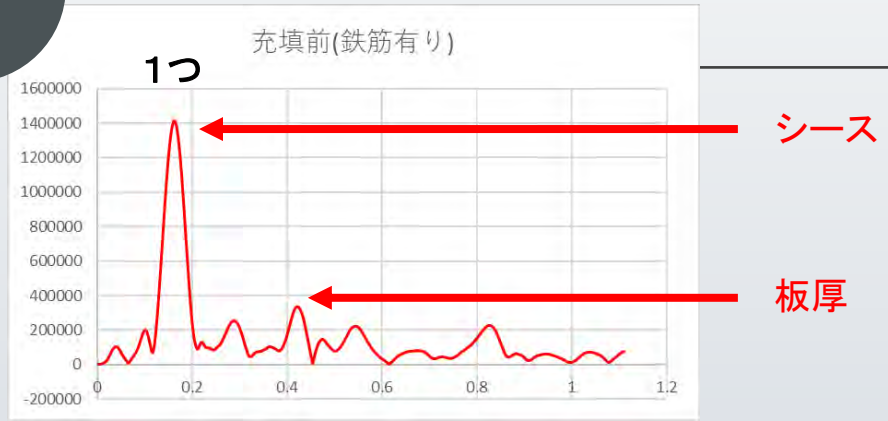


- 断面方向のデータから振幅値を算出
- 波形データをCSVで抽出し、グラフ化

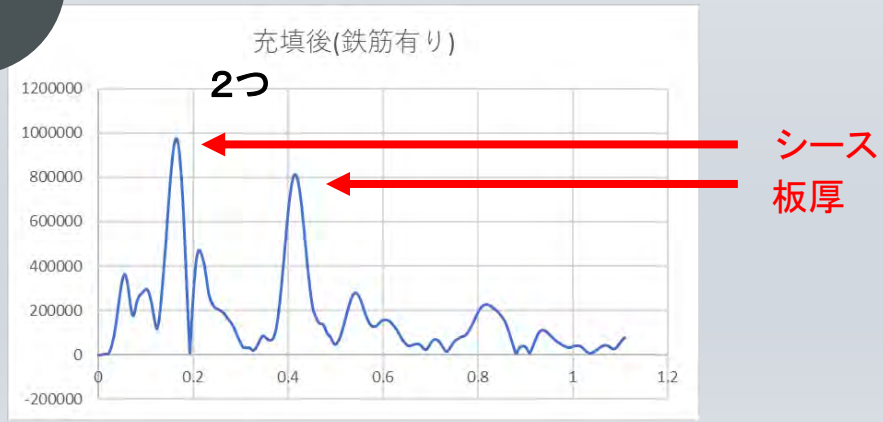


1-6. 超音波パルスエコー法　PCグラウト評価方法

未充填
PC鋼材有り



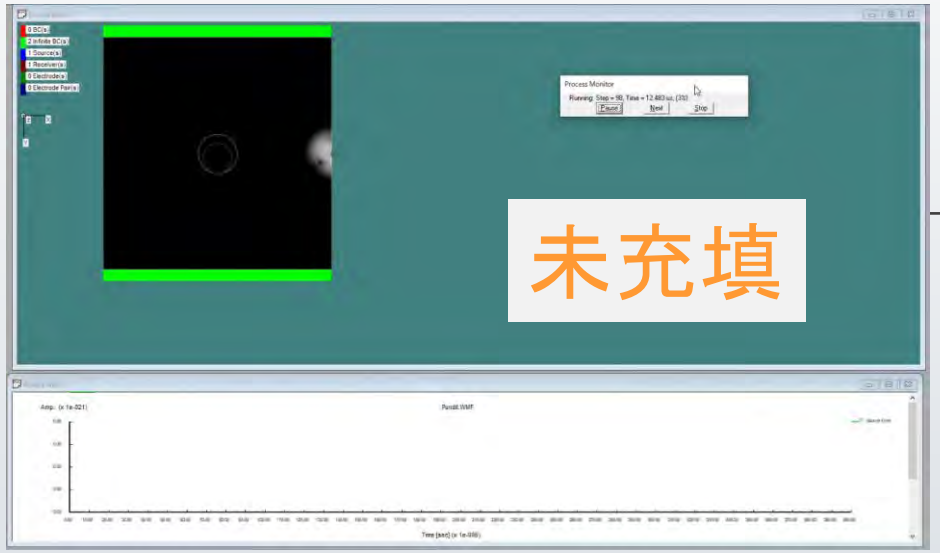
充填
PC鋼材有り

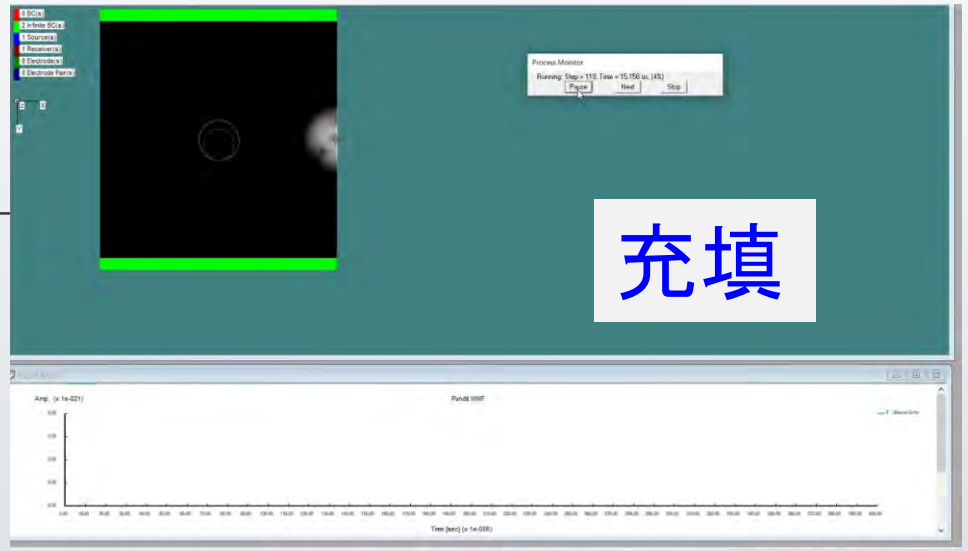


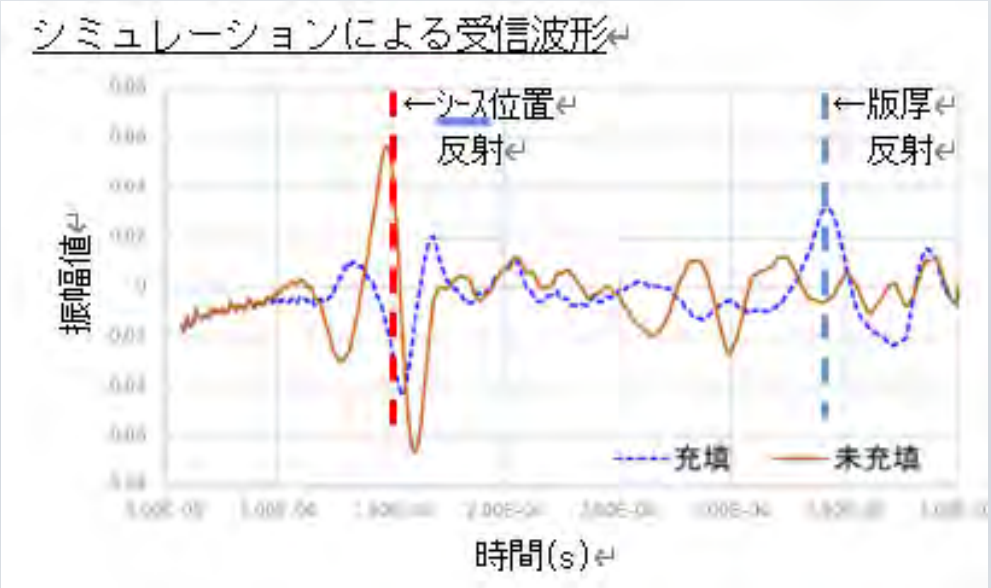
- 未充填の場合は，シース位置で最も卓越したピークが1つ認められる
- 充填の場合は，シース位置および版厚の位置で同程度の卓越したピークが2つ認められる

→コンター図の色識別では，未充填・充填ともに同程度の暖色系の反射強度ではあったものの，
卓越した反射強度のピーク値の特徴を数値で比較できれば，グラウト充填度が適切に評価できる。

1-6. 超音波パルスエコー法 シミュレーションによる検証







1-6. 実橋での調査結果（高速自動車道）

実橋での適用結果

- 6橋のコンクリート箱桁橋で、超音波パルスエコー法(UPE) を実施
- 調査箇所は、計134箇所
- そのうち40箇所で削孔確認を行い、正解率を算出した

対象橋梁	径間	構造形式	調査数量
A橋	A1-A2	箱桁	28箇所
B橋	A1-A2	箱桁	12箇所
C橋	A1-A2	箱桁	28箇所
D橋	A1-A2	箱桁	16箇所
E橋	A1-P3	箱桁	20箇所
	P3-A2	箱桁	15箇所
F橋	A1-A2	箱桁	15箇所
合計			134箇所

