

超音波による接着系アンカーボルトの健全性評価

田中雄介 星野秀和 小倉幸夫

ジャパンプローブ株式会社 〒232-0033 神奈川県横浜市南区中村町 1-1-14

E-mail: {yuusuke.tanaka, h.hoshino, ogura}@jp-probe.com

あらまし 看板やトンネル天井版の固定に使用されている接着系アンカーボルトの健全性を超音波で評価した。アンカーボルト先端からの反射信号 A と遅れて発生する信号 B の振幅比 B/A からアンカーボルトの接着状態を調べた。アンカーボルトの接着状態が悪くなるコンクリート下孔が大きすぎる場合や下孔の掃除が不十分な場合などでは B/A の値が低下した。また、アンカーボルト内部の超音波伝搬をシミュレーションで確かめ、遅れて発生する信号 B はアンカーボルト先端付近のねじ山からの反射信号であると確認した。

キーワード 超音波、アンカーボルト、ケミカルアンカー、非破壊検査、コンクリート

Non-destructive inspection of chemical anchor bolts by ultrasonic

Yuusuke Tanaka Hidekazu Hoshino Yukio Ogura

Japan Probe Co., Ltd., 1-1-14 Nakamura-chou, Minami-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 232-0033, Japan

E-mail: {yuusuke.tanaka, h.hoshino, ogura}@jp-probe.com

Abstract The soundness of the adhesive system anchor bolt used for fixing signboards and tunnel ceiling plates was evaluated by ultrasonic wave. The adhesion state of the anchor bolt was examined from the amplitude ratio B / A of the reflected signal A from the tip of the anchor bolt and the signal B generated late. The value of B / A decreased when the concrete pilot hole where the anchor bolt adhesion state deteriorates is too large, or the pilot hole is insufficiently cleaned. Also, ultrasonic wave propagation inside the anchor bolt was confirmed by simulation, and it was confirmed that the signal B generated late was a signal reflected from the thread near the tip of the anchor bolt.

Keywords Ultrasonic、Anchor Bolt、Chemical Anchor、Non-Destructive Inspection、Concrete

1. はじめに

看板の設置やトンネルの天井版固定などにはアンカーボルトが使用されている。アンカーボルトには金属をコンクリートに引っかける打ち込みアンカーと接着剤を用いた接着系アンカー(ケミカルアンカー)があり、主に接着系アンカーが用いられている。アンカーボルトはビルやトンネルなどのコンクリートに下孔を開けてから施工するが、孔の状態により接着強度が低下する。近年看板の落下事故[1]や笹子トンネルの天井板崩落事故[2]などアンカーボルトが外れることによる事故が発生しているため、アンカーボルトの接着強度を評価することが重要である。特に施工不良を調べるために施工直後に接着強度を測定することが重要であり、文献[2]でも施工不良のアンカーボルトがあったことが報告されている。アンカーボルトの検査は目視検査や接触検査、打音検査があるが、これらは定量的な測定が困難であり検査技師の技量に左右される。また、一定の荷重を加えて強度を推定する引張試験があるが、

これも検査技師により結果にばらつきが生じる。現在研究されている非破壊検査法として電磁超音波を利用した方法がある。超音波の共振周波数変化[3]や周波数スペクトル[4]の変化から接着強度を推定している。これらはアンカーボルトを振動させて計測しており、コンクリートの状態で共振状態が変化する可能性がある。我々はアンカーボルトに超音波を伝搬させ反射信号から接着系アンカーボルトの接着状態を評価する方法を提案した[5]。また、超音波の伝搬時間から受信される信号の伝搬経路について報告してきた[6]。今回アンカーボルト内の超音波伝搬をシミュレーションで調べ、施工が良い場合と不良の場合の信号について考察した。

2. アンカーボルトの施工

アンカーボルトの施工はコンクリートに下孔を開けて行う。接着系アンカーボルトの施工は図 1 のようにまずコンクリートに下孔を開けて、孔の中を掃除してコンクリート片やほこりが無いようにする。次に接着剤カプセルを挿入して、アンカーボルトを接着剤力

