# 論文　アンカーボルト打撃時の応答特性に着目した接着材充填状況の非破壊評価手法

林本　和也*1・内田　慎哉*2・鎌田　敏郎*3・宮田　弘和*4

**要旨**：本研究では，鋼球でアンカーボルト頭部を打撃することにより弾性波を入力する方法により得られた波形エネルギー，伝搬時間および機械インピーダンスを評価指標として，接着系あと施工アンカー固着部の接着剤の充填状況の評価可能性について検討した。その結果，波形エネルギーは，充填率を評価する指標としては，感度が良好であることが明らかとなった。一方，伝搬時間および機械インピーダンスは，評価指標としての感度は鈍く，実構造物における充填率を評価するための有効な指標とはなりにくいことがわかった。

**キーワード**：接着系あと施工アンカー，非破壊評価手法，波形エネルギー，伝搬時間，機械インピーダンス

## 1. はじめに

道路標識やトンネルの天井板などを吊り下げるために使用されている接着系あと施工アンカーは，母材コンクリートの削孔部にボルトを挿入し，そこに接着剤を流し込み固着させ，性能を発揮している。つまり，あと施工アンカーで吊り下げている構造物の安全性が確保されるためには，少なくとも接着剤の充填状況が適切であることが前提条件である。しかしながら，近年では，接着材充填状況の不良が原因の一つとして発生したと考えられる天井板の落下事故も報告されており，適切な維持管理を行うためには，接着系あと施工アンカーの接着剤充填状況を定量的に評価できる手法の確立が必要である。

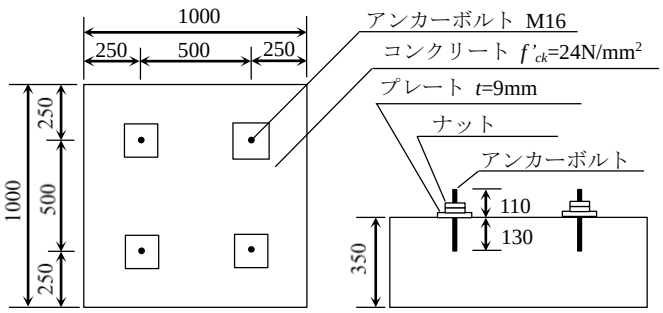
著者らはこれまでに，ボルトを非接触で振動させかつ再現性の高い弾性波を入力できる電磁パルス法を用い，接着剤を介してボルトから伝わる弾性波をコンクリート表面で受信し，その波形を分析することで，接着剤充填状況の評価可能性について検討してきた[1)]ただし，この適用に当たっては，現地の制約により例えば，狭小な作業空間への機材搬入が困難な場合や，電源確保が困難な場合が懸念されるといった課題があった。

そこで本研究では，鋼球でボルトを打撃し弾性波を入力する方法により，接着剤の充填状況の評価可能性を検討するため，供試体の測定実験を行った。本手法では，人力で衝撃を与えるため入力にばらつきが生じることも考えられるが，より簡易に入力できる方法であるため適用できる場合のメリットは大きいと考えられる。

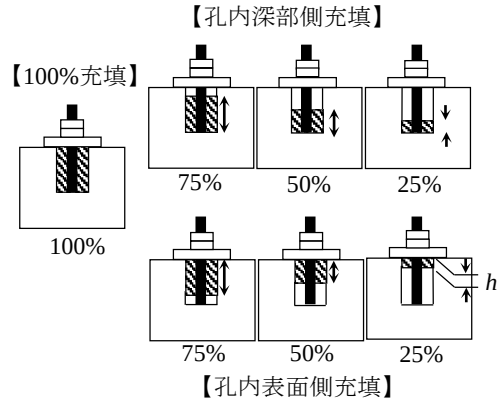
## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

**図－1** に供試体の概要を示す。供試体のコンクリート部分の寸法は，縦 1000mm×横 1000mm×厚さ 350mm とし，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て，まず，コンクリート部分を直径 24mm，深さ 130mm で削孔した。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 突出するよう設置した後，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。接着剤の充填パターンを**図－2** に示す。本研究では，接着剤の