→40箇所を削孔確認

実橋における
「正解率」７割程度

Contents

１．PCグラウト調査　超音波パルスエコー法

２．電磁石式漏洩磁束による鋼材破断調査

３．ドローン空撮によるたわみ測定

４．ミリ波レーダーを用いた計測

５．J-ティフコム

2．電磁石式漏洩磁束による鋼材破断調査

01　構造物の耐荷力低下

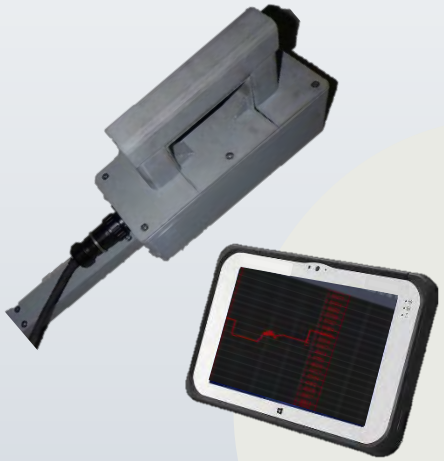
02　第三者被害の発生

03　落橋に繋がる場合も･･･

狭隘部でも検査可能な小型･軽量の漏洩磁束法による
PC鋼材破断検査機の開発を行った

2-1. 電磁石式漏洩磁束による鋼材破断調査

技術概要



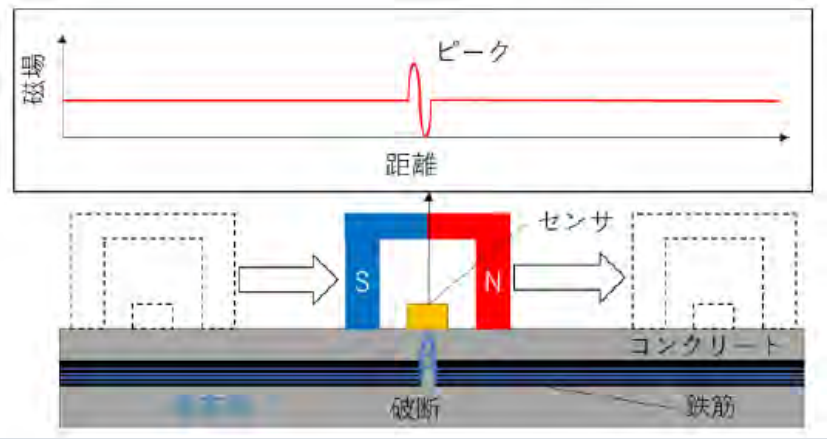
電磁石式
漏洩磁束法

技術概要

漏洩磁束法とは、内部の鉄筋やPCケーブルが強磁性体であることを利用し、コンクリート表面から鉄筋やPC鋼材を磁化させ、漏洩した磁束を検出することによって非破壊で鉄筋破断の有無を調査するものである。

電磁石式漏洩磁束法の原理

原理



小型化

着脱式

効率化

電磁石を使って磁化し、同時に磁場センサーで磁場を測定する。装置を調査対象物に沿ってコンクリート表面で移動させることで、鋼材の長さに沿った磁場の変化の波形が生成される。破断箇所では磁場が急激に強くなり、それが波形上でS字パターンとして反映される

