

ロックボルト・ロックアンカーの維持管理および劣化 に対する非破壊試験法の解析的検討

アイダン オメル¹・金原俊也²、上原史洋²・川本眺万³

¹正会員 東海大学 海洋学部 (〒424-0816 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)
E-mail: aydan@scc.u-tokai.ac.jp

²中部電力株式会社 (〒461-8680 名古屋市東区東新町1番地)

³正会員 名古屋大学 工学部 名誉教授 (〒424-0816 名古屋市千種区)

打撃によるロックボルト・ロックアンカーの波動応答を利用する非破壊試験が有効であると考えられる。しかし、この方法によるロックボルト・ロックアンカーの緊張力・軸力や腐食個所の把握については、ロックボルト・ロックアンカーの付着状況や腐食個所、周辺岩盤の剛性などによる波動応答の違いを把握する必要がある。本研究では、ロックボルト・ロックアンカーの動力学応答の基礎式を誘導し、芯材の物理特性を計測し、付着状況、腐食部分の存在、緊張力を考慮して数値解析を行い、その数値解析結果に基づいて、ロックボルト・ロックアンカーに関して行う現場計測結果の解釈の仕方を検討して、まとめたものである。

Key Words : rockbolts, rockanchor, non-destructive tests, numerical analyses

1. はじめに

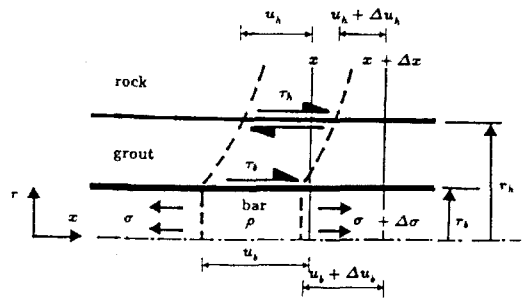
既設構造物の補強・支保部材として利用されるロックボルト・ロックアンカーが健全かどうかは構造物の安全性および維持管理において大変重要な要素である。ロックボルト・ロックアンカーの健全さを検証する試験は破壊試験と非破壊試験に大別されるが、破壊試験は試験費が高く、破壊したロックボルト・ロックアンカーの代替りのもの打設することが必要である。そこで、打撃によるロックボルト・ロックアンカーの波動応答を利用する非破壊試験が有効であると考えられる。しかし、この方法によるロックボルト・ロックアンカーの緊張力や損傷個所の把握については、周辺岩盤の剛性などによる波動応答の違いを把握する必要がある。本論文で、非破壊試験に利用されると思われる打撃試験法に着目して、ロックボルト・ロックアンカーの波動応答に対する基礎式を誘導し、その波動応答に対して行った数値シミュレーションよりロックボルト・ロックアンカーの健全さを判断する基礎データを求める。

2. ロックボルト・ロックアンカーの波動方程式

ロックボルト・ロックアンカーの力学応答の基礎式は

静的な問題に関して下記のように誘導されている^{1,2)}：

$$\frac{d\sigma}{dx} + \frac{2}{r_b} \tau_b = 0 \quad (1)$$



(a) ロックボルト・ロックアンカー縦波モデル

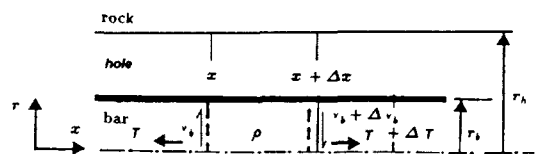


図-1 ロックボルト・ロックアンカー波動モデル

ここで σ, τ_b, r_b と x は芯材の軸応力, せん断応力, 半径および先端から距離である. 上式において, 慣性項を追加すると下記ようになる(図—1(a)).

$$\rho \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{2}{r_b} \tau_b \quad (2)$$

緊張力 (σ) が作用しているロックボルト・ロックアンカーの場合, ボルト・アンカー軸に直角方向の揺れに対する波動方程式は下記のように誘導される(図—1(b)).