**図－1　供試体概要**




**図－2　接着剤充填パターン**

*1 大阪大学　工学部地球総合工学科（学生会員）
*2 立命館大学　理工学部環境システム工学科講師　博士（工学）（正会員）
*3 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻教授　博士（工学）（正会員）
*4 西日本高速道路株式会社　本社技術本部技術環境部技術統括課主任

充填位置について，孔内の深部側が充填されコンクリート表面側に空隙が存在するもの（以下，孔内深部側充填）と，それとは逆に孔内の深部側が空隙で表面側が充填されたもの（以下，孔内表面側充填）をそれぞれ作製した。各充填パターンにおける接着剤の充填率は，それぞれ 3 水準（25%，50%，75%）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の高さ（**図－2** 中の $h$）の百分率である。また，孔内全てに接着剤を充填した充填率 100%も併せて作製した。以上の方法により，コンクリートに接着剤の充填率の異なるアンカーボルトを 4 本設置した（**図－1** 参照）。コンクリートの設計基準強度は $f'_{ck}$ = 24N/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）は設置していない。

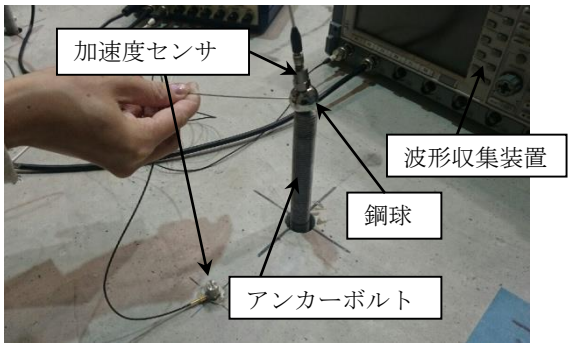
いずれのアンカーボルトにおいても，長さ 100mm×幅 100mm×厚さ 9mm の鋼製プレートを設置し，ナット 2 個によりプレートを固定できるようにした。

