

コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム 2023

# コンクリートの非破壊検査技術最前線



～コンクリート中の**鋼材への電磁的作用**  
にともなう物理現象に基づく手法を中心として～

大阪大学 鎌田敏郎



# 講演内容

①PCグラウトの充填状況

②PC鋼材の破断状況

③あと施工アンカーの固着状況

を対象とした、それぞれの非破壊検査手法の原理および

実際の構造物への適用上のハードルと課題解決の方策

④コンクリート内部の鋼材の腐食状況の可視化のための  
の手法

⇒ 上記①～④については、2022年度に私の研究室で得られた

最新の研究成果を一部ご紹介します！



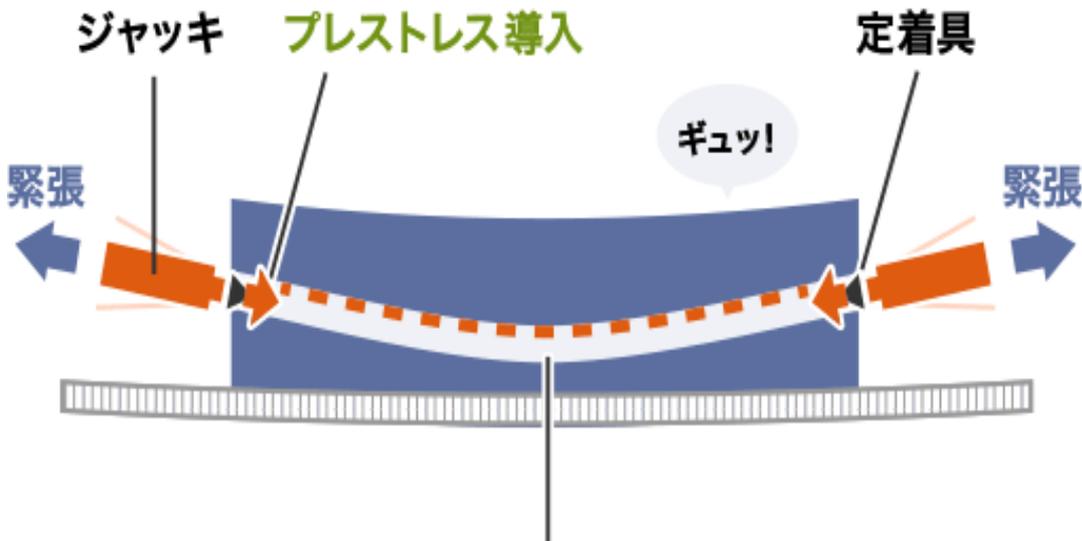
# ①PCグラウトの充填状況

# PC橋



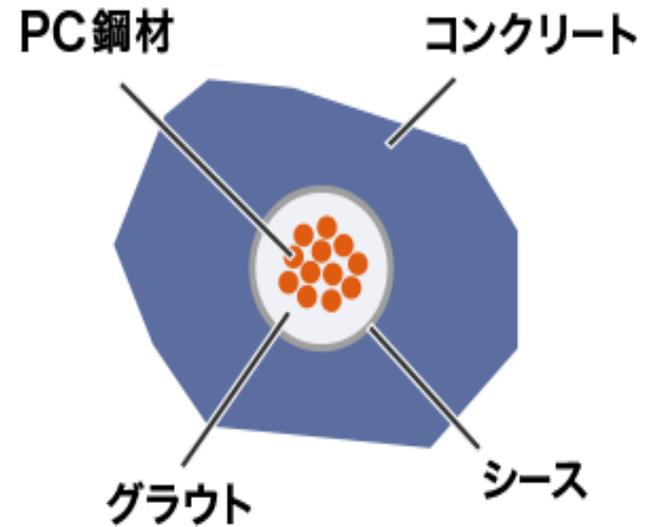
新東名高速道路 芝川高架橋  
2003年 土木学会田中賞  
2006年 土木学会デザイン賞

# 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

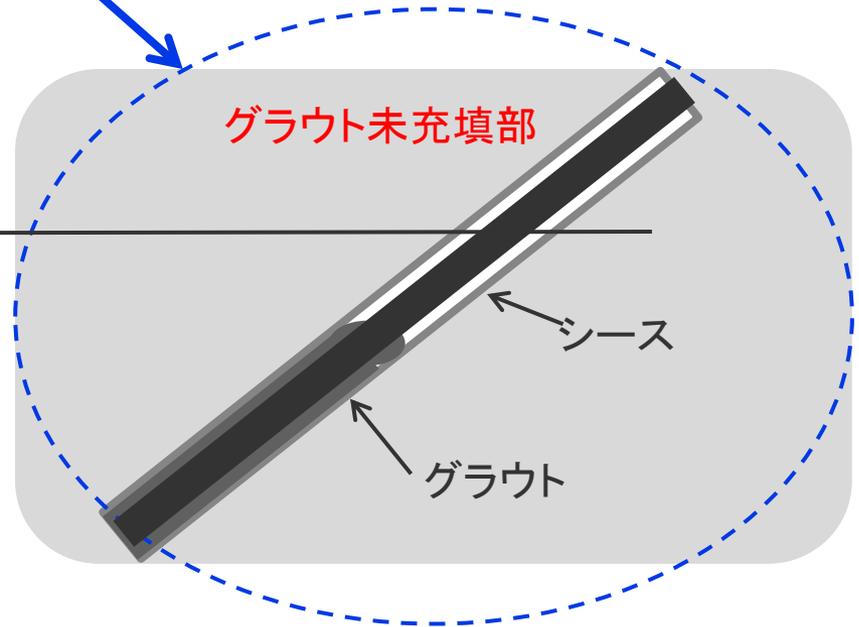
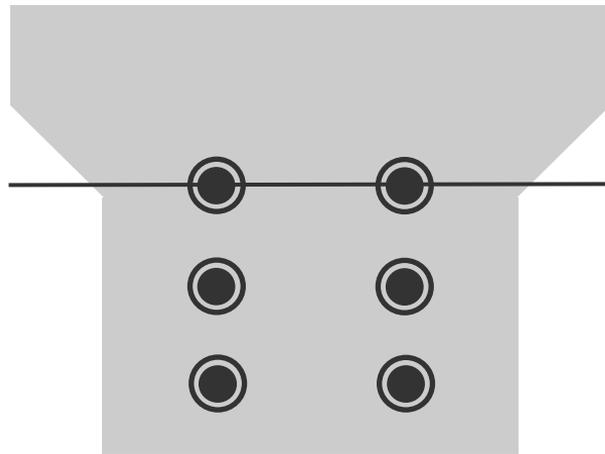
ポストテンション方式の場合、PC鋼材の  
定着力は、定着具にて保持します



# 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



# 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



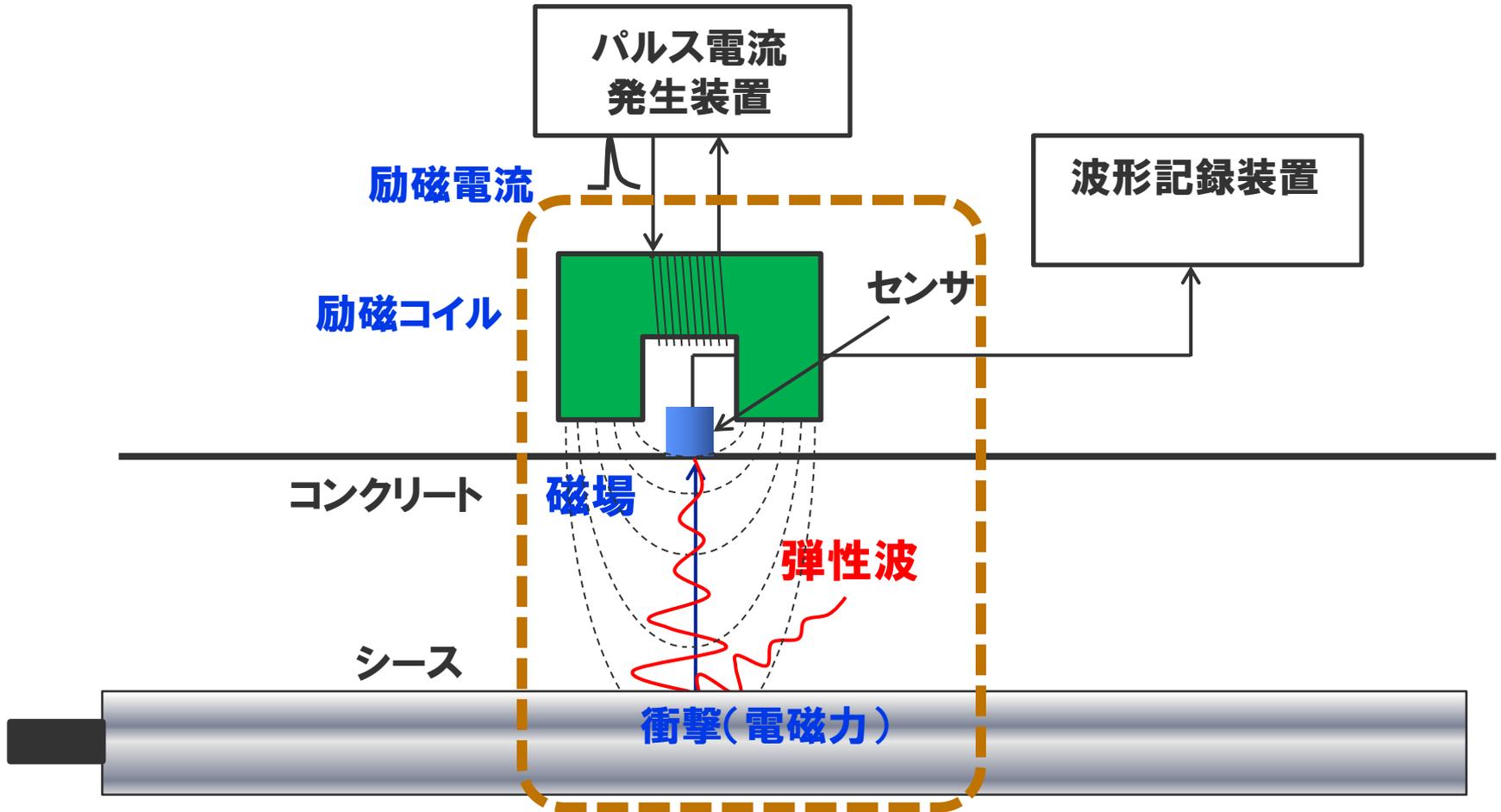
鉛直締めPC鋼棒の破断

**グラウト未充填箇所を非破壊で的確に検出したい**



シースに沿ったひび割れ，エフロレッセンス

# 電磁パルス法の原理



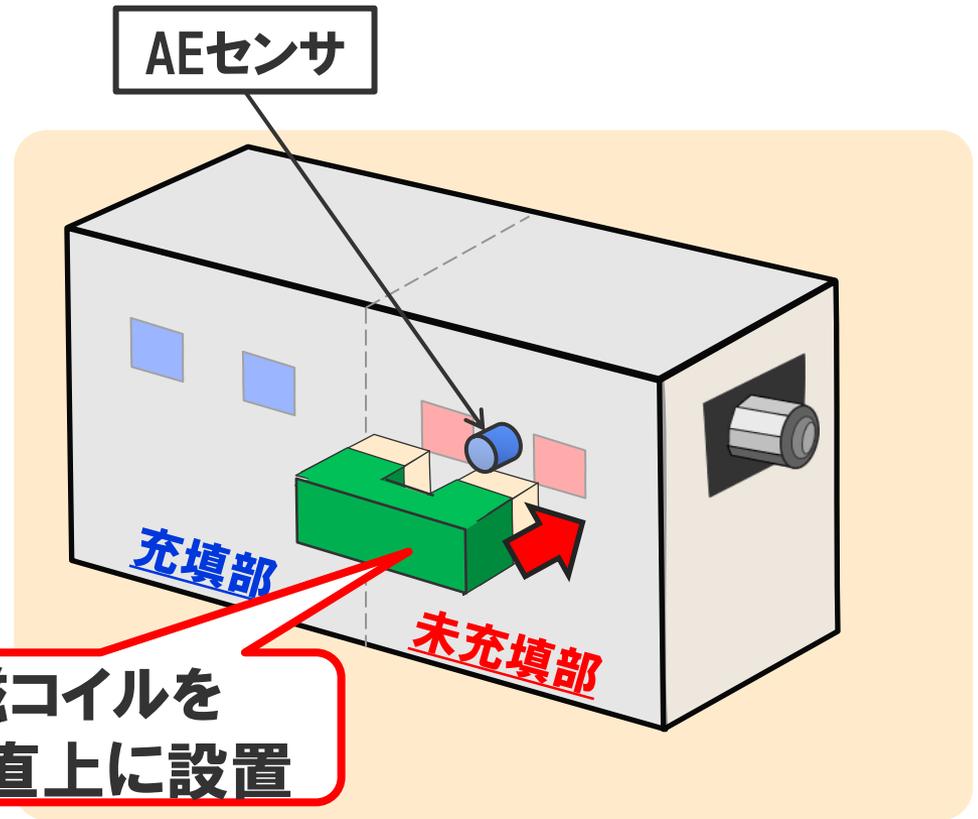
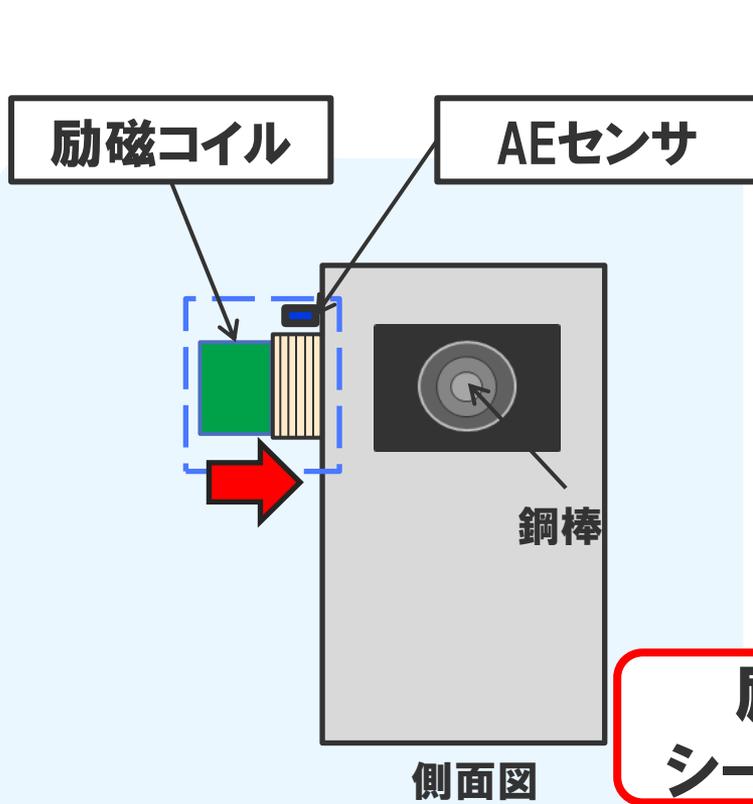
未充填部では充填部より  
グラウトによる拘束が小さい



未充填部では充填部より  
振動が大きい

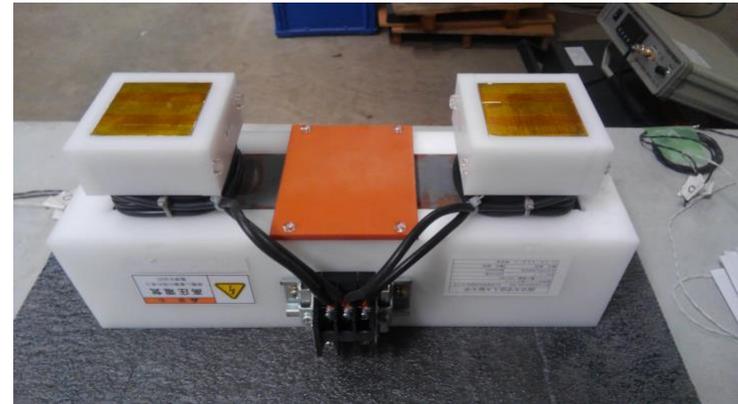
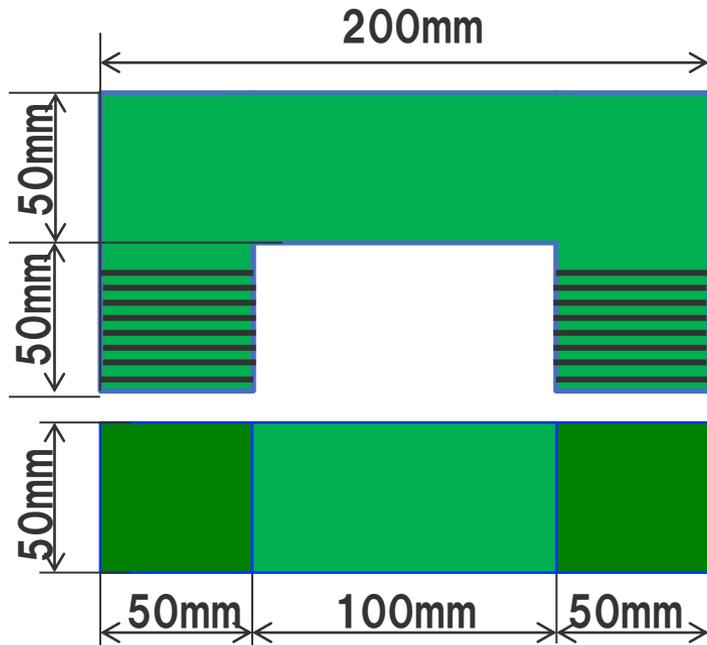


# 基礎実験の状況



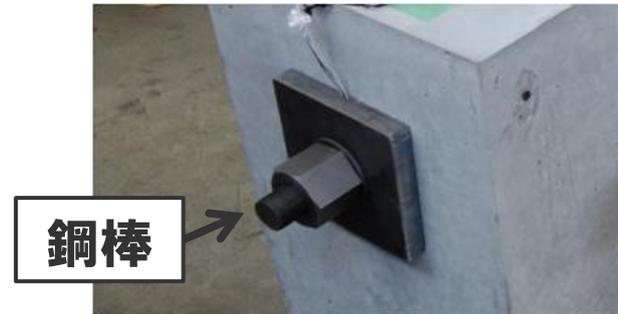
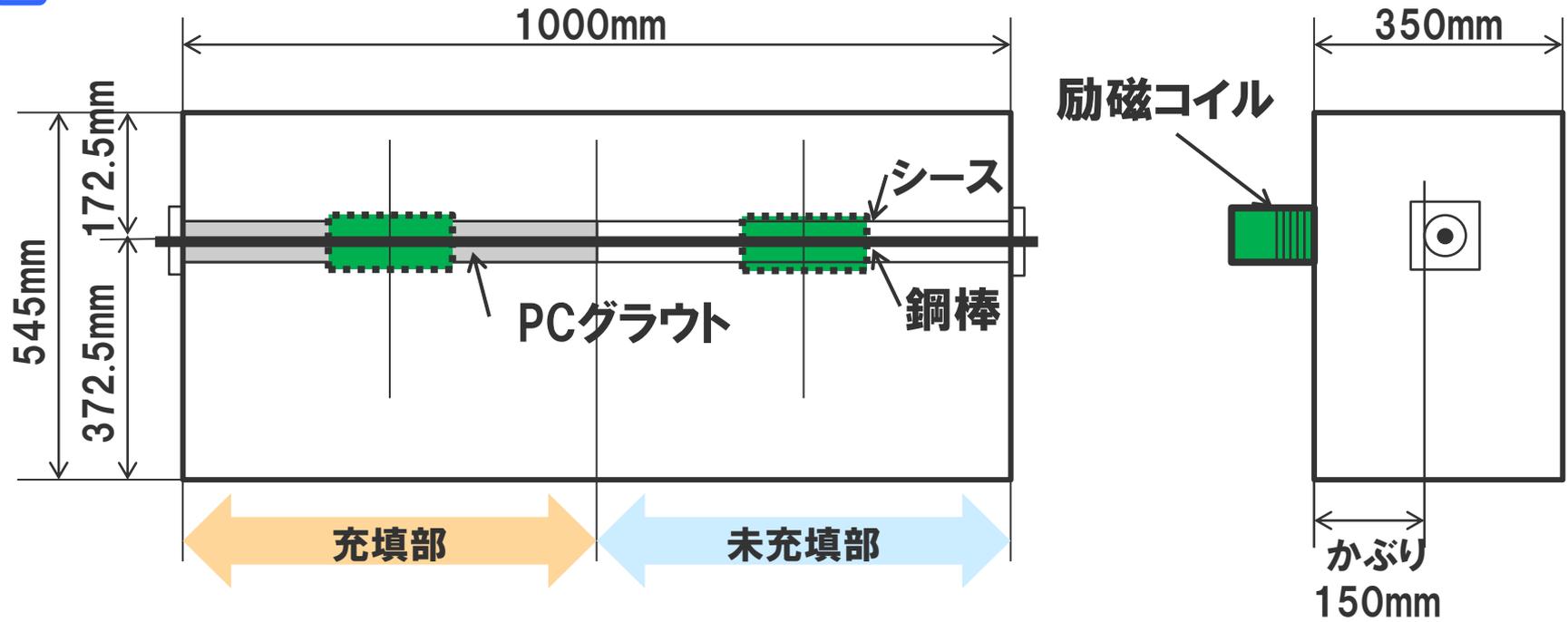
# 励磁コイル、AEセンサ

