

超音波による接着系アンカーボルトの非破壊検査

Non-destructive inspection of chemical anchor bolts by ultrasonic

田中 雄介
Yuusuke Tanaka

星野 秀和
Hidekazu Hoshino

小倉 幸夫
Yukio Ogura

ジャパンプローブ株式会社 Japan Probe Co., Ltd.

講演概要

看板の設置やトンネル天井板の固定などに使われている接着系アンカーボルトの接着強度について超音波で計測した。強度はアンカーボルトに超音波を送信し、超音波先端からの反射信号 A と遅れて受信される信号 B との比 B/A で評価した。施工不良の時には接着強度が小さくなるが、その時は B/A が小さくなった。 B/A の値を観測することで接着系アンカーボルトの強度評価を行うことができる。また、シミュレーションを行い、B の信号はボルト側面のねじ山からの反射信号と推定した。

KEYWORDS : 超音波、アンカーボルト、ケミカルアンカー、非破壊検査

1. 緒言

ビルに取り付けてある看板やトンネルの天井板の固定にはアンカーボルトが使用されている。これらに使用されているアンカーボルトは主に接着剤を使用した接着系アンカーボルト(ケミカルアンカーとも呼ばれる)である。ケミカルアンカーボルトの設置はビルなどのコンクリートに下穴を開けてから行うが、アンカーボルトを挿入する穴の状態により接着強度が変化する。近年看板の落下[1]やトンネルの崩落事故[2]が発生しているが、アンカーボルトの接着強度を評価することが必要である。特に[2]の笹子トンネルの事故では施工不良と考えられるアンカーボルトが複数あり、施工直後の健全性や接着強度を評価することが重要である。アンカーボルトの検査は目視検査や接触検査、打音検査があるが検査技師の能力によりばらつきがあり、定量的な評価ができない。また、一定の荷重を印加する引張試験により接着強度を推定する方法があるがこの方法もばらつきがあり、安定した評価が難しい問題がある。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する方法があり、超音波の共振状態変化[3]や周波数スペクトルの変化[4]から接着状態を推定する方法がある。これらの方法は電磁波を用いており、アンカーボルト自体を振動させて計測を行う方法である。アンカーボルト自体の振動から計測している方法はコンクリートの状態により共振や周波数スペクトルが変化する可能性がある。そこで我々はアンカーボルトに超音波を伝搬させ、反射信号から接着状態を評価する方法を提案した[5]。今回、シミュレーションにより超音波伝搬を調べ、検出される信号について評価した。

2. アンカーボルトの施工

接着系アンカーボルトはコンクリートにアンカーボルトを挿入する下穴を開けて施工する。接着剤カプセルを用いた施工方法は図 1 のものである。コンクリートに下穴を形成し、接着剤カプセルを挿入する。その後接着剤カプセルを割りながらアンカーボルトを挿入して、接着剤を硬化させる。コンクリートの下穴の直径、深さは用いるアンカーボルトのサイズにより標準値が決められており、標準値より大きくなると接着剤の量が一定のためアンカーボルトに接触する接着剤の量が減り接着強度が低下する。また、コンクリートの下穴を開けた後はきれいに掃除を行うことが重要である。下穴を開けた後

はコンクリートの破片などが多くあり、これらがアンカーボルトへ接着材が付着することを阻害する要因となる。硬化後の接着剤はカプセルの破片が混じっており、超音波が散乱してしまいほとんど伝搬しない。