### 2.2 鋼球打撃による計測

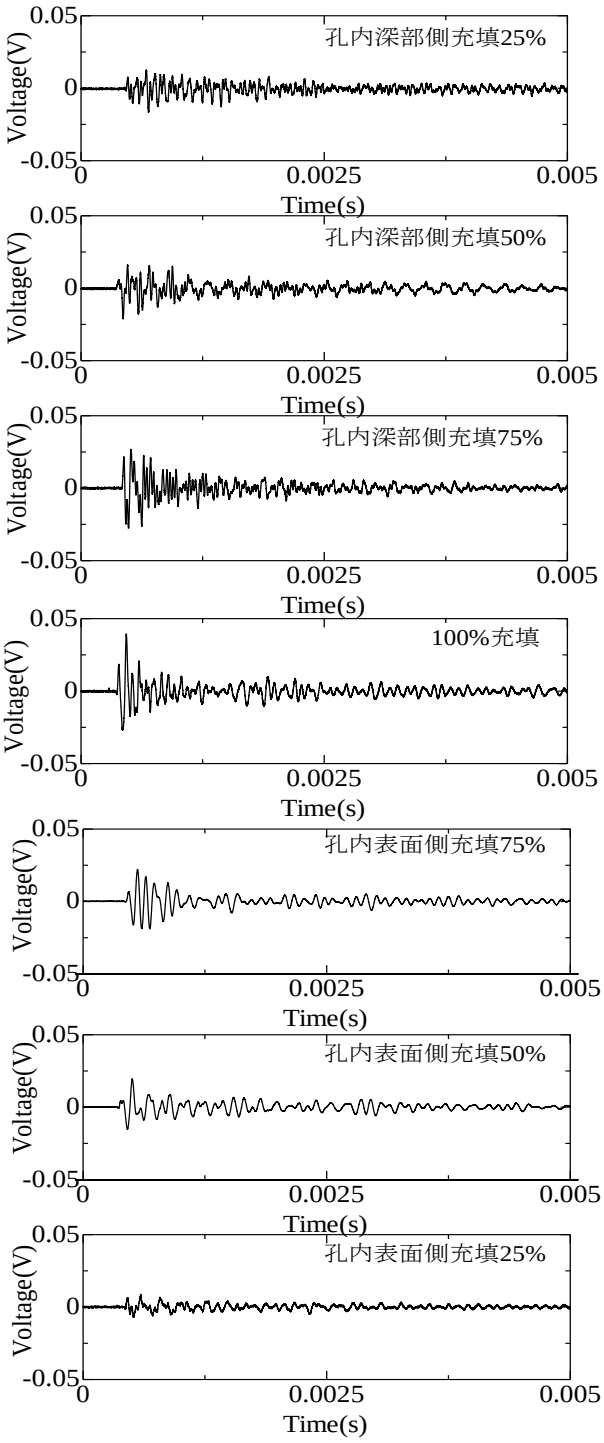
計測概要を**写真－1** に示す。加速度センサを取り付けた鋼球によりボルト頭部を打撃し，ボルトの振動に伴い生じた弾性波をボルト中心から 100mm 離れたコンクリート表面に張り付けた加速度センサにより受信した。同時に，ボルトの振動特性を把握するため，鋼球に取り付けた加速度センサで波形（以降，打撃入力波形）も収集した。各センサで受信した信号は，サンプリング周波数 2MHz，サンプリング数 10000 点で電圧の時刻歴波形として波形収集装置に記録した。コンクリートに取り付けたセンサで受信した波形（以降，受信波形）からは「波形エネルギー」を，鋼球に設置したセンサで受信した打撃入力波形からは「機械インピーダンス」を，また両波形から「伝搬時間」をそれぞれ算出した。この指標の具体的な計算方法は 3.1 で説明する。なお，コンクリート表面に設置した加速度センサは，0.003～30kHz においてフラットな応答感度を有する加速度センサを用いた。一方，鋼球に取り付けた加速度センサは，0.0002～25kHz においてフラットな応答感度を有する加速度センサである。なお，いずれのセンサの場合もフィルタの設定は行っていない。

計測では，いずれの接着剤の充填パターンにおいても，鋼球打撃による衝撃力の大きさや入力周波数の違いが評価に与える影響を把握するため，鋼球直径は 9.6mm および 19.1mm の 2 種類の鋼球を使用した。

各充填率に対して測定回数は 10 回とし，評価パラメータのばらつきを把握した。また，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。




**写真－1　鋼球打撃による計測概要**




**図－3　受信波形の一例（鋼球直径 9.6mm）**

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ボルトのみの状態で測定した場合

#### (1) 波形エネルギー

直径 9.6mm の鋼球を用いて，ボルトのみの状態の計測で得られた受信波形の一例を**図－3** に示す。孔内深部側充填 75%と 100%では概ね同じ形状の波形になっているものの，基本的には，孔内深部側充填および孔内表面側充填のいずれにおいても，充填率の増加に伴い，0s～0.00125s における波形の振幅値が大きくなっている。

そこで，受信波形における振幅の差異を定量的に把握するために，著者らの既往の研究 [1]で定義している波形エネルギーを算出した。波形エネルギーとは，サンプリングする各点における振幅値の 2 乗和で表されるもので，本研究では，打撃ごとにボルトへ与える衝撃力が異なるため，受信波形の振幅値を打撃入力波形の最大振幅値で除した後，次式によって波形エネルギーを算出した。

$$E = \sum_{i=0}^{n} \left( y_i / A_{\max} \right)^2 \tag{1}$$

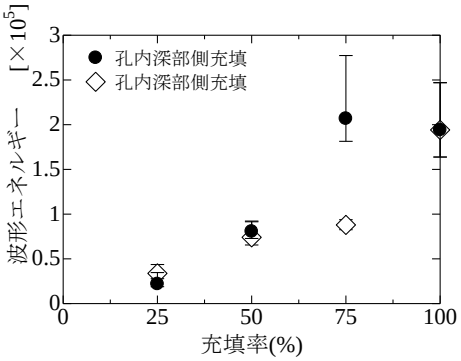
ここに，$E$：波形エネルギー，$y_i$：受信波形における各サンプリング点の振幅（V），$n$：受信波形におけるサンプリング数（$n$=10,000：0～5,000μsec），$A_{max}$：打撃入力波形の最大振幅値(V)である。