## 励磁コイル



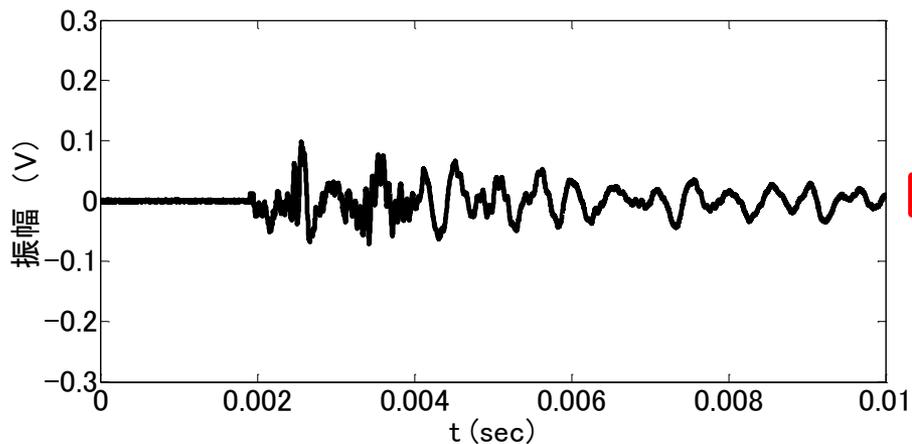
AEセンサ

# 完全充填 (100%) と完全未充填 (0%) の比較

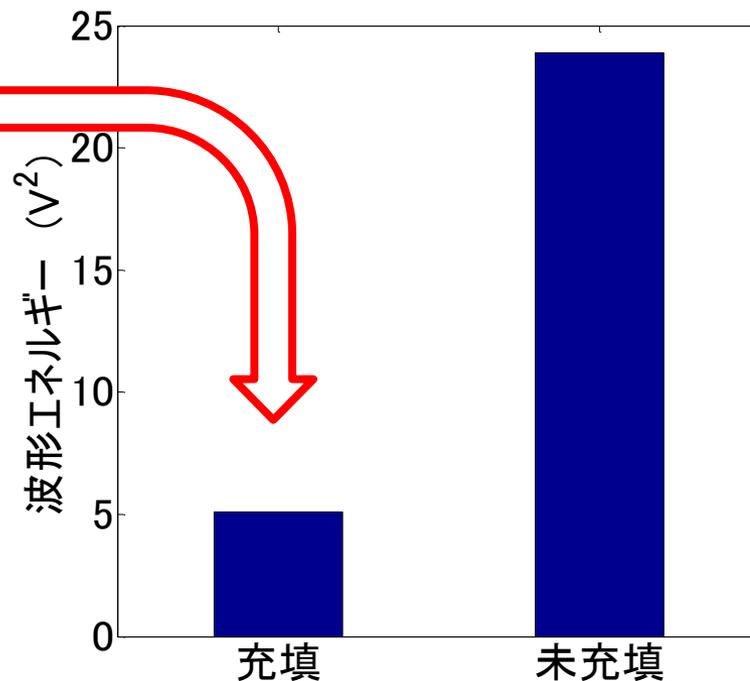
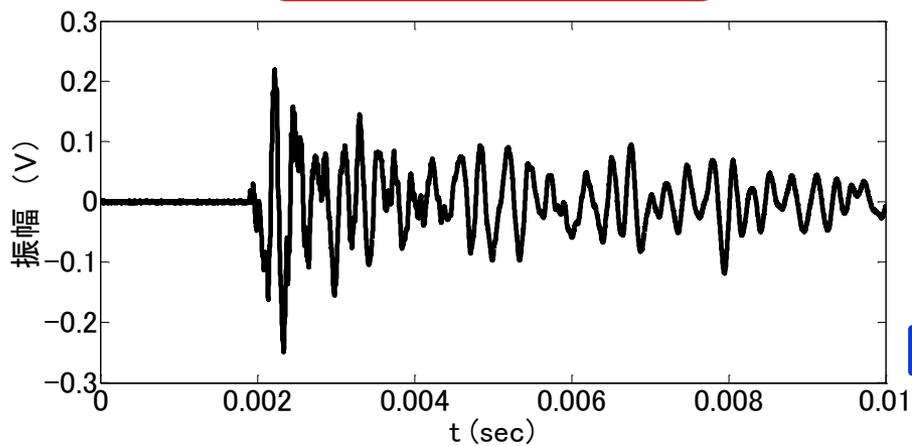


# 波形エネルギーで比べると？

## グラウト充填



## グラウト未充填



# グラウトが**部分充填**の場合は？

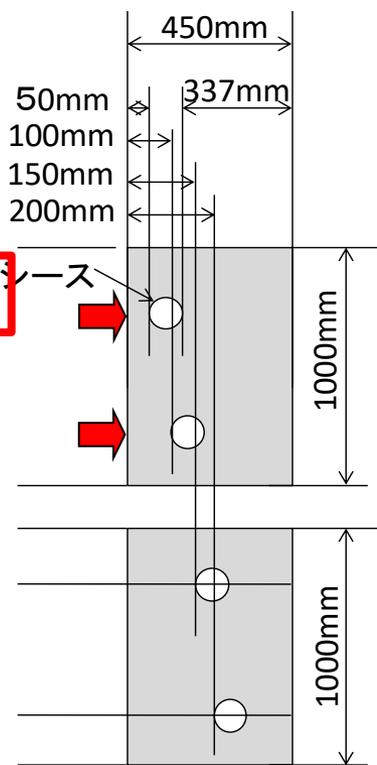
グラウト充填率

100, 75, 50, 25, 0 %

2000mm				
400mm	400mm	400mm	400mm	400mm
100%	75%	50%	25%	0%
100%	75%	50%	25%	0%
100%	75%	50%	25%	0%
100%	75%	50%	25%	0%

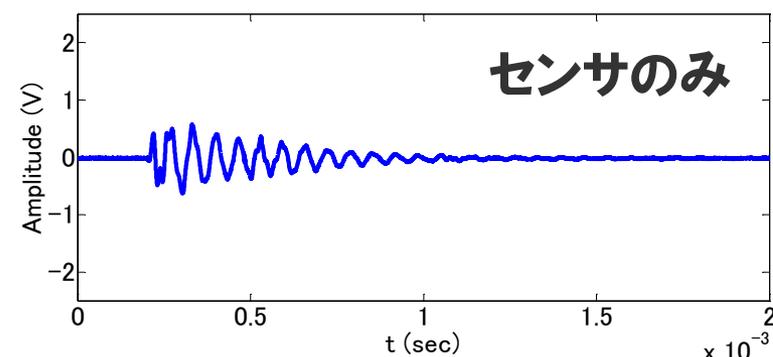
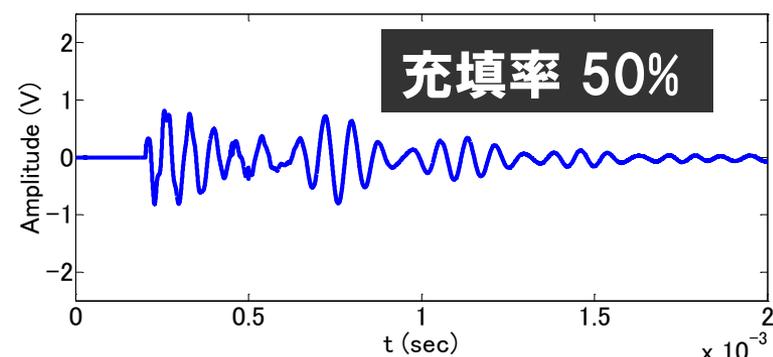
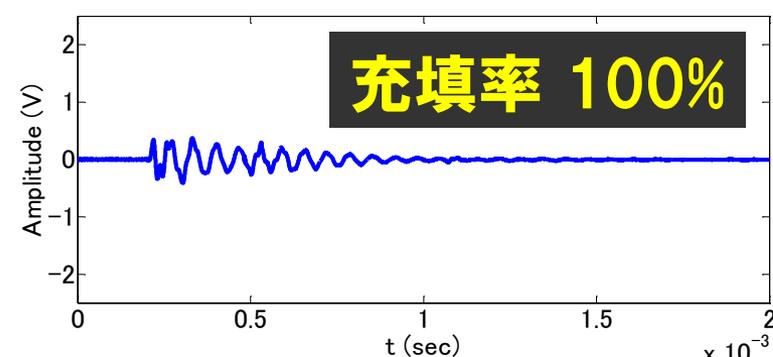
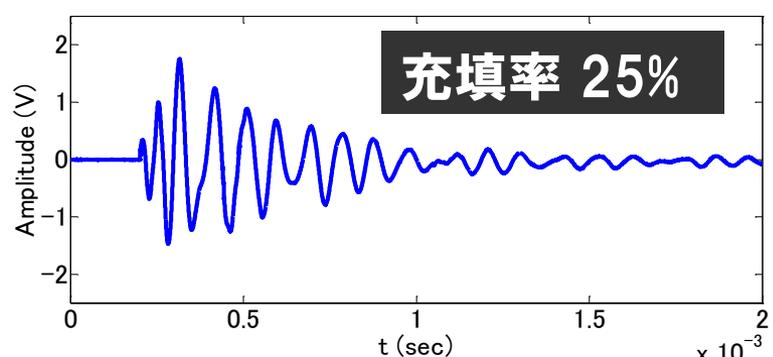
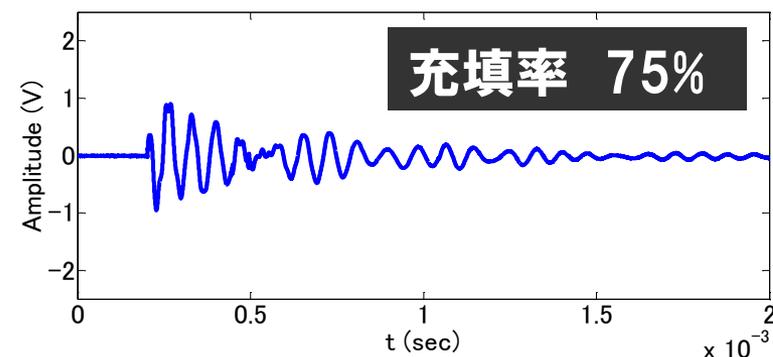
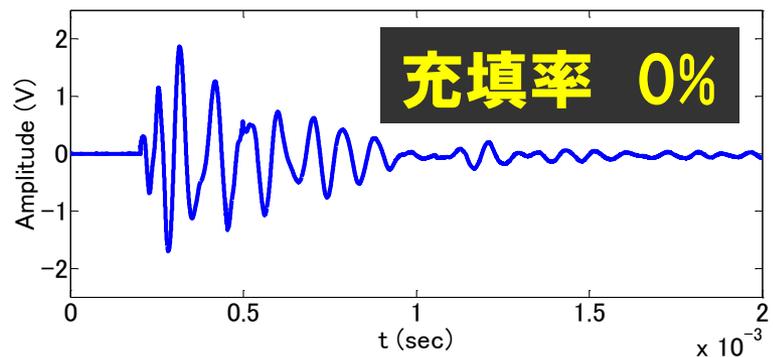
図中の%表示は充填率を表す。

計測面

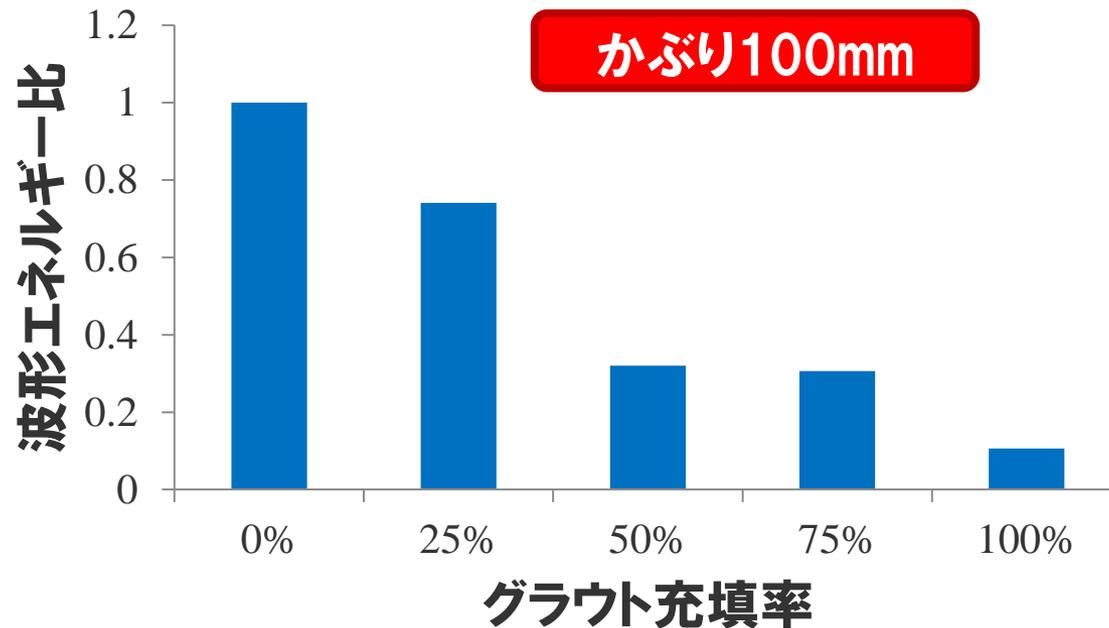


**こうした供試体の作製には、細かなノウハウが不可欠です！**

# グラウト充填率による波形の違い



# 波形エネルギー比で整理すると



供試体では良い結果が得られるが？

# 実構造物における計測での課題

シース

桁側面図

桁断面図

AEセンサ

鉄筋

シース

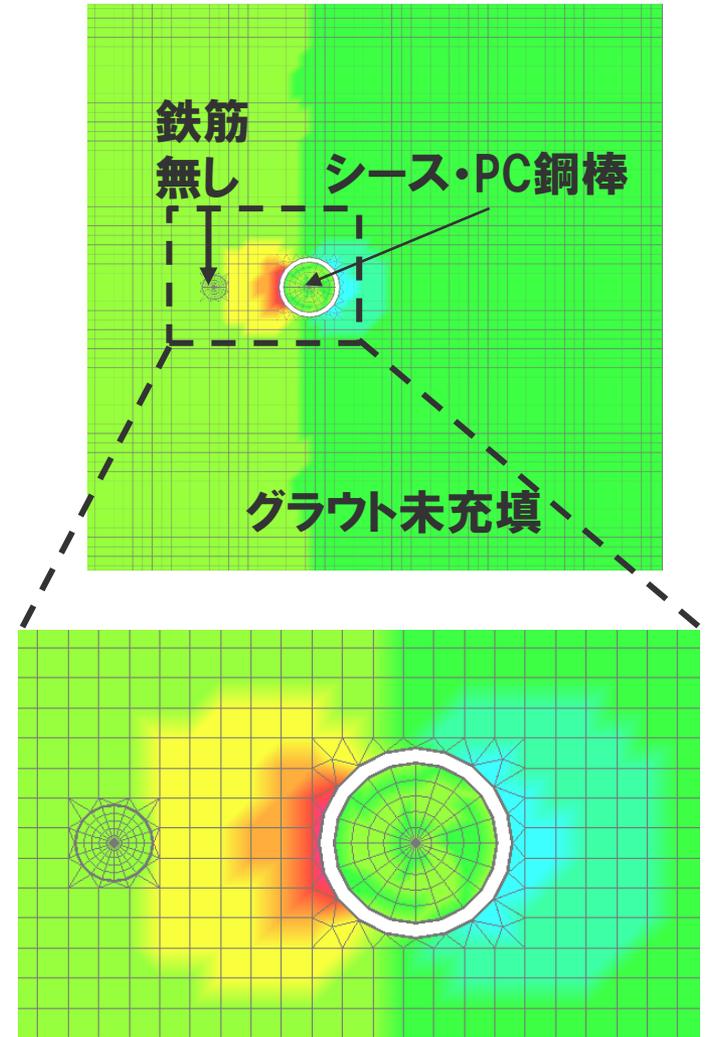
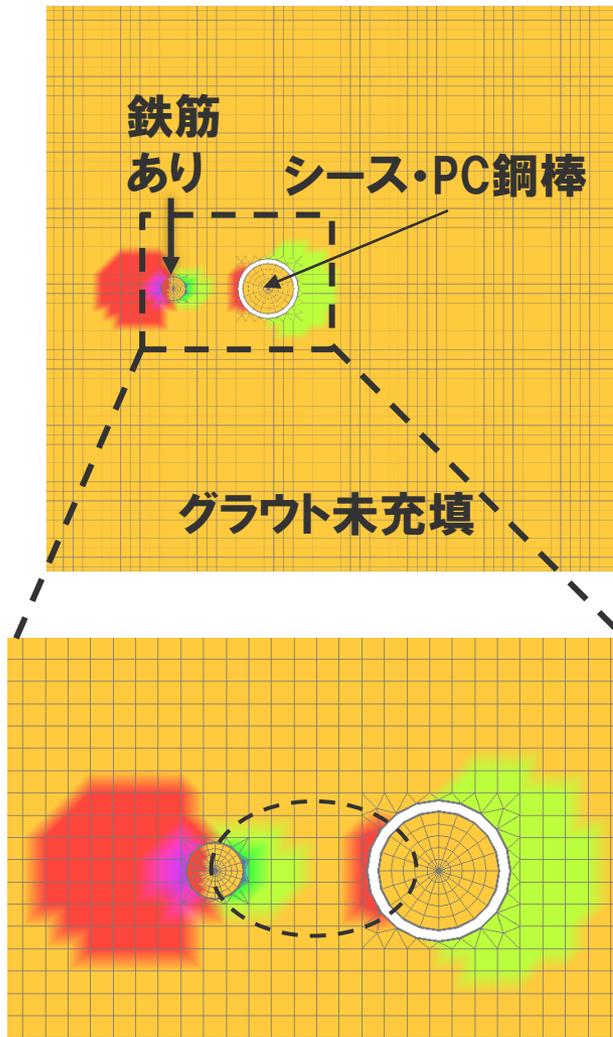
PC鋼棒

励磁コイル

鉄筋

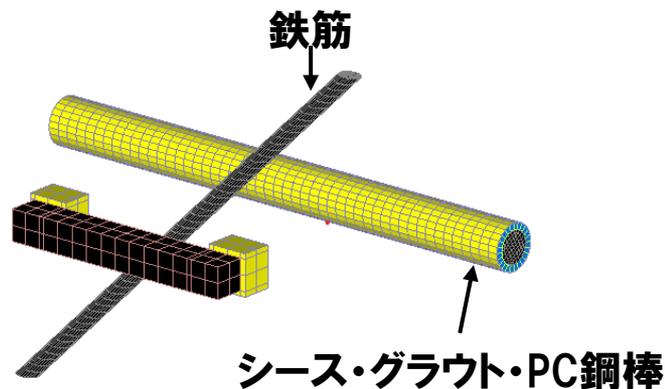
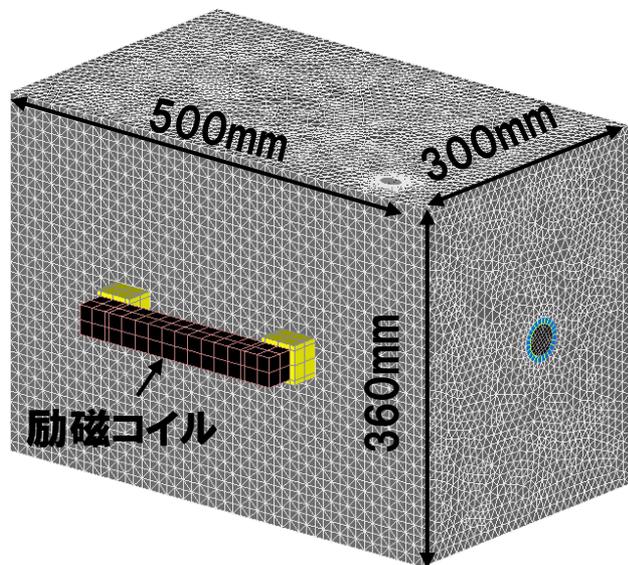
- 対象とするシースの振動に加えて
- 鉄筋の振動もノイズとして混入する可能性

