

基部が腐食した防護柵支柱に対する健全度評価手法の構築

Construction of structural integrity assessment method for the guardrail post with the corrosion at the basement

深田宰史*, 水野卓哉**, 青山實伸***

Saiji Fukada, Takuya Mizuno, Minobu Aoyama

*博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

saiji@se.kanazawa-u.ac.jp

** 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 株式会社 (〒920-0025 石川県金沢市駅西本町 3-7-1)

***博(工), 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 株式会社 (同上)

Chloride due to de-icing salt induced the corrosion of the guardrail post on the highway along the seashore of Hokuriku district. This study proposed the non-destructive method to estimate the structural integrity using the vibration mode obtained by the vibration test. Test guardrail posts which modeled the corrosion were produced. The vibration characteristics of those posts due to the impact and the resonance examination were observed. Also the stiffness and load carrying performance of those posts were investigated using FEM analysis. As the results of the examination and analysis, this study targeted the high-order vibration mode shapes to estimate the corrosion damage of the guardrail post at the basement. Moreover, the structural integrity of those posts was estimated using the relation of the MAC (Modal Assurance Criterion) and the ratio of the bending stiffness.

Key Words: guardrail post, corrosion, non-destructive, vibration mode

キーワード: 防護柵支柱, 腐食, 非破壊, 振動モード

1. はじめに

積雪寒冷地域では, 冬季の降雪による路面凍結を防止するため, 凍結防止剤(塩化ナトリウム)を路面に散布している. 散布された凍結防止剤は, 除雪作業により路肩に集積され, 防護柵(ガードレール)支柱基部を腐食させる環境状況となっている. また, 日本海側に位置する北陸地方の沿岸部における高速道路では, 飛来塩分が鋼材の腐食速度を加速させている.

このような背景のもと, 防護柵支柱基部の腐食に対する耐荷力評価¹⁾⁴⁾や維持管理方法が課題となっている. また, 以下のような問題も加わり, 点検する際にどの程度の腐食段階で支柱を交換するべきなのか点検技術者の経験的な判断によるところが大きく, 明確な評価手法がないのが現状である.

- a) 支柱基部に防食テープを施しており, 腐食の程度を目視から即座に判断できない.
- b) 腐食により層状剥離を生じている支柱では, さびを除去する時間を要する上に厚さ計による正確な肉厚測定が困難である.

- c) 支柱基部にコンクリートが充填されている支柱もあり, 厚さ計で正確な肉厚を測定できない.
- d) 様々な支柱形式が存在し, 統一的な評価が難しい.

このような状況に対して, 支柱の耐荷性能を評価して交換要否を簡易的に判定できる非破壊の評価手法の構築が求められている. そこで本研究では, 基部の腐食を模擬した様々な防護柵支柱を作製し, それらに対して振動試験を行い, それぞれの振動モードの相違を評価することにより, 支柱の交換要否を判定できる健全度評価手法を構築した.

2. 本研究の位置付け

2.1 これまでの損傷評価手法

これまで, 構造物の振動データを用いた様々な損傷評価手法が研究されてきた. 基本的には部材の損傷は, 剛性または質量の変化を生じるとして, 振動数やモード減衰定数などの振動特性に着目した事例が多い. 加藤ら⁵⁾は, 実在のPC橋を用いて破壊に至るまで静的載荷実験を行い, 1次, 2次および

水平振動の振動数やモード減衰定数を用いて載荷荷重との関係について明らかにした。西村ら⁶⁾は、模型桁を用いて載荷実験と数値解析から固有振動数の変化に基づいた評価を行い、低次の曲げ振動だけでなく、ねじれ振動や高次の振動を用いて損傷評価の精度を高めた。振動数や減衰定数を用いた手法では分析精度が問題となるが、吉岡ら⁷⁾は、トラス橋の局部的な斜材の損傷評価として、インパルスハンマーを用いた衝撃加振から、Eigensystem Realization Algorithm (以下、ERA)⁸⁾を用いたモード減衰定数の変化を評価手法に取り入れた。

また、振動数や減衰定数を用いた評価では、健全時の初期値を必要とするが、初期値の不要な振動モードの曲率⁹⁻¹¹⁾、フーリエ振幅比¹²⁾に着目した手法も提案されている。さらに、振動モード形状そのものを評価指標に取り入れた信頼性評価基準 (Modal Assurance Criterion, 以下、MAC)¹³⁾を用いた評価手法も提案されている。この手法は、2つの振動モード形状の相関を1つの数値として表現できるものであり、式(1)で算出される。

$$MAC = \frac{\left(\sum_{j=1}^n \phi_{Tj} \phi_{Ej} \right)^2}{\sum_{j=1}^n \phi_{Tj}^2 \sum_{j=1}^n \phi_{Ej}^2} \quad (1)$$

ここに、 ϕ_T は理論による振動モード、 ϕ_E は計測による振動モードを示し、 n は振動モードの観測点の数を示している。

2.2 本研究で用いた健全度評価手法

上述したこれまでの知見を基にして、本研究においても、防護柵支柱基部の腐食を剛性の低下、質量の減少とみなし、振動特性の変化により腐食評価を行うことを基本とした。また、低次振動の振動数やモード減衰定数を用いた評価をするのではなく、後述するように、高次振動を対象とした振動モードの変化に着目した評価手法を構築した。

