

インフラ維持管理のDXを加速するNDE

～**弾性波**や**電磁場**に基づく方法を用いて～

NDEとDXが融合し、インフラ維持管理は新たな進化へ。高度センシングとデータ解析が、劣化予測から意思決定までを革新し、持続可能な社会基盤の未来を切り拓く！

インフラ維持管理におけるDX×NDEの関係

■ 従来の維持管理

- ・目視・打音など経験に依存
- ・点情報(局所的)
- ・定性的評価

■ NDE(非破壊評価)

- ・内部を「非破壊」で診る
- ・弾性波・電磁場などの物理量で評価

■ DXとの融合

- ・計測データのデジタル化
- ・評価指標(波形・エネルギー等)による定量化
- ・意思決定(補修・更新)へ接続



講演内容

1. 「コンクリートダムの水平打継目」を、
ダム頂部をハンマーで叩いて弾性波で診る
2. 「あと施工アンカー固着部」を、
アンカー埋込部を電磁パルスで叩いて弾性波で診る
3. 「PCグラウトの充填状況」を、
シースを電磁パルスで叩いて電磁場応答で診る

DX × NDE の共通フレーム

1～3のすべての事例は、以下の共通プロセスで成り立つ

① 物理刺激を与える(叩く)



② 応答を計測する(弾性波・電磁場)



③ データとして取得する(波形)



④ 指標化・解析する(エネルギー・周波数など)



⑤ 構造物の状態を評価する

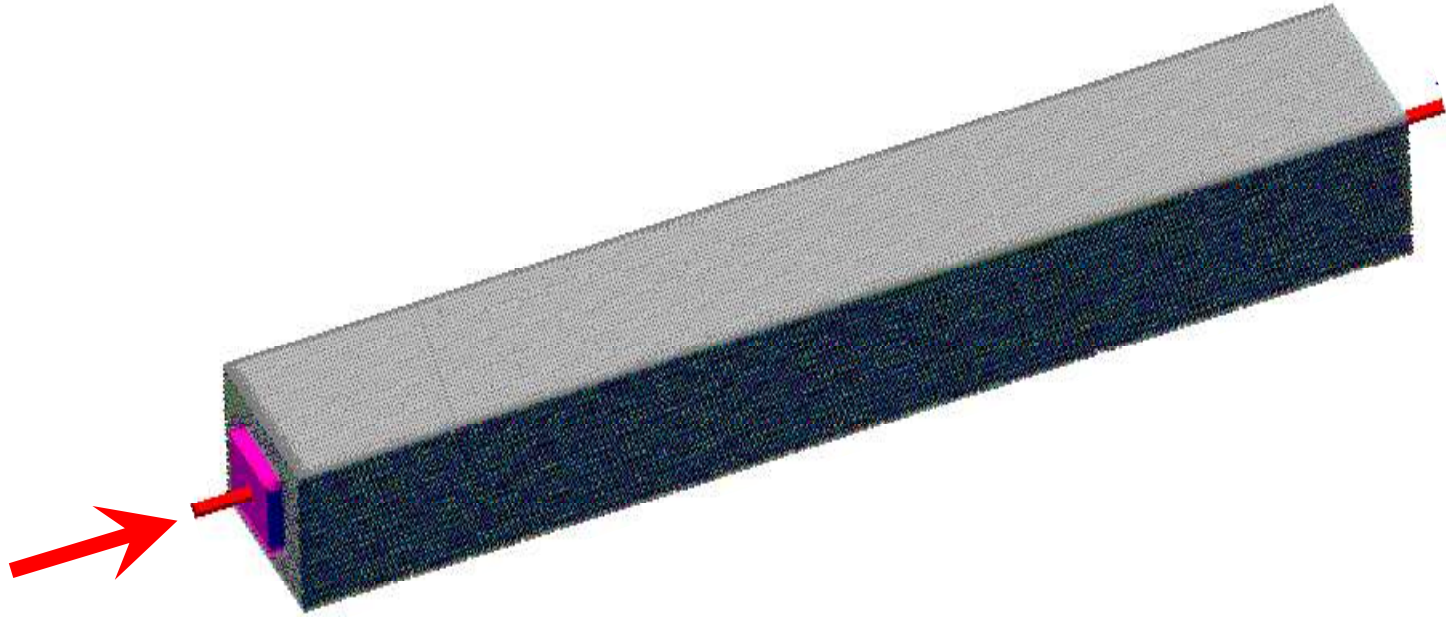


⑥ 維持管理の意思決定へ

講演内容

1. 「コンクリートダムの水平打継目」を、
ダム頂部をハンマーで叩いて弾性波で診る
2. 「あと施工アンカー固着部」を、
アンカー埋込部を電磁パルスで叩いて弾性波で診る
3. 「PCグラウトの充填状況」を、
シースを電磁パルスで叩いて電磁場応答で診る

叩くと弾性波が生じる



この弾性波の特性をしっかりと分析することによって、
(そこに反映されている)コンクリートの品質や内部欠陥の
特長を非破壊で診る(抽出する)ことができる。

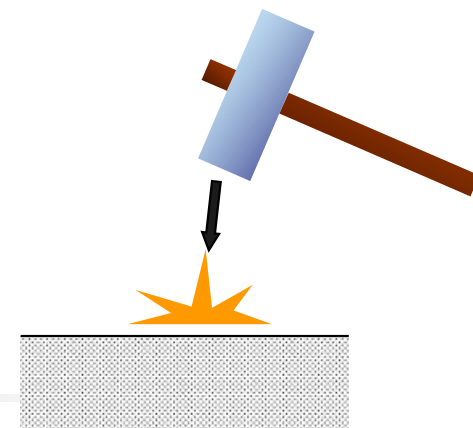
叩いた後は

弾性波 → 加速度計,
AEセンサ, etc.

音 → マイクロフォン



叩いて入力した (波長の長い)弾性波の特徴



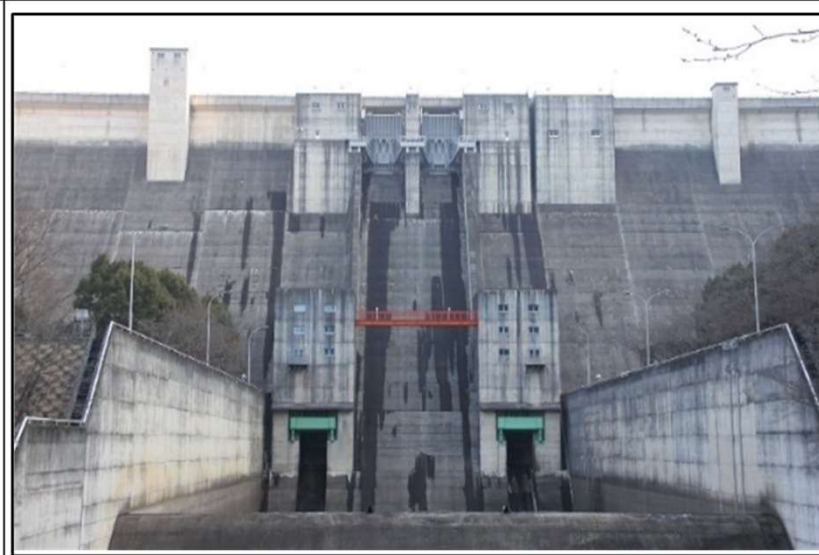
コンクリート中での散乱(骨材界面、微小空隙、鉄筋界面など)
等による減衰の影響を受けにくく、**伝播距離を長くす
ることができる。**

さらに、(波長の短い超音波レベルでは困難な)
コンクリート中での波の
伝播シミュレーションが活用可能

ダムで、なぜ水平打継目(0.75~2m)の状態を診たいのか？



事例 1



事例 2

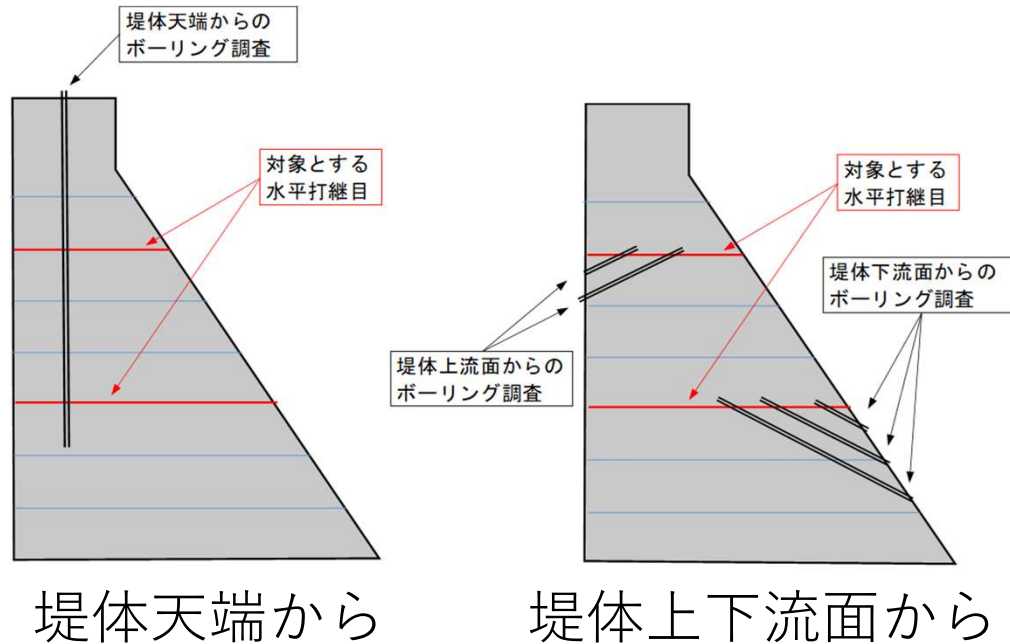


事例 3



事例 4

ボーリング調査による水平打継目変状の把握



目視での直接的な状態把握が可能



変状が生じた打継目の
ボーリングコア状態事例

変状が生じた打継目の
ボーリング孔壁画像事例

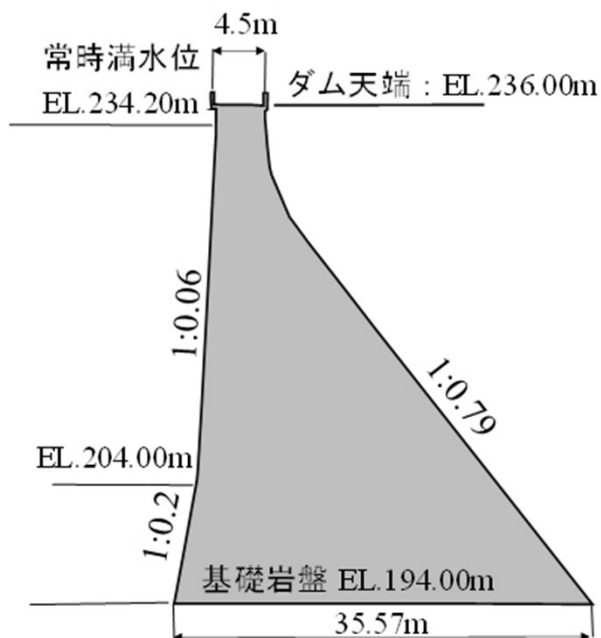
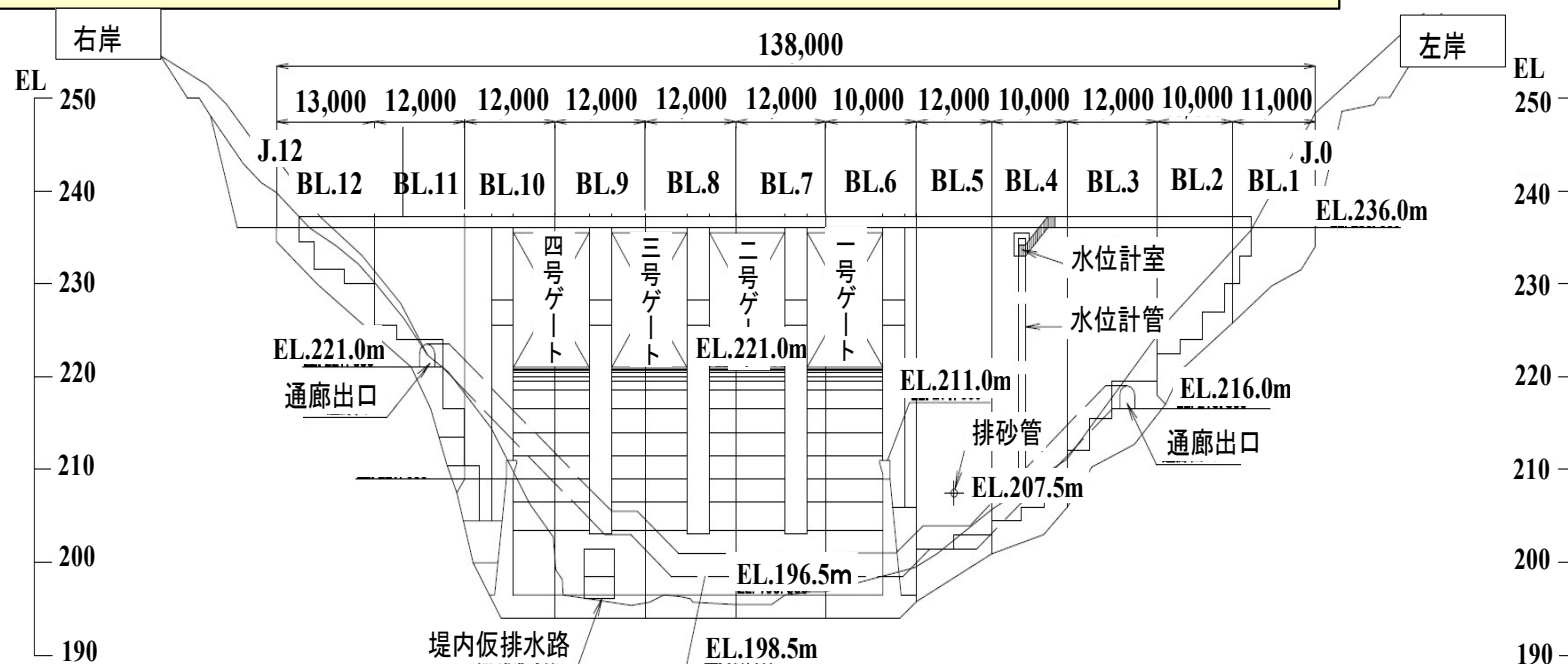
課題：