2-2. 電磁石式漏洩磁束による鋼材破断調査

計測手順

01 鋼材探査

調査対象物を探査する

鋼材位置を特定

- 鉄筋探査機を用いて鋼材位置を特定し、罫書を行う。

02 計測

計測を行う

鋼材位置にて計測

- 探査を実施した鋼材に対して、磁場検出機器を用いて計測を行う。
- 鉄筋またはPCケーブルに沿って一定の速度で移動させる。

03 解析・評価

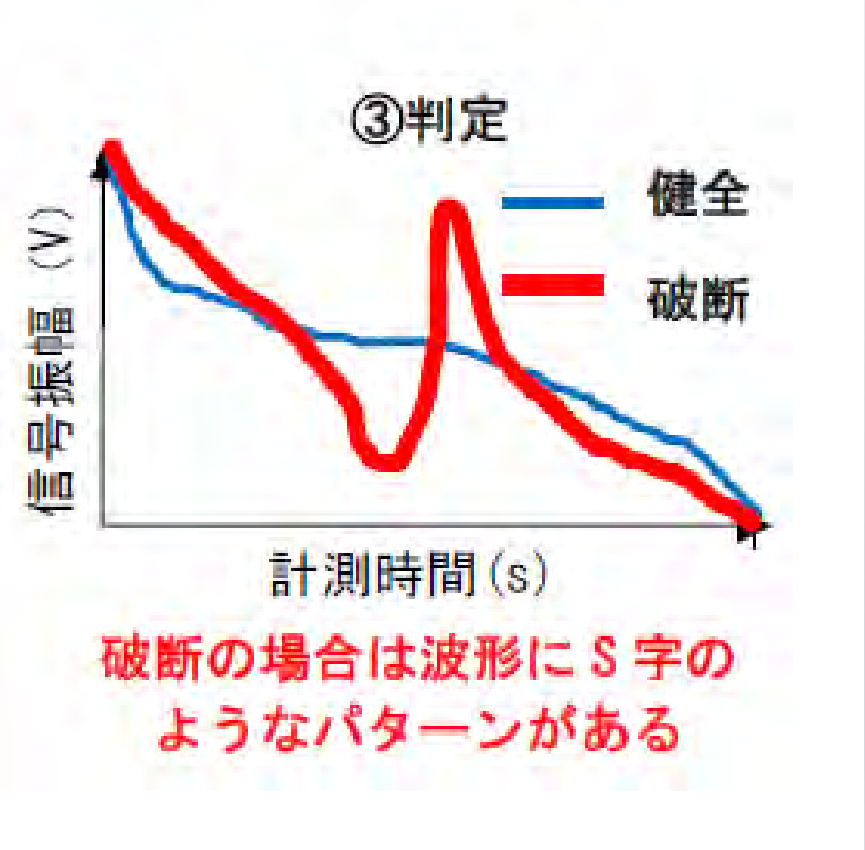
計測したデータを解析・評価

データの解析

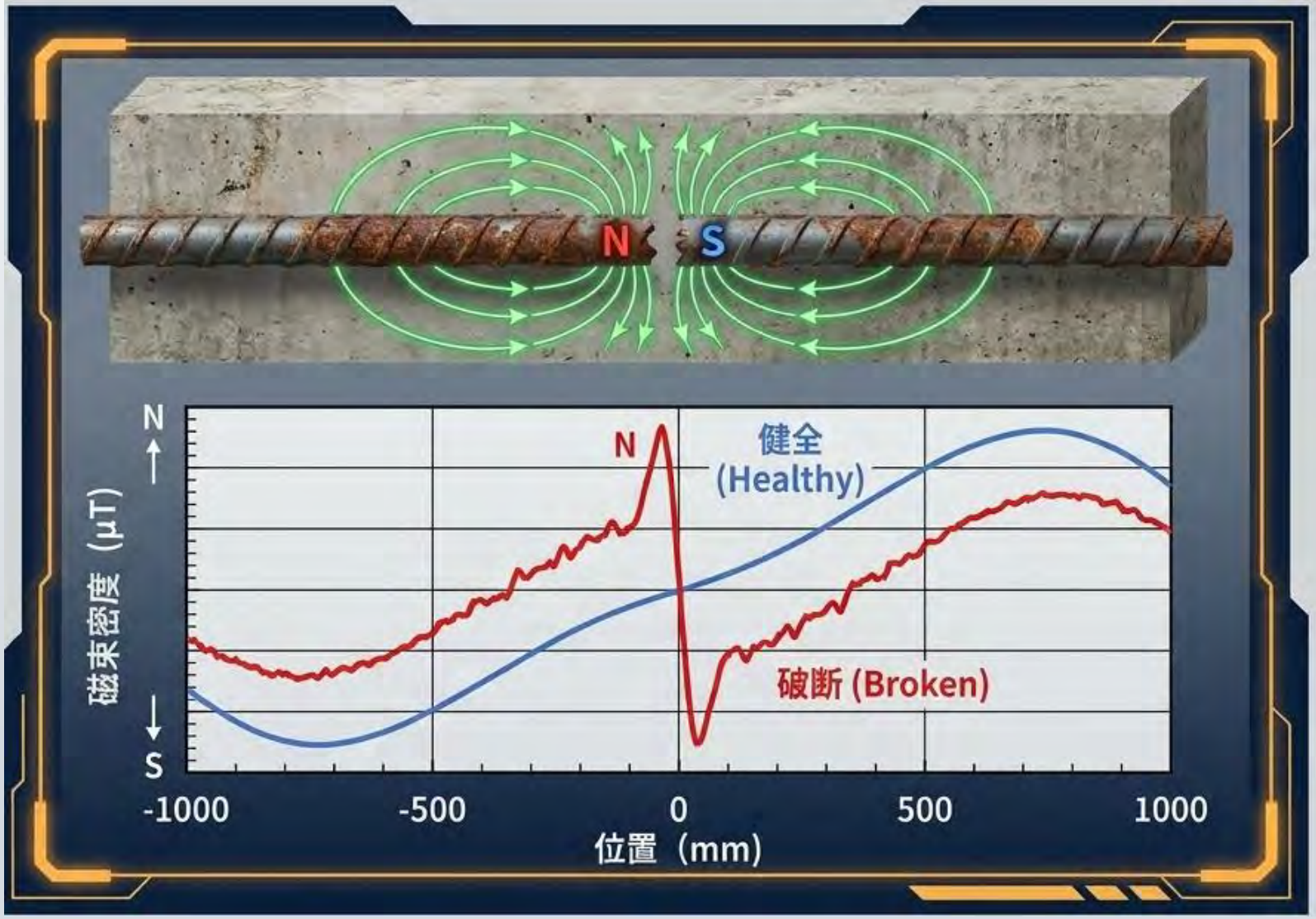
- 波形収録装置で解析を行い、磁束密度分布の波形として収録する。

破断の有無の評価

- 磁束密度分布の波形において、急な変化が無いか確認する



2-3. 電磁石式漏洩磁束による破断調査　評価方法



波形の急変による特定