具体的な手順として、本評価手法の概念をまとめたものを図-1に示す。

①衝撃加振試験を行う。②ERAにより支柱に卓越する振動数と振動モードを算出する。③評価対象とする振動数で圧電素子を用いた共振加振試験¹⁴⁾を行い、評価対象の振動を共振により励起させ、振動モードを算出する。なお、③については、衝撃加振試験だけで精度よく振動モードを算出することができれば、省略することもできる。④式(1)からMACを求め、そのMACと後述する曲げ剛性比との関係から交換要否を判定できる健全度を評価する。

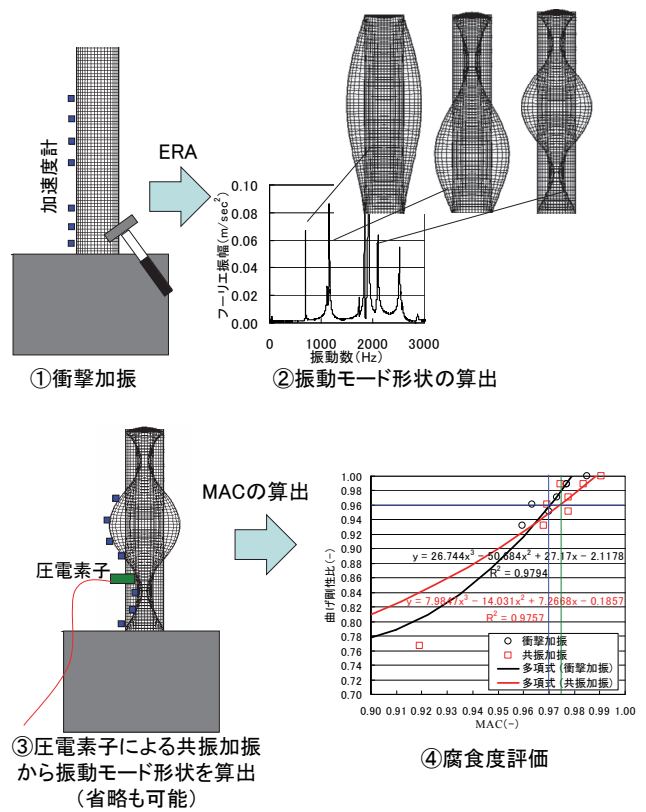


図-1 本評価手法の概念図

3. 数値解析

3.1 解析モデル

実験に先立ち、実際に使用される防護柵支柱 (直径 139.8mm, 板厚 4.5mm, STK400) の基部が腐食した場合、曲げ剛性および振動特性 (振動数, 振動モード) がどの程度変化するか調べるために非線形解析および固有振動解析を行った。

解析検討ケースは、表-1に示すように健全ケースとして1ケース、部分腐食ケースとして34ケースおよび全周腐食ケースとして15ケース、合計50ケースとした。表中のケース名は腐食角度, 板厚および腐食幅を表している。

腐食部分のモデル化は、図-2に示すように部分腐食モデルとして、腐食幅 (支柱軸方向) 10mm に対して、腐食角度 (θ) を 18~324度まで変化させながら、健全時の板厚 4.5mm に対して 0mm (孔があいた状態), 1.5, 2.5 および 3.5mm としたケースを作成した。さらに、全周腐食モデルとして、腐食幅 (支柱軸方向) 10, 50mm のそれぞれの解析ケースに対して、全周の板厚を 1.5, 2.5 および 3.5mm と変化させたケースを作成した。

解析モデルは、高さ 700mm の支柱全体をシェル (板) 要素でモデル化した。解析モデルを図-3に示す。要素分割は、支柱軸方向に 10mm 間隔, 円周方向に 40 分割, 約 11mm 間隔としている。

表-1 解析検討ケース

ケース	腐食角度(度)	板厚(mm)	腐食幅(mm)	備考
c000_45_00	0	4.5	0	健全
c018_00_10	18	0	10	部分腐食
c018_15_10	18	1.5	10	部分腐食
c018_25_10	18	2.5	10	部分腐食
c018_35_10	18	3.5	10	部分腐食
c036_00_10	36	0	10	部分腐食
c036_15_10	36	1.5	10	部分腐食
c036_25_10	36	2.5	10	部分腐食
c036_35_10	36	3.5	10	部分腐食
c054_00_10	54	0	10	部分腐食
c054_15_10	54	1.5	10	部分腐食
c054_25_10	54	2.5	10	部分腐食
c054_35_10	54	3.5	10	部分腐食
c090_00_10	90	0	10	部分腐食
c090_15_10	90	1.5	10	部分腐食
c090_25_10	90	2.5	10	部分腐食
c090_35_10	90	3.5	10	部分腐食
c144_00_10	144	0	10	部分腐食
c144_15_10	144	1.5	10	部分腐食
c144_25_10	144	2.5	10	部分腐食
c144_35_10	144	3.5	10	部分腐食
c180_00_10	180	0	10	部分腐食
c180_15_10	180	1.5	10	部分腐食
c180_25_10	180	2.5	10	部分腐食
c180_35_10	180	3.5	10	部分腐食
c234_00_10	234	0	10	部分腐食
c234_15_10	234	1.5	10	部分腐食
c234_25_10	234	2.5	10	部分腐食
c234_35_10	234	3.5	10	部分腐食
c270_15_10	270	1.5	10	部分腐食
c270_25_10	270	2.5	10	部分腐食
c270_35_10	270	3.5	10	部分腐食
c324_15_10	324	1.5	10	部分腐食
c324_25_10	324	2.5	10	部分腐食
c324_35_10	324	3.5	10	部分腐食
c360_15_10	360	1.5	10	全周腐食
c360_25_10	360	2.5	10	全周腐食
c360_35_10	360	3.5	10	全周腐食
c360_15_20	360	1.5	20	全周腐食
c360_25_20	360	2.5	20	全周腐食
c360_35_20	360	3.5	20	全周腐食
c360_15_30	360	1.5	30	全周腐食
c360_25_30	360	2.5	30	全周腐食
c360_35_30	360	3.5	30	全周腐食
c360_15_40	360	1.5	40	全周腐食
c360_25_40	360	2.5	40	全周腐食
c360_35_40	360	3.5	40	全周腐食
c360_15_50	360	1.5	50	全周腐食
c360_25_50	360	2.5	50	全周腐食
c360_35_50	360	3.5	50	全周腐食