3. アンカーボルトの超音波計測

3.1 周波数による超音波伝搬の違い

アンカーボルトの超音波計測に適する超音波の周波数について調べた。まずシミュレーションで超音波伝搬を確認した。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]のものでアンカーボルト頭頂部の平らな部分に超音波探触子を接触させて超音波を伝搬させた。アンカーボルト周囲には接着剤の樹脂が充填された状態で樹脂は超音波がすぐに減衰する。シミュレーションモデルは図2のようにアンカーボルトの周囲にエポキシ樹脂を配置したモデルである。アンカーボルトは鋼で密度 7800[kg/m³]、縦波音速 5920[m/s]、横波音速 3230[m/s]、エポキシ樹脂は密度 1850[kg/m³]、縦波音速 2600[m/s]、横波音速 1100[m/s]、減衰 2000[dB/m]とした。周波数 10[MHz]と 2[MHz]で超音波を送信し、反射信号を調べた。送信波形は 1 波の負の sin 波である。探触子幅は 10[mm]とした。図 3 にシミュレーションにおける受信波形を示す。時間 45[μs]付近にアンカーボルト先端からの反射信号が計測された。アンカーボルト先端からの反射信号は 10[MHz]のときに計測され、2[MHz]のときには計測されなかった。これはアンカーボルト側面のねじ山から超音波が漏洩したからである。M12 のねじはピッチが 1.75[mm]である。周波数 10[MHz]のときアンカーボルト内の超音波の波長は 0.59[mm]、周波数 2[MHz]のとき波長は 2.45[mm]である。波長がピッチより長いいため多くの超音波がアンカーボルトのねじ山からエポキシへ漏洩し、アンカーボルト先端からの反射信号が検出されなかった。波長が 1.75[mm]となる周波数は 3.4[MHz]であるのでこれ以上の周波数、例えば 5[MHz]でアンカーボルト先端からの反射信号が検出できると考えられる。M12 以上の呼び径のねじではピッチが大きくなるため、より小さな周波数での計測が可能である。周波数が大きいほどねじ山からの超音波の漏洩が小さくなるため、減衰で超音波が受信できない状態にはならない程度に高い周波数での計測が適している。

次にコンクリートに施工した接着系アンカーに超音波を送信し、シミュレーションと比較した。試験体は M12 の接着系アンカーボルトを直径 15[mm]、深さ 110[mm]の穴を開けたコンクリートに施工したものをを用いた。探触子の周波数は 10[MHz]と 2[MHz]で、超音波探傷器(菱電湘南エレクトロニクス製、UI-27)により超音波を送受信した。周波数 10[MHz]の受信波形を図 4、2[MHz]の受信波形を図 5 に示す。図 4 ではアンカーボルト先