# 鉄筋からのノイズによる弾性波の干渉

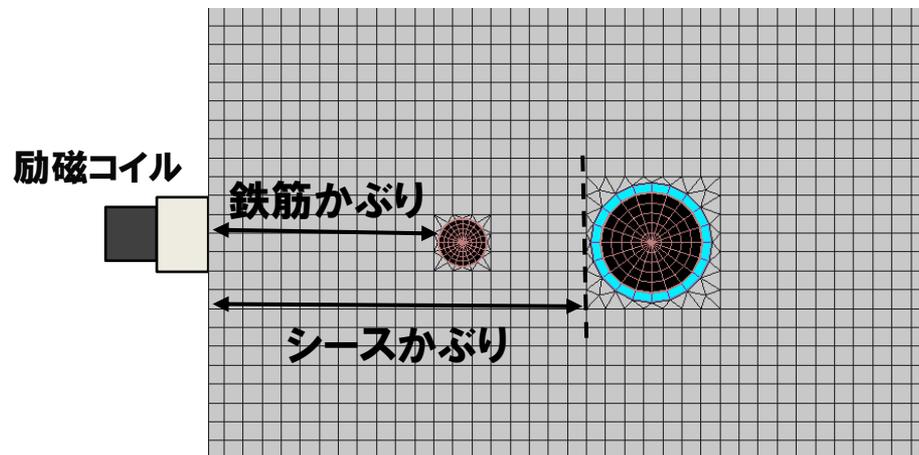


シースによる弾性波が鉄筋からの弾性波により打ち消される可能性

# その影響の程度を解析的に把握

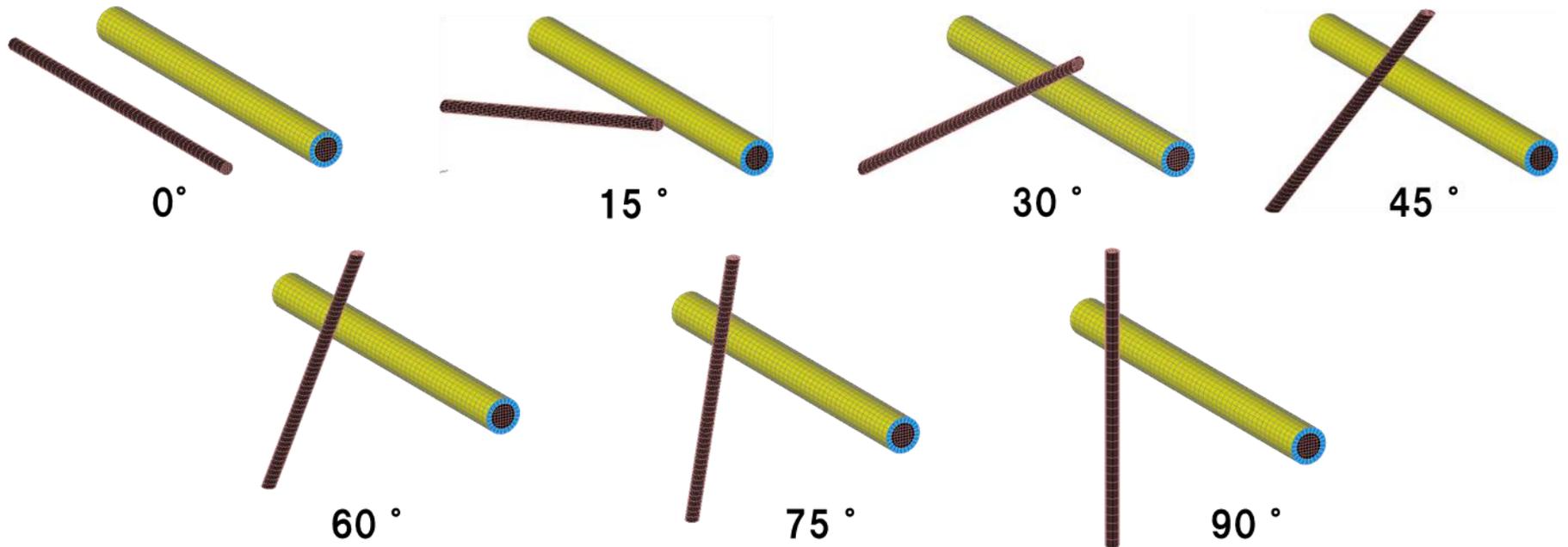


シース径  $\phi$  48mm  
シースかぶり 150mm  
鋼棒径  $\phi$  32mm  
鉄筋径 D16





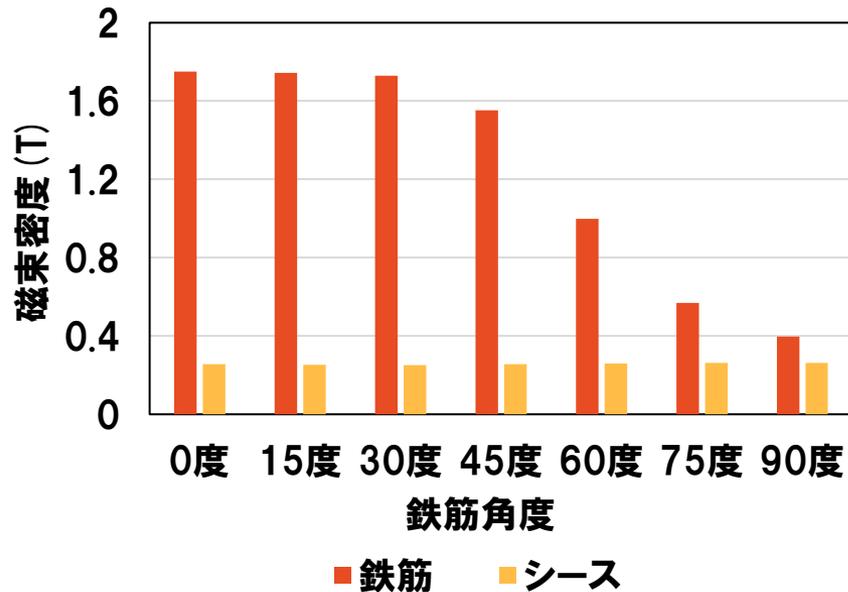
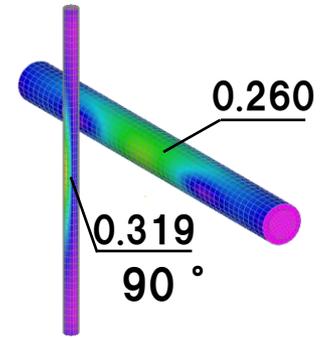
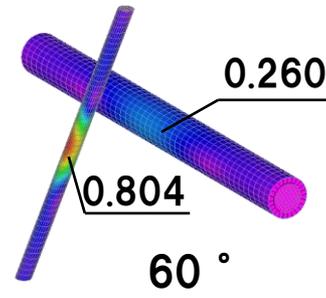
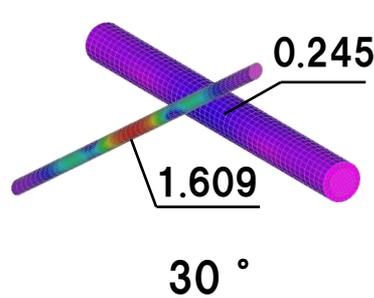
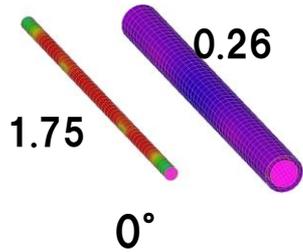
# PC鋼材に対する鉄筋のなす角度を変化させた



**鉄筋かぶり 30mm:**

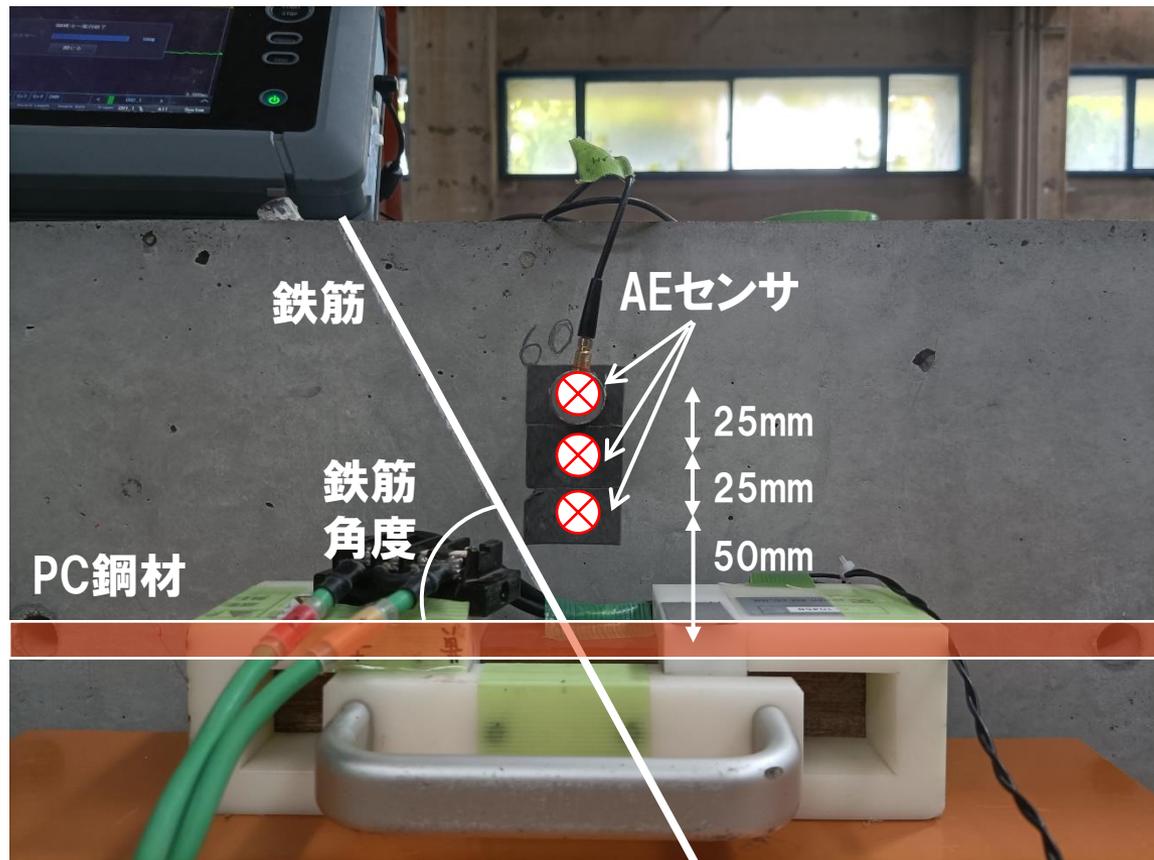
**0° 15° 30° 45° 60° 75° 90°**

# 磁束密度の分布状況



鉄筋角度が増大するほど、鉄筋での磁束密度は**減少**！

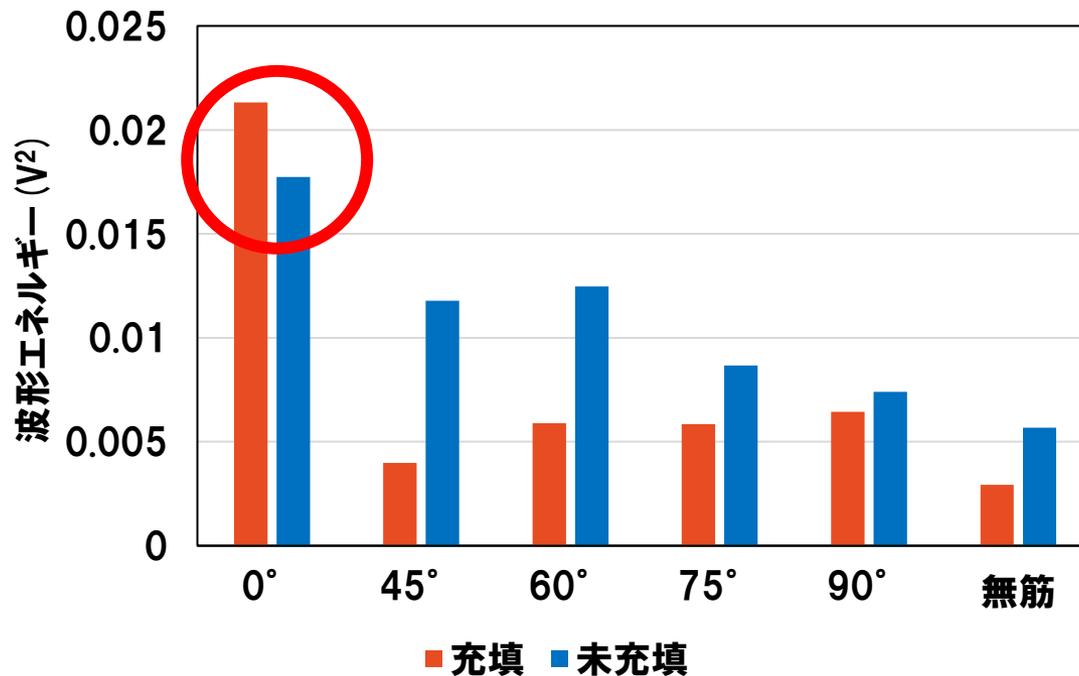
# 次は実験で**弾性波**の波形を調べた



- 鉄筋とシースのなす角度 $0^{\circ}$   $45^{\circ}$   $60^{\circ}$   $75^{\circ}$   $90^{\circ}$
- 無筋の場合についても比較実験を実施

# 鉄筋角度と波形エネルギーの関係

AEセンサ位置100mmの場合



鉄筋角度0° の場合、充填状況の評価が困難

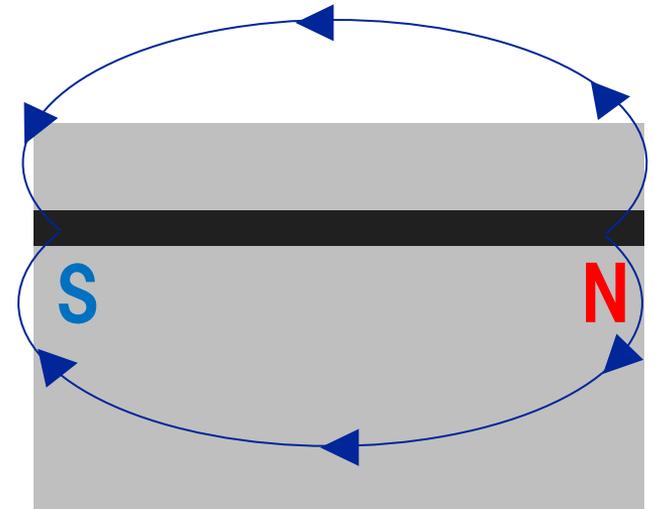
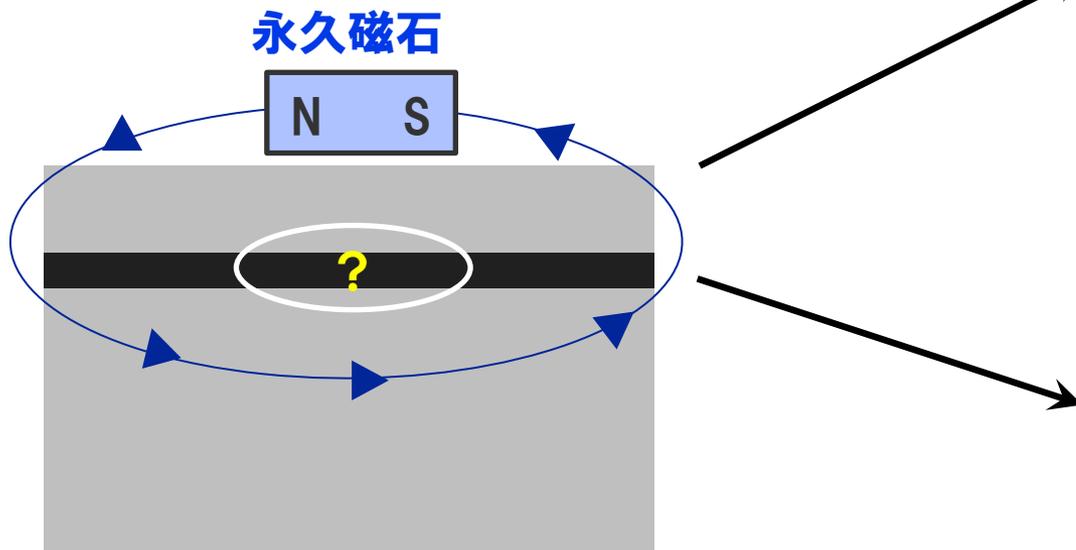
→ PC鋼材と鉄筋との角度が小さい場合は要注意



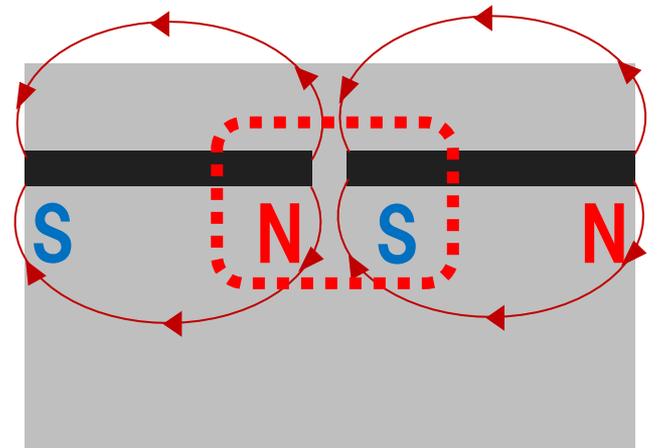
## ②PC鋼材の破断状況

# 漏洩磁束法の原理

- 永久磁石によりコンクリート中の鋼材の着磁を行う
- 内部の鋼材が破断している場合は破断箇所には磁極が発生する

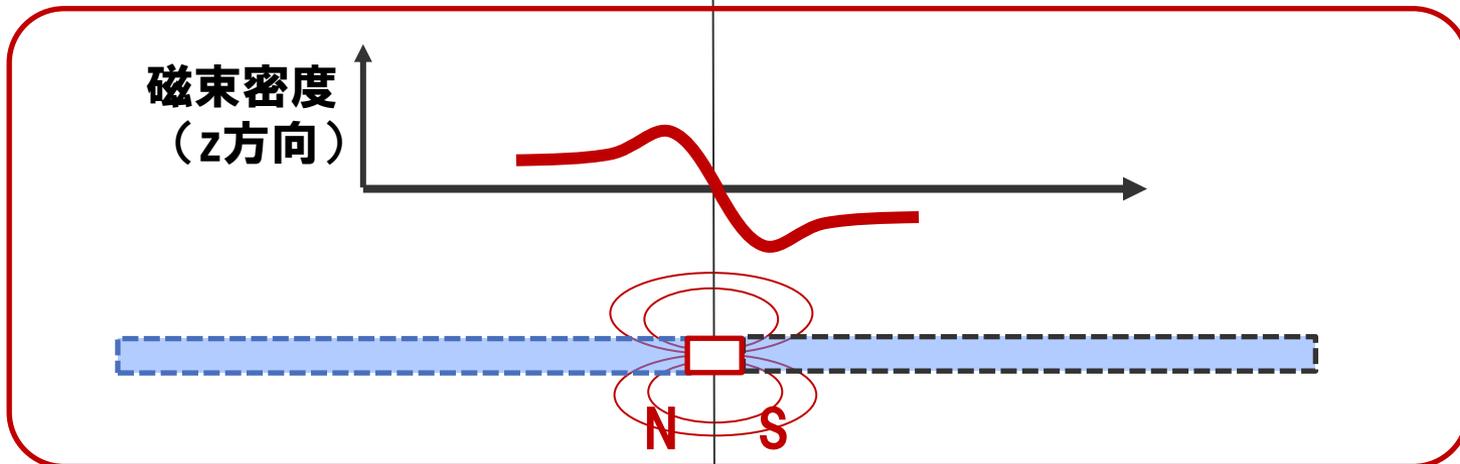
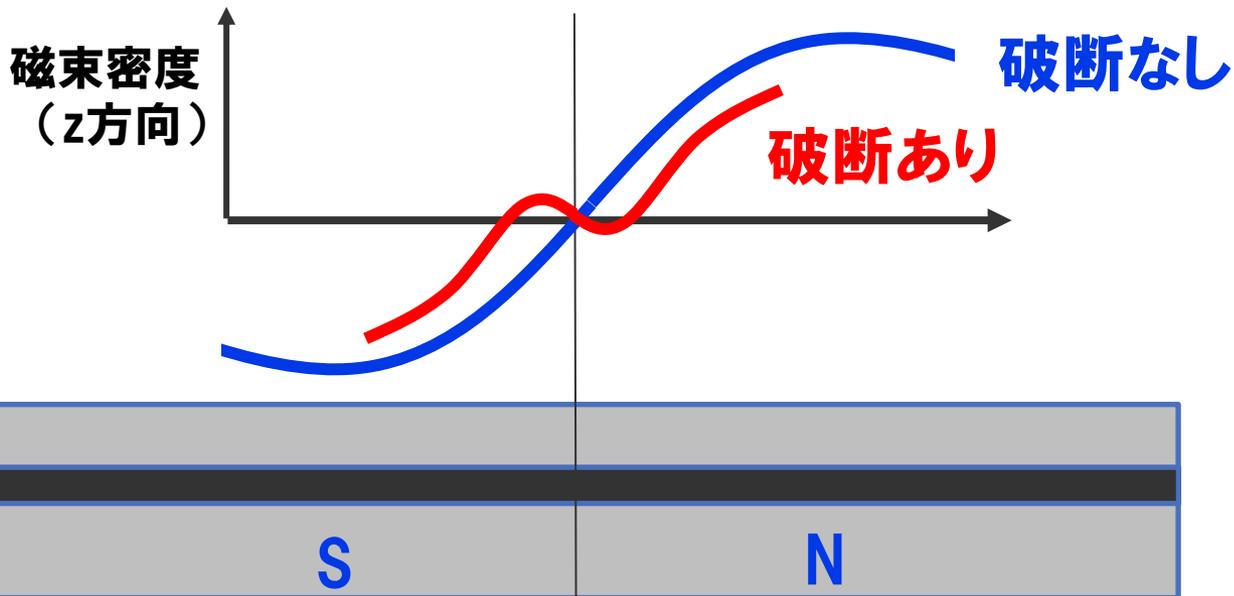