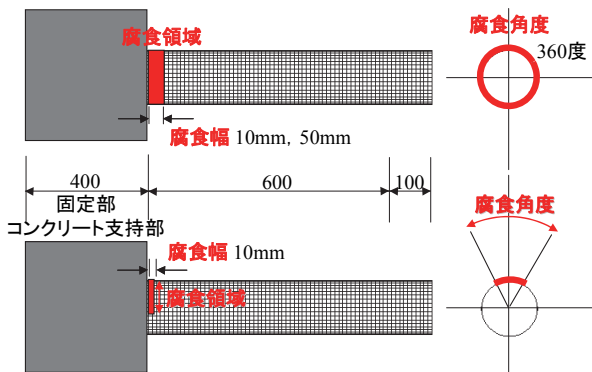


図-2 試験体（上段：全周腐食，下段：部分腐食）

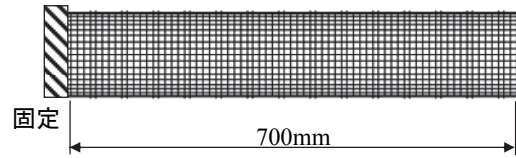


図-3 解析モデル（健全ケース，c000_45_00）

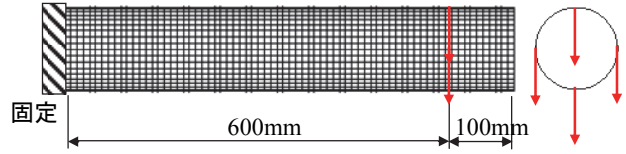


図-4 非線形解析における荷重載荷方法

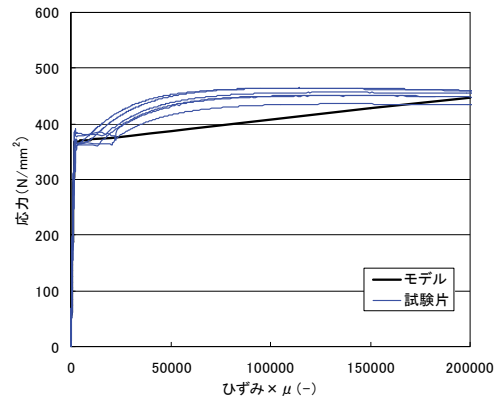


図-5 仮定した材料特性

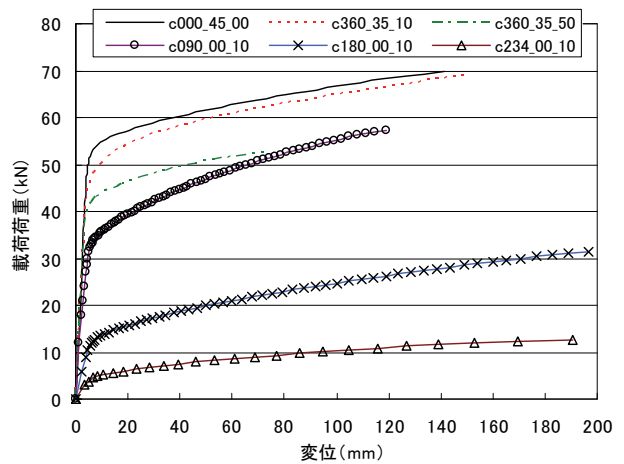


図-6 載荷荷重-変位図

境界条件は、支柱基部のコンクリート支持部を固定として扱った。また、上端部のふたは、剛な梁を用いてモデル化した。

3.2 非線形解析

上記のように基部の腐食を様々にモデル化した各解析モデルの耐荷力がどの程度なのか非線形解析により調べた。車両用防護柵標準仕様¹⁵⁾を参考

にして荷重は基部から 600mm の位置に荷重し、基部を固定とした。なお、局部的な変形を避けるため、荷重は図-4 に示すように円周上に 4 等分して荷重した。また、材料特性については、実物の支柱から切り出した試験片に対する引張試験から得られた図-5 に示す応力-ひずみ関係を使ってバイリニアの材料非線形を仮定した。

解析結果の一例として、表-1 の解析モデルの中から、荷重荷重と支柱先端の変位の結果を図-6 に示す。健全ケース (c000_45_00) の解析モデルでは、概ね耐荷力として 70kN、変形性能として 140mm であった。これに対して、解析モデルの中で最も腐食した状態をモデル化したケース (c234_00_10) の解析モデル (腐食幅 10mm、角度 234 度分の孔があいたモデル) では耐荷力 12.4kN、変形性能として 190mm となっていた。