$$\frac{\partial^2 v_b}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho A} \frac{\partial^2 v_b}{\partial x^2} \quad (3)$$

3. 運動方程式の有限要素法による定式化

(1) 弱定式化

式(2)に変分原理を適用すると, 積分形は次のようになる.

$$\int \delta u_b \rho \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} dx = \int \delta u_b \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx + \int \delta u_b \frac{2}{r_b} \tau_b dx \quad (4)$$

ここで

$$\delta u_b \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\delta u_b \sigma) - \frac{\partial \delta u_b}{\partial x} \sigma$$

である. これを式(4)に代入すると次式が得られる.

$$\int \delta u_b \rho \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} dx + \int \frac{\partial \delta u_b}{\partial x} \sigma dx - \int \delta u_b \frac{2}{r_b} \tau_b dx = \int \delta u_b \sigma_n \Big|_{x=a}^{x=b} \quad (5)$$

(2) 離散化

導き出した式(5)の有限要素法における定式化を考える. 式(5)においてロックボルト・ロックアンカーの各要素に対し要素内の変位は次のように近似されとする.

$$u_b = [N] \{U_b\} \quad (6)$$

$$a_b = \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} = [N] \{\ddot{u}_b\} \quad (7)$$

$$\varepsilon_b \frac{\partial u_b}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} ([N(x)] \{u_b\}) = [B] \{u_b\} \quad (8)$$

上記の関係式を式(5)に代入し, 有限要素法における定式化は以下のように得られる.

$$[M_e] \{\ddot{u}_b\} + [C_e] \{\dot{u}_b\} + [K_e] \{u_b\} = \{f_e\} \quad (9)$$

ここで,

$$[M_e] = \int \rho [N]^T [N] dx$$

$$[C_e] = \int \eta [B]^T [B] dx$$

$$[K_e] = \int E [B]^T [B] dx - \int \frac{2Kg}{r_b} [N]^T [N] dx$$

である. 同様に式(3)の有限要素法における定式化は以下のようになる.

$$[M_e] \{\ddot{v}_b\} + [T_e] \{v_b\} = \{t_e\} \quad (10)$$

ここで,

$$[M_e] = \int \rho [N]^T [N] dx$$

$$[T_e] = \int \frac{T}{A} [B]^T [B] dx \text{ である.}$$

4. 芯材の物理力学特性

ロックボルト・ロックアンカーの芯材として, スチールが利用されることが多い. 既存のスチールおよび現場で利用された多少さびが認められるより線, PC 鋼棒, 異形鉄筋に対して得られた実験結果を表-1 に示す(図—2). また, 70 年前に建設された清水橋における丸棒の物性値と伊計島でさびが進んでいた丸棒の値を同表に示した. この表からわかるように PC 鋼棒の弾性波速度は芯材弾性波速度とほぼ同様である. さびが進んだ伊計島で回収した丸棒の弾性波速度はかなり小さくなっている.



図-2 室内における PC 鋼棒の弾性波速度試験の様子

表-1 鉄, PC 鋼棒, 異形鉄筋などの物理力学特性

種類	単位体積重量 (kN/m^3)	縦波速度 (km/s)	横波速度 (km/s)	弾性係数 (GPa)	引張り強度 (MPa)
PC 鋼棒	7.56	6.05			
PC より線	6.96				
伊計島さびた丸棒		4.83			
JR 清水橋丸棒	7.54-7.85			196-213	425-458
異形鉄筋		5.55			
スチール		5.95	3.23		
鉄		5.91			
理論値	7.56	5.97	3.19	200	

5. さびの評価

一般的にさびた部分の影響は断面欠損として考えられる(図-3). その場合芯材の弾性波速度(v_p)は下記のような式に従うと考えられる.

$$\alpha = 1 - \left(\frac{v_p^*}{v_p^0} \right)^2 \quad (11)$$

ここで α はさびによる欠損率である.

