

## 報告 打撃によるケミカルアンカーボルトの非破壊健全性試験方法

## Integrity test method on chemical anchored bolt by hammer blow

○岡本 真\*1・久保 元樹\*1・久保 元\*2・境 友昭\*3

Makoto OKAMOTO, Genki KUBO, Hajime KUBO and Tomoaki SAKAI

**要旨：**後施工アンカーボルトの一つとしてケミカルアンカーボルトがあり、充填樹脂の劣化あるいは施工不良によって所期の強度が保たれない場合があり、非破壊的手段による検査技術の確立が望まれている。本論では、健全なアンカーボルトが相当な外力に対しても弾性体として挙動することを前提とし、打撃によって、その健全性を非破壊的に診断する技術について検討した結果を報告する。特に、打撃されたボルトの非線形的挙動からボルトの状態を推測する方法について、理論的側面及び実験結果とともに、その適用性について論じる。

**キーワード：**非破壊検査、後施工アンカー、打撃試験、健全性

## 1. はじめに

後施工アンカーが健全であるかどうかは、アンカーの引き抜き抵抗力が設計条件を満たすかどうかで判定可能である。しかし、引き抜き試験で極限までの荷重を作用させた場合、破壊試験となる可能性があり、高精度ではあるものの、その実用性には疑問が残る。筆者らは、ハンマ打撃に対するボルトの反力を測定し、その応答波形から、ボルトの健全性を非破壊的に試験する方法について検討してきた<sup>1)2)</sup>。本論では、ハンマ打撃に対するボルトの応答を理論的に解析し、後施工アンカーボルトの非破壊試験について、検討するものである。

## 2. 打撃試験方法

ハンマ打撃に対する応答を測定する方法には、①ボルトを打撃して、その近傍のコンクリート表面での振動応答を測定する方法<sup>1)</sup>、②逆に、ボルト近傍のコンクリート表面を打撃し、ボルトの振動応答を測定する方法、及び③加速度計あるいはロードセルを内蔵したハンマで、ボルトの頂部を打撃し、ハンマに作用する打撃力波形を測定する方法<sup>2)</sup>、などがある。①、②は、いずれもボルトとコンクリートの境界での波動の伝達特性を調べるものであり、伝達率が高い程、ボルトとコンクリートの密着性が高い、すなわち健全であると評価する。また、初期波頭の到達時間から、接着剤の施工高さを推定する。これに対し、③は、ボルトの支持条件を吟味する方法であり、打撃に対する反力の時間波形あるいはその強度指標を元に、ボルトの状態


評価を行う。なお、本論では、③を対象とする。



## 3. 後施工アンカーの力学モデルと打撃応答

健全なボルトは、弾性体として挙動し、このため一つの力学モデルで記述することができる。すなわち、測定した打撃に対する応答波形から直ちに、「健全」であると判断することも可能である。これに対し、健全度合いがやや劣るもの、非健全なものには、様々なタイプがあり、打撃に対する応答波形の解釈では、そのタイプによって異なった力学モデルの適用が必要となる。この章では、まず、後施工アンカーの様々な状態を想定し、その力学モデルと推察される応答波形について考察する。

## 3.1 健全なボルト

## 3.1.1 力学モデル

ボルトとコンクリート母材が接着剤によって所定の強度以上で接合されている状態を健全と評価することができる。このとき、接着剤は、ボルトやコンクリートと比較して剛性が弱いと考えると、力学モデルとしてボルトとハンマを質量、接着剤をバネとした、単弦振動系を導入することができる。この時、インパルス入力に対する応答波形は、-1 のようになり、この波形は上に凸なピークに対して左右対称の波形となる。

-2 は、現実のボルトを打撃した時の応答波形である。測定対象としたボルトの接着剤充填率は100%であり、後施工アンカーとしては、設計上「健全」と評価されるものである。打撃力波形は、-1 と同様に上に凸なピークを一つ持ち、このピークに対してほぼ左右

\*1 日東建設 (株) 札幌支店

Nitto Construction Inc., Sapporo Branch..