- ①点情報
- ②小規模ながら堤体を破壊
- ③コストが大、時間が掛かる

⇒ 叩いて入力した弾性波で診ることができないか？

弾性波での計測対象としたコンクリートダム

所在地：四国地方
完成：1974年
堤高：42m
堤頂長：138m



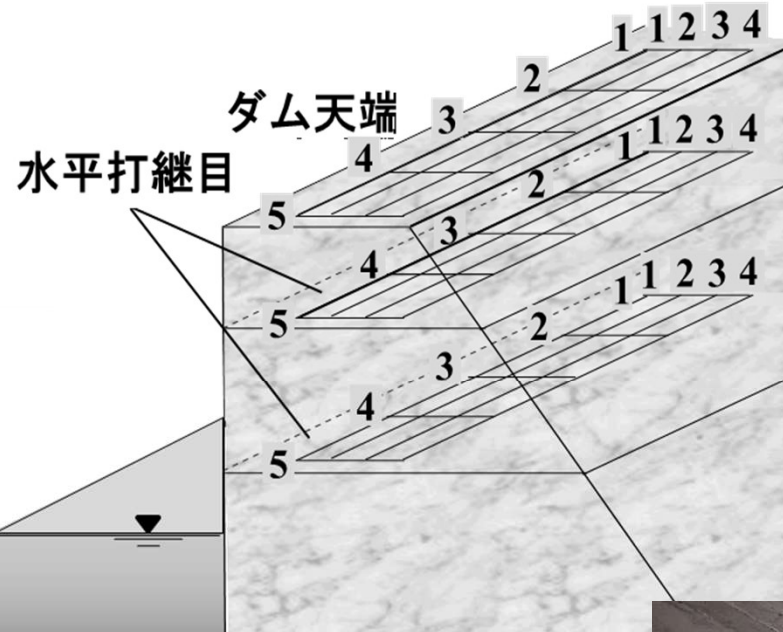
堤体標準断面図



堤体下流面の漏水状況

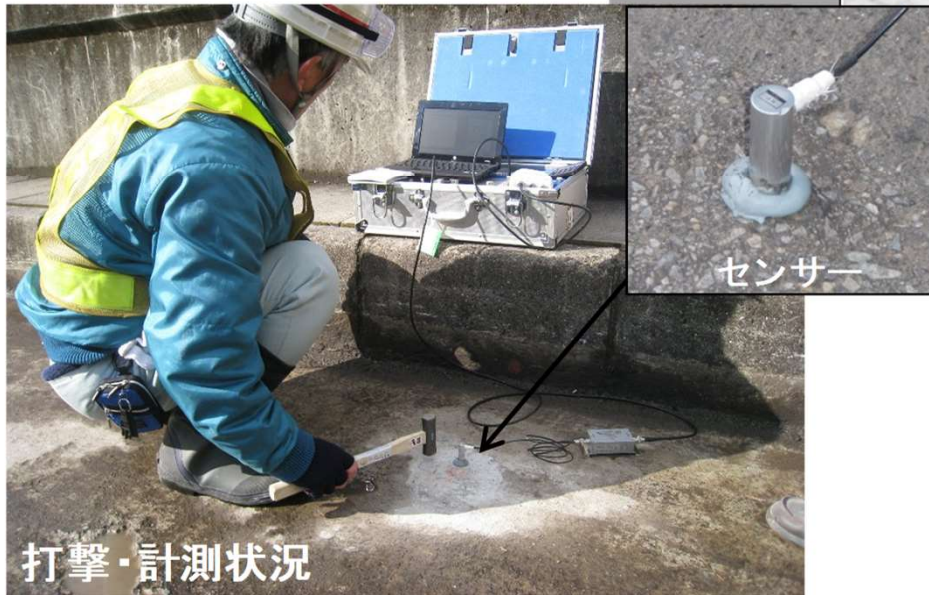
ダム天端を叩いて弾性波を入力

測定点：ダム軸方向 2 m × 上下流方向 1 m の間隔
コンクリート表面をハンマーで打撃し、振動センサで受信



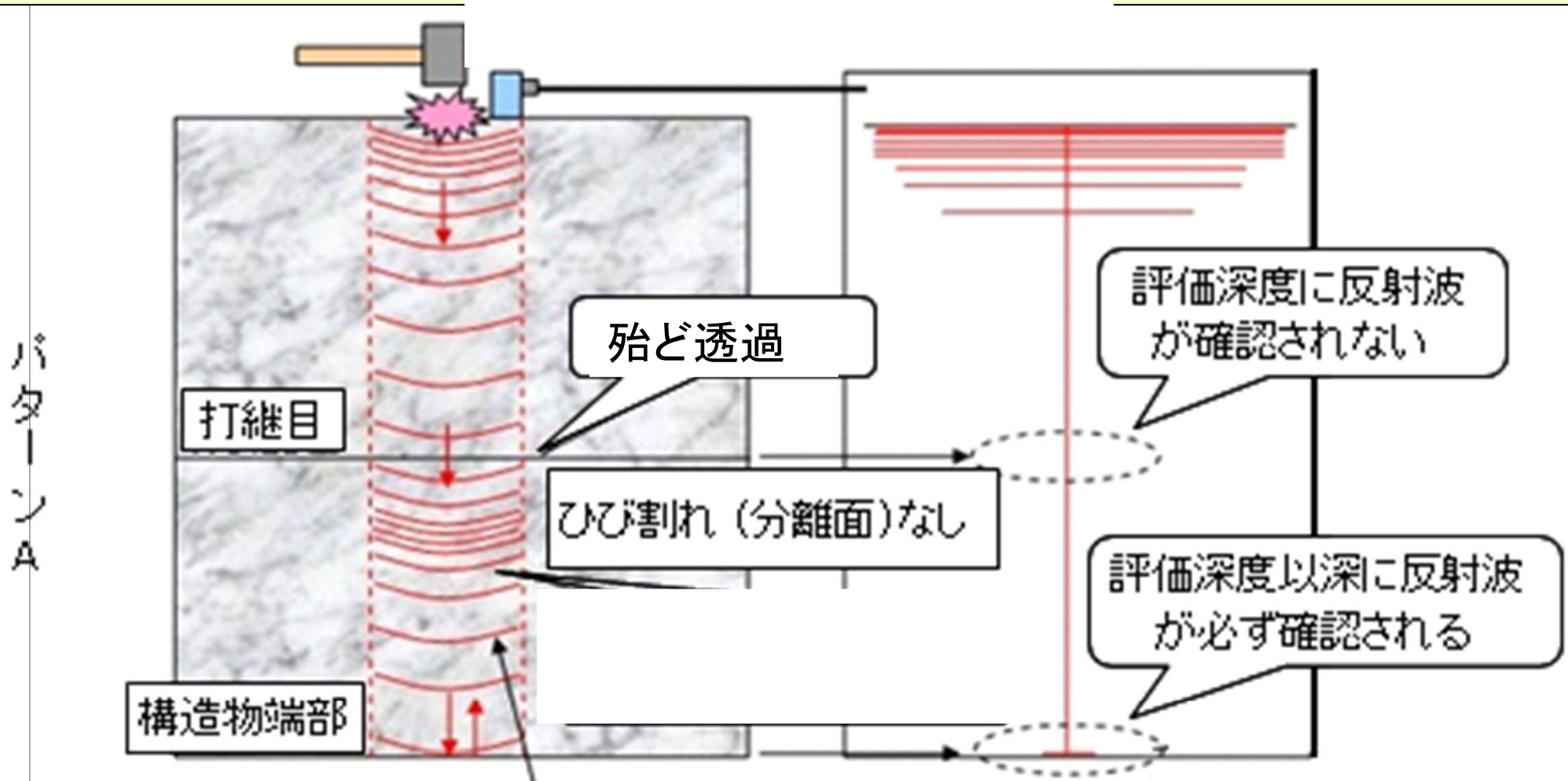
ダム天端での打撃と受信

監査廊の天井面なども活用



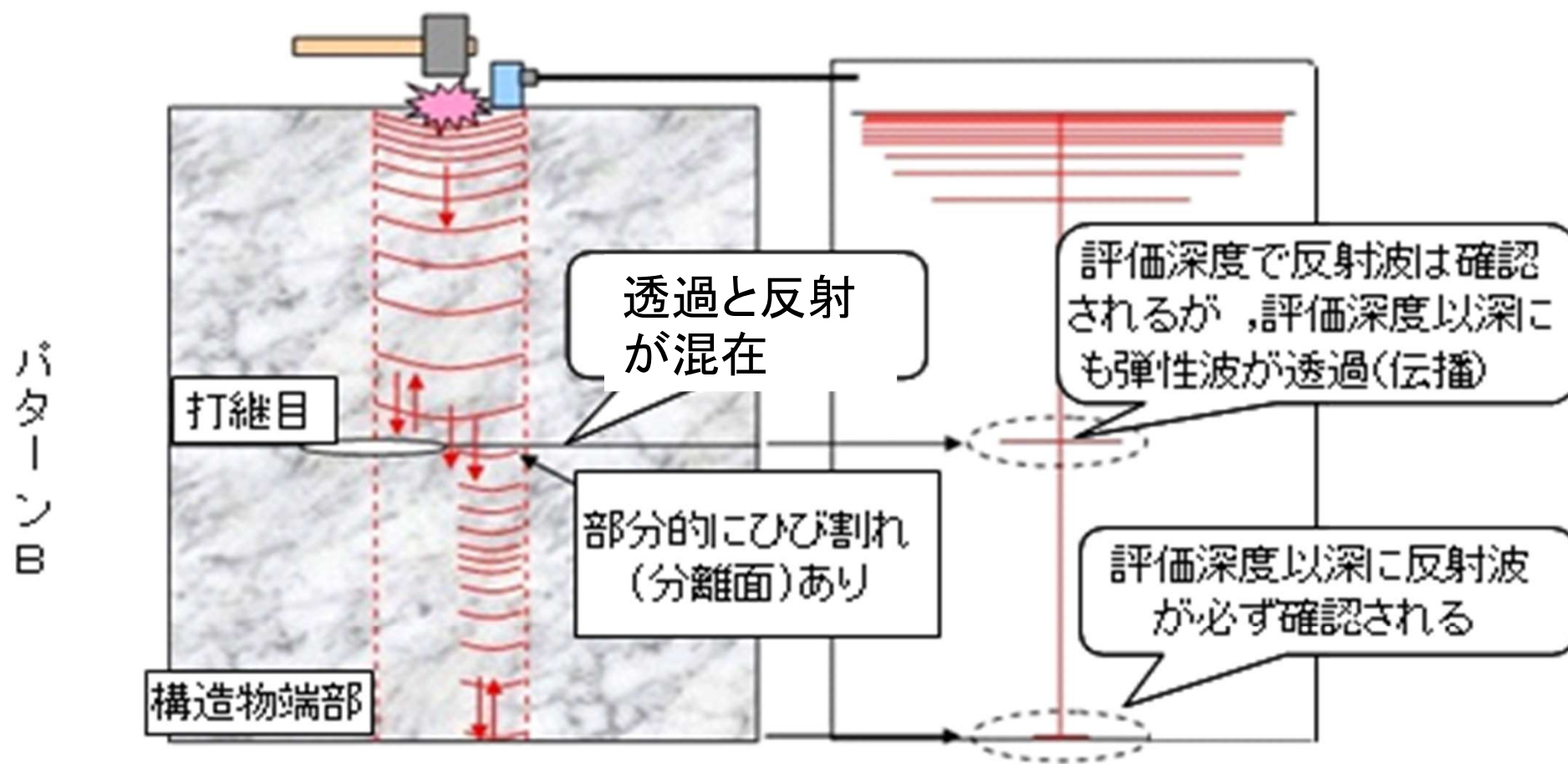
受信される波形のパターンを A, B, C の 3つに分類

打継目の状態と波形の透過・反射特性との関係（パターンA）



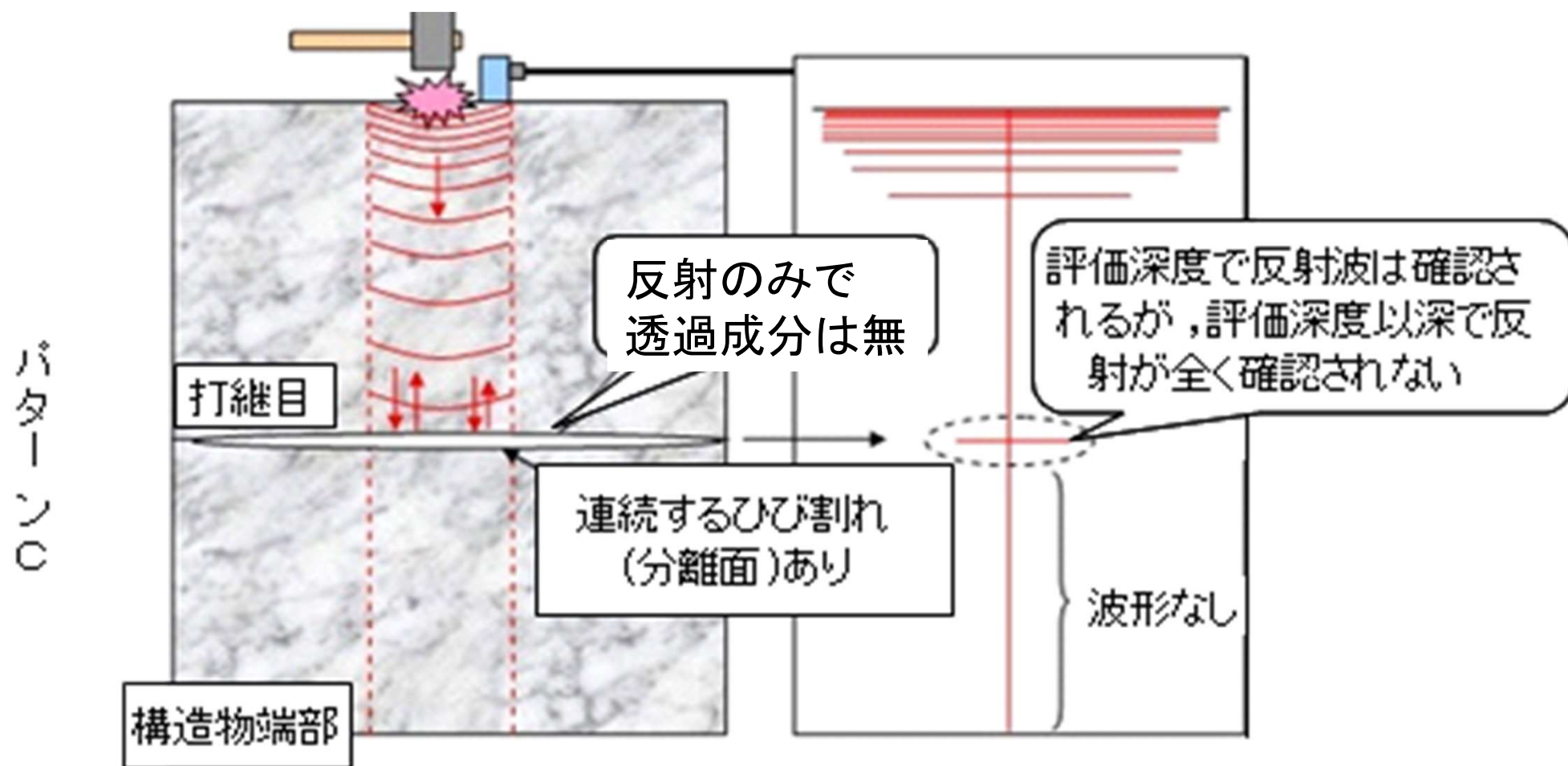
推定される打継面状態: 良好であり、ひび割れ(分離面)がない

打継目の状態と波形の透過・反射特性との関係（パターンB）



推定される打継目状態: 概ね良好であるが、部分的にひび割れあり

打継目の状態と波形の透過・反射特性との関係（パターンC）



推定される打継面状態: 不良であり, 連続したひび割れ(分離面)あり

ただし、実構造物の計測では・・・



人手によるハンマー打撃では、ある1つの計測点において複数回計測した場合の波形パターンは必ずしも毎回（全て）同じものにはならない。



1つの計測点ごとに10波形程度を計測し、全体における波形パターンA, B, Cの出現割合から、
対象となる打継目の状態区分を推定した。

波形パターンA, B, C → 打継目状態区分(タイプⅠ～Ⅳ)の関係

① 衝撃弾性波法で計測
(波形パターンA, B, C
の(10回計測での)出現比率を確認)

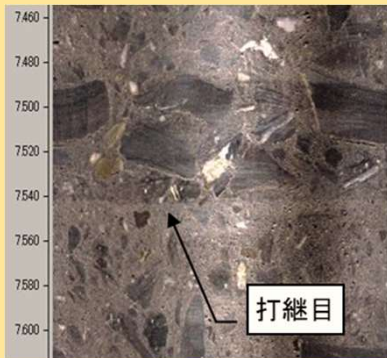


62箇所

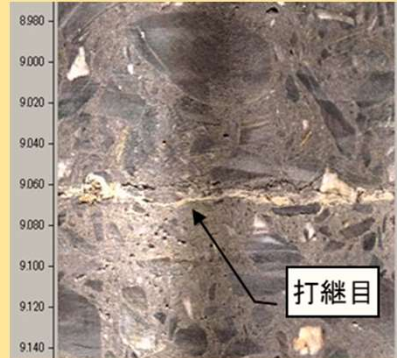
② ボーリング調査結果

- ・ 密着
- ・ 部分的に分離
- ・ 完全に分離

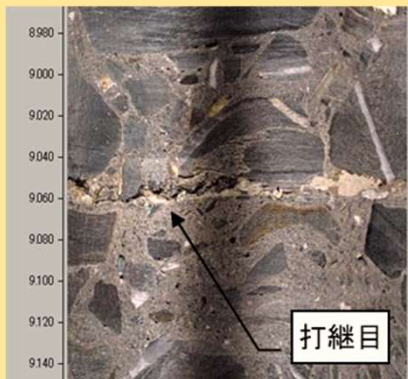
の3段階に区分



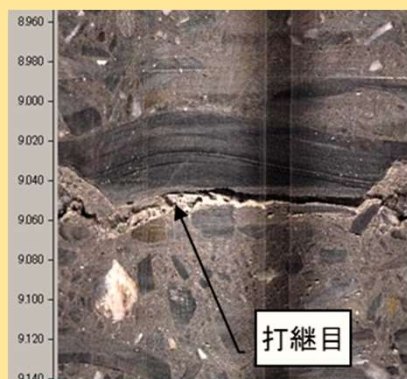
密着



密着

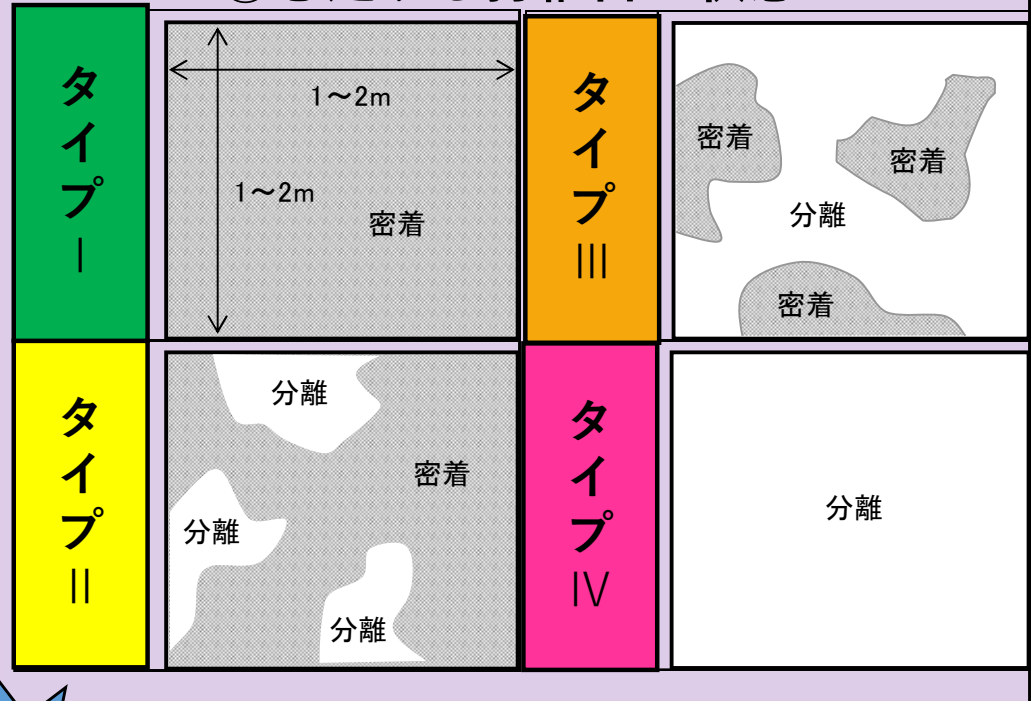


部分的に分離



完全に分離

③ 想定する打継目の状態



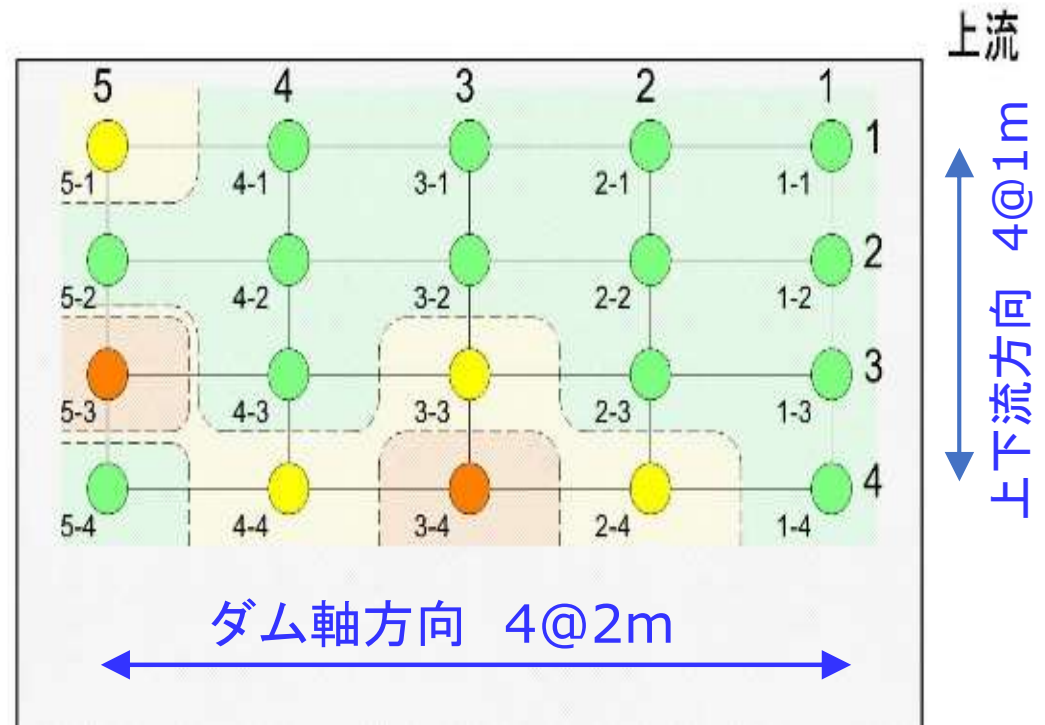
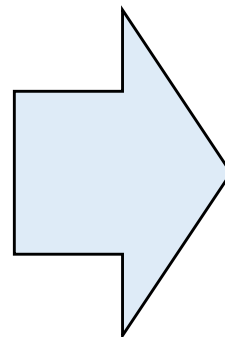
④ ボーリング結果との適合率が高い比率
を基に、**打継目状態区分**を設定

打継目 状態区分	波形パターンの比率
タイプⅠ	$A > 80\% \text{ かつ } C = 0\%$
タイプⅡ	① $0 < A \leq 80\% \text{ かつ } C = 0\%$ ② $0 < C \leq 20\%$
タイプⅢ	① $20 < C < 80$ ② $C \geq 80\% \text{ かつ } 0 < A \leq 20\%$
タイプⅣ	$A = 0\% \text{ かつ } C \geq 80\%$

ダム頂部で叩いた計測結果からの水平打継目状態の推定

B L	打継目 標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態 評価
				A	B	C	合計	
BL4	222.5	1 - 1	波形数	8	2	0	10	I
			%	80	20	0	100	
		1 - 2	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		1 - 3	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		1 - 4	波形数	8	2	0	10	I
			%	80	20	0	100	
		2 - 1	波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100	
		2 - 2	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		2 - 3	波形数	8	2	0	10	I
			%	80	20	0	100	
		2 - 4	波形数	6	4	0	10	II
			%	60	40	0	100	
		3 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		3 - 2	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		3 - 3	波形数	7	3	0	10	II
			%	70	30	0	100	
		3 - 4	波形数	4	3	3	10	III
			%	40	30	30	100	

B L	打継目 標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態 評価
				A	B	C	合計	
BL4	222.5	4 - 1	波形数	8	2	0	10	I
			%	80	20	0	100	
		4 - 2	波形数	8	2	0	10	I
			%	80	20	0	100	
		4 - 3	波形数	8	2	0	10	I
			%	80	20	0	100	
		4 - 4	波形数	4	2	1	7	II
			%	57.1	28.6	14.3	100	
		5 - 1	波形数	7	3	0	10	II
			%	70	30	0	100	
		5 - 2	波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100	
		5 - 3	波形数	5	2	3	10	III
			%	50	20	30	100	
		5 - 4	波形数	9	0	0	9	I
			%	100	0	0	100	



ダム事例におけるDXの価値

■ 従来

- ・ボーリング調査
 - 点情報
 - 破壊・高コスト



■ NDE

- ・弾性波により広範囲評価
- ・非破壊



■ DX

- ・波形パターン(A/B/C)に分類
- ・出現割合 → 状態区分(I ~ IV)

➡ 定性的判断 → 定量分類へ

➡ 点検 → データ解析へ

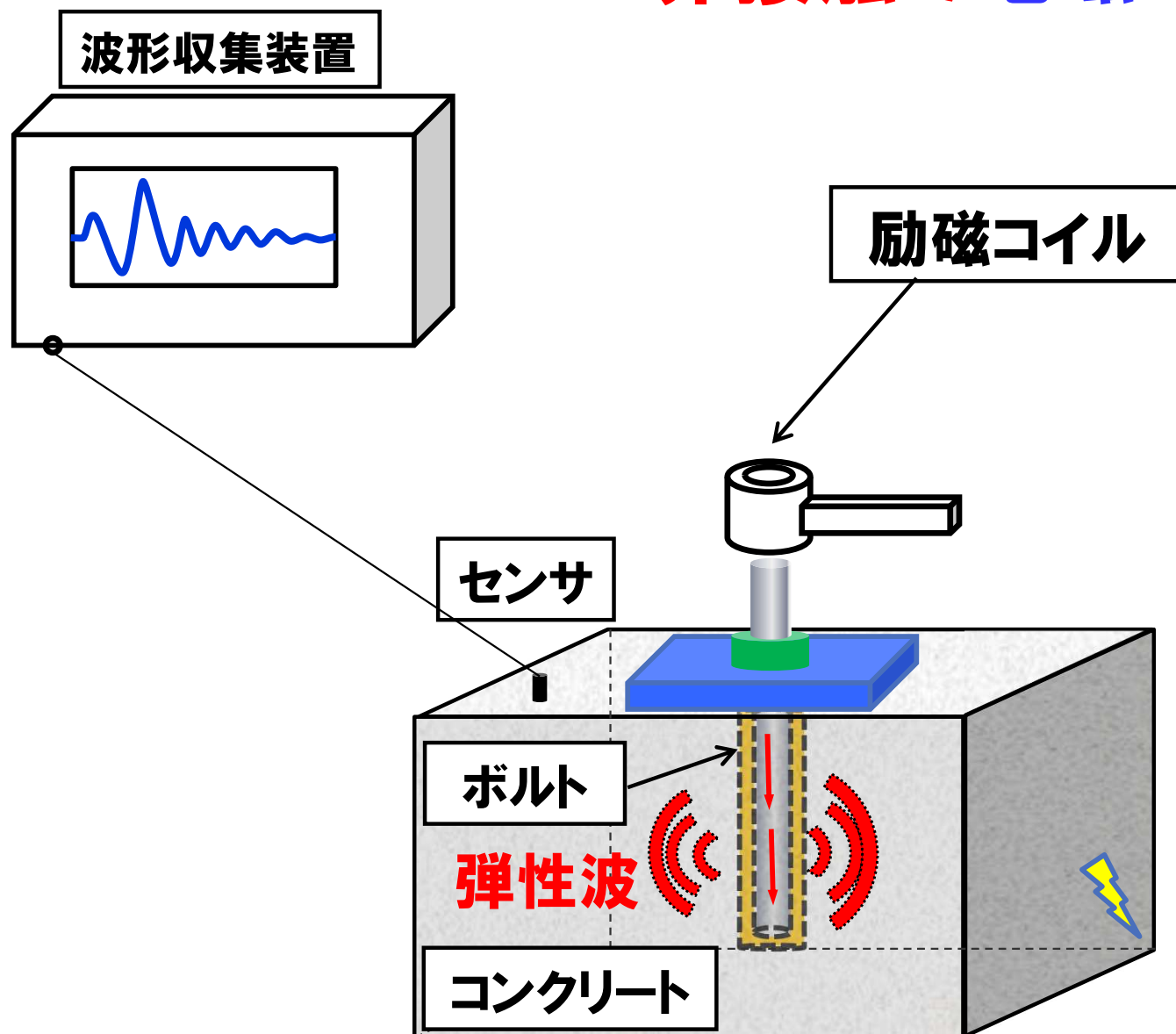
講演内容

1. 「コンクリートダムの水平打継目」を、
ダム頂部をハンマーで叩いて弾性波で診る
2. 「あと施工アンカー固着部」を、
アンカー埋込部を電磁パルスで叩いて弾性波で診る
3. 「PCグラウトの充填状況」を、
シースを電磁パルスで叩いて電磁場応答で診る