破断なし



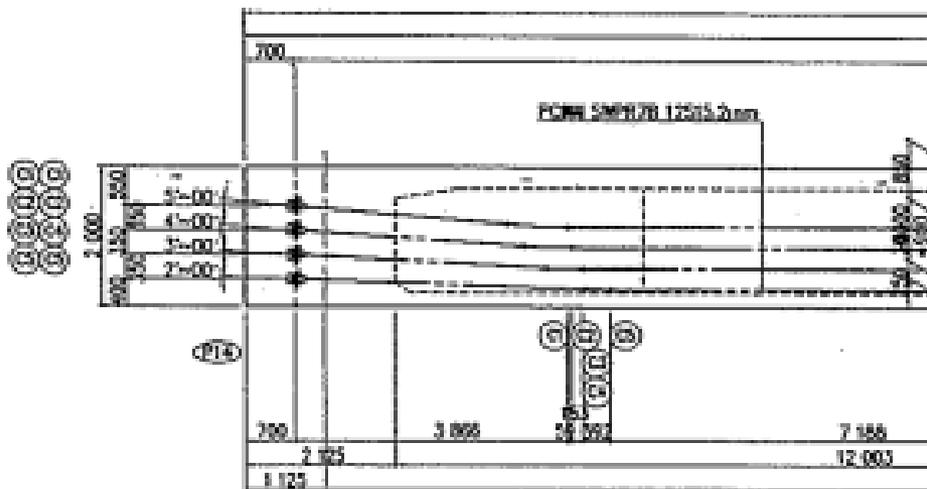
破断あり

# 磁束密度のプロファイルに着目

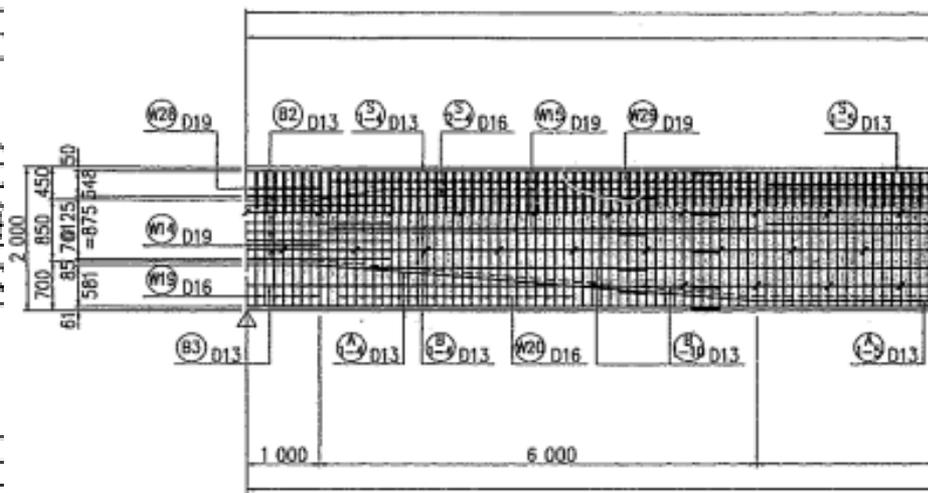


破断部の磁極対は、**N-Sが逆方向** ⇒ 破断箇所S字を示す

# PC鋼材破断の検出でのハードルも？



PC鋼材配置図



鉄筋配筋図

**検査対象となるPC鋼材の前面には鉄筋が一杯！**

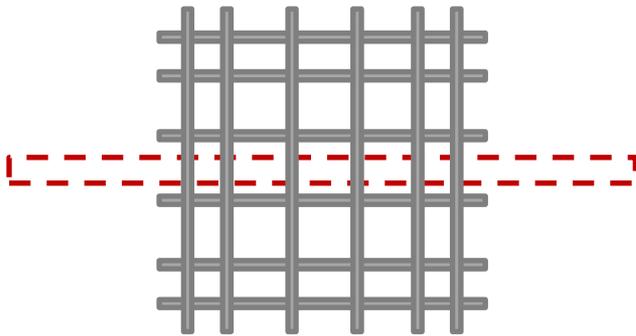
**この鉄筋の存在が磁束密度プロファイルに与える影響が大**

# では、その影響をどうやって消すか？

**脱磁器**を用いて**鉄筋に付与された磁化を低減**し、  
その減少率に基づいて**PC鋼棒に付与された磁束密度を算出**する

## Step.1

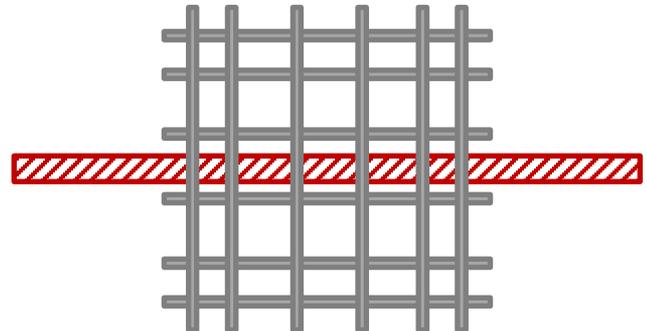
着磁後の鉄筋(PC鋼材がない場所)の脱磁器による磁束密度の減少率を求める。



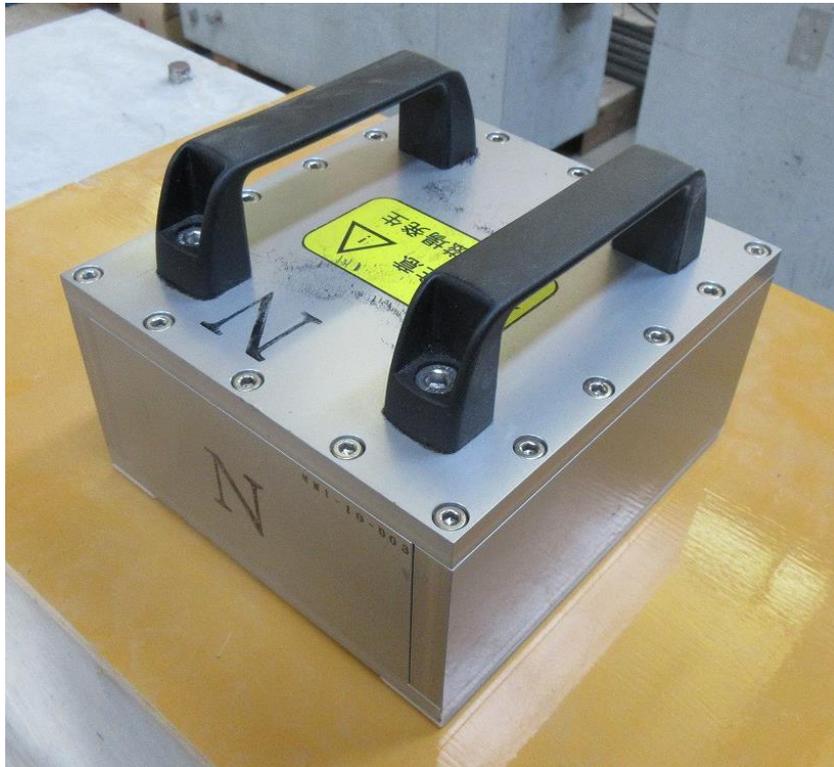
## Step.2

続いて、PC鋼棒＋鉄筋で着磁および脱磁を行う。

さらに、Step.2 – Step.1 によりの鉄筋の影響分を低減



# 計測装置（着磁、計測）



**永久磁石**

180mm×165mm×134mm、**3kg**



**磁気センサ**

計測範囲：±300  $\mu$ T、  
253mm×142mm×135mm、**1.5kg**

# 脱磁器



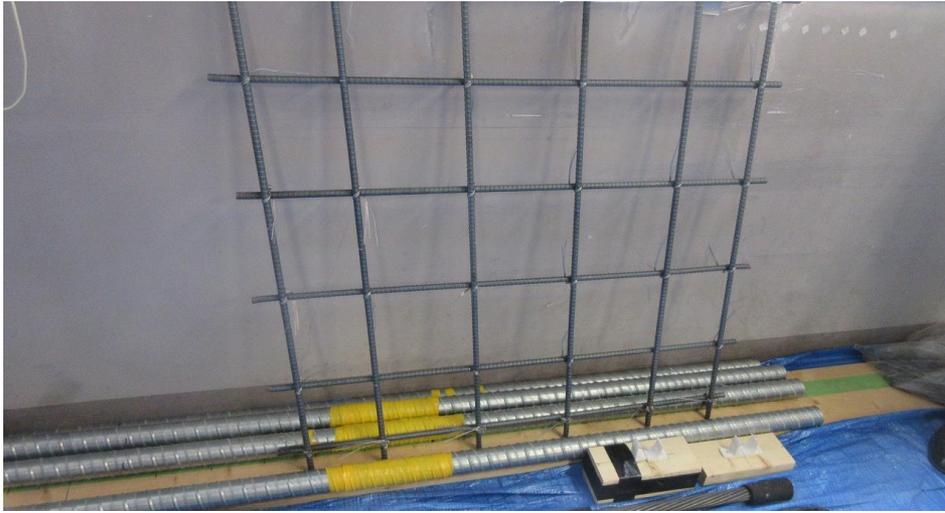
**脱磁器**  
**(実験前:PC鋼材の脱磁)**



**携帯型脱磁器**  
**(構造物での脱磁)**



# 試験体（鉄筋、シース、PC鋼材）



**鉄筋**



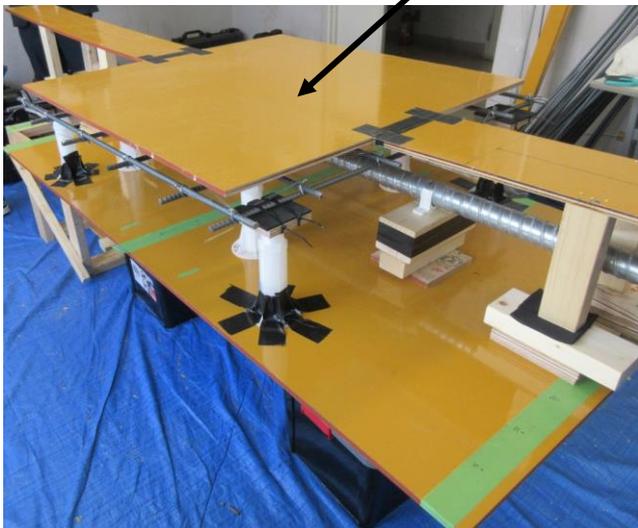
**PC鋼材**



**シース内にPC鋼材を設置した試験体**

# 供試体 (この実験にコンクリートは不要!)

コンクリート面を模擬



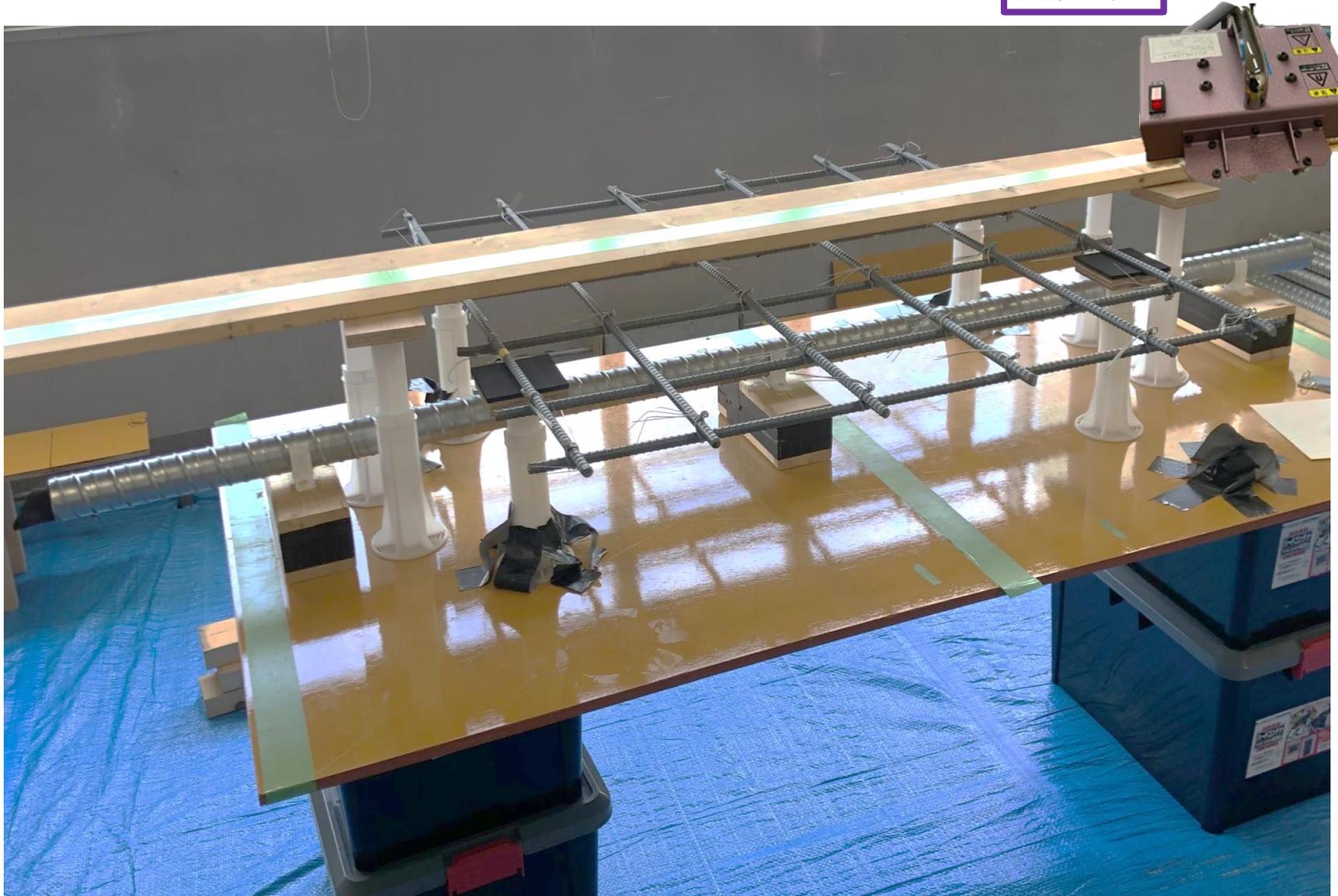
計測治具



鉄筋、シースの設置状況

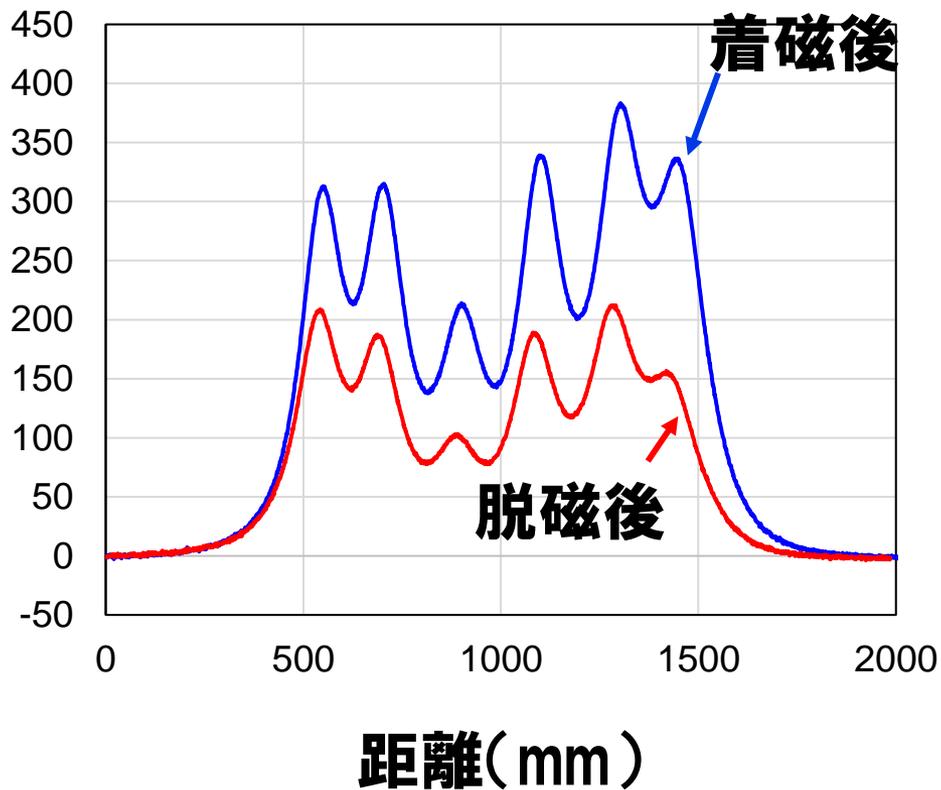
# 実験概要

脱磁



# Step.1 (鉄筋のみ) の 実験結果

磁束密度( $\mu T$ )



$$\frac{\text{(着磁後)}}{\text{(着磁後)} - \text{(脱磁後)}}$$

の平均

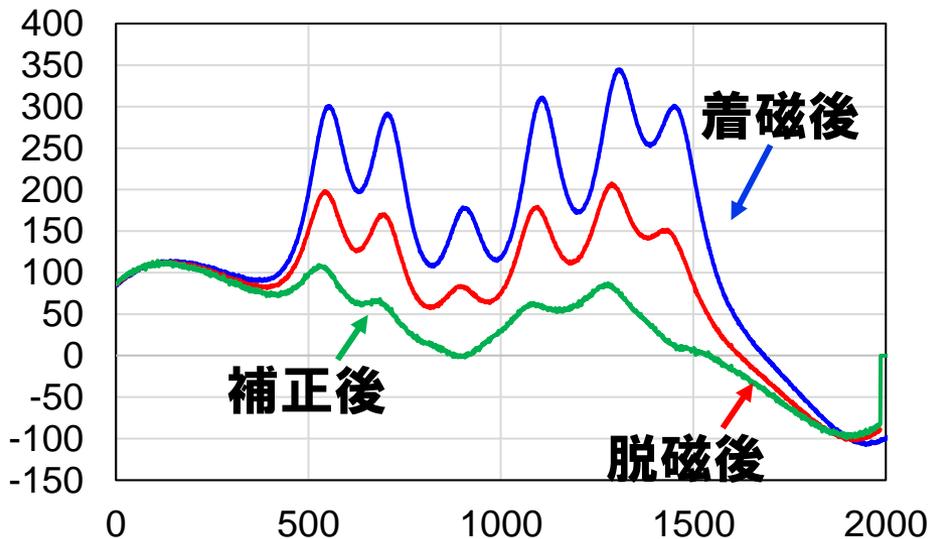
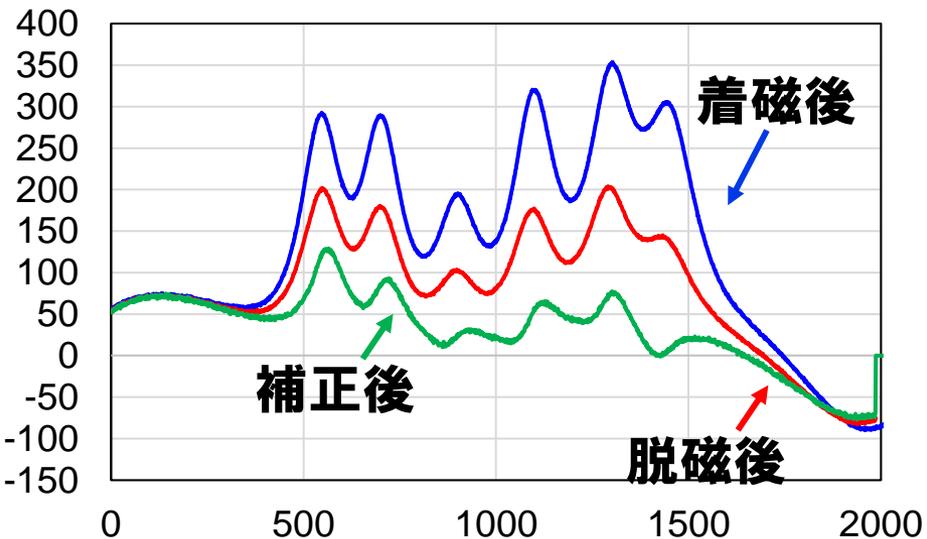