**図－4** に，各鋼球で算出した波形エネルギーと接着剤の充填率との関係を示す。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。いずれの鋼球においても，孔内表面側充填では，充填率が大きくなると波形エネルギーも増加する傾向を示した。ボルト頭部から入力した弾性波は接着剤を介してコンクリートへ伝搬するため，接着材の充填率が大きくなるとコンクリートへ伝搬する弾性波の成分も大きくなり，波形エネルギーも大きくなったと考察できる。一方，孔内深部側充填では，全体的に充填率が大きくなると波形エネルギーも増加するが，充填率 75%と充填率 100%ではその傾向が逆転した。なお，逆転現象が生じた理由は現段階では不明であり，今後詳細に検討する必要がある。

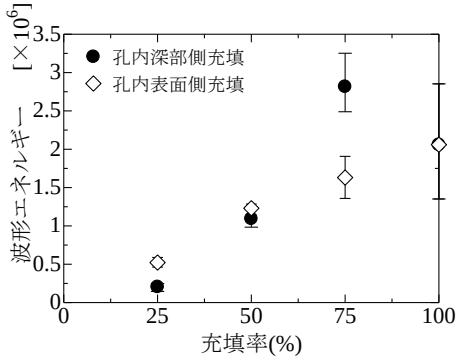
続いて，10 回の計測のばらつきに着目すると，いずれの充填パターンにおいても，充填率が 75%と 100%の場合のばらつきがそれ以外の充填率と比較して大きくなっている。これは，打撃入力波形のばらつきなどが影響していると考えられるため，今後詳細に検討する予定である。しかしながら，波形エネルギーを相対的に比較すれば，明らかに充填率の低いアンカーボルトを検出できる可能性があることが明らかとなった。

#### (2) 機械インピーダンス

機械インピーダンスは，打撃対象が線形の機械系だと仮定し，ある 1 点に加えられた力 $F$ を，その結果生じた速度 $V$ の，力と同じ方向成分で除した値であり，評価対象の弾性的性質を示す指標である。機械インピーダンスが大きくなれば，充填率が高く，接着剤による固着状態が良好であることがわかる。また，強い打撃力の場合が固着状態の違いによる影響を受けやすいため直径 19.1mm の鋼球で検討を行った。打撃入力波形の一例を**図－5** に示す。機械インピーダンスは**図－5** に示す網掛け部分の面積であり，次式により算出できる。

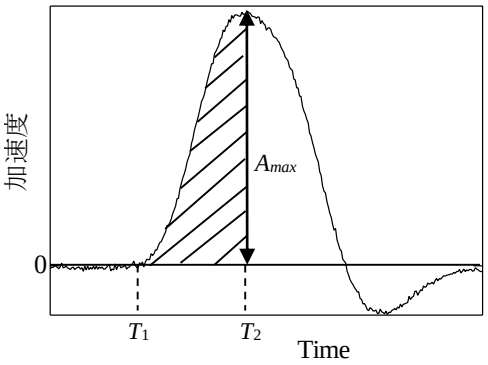



(a) 鋼球直径 9.6mm




(b) 鋼球直径 19.1mm

**図－4　波形エネルギー（ボルト単体）**




**図－5　打撃入力波形の一例**

$$Z = \frac{F_{\max}}{V} = \frac{MA_{\max}}{\int_{T_2}^{T_1} A(t)dt} \tag{2}$$

ここに，$Z$：機械インピーダンス，$F_{max}$：最大打撃力，$M$：センサと鋼球の総質量，$A_{max}$：最大加速度，$A$：加速度，$T_1$：打撃開始時刻，$T_2$：最大加速度の時刻である。