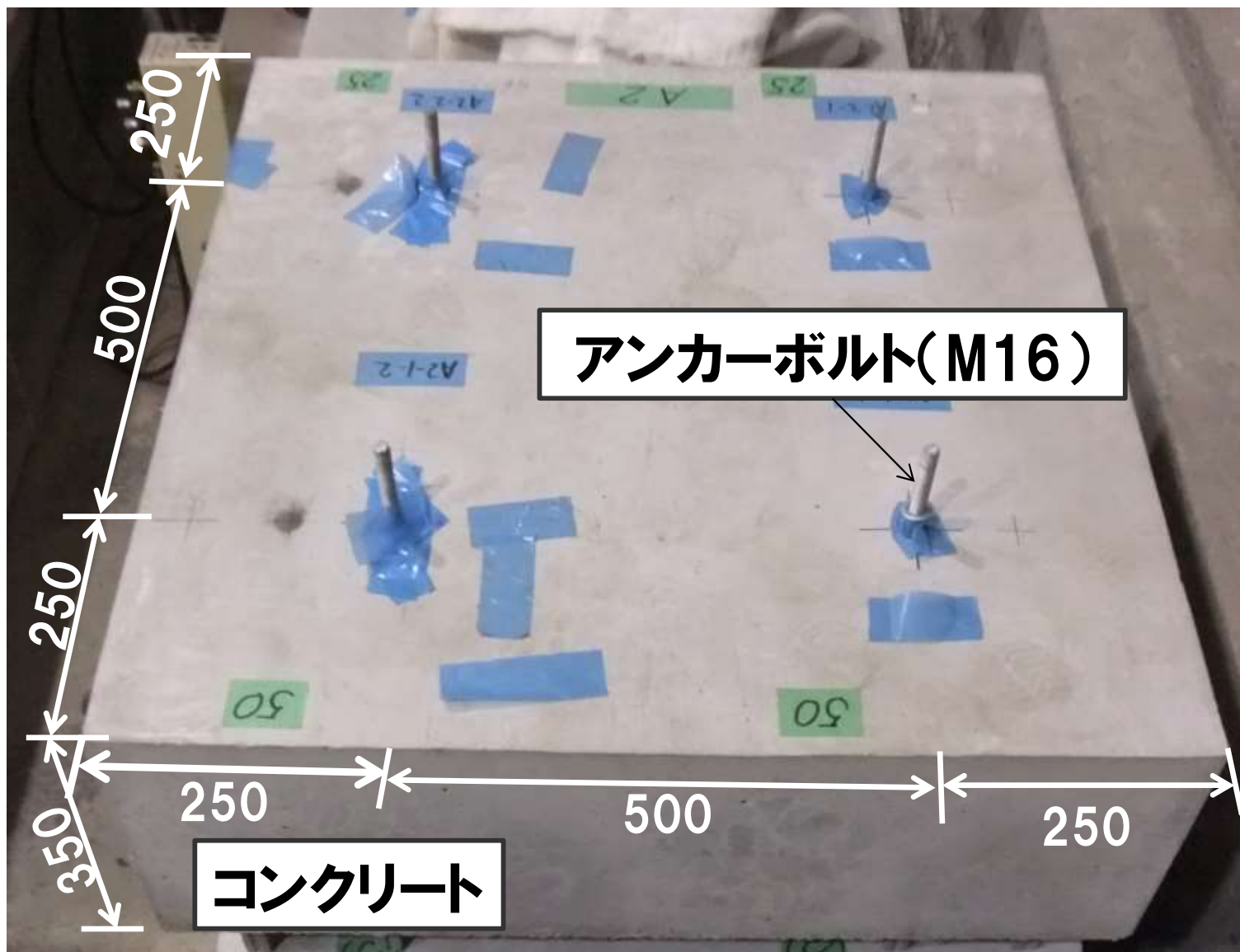
アンカーボルト固着部を

非接触で電磁パルスで叩く





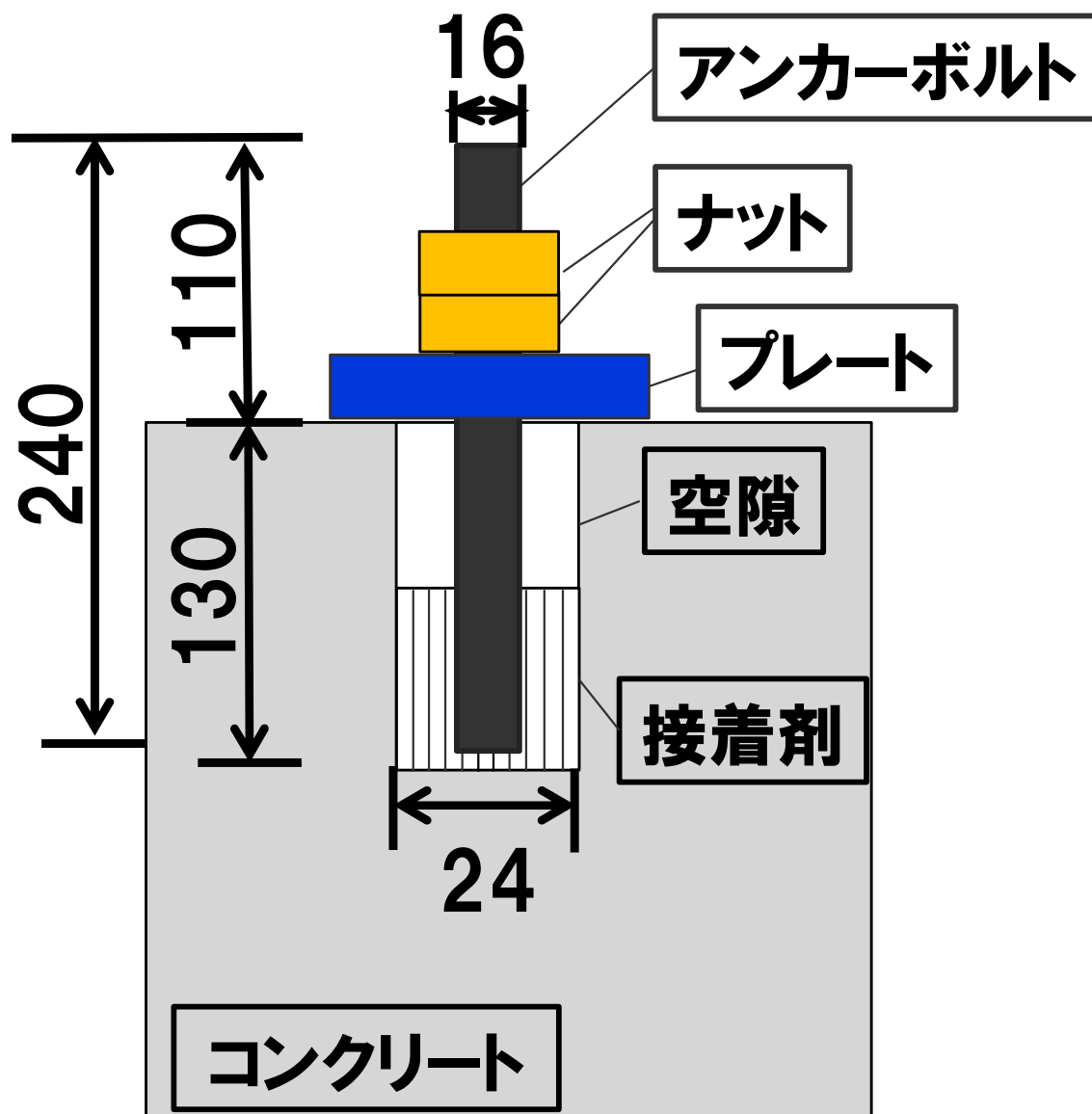
接着剤充填不良の評価



単位:mm



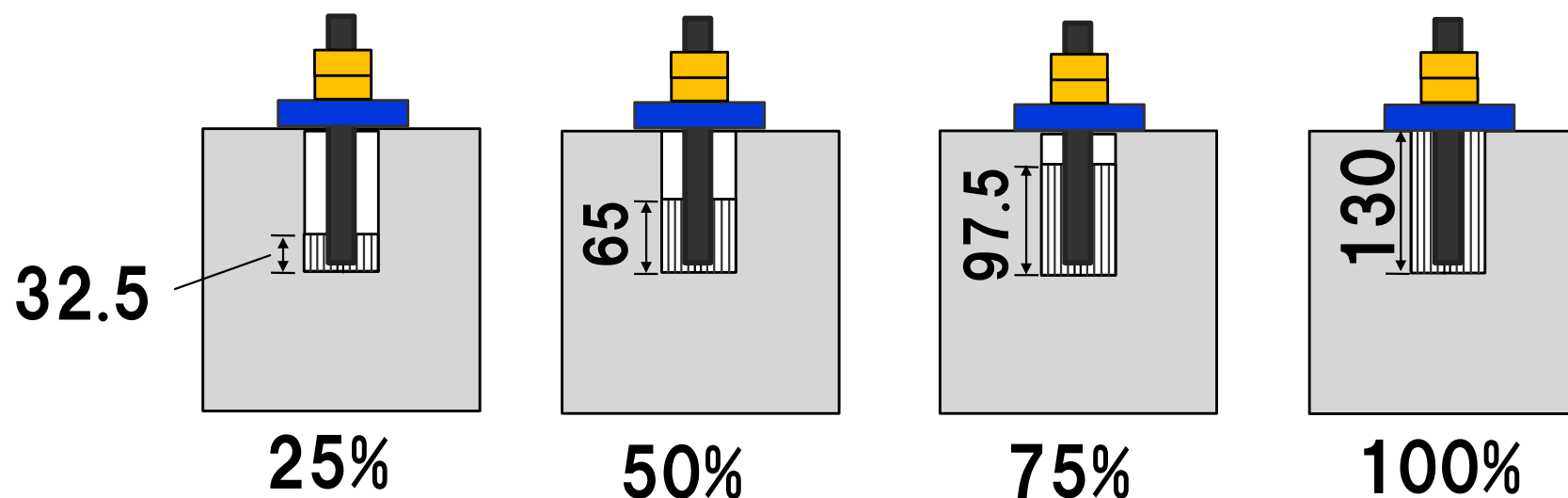
ボルト固着部(断面)の模式図



単位:mm



接着剤の充填ケース(充填率)



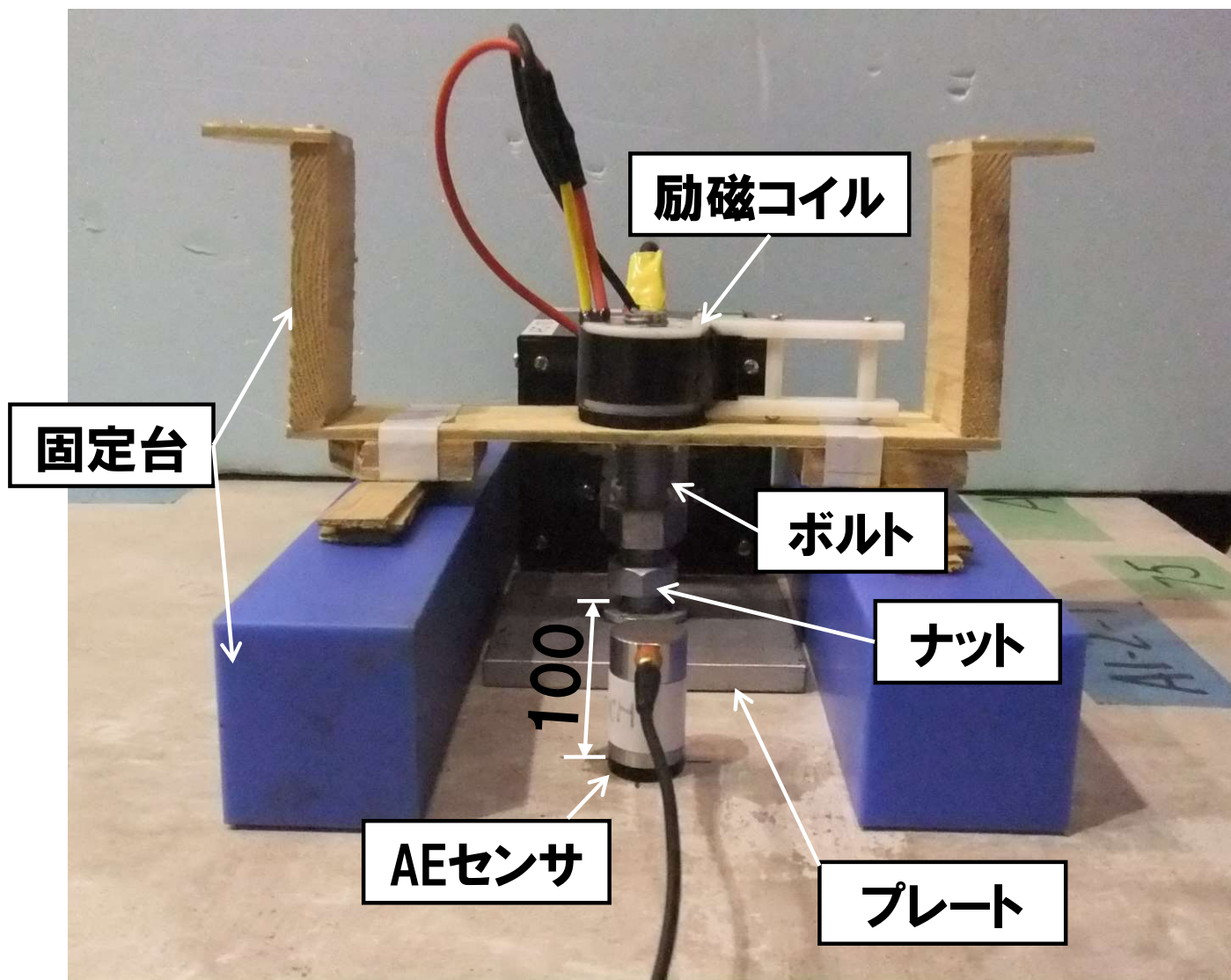
単位:mm

空隙

接着剤

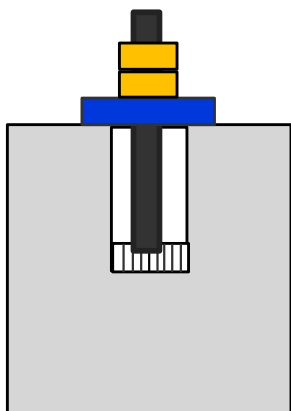


計測概要(弾性波をコンクリート表面で受信する場合)

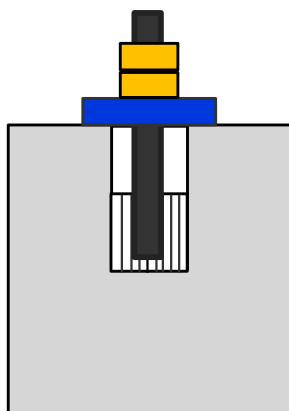




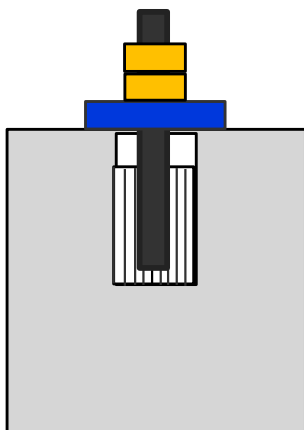
受信波形の例



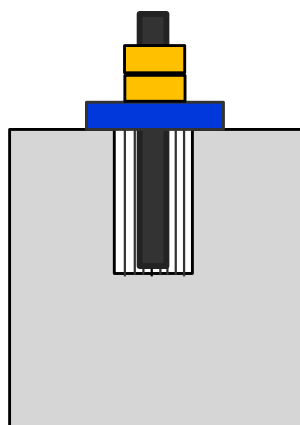
25%



50%



75%

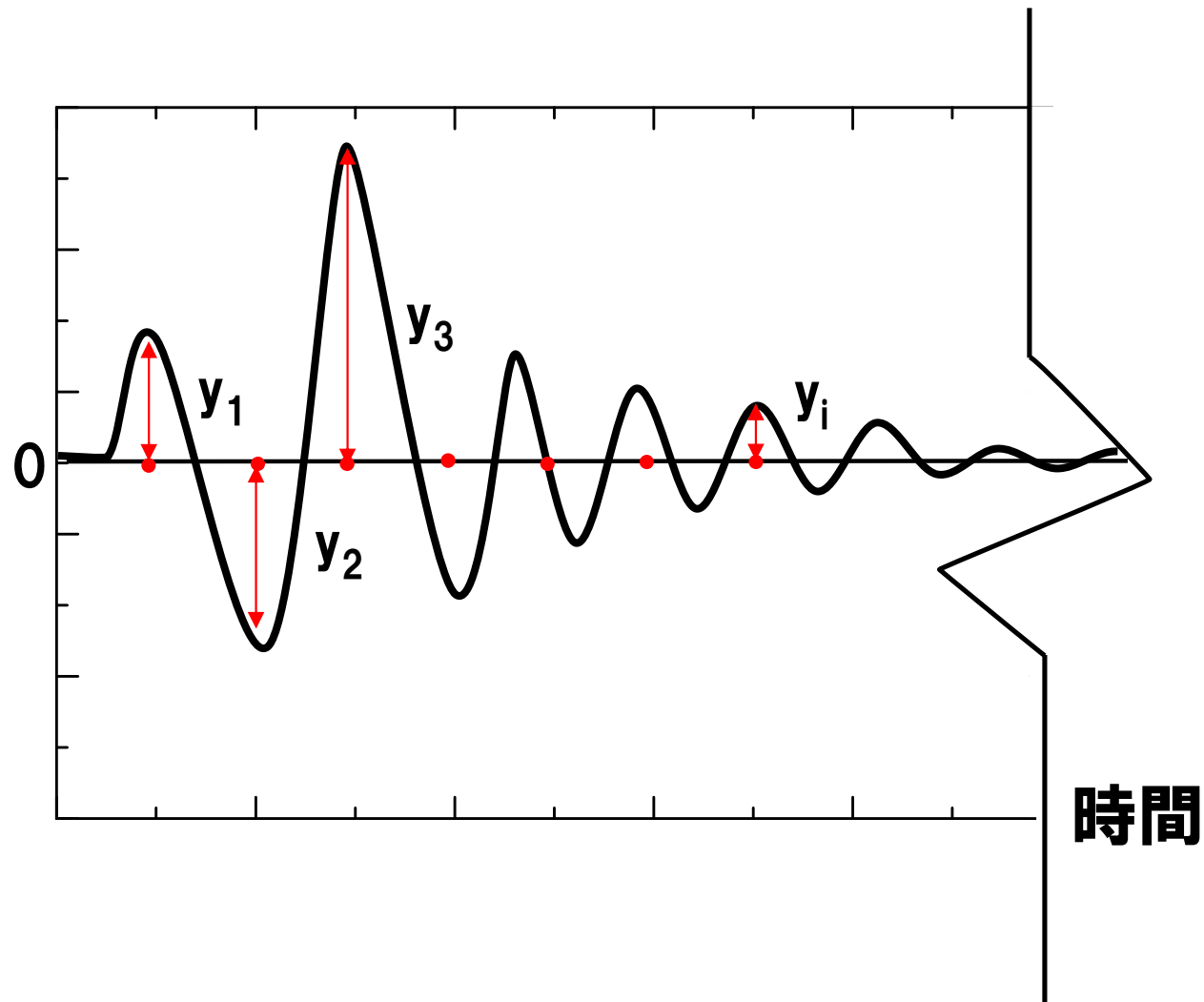


100%





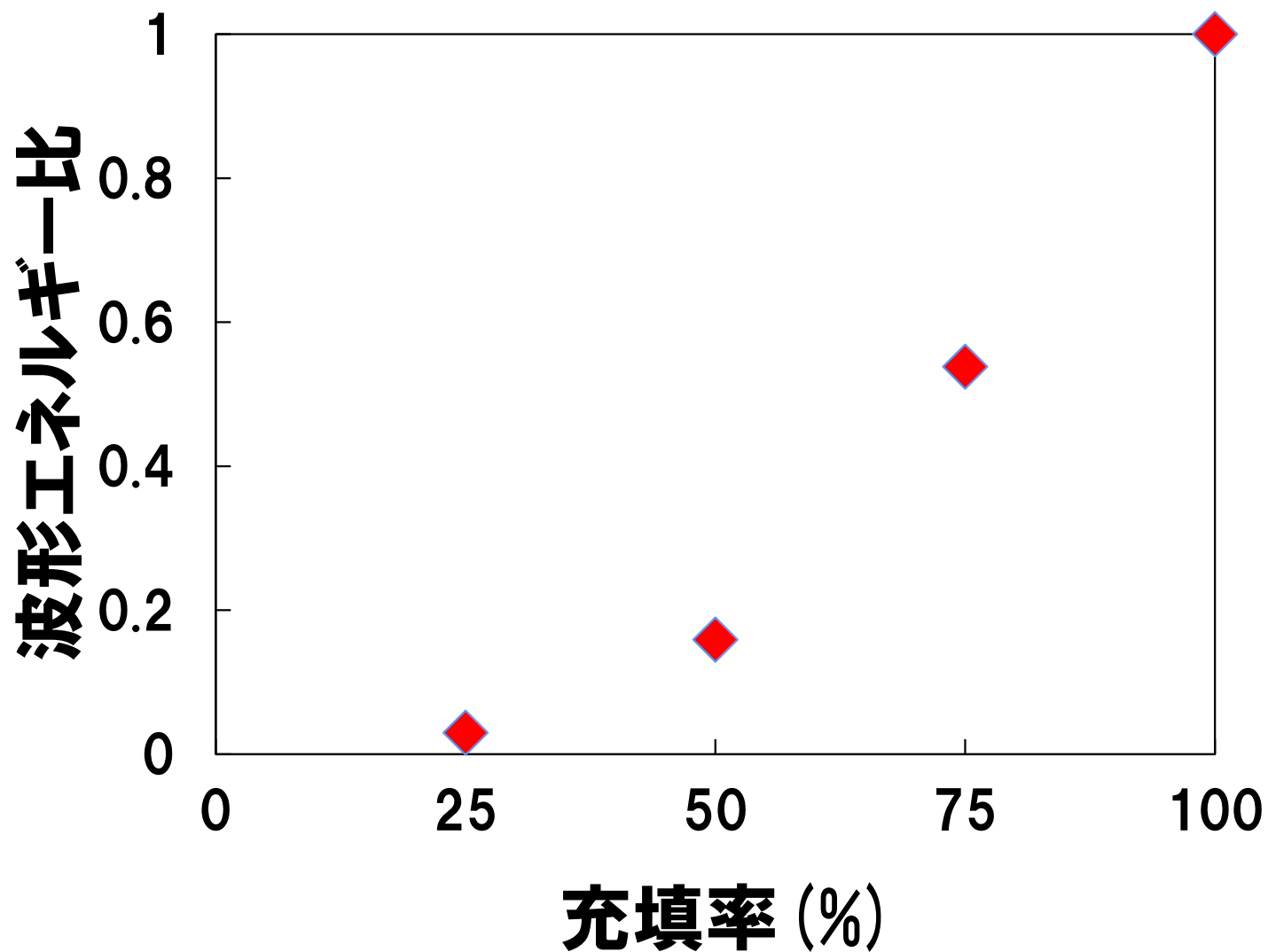
波形エネルギーの定義



$$\text{波形エネルギー} = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \cdots + y_i^2 = \sum y_i^2$$



接着剤充填率と波形エネルギーの関係





ここまでで示したように、

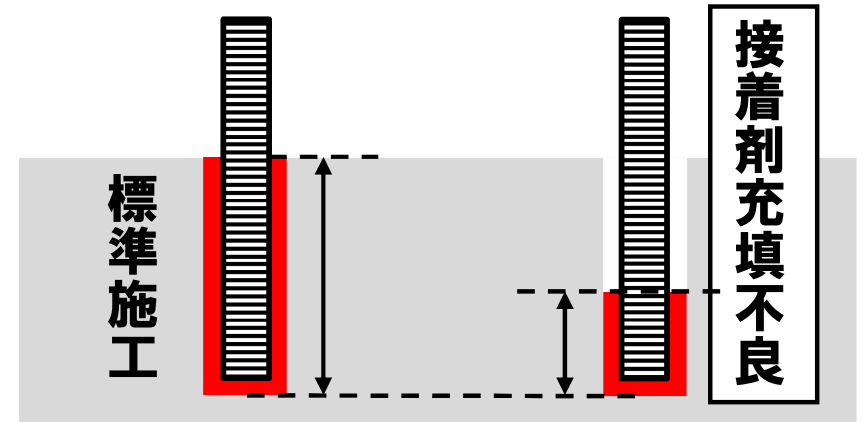
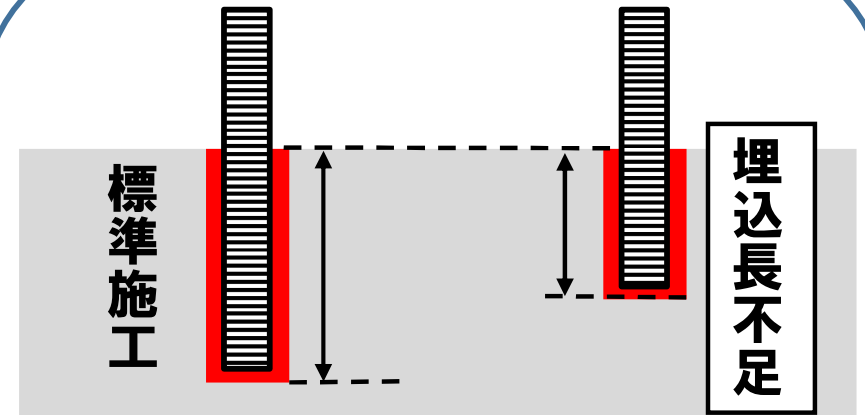
ボルトの**施工不良**の状況
の把握が可能



さて、それでは、ボルトの**引拔耐力**を
非破壊で推定できる可能性は？



電磁パルスで叩いた際の弾性波の
各種評価指標と**引拔耐力**との関係を把握
(卒論での木村君の研究)