プセルを割りながら挿入する。その後接着剤を養生し硬化させる。接着強度が低下する要因として下孔の直径や深さが大きすぎてアンカーボルト全体に接着剤が付着しないこと、下孔の掃除が不十分でアンカーボルトにはこりが付着して接着剤が付着していないことが挙げられる。また、接着剤部分はカプセルの破片が混じっており、超音波が散乱して伝搬はほとんどしない。

3. 計測に適した周波数

アンカーボルトの計測に適した周波数を調べた。アンカーボルト側面のねじ山から周囲の接着剤へ超音波が漏洩するが、周波数により漏洩量が異なる。周波数 10[MHz]と 2[MHz]でアンカーボルト先端からの反射信号がどのようになるか調べた。まずシミュレーションで波形を比較した。用いたシミュレータはイーコンピュート製、SWAN21 である。アンカーボルトは M12、長さ 130[mm]で先端が両面カットのものを用いた。図 2 にシミュレーションモデルを示す。鋼の M12 ねじの左端に幅 10[mm]の探触子を配置し、周囲にエポキシを配置した。鋼の密度は 7800[kg/m³]で縦波音速が 5900[m/s]、横波音速が 3230[m/s]、エポキシは密度 1850[kg/m³]、縦波音速 2600[m/s]、横波音速 1100[m/s]である。周波数は 10[MHz]と 2[MHz]の負のパルス波で送信した。受信は送信と同じ探触子の振幅で評価した。10[MHz]と 2[MHz]のそれぞれの場合の受信波形を図 3 に示す。アンカーボルト先端からの反射信号が 45[μs]付近に検出された。10[MHz]ではアンカーボルト先端からの反射信号がはっきりと検出されたが、2[MHz]ではアンカーボルト先端からの反射信号は検出されなかった。アンカーボルト側面や先端からエポキシへ超音波が漏洩するが、10[MHz]では超音波の漏洩は少なく、先端から少し漏洩し、側面からはほとんど漏洩しなかった。2[MHz]では側面と先端の両方で漏洩が大きかった。M12 ねじのピッチは 1.75[mm]であり、鋼の音速 5900[m/s]から波長を計算すると 10[MHz]は 0.59[mm]、2[MHz]では 2.45[mm]である。アンカーボルトのねじ山のピッチが波長より小さくなるとねじ山からの漏洩が多くなると仮定すると、波長が 1.75[mm]

となる周波数は 3.4[MHz]である。3.4[MHz]より高い周波数で送信するとアンカーボルト側面からの超音波の漏洩が少くなりアンカーボルト先端からの反射信号を検出できると考えられる。実際に 10[MHz]、5[MHz]、2[MHz]の探触子でアンカーボルト先端からの反射信号を計測すると図 4～図 6 の結果となった。用いた探