1.89

# Step.2 (鉄筋+PC鋼材) の実験結果

## 健全

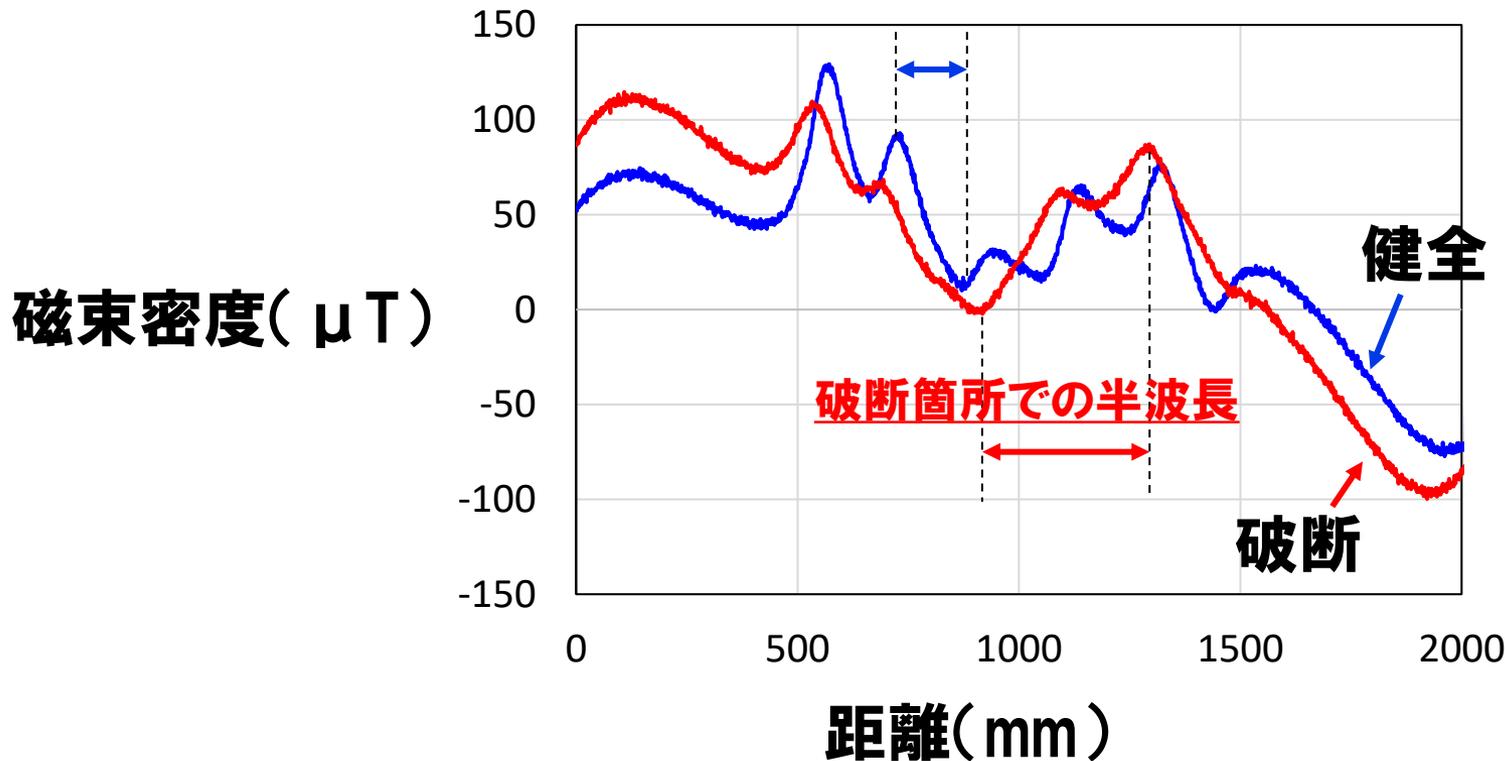
## 破断



補正後のグラフ

Step.2 - Step.1

# 補正後の「健全」と「破断」の比較



破断箇所(1000mm)での波形の半波長は、  
垂直方向鉄筋による半波長よりも大きい

補正後のS字カーブの形状を精査することで破断検知が可能



## ③あと施工アンカーの固着状況

# 2012年12月2日の中央道での事故

トンネルの天井裏  
潜んでいた危険

写真提供 山梨県警



笹子トンネル

2012-12-2

コンクリート製の天井板が崩落PM  
車3台が下敷きになり9人死亡

トンネルの天井裏  
潜んでいた危険

つり金具

天井板



トンネルの天井裏  
潜んでいた危険

ボルトが  
抜け落ち—

7

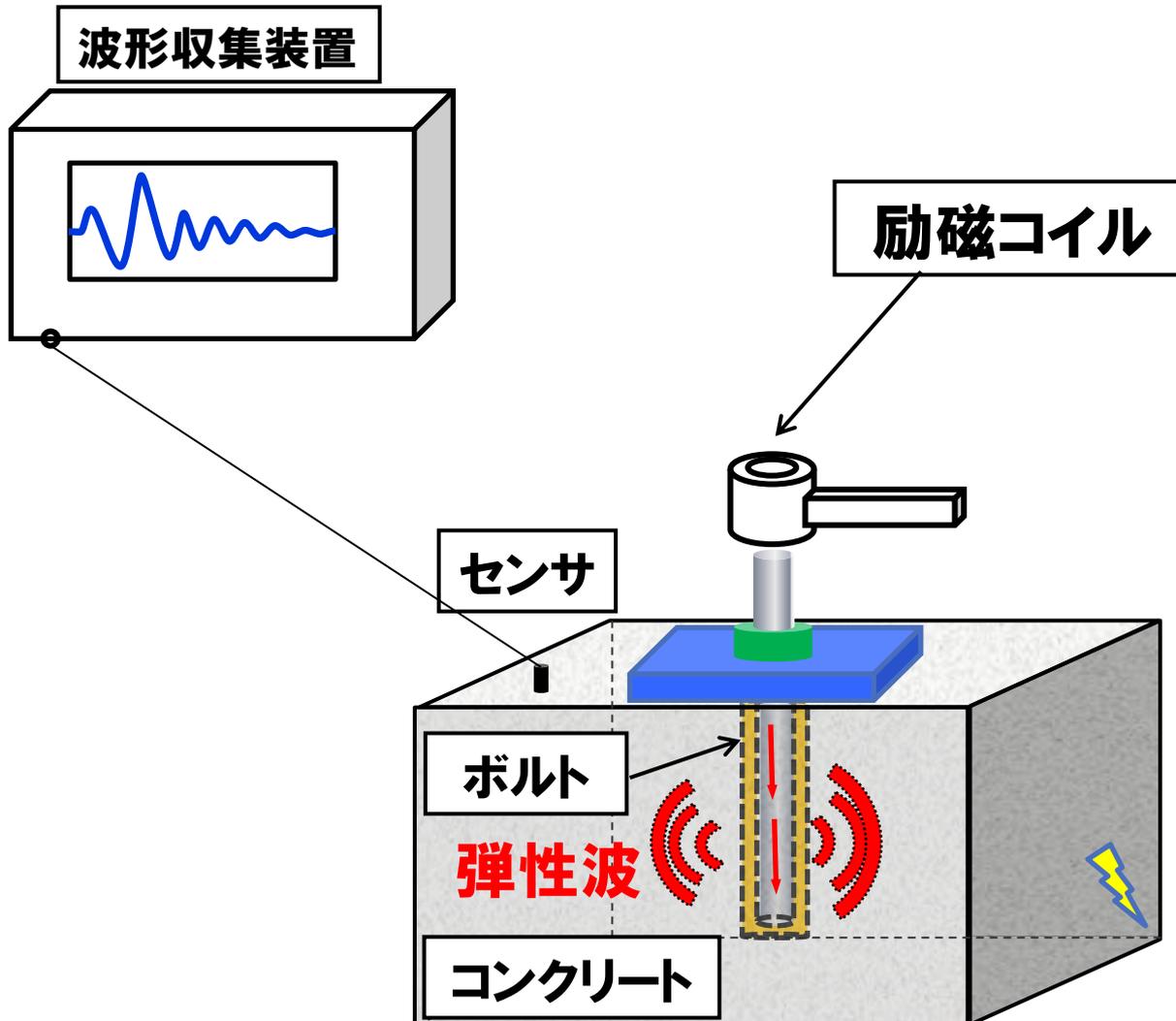
# 中央道トンネル事故 “点検は目視のみ”