- **健全な波形**：連続した鋼材は1つの大きな磁気ループを形成し、磁束密度の変化は緩やかに推移する。
- **破断のシグナル**：鋼材が破断すると、その瞬間に切断部に新たな磁極(N極とS極)が発生する。
- **位置の特定**：グラフ上で波形が急激に変化・反転する(ゼロクロスする)座標が、物理的な破断位置と完全に一致する。

2-4. 電磁石式漏洩磁束による破断調査

従来技術との比較

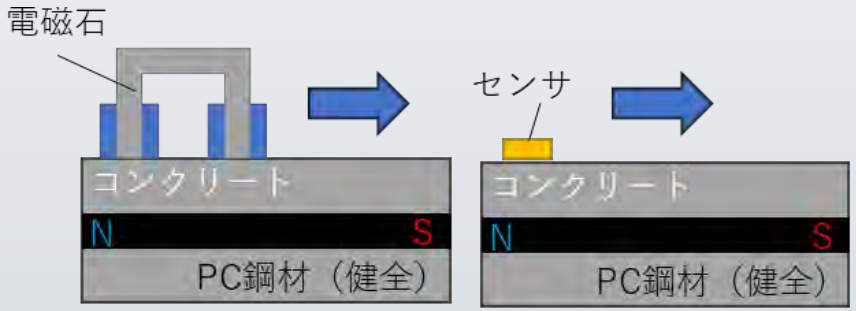
	永久磁石	同極電磁石
磁場の種類	残留磁場	残留磁場＋アクティブ
磁力制御	不可（常時ON）	可能
透過深度	かぶり150mm程度まで	かぶり約180mm程度 ただし、磁場強度を調整することで、より深部の鋼材まで検査可能
作業性・可撤性	低い	高い（軽量化+高出力）

2-5. 電磁石式漏洩磁束による破断調査

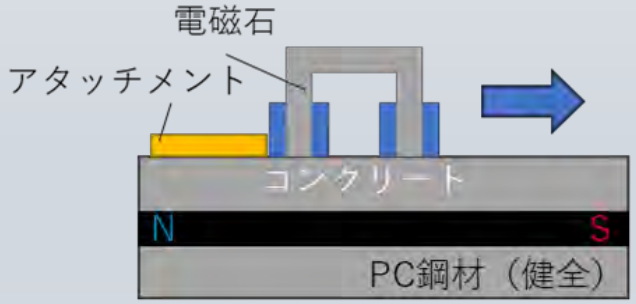
従来技術との比較：磁場の種類(計測手法)