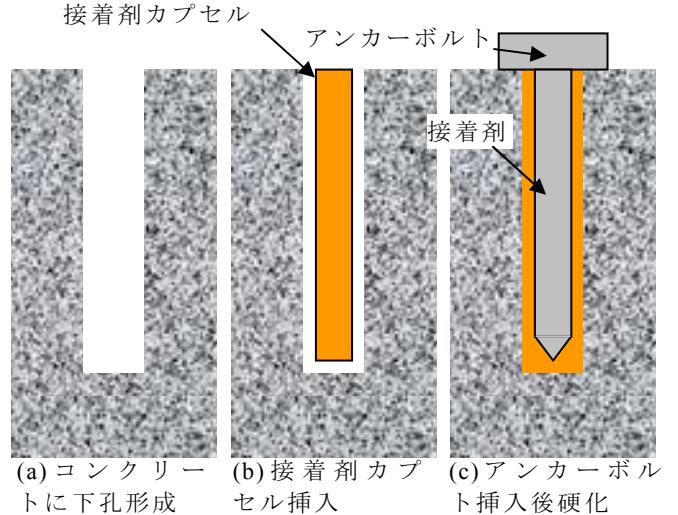


図 1 コンクリートへのアンカーボルト施工法

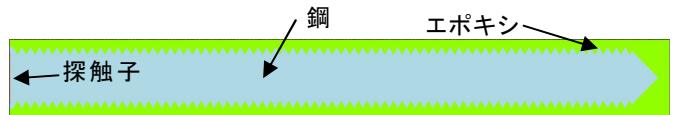


図 2 アンカーボルトシミュレーションモデル

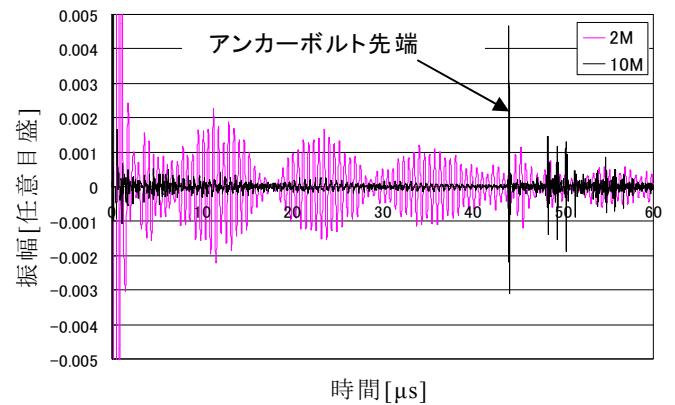


図 3 周波数による超音波伝搬の違い

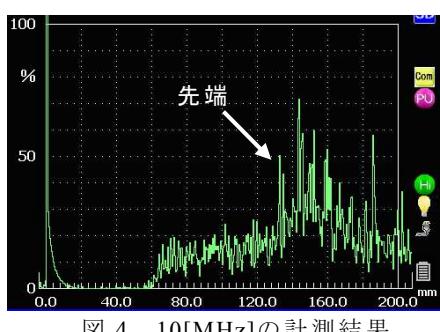


図 4 10[MHz]の計測結果

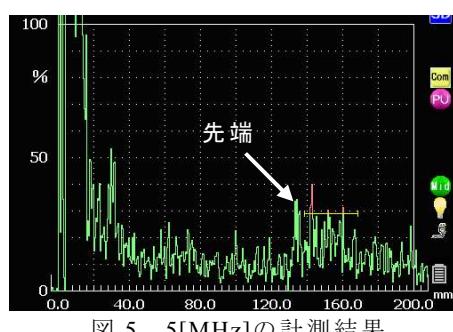


図 5 5[MHz]の計測結果

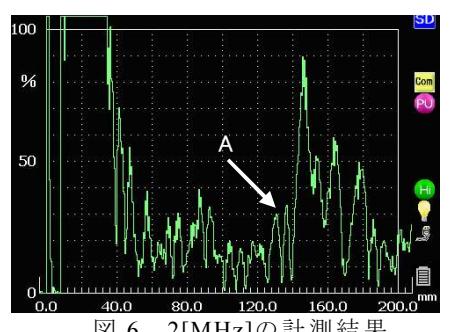


図 6 2[MHz]の計測結果

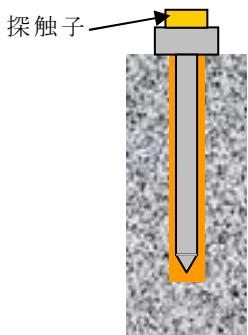


図 7 アンカーボルト計測

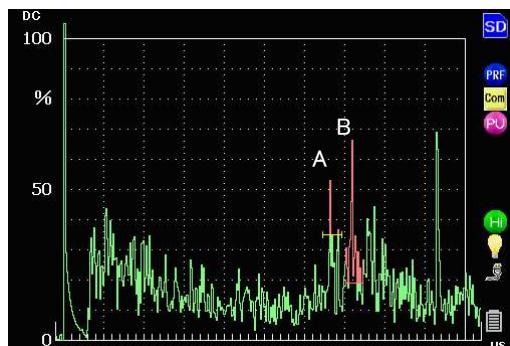


図 8 下孔直径 15[mm]のときの受信波形

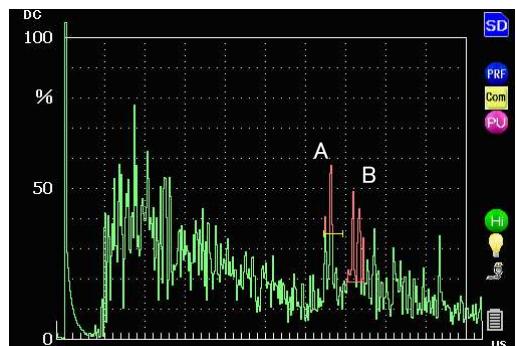


図 9 下孔直径 16[mm]のときの受信波形

傷器は菱電湘南エレクトロニクス製、UI-27 である。受信波形の計測は図 7 のようにアンカーボルト頭頂部に超音波探触子を配置して行った。アンカーボルト先端からの反射信号は周波数に関係なく同じ位置に検出されるので 10[MHz]の周波数でのアンカーボルト先端の位置から他の周波数での先端位置を推定できる。アンカーボルトの長さは 130[mm]であるので図 4 の 130[mm]付近の反射信号がアンカーボルト先端位置である。図 5 の 5[MHz]においても、130[mm]付近にアンカーボルト先端からの反射信号が検出された。