これらの結果を用いて、弾性域における健全ケースの曲げ剛性と各ケースの曲げ剛性とを曲げ剛性比として表し、一方で塑性域まで考慮した健全ケースの等価曲げ剛性と各ケースの等価曲げ剛性とを比を等価曲げ剛性比とし、それらの関係を図-7 にまとめた。ここで、等価曲げ剛性は、60kN 時と原点を結んだときの曲げ剛性とした。車両用防護柵標準仕様・同解説から、支柱の最大支持力は、モルタル固定の場合 60kN (砂詰め固定の場合 50kN) 以上有するように規定されているため、ここでは、耐荷力 60kN を一つの基準とし、それ以上あるケースのみをプロットした。

これより、耐荷力 60kN 以上あるケースの中で、図中の赤丸部分に示したケースには曲げ剛性比と等価曲げ剛性比にある程度の関係性が見られ、その下限として、曲げ剛性比 0.96 を支柱交換要否の閾値とした。

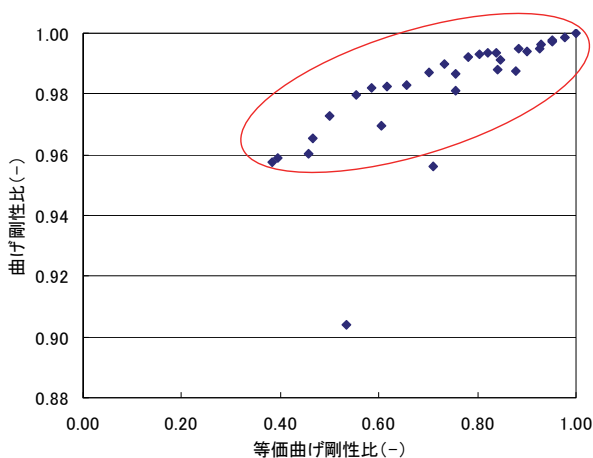


図-7 弾性域の曲げ剛性比と塑性域まで考慮した等価曲げ剛性比との関係

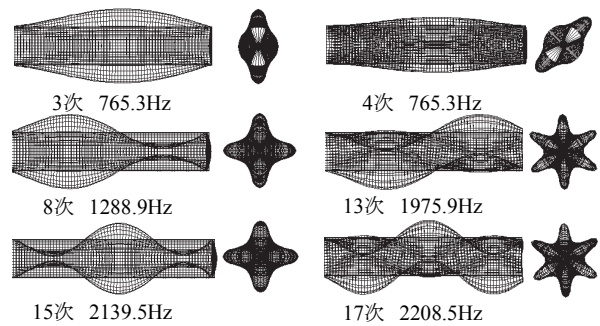


図-8 振動数と振動モード

非破壊による試験結果を評価する場合、弾性域での剛性を評価するため、ここでは弾性域の曲げ剛性比を指標とした評価を用いることにするが、弾性域の曲げ剛性比と塑性域まで考慮した等価曲げ剛性比との関係性が見られることから、等価曲げ剛性比への置き換えも可能と考える。

3.3 固有振動特性

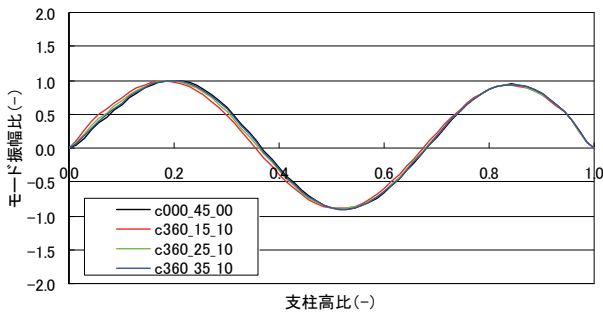
健全な防護柵支柱 (c000_45_00) がどのような振動特性を有するのか固有振動解析を行い、振動数および振動モードを把握した。その解析結果から後述する衝撃加振試験でよく卓越していた振動数と振動モードを図-8 にまとめた。

次に、上述した振動モードの中から、15 次振動 (2139.5Hz) を例として、支柱基部の腐食を様々にモデル化した場合の振動モードの違いを図-9 にまとめた。なお、横軸は支柱高比として、支柱高 700mm で正規化し、縦軸はモード振幅比として、それぞれの解析モデルのモード質量で正規化されたモード振幅に対して、健全ケースの最大値振幅で正規化した。

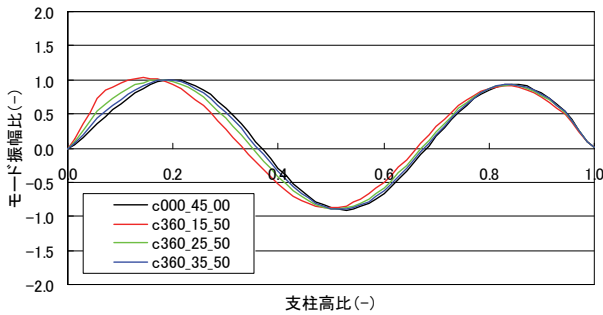
図-9 (a) の腐食領域は支柱高比 0-0.014 (腐食幅 10mm) になっており、この部分の板厚が薄くなるにしたがって、基部に近いモードの腹の位置が全体的に基部側に偏っていると同時に腐食領域での振幅が大きくなっている。同様に、図-9 (b) の腐食領域は支柱高比 0-0.071 (腐食幅 50mm) であり、板厚が薄くなるにしたがって、腐食領域でのモードの腹の位置が基部側に偏ると同時に、モード全体での振幅の変化も確認できる。さらに、図-9 (c) の腐食領域は支柱高比 0-0.014 (腐食幅 10mm) に孔のあいたケースであり、モード振幅および腹の位置が顕著に変化している。特に c180_00_10 ケースは円周方向に半分、孔があいているため、折れ曲がったようなモードになっている。