検討の流れ

①

引抜耐力が低下した状態を
接着剤の充填不良により模擬



まずは非破壊で

②

電磁パルスで叩いた際の
弾性波計測



続いて破壊試験

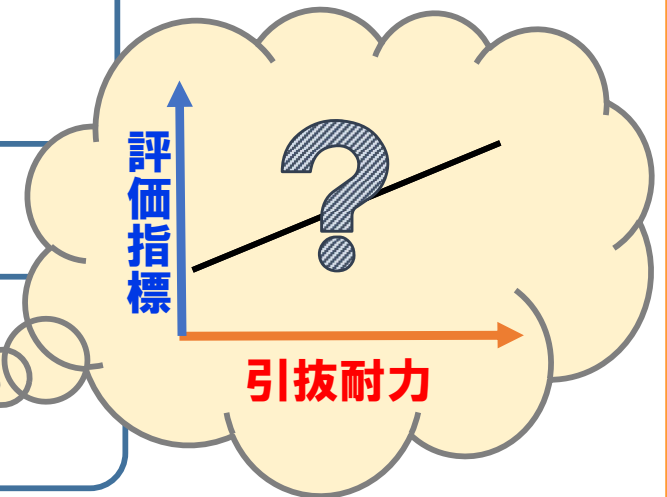
③

静的引抜試験



④

②と③との関係を把握





検討の流れ

①

引抜耐力が低下した状態を
接着剤の充填不良により模擬



②

電磁パルス法で叩いた際の
弾性波計測



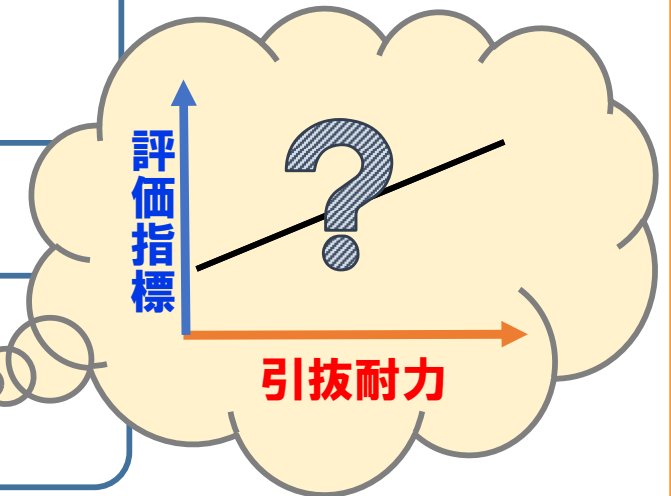
③

静的引抜試験



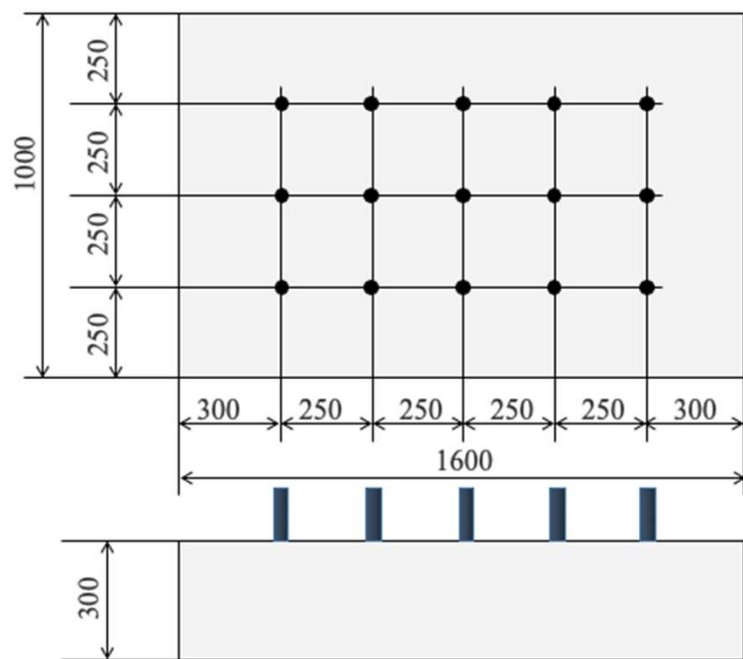
④

②と③との関係を把握

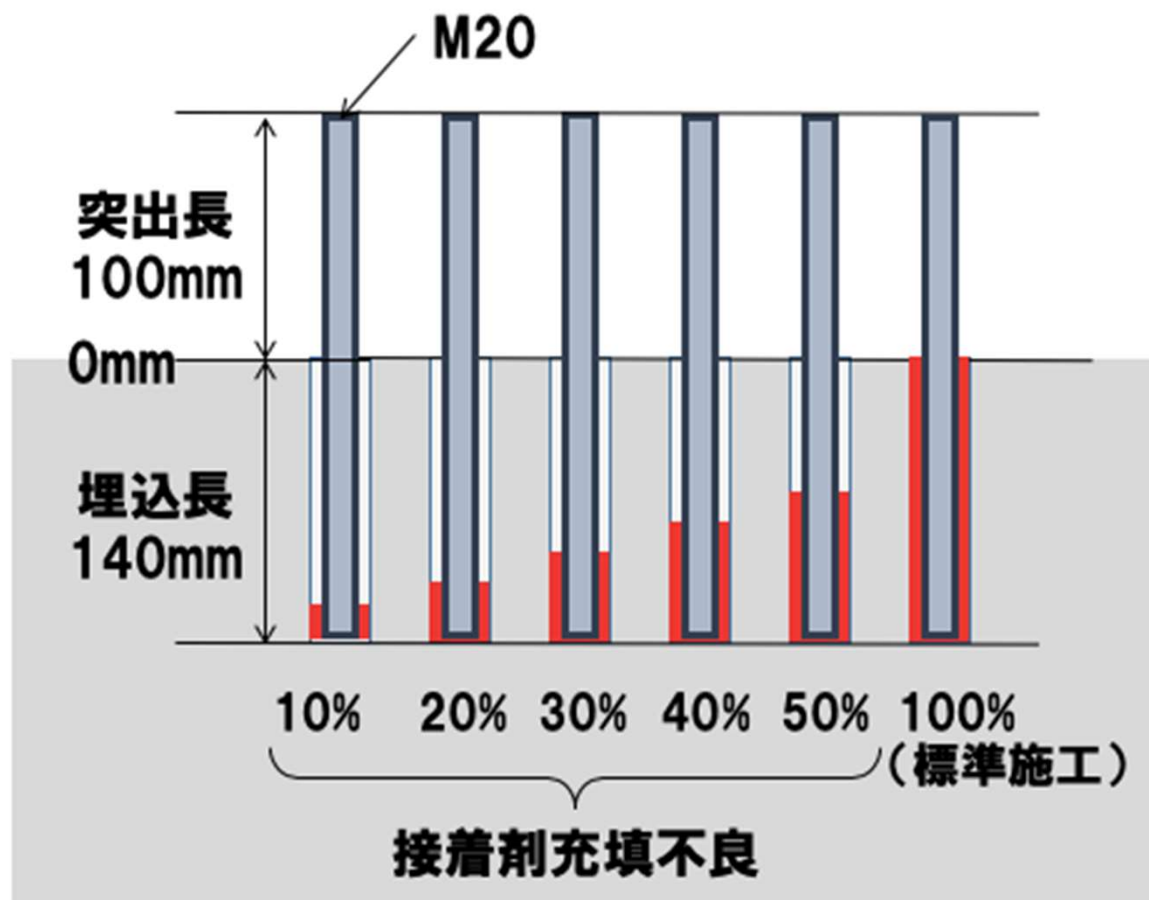




供試体概要



(単位：mm)



$n = 3$ で実験



検討の流れ

①

引抜耐力が低下した状態を
接着剤の充填不良により模擬



②

電磁パルス法で叩いた際の
弾性波計測



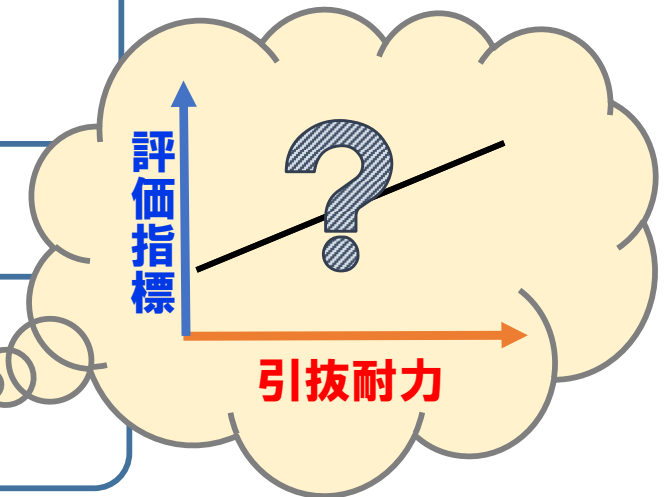
③

静的引抜試験



④

②と③との関係を把握





電磁パルスで叩いた際の弾性波計測

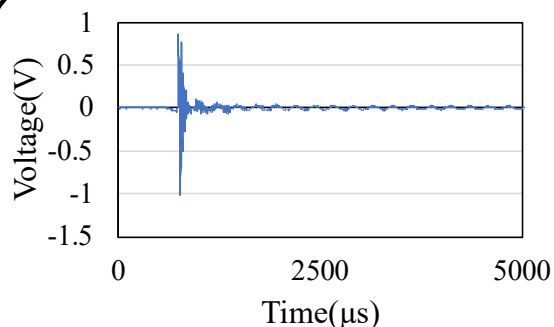
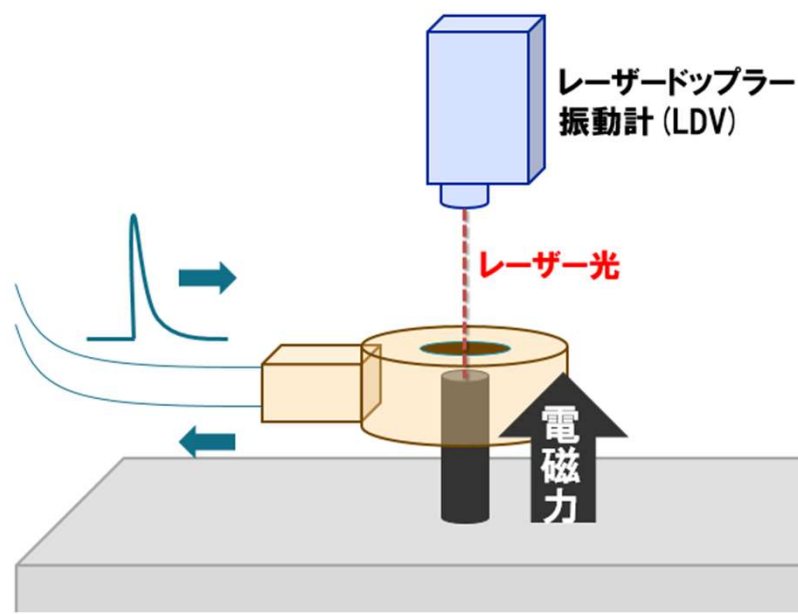


電圧: 600V
励磁コイル:
巻き数 12ターン

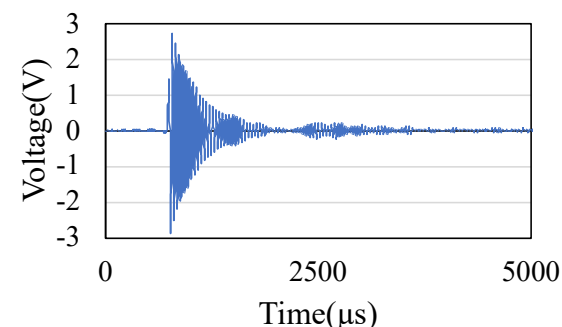
各ボルト3回ずつ計測

ボルト頭部で弾性波を受信 → 指標は

- 波形エネルギー
- 対数減衰率

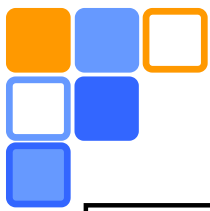


充填率 100%



充填率 10%

ボルト頭部受信では、コンクリート表面受信とは様子が異なる。

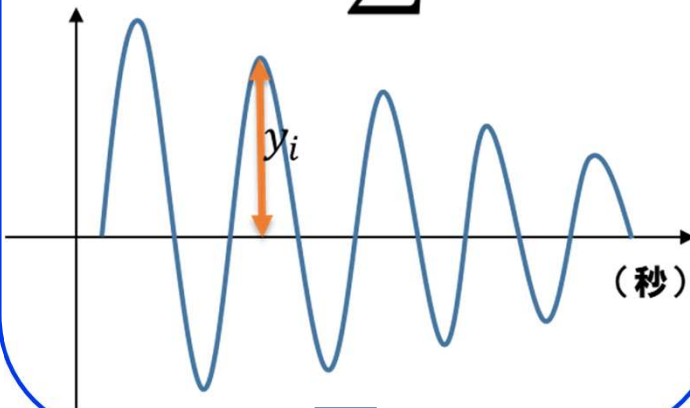


計測結果 I (波形エネルギー比)

評価指標

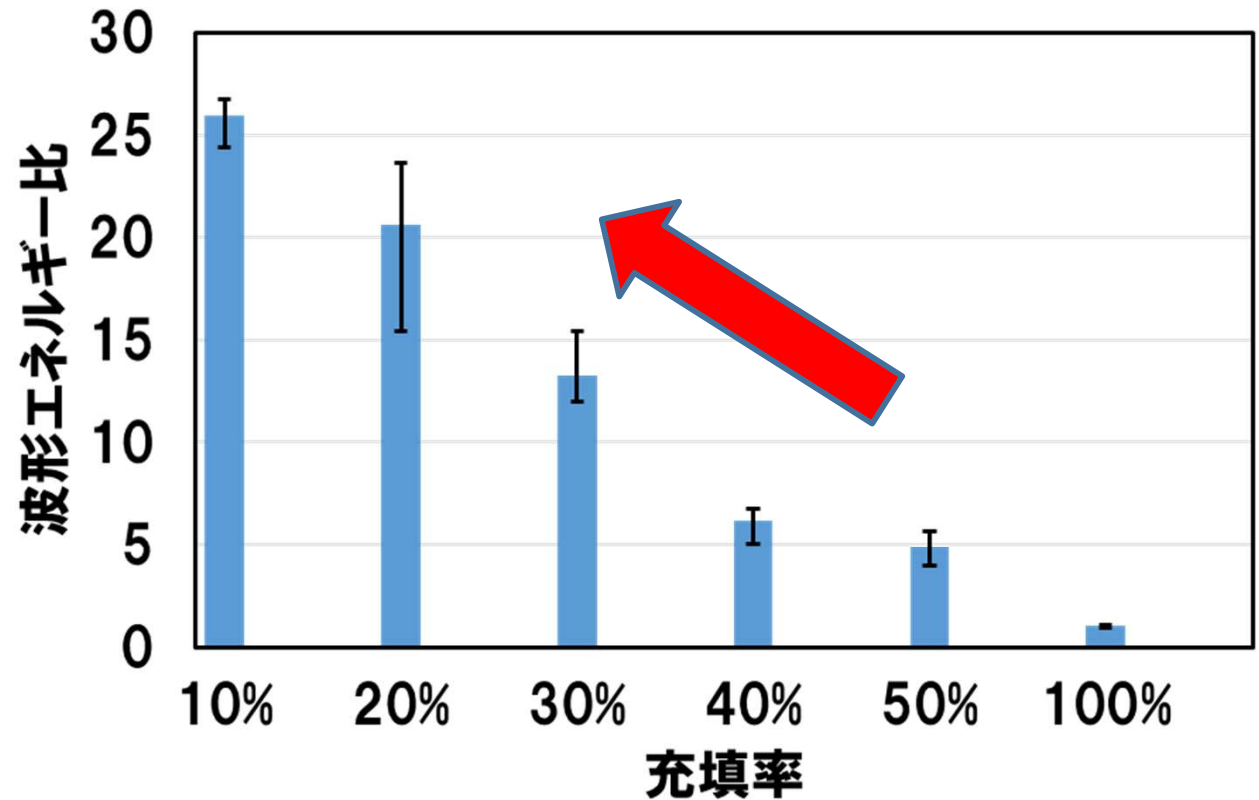
波形エネルギー：
振幅の2乗和で表される。
振動の大きさを表す。

$$E = \sum y_i^2$$



波形エネルギー比：
標準施工の波形エネルギーの大きさを基準(=1)
とした場合の各ボルトの
波形エネルギー。

充填率ごとの波形エネルギー比



**充填率が低下するにつれて
波形エネルギー比が増大**



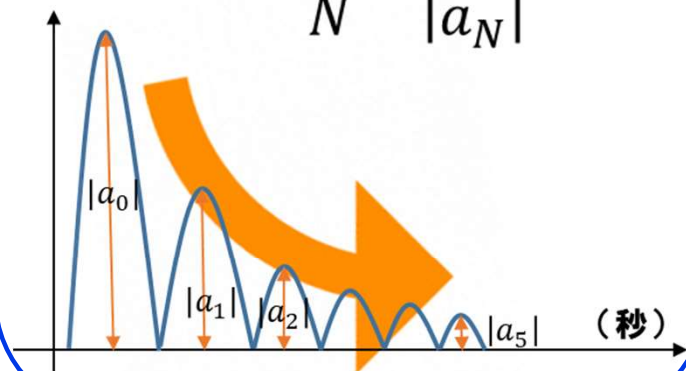
計測結果II (対数減衰率比)

評価指標

対数減衰率:

振動の収束の速さを表す。
本研究ではN=5と定めた。

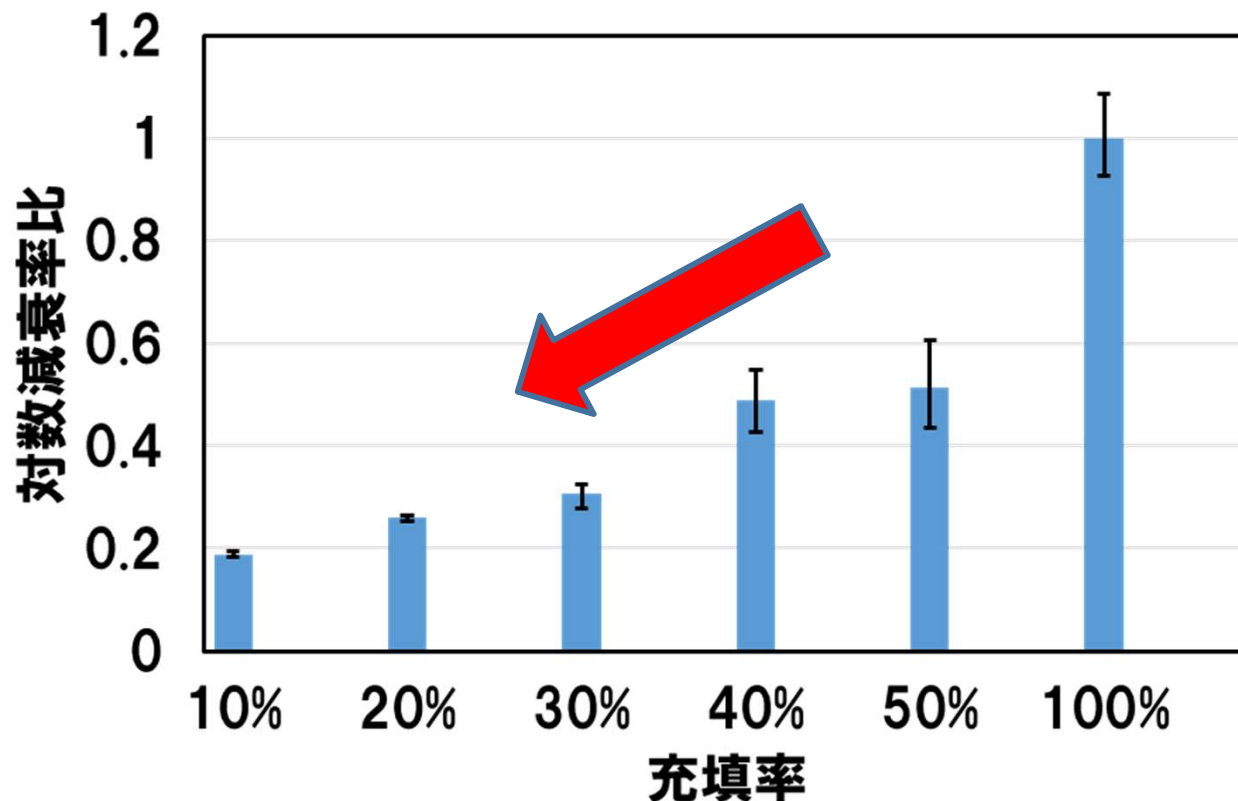
$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{|a_0|}{|a_N|}$$



対数減衰率比:

標準施工の対数減衰率の大きさを基準(=1)とした場合の各ボルトの対数減衰率。

充填率ごとの対数減衰率比



充填率が低下するにつれて
対数減衰率比は小さくなる



検討の流れ

①

引抜耐力が低下した状態を
接着剤の充填不良により模擬



②

電磁パルス法で叩いた際の
弾性波計測



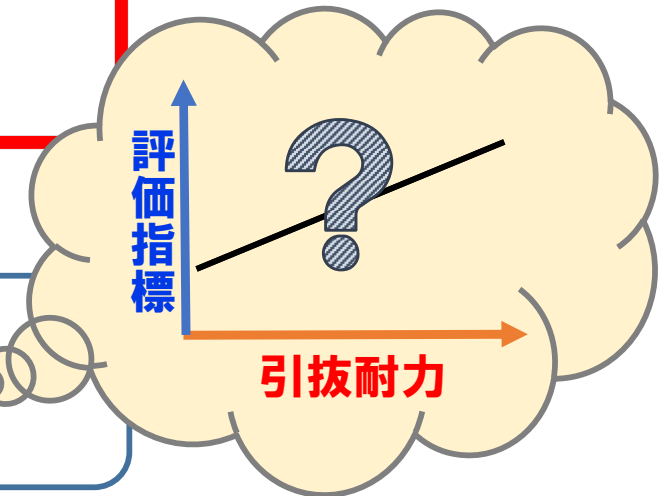
③

静的引抜試験



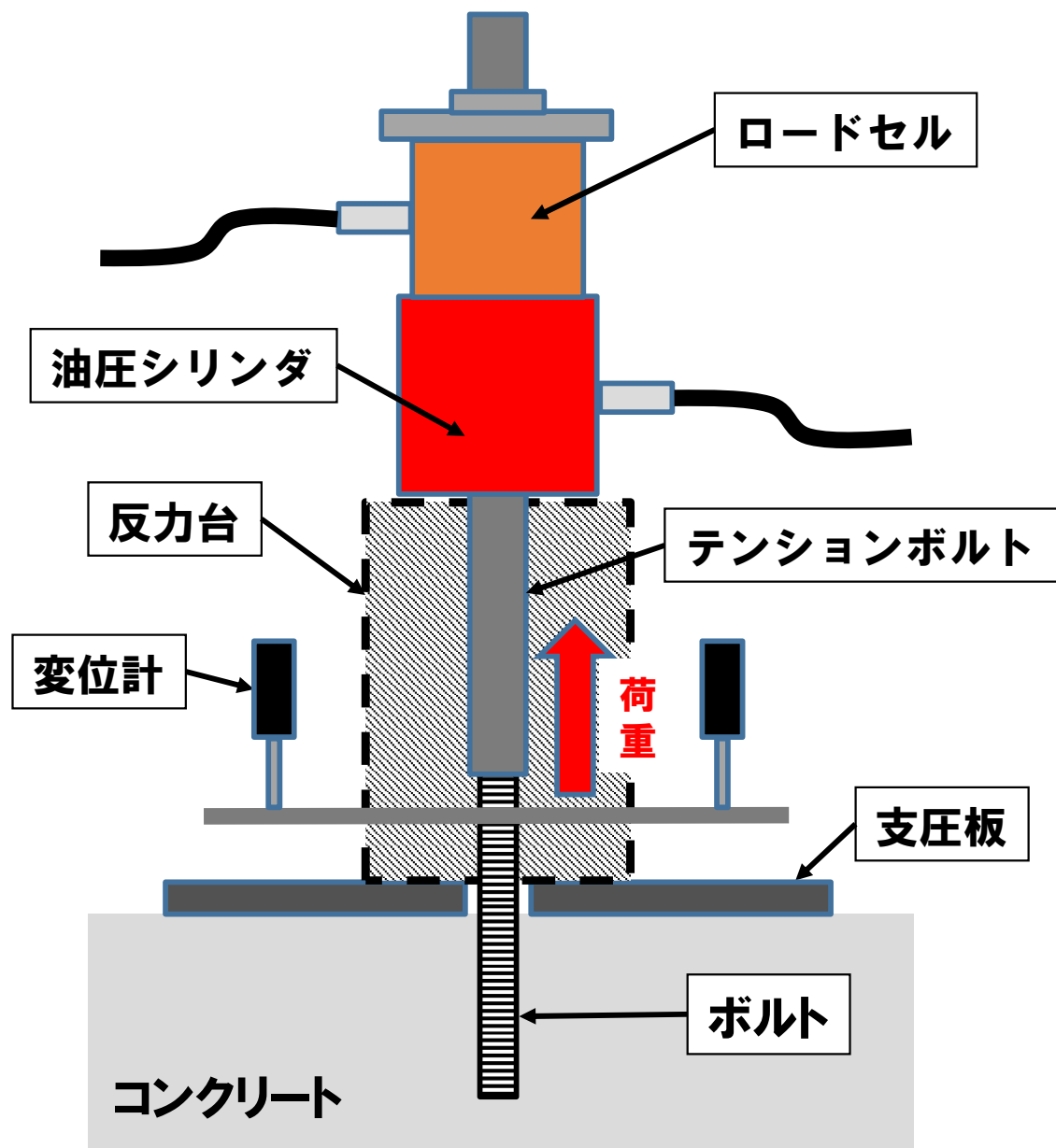
④

②と③との関係を把握



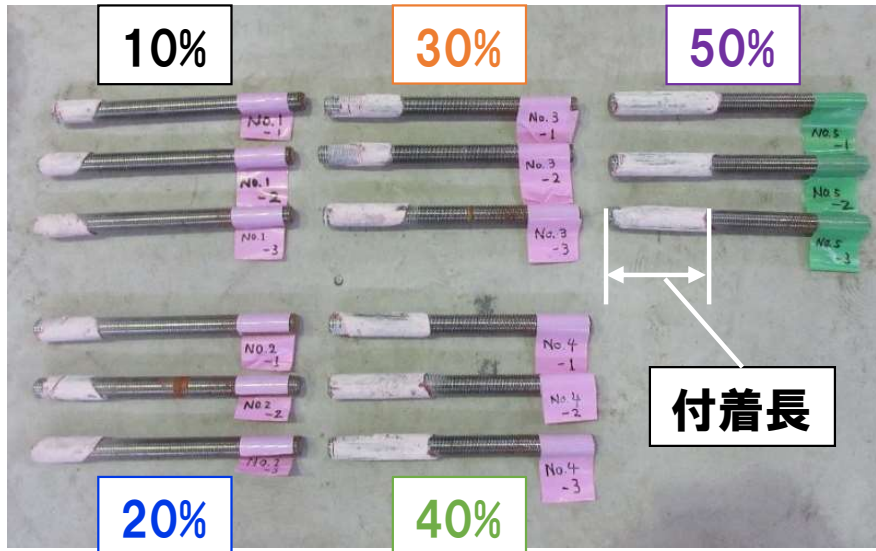


静的引抜試験概要





静的引抜試験結果

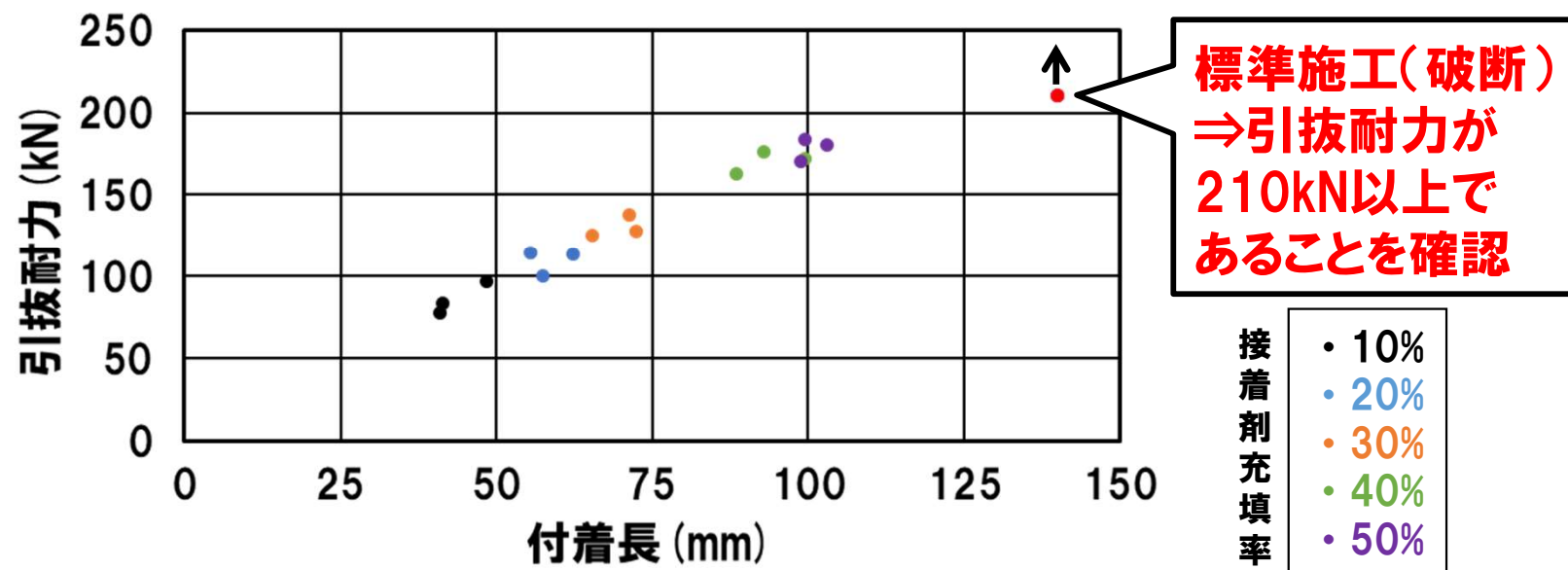


引抜後のボルト



破断した標準施工ボルト

付着長と引抜耐力との関係





検討の流れ

①

引抜耐力が低下した状態を
接着剤の充填不良により模擬



②

電磁パルス法で叩いた際の
弾性波計測



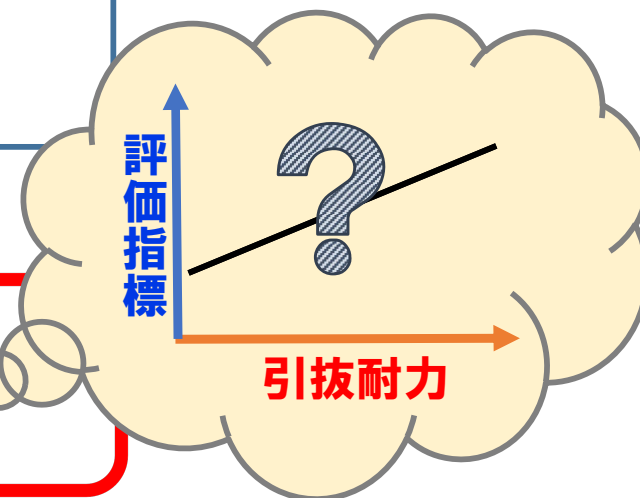
③

静的引抜試験



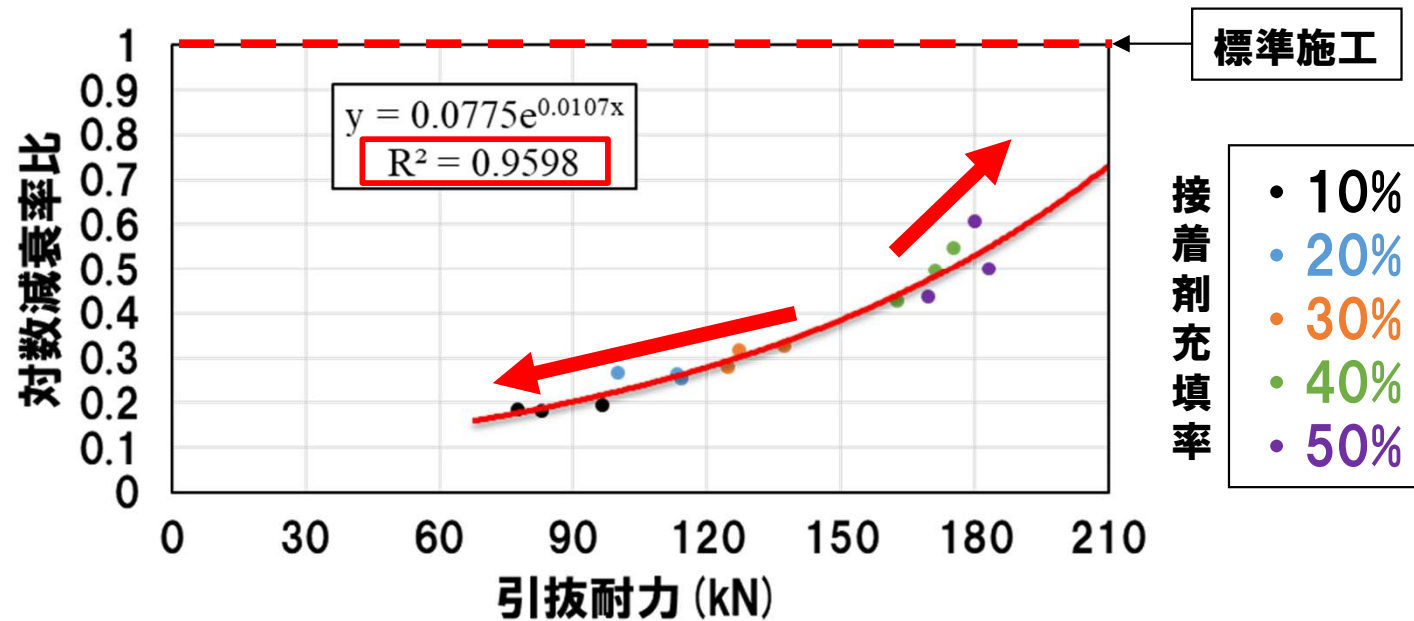
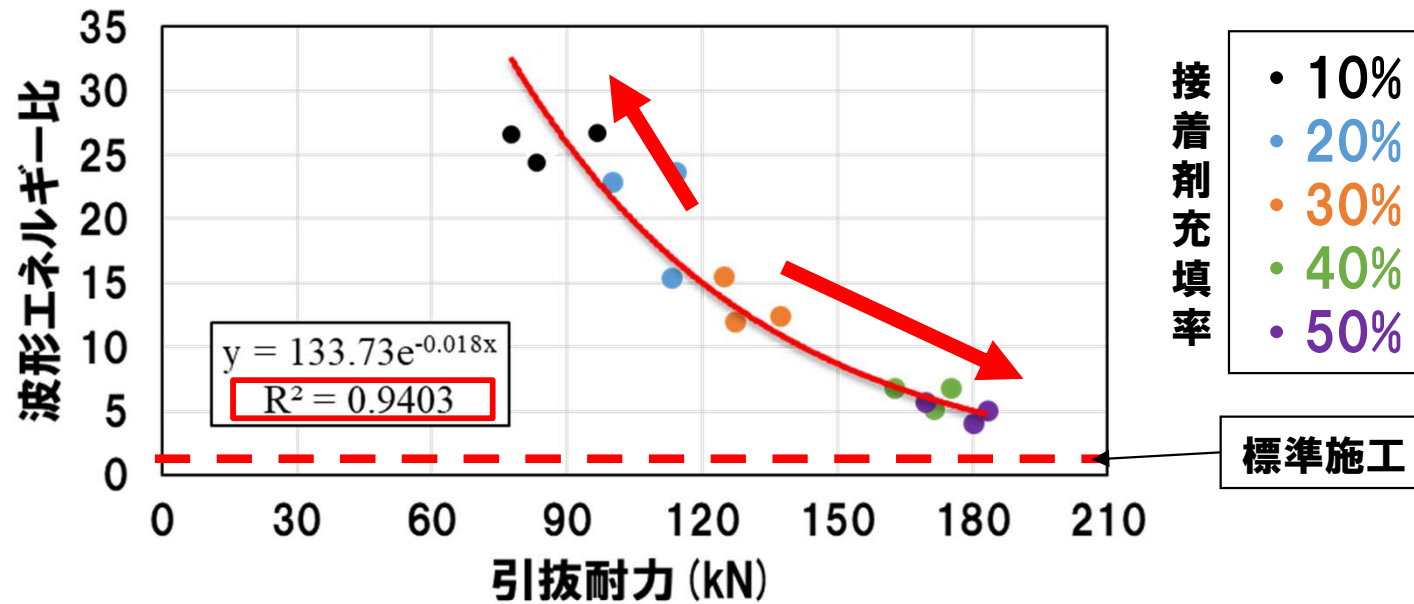
④

②と③との関係を把握





2つの評価指標と引抜耐力の関係





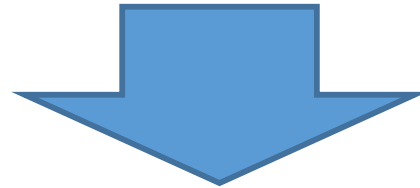
2つの評価指標の適用例

□ 波形エネルギー比

⇒ 引抜耐力が小さい範囲で感度が高い

□ 対数減衰率比

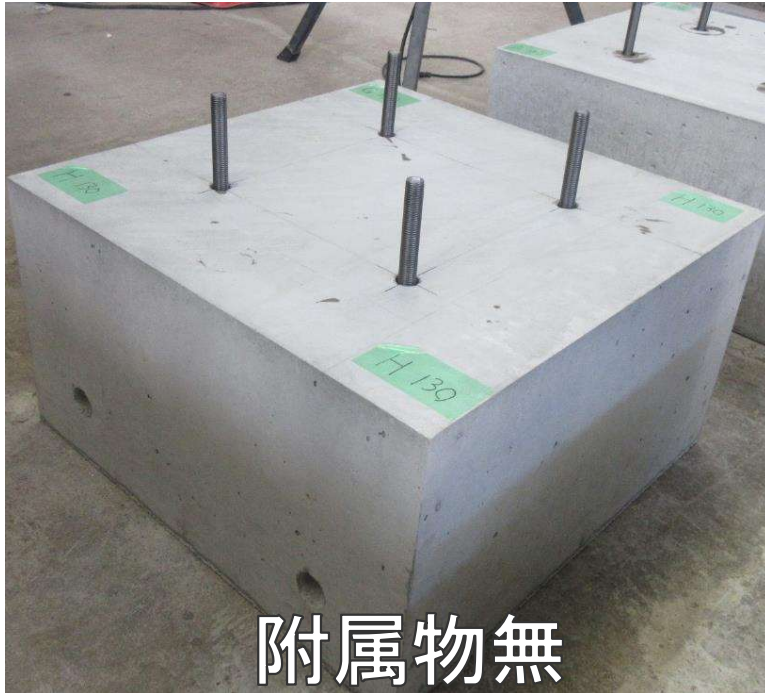
⇒ 引抜耐力が大きい範囲で感度が高い



80～150kN・・・ 波形エネルギー比の適用範囲

150～190kN・・・ 対数減衰率比の適用範囲

さて、実際の構造物では、



接着剤充填不良 ○

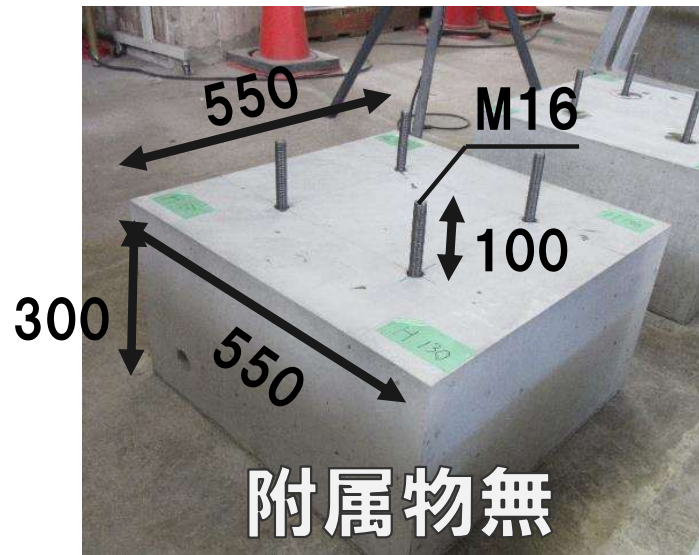


接着剤充填不良 ?

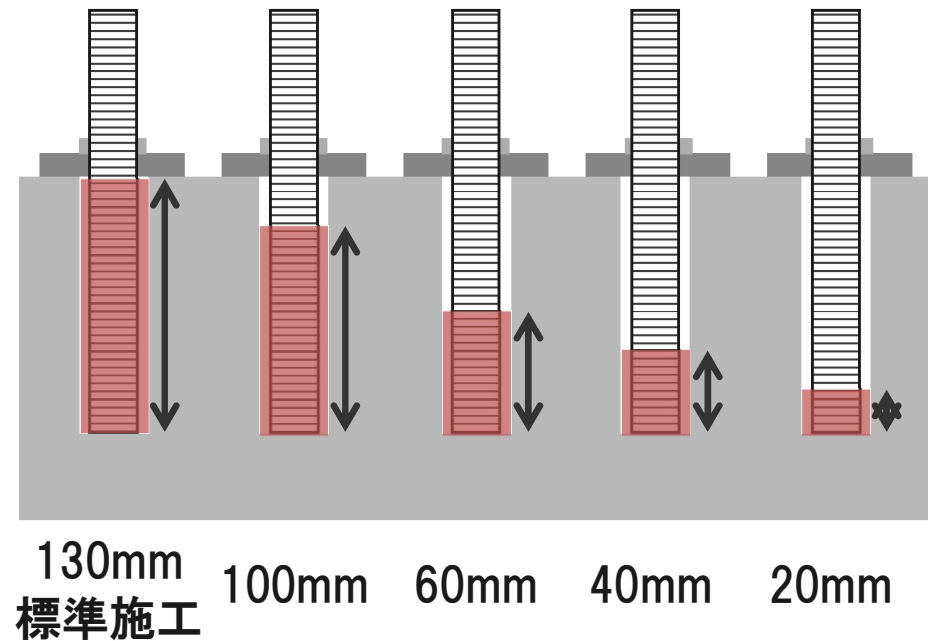
これをどう解決するのか？

(まずは実験的な検討) (湯川君の修論での研究)