図 6 の 2[MHz]では A の位置付近でアンカーボルト先端からの反射信号が検出されるはずであるが、ノイズと同程度となりはつきりしなかった。これらの結果から周波数 5[MHz]以上でアンカーボルト先端からの反射信号が検出されており、シミュレーションで推定した 3.4[MHz]以上でアンカーボルト側面からの漏洩が少なくなった。従って、計測にはアンカーボルトのねじ山のピッチより波長が小さくなるように周波数を選択する必要がある。

4. 接着状態の評価

4.1 下穴の直径

アンカーボルトの接着状態が低下する原因としてコンクリートの下孔が大きすぎること、下孔の掃除が不十分であることが挙げられる。まず下孔の直径が標準より大きくなった場合の受信波形を調べた。用いた探触子は直径 10[mm]、10[MHz]のソフトプローブ(ジャパンプローブ製、柔探)で、探傷器(菱電湘南エレクトロニクス製、UI-27)で超音波を送受信した。試験体は長さ 130[mm]、M12 の接着系アンカーボルトをコンクリートに設置したもので、下孔の深さ 130[mm]で直径 15 から 19[mm]まで 1[mm]ずつ変化させた。標準施工の孔は深さ 130[mm]、直径 15[mm]であるので直径を標準より大きくした場合の波形の変化を調べた。

下孔直径 15[mm]のときの受信波形を図 8 に示す。アンカーボルト先端からの反射信号 A と遅れて発生する信号 B がそれぞれ検出された。次に下孔直径 16[mm]

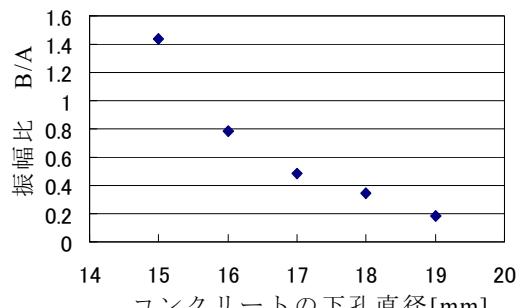


図 10 下孔直径と信号 A と B の比

のときの受信波形を図 9 に示す。信号 A と信号 B がそれぞれ検出されたが、信号 B が信号 A より小さくなつた。信号 A と信号 B はほぼ同じ位置に検出されるのでそれぞれの下孔直径で信号 A と信号 B の振幅比 B/A をまとめたものを図 10 に示す。コンクリートの下孔直径が大きくなるほど B/A の値が低下することが分かった。