鋼球直径 19.1mm の機械インピーダンスを**図－6** に示

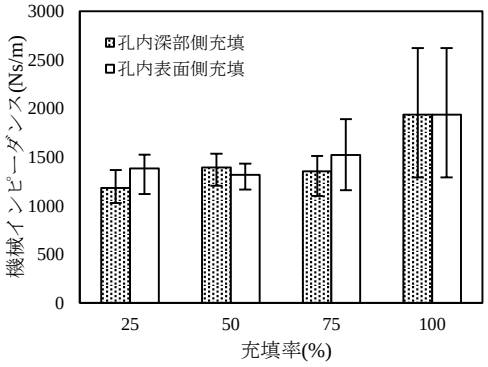
す。いずれの充填パターンにおいても，充填率が 100%の場合は比較的大きな機械インピーダンスとなるものの，ばらつきが大きく，充填率との相関は小さい。

(3) 伝搬時間

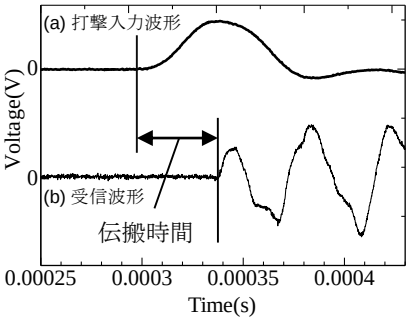
**図－7** に，打撃入力波形と受信波形の一例を併せて示す。本研究における「伝搬時間」は，コンクリート表面に設置したセンサで弾性波を受信した時刻（**図－7** (b)参照）から鋼球がボルトに接触した時刻（**図－7** (a)参照）を差し引いた値である。両時刻の算出にあたっては，前田らの既往の研究 [2)] を参考にして，波形をノイズ部分と信号部分に分けることのできる赤池情報量規準（Akaike Information Criteria, AIC）を利用することとし，次式に示す値が最小となる時刻を抽出した。

$$AIC_k = (k-1)\log\sigma_F^2 + (n-k+1)\log\sigma_{Fs}^2 \qquad (3)$$

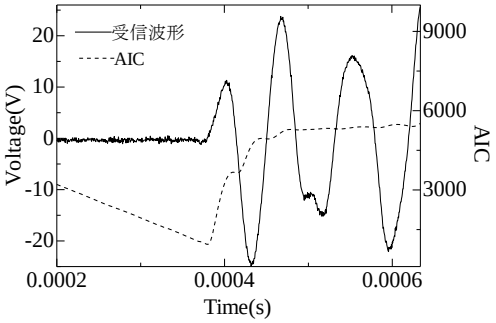
ここで，$k$ : 1～$n$，$n$ : 波形のサンプリング数，$\sigma_F$ : $i$=1～$k$-1 に対する $F$ の分散，$\sigma_{Fs}$ : $i$=$k$～$n$ に対する $F$ の分散，$F$ : 波形の振幅値（$i$=1～$n$）である。ただし，$AIC$ を計算するにあたり，波形到達時刻は得られた波形の最大振幅値よりも前のいずれかの点だと仮定し，$n$ は波形の最大振幅値を取るサンプリング点までのサンプリング数とした。$AIC$ の計算結果の一例を**図－8** に示す。