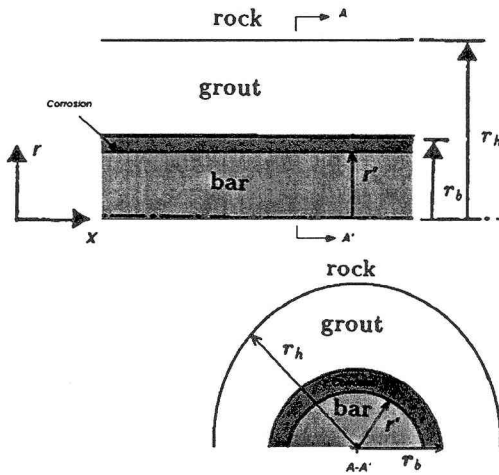


図-3: 腐食モデル

6. 解析結果と考察

(1) 腐食がない場合

次に, 2 節で誘導した支配方程式に基づいて非破壊試験の数値シミュレーションを行う. 解析条件として, 次の4つのケースを考えた.

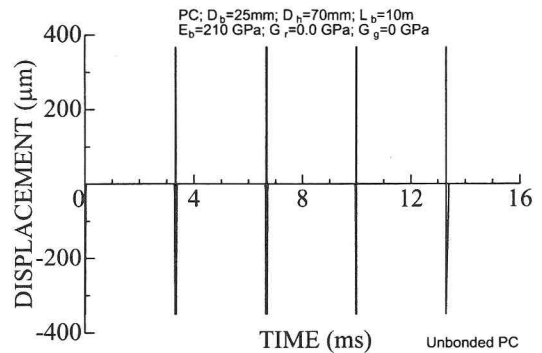
- ケース1: PC 鋼棒: 付着なし
- ケース2: PC 鋼棒: 付着あり
- ケース3: PC より線: 付着なし
- ケース4: PC より線: 付着あり

打撃を行った近傍で選定した接点で変位応答を計測するとし, その解析結果を図-4 および図-5 に示す. また, 解析に用いた材料定数とアンカー体に対する幾何学パラメータを各図中に示す.

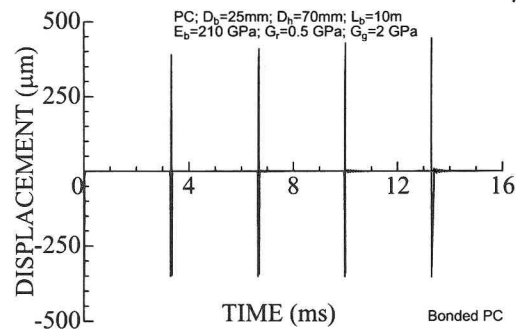
図-4より, 付着がないPC鋼棒の場合, 縦波はアンカー体の弾性波速度(6km/s)で往復している. アンカー体を弾性体としてモデル化しているため, その振幅は変わらず一定間隔で往復している. 一方, 付着がある場合, 岩盤のせん断剛性によってアンカー体には打撃による波形の後にノイズに類似した波形が現れ, その振幅は次第に大きくなっている.

図-5より, PC より線では, PC 鋼棒に比べ, 打撃波の

往復時間が長くなっている. これは, PC より線の弾性波速度が約 3.34km/s であり, PC 鋼棒の弾性波速度より遅いためである.



(a) ケース1: PC 鋼棒・付着なし



(b) ケース2: PC 鋼棒・付着あり

図-4 PC 鋼棒体の振動応答

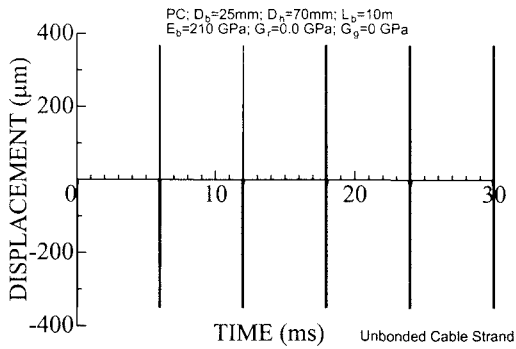
(2) 腐食がある場合

次に, 芯材長さの真中の位置で腐食した部分があると想定して, 次の4つのケースを考えて解析を行った.