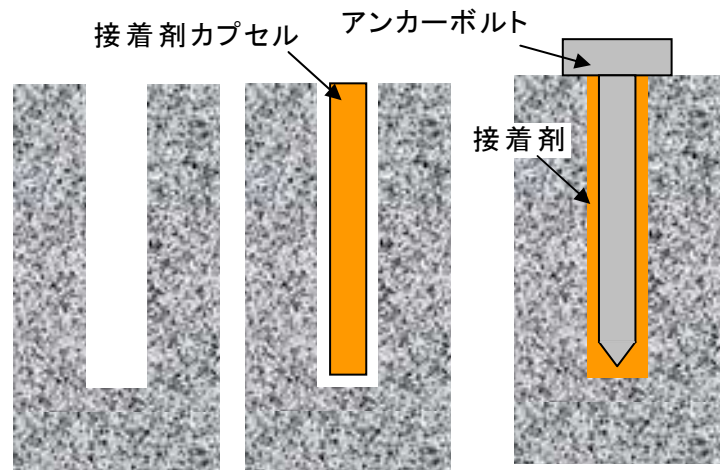


図 1 コンクリートへのアンカーボルト施工法

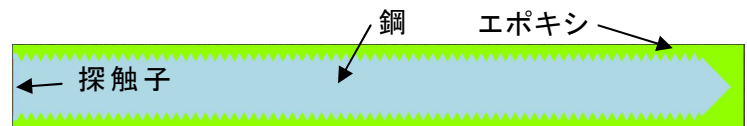


図 2 アンカーボルトシミュレーションモデル

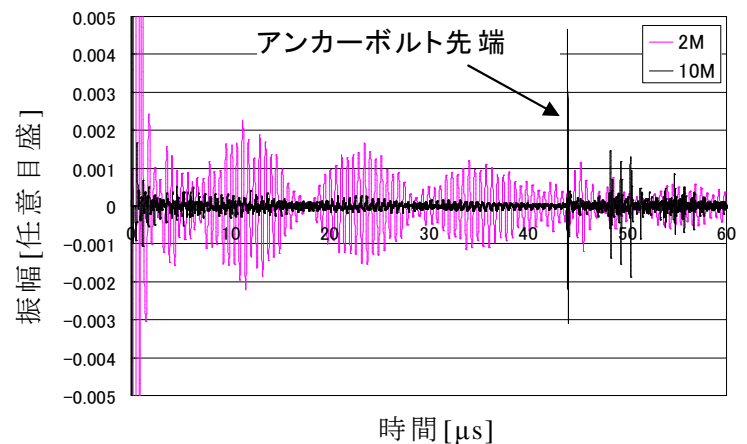


図 3 周波数による超音波伝搬の違い

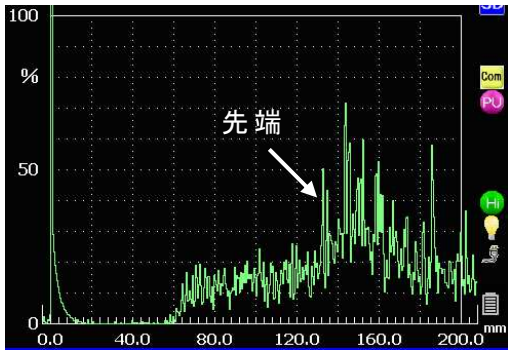


図4 10[MHz]の計測結果

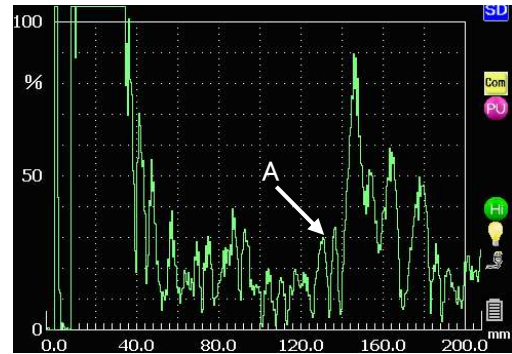


図5 2[MHz]の計測結果

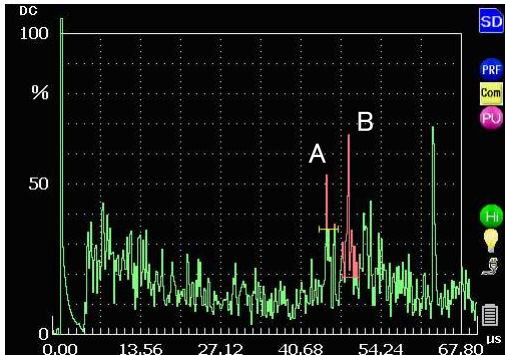


図6 下穴直径 15[mm]のときの受信波形

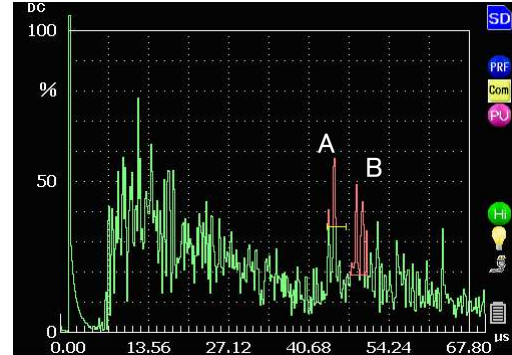


図7 下穴直径 16[mm]のときの受信波形

端からの反射信号が検出された。一方、図5ではAの位置にアンカーボルト先端からの反射信号が受信されるはずであるが、はっきりわかる信号で検出されなかった。これらの結果より、シミュレーションと同様に2[MHz]の周波数ではアンカーボルト側面のねじ山から超音波が多く漏洩していると考えられる。

シミュレーション、実験結果をまとめるとアンカーボルト側面のねじ山から超音波を漏洩させないためには超音波の波長がねじ山より小さくなるような周波数を選択する必要がある。例えば看板設置に多く使用されるM12のアンカーボルトはねじのピッチが1.75[mm]であるので、アンカーボルト内の音速を5900[m/s]とすると3.4[MHz]以上の周波数を選択する。この場合、5[MHz]や10[MHz]などの高周波超音波探触子を用いると良い。