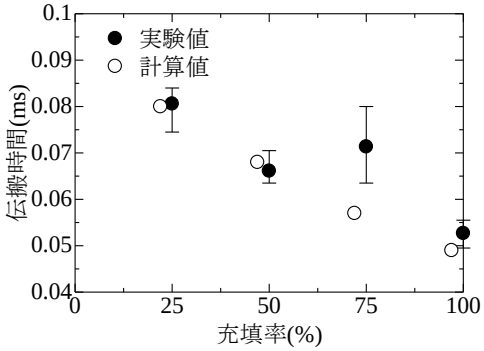

**図－6　機械インピーダンス（ボルト単体）**



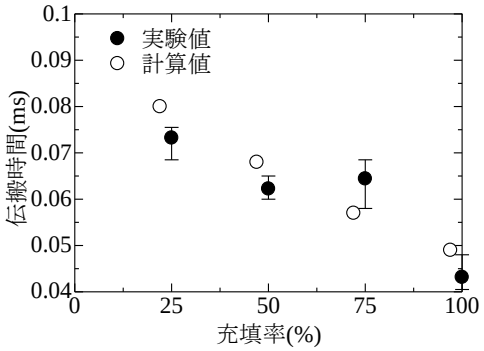

**図－7　打撃入力波形と受信波形）**



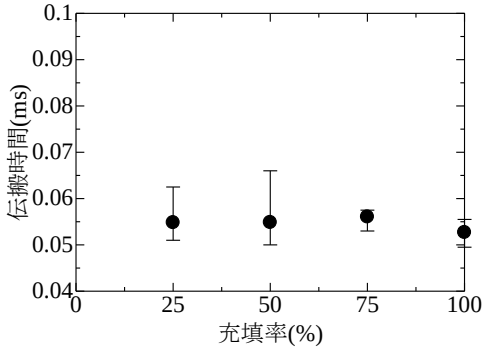

**図－8　受信波形と AIC**



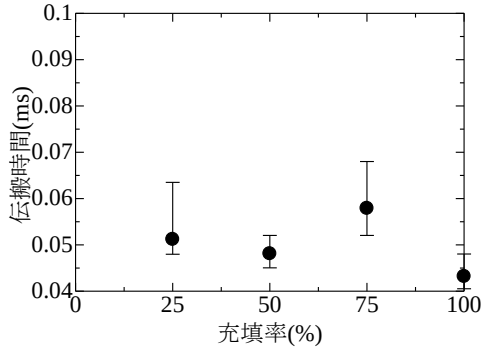

(a) 孔内深部側充填（鋼球直径 9.6mm）




(c) 孔内深部側充填（鋼球直径 19.1m）

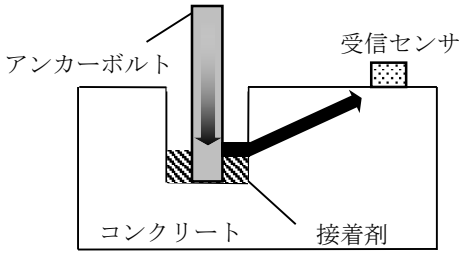



(b) 孔内表面側充填（鋼球直径 9.6mm）




(d) 孔内表面側充填（鋼球直径 19.1mm）

**図－9　伝搬時間（ボルト単体）**




図－10　弾性波の伝搬経路イメージ

表－1　伝搬時間の計算値（孔内深部側充填）

| 充填率(%) | 伝搬時間(ms) |
|---|---|
| 25 | 0.080 |
| 50 | 0.068 |
| 75 | 0.057 |
| 100 | 0.049 |

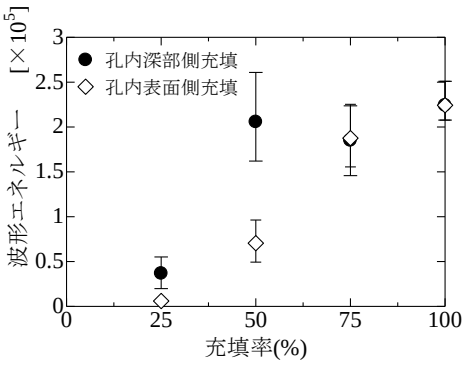
図－9 に算出した伝搬時間を接着剤の充填パターンごとにそれぞれ示す。また，孔内深部側充填における弾性波の伝搬経路のイメージを図－10 に示す。アンカーボルト（SS400 相当材）の縦波速度を 5200m/s，コンクリートの縦波速度を 3800m/s ，弾性波が図－10 に示す直線の経路で伝搬すると仮定した場合の伝搬時間を表－1 に示す。表より，充填率が大きくなり伝搬経路が短くなると，伝搬時間が小さくなることがわかる。これを参考に図－9 における孔内深部側充填での伝搬時間に着目すると，特に鋼球直径 9.6mm では，充填率 75%以外は表－1 に示す伝搬時間と概ね一致していることがわかる。一方，孔内表面側充填の場合は，いずれの充填率の場合も表面側に接着剤があるため，伝搬経路に違いが生じにくく，伝搬時間に明瞭な差が生じなかったと考えられる。