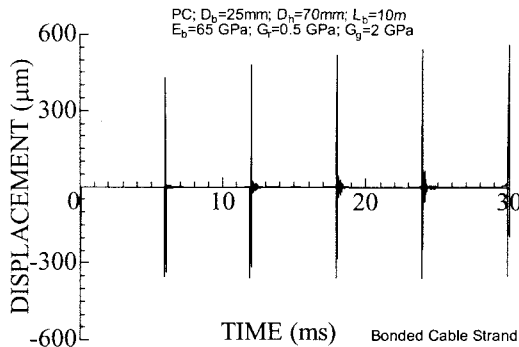
- ケース1: PC 鋼棒: 付着なし
- ケース2: PC 鋼棒: 付着あり
- ケース3: PC より線: 付着なし
- ケース4: PC より線: 付着あり

打撃を行った近傍で選定した接点で変位応答を計測するとし, その解析結果を図-6 および図-7 に示す. また, 解析に用いた材料定数とアンカー体に対する幾何学パラメータを各図中に示し, (1)節で使用したパラメータと同様である.

図-6より, 付着がない場合, 縦波はアンカー体の弾性波速度(6km/s)の半分で往復している. アンカー体を弾性体としてモデル化しているが, その振幅は経過時間とともに変化している. 一方, 付着がある場合, 岩盤のせん断剛性によってアンカー体における振動に打撃による波の後にノイズに類似している波が現れ, その振幅は次第に大きくなっていく.