4.2 下穴の掃除

次に下孔の掃除具合でどのように波形が変化するかを調べた。試験体はコンクリートの下孔掃除を 3 段階に変化させたもので受信信号を比較した。アンカーボルトは長さ 130[mm]、M12 で下孔は直径 15[mm]、深さ 110[mm]の標準施工である。下穴の掃除については定量的にできないため定性的であるがきれいに掃除したもの(きれい)、少し掃除したもの(普通)、掃除しないもの(汚い)の 3 種とした。計測した探触子と探傷器は前節と同様に柔探と UI-27 である。

下孔の掃除をきれいに行ったときの受信波形を図 11 に示す。アンカーボルト先端からの反射信号 A と遅れて発生する信号 B が検出された。次に下孔の掃除をほとんど行わなかったときの受信波形を図 12 に示す。信号 A と信号 B がそれぞれ検出されたが、信号 B は信号 A よりかなり小さくなつた。3 種の掃除状態と受信信号 A と B の振幅比 B/A との関係を図 13 に示す。定性的ではあるが、掃除を丁寧に行うほど B/A の値が大きくなつた。

前節の結果と合わせて下孔の直径が標準より大き

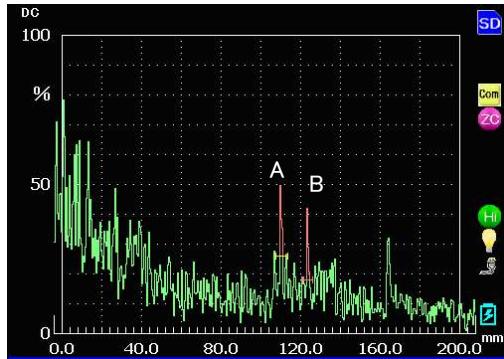


図 11 下穴がきれいなときの受信波形

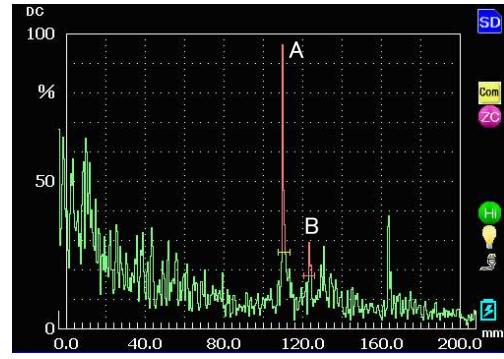


図 12 下穴が汚いときの受信波形

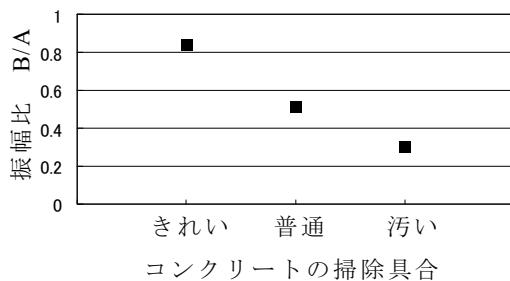


図 13 掃除具合と信号 A と B の比

い、下孔の掃除が不十分といったアンカーボルトの接着強度が低下している状態では B/A の値が小さくなることが分かった。

5. アンカーボルト内の超音波伝搬

5.1 信号 A と信号 B の経路

前章の結果から B/A の値が小さい場合はコンクリートの下孔径が大きい、下孔の掃除が不十分など接着強度が低下する要因があることがわかった。これら信号 A と B の伝搬経路についてシミュレーション、SWAN21 で調べた。図 14 の M12、長さ 130[mm]のアンカーボルトシミュレーションモデルで超音波の反射信号を調べた。左端に超音波探触子を設定し、10[MHz]、負の sin 波を 1 波送信した。アンカーボルトの材質は鋼として、密度が 7800[kg/m³]、縦波音速が 5920[m/s]、横波音速が 3230[m/s]である。図 15 にシミュレーションの受信波形を示す。アンカーボルト先端からの反射信号のほか、遅れて発生する信号 1、2、3 が検出された。これらは図 16 のように考えられる。アンカーボルト内を伝搬した超音波は先端の斜めカットの部分で反射する。縦波は反対側の斜めカット部で反射して探触子へ戻り、先端からの反射信号 A となる。同時にモード変換により横波が発生し、ねじ山の方向へ超音波が伝搬する。ねじ山で横波が反射して先端に戻り、斜めカット部で反射して再度モード変換が発生し、縦波成分が探触子に到達する。ねじ山が先端から近い部分ほど伝搬時間が短く、先端から近い 3 つのねじ山か