### 3. 2 プレートとナットを設置してボルトを締め付けた状態で測定した場合

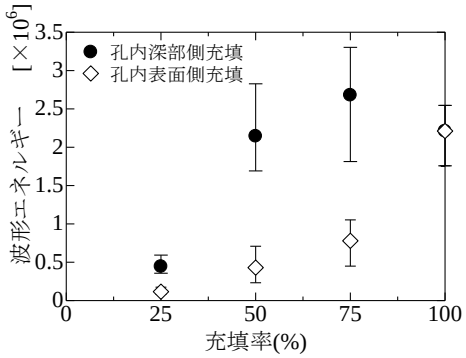
#### (1) 波形エネルギー

図－11 に，各鋼球で算出した波形エネルギーと接着剤の充填率との関係を示す。いずれの鋼球においても，孔内表面側充填では充填率の増加に伴い波形エネルギーも増加傾向を示すが，孔内深部側充填に関しては明瞭な相関関係を見出せなかった。孔内深部側充填の場合，ボルトを伝搬した弾性波は，プレートと接着剤を介してコンクリートを伝搬するため，受信センサへ伝わる弾性波の伝搬挙動が複雑となるため，孔内表面側充填と比較して，波形エネルギーにバラつきも生じ，充填率ごとの差異を判別しにくかったと考察される。

しかしながら，鋼球直径 9.6mm を使用すれば，プレートとナットを設置してボルトを締め付けた状態においても，波形エネルギーを相対的に比較すれば，充填率 25%程度の明らかに充填率の低いアンカーボルトを検出できる可能性があることがわかった。

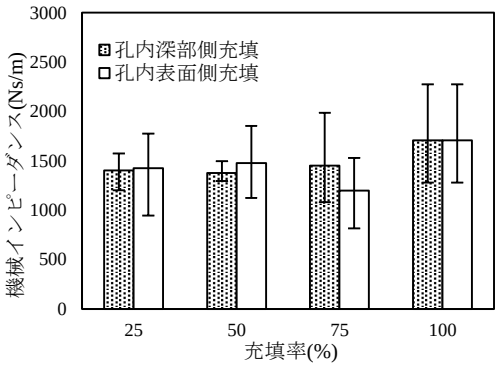



(a) 鋼球直径 9.6mm




(b) 鋼球直径 19.1mm

図－11　波形エネルギー（ボルト締め付け）



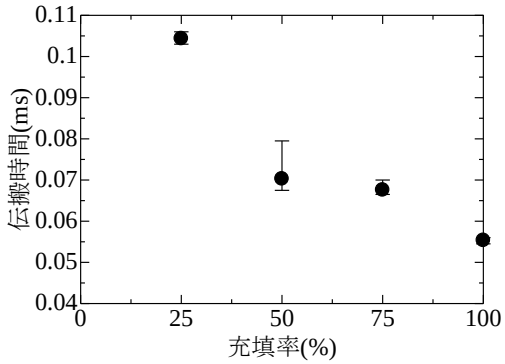

図－12　機械インピーダンス（ボルト締め付け）

#### (2) 機械インピーダンス

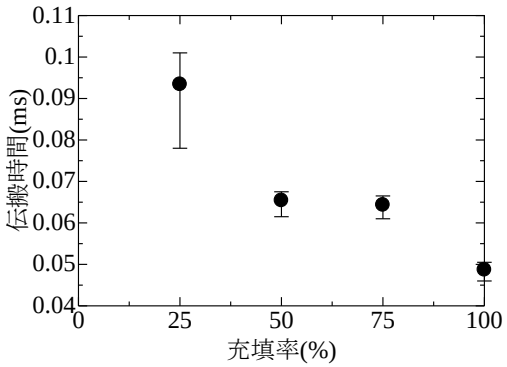
図－12 に，鋼球直径 19.1mm における機械インピーダンスの結果を示す。図－6 に示すボルト単体の場合と同様に，ばらつきが大きく，充填率との相関は小さいことが明らかとなった。

