

## 37. 解析を援用した弾性波法による接着系あと施工アンカー 固着部の接着剤充填状況の非破壊評価手法

立命館大学  
大阪大学大学院  
西日本高速道路株式会社

○ 内田 慎哉  
鎌田 敏郎  
宮田 弘和

### 1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理においては、構造物の状態を適確に把握し、現状を踏まえた上で劣化予測を行い、適切な対策を講じることが重要である。構造物の現状把握のための点検では、コンクリートの品質、コンクリート内部のひび割れの状況や空隙あるいは内部鉄筋の損傷の状態など、構造物表面からの目視では把握が困難なコンクリートの内部欠陥を、非破壊で評価する手法の確立が求められている。コンクリートの非破壊評価手法のうち、弾性波を利用した方法（弾性波法）は、コンクリート中での波の減衰が小さいため、特に実構造物での調査において活躍が期待されている。しかしながら、実際の現場においては、測定対象物の条件（形状・材質等）が様々であるため、非破壊評価結果と削孔などにより調査した実態とは

必ずしも一致しないケースもあり、測定対象物ごとに試行錯誤で評価する場合が少なくない。

このような背景から、著者らは、コンクリート構造物の内部欠陥を効率よく適確に評価するため、対象構造物での計測を実施する前に弾性波動シミュレーションを行い、コンクリート中での弾性波の伝搬挙動を把握した上で、予め、対象とする構造物および内部欠陥に応じた「評価に適した弾性波の入力や受信の条件（計測条件）を決定」、「評価パラメータを選定」および「検出性能（適用範囲）」を把握した後に計測に移行する形の「解析を援用した弾性波法（図-1 参照）」に関する研究に着手し始めている<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、上記アイデアの有効性を検証するためのファーストステップとして、接着系あと施工アンカーにおける接着剤の充填状況を