技術概要

漏洩磁束法での調査は、従来残留磁場方法の1種類しかなかったが、電磁石を用いることで「アクティブ磁場方法」という新たな計測手法が可能となった。



残留磁場方法



アクティブ磁場方法

残留磁場による計測

・永久磁石を用いて、着磁後に計測を行う工法である。

アクティブ磁場による計測

・着磁と磁場が近距離であることから、計測を同時(瞬時)に行うことが可能となった。このことから、計測深度および精度の向上が大幅に向上した。

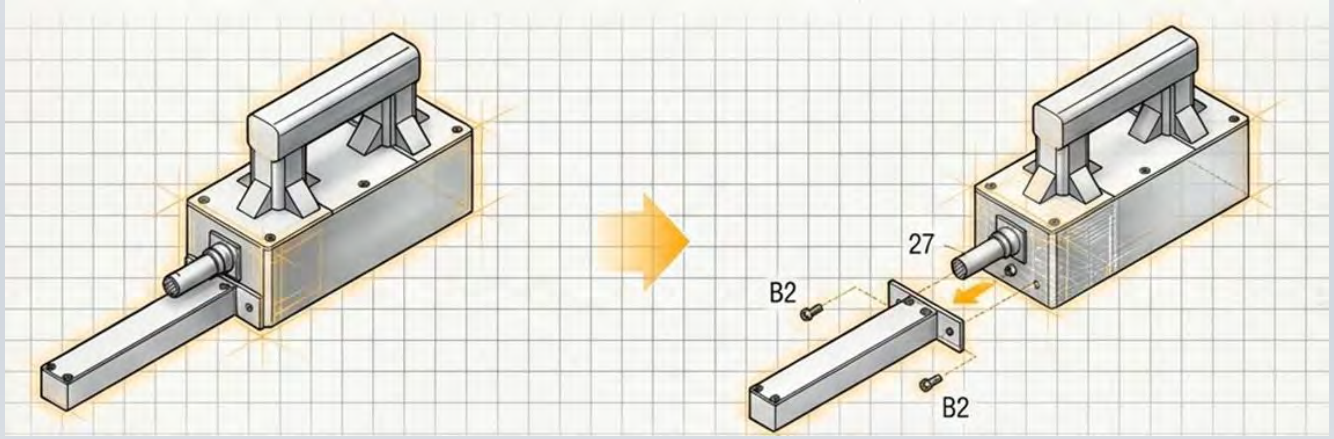
2-6. 電磁石式漏洩磁束による破断調査

従来品技術との比較：センサ部の概要

センサアタッチメント（着脱式）

電磁石

センサボックス



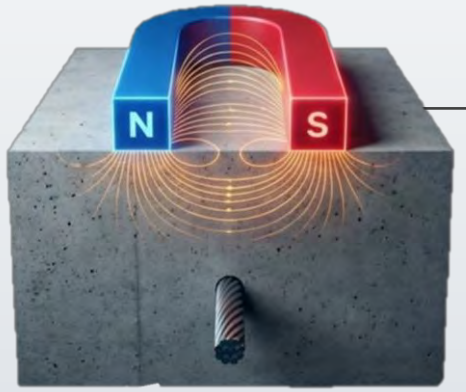
センサは着脱式

計測方法により、センサ部は着脱式を採用。そのため、アンカーの破断計測など狭隘部でも計測が可能である

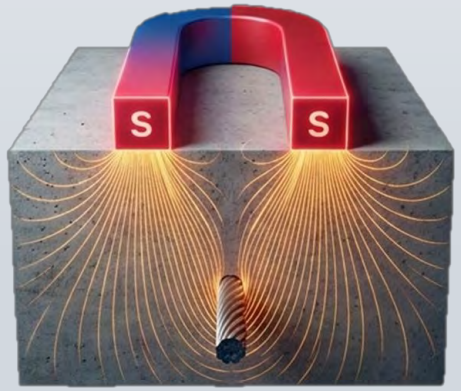
低コストでの提供

自社での開発であるため、低コスト・技術提供も実現

2-7. 電磁石式漏洩磁束による破断調査
従来技術との比較：磁力の制御、透過深度



従来品(N-S配置)



新製品(S-S配置)