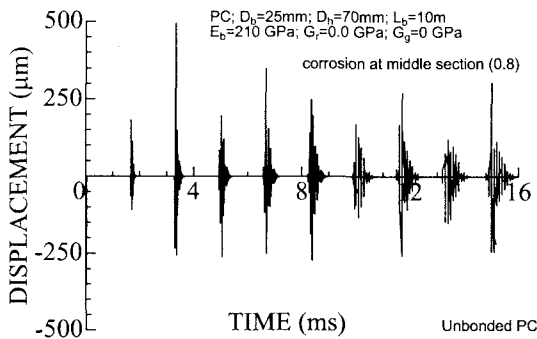


(a) ケース 3 : PC より線・付着なし

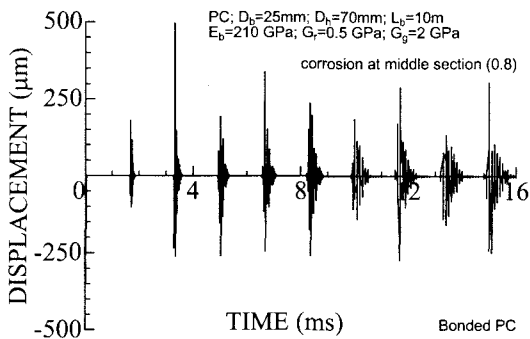


(b) ケース 4 : PC より線・付着あり

図-5 : PC より線体の振動応答



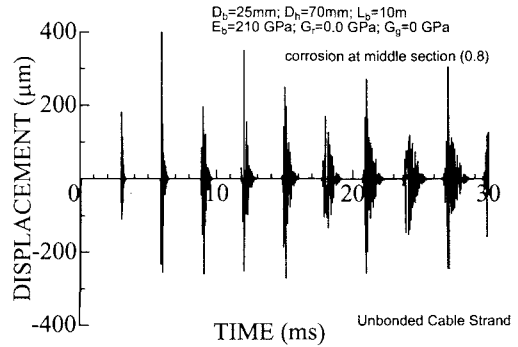
(a) ケース 1 : PC 鋼棒・付着なし



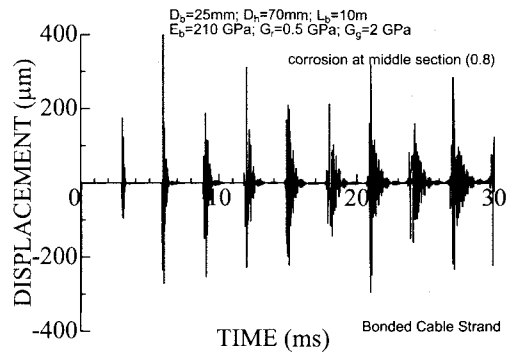
(b) ケース 2 : PC 鋼棒・付着あり

図-6 : PC 鋼棒体の振動応答

図-7 で、PC より線体の場合も同様な傾向が得られているが、腐食した部分の影響を受けて腐食が無い場合の半分の時間間隔で反射波が現れている。



(a) ケース 3 : PC より線・付着なし



(b) ケース 4 : PC より線・付着あり

図-7 : PC より線体の振動応答

(3) 緊張力とカブラーの影響

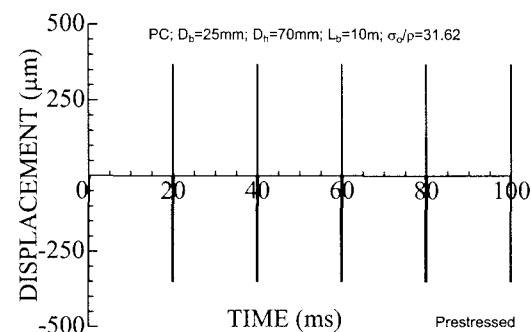
次に、アンカー体に緊張力が作用した場合にその値とカブラーの有無が与える影響を検討する。次の 4 つのケースを考えて解析を行った。

ケース 1 : 緊張力係数の値は 31.62 で、カブラーがなし
 ケース 2 : 緊張力係数の値は 54.77 で、カブラーがなし
 ケース 3 : 緊張力係数の値は 31.62 で、カブラーがあり
 ケース 4 : 緊張力係数の値は 54.77 で、カブラーがあり
 打撃を行った近傍で選定した接点で変位応答を計測するとし、その解析結果を図-8及び図-9に示す。また、解析に用いた材料定数とアンカー体に対する幾何学パラメータを各図中に示す通りとし、(1)節で使用したパラメータと同様である。カブラー部分は断面が大きくなると考えて、その影響を検討することにした。

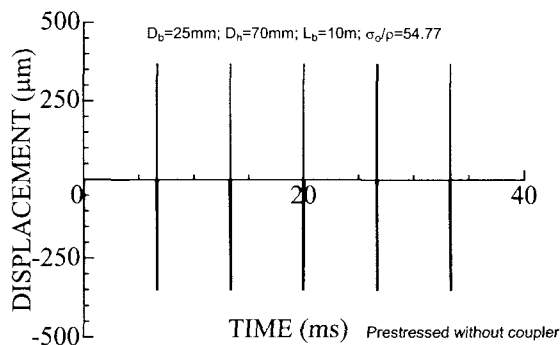
図-8 に見られるように、緊張力係数の値は 31.62 と 54.77 で、カブラーがなしの場合、緊張力係数の値により、打撃波の往復時間が異なっている。つまり、緊張力係数の値が大きくなると往復時間が短くなるが、振幅は

それほど変化しない。

図-9 で、アンカー体はカプラーで連結されとして行った解析結果を示す。カプラーの影響を強く受け、反射波と最大振幅の後ノイズのような波が発生する。また、その最大振幅値は一定ではない。