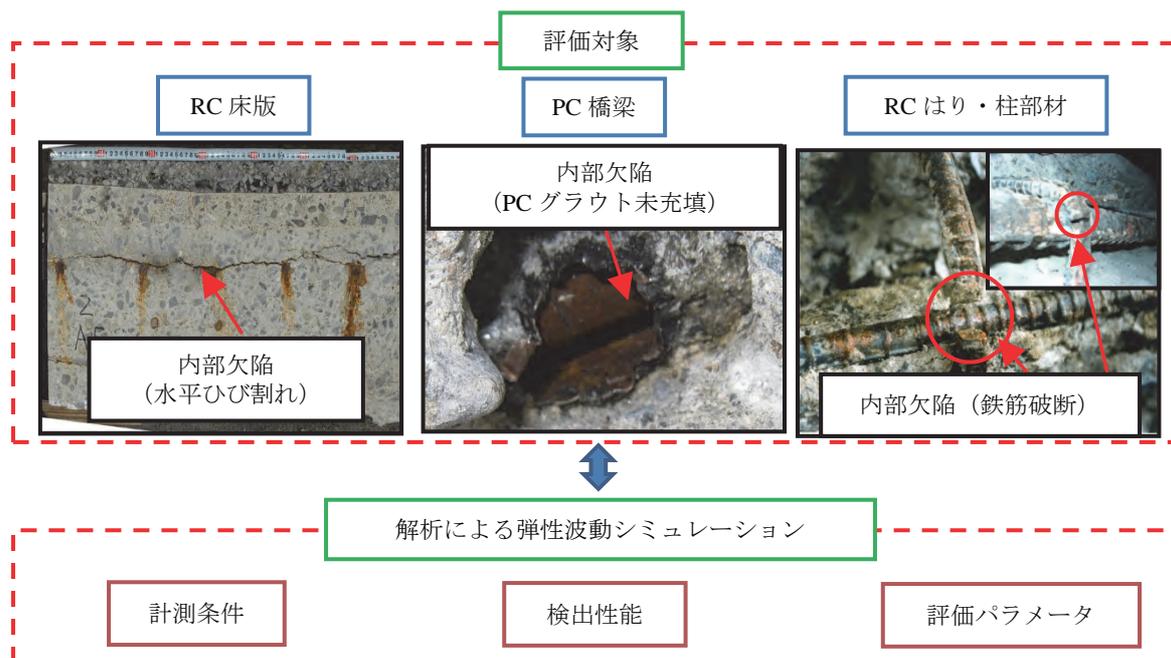


図-1 解析を援用した弾性波法の概要

対象として、弾性波法（電磁パルス法）により定量的に非破壊でこれを評価するための「計測条件」および「評価パラメータ」を、衝撃応答解析により決定した。また、解析で得られた結果の妥当性を検証するため、あと施工アンカーを模擬したコンクリート供試体に対して接着剤の充填状況の電磁パルス法による非破壊評価を試みた。

## 2. 電磁パルス法の概要<sup>2)</sup>

電磁パルス法の概要を図-2に示す。電磁パルス法では、電磁鋼板（鉄心）にマグネットワイヤを巻き付けた励磁コイルにパルス状の電流を流すことによりコイル周辺に瞬間的に磁界を発生させ、これにより生じる電磁力により、コンクリート内部に存在する鉄筋、あるいはアンカーボルトなどの磁性体を非接触で振動させる。この方法では、対象部材の表面に設置した振動センサにて磁性体の振動にともなう弾性波を捉え、これを波形分析することにより、強磁性体界面の欠陥や付着状態を非破壊で評価することができる。

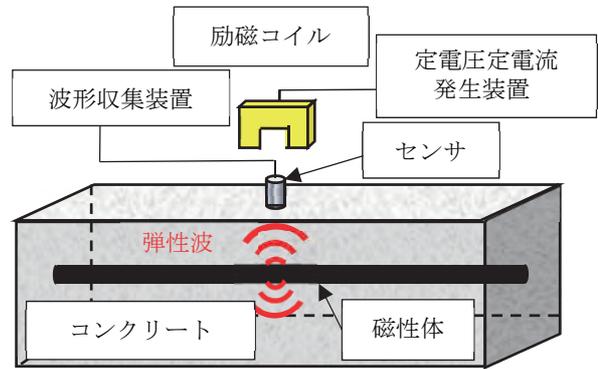
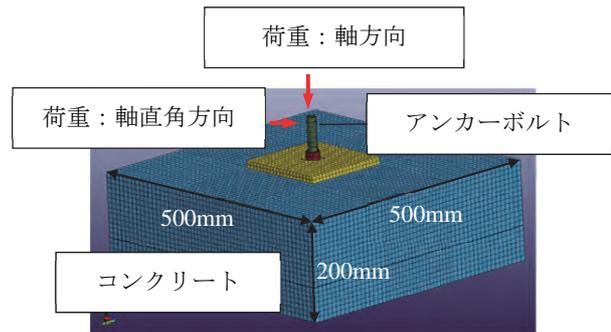
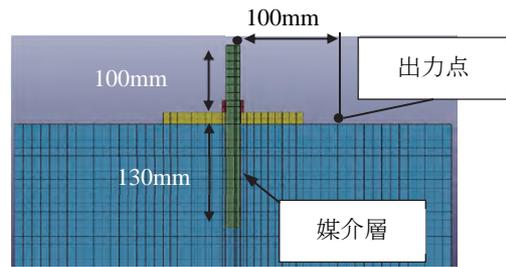