3.4 解析における健全度評価

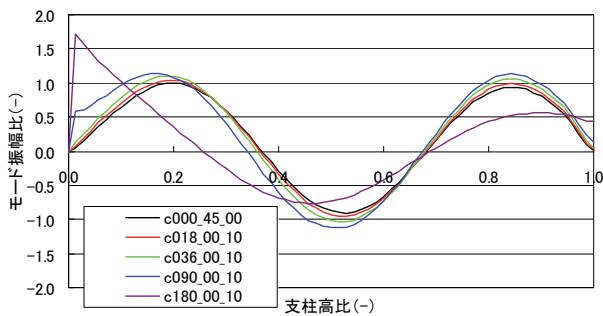
各解析モデルの曲げ剛性比と振動数比 (健全ケースで正規化) との関係性を求め、図-10 にまとめた。



(a) 腐食幅 10mm, 全周 15mm, 25mm, 35mm



(b) 腐食幅 50mm, 全周 15mm, 25mm, 35mm



(c) 腐食幅 10mm, 腐食角度 18, 36, 90, 180 度
 図-9 各解析モデルにおける振動モードの比較
 (c000_45_00 は健全なケースを示す)

また、もう一つの評価方法として、各解析モデルの曲げ剛性比と式 (1) に示した MAC (モード信頼性評価基準) との関係を図-11 にまとめた。なお、図-8 に示した解析値の振動モード図のうち、高次振動の 13 次振動、15 次振動および 17 次振動を対象にして曲げ剛性比と振動数比、曲げ剛性比と MAC との関係をもとめた。また、式 (1) に示す MAC の計算では、 ϕ_r として解析における健全ケース (c000_45_00) の振動モード、 ϕ_e は各腐食を模擬した解析における振動モードを用いて計算した。

図-10 に示した曲げ剛性比と振動数比の関係において、15 次振動と比べて、13 次振動、17 次振動の振動数比は変化量が小さく、交換要否の峻別を付けにくいと考えられる。また、図-10 に示した赤丸部分の孔のあいた部分腐食ケースは、全周腐食ケースとは違った傾向が示され、統一的な評価が難しいと考えられる (c180 以降孔のあいたケースはグラ

フ外にプロットされている)。これより、曲げ剛性比と振動数比を用いて現場の支柱に対して評価する場合、適用が難しいと考えられる。

次に、図-11 に示した曲げ剛性比と MAC (モード信頼性評価基準) との関係において、図-11(a) の 13 次振動と比べて、図-11(b), (c) の 15, 17 次振動は、MAC が曲げ剛性比に対して緩やかな勾配になっており、MAC の変化領域が大きくなっていることがわかる。これにより、15, 17 次振動を用いた方が、交換要否の峻別を付けやすいと考えた。しかし、図-11(c) の 17 次振動は、振動数比の場合と同様に、赤丸部分の孔のあいた部分腐食ケースは、全周腐食ケースとは違った傾向が示され、統一的な評価が難しい。一方、図-11(b) に示した 15 次振動では、曲げ剛性比と MAC に明確な相関が見られたことから、本研究では、曲げ剛性比と MAC を用いた評価を行い、15 次振動の振動モードを評価対象にすることにした。

また、車両用防護柵標準仕様・同解説によると本研究で用いた支柱の最大支持力としてモルタル固定の場合で 60kN (砂詰め固定 50kN) 以上有するように規定があるため、3.2 節で述べた曲げ剛性比 0.96 に対する 15 次振動を用いた MAC の閾値を近似曲線から求めたところ、解析上で 0.995 になった。

4. 実物の試験体を対象とした振動試験

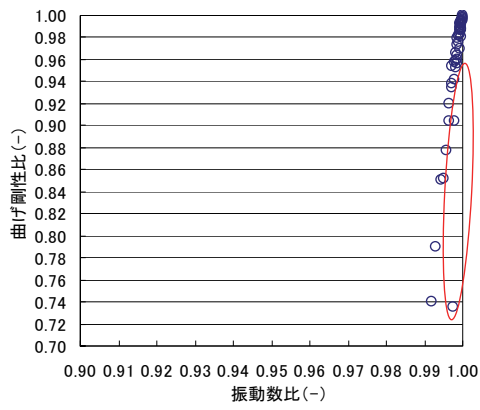
4.1 試験体

上記の解析結果を受けて、実際に使用されている防護柵支柱(直径 139.8mm, 板厚 4.5mm, STK400)を用い、解析モデルの中から表-2 に示す、健全ケース 1 体、部分腐食 4 体、全周腐食 6 体の合計 11 体を作製した。