\*2 日東建設 (株)

Nitto Construction Inc., Head Office.

\*3 アプライドリサーチ (株)

Applied Research Inc.

対称となる波形となっているが、完全に対称ではない。図-1と図-2の違いは、打撃による入力波形がインパルスではないからである。なお、図-2の波形は、実際に測定した波形に対して13.3kHzの異動平均フィルターを施したものであり、測定波形そのものではない。この移動平均フィルターは、ボルトの振動応答以外の雑音や打撃に伴うハンマ自体の振動による高周波成分の信号を取り除くための処置である。

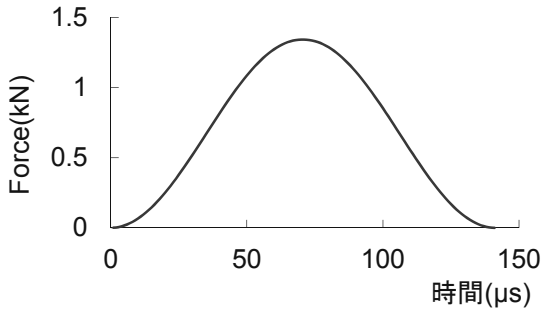


図-1 健全なボルトの打撃応答(計算波形)

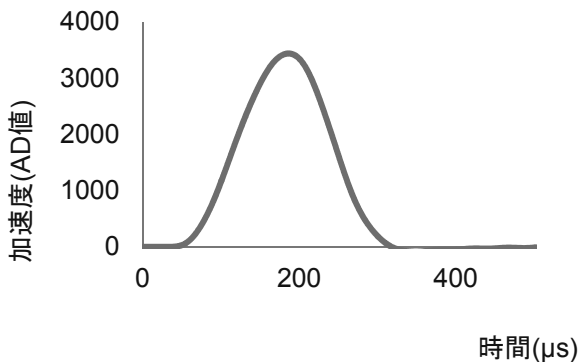


図-2 充填率100%ボルトの打撃応答波形(実測)

に小さい場合について(ハンマと疑似バネで構成されるバネ-質量系の機械インピーダンスがボルトの断面の持つ機械インピーダンス値の1/2より小さい)、式(1)を解くと、

$$V = V_0 M \frac{\omega^2}{\sqrt{\omega^2 - h^2}} \exp(-ht) \sin \sqrt{\omega^2 - h^2} t \quad (2)$$

が得られる。なお、

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}, \quad h = \frac{k}{2Z}$$

である。

打撃力は、式(2)にボルト断面の機械インピーダンスを乗じることによって得られる。図-3にその波形を示す。実際に観測される打撃力波形は、図-3の打撃入力とボルト-接着剤接合のバネ-質量系の応答波形を畳み込み合成した波形であり、これを図-4に示す。

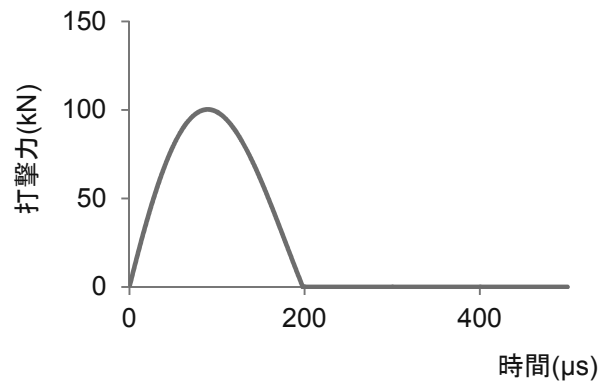


図-3 ハンマ打撃での入力波形

### 3.1.2 打撃の入力波形と応答波形

実際のボルトでは、ボルトは弾性棒としての長さを持つことから、1次元の弾性体としての振る舞いを持つ。またハンマ先端形状が球冠であるとき、ハンマがボルト頂部に貫入すると、その貫入量に比例してハンマとボルトの接触面積が増し、あたかもボルト頂部にバネが存在するかのような挙動を示す。この時の擬似的なバネ係数を  $k$  とし、ボルトの断面の機械インピーダンスを  $Z$ 、ハンマ質量を  $M$  とし、ハンマの変位、ボルト頂部の変位をそれぞれ  $x, y$  とすると、式(1)の運動方程式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} M \frac{d^2 x}{dt^2} + k(x - y) &= 0 \\ Z \frac{dy}{dt} + k(y - x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ハンマの初速度を  $V_0$ 、擬似的なバネのバネ係数が相応