図-2 電磁パルス法の概要



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-3 解析モデルの概要

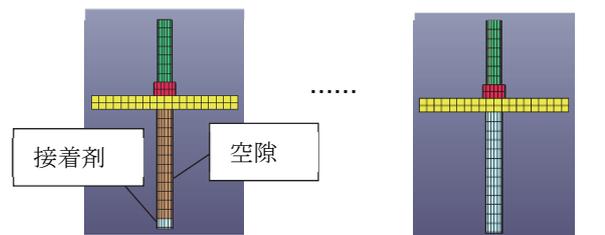
## 3. 衝撃応答解析による計測条件および評価パラメータの決定

### 3.1 解析概要

図-3に解析モデルを示す。モデルはトンネルの天井板を固定する接着系あと施工アンカーを想定し、縦500mm×横500mm×高さ200mmのコンクリート直方体に、直径16mm、長さ250mmのアンカーボルトを模擬した鋼棒をコンクリート表面から130mmの深さとなるまで埋め込んだ。コンクリートとアンカーボルトの間には、接着剤の有無を模擬するための媒介層を設けた。解析モデルにおける各構成材料の物性値を表-1に示す。各構成材料の要素は、いずれも8節点6面体ソリッドとし、要素の代表長さは約10mmとした。境界条件としては、コンクリート部分の全側面(500mm×200mmの面を4面)は無反射条件とした。一方、プレートとボルトとは非接触とし、プレートはコンクリート表面に固定した。電磁パルス法による弾性波入力には、図-3(a)に示すように、ボルト軸方向に荷重を与える場合およびボルト軸直角方向の場合の2ケースを設定した。いずれのケースも、波形出力位置は、図-3(b)に示すコンクリート表面の1節点とした。接着剤の充填状況の違いが弾性波挙動に与える影響を把握するために、媒介層(長さ130mm)をボルト長さ方向に13等分して接着剤の有無を模擬した。媒介層全要素に接着剤の物性値を設定したものを「健全度レベル13」とし、アンカーボルト最下部の要素のみを接着剤、それ以外を空気として設定したものを「健全度レベル1」とした(図-4参照)。さらに

表-1 解析モデルの物性値

物質	弾性係数 (GPa)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比
コンクリート	30	2.3	0.2
プレート	200	7.9	0.3
ボルト	200	7.9	0.3
接着剤	2	1.2	0.4
空気	1.6E-20	2.2E-13	2.0E-20



(a) 健全度レベル1

(b) 健全度レベル13

図-4 健全度レベルの一例

接着剤の充填状況にバリエーションを持たせるため、ボルト長さ方向に接着剤要素を段階的に増やし、健全度レベルを全 13 段階に設定した。

### 3.2 解析結果および考察

#### (1) ボルト軸方向入力

図-5 に解析により得られた速度波形の一例として、ボルト軸方向に弾性波を入力した場合の健全度レベル 1 およびレベル 13 をそれぞれ示す。健全度レベル 13 では、波形の振幅が健全度レベル 1 よりも明らかに大きいことがわかる。健全度レベル 13 では、アンカーボルト上端で入力した弾性波がボルトの深さ方向に伝搬し、これがコンクリート部分に到達すると、接着剤を介してコンクリート部分にも伝搬することになる（図-6 (b) 参照）。一方、健全度レベル 1 では、媒介層では接着剤よりも空隙が占める割合が大きいいため、コンクリート部へ伝搬する弾性波の成分が少なくなる（図-6 (a) 参照）。これにより、コンクリートで出力した波形に差異が生じたものと考察できる。

速度波形の振幅の大きさを定量的に表現するため、波形における各振幅を 2 乗した後これを総和したものを「波形エネルギー」と定義し、次式により算出することとした。

$$E = \sum_{i=0}^n y_i^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $E$  : 波形エネルギー ( $\text{mm}^2/\text{s}^2$ )、 $y_i$  : 速度波形における各振幅 ( $\text{mm/s}$ )、 $n$  : 振幅の数 ( $n=1000 : 0 \sim 1000\mu\text{s}$ ) である。図-7 に波形エネルギーと健全度レベルとの関係を示す。図に示す波形エネルギー比とは、健全度レベル 13 で算出した値に対する各健全度レベルでの値の比である。図より、健全度レベルが大きくなるにしたがって、波形エネルギーが増加していく傾向が見られる。

#### (2) ボルト軸直角方向入力

ボルト軸直角方向入力における波形エネルギーと健全度レベルとの関係を図-8 に示す。健全度レベルと波形エネルギーとの間に相関関係は確認できない。このような傾向になった理由としては、波の入力方向と伝搬方向とが異なっているため、弾性波が伝搬する際に干渉し、複雑な形態となって各媒質中を伝搬したことが挙げられる。

### 4. 解析により決定した手法の妥当性の検証

#### 4.1 実験概要

図-9 に供試体の概要を示す。コンクリート部分の寸法は、縦 1000mm×横 1000mm×厚さ 350mm とした。コンクリート部分には、まず、直径 24mm、深さ 130mm の穴を開けた。続いて、孔内に長さ 240mm のアンカーボルト (M16, SS400 相当材) をコンクリート表面から 110mm 突出するように設