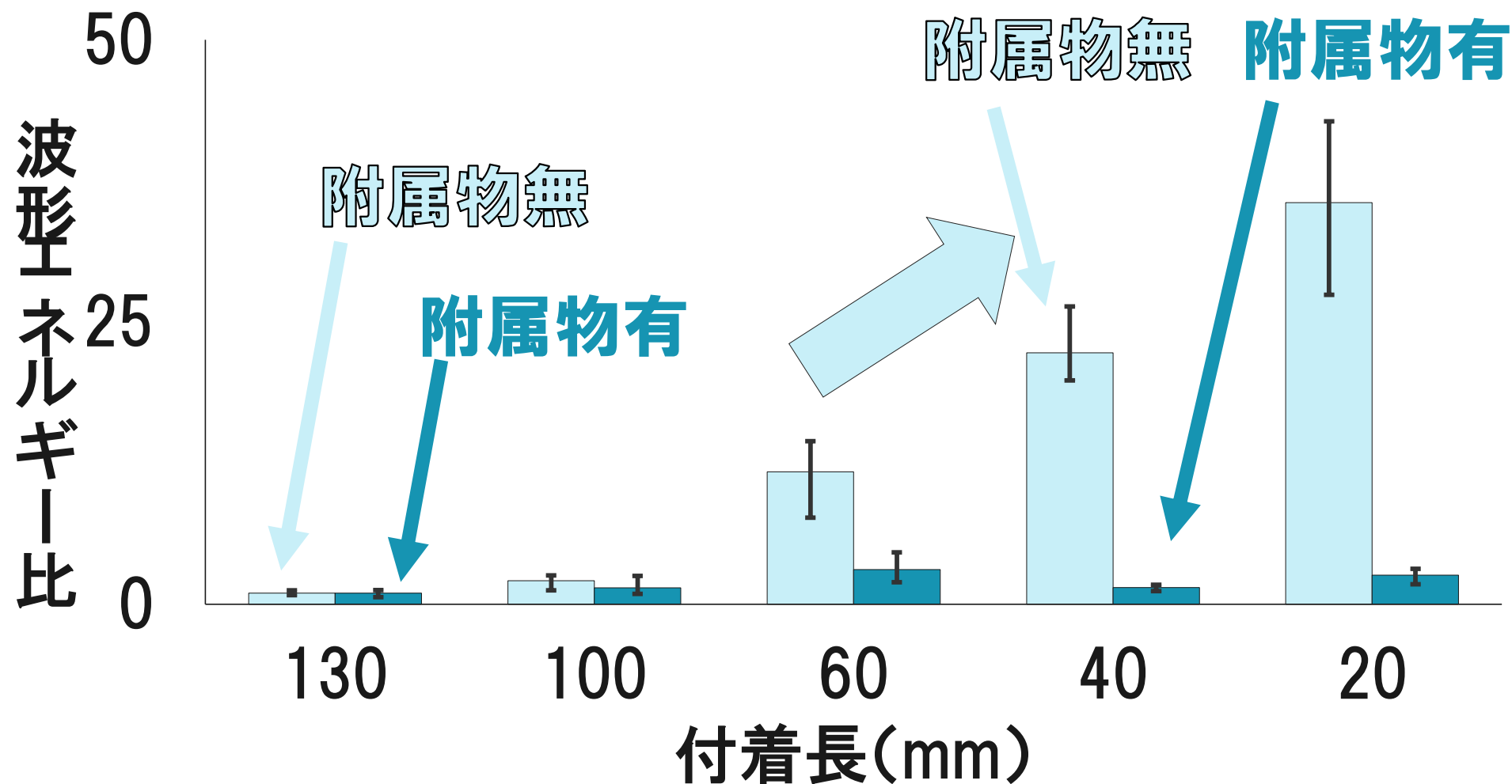
単位:mm



ボルト頭部受信



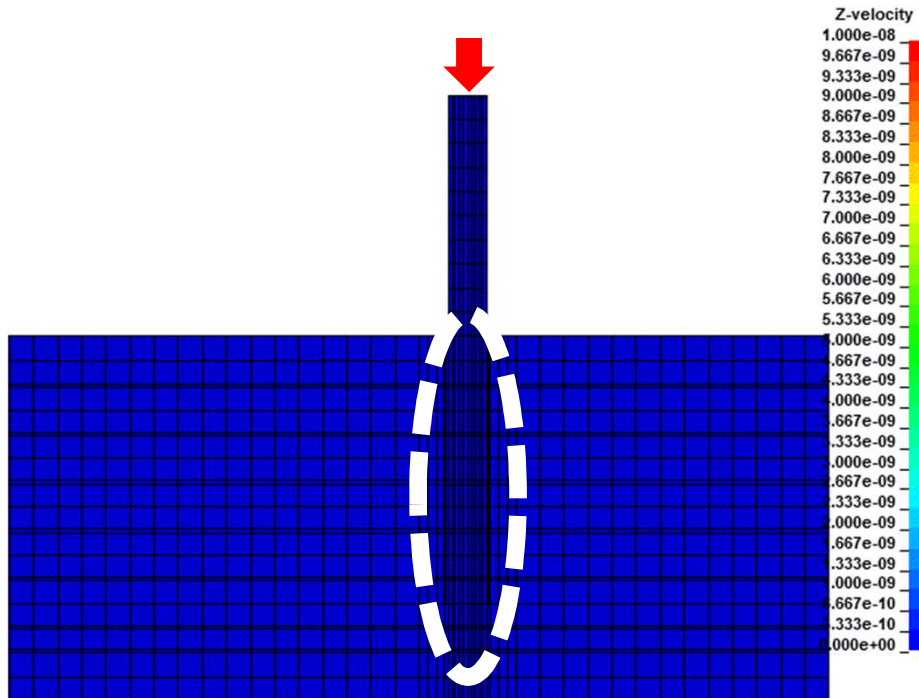
附属物が充填不良評価に与える影響



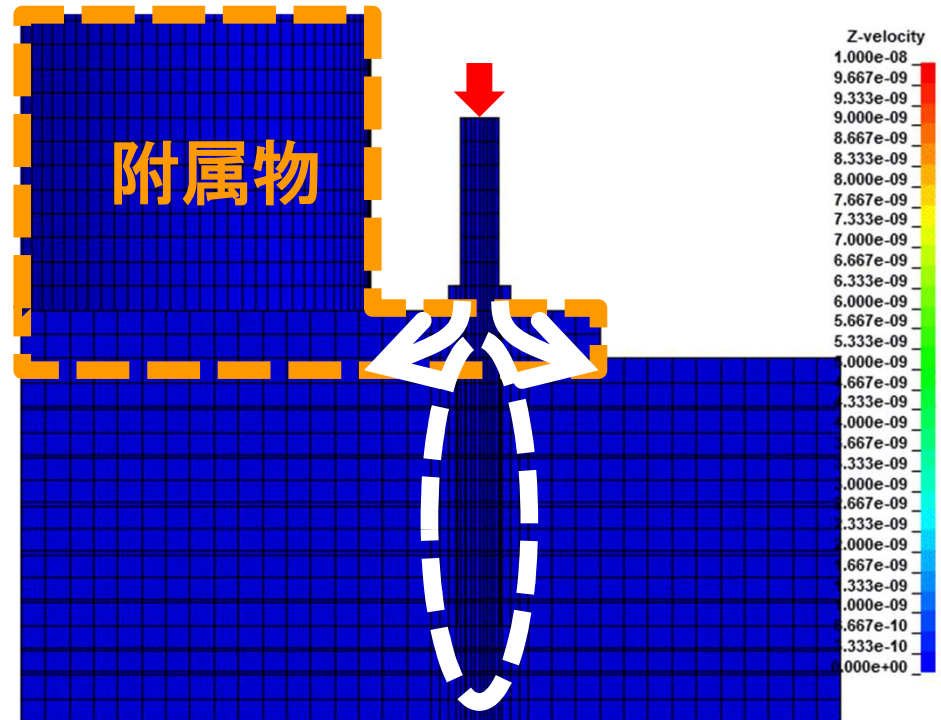
附属物の存在により，波形エネルギーによる評価感度が低下

附属物が充填不良評価に与える影響 (解析的な考察)

附属物無

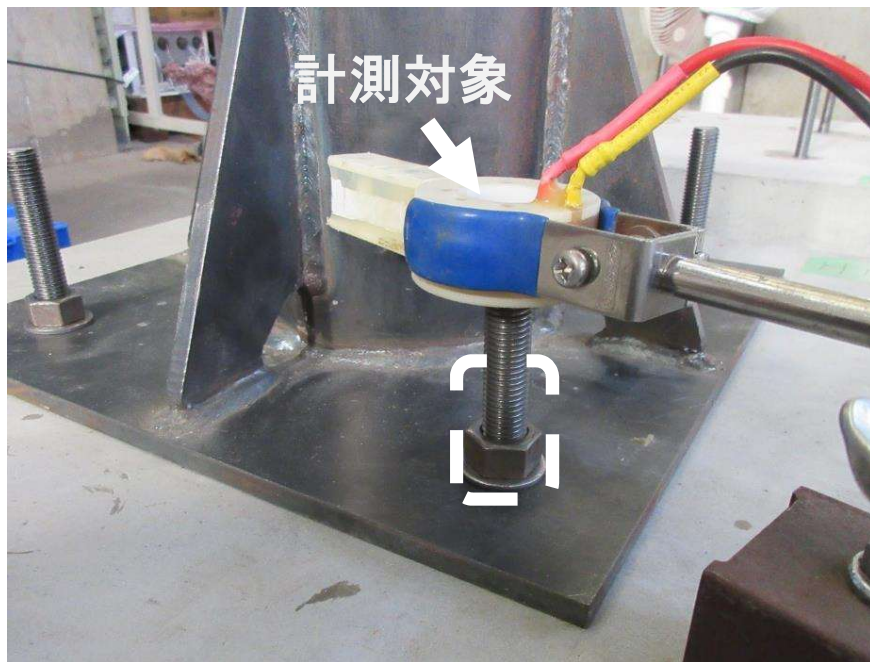


附属物有

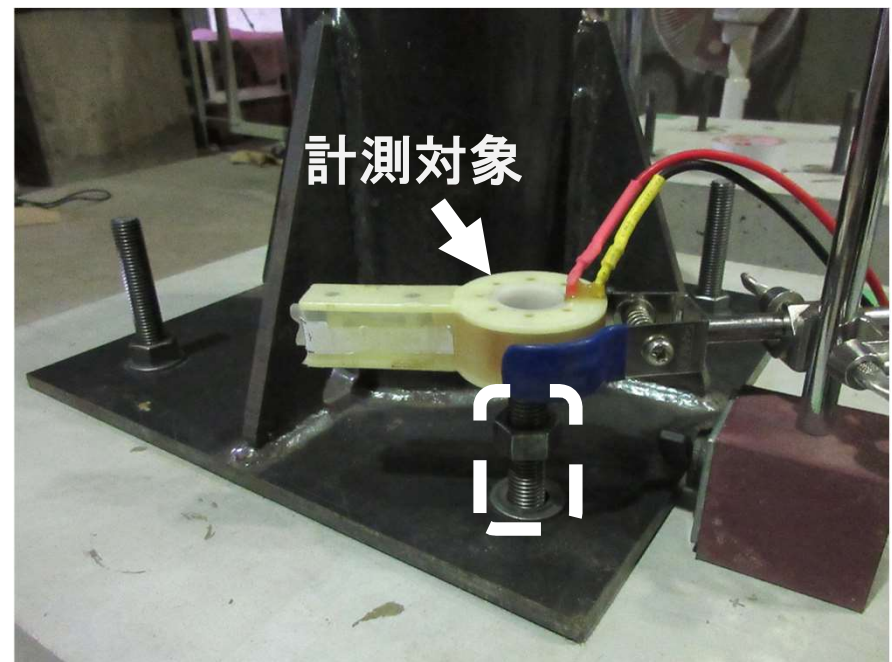


ボルトから入力された弾性波が附属物中にも伝播

そこで、ナット締結を解除してみると？

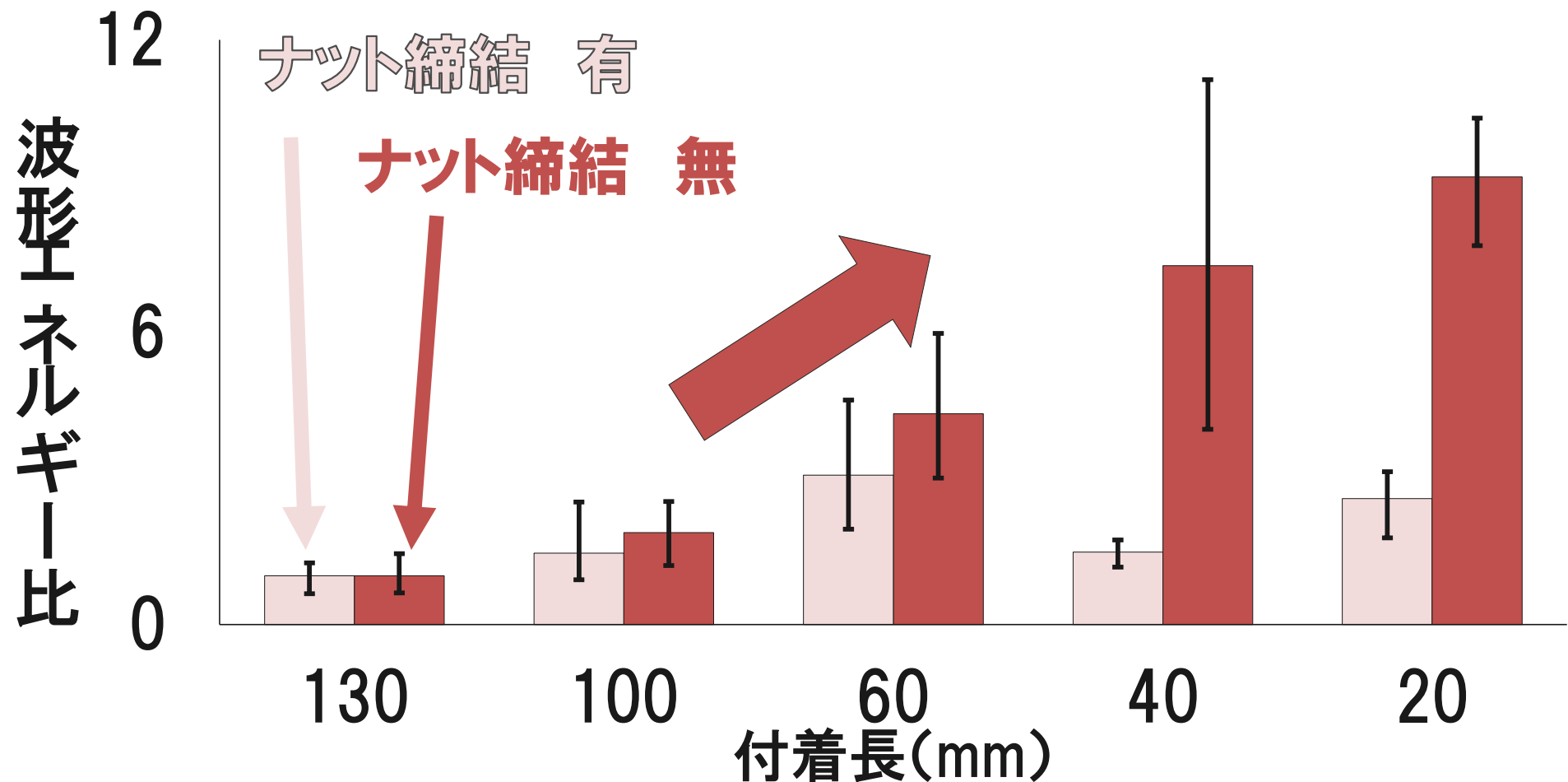


ナット締結 有



ナット締結 無

ナット締結を解除した場合の実験結果



ナット締結を解除して計測することにより、
接着剤充填不良が評価可能

あと施工アンカー評価におけるDXの価値

■ 従来

- ・打音検査(人間の感覚)

■ NDE

- ・電磁パルスで内部を叩く
- ・弾性波を取得

■ DX

- ・波形エネルギー
- ・対数減衰率

→ 引抜耐力の推定

➡ 「音」 → 「物理指標」

➡ 性能(耐力)を非破壊で推定

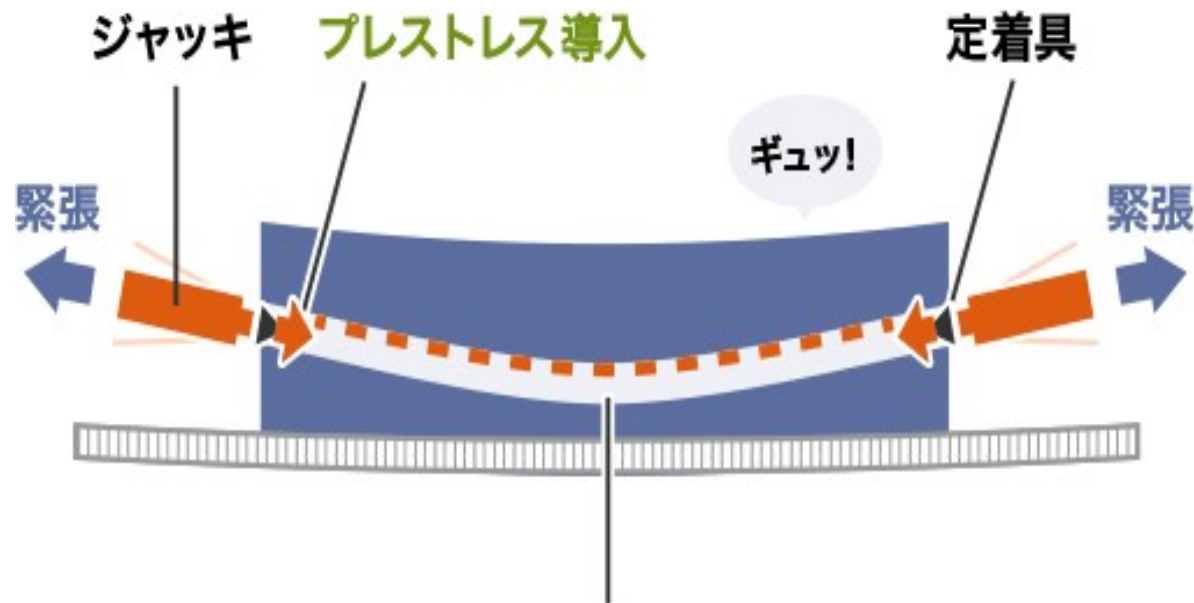
講演内容

1. 「コンクリートダムの水平打継目」を、
ダム頂部をハンマーで叩いて弾性波で診る
2. 「あと施工アンカー固着部」を、
アンカー埋込部を電磁パルスで叩いて弾性波で診る
3. 「PCグラウトの充填状況」を、
シースを電磁パルスで叩いて電磁場応答で診る

PC橋

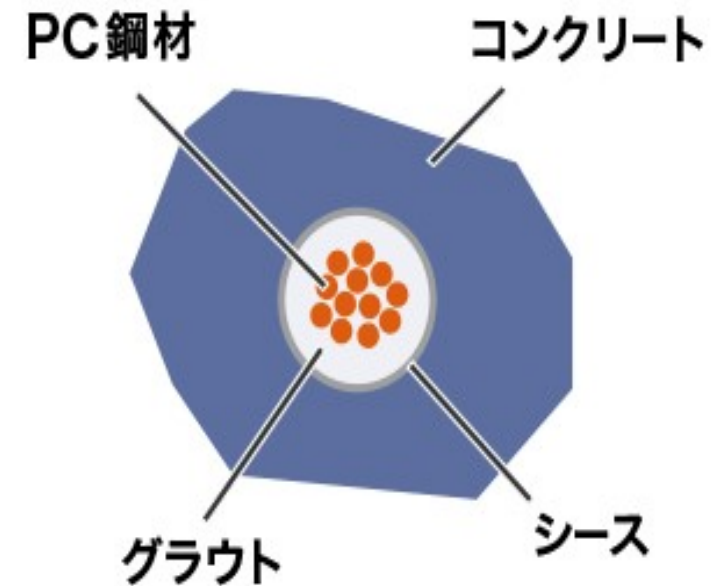
新東名高速道路 芝川高架橋
2003年 土木学会田中賞
2006年 土木学会デザイン賞

プレストレストコンクリートの原理と グラウトの役割



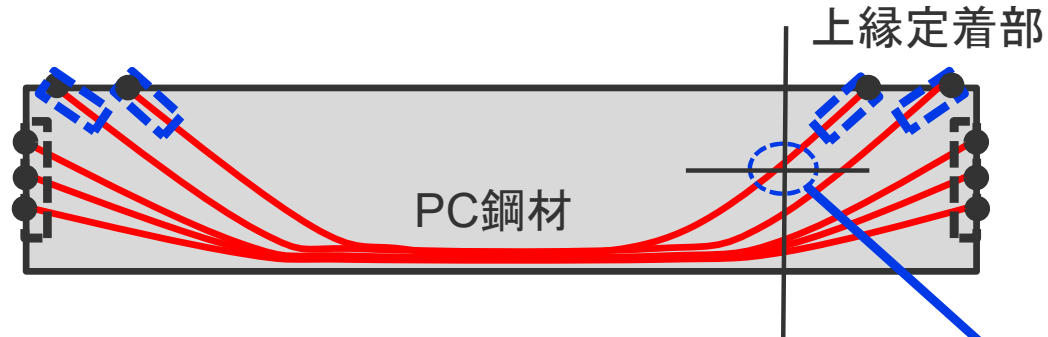
緊張後、コンクリート部材とPC鋼材を一体化するとともに
PC鋼材をサビから保護するために、「グラウト」と呼ばれる
充填剤を注入します

ポストテンション方式の場合、PC鋼材の
定着力は、定着具にて保持します

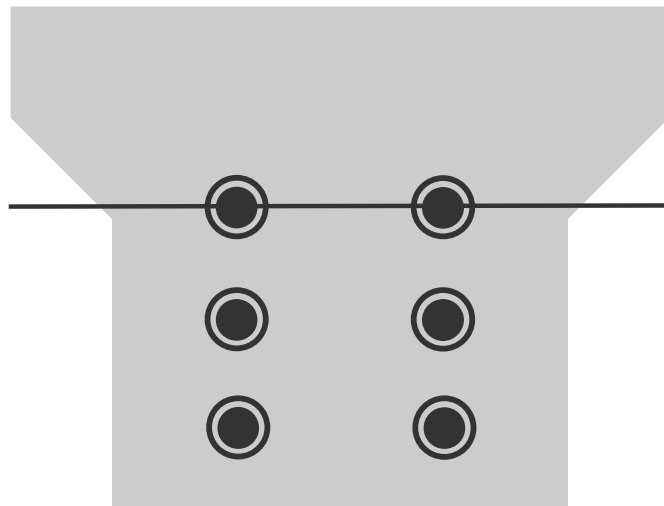




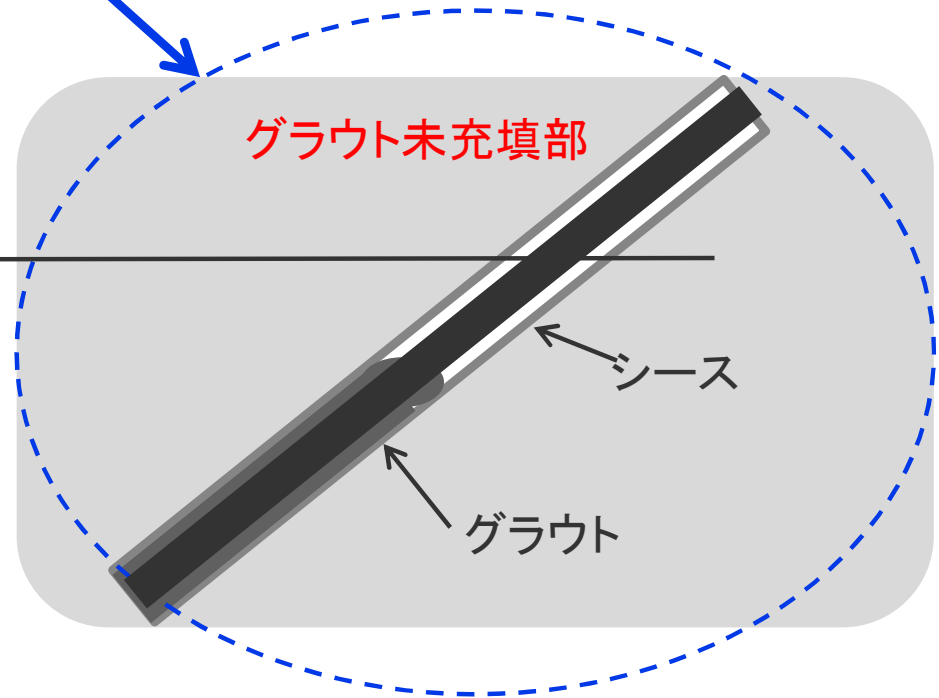
グラウト充填時の問題点



曲げ上げ部などで充填不良が発生しやすい



断面図(直交)