かぶりが厚い鋼材に対しての課題

・磁場強度は距離とともに減少するため、永久磁石の場合、調整ができず、かぶりが厚い鋼材は判定が困難である。

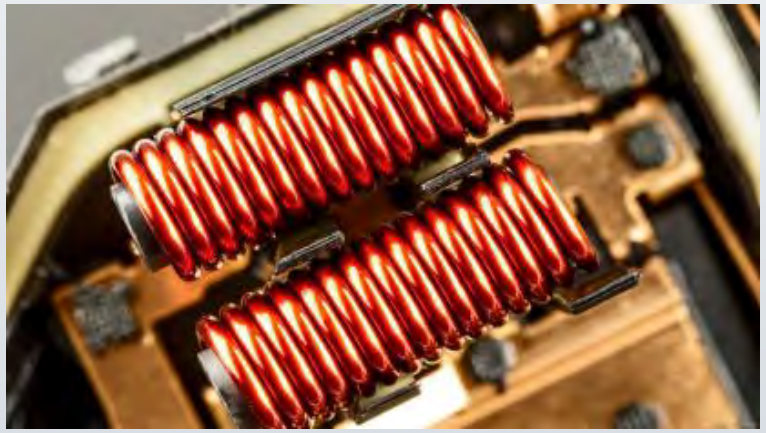
電磁石式の場合

・電磁石にすることで、磁場強度を調整することが可能となる（実績でかぶり180mm）

・電源出力が可能な一般的な直流安定化電源装置を使用している

0～10Aで調整

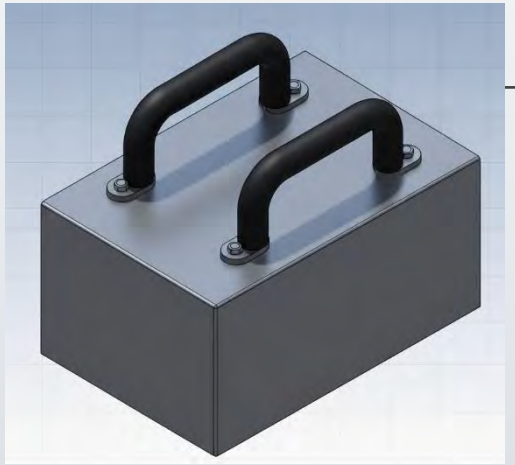
深部の調査可能



電磁石を使用し、S－S配置にしたことで、計測機器をコンパクトにすることができた。

2-8. 電磁石式漏洩磁束による破断調査

従来技術との比較：作業性、可搬性



永久磁石の場合

・永久磁石の重量は、約8kg。片手で作業するのは困難
・永久磁場の場合、磁場をON/OFFが切り替えることができないため、近傍の足場資材や支承などの付属物に勝手に吸着し、取り回しが面倒

電磁石式の場合

・電磁石の重量は、5kg。片手で作業が可能。
・電源のOFF時は、磁力を帯びていないため、吸着することはなく、取り回しが容易

計量化

作業性向上

Contents

１．PCグラウト調査　超音波パルスエコー法

２．電磁石式漏洩磁束による鋼材破断調査

３．ドローン空撮によるたわみ測定

４．ミリ波レーダーを用いた計測

５．J-ティフコム

3. ドローン空撮によるたわみ計測

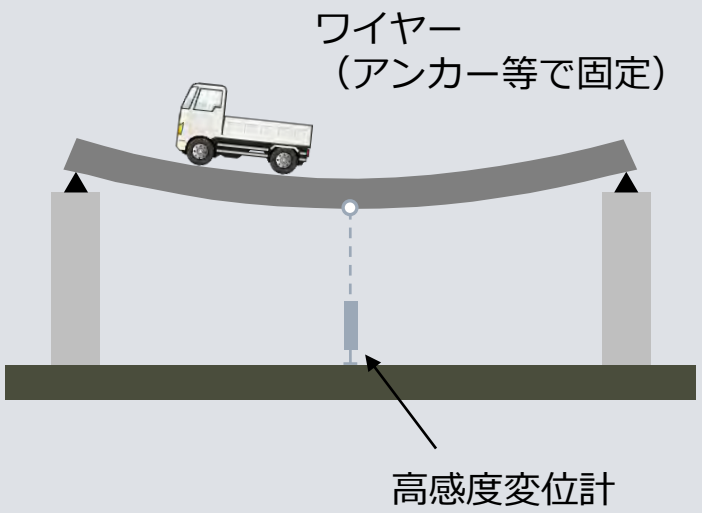
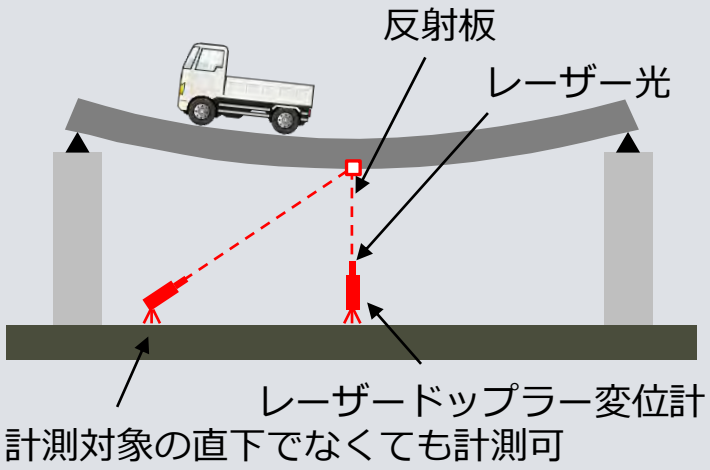
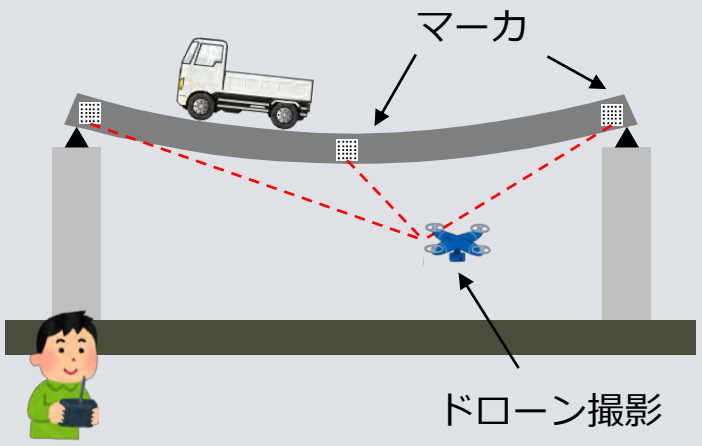
産総研