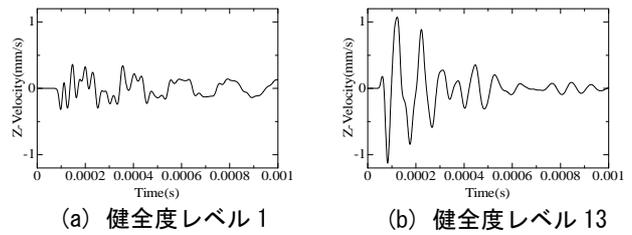


図-5 ボルト軸方向入力によりコンクリートで出力した速度波形の一例

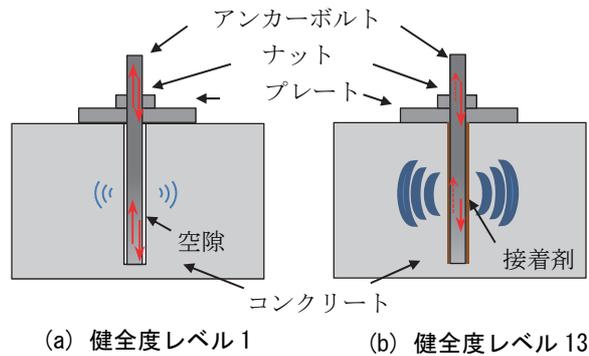


図-6 弾性伝搬挙動のイメージ

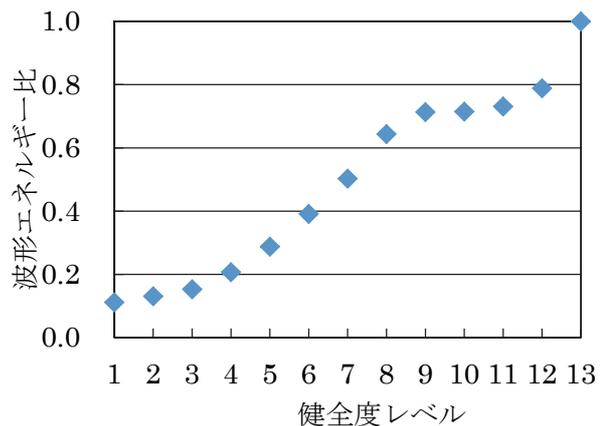


図-7 ボルト軸方向入力により算出した波形エネルギー

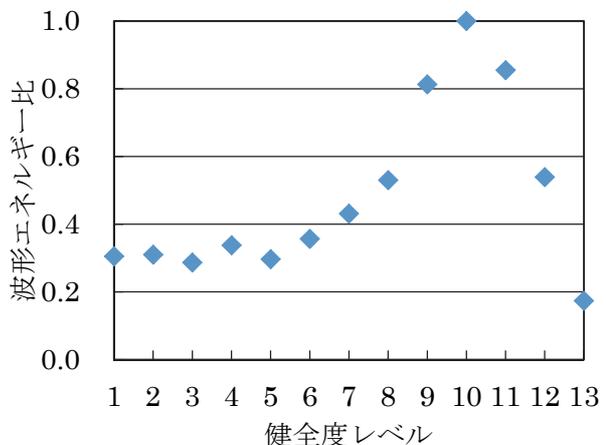


図-8 ボルト軸直角方向入力により算出した波形エネルギー

置した後、接着剤（エポキシ樹脂）を流し込むことでボルトを固定した。接着材の充填パターンを図-10に示す。本研究では、接着材の充填率として4水準（25, 50, 75, 100%）を設けた。ここでいう充填率とは、孔内の全高（削孔深さ）130mmに対する硬化後の接着剤高さの百分率である。具体的には、例えば充填率が25%のパターンでは孔内の底から高さ32.5mmとなるまで接着剤を注入している。以上の方法により、接着剤の充填率が異なるアンカーボルトを供試体1体に対して4本設置した（図-9参照）。なお、コンクリートの設計基準強度は $f_c=24\text{N/mm}^2$ とし、供試体内部にはアンカーボルト以外の強磁性体（鉄筋）を設置していない。いずれのアンカーボルトにおいても100mm×100mm×厚さ9mmの鋼製プレートを設置し、ナット2個によりプレートを固定できるようにした。