PCグラウト充填不足による変状事例



横締めPC鋼棒の破断



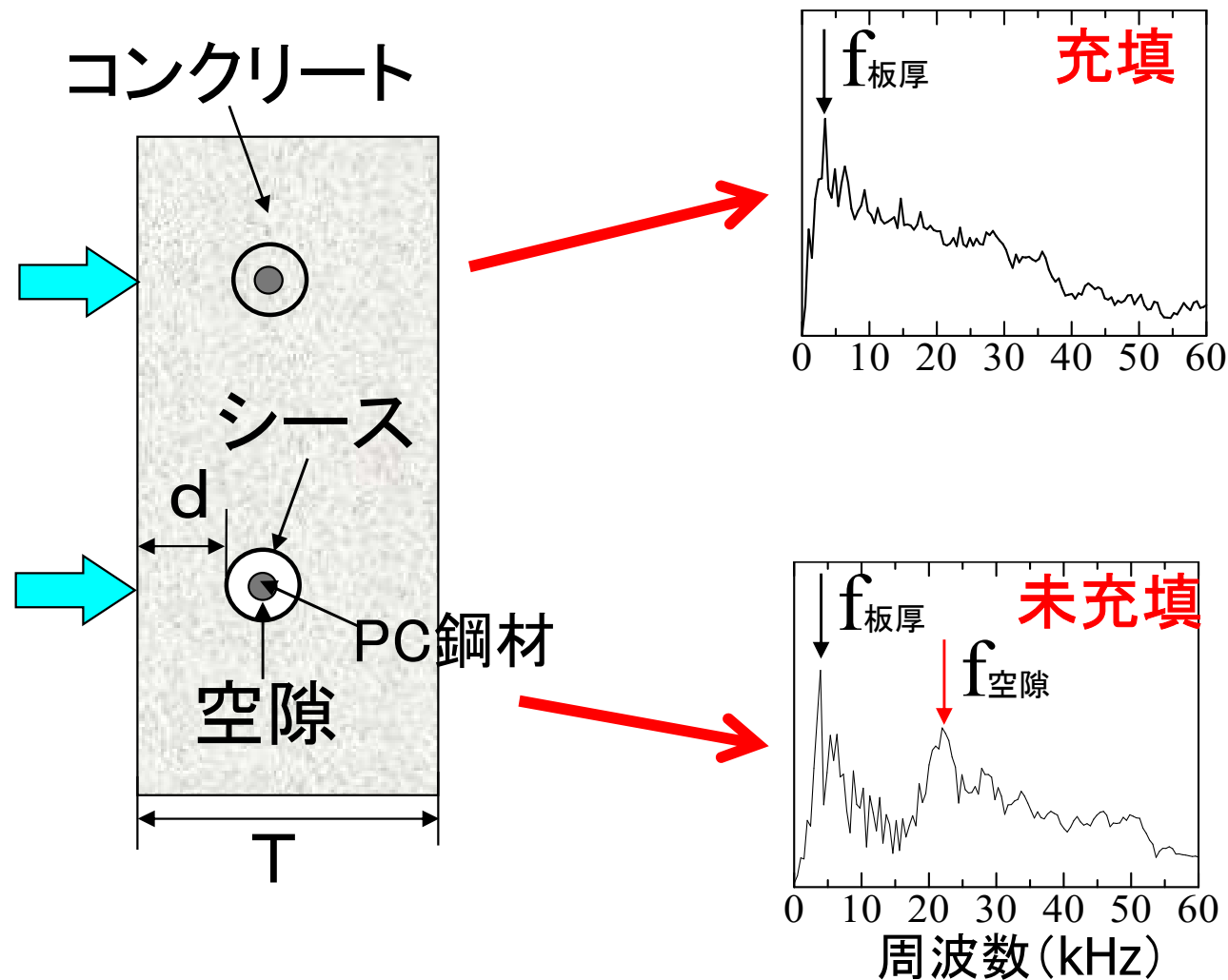
鉛直締めPC鋼棒の破断

グラウト未充填箇所を非破壊で適確に検出したい



シースに沿ったひび割れ, エフロレッセンス

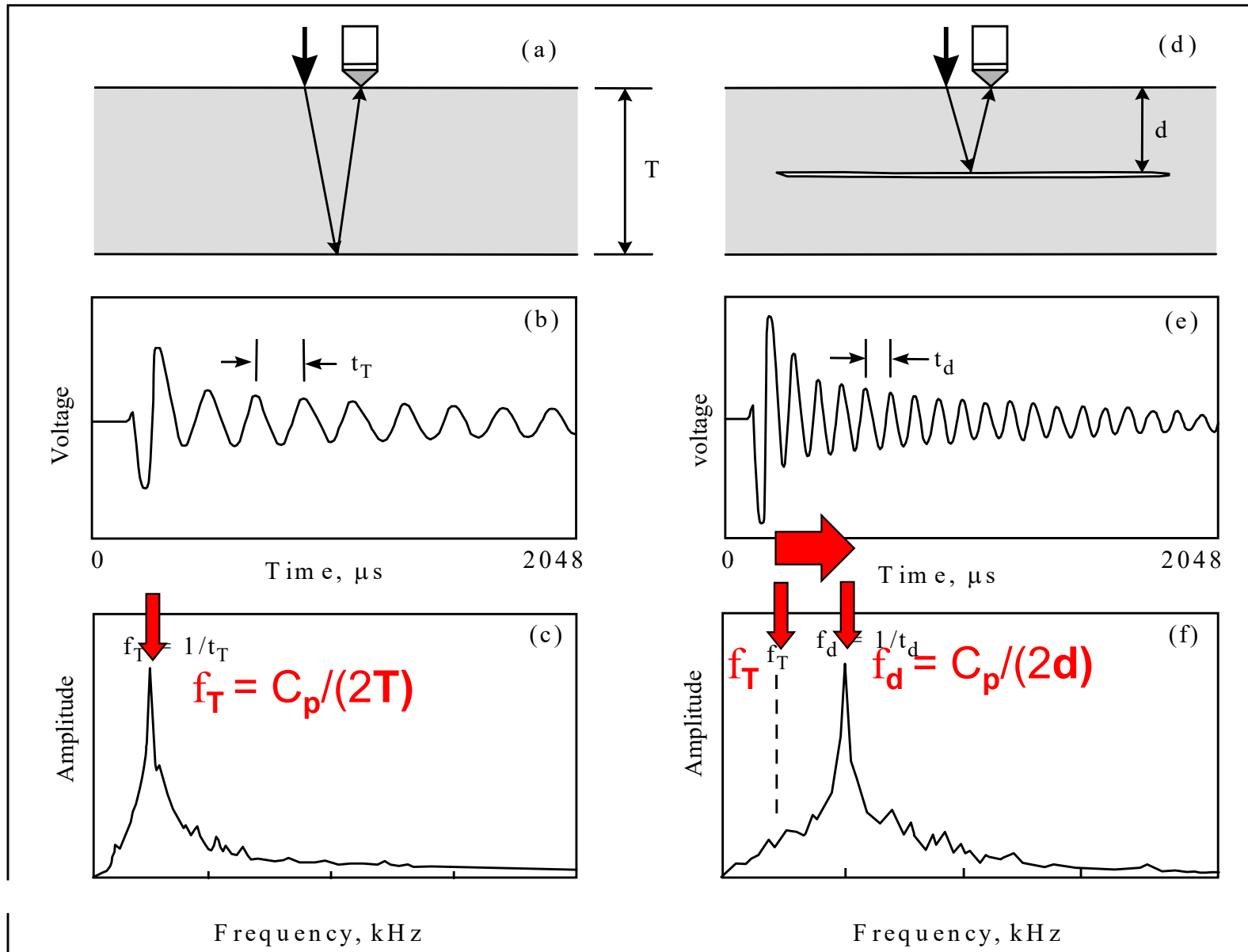
PCグラウト充填状況の非破壊評価方法として、**評価原理が明解な手法の一つにインパクトエコー法**がある。これは、**コンクリートを直接叩いて弾性波で診る**方法であり、適用実績も豊富である。



➡ ただし、シース径が小さくかぶりが多い場合、あるいは、コンクリートにひび割れがある場合など、評価が難しくなる場合もある。

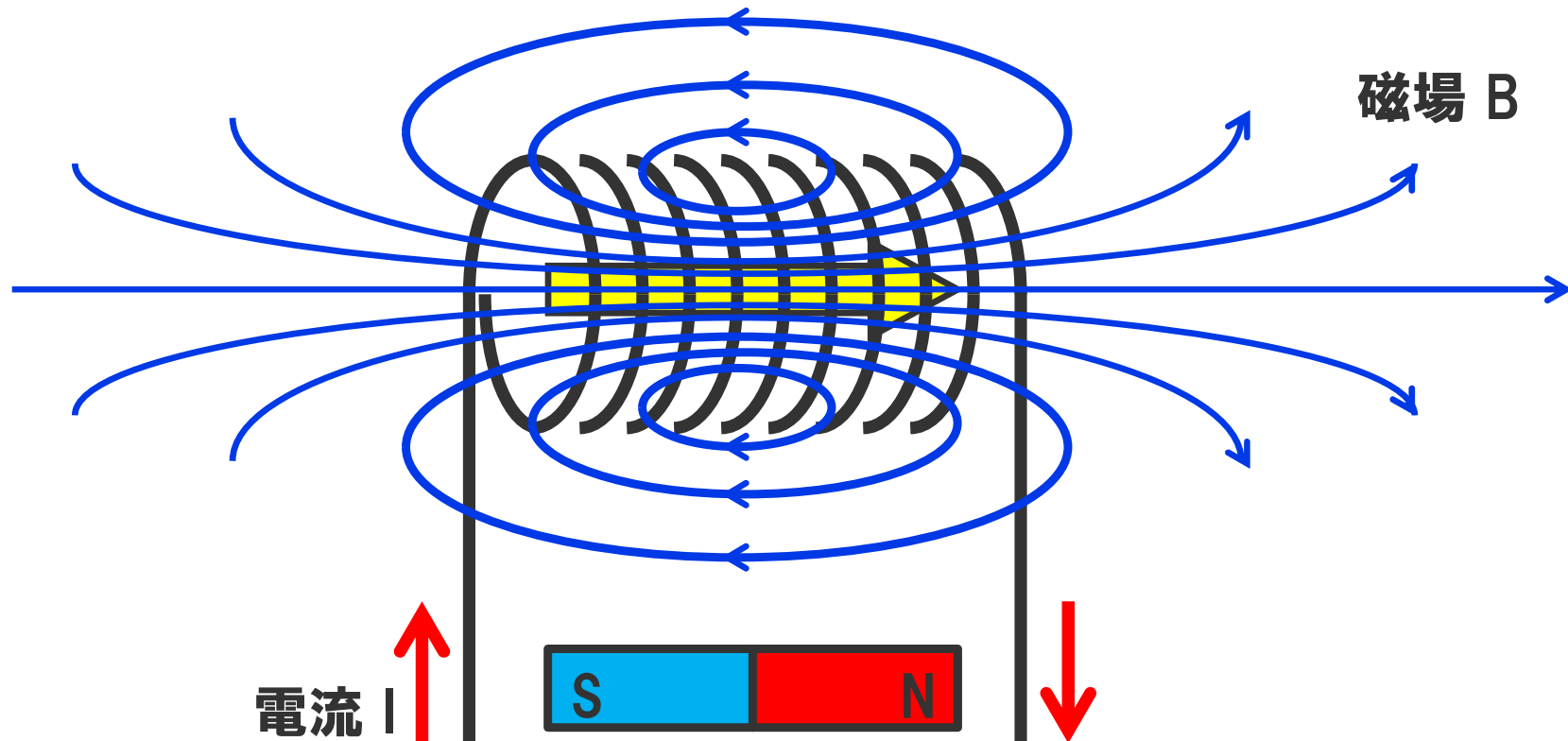
インパクトエコー法の欠陥検出原理

(版厚: T , 欠陥深さ: d , 縦波伝播速度: C_p)



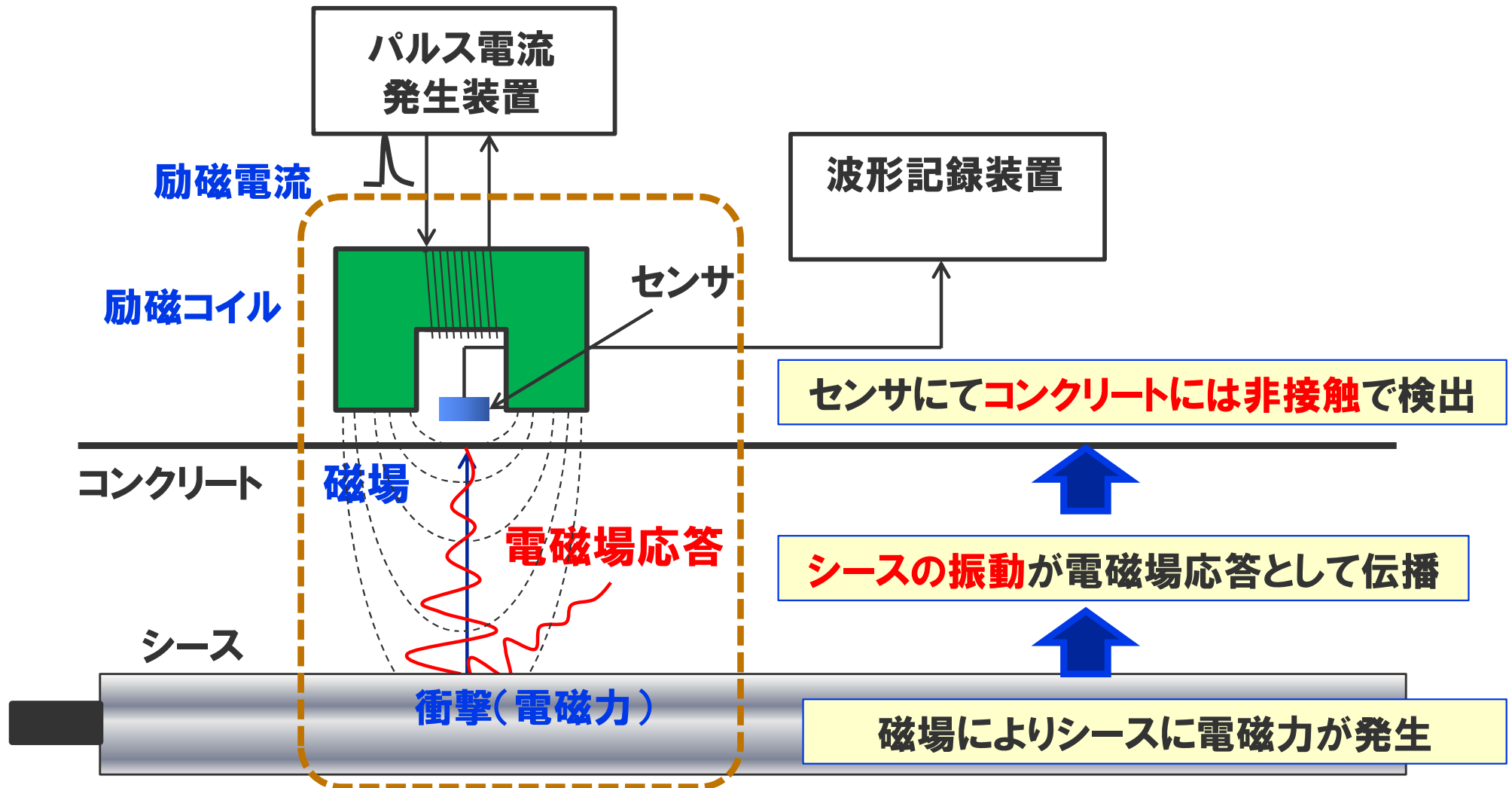


電磁パルスで鋼製シースを非接触で叩いて電磁場応答で診れば、かぶりコンクリートの影響を受けずに済むのでは？



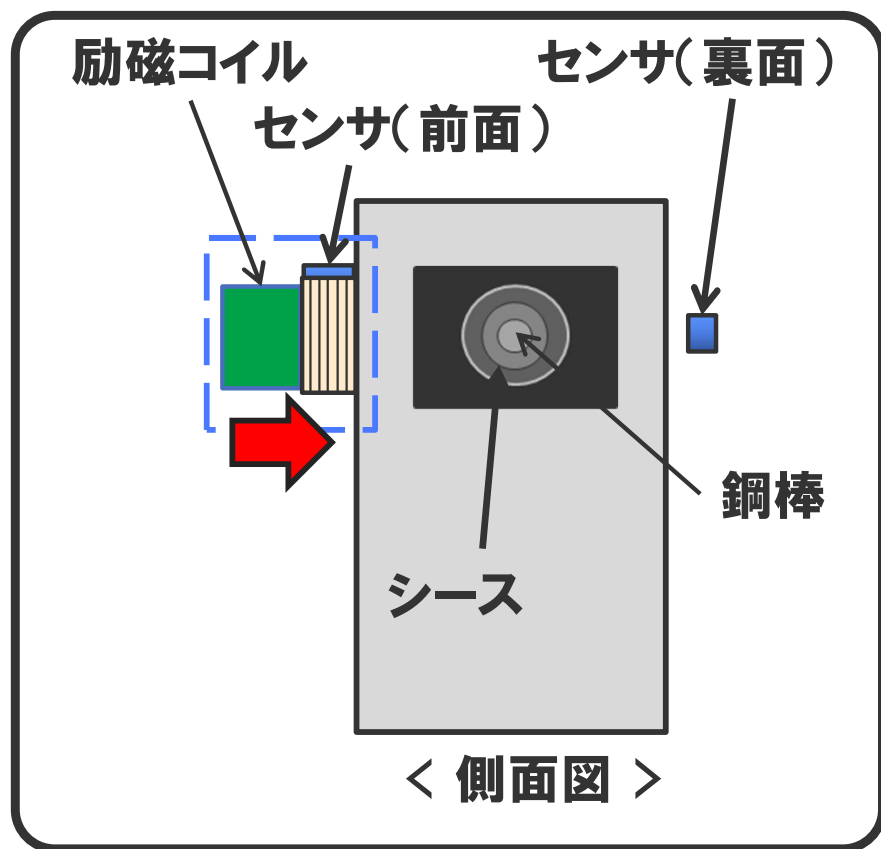


電磁場応答に着目する方法

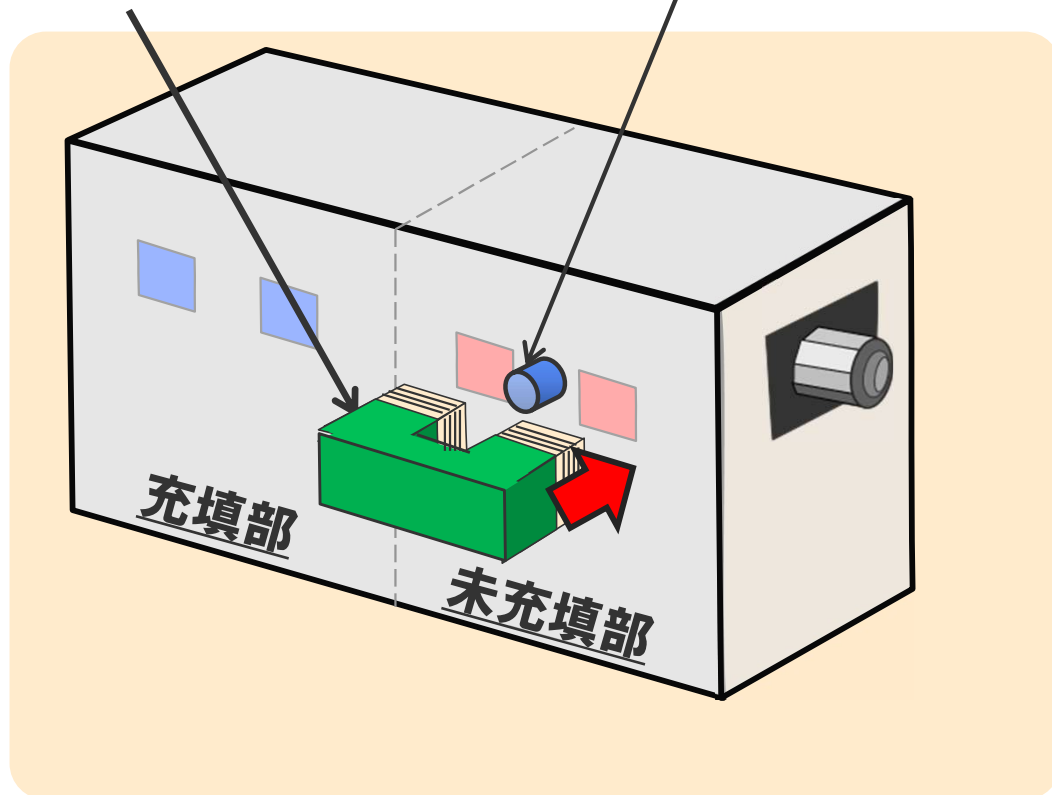




供試体での基礎実験



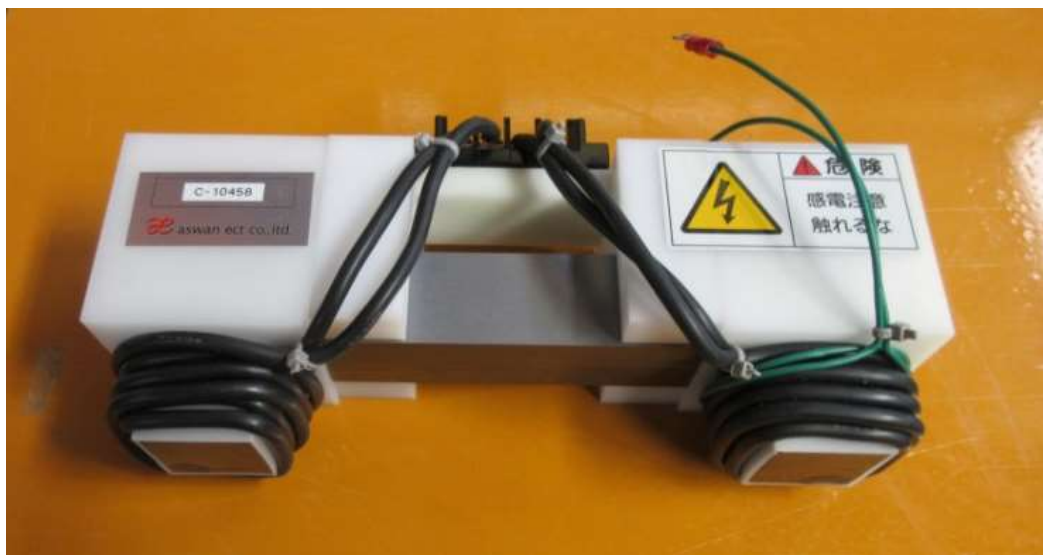
励磁コイル
電磁場検出センサ





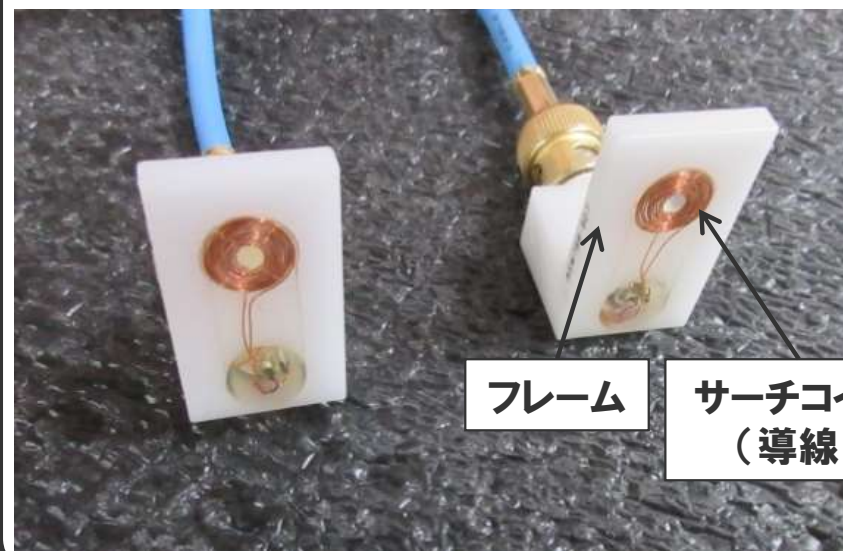
励磁コイル

諸元	
コイル断面積 (mm ²)	30×30
コイル幅 (mm)	200
重量 (kg)	2.6



電磁場検出センサ

諸元	
コイル外径 (mm)	10
コイル内径 (mm)	3
コイル巻数 (T)	10



フレーム

サーチコイル
(導線)



計測概要



LDV

データ記録装置

励磁コイル

鋼棒

供試体

電磁場検出センサ(前面)