人間の耳で聞く  
打音検査でどこまで  
わかるか？

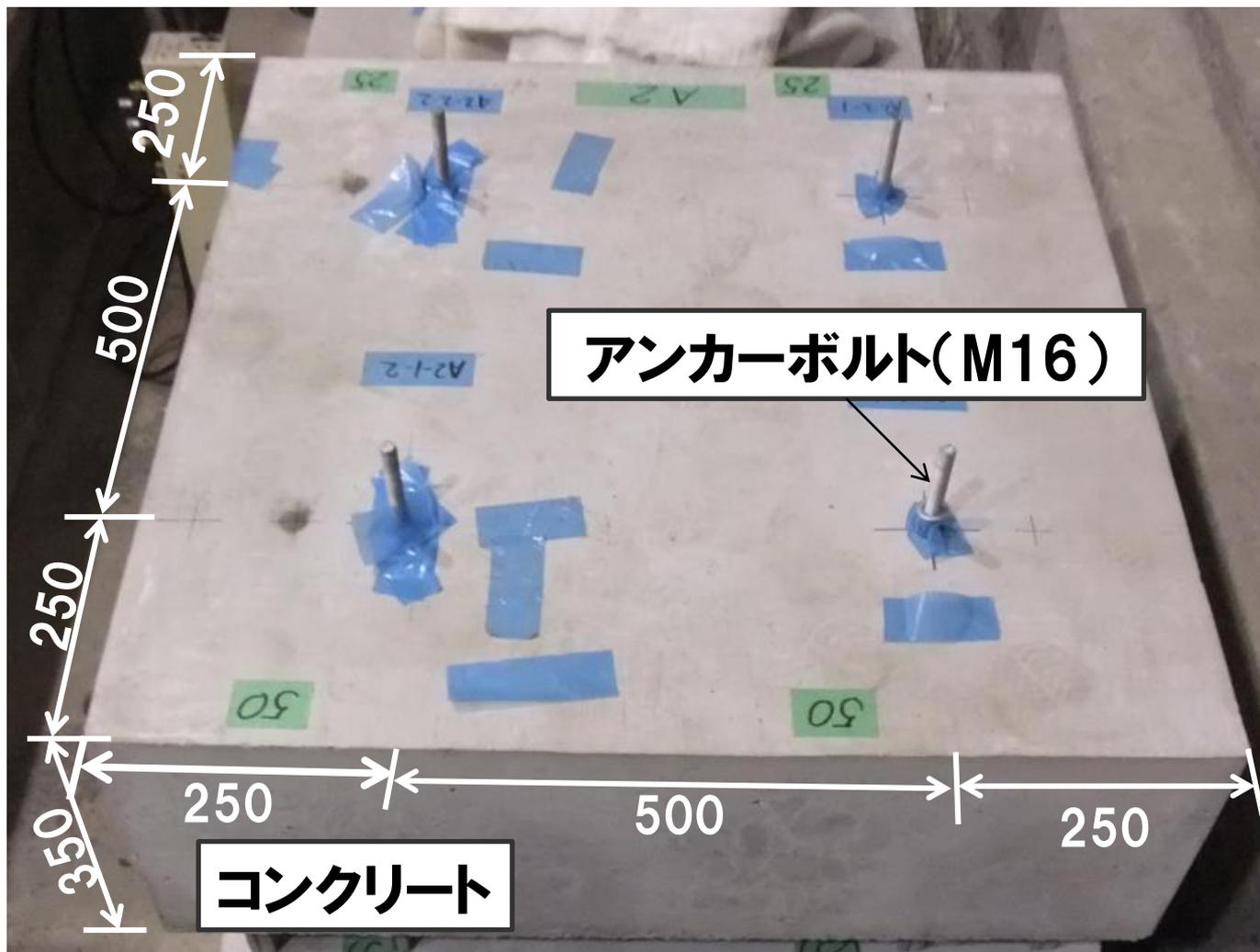
NHK



# アンカーボルトを**非接触**で**電磁パルス**で**加振**

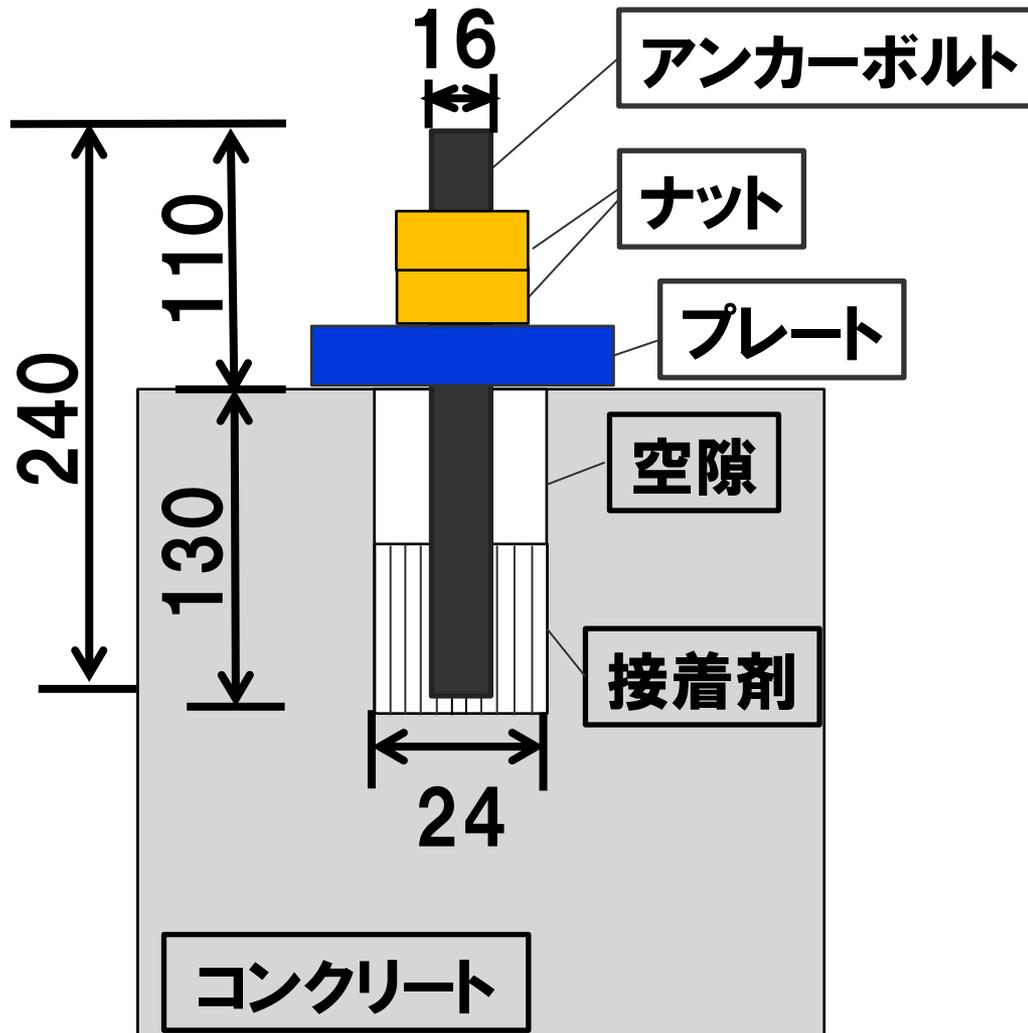


# 接着剤充填不良の評価



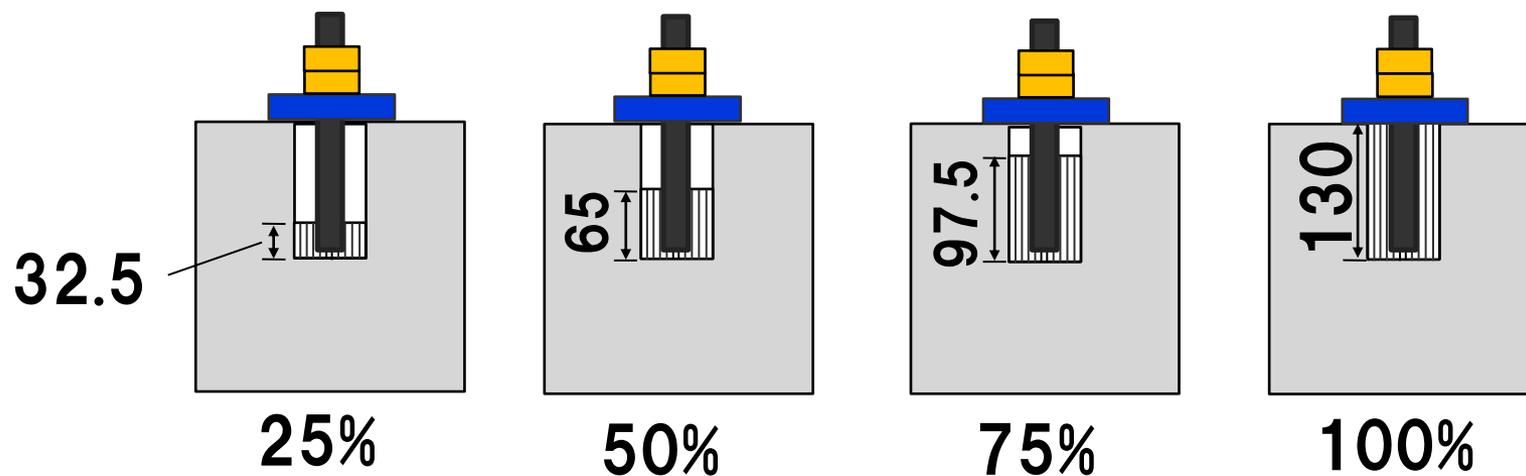
単位:mm

# ボルト固着部の模式図



単位:mm

# 接着剤の充填ケース(充填率)

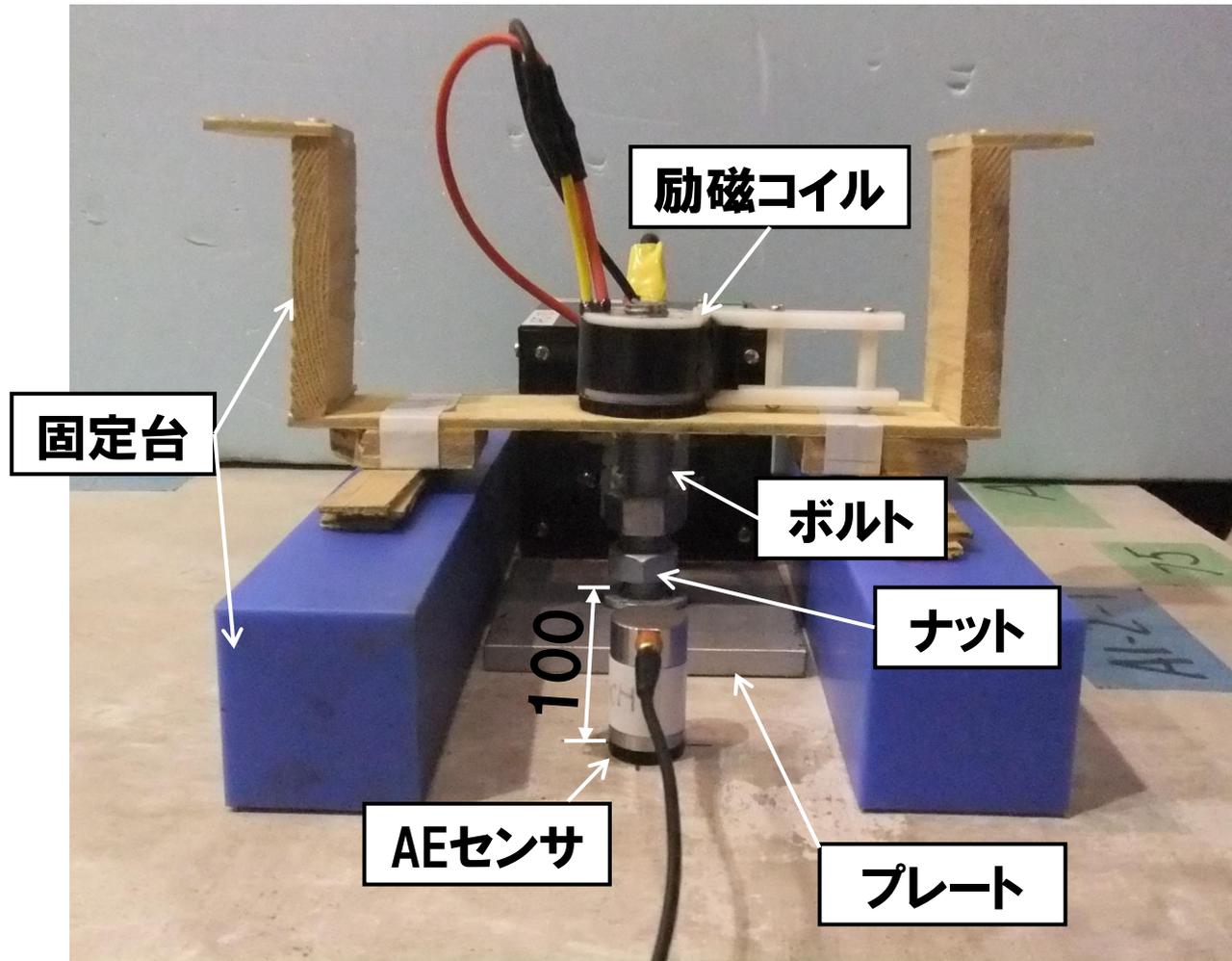


単位: mm

空隙

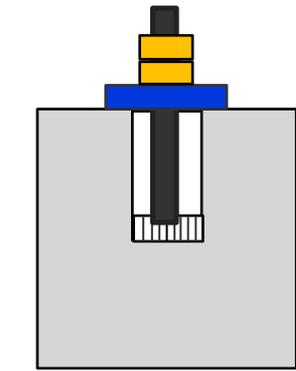
接着剤

# 計測概要(弾性波をコンクリート表面で受信する場合)

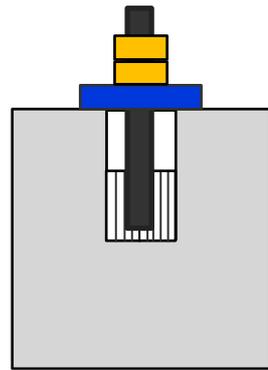




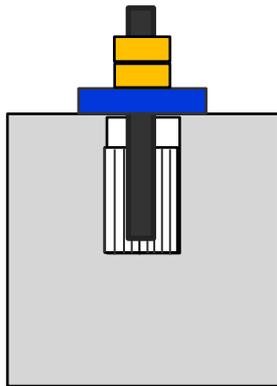
# 受信波形の例



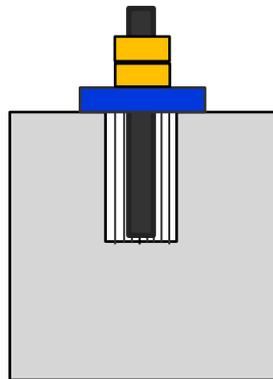
25%



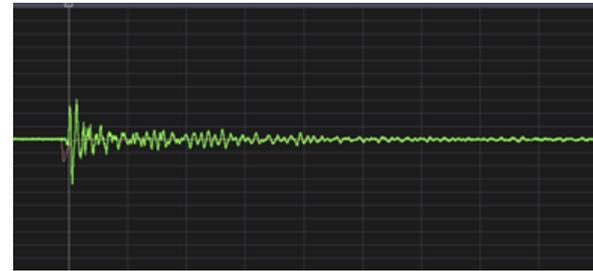
50%



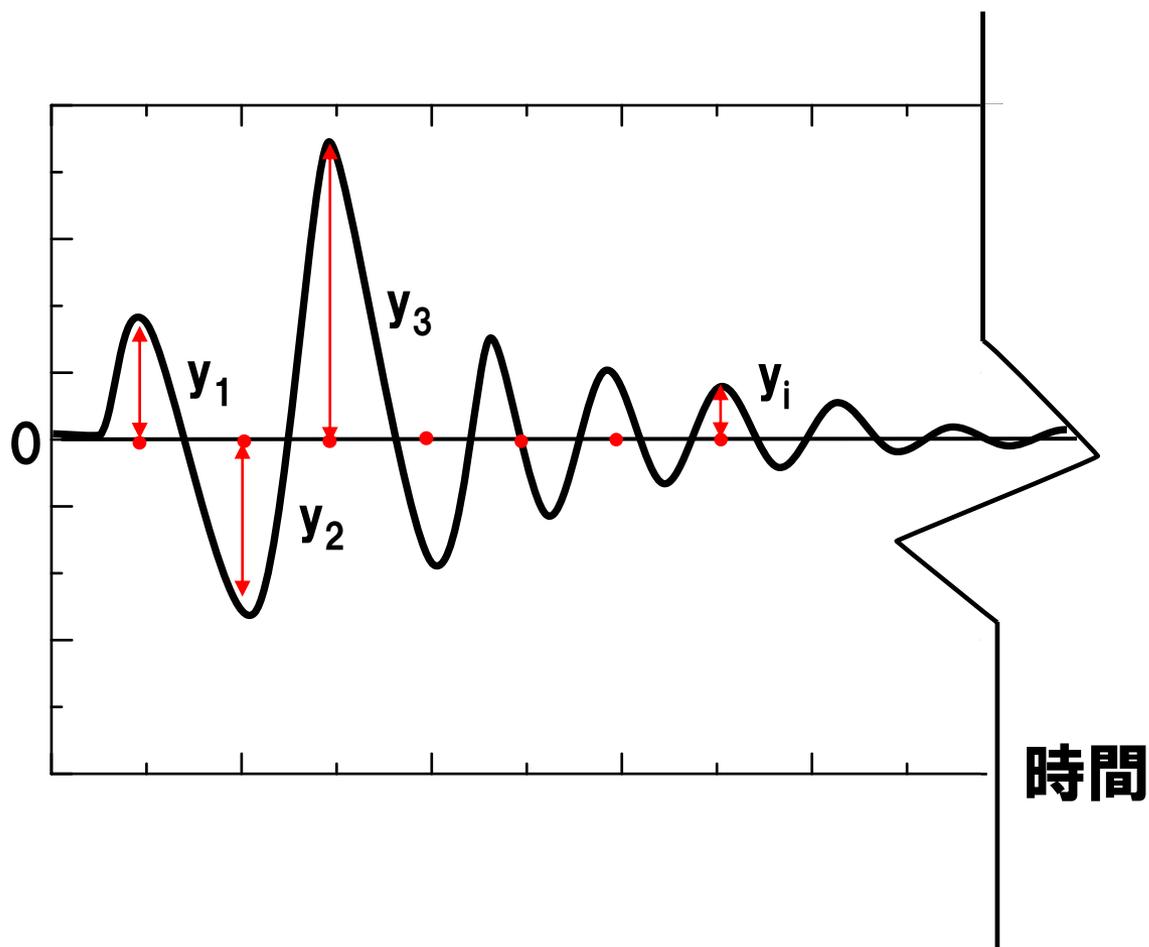
75%



100%



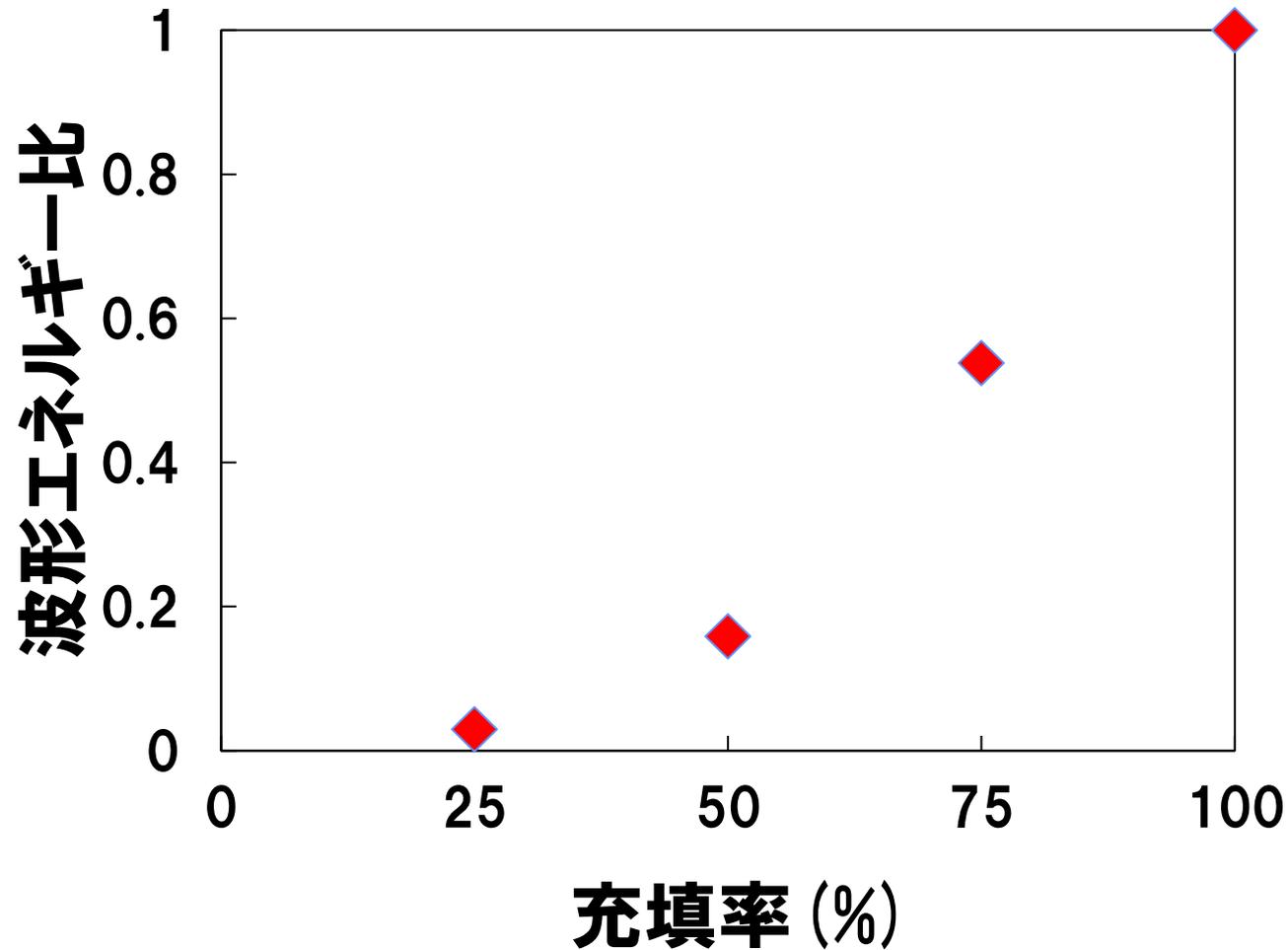
# 波形エネルギーの定義



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



# 接着剤充填率と波形エネルギーの関係

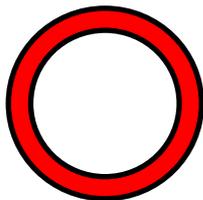


# 実際の現場でのハードルは何か？



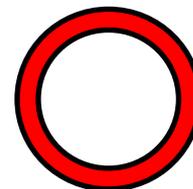
附属物なし

様々な施工不良

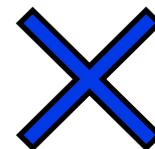


附属物あり

ナット締結を解除  
→接着剤充填不良



ナット締結状態

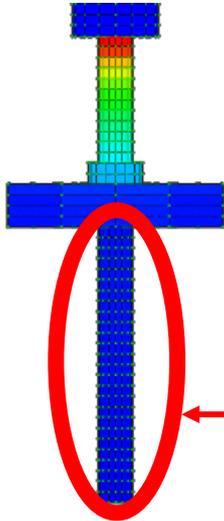


# コイル形状による違いは？

リング型

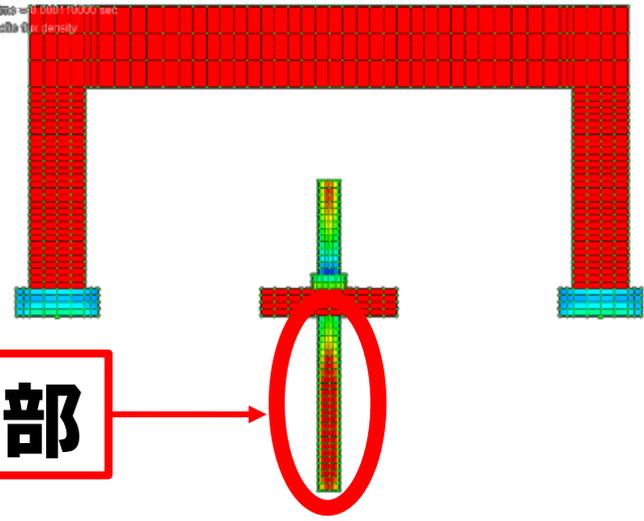
コの字型

Output File: Time = 0.00010000 sec  
Vector: Magnetic flux density



$10^3$

Output File: Time = 0.00010000 sec  
Vector: Magnetic flux density



10

0

ボルト埋込部

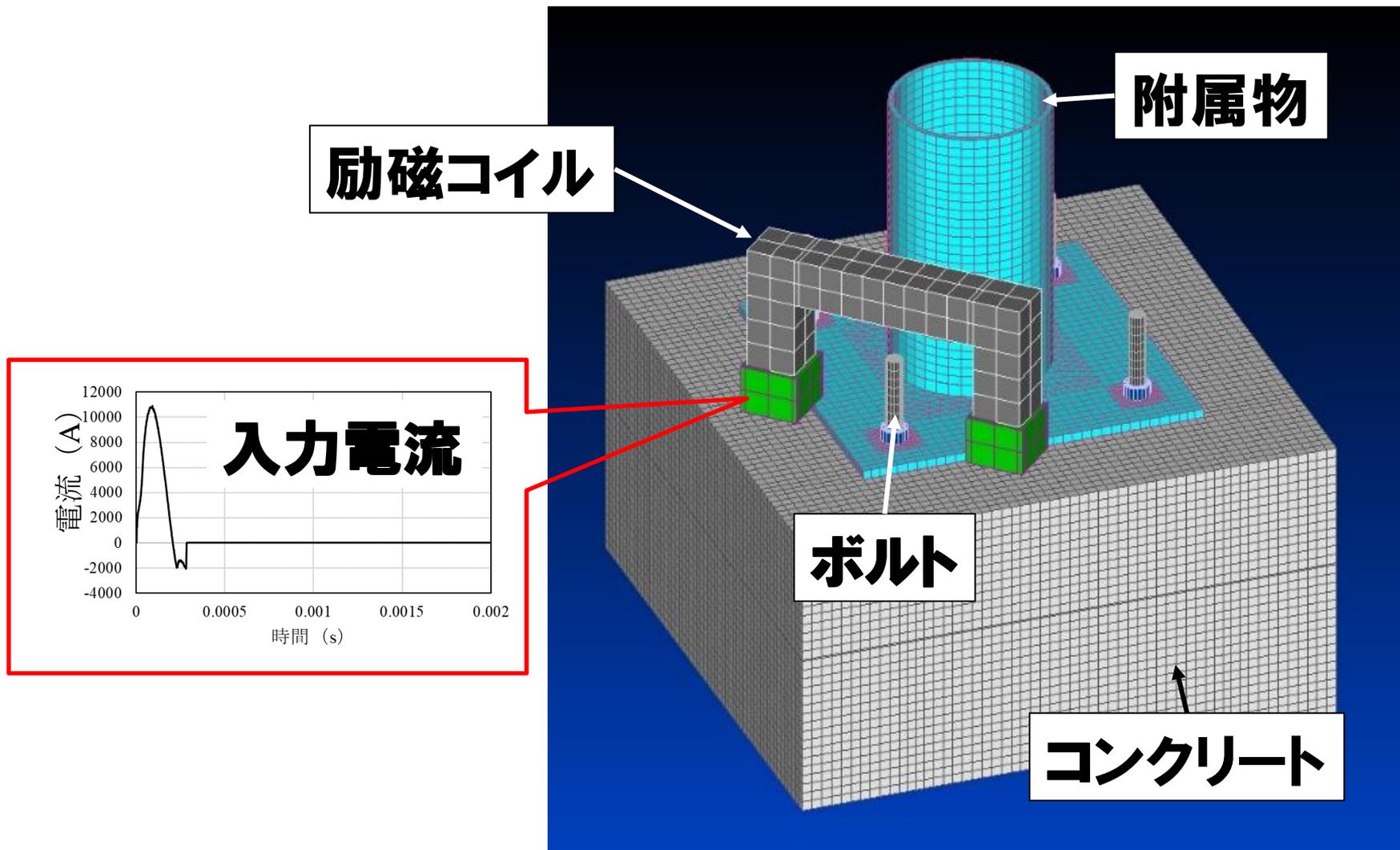
コの字型励磁コイル

⇒ ボルトを**効率よく加振**できる

||

- ボルト埋込部の振動 ⇒ 大
- 附属物の振動 ⇒ 小

# 付属物ありでナットで締結された場合の 適切な励磁コイルの設置条件の検討



# 動磁場解析モデル詳細

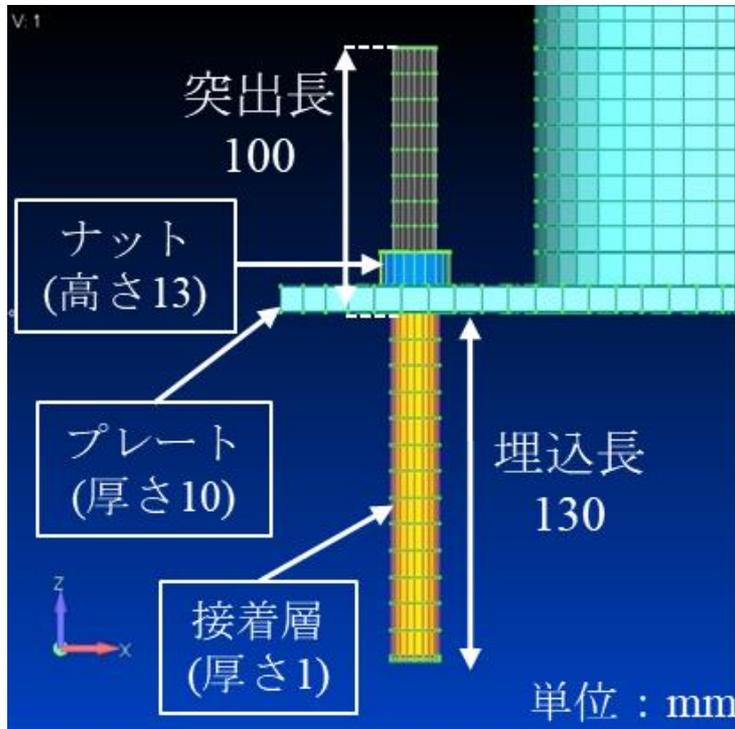


表-4.4 磁気ヒステリシスパラメータ

保磁力 (A/m)	残留磁化 (A/m)	飽和磁化 (A/m)
$4.17000 \times 10^2$	$7.32113 \times 10^5$	$1.38465 \times 10^6$

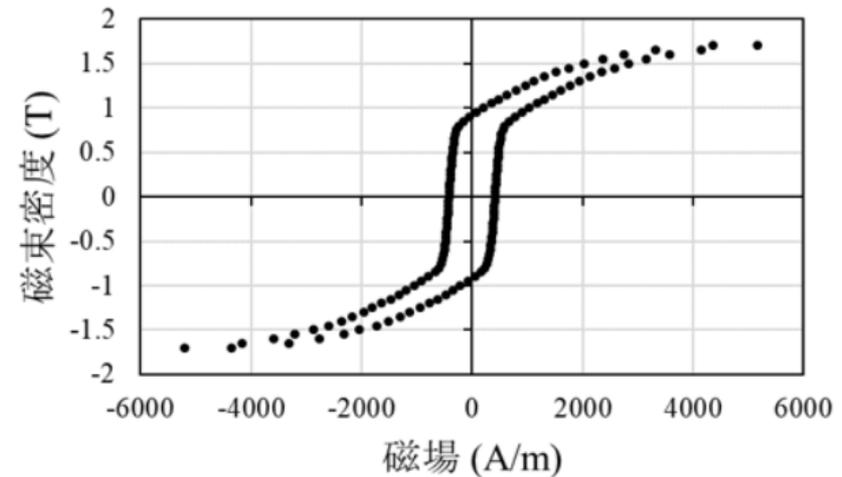
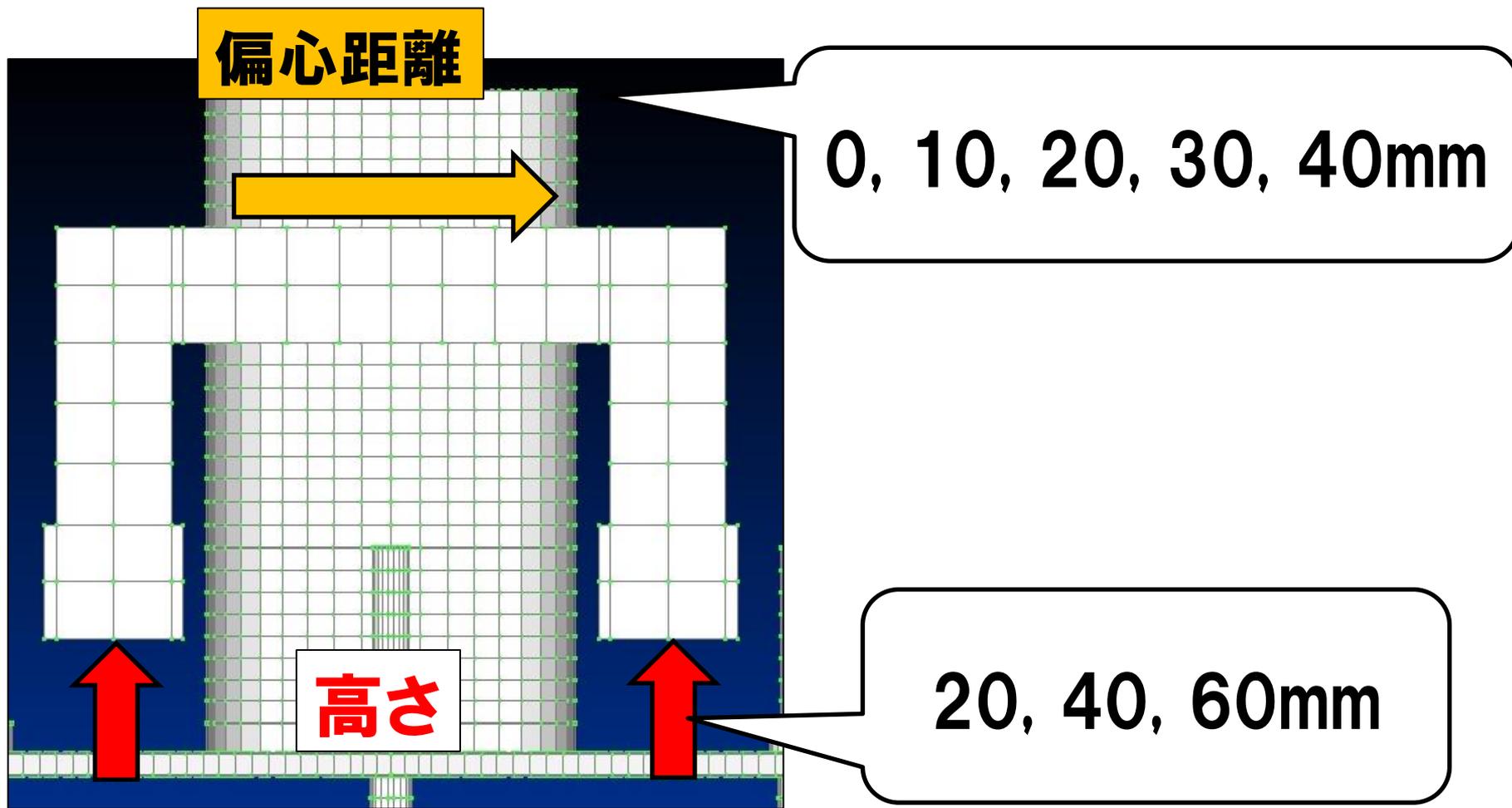
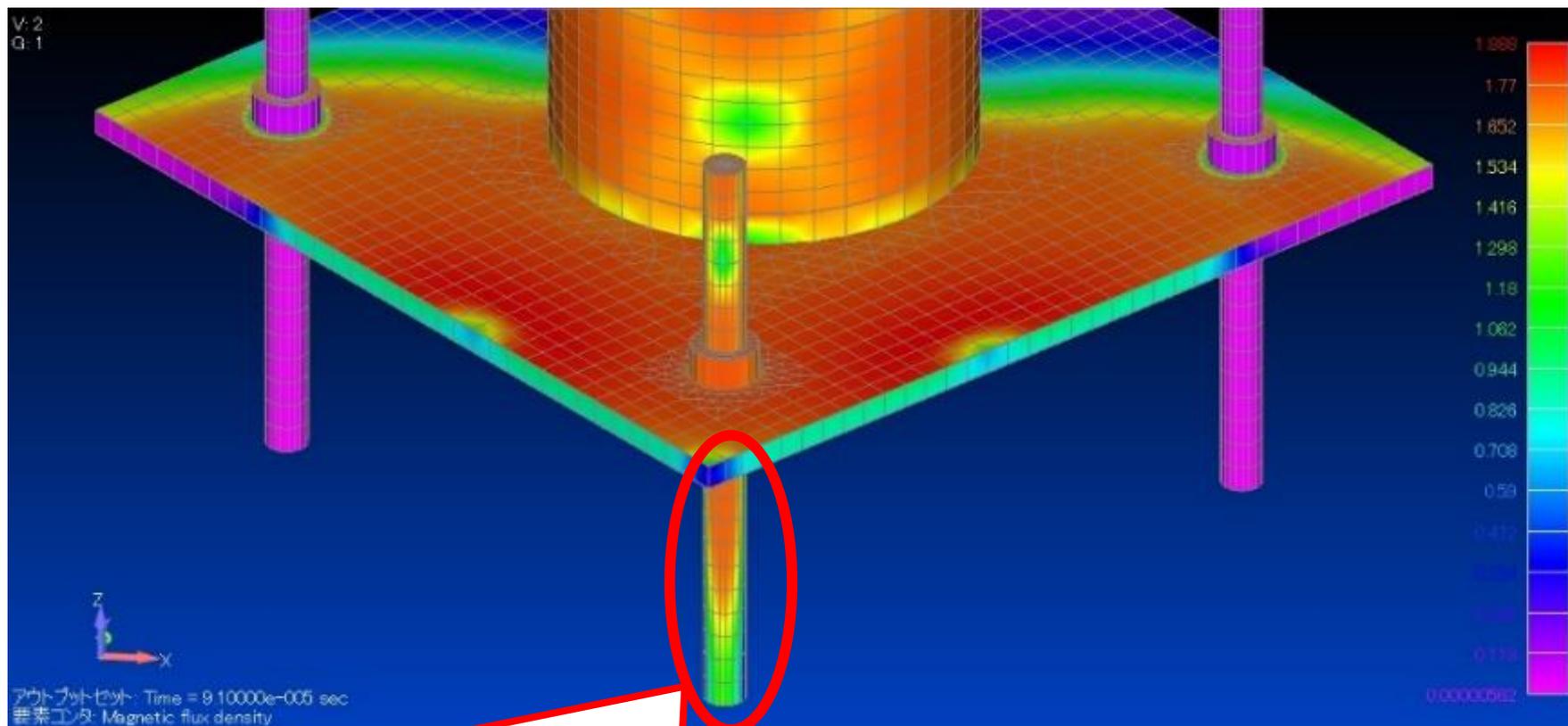