#### (3) 伝搬時間

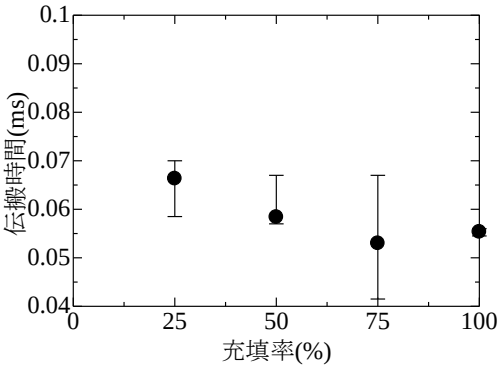
各充填ケースにおける，鋼球直径ごとの伝搬時間の結果を図－13 に示す。いずれの鋼球直径においても，充填率と伝搬時間との関係は，ボルト単体の場合と同様，孔内深部側充填では，充填率が大きくなると伝搬時間が小さくなる傾向を示した。したがって，ボルトの締め付けの有無に関わらず，孔内深部側充填の場合は，伝搬時間から充填率を評価することは可能である。



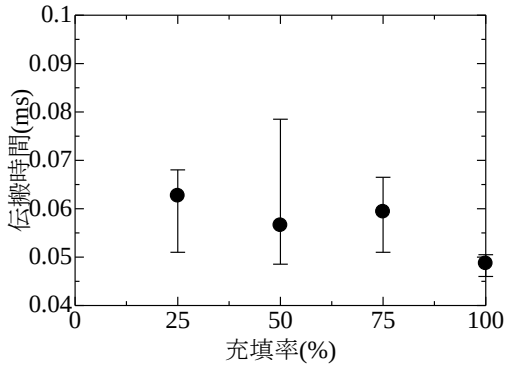

(a) 孔内深部側充填（鋼球直径 9.6mm）




(b) 孔内深部側充填（鋼球直径 19.1mm）




(c) 孔内表面側充填（鋼球直径 9.6mm）




(d) 孔内表面側充填（鋼球直径 19.1mm）

図－13　伝搬時間（ボルト締め付け）

これに対して，孔内表面側充填の場合は，ボルト単体の結果と同様（図－9，(b)，(d)参照），いずれの充填率においても，概ね同じ伝播時間となった。しかしながら，測定のバラつきが大きくなった原因としては，プレートを取り付けたことに影響を受けていると考えられる。

## 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) アンカーボルトの頭部を鋼球直径 9.6mm で打撃し，コンクリート表面に設置した加速度センサで受信した波形のエネルギーについては，ナットでボルトやプレートが締結された状態においても，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概ねの充填ケースで確認された。したがって，波形エネルギーは，充填率を評価する指標としては，感度が良好である。

(2) 伝搬時間は，鋼球直径に関わらず，孔内深部側充填のケースに限定すれば，プレート締結の有無に関わらず，充填率と相関があることがわかった。しかしながら，接着剤の充填状態によっては感度が鈍く，実際の充填状態が不明な実構造物での適用は困難な指標である。

(3) 直径 19.1mm の鋼球でボルトを打撃した際に得られる機械インピーダンスは，いずれの充填ケースにおいても，計測ごとのバラつきが大きく，接着剤の充填状況を評価する指標としては感度が鈍い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。また，実験の実施およびデータ整理では，大阪大学大学院の劉軒君，立命館大学の前川晴香君にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

1) 木村貴圭，内田慎哉，宮田弘和，鎌田敏郎：電磁パルス法による接着系あと施工アンカー固着部の非破壊評価手法に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2116-2121，2014

2) 前田直樹：地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価，地震 2 輯，38(3)，pp.365-380，1985