写真-1に計測概要を示す。励磁コイルは外径35mm、内径31mmの円筒形状となっており、コイル中央の空心部にアンカーボルトを貫通させ、コイル上端とボルト上端が一致するように設置した。このリング形状の励磁コイルに瞬間的に大電流（約3200A）を流し、動磁場を発生させることによりアンカーボルトを振動させた。ボルトの振動に伴って生じた弾性波は、ボルト中心から100mm離れたコンクリート表面に貼り付けた振動センサにより受信した（写真-1参照）。センサで受信した信号は、サンプリング周波数2MHzでデジタル化した後、波形収集装置で記録した。記録した波形に対して、波形エネルギー（振幅の2乗総和）を

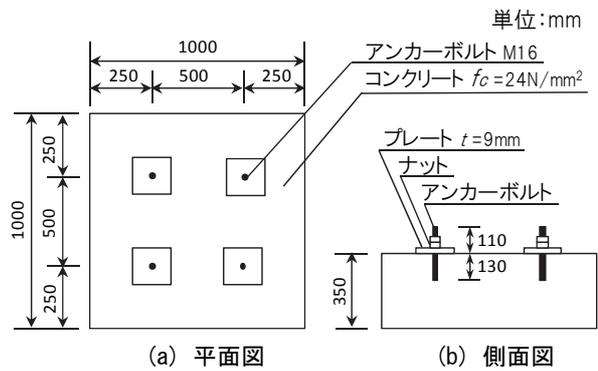


図-9 供試体概要

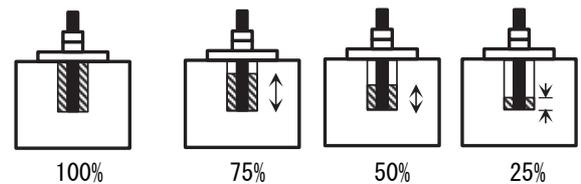


図-10 接着剤の充填パターン

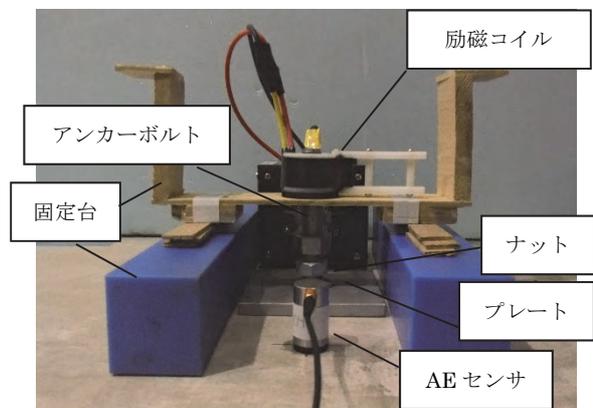
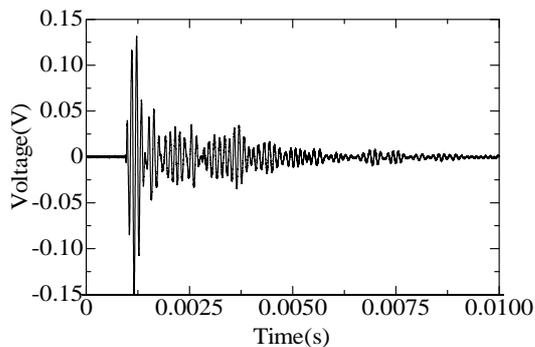
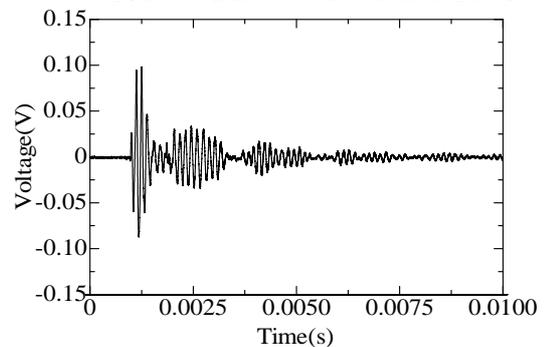