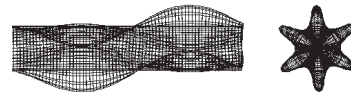
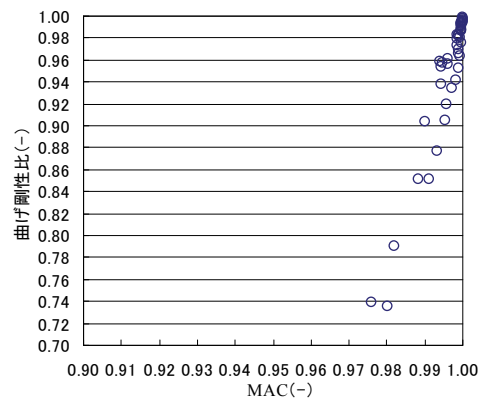
腐食部分のモデル化としては、図-12 に示すように部分腐食モデルとして、腐食幅 10mm に対して、腐食角度(θ)は 18 度、36 度、90 度および 180 度の領域に孔をあけた試験体を作製した。さらに、全周腐食モデルとして、腐食幅 10mm, 50mm のそれぞれに対して、全周の厚さを健全時 4.5mm に対して 3.5mm, 2.5mm および 1.5mm とした試験体を作製した。なお、支柱基部は図-13 に示すようにコンクリートで固定した (例として c360_15_50)。

4.2 衝撃加振試験

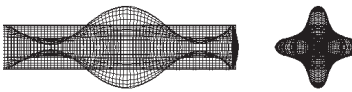
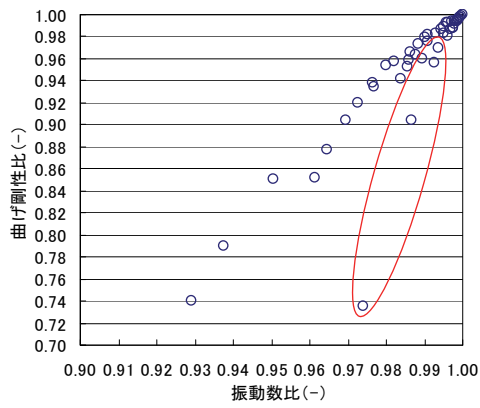
支柱の振動特性を調べるため、衝撃加振試験を行った。衝撃加振位置は、評価対象とした振動モードの腹の位置に近い基部から概ね 150-200mm 付近とした。加速度計は、基部から 50, 100, 150, 250, 350, 450, 550mm の位置に合計 7 か所設置した (図-13 参照)。



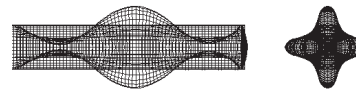
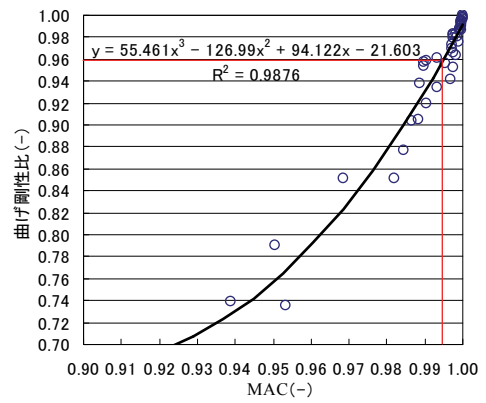
(a) 13 次振動 ($R^2=0.44$)



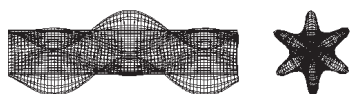
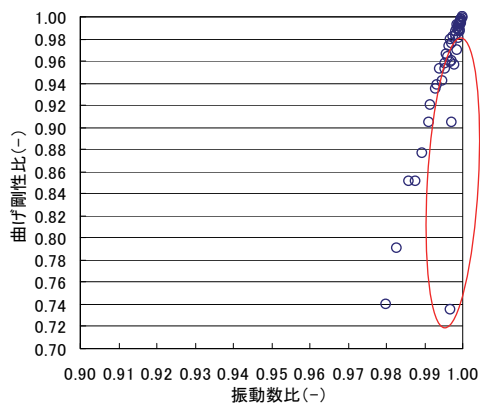
(a) 13 次振動 ($R^2=0.51$)



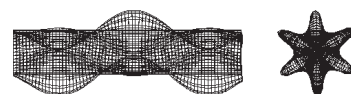
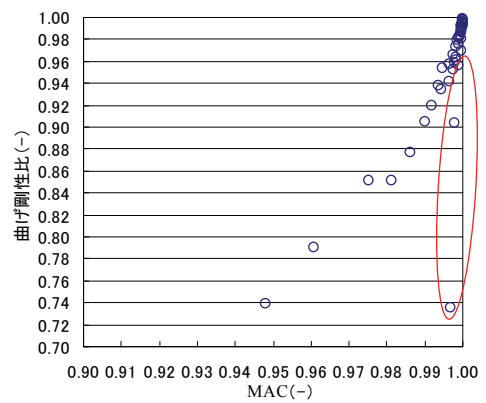
(b) 15 次振動 ($R^2=0.82$)



(b) 15 次振動 ($R^2=0.99$)



(c) 17 次振動 ($R^2=0.40$)



(c) 17 次振動 ($R^2=0.56$)