コンクリート前面

コンクリート裏面



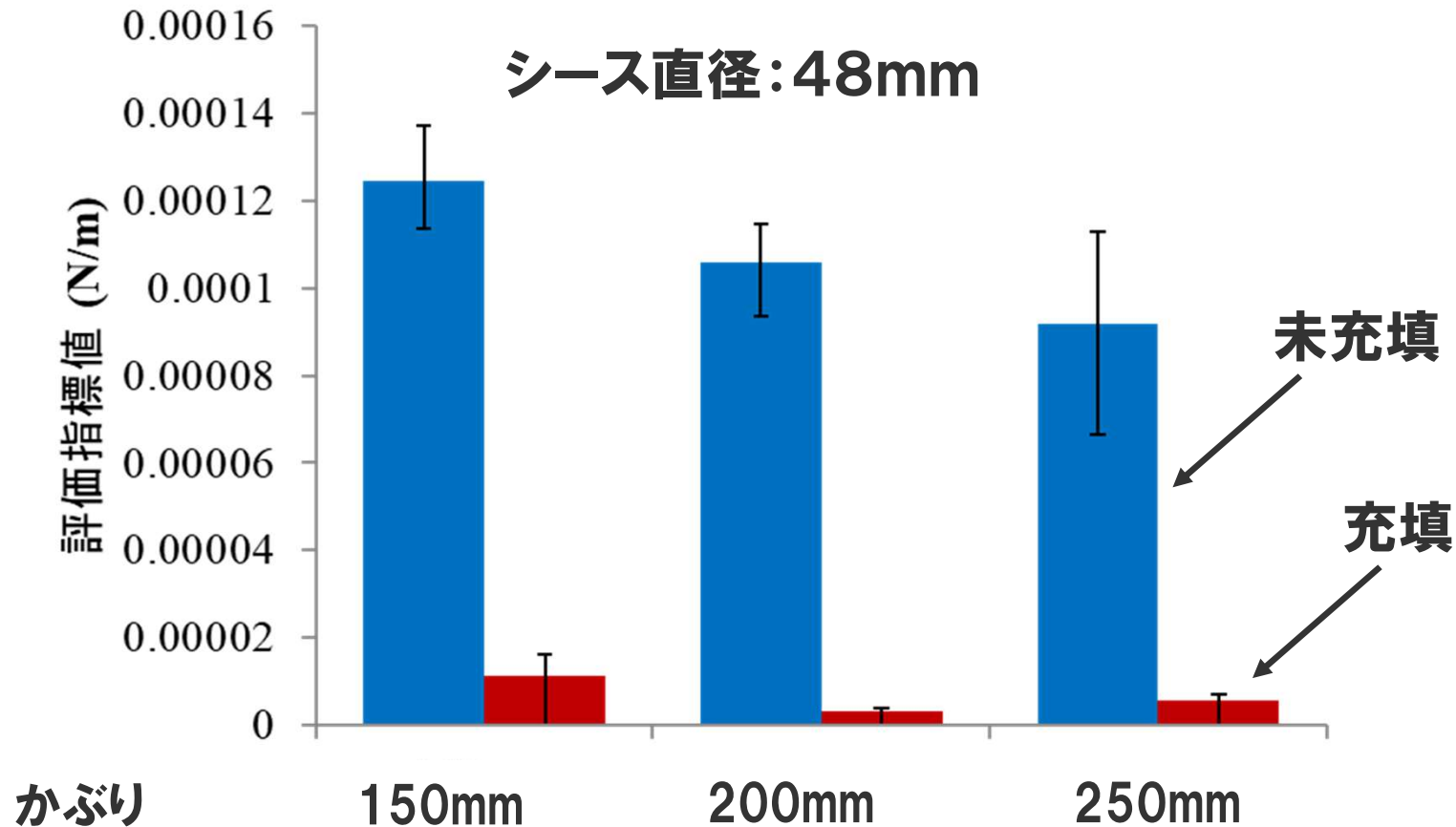
電磁場検出センサ
(裏面)

コンクリート裏面



電磁場応答による未充填の検出性能

評価指標： Δ (誘導電流値×磁束密度)のピーク値



インパクトエコー法 ($c < 4d$) では、検出がやや難しい、
かぶりの大きな領域においても、充填と未充填に有意な差が確認



電磁場応答の実橋でのトライアル

□ 対象橋梁

- 構造型式: PC2径間連続箱桁橋
- 橋長: 68.0m
- 支間長: 35.56m + 35.56m
- 幅員: 10.7m



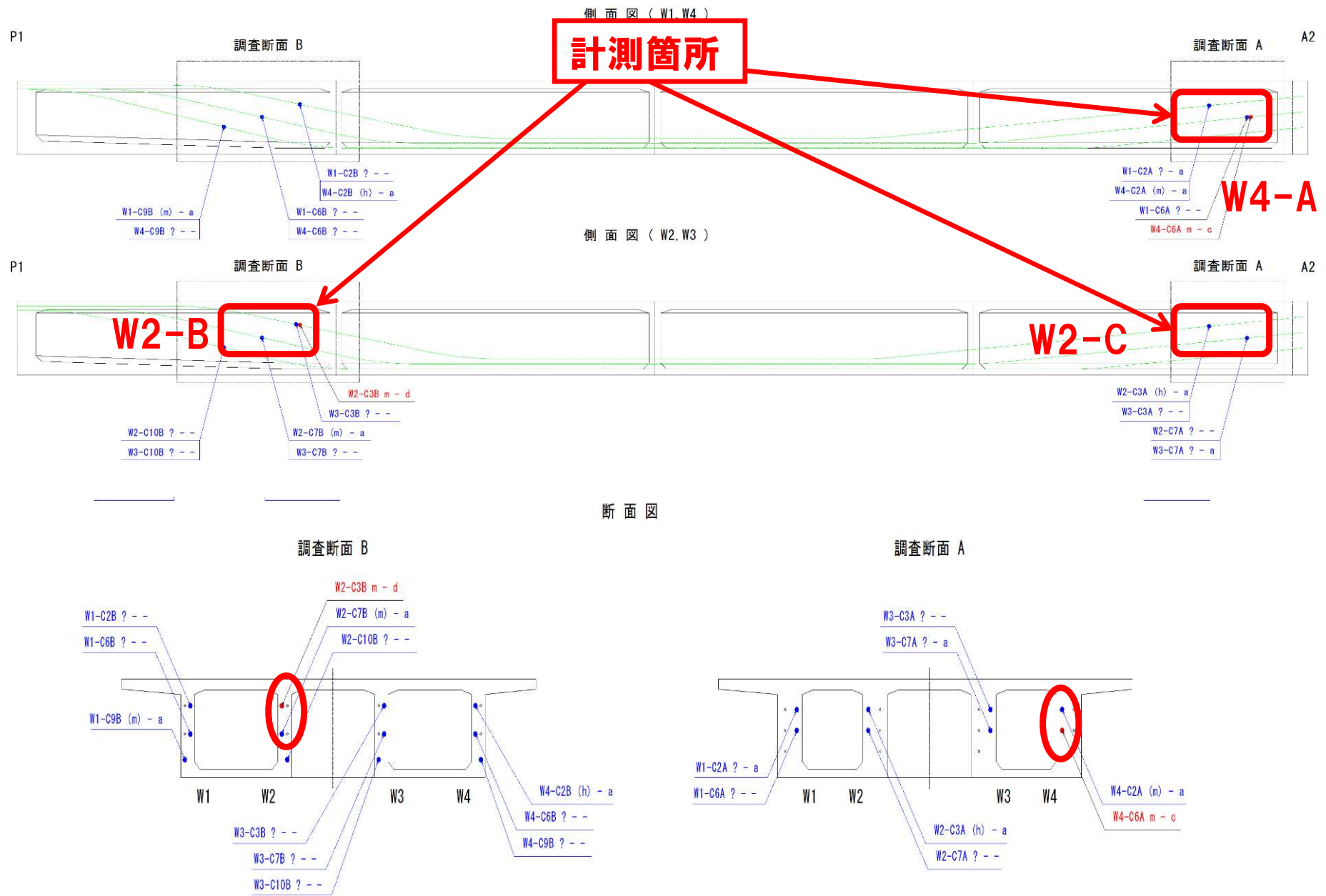
□ 計測条件

- 励磁コイル
- 電磁場応答センサ
- AEセンサ(弾性波受信との
比較のため)



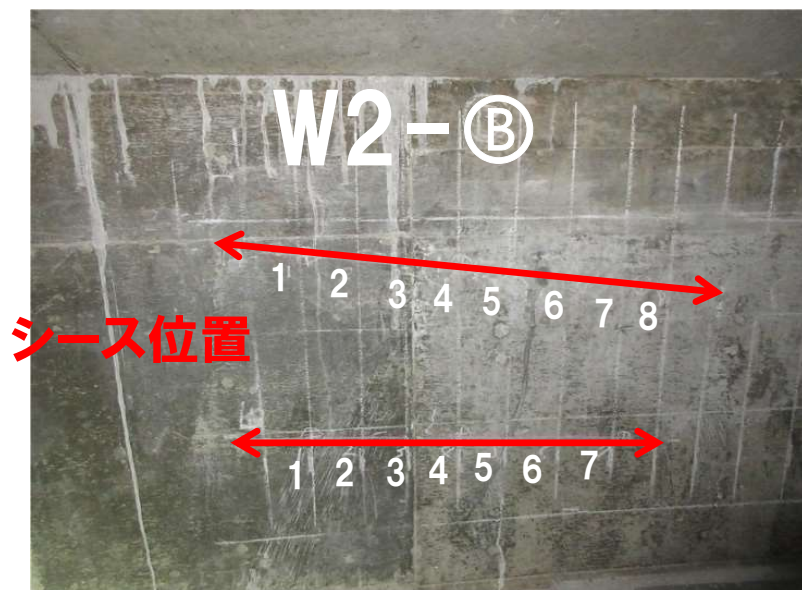


計測箇所

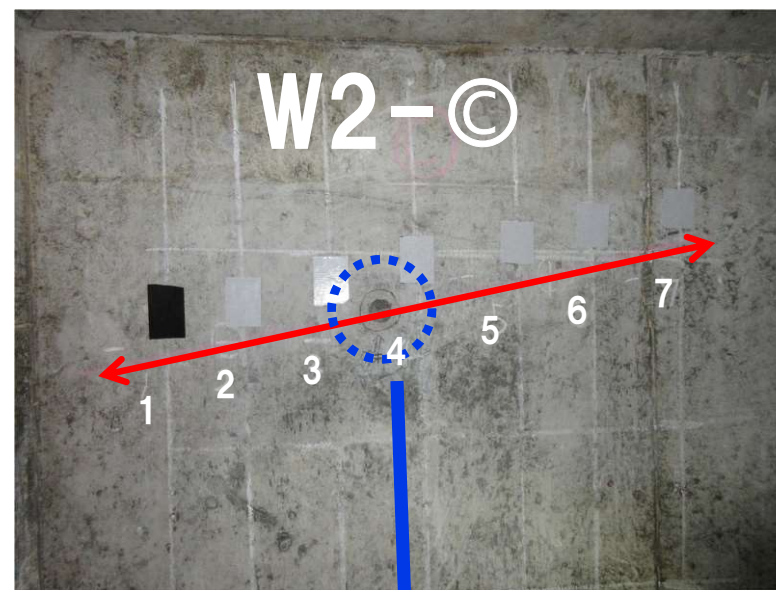




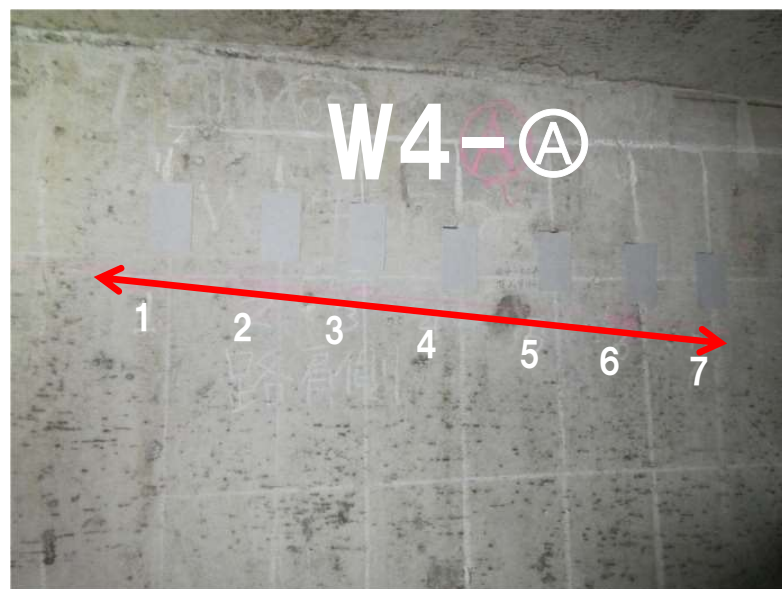
計測部位の状況



W2-B周辺(「**充填**」)



W2-C周辺(「**充填不良**」)



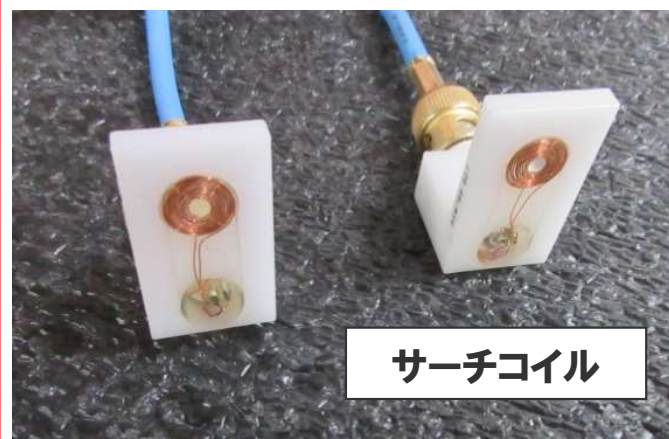
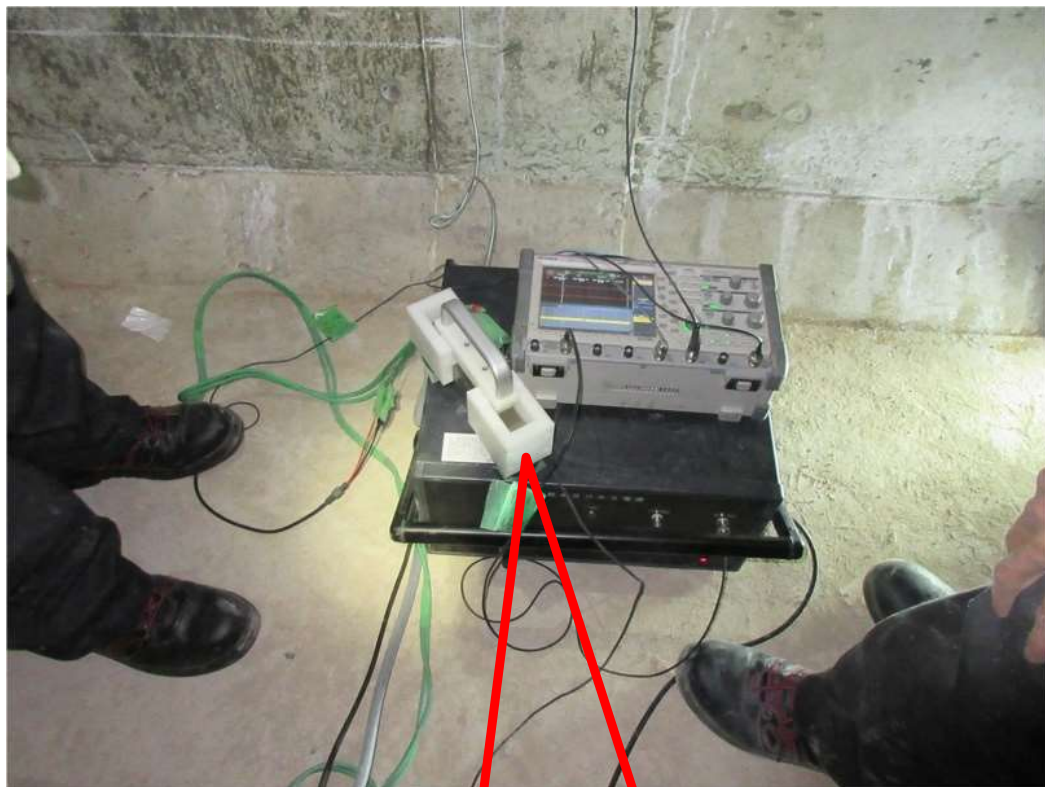
W4-A周辺(「**充填不良の可能性あり**」)



コア抜き「**充填不良**」



計測機材



サーチコイル



励磁コイル

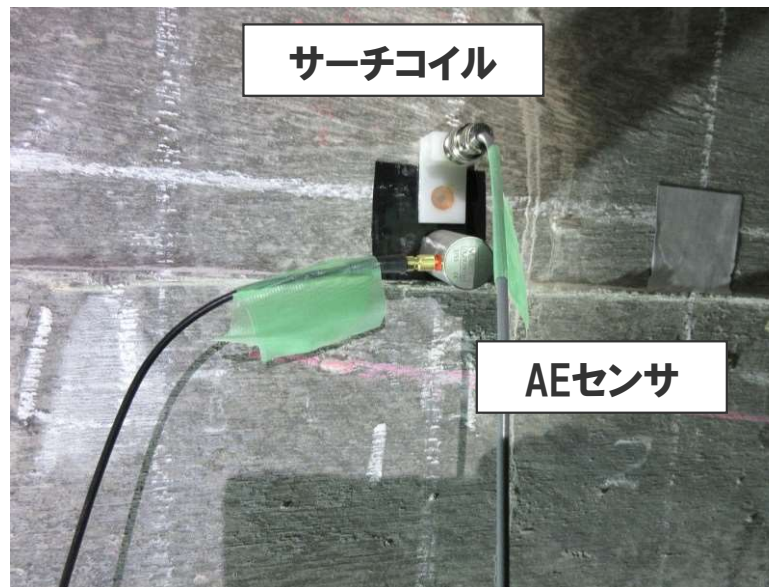
現場での適用を前提に小型化



計測概要



励磁コイル

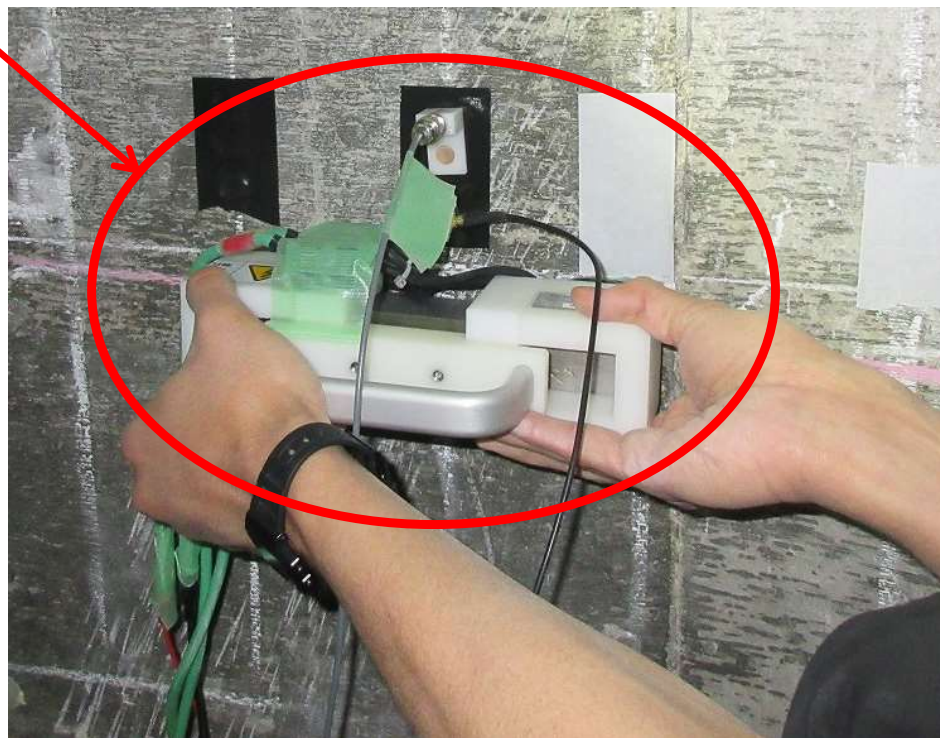


サーチコイル

AEセンサ



データ記録装置

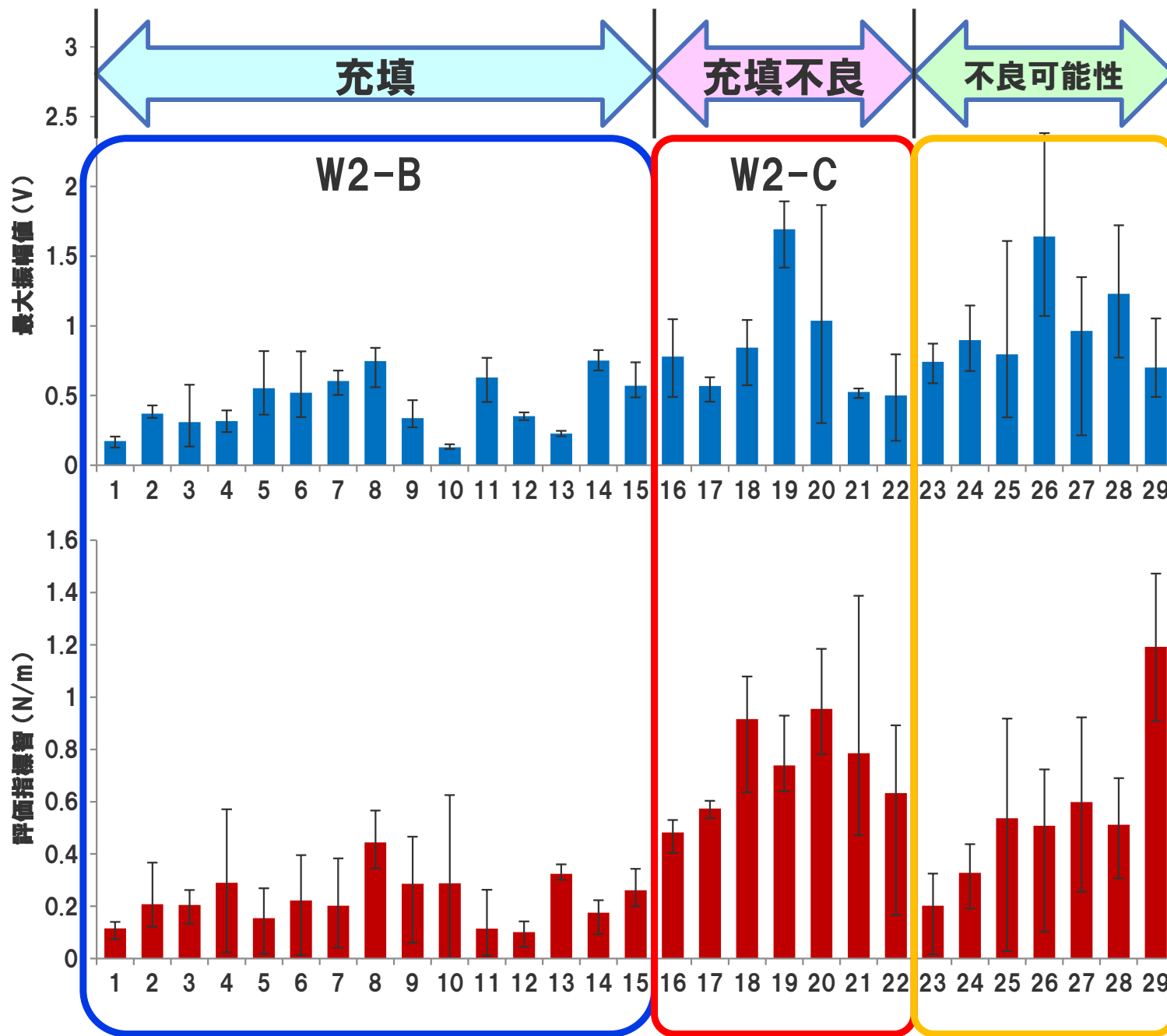




弾性波 (接触型) と電磁場応答 (完全非接触)

弾性波
(接触型)

電磁場応答
(完全非接触)



DX × NDEがもたらす変革

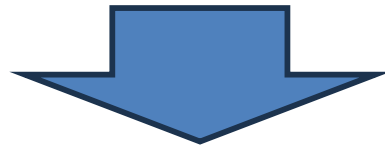
■ 共通要素

- ・叩く(刺激)
- ・測る(センシング)
- ・解析する(データ)

■ DXの本質

- ・感覚 → 計測
- ・経験 → 指標化
- ・点検 → 意思決定支援

「叩けばわかる」という経験知を、データとして扱えるようにすること、それがDXにおけるNDEの本質



インフラ維持管理の高度化へ

ご清聴ありがとうございました！

大阪大学

吹田キャンパス

千里門

Osaka University

Senri Gate of Suita Campus