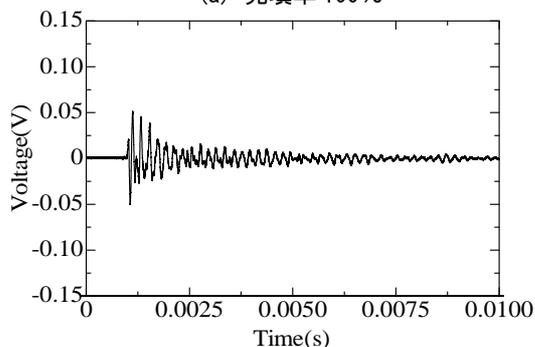
写真-1 電磁パルス法による測定状況



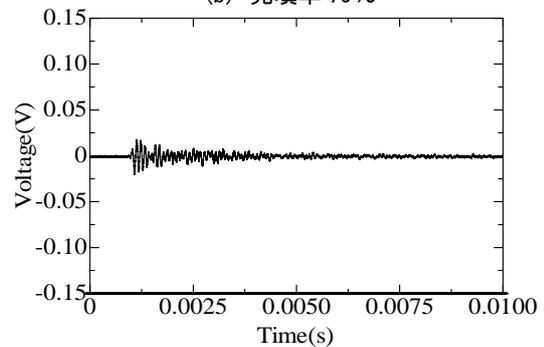
(a) 充填率 100%



(b) 充填率 75%



(c) 充填率 50%



(d) 充填率 25%

図-11 受信波形の一例（ナットが緩んだ状態）

算出した。使用した振動センサは、15kHz～100kHzの間に応答感度を有し、特に 25kHz～80kHz の間では感度特性が比較的フラットなものである。

計測においては、いずれの充填率のパターンにおいても、測定回数を 10 回とし、評価パラメータのばらつきを把握することとした。また、いずれの充填率においても、ボルトの基本的な振動特性を把握するためにナットとプレートを設置しない場合と、両者を設置した上でトルクレンチにより 80N・m でボルトを締め付けた場合の 2 ケースを設定した。

#### 4.2 実験結果および考察

##### (1) ナットが緩んだ状態での測定結果

図-11に、ナットが緩んだ状態で測定を行った場合における接着剤の各充填率で得られた受信波形の一例をそれぞれ示す。この図より、波形の振幅が接着剤の充填率によって異なることが確認でき、充填率が小さくなるに従って波形の最大振幅値が小さくなる傾向を示した。このような傾向は、解析結果と一致している（図-5参照）。

図-12に、ナットが緩んだ状態で測定を行った場合の波形エネルギーと接着剤の充填率との関係を示す。図に示す波形エネルギー比は、接着剤の充填率 100%で算出した値に対する各充填率での値の比である。また、いずれの充填率においても、測定値の平均、最大、最小の範囲を同図に示している。この図より、充填率が大きくなると波形エネルギーも大きくなる傾向がみられた。これは図-6に示すように、空隙部分の大きさの変化に伴い弾性波がアンカーボルトからコンクリート中へ伝搬する際の減衰に差異が生じたためと考えられる。

##### (2) ナットで締め付けた状態での測定結果

図-13に、ナットで締め付けた状態で計測した場合における波形エネルギーと接着剤の充填率との関係を示す。充填率の増加に伴い、波形エネルギーが大きくなることが確認できる。しかしながら、充填率 75%と 100%の波形エネルギー比は大小が逆転しており、充填率が高い場合には波形エネルギーから充填率の違いを判別することは困難であることがわかった。これは、ナットで締め付けることによってプレートとコンクリートが接する面の圧力が大きくなることから、ボルトを伝搬する弾性波がプレートからコンクリート表層へと伝搬しやすくなることに起因すると考えられる（図-14参照）。