3.2 下穴直径と受信波形

次にコンクリートの下穴直径を変化させた場合に受信波形がどのように変化するかを実験した。探触子の直径は10[mm]、周波数は10[MHz]でソフトプローブ(ジャンププローブ製、柔探)を用いた。超音波探傷器(菱電湘南エレクトロニクス製、UI-27)を用いて超音波を送受信した。アンカーボルトはM12、長さ130[mm]のものを用い、コンクリートの下穴深さは110[mm]とした。コンクリートの下穴直径は15[mm]が標準で、16[mm]、17[mm]、18[mm]、19[mm]と1[mm]ずつ下穴を大きくして5種類の下穴でアンカーボルトを施工した。受信波形を図6、図7に示す。図6は下穴直径15[mm]の時の受信波形で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。図7は下穴直径16[mm]の時の受信波形で下穴直径15[mm]の時と同様に信号AとBがそれぞれ検出された。図7ではAよりBの方が小さくなった。下穴直径を大きくするとBの信号がさらに小さくなり、信号AとBの比B/Aをとると図8のようになった。下穴直径が15[mm]ではB/Aが1.4、19[mm]ではB/Aが0.2となり、コンクリート下穴の直径が大きくなるほどB/Aの値が小さくなり、施工不良の状態では接着強度が小さくなるほどB/Aが小

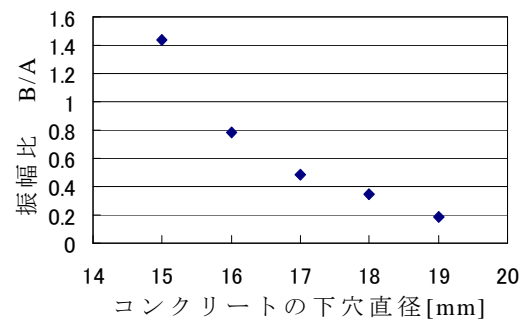


図8 下穴直径と信号AとBの比

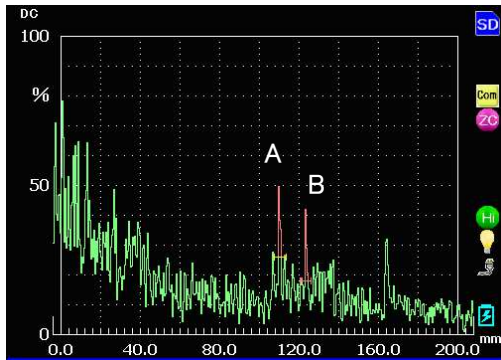


図9 下穴がきれいなきときの受信波形

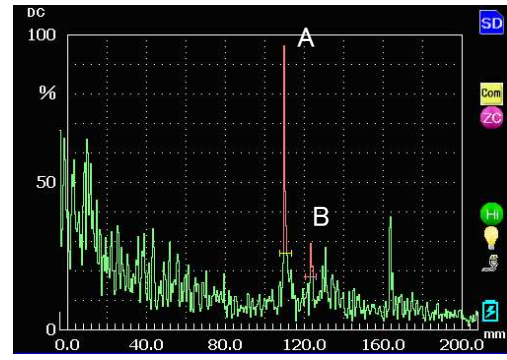


図10 下穴が汚いときの受信波形

さくなる結果となった。

3. 3 下穴の掃除具合と受信波形

次に下穴の掃除具合を変化させて超音波の受信波形を比較した。コンクリートに接着系アンカーボルトを施工した試験体について掃除具合を変化させた3種用意してそれぞれの波形を調べた。アンカーボルトは M12、長さ 130[mm] のものを用い、コンクリートの下穴は直径 15[mm]、深さ 110[mm] の標準施工とした。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ソフトプローブと UI-27 である。

下穴がきれいな場合の受信波形を図9、汚い場合の受信波形を図10に示す。図9の下穴をきれいに掃除した時は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 を比べると信号 B のほうが信号 A より 20%程度小さいが、図10の掃除が汚い状態のときは信号 B が信号 A より 70%程度小さくなる。掃除がきれいな状態では B/A が 0.84、掃除が汚い状態では B/A が 0.30 となった。この結果から接着系アンカーボルトの接着強度が低下するコンクリート下穴の掃除を行わない場合は B/A が小さくなるのがわかる。前節の結果と合わせてアンカーボルト下穴の直径が標準より大きい場合や下穴の掃除が不十分な場合など接着強度が低下する要因がある場合は B/A が小さくなり、B/A の値により接着強度を評価できる可能性がある。