京都大学
KYOTO UNIVERSITY

株式会社CORE技術研究所

3-1．ドローン空撮によるたわみ計測

たわみ計測方法

計測方法	変位計	レーザードップラー	ドローン空撮
概要	計測対象にアンカー等でワイヤーを固定して垂らし、桁下に設置した変位計と接続して垂直方向の変位を計測する	非接触測定センサを用いて、1～数10m離れた構造物の変位を計測する	ドローンに搭載したカメラを用いて橋梁を撮影し、構造物のたわみを計測する
計測条件	• 計測対象（対象部材）への近接 • 桁下直下へのアクセスが必要 • ケーブル配線が必要	• 計測対象（対象部材）への近接 • レーザードップラー変位計を設置する箇所（陸地）が必要	• 計測対象（対象部材）への近接 • ドローンの飛行およびマーカの撮影が可能であることが必要
イメージ			

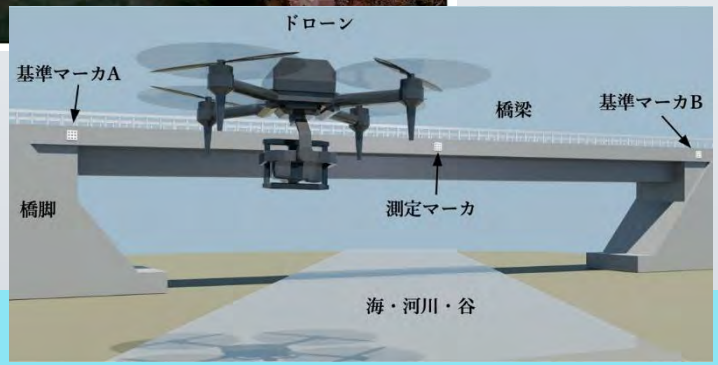
3-2. ドローン空撮によるたわみ計測

ドローン空撮での適用範囲(メリット)

3.3. ドローン空撮によるたわみ計測　技術概要

計測原理

- ✓ 一定のピッチの繰り返し模様を有するマーカを、橋梁の中央部（計測マーカ）と左右の橋台・橋脚部（基準マーカ）に設置し、ドローンに搭載したカメラで撮影
- ✓ 基準マーカの中心座標のずれとサンプリングモアレ法などの位相解析によって得られる各マーカ全体の位相変化から画像のぶれ補正を行い、基準マーカに対する測定マーカの相対変位をたわみ値として算出する。