上記の考察を踏まえ、コンクリートに埋め込まれたアンカーボルト部分に振幅の大きな弾性波を伝搬させることが充填状況の評価のためには重要であると考えられることから、与える磁場の強さをより大きくする工夫をした上で計測を行うこととした。具体的には、アンカーボルト頭部にネオ

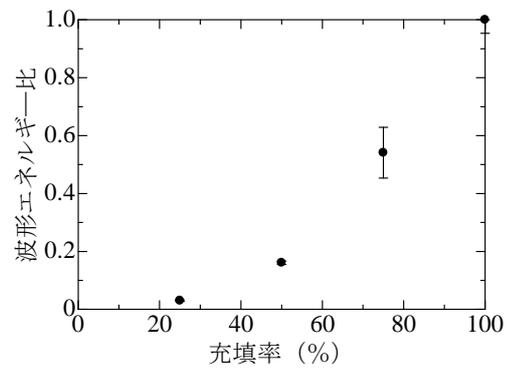


図-12 波形エネルギー（ナットが緩んだ状態）

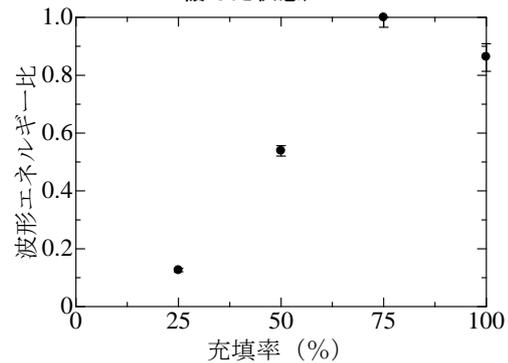


図-13 波形エネルギー（ナットを 80N・m で締め付けた状態）

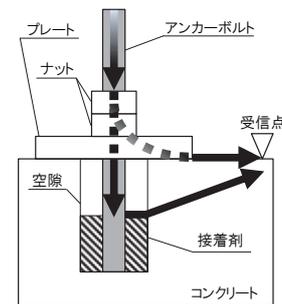


図-14 弾性波伝搬経路のイメージ

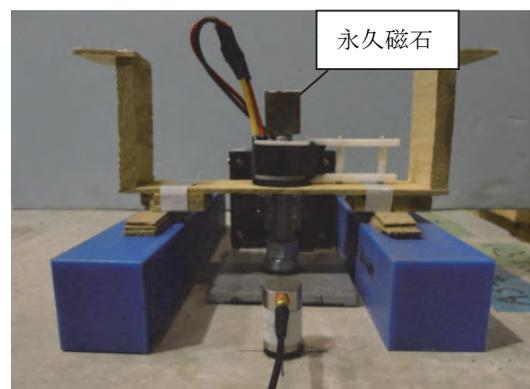


写真-2 永久磁石を併用した電磁パルス発生状況

ジム磁石（永久磁石）を設置し静磁場を付与した状態で励磁コイルにより動磁場を発生させて、ボルト内部に弾性波を伝搬させる方法である。測定状況を写真-2に示す。なお、この測定条件については、永久磁石を用いることを除けば、4.1と全て