(a) ケース 1 : 緊張力係数の値は 31.62 で、カプラーがなし



(b) ケース 2 : 緊張力係数の値は 54.77 で、カプラーがなし

図-8: アンカー体の振動応答

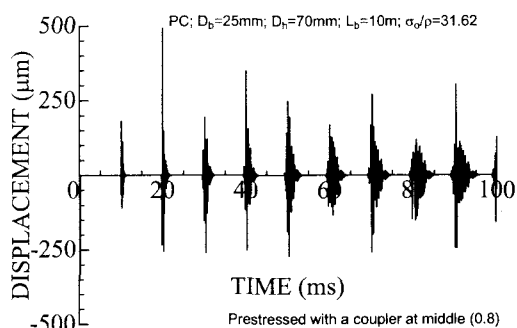
7. 結論

本論分で支保部材の波動応答を利用した非破壊試験法についての検討を行った。本研究で得られた主な結論は下記の通りである。

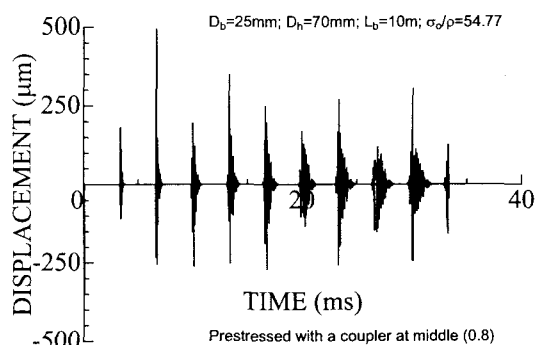
- 非破壊試験の結果と数値解析結果を比較すると大変類似していることがわかる。
- PC鋼棒の場合で付着がない場合、アンカー体の弾性波速度 (6km/s) で往復している。
- アンカーを弾性体としてモデル化した場合、打撃波の振幅および往復時間は一定である。
- 付着がある場合、岩盤のせん断剛性によってアンカー体には打撃による波の後にノイズに類似した波が現れ、その振幅は次第に大きくなっていく。
- PCより線体の場合も、同様な傾向が得られている

が、弾性波速度の違いから打撃波の往復時間が約 2 倍になる。

- 芯材に腐食部分やカプラーがある場合、芯材の断面積が変化するため、その部分で反射波が発生する。この反射波とその特性より腐食のような欠損位置や断面積の変化位置などを推定することが可能と考えられる。
- アンカー体とその周辺岩盤の非線形性や減衰特性を把握できれば、より現実的に推測することが可能と考えられる。



(a) ケース 3 : 緊張力係数の値は 31.62 で、カプラーがあり



(b) ケース 4 : 緊張力係数の値は 54.77 で、カプラーがあり

図-9: アンカー体の振動応答

参考文献

- 1) Aydan, Ö. (1989): The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts. 名古屋大学博士論文。
- 2) アイダン・オメル, 大和田洋一 (2004): 振動中の不連続性岩盤におけるロックボルトの挙動について。土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 225-226。

A NUMERICAL ANALYSIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTS FOR THE MAINTENANCE AND ASSESSMENT OF CORROSION OF ROCKBOLTS AND ROCKANCHORS

Ömer AYDAN, Toshiya KINBARA, Fumihiro UEHARA and Toshikazu KAWAMOTO

The assessment of support systems such rockbolts and rockanchors are very important for the maintenance of existing rock engineering structures such as underground powerhouses, dams and slopes. The utilization of non-destructive tests are very preferable compared to destructive tests such as pull-out tests. The dynamic wave responses of rockanchors and rockbolts could be used for non-destructive tests. These tests should generally provide some information on the constructional conditions, corrosion and axial force conditions. In the first part of this study, some theoretical models are developed for the axial and transverse dynamic tests and then results of numerical simulations are presented by considering possible conditions in-situ. These conditions are the bonding quality, the existence of corroded parts or couplers and pre-stress. The results of the numerical simulations could be very valuable for interpretation of the wave responses to be measured in non-destructive dynamic tests in-situ.