図-4.8 磁気ヒステリシス曲線

# 励磁コイルの設置条件を変化させた解析

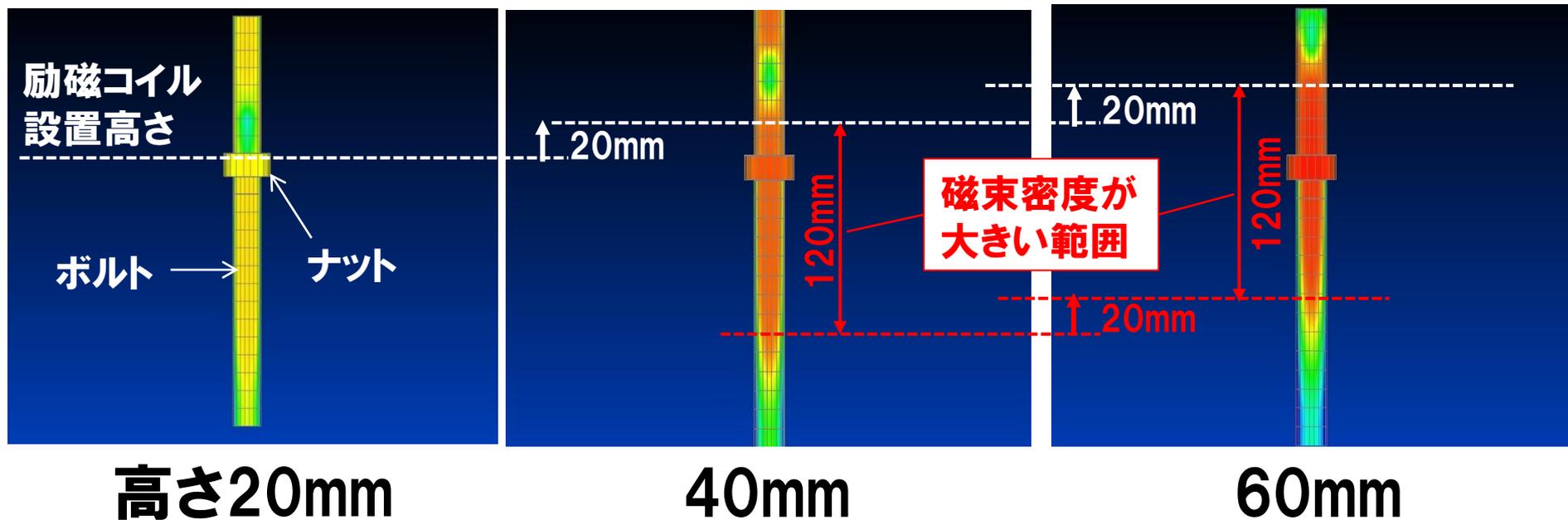


# 動磁場解析結果の例



**コの字型励磁コイルを用いることで  
ボルト埋込部まで磁場が透過する**

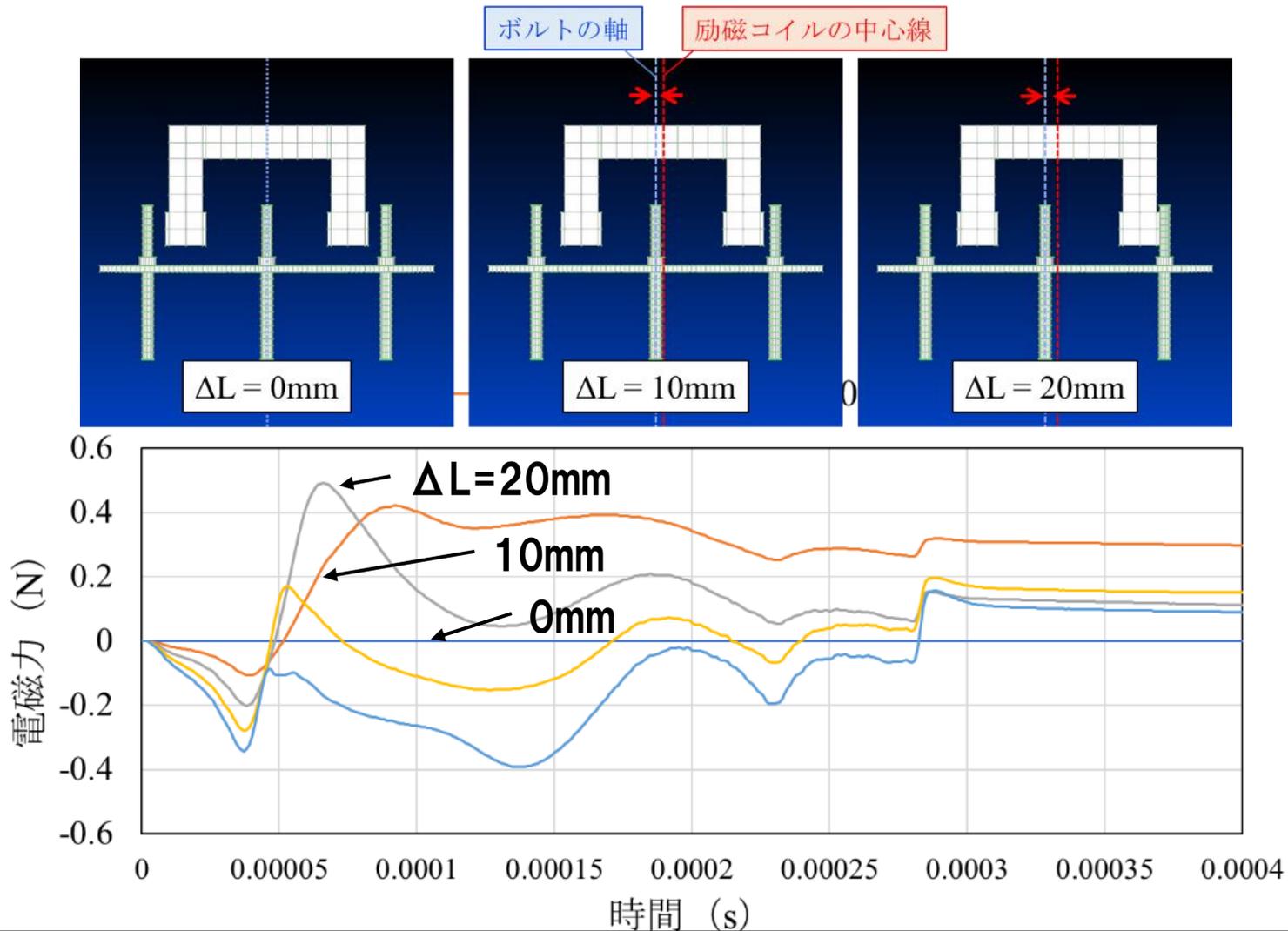
# 動磁場解析結果の例



**励磁コイルの設置高さは40mm程度が良い**

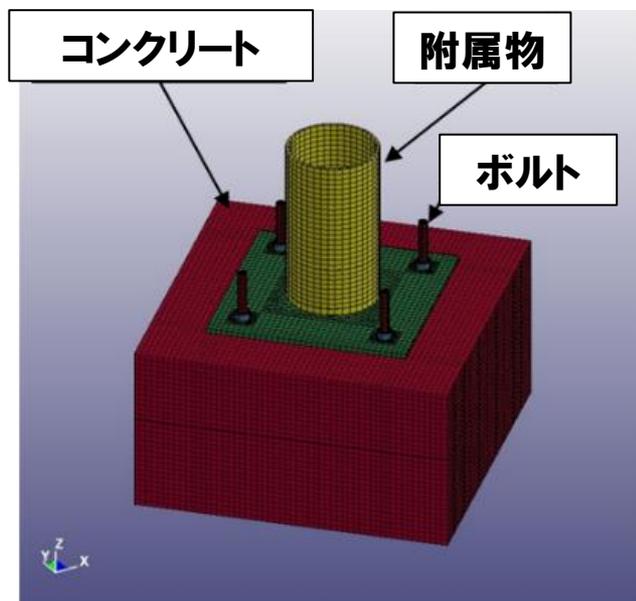
(高さ20mmでは、ボルトよりもプレート部の磁場が相対的に大きくなってしまい不適。)

# 偏心距離と水平方向に作用する電磁力



**偏心距離10~20mmの条件で、ボルト埋込部を効率よく加振できる。(偏心0mmでは、左右の力が相殺され不適。)**

# 次は、加振により生じる弾性波挙動の確認



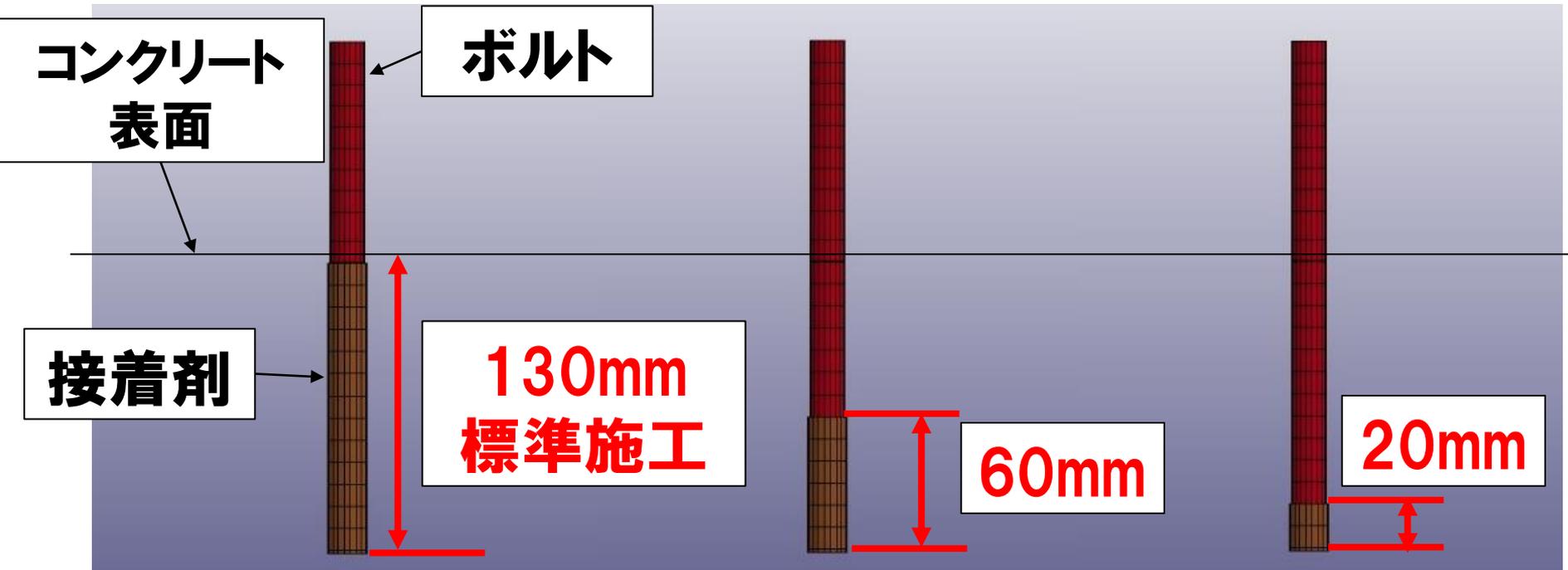
単位:mm

## ボルト+附属物

### 物性値

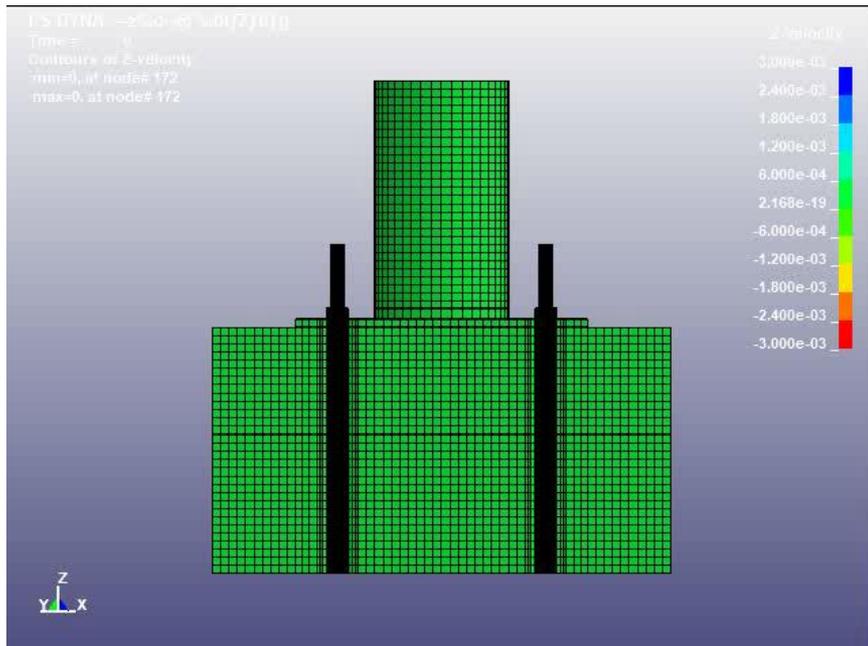
	密度 (kg / m <sup>3</sup> )	ヤング率 (N / m <sup>2</sup> )	ポアソン比
コンクリート	$2.3 \times 10^3$	$3.0 \times 10^{10}$	0.2
ボルト	$7.9 \times 10^3$	$2.0 \times 10^{11}$	0.3
接着剤	$1.2 \times 10^3$	$2.0 \times 10^9$	0.4

# 衝撃応答解析(弾性波の解析)モデル

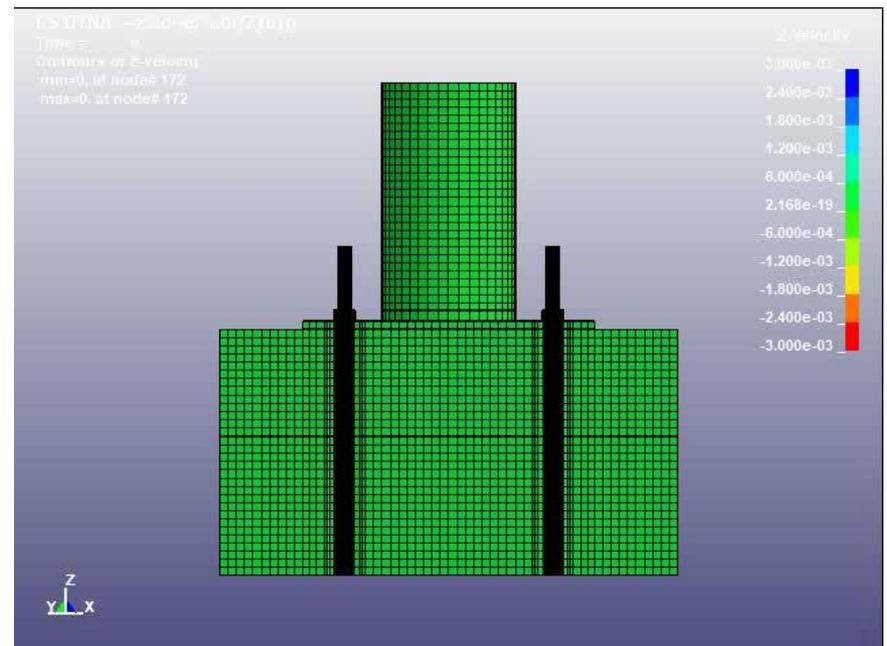


ボルトの固着長ケース

# 弾性波伝播シミュレーション



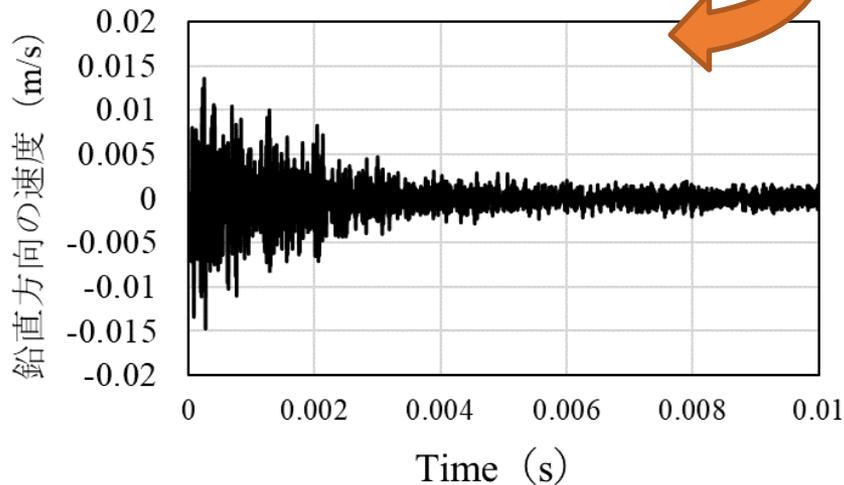
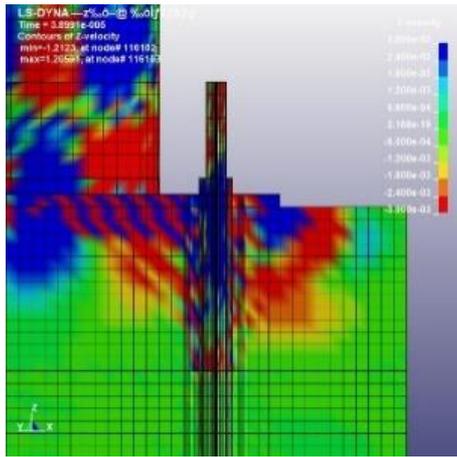
固着長  
130mm



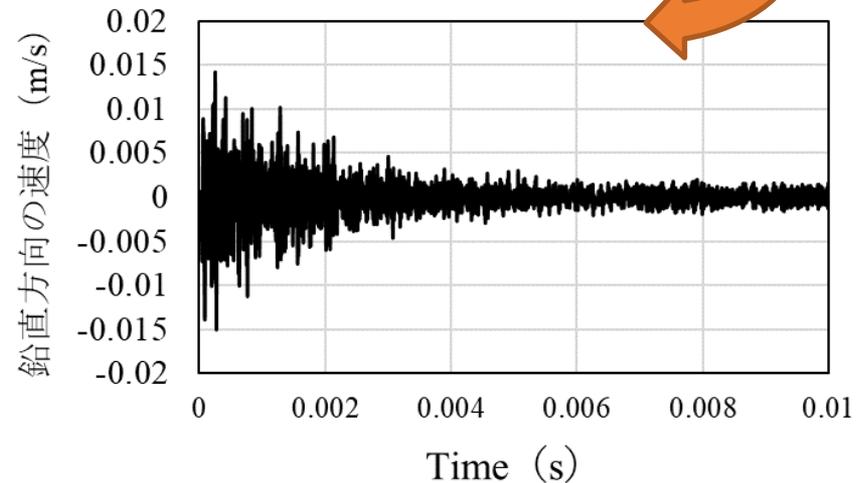
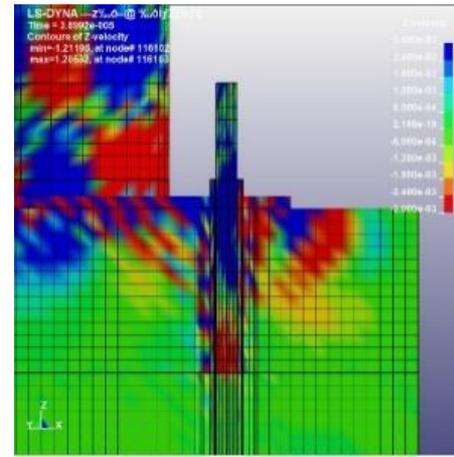
固着長  
20mm