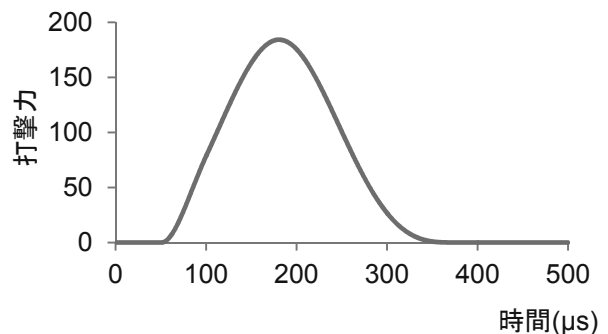


図-4 打撃入力と振動応答の合成波形

図-4の計算波形と図-2の測定波形は、よく似ており、打撃力は厳密にはピークに対して左右対称ではなく、ピーク前半部分の方がやや広い面積を持つ波形となっている。

### 3.2 ボルトの先端のみ接着されている場合

ボルトは、1次元の弾性体であるから、ボルト先端

からの反力は、波動がボルトを1往復する時間だけ遅れて到達する。ハンマがボルトに衝突するときの反力は、衝突と同時に発生し、したがって、打撃に対するボルトの応答は打撃力波形によるものと、先端バネによるものが合成された波形となる。

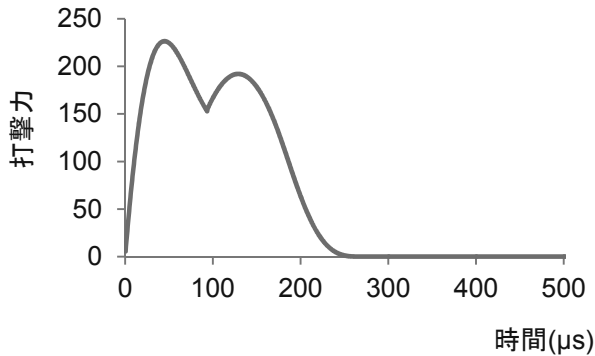


図-5 ボルト先端のみが接着されている場合

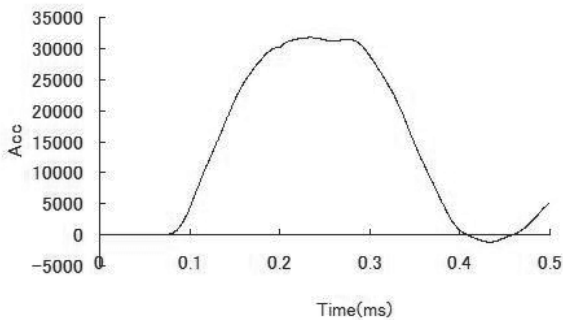


図-6 先端のみ接着されたボルトの打撃応答

図-5は、ボルトの長さが300mmの場合計算波形の一例である。健全な場合と比較すると、上に凸なピーク時刻に対する波形の対称性は崩れ、この事例では、上に凸なピークが2つ生成されており、打撃力の継続時間も長くなっている。最初のピークは、打撃力自体によるものであり、2番目のピークは、ボルトの頂部に発生した打撃力が波動となってボルト内を伝搬、ボルト先端のバネ支持拘束端で反射し、ハンマを押し戻す方向に作用したボルト内の圧縮応力によるものである。図-5は、先端部での接着が強固な場合の事例であり、接着強度によって、打撃力波形形状は異なる。