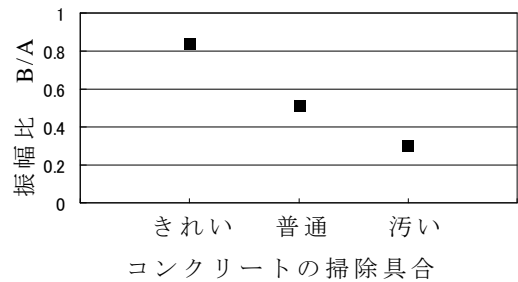
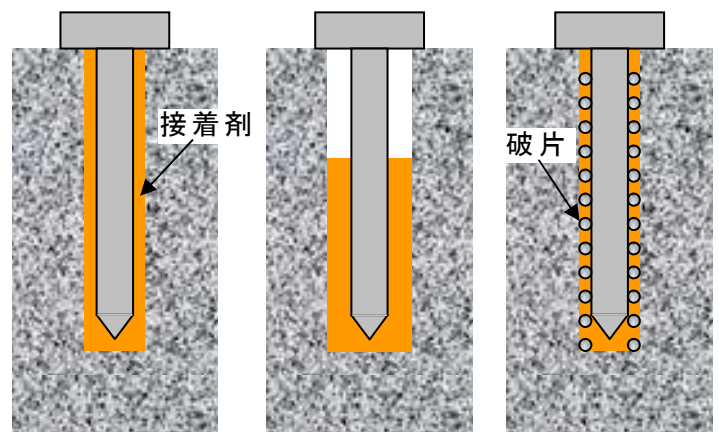


図11 掃除具合と信号 A と B の比

3. 4 施工不良時における接着系アンカーボルトの状態

接着系アンカーボルトの施工不良はコンクリートの下穴径が標準より大きい場合や下穴の掃除が不十分な場合であると前節までに述べた。施工不良の場合は信号比 B/A の値が低下するが、この場合に接着系アンカーボルトがどのような状態かを考える。図12に接着系アンカーボルトの状態図を示す。図12(a)の正常な状態ではアンカーボルト周囲全てに接着剤が付着した状態である。図12(b)の下穴径が大きい場合はカプセルの接着剤の量が一定なのでアンカーボルト側面に付着する接着剤の量が低下する。下穴が深すぎる場合も同様である。図12(c)の下穴掃除が不十分な場合は破片などが多く残っ



(a)正常な状態 (b)下穴径が大きい場合 (c)下穴掃除が不十分な場合

図12 各施工時の接着系アンカーボルトの状態

ており、アンカーボルト側面に挟まって接着剤が十分に付着していないと考えられる。これらの状態から施工不良の接着系アンカーボルトは側面に付着している接着剤の量が少ないと推定できる。アンカーボルト内部の超音波伝搬を考えると施工不良の場合はアンカーボルトから接着剤へ漏洩する超音波の量が低下すると考えられる。

4. アンカーボルト内の超音波伝搬

信号 A と信号 B の比 B/A による接着強度の評価について前章で述べたが、それぞれの信号がどのように発生するか調べる必要がある。

シミュレータ(イーコンピュート製、SWAN21)によりアンカーボルト内部の超音波伝搬を調べた。図 13 にシミュレーションモデルを示す。M12 のアンカーボルトで長さは 130[mm]である。左端に幅 10[mm]の探触子を配置し 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で密度 7800[kg/m³]、縦波音速 5920[m/s]、横波音速 3230[m/s]である。図 14 にシミュレーションの受信波形を示す。先端からの反射信号と遅れて発生する 3 つの信号 1、2、3 を検出した。これらの超音波伝搬を図 15 のように考える。アンカーボルト内に縦波が伝搬し、斜めにカットされた先端部分で反射する。反射された波はモード変換縦波と横波に分離し、縦波は反対側の斜辺で反射して探触子側へ伝搬して信号 A となる。一方、横波は側面のねじ山方向へ反射する。ねじ山で反射した信号が先端の斜面へ戻って反射し、反射した縦波成分が探触子側へ伝搬し、信号 B になると考えられる。シミュレーションでは 1、2、3 の信号が検出されたが、3 つ目までのねじ山から反射した信号である。4 つ目のねじ山からの反射信号についても 3 の信号の後少し検出されているが、反射角度が適当でないため振幅が弱くなった。