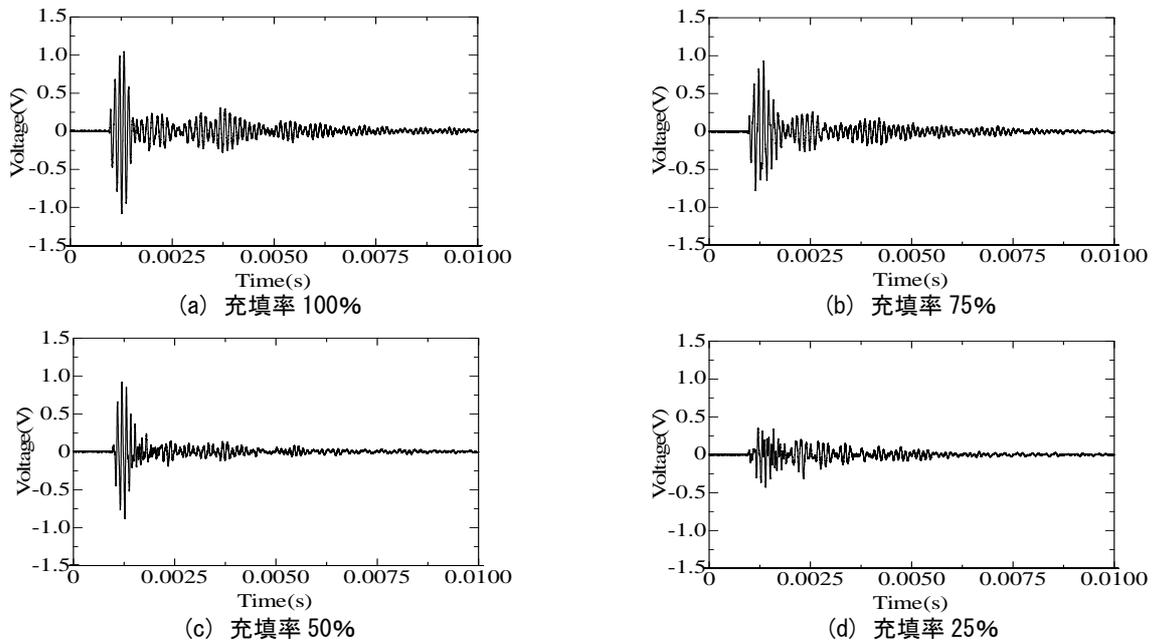


図-15 受信波形の一例（締め付けあり，永久磁石を併用）

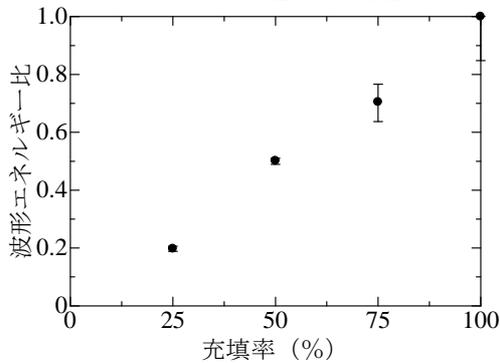


図-16 波形エネルギー（締め付けあり，永久磁石併用）

同じである。得られた受信波形の一例を図-15に示す。この図より、いずれの充填率の場合においても図-11に示す波形よりも10倍程度大きな振幅が得られていることがわかる。また、この測定方法により得られた波形エネルギー比を図-16に示す。ナットで締め付けた状態においても、充填状況に応じて波形エネルギーが一定の割合で大きくなる事が明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

衝撃応答解析の結果：

- (1) ボルト軸方向に弾性波を入力し、ボルト近傍のコンクリート表面において受信される弾性波の波形エネルギーに着目することで、接着系あと施工アンカー固着部の接着剤の充填状況を評価できることが明らかとなった。

解析結果に基づき、供試体を対象とした電磁パルス法による測定を行った結果：

- (2) ボルトにプレートが設置され、ナットが緩んだ状態では、受信した波形エネルギーと接着

剤の充填率との間に相関があり、これにより充填程度を評価できることがわかった。

- (3) ボルトがナットにより締め付けられた状態においては、充填状況の違いを明確に把握することが困難であった。
- (4) しかしながら、永久磁石（静磁場）を併用した磁場の強さを高める方法を用いれば、波形エネルギーからアンカーボルト固着部の充填率の違いを的確に評価できる可能性があることを明らかにした。

上記(1)から(4)の結果：

- (5) 「解析を援用した弾性波法」は、接着系あと施工アンカーにおける接着剤の充填状況を評価する上で、有効な手法であることが明らかとなった。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B）25289132）の援助を受けて行なったものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) S. Uchida, T. Kamada, T. Iwasaki and H. Tsunoda: Non-Destructive Evaluation for Horizontal Cracks in RC Slabs of Highway Bridges Based on Analysis-Aided Impact Elastic-Wave Methods, *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, pp.827-834, 2013.
- 2) K. Munakata, T. Kamada, S. Uchida, H. Mae and H. Minezawa: Nondestructive Evaluation of Deterioration around Rebar Based on Elastic Waves Generated by Electromagnetic Force, *Proceedings of the 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, NDTCE'09*, pp.107-112, 2009.