図-6は、接着剤の充填率が25%で先端のみが接着されている事例での実際の打撃力波形の測定例である。数値計算とは異なって、打撃力は双山とはなっていないが、ピークが平坦であることから、時間間隔を置いた反射波が最初の打撃力に重畳した波形と理解することができる。

### 3.3 ボルトの接着が弱い場合(非線形挙動)

ボルトの接着力がハンマによる打撃力よりも弱いと、

接着面でボルトとコンクリートの間に滑りが生じるか、接着面が破壊され、ボルトに並進運動が生じる。このような事例では、ボルトの運動は線形領域を外れ、不可逆的な非線形運動となる可能性が高い。

図-7は、接着剤が施工されていないボルトを打撃した時の打撃力波形の例である。打撃力波形は、明瞭に双山となっており、最初の打撃力のピークから、次の打撃力のローカルピークまでの時間は、約370 $\mu$ sあり、ボルト内の波動の伝搬遅延現象としては説明できない。長さ300mmのボルトであったとしても、波動がボルト内を1往復する時間は、せいぜい117 $\mu$ sだからである。この遅延時間は、ボルト先端部が固定されていないため、まず①ボルト先端での反射波は、引っ張り波となってハンマに取り付けた加速度計でのその影響を検知できないこと、次いで、②ボルト先端が並進運動をして、その先端がコンクリートに衝突して圧縮力が発生してボルト頂部に伝達され、ハンマに衝突すること、を原因として生じていると解釈できる。

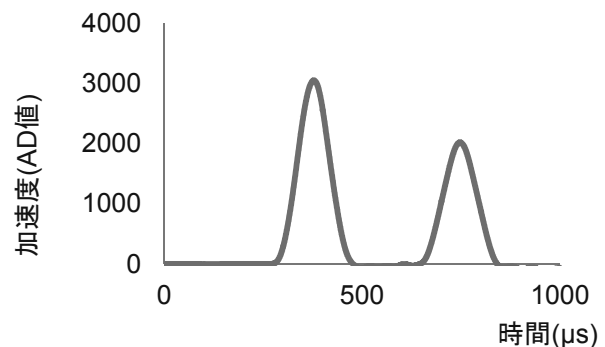


図-7 未充填ボルトを打撃した時の波形

## 4. アンカーの健全性評価尺度の構成

### 4.1 波形信号の処理

アンカーボルトの健全性指標として、測定した打撃力波形の中に含まれる時間遅れを持つ成分の遅れ時間とその振幅が考えられる。基本的に、ボルトが弾性支持されている場合、波動がボルト内を1往復する時間以上を大きく越える波動の伝搬遅延は生じない。波動がボルトを1往復する時間内において波動に遅延が生じている場合には、アンカーボルトの上側に接着剤が回っていない可能性を示すものである。波動がボルト内を1往復する時間以上遅れる場合、打撃によってボルトの支持が破壊されるか、ボルトとコンクリートの間で摺れが生じたと考えて良い。

反射波成分の時間遅れを正確に測定するためには、打撃の入力とこれに対する応答を独立して測定する必要があるが、波動としては一体となっていることから、これを分離することは原理的に難しい。このため、打撃の入力波形が上に凸なピークに対して対称な波形と

なることを利用し、打撃力波形の最初のピークの前半波形を線対称展開して、打撃力を求めるという方法を用いる。反射波は、測定した打撃力波形から、入力波形を引いた波形として推定する。図-8 にその波形を示す。原波形は、図-5 に示す波形である。図から、打撃入力に対する応答の時間遅れ及び、応答強度が推定される。すなわち、入力波形と応答波形のピークの時間差、またピークの振幅比から応答強度が得られる。