海洋や山間部に架けられた橋梁でたわみ計測が可能

定期的な計測による状態把握に利用

補修後の補修効果の確認などに利用

3-4. ドローン空撮によるたわみ計測

モアレとは（サンプリングモアレ法）

変形量を定量的に評価する方法

規則正しい繰り返し模様を重ね合わせた際に発生するモアレを活用する

精度よく動的な変位やたわみ角が計測できる

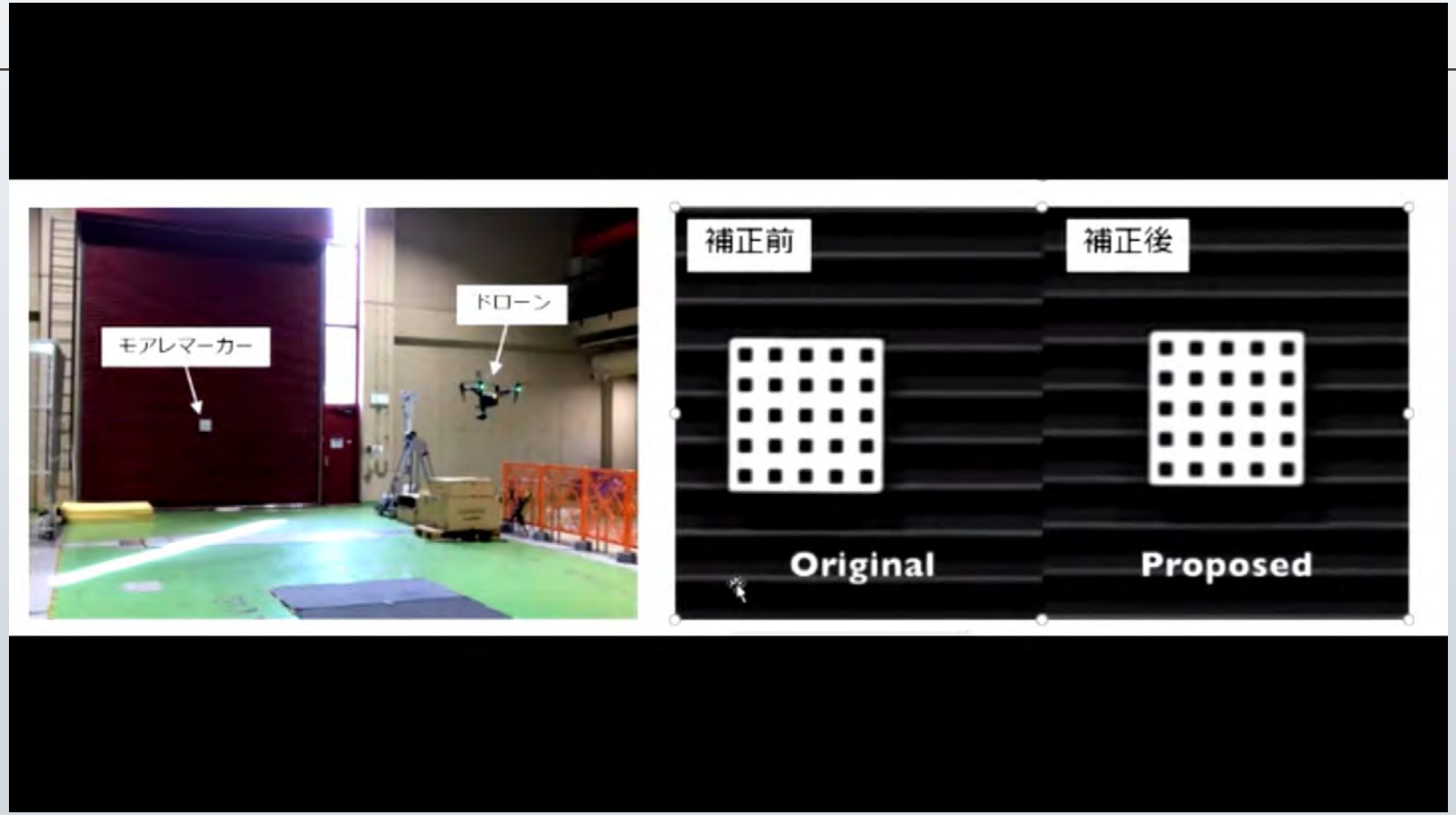
サンプリングモアレ法だと数枚の格子パターン画像を張り付けて撮影するのみ

引用：産総研サステナブルインフラ研究ラボHP、
産総研公式YouTube

ドローンによる格子画像の撮影

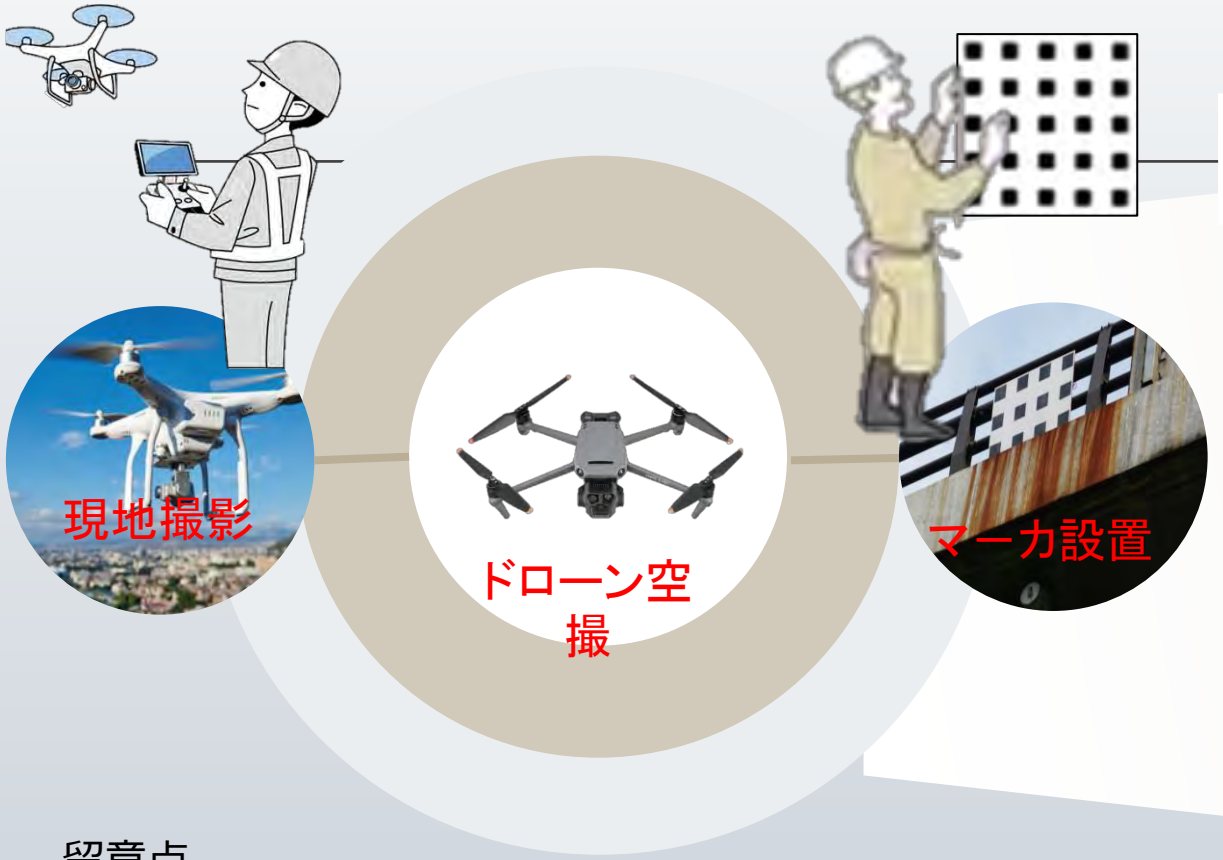
3-5. ドローン空撮によるたわみ計測

機体のブレ補正



引用：産総研サステナブルインフラ研究ラボHP、産総研技術資料

3-6. ドローン空撮によるたわみ計測　計測手順



PCへ
データ移行

留意点
- 計測対象への近接（格子マーカを設置）が可能なこと
- ドローンを飛行させることが可能なこと（航空法等による）
- 格子マーカを撮影することが可能なこと（陽炎や霧が激しい場合は、測定結果のばらつきが大きくなる）