図-10 解析による曲げ剛性比と振動数比の関係

図-11 解析による曲げ剛性比と MAC の関係

表-2 試験体ケース

ケース	腐食 角度(度)	板厚(mm)	腐食 幅(mm)	備考
c000_45_00	0	4.5	0	健全
c018_00_10	18	0	10	部分腐食
c036_00_10	36	0	10	部分腐食
c090_00_10	90	0	10	部分腐食
c180_00_10	180	0	10	部分腐食
c360_35_10	360	3.5	10	全周腐食
c360_25_10	360	2.5	10	全周腐食
c360_15_10	360	1.5	10	全周腐食
c360_35_50	360	3.5	50	全周腐食
c360_25_50	360	2.5	50	全周腐食
c360_15_50	360	1.5	50	全周腐食

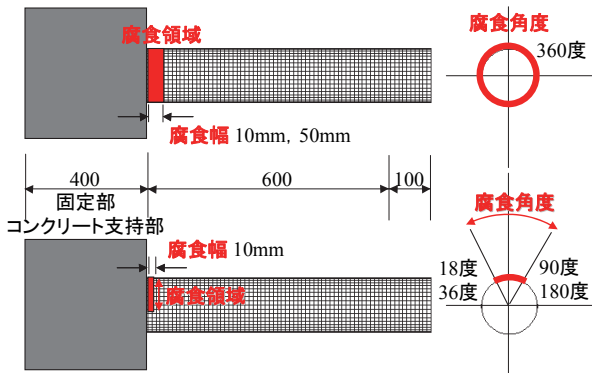


図-12 試験体 (上段：全周腐食，下段：部分腐食)

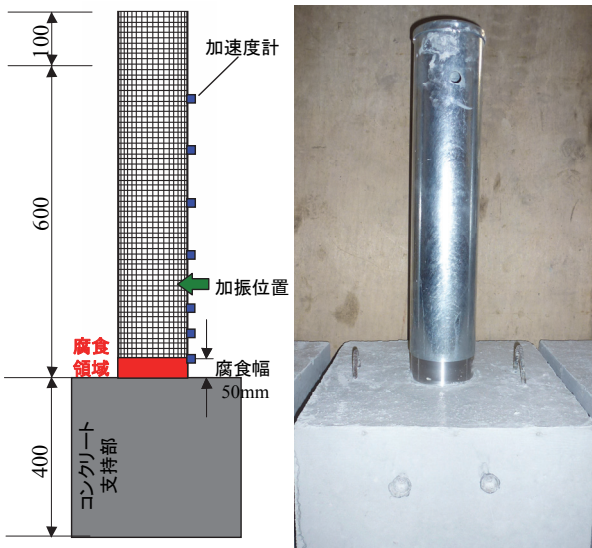


図-13 試験体 (c360_15_50)

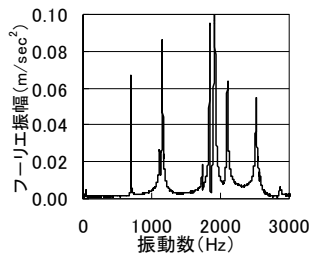


図-14 健全ケースの加速度スペクトル

衝撃加振時の留意点として、腐食領域で卓越する評価対象の高次振動モードが卓越するように衝撃加振場所や加速度計の配置に注意する必要がある。なお、本研究で用いた圧電型加速度計は、昭和測器(株)製 (MODEL 2363)を用い、サンプリング周波数 10kHz、計測時間は約 1.6sec とした。健全ケース (c000_45_00) の下端部から 100mm 位置で得られた加速度スペクトルを図-14 に示す。

これより、図-8 に示した解析値の振動モード図と比較すると 700-800Hz の 3, 4 次振動, 1200-1300Hz の 8 次振動, 1900-2000Hz の 13 次振動, 2000-2200Hz 付近の 15 次, 17 次振動の卓越が確認できた。特に、2000Hz 付近の振動が大きく卓越しており、評価対象とした振動が励起していることがわかる。

4.3 共振加振試験有無の比較

衝撃加振試験と共振加振試験によりそれぞれ同定した評価対象の振動モード (図-15) と解析値の振動モードを比較した。

共振加振試験では、加振装置として圧電素子 (ピエゾ素子) を用い、評価対象の振動に共振させた後、各測点で得られた任意の時間の加速度振幅をプロットさせることにより振動モードを得た。健全ケース (c000_45_00) において、共振加振により任意の時刻で得られた試験と解析の振動モードを図-16 に示した。

今後の簡易かつ効率的な点検を行うため、共振加振試験を行わなくても精度よく振動モードを同定できるようにするべきである。そこで、共振加振試験を行わず、衝撃加振試験から得られた加速度波形を用いて ERA により振動モードを同定した。その結果を図-16 に合わせて記載した。

衝撃加振と共振加振の振動モードを比較すると、共振加振試験を行わなくても衝撃加振試験からモード同定が可能であることが明らかとなった。

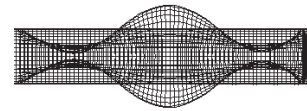


図-15 評価対象とした振動モード

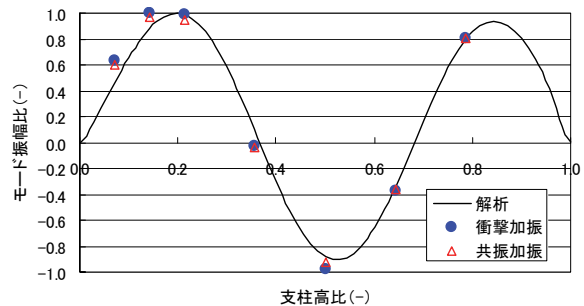


図-16 試験と解析におけるモード振幅の比較

しかし、両試験結果と解析による振動モードは基部における支柱高比 0.0~0.5 まで相違が見られた。この理由として、実際の基部での拘束条件が解析のように基部で完全固定になっていないことが原因だと考えられる。これは、現場でも基部の拘束条件が様々であることから今後の大きな課題といえる。