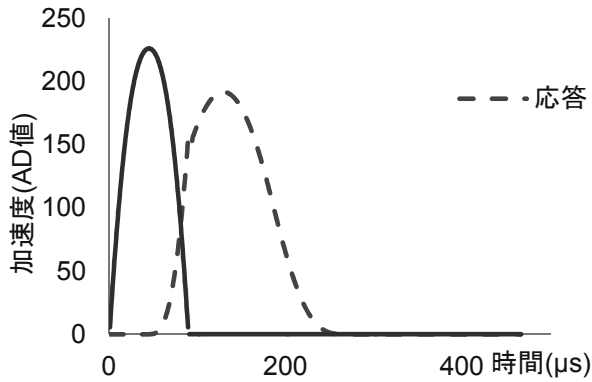


図-8 打撃入力と応答波形の分離

#### 4.2 健全性評価尺閾値

##### (1) 伝搬遅延時間

反射波の時間遅れは、ボルト周面での接着剤の施工状況が反映されている。すなわち、反射波の到達時間は、主としてボルトの頂部から周面抵抗が十分に発揮される位置までの距離に依存しているからである。伝搬遅延時間が短いほど、接着剤が母材表面近くまで施工されていることを意味している。また、伝搬遅延時間が、波動がボルトを1往復する時間を超える場合、ボルトは接着されていないか、接着力が弱く打撃によって接着部が塑性変形したと考えられる。

##### (2) 反射波の振幅比

反射波の伝搬遅延時間が、波動がボルト内を1往復する時間よりも短い場合、打撃入力に対する反力がボルトの長さの範囲内での抵抗力によって生成されることになる。この反力の強さが、打撃入力と等しいとき、ボルトは弾性支持されており、打撃に対するボルトの挙動は線形応答と言える。実際は、バネ支持となっており、線形応答であっても1よりも小さくなる。

#### 5. 実験による評価方法の適用性検討

本論で構成したアンカーボルトの健全性の評価尺度の適用性の検証を行うため、充填率をパラメータとした供試体実験を行った。ボルトはM16、長さは260mmであり、打撃は380gのハンマで行った。図-9 に実験結

果を示す。それぞれのボルトの試験結果は、反射波の遅延時間と反射波の振幅比の平面空間状の点として示される。なお、図では同一ボルトに対して10回の打撃を行い、それぞれを点として示している。図に示されるように、反射波の振幅比が大きい程、遅延時間比が小さいという傾向が見られる。表-1は、接着剤の充填率と健全性の関係を示している。なお、健全率は、複数回の測定回数の中、健全と評価された回数の割合である。評価基準は、①遅延時間比が1以上であれば不健全、②遅延時間比が1未満の場合、振幅比が0.8以上で健全、である。分析結果では、充填率が61%では、健全と評価される確率は50%、それ以下の充填率では、非健全と評価されていることが示される。

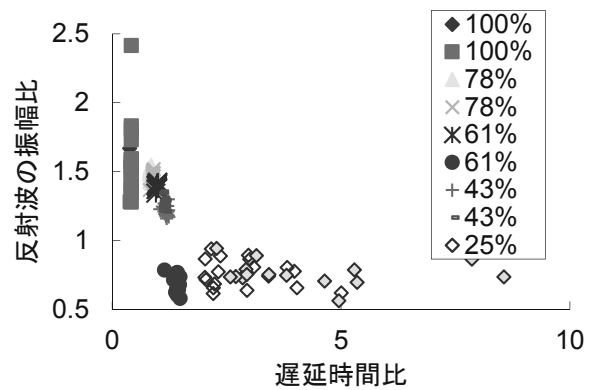


図-9 供試体実験の結果

表-1 充填率と健全率の関係

充填率	100	78	61	43	25
健全率	100	100	50	0	0

#### 6. まとめ

後施工アンカーボルトの健全性をハンマ打撃によって診断する技術について、理論的、実験的に検討を行い、反射波生成の時間及び強度を指標化することによって健全性評価が可能であることを確認した。評価に必要な閾値の設定方法については、今後の検討も必要であるが、ハンマ打撃という手軽な方法での健全性診断が可能であることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 山下健太郎, 他, 衝撃弾性波法を用いたあと施工アンカーボルトの健全性調査, 土木学会第66回年次講演会, 2013年9月, 第VI部門
- 2) 久保元樹, 他, 機械インピーダンス法による後施工アンカーの健全性診断, 土木学会第66回年次講演会, 2013年9月, 第VI部門