図 14 アンカーボルトシミュレーションモデル

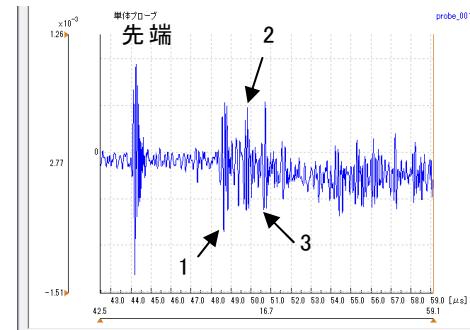


図 15 シミュレーション結果

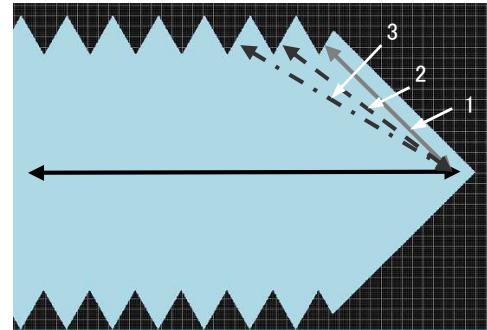


図 16 アンカーボルト先端の超音波

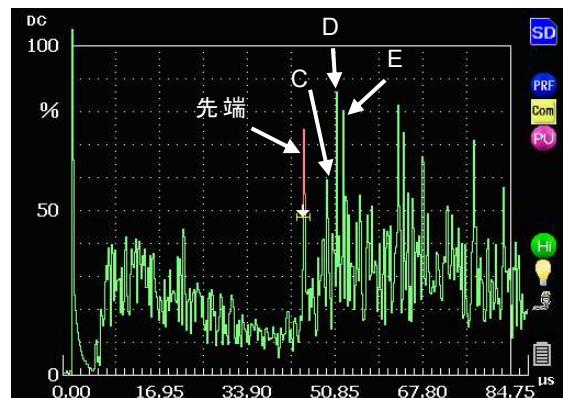


図 17 アンカーボルト単体の反射信号

表 1 反射信号の受信時間

[μs]	シミュレーション	実験
先端	44.2	44.8
信号1、C	48.6	49.2
信号2、D	49.8	51.2
信号3、E	50.7	52.4

表 2 アンカーボルト周囲の状況と B/A

		密度 [kg/m ³]	縦波音速 [m/s]	横波音速 [m/s]	B/A
①	物体1	1850	2600	1100	0.182
	物体2	1850	2600	1100	
②	物体1	3150	4400	2300	0.076
	物体2	3150	4400	2300	
③	物体1	3150	4400	2300	0.137
	物体2	空隙			

らの反射信号が図 15 の信号 1、2、3 である。実際に M12 のアンカーボルトの受信波形を図 17 に示す。先端からの反射信号のほか、C、D、E の信号が検出された。それぞれの受信時間をシミュレーションと比較すると表 1 のようになる。信号 1 と C の誤差は 1.2% となり、音速などの誤差を考えると信号の伝搬経路は図 16 で合っていると考えられる。図 8 や図 11 の信号 B の受信時間はそれぞれ 48.8[μs]、48.5[μs] であり、信号 1 や信号 C の伝搬時間に相当する。従って、信号 B は先端に一番近いねじ山からの反射信号 C であると推定できる。