次にアンカーボルト単体に超音波を送信した時の波形を計測した。M12、長さ 130[mm]のアンカーボルト単体に周波数 10[MHz]で超音波を送信した。受信波形を図 16 に示す。先端からの反射信号と遅れて発生する信号 C、D、E がそれぞれ検出された。これらの信号の受信時間をシミュレーションと比較すると表 1 の結果となった。先端や信号 1、信号 C の受信時間差は 0.6[μs]となった。アンカーボルトの音速、形状など細かな違いがあることを考慮するとシミュレーションと同様の超音波伝搬が発生したと考えられる。

図 6、図 10 の受信信号とアンカーボルト単体の反射信号の受信時間を比較すると図 6 の信号 B は 48.8[μs]、図 9 の信号 B は 48.5[μs]である。これらの結果から考えると信号 B は図 16 の先端に一番近いねじ山からの反射信号 C に相当すると考えられ



図 13 アンカーボルトシミュレーションモデル

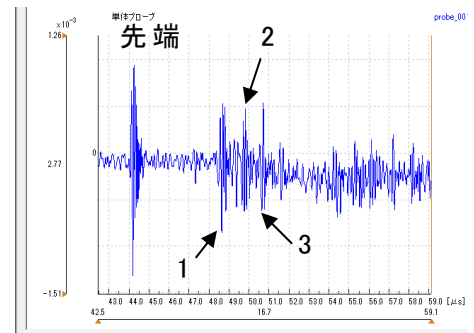


図 14 シミュレーション結果

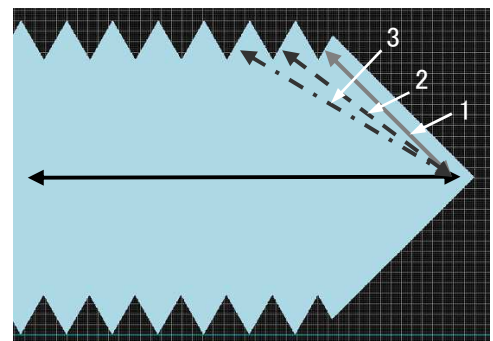


図 15 先端の超音波伝搬

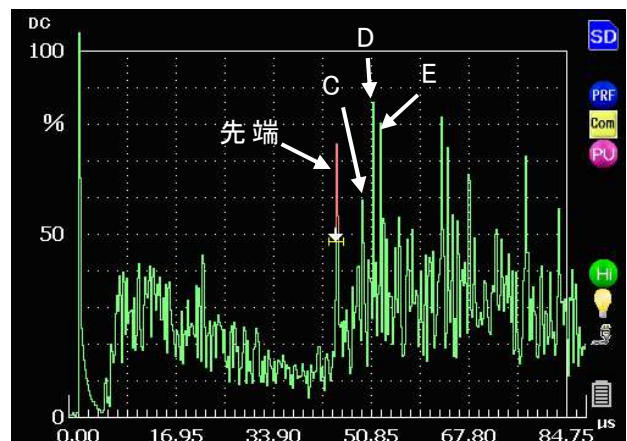


図 16 アンカーボルト単体の反射信号

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

る。

今後の課題としては接着系アンカーボルトの施工不良をシミュレーションでモデル化することである。現在のモデルでは信号 A と信号 B は検出されても B/A の値がシミュレーションされていない。今後アンカーボルト先端からの超音波の漏洩なども考慮してモデルを作成する必要がある。

5. 結 言

接着系アンカーボルトの超音波検査を行い、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 から接着強度を評価する方法を提案した。今後の課題として B/A の値と実際の引張強度との関係を調べることで、B/A を評価できるシミュレーションモデルを作成することである。

謝辞

株式会社アインの石塚様、山口様にはアンカーボル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。

参考文献

- [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 ー評価指標の検討ー；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)