# 解析波形を比較してみると

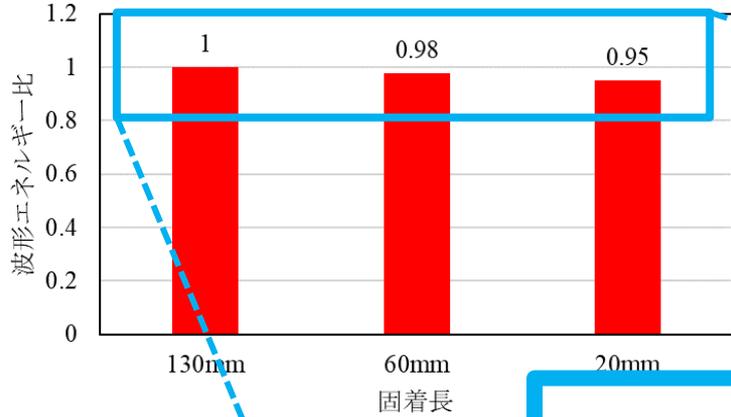
**固着長130mm**  
ボルト中心から100mm



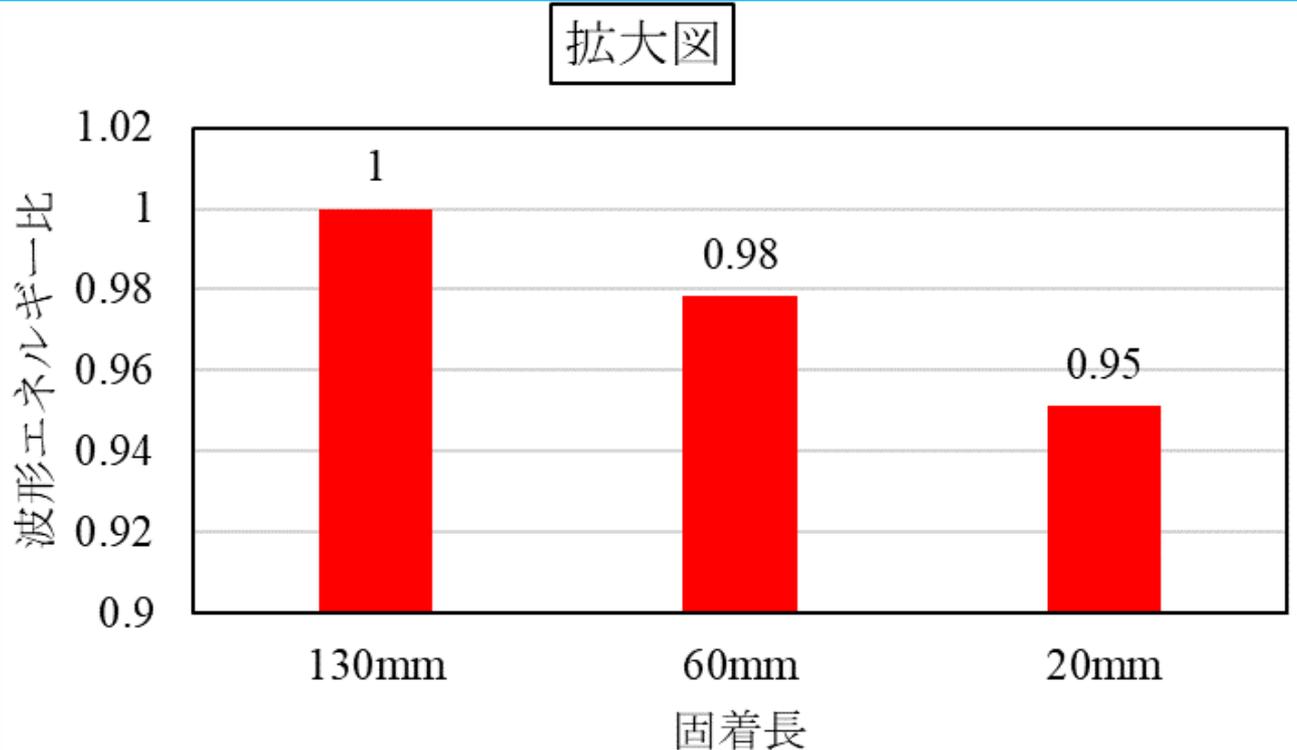
**固着長20mm**  
ボルト中心から100mm



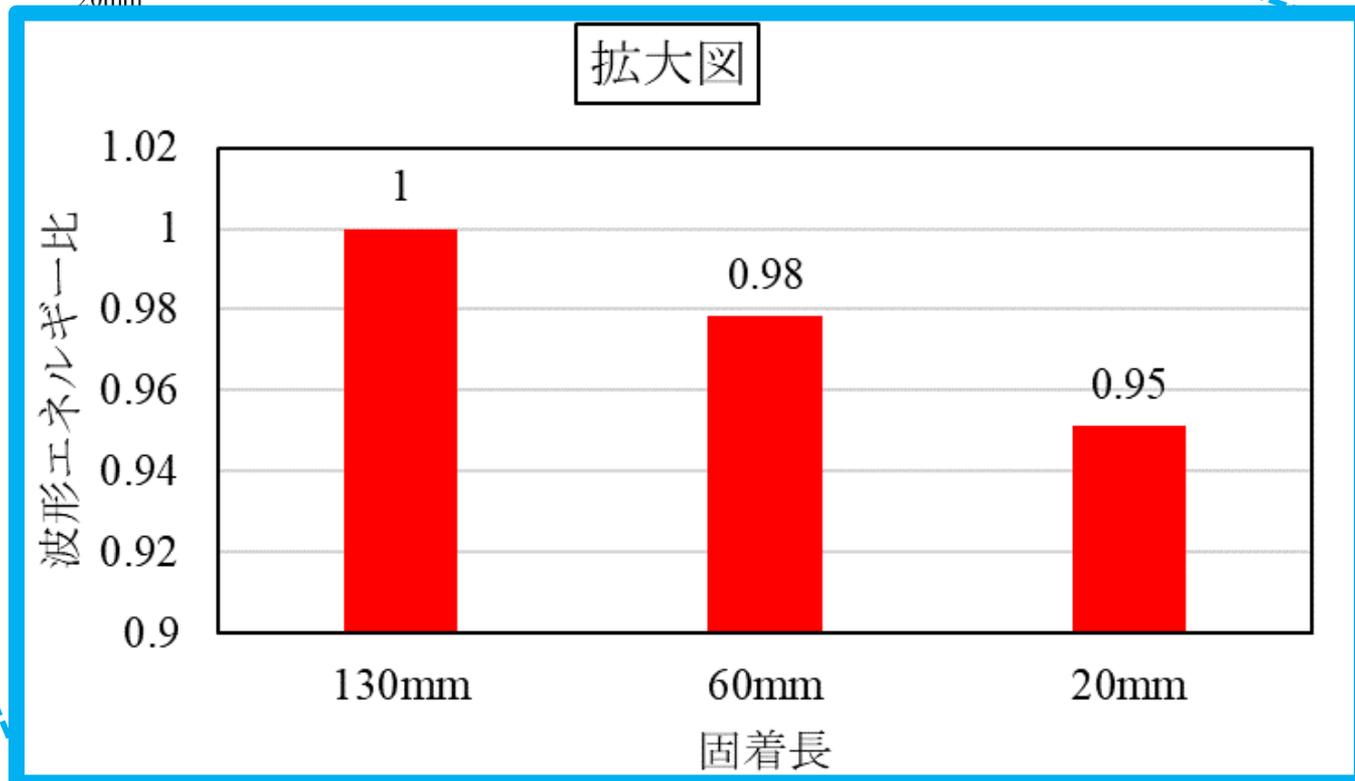
# この差を定量的に比較するため に波形エネルギーを算定



**固着長が減少するにつれて  
波形エネルギーも減少する**



# 附属物がナットで締結された あと施工アンカー部の接着剤充填不良を 評価できる可能性

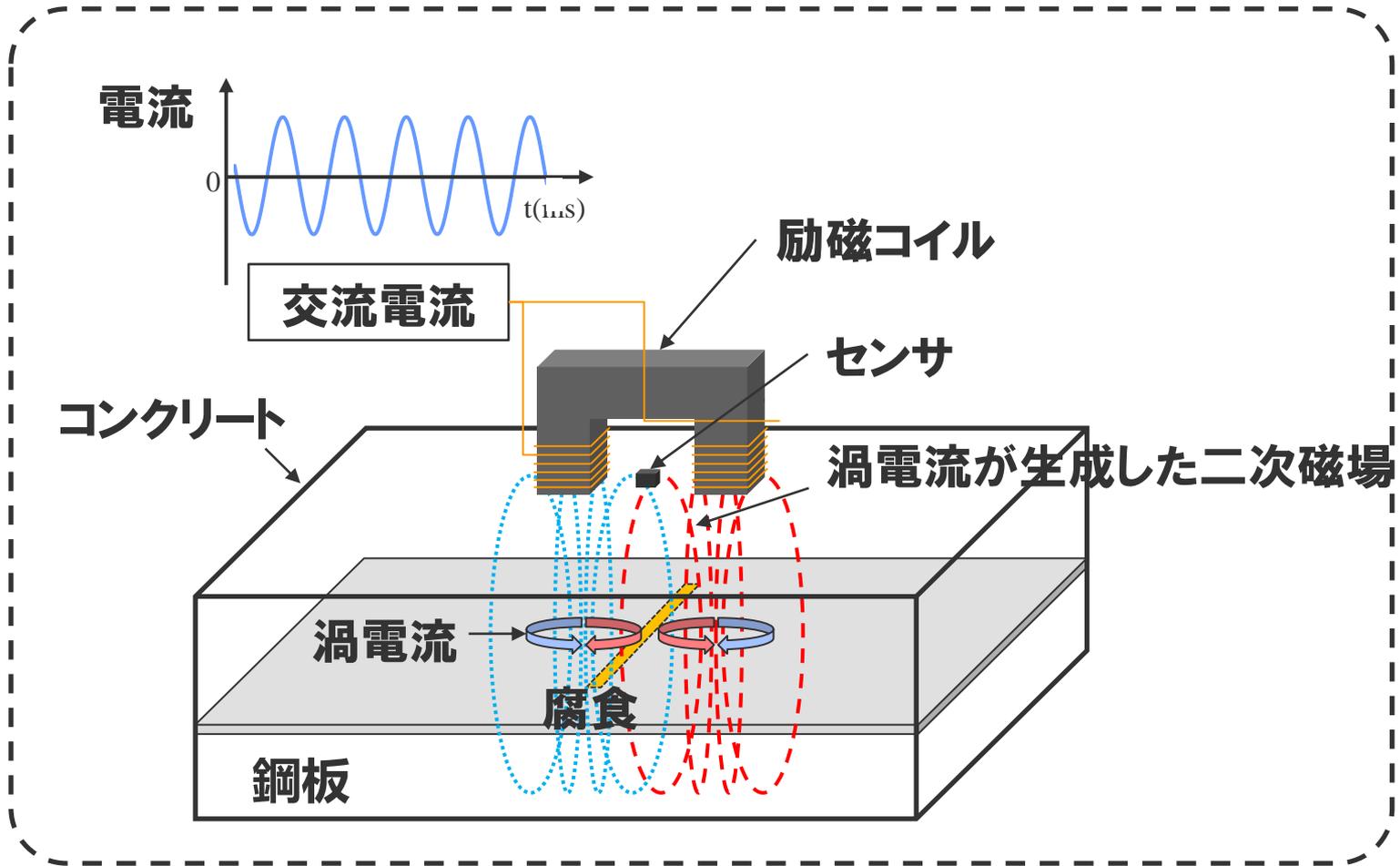




## 最後に・・・少しだけ

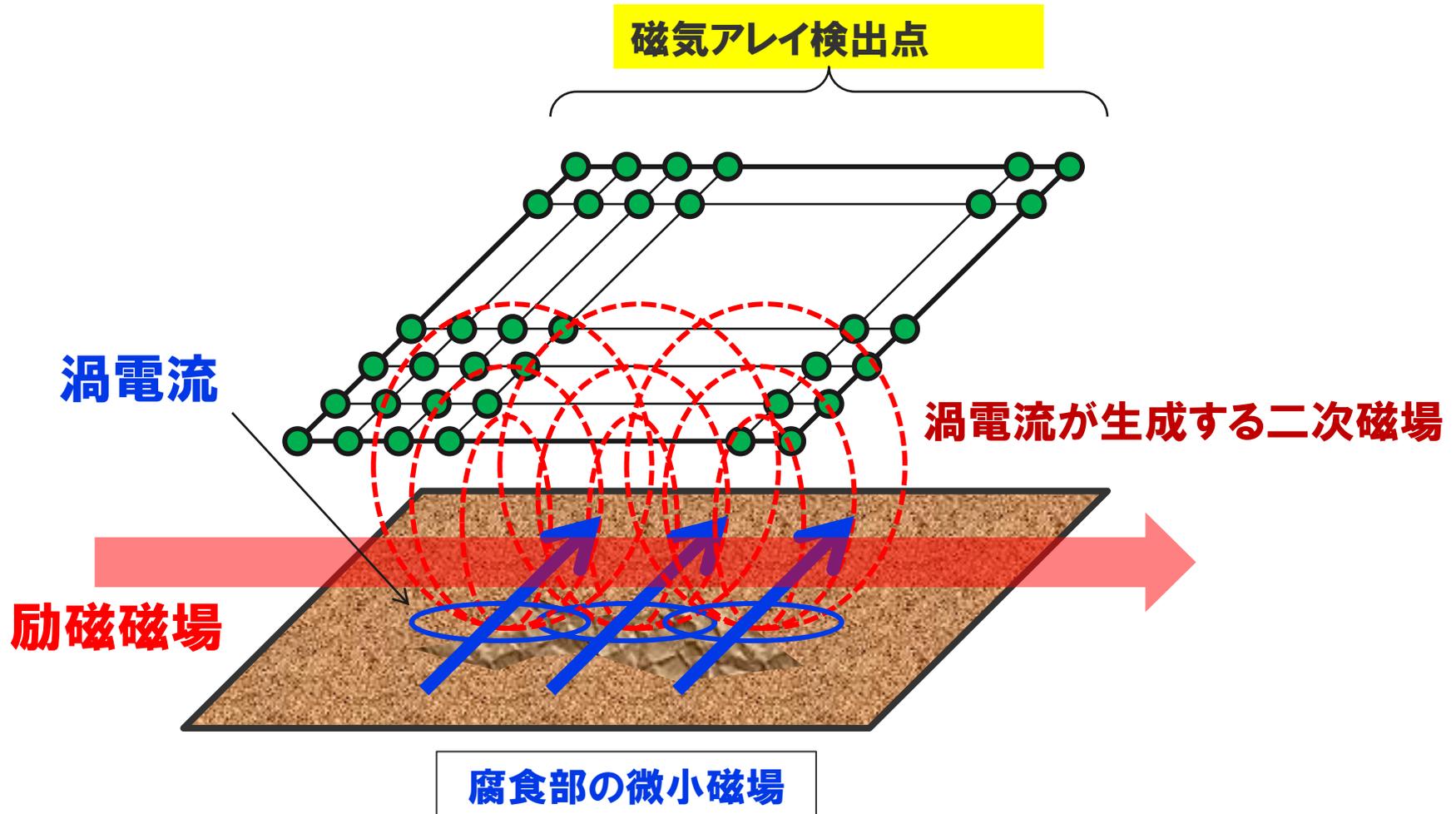
**④コンクリート内部の鋼材の腐食状況の可視化  
のための非破壊検査手法**

# 腐食検出の原理



鋼板上の渦電流の局所的な変化により腐食を可視化

# 磁気アレイ計測



渦電流が生成する二次磁場を磁気センサアレイにより面的に計測

①基本的な波数パターンを切削試験体で模擬

②サーチコイルを二次元的に配列した磁気アレイセンサを用いて基本波数パターンの磁気分布を計測

③コンクリート表面近傍で計測した信号を波数空間のフーリエ変換で基本波数パターンに分解

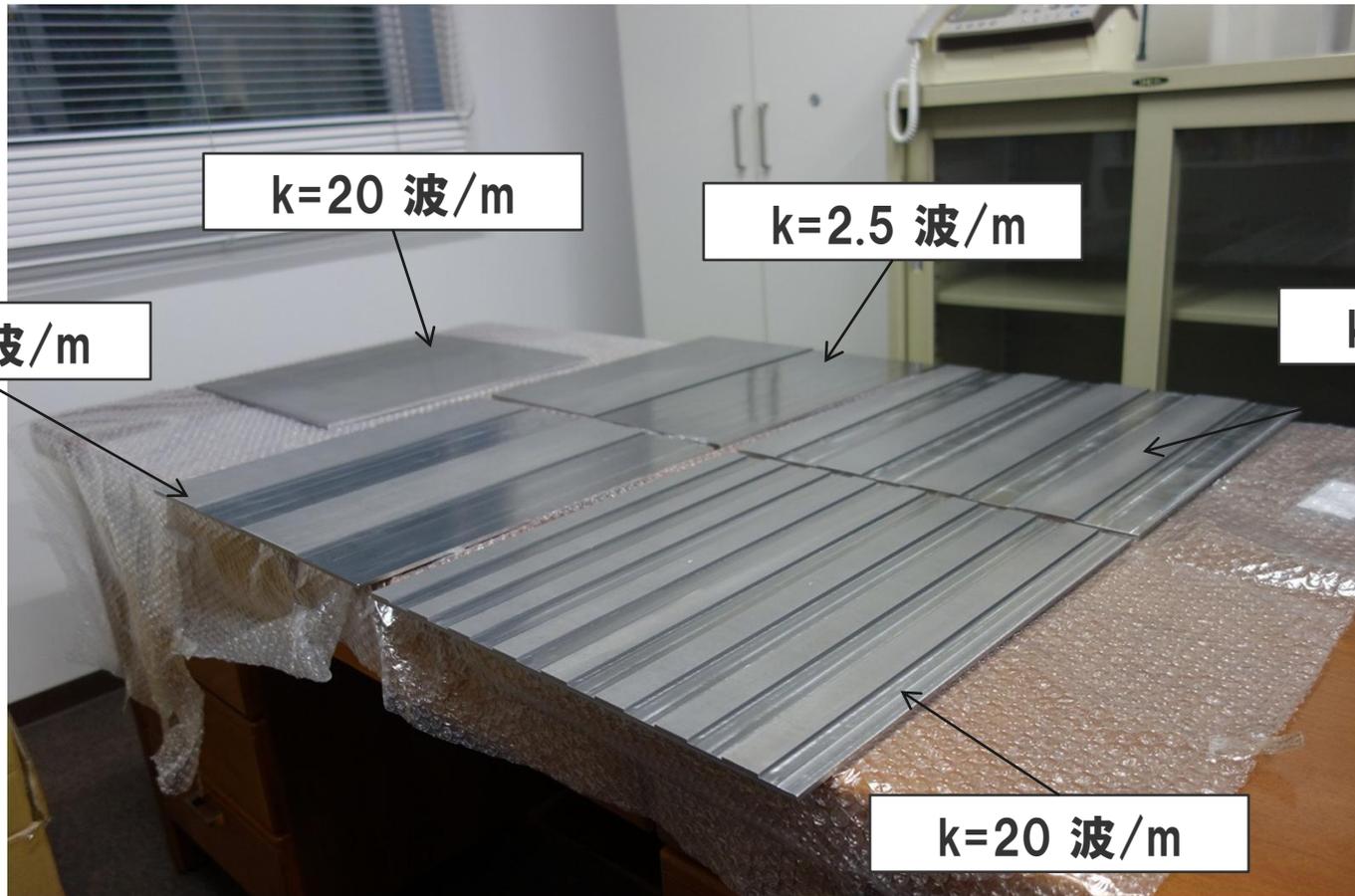
④基本波数パターンの磁場分布を合成し、鋼材表面の磁場分布を再構成



鋼材腐食部での電磁場応答に基づき

鋼材の腐食状況を「逆問題解析」により可視化

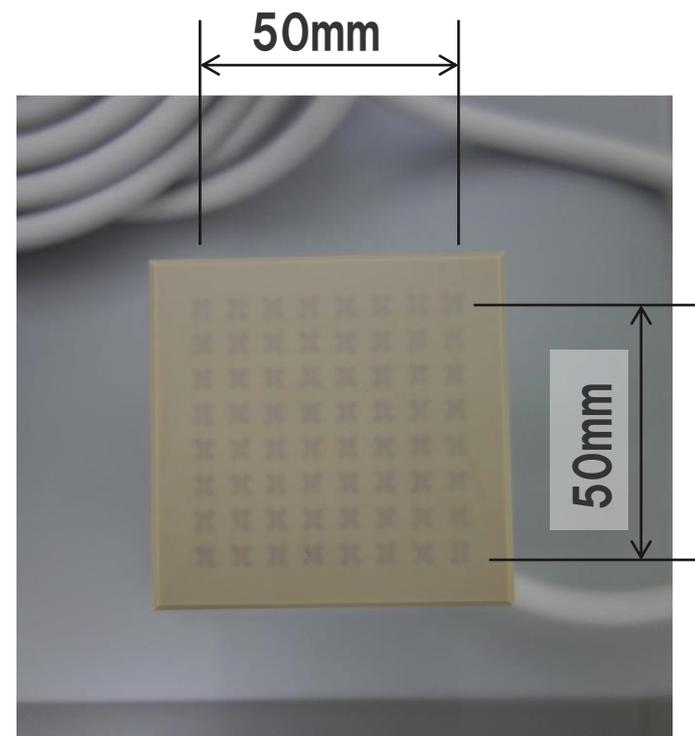
# 基本波数パターンを設けた切削供試体



# 磁気アレイセンサ、磁気アレイ増幅器



磁気アレイ増幅器



磁気アレイセンサ  
(SC×64ch)

# 計測状況



データ収集PC

交流磁場生成装置

磁気センサ信号  
増幅アンプ

試験体

定電流定電圧電源

前置増幅器

シグナルジェネレータ

ロックインアンプ

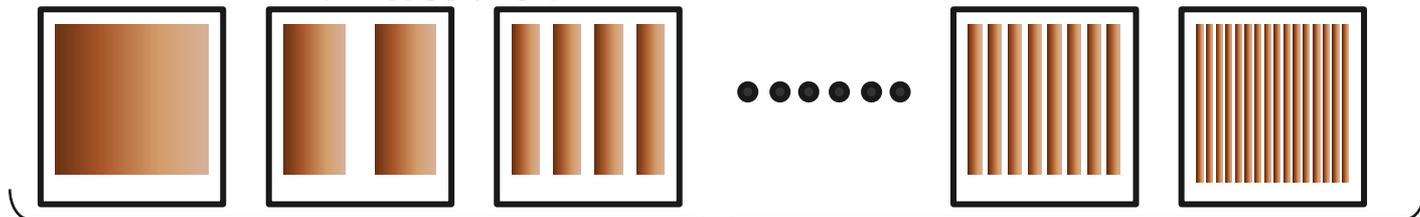
# 腐食の可視化のイメージ

コンクリート表面近傍での磁場分布を基本波数パターンに分解

空間フーリエ  
変換

$$H_i(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} h(k_x, k_y, z) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$$

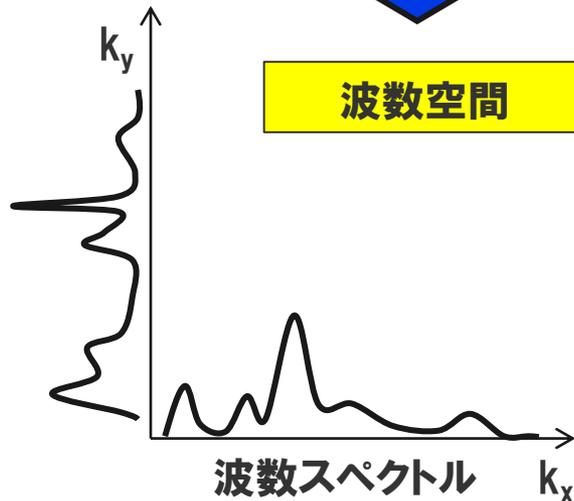
腐食鋼材表面



基本波数パターン



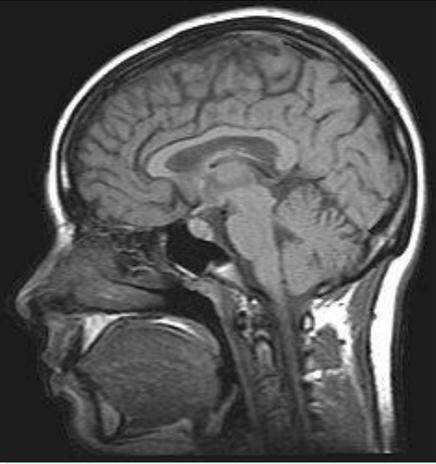
波数空間



鋼材面上の近接磁場として再構成



# 2050年へ向けた社会基盤構造物の長寿命化 のためのイノベーションの例

イノベーション	2050年の目標	期待できる効果の例
<p data-bbox="38 378 415 621">構造物の 内部状況の 可視化</p> 	<p data-bbox="473 378 937 971">弾性波、電磁波、電磁場応答など、 <u>非破壊検査技術</u>を駆使した 構造物の内部可視化が実現</p>	<p data-bbox="975 378 1883 1156">安価な構造物可視化技術の出現により、<b>的確な補修・補強の要否の判断</b>、<b>補修・補強箇所最適化</b>などが可能となることにより、高速道路を始めとして、財政事情の厳しい地方管理の構造物でも経済的なインフラメンテナンスが可能となる。</p>

日本コンクリート工学会(JCI)イノベーション戦略委員会報告書(2020.10):

「未来を守る・変える・創るコンクリートイノベーション」より

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