5.2 施工不良の状態推定

次に B/A の信号がどのような状態のときに小さくなるかをシミュレーション、SWAN21 で調べた。まず、下孔の掃除が不十分な場合の状況を推定した。信号 B は先端から一番近いねじ山からの反射信号であるので先端の斜め部分、ねじ山の周囲を変化させた。図 18 のアンカーボルト周囲にエポキシを配置したシミュレーションモデルで受信波形を調べた。鋼の密度は 7800[kg/m³] で縦波音速が 5900[m/s]、横波音速が 3230[m/s]、エポキシは密度 1850[kg/m³]、縦波音速 2600[m/s]、横波音速 1100[m/s] である。物体 1 を先端付近のねじ山に配置し、物体 2 を先端の斜めカット部に配置した。物体 1、2 の密度、縦波音速、横波音速をそれぞれ変化させて信号 B/A の値を比較した。まず物体 1、2 をエポキシと同じにして、健全な場合の信号を調べた。結果はまとめて表 2 に示す。次に物体 1、2 をコンクリートと同じ物性値、密度 3150[kg/m³]、縦波音速 4400[m/s]、横波音速 2300[m/s] として信号 B/A を調べた。さらに物体 1 をコンクリート、物体 2 を空隙にした時の B/A を調べた。表 2 の結果からエポキシ

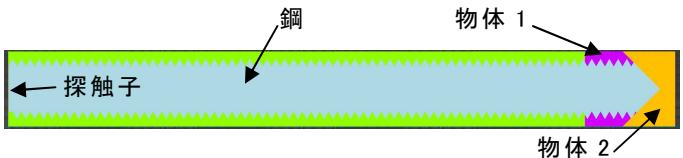


図 18 アンカーボルトシミュレーションモデル



図 19 掃除が不十分なときのアンカーボルト [7]

がアンカーボルト先端周囲にある①の条件では B/A が 0.182、コンクリートがアンカーボルト先端周囲にある②の条件では B/A が 0.076 となった。また、アンカーボルト先端が空隙の条件③では B/A が 0.137 となった。これらから信号 B はねじ山からの反射であるので、アンカーボルトとねじ山周囲の物体で反射が大きいほど B/A の値が大きくなることがわかる。また、アンカーボルト先端の斜めカット部分についても反射が大きいほど B/A の値が大きくなつた。コンクリートがアンカーボルト先端付近にある状況は下孔の掃除が不十分でアンカーボルトのねじ山にコンクリートが付着している状況である。文献[7]の動画より、図 19 のようにアンカーボルト下孔の掃除が不十分な場合はコンクリートの粉がアンカーボルトと接着剤の間に張り付き、接着剤の付着が妨害される。エポキシの音響インピーダンスは横波で考えると 2.04[MRayl]、コンクリートの音響インピーダンスは横波で 7.25[MRayl]、鋼の音響インピーダンスは横波で 25.2[MRayl] である。アンカーボルトからの漏洩はエポキシよりコンクリートのほうが多くなる。従って、下孔の掃除が不十分な場合はアンカーボルトからコンクリートへ超音波が漏洩して B/A の値が低下すると考えられる。

次にコンクリートの下孔直径が大きい場合について調べた。コンクリートの下孔直径が大きいときや下孔が深い時はカプセルの接着剤の量が一定であるので、接着剤がアンカーボルトに接触している部分が小さくなる。シミュレーションでエポキシ部分を短くして B/A の信号を調べた。シミュレーションモデルは図 20 で極端なモデルであるが、アンカーボルト先端から 30[mm]までの部分にエポキシを配置し、それ以外は空隙とした。シミュレーションにおける樹脂の量と B/A