5. 交換可否を判定できる健全度評価

本研究で作製した実物の試験体に対して衝撃加振試験を行い、得られた加速度波形から ERA により振動モードを同定して MAC を算出した場合と、共振加振試験から得られた任意の時刻における加速度波形から得られた振動モードを用いて MAC を算出した場合の結果を図-17 にまとめた。なお、式(1)に示す MAC の計算では、 ϕ_r として解析における健全ケース(c000_45_00)の振動モードを用い、 ϕ_E は腐食を模擬した各試験体から得られた振動モードを用いた。

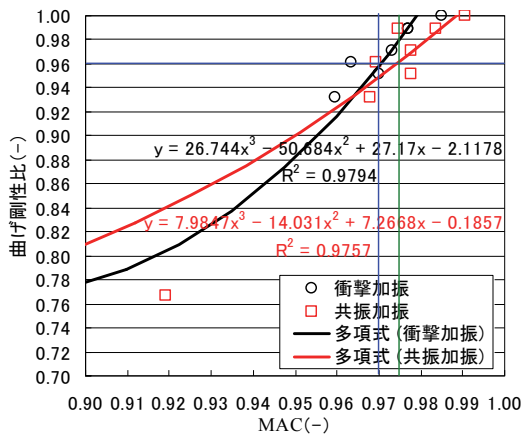


図-17 衝撃・共振加振試験から得られた曲げ剛性比と MAC の関係

これより、共振加振試験による結果は、衝撃加振試験よりも精度のよく同定できるため、衝撃加振試験の結果に比べて、共振加振試験の MAC の方が大きい傾向にある。

しかし、図-11(b)の解析による MAC に比べて両試験による結果は、大きく異なっている。その理由として、解析とは違い、実際の支柱の品質(板厚)のばらつき、計測誤差の影響、先に述べた基部の拘束条件の違いなど様々な要因が影響したと考えられる。これは現場に適用した場合にも当然生じることである。

そこで、このような現場でのばらつきを考慮して、試験から新たな MAC の閾値を算出することにした。その結果、衝撃加振による結果を使った近似曲線から、曲げ剛性比 0.96 に対する MAC の閾値として 0.970 を、共振加振による結果からは、0.974 を得た。

6. まとめ

本研究では、凍結防止剤や飛来塩分の影響により、防護柵支柱基部が腐食環境にあり、その維持管理方法が課題となっている状況下において、振動試験(衝撃加振、共振加振)により同定した振動モードを用いた MAC と曲げ剛性比から簡易的に防護柵支柱の交換可否を判定できる健全度評価手法の構築を行った。

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 非線形解析から、防護柵支柱に要求される耐力 60kN を超えた解析モデルをもとにして、弾性域の曲げ剛性比の閾値を求めたところ 0.96 となった。
- (2) 基部の腐食を様々にモデル化した場合の振動モードの違いを調べた結果、板厚が薄くなるにしたがって、モードの腹の位置が全体的に基部側に移動するとともに損傷を与えた領域でのモード振幅が大きくなっていった。この傾向は、孔のあいたケースにおいて、さらに顕著に見られた。
- (3) MAC と曲げ剛性比との相関から、基部の腐食に対して 15 次振動を評価対象の振動モードにした。さらに、曲げ剛性比 0.96 に対する解析から得られた MAC の閾値を求めたところ、0.995 であった。
- (4) 共振加振試験を行わなくても衝撃加振試験から得られた加速度波形を用いて、ERA により振動モードを同定しても精度のよい結果を得られることがわかった。
- (5) 曲げ剛性比と MAC の関係は、解析のような精度を試験から得ることはできなかった。そこで、現場でのばらつきを考慮して、試験から新たな MAC の閾値を算出することにした。その結果、衝撃加振による結果からは、MAC の閾値として 0.970 を、共振加振による結果から、0.974 を得た。

実際の現場での支柱を対象とした計測では、解析とは違い、支柱の品質(板厚)のばらつき、基部の支持条件、さらに計測時の誤差の影響なども加わり、解析のような精度を得ることは難しいと考えられる。また、腐食箇所については、本試験体のように一箇所だけでなく二箇所以上の場合も考えられる。

本手法は、支柱全体としての剛性が健全な状態に対してどの程度変化したのか MAC という 1 つの数値で表現できる利点があり、今後は、実際の現場で多くのデータを収集することによって、MAC の閾値を設定することも可能だと考える。

謝辞

本実験および解析に際してデータ整理を手伝ってくれた当時金沢大学4年津幡亮佑氏, 平野純規氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 森猛, 渡邊英一, 正井資之: 腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐力, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.675-686, 2003.3.
- 2) 杉浦邦征, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿, 岡扶樹: 腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.679-687, 2006.3.
- 3) 山沢哲也, 野上邦栄, 森猛, 塚田祥久: 腐食鋼部材の腐食形状計測と曲げ耐力実験, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.711-720, 2006.3.
- 4) 藤井堅, 中村