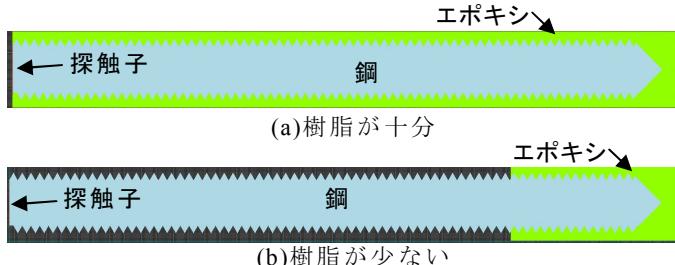


図 20 樹脂量の違いで B/A を調べるモデル

との関係は表 3 の通りで、アンカーボルトに付着している樹脂が長いほど B/A が大きくなるわけではない。樹脂の付着量が多いと超音波の漏洩が多くなるが、図 3 から図 6 の結果を見ると 10[MHz]では漏洩は少ない。従って、樹脂の量以外の原因がある。接着剤カプセルはガラス管の中に主剤(エポキシ系樹脂)、硬化材、骨材(珪石)がある。下孔の直径や深さが大きい場合はアンカーボルトに付着する接着剤の量が低下するほか、アンカーボルトが接着剤に接触する面積が少なく搅拌不足になり接着強度が低下する。このとき、骨材や容器のガラスがアンカーボルト先端に付着すると超音波がその部分から漏洩する。この状態をシミュレーションした。図 18 の物体 1 をエポキシ、物体 2 を骨材にした時の B/A を調べた。エポキシは密度 1850[kg/m³]、縦波音速 2600[m/s]、横波音速 1100[m/s]、骨材は珪石として密度 2200[kg/m³]、縦波音速 5900[m/s]、横波音速 3750[m/s]とした。このとき B/A は 0.09 となり、エポキシ樹脂がアンカーボルト周囲にあるときより値が小さくなつた。従って、可能性の一つとしてコンクリートの下孔が大きい時は骨材や容器のガラスがアンカーボルト先端付近に付着している可能性があるが、詳細はまだ不明のため超音波の漏洩等も含めて今後調べる。

6. まとめ

接着系アンカーボルトの接着強度について超音波の反射信号で評価する方法を提案した。アンカーボルト先端からの反射信号 A とアンカーボルト側面の先端に一番近いねじ山からの反射信号 B の振幅比 B/A で接着強度を評価する。接着強度が低下する下孔の直径が大きい場合や掃除が不十分な場合は B/A の値が低下した。シミュレーションによりアンカーボルト先端の斜めカット部分の超音波の反射が大きい場合、アンカーボルト側面のねじ山からの超音波の漏洩が少ない場合に B/A の値が大きくなることがわかつた。施工不良の場合はねじからの超音波の漏洩が大きくなることを推定した。

謝辞

株式会社AINの石塚様、山口様にはアンカーボル

表 3 樹脂の量と B/A

樹脂の長さ [mm]	B/A
130	0.182
30	0.195

表 4 樹脂の量と B/A

先端の状況	B/A
エポキシ樹脂	0.182
骨材(珪石)	0.090

トをコンクリートに設置した試験体を提供いただきました。お礼申し上げます。

文献

- [1] 札幌かに本家札幌駅前本店看板落下事件のまとめ ; <https://matome.naver.jp/odai/2142405463728339401> 2017 年 12 月 7 日確認
- [2] トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会 ; トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書 ; 国土交通省資料 (2013) <https://www.mlit.go.jp/common/001001299.pdf> 2017 年 12 月 7 日確認
- [3] 長谷部和彦、水野洋輔、中村健太郎 ; “電磁超音波を用いた接着系アンカーの健全性評価” ; 超音波 TECHNO、Vol.29 No.4、pp.36-39(2017)
- [4] 高鍋雅則、三輪秀雄、加賀敏明、長岡康之 ; “電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト定着部の健全性評価 一評価指標の検討ー” ; 平成 29 年度日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集 ; pp.179-182(2017)
- [5] 田中雄介、星野秀和、小倉幸夫、山口暁、石塚清堯 ; “超音波によるアンカーボルトの非破壊検査” ; 平成 29 年度日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集 ; pp.175-178(2017)
- [6] 田中雄介、星野秀和、小倉幸夫 ; “超音波による接着系アンカーボルトの検査” ; アコースティックイメージング研究会資料 AI-2017-30(2017)
- [7] TRUST 公式動画チャンネル ; 2016/3/7 【あと施工アンカーのトラスト】アンカー施工・施工不良実験 (接着系アンカーボルトの検査) ; <https://www.youtube.com/watch?v=HE0R9YbfYG4> 平成 29 年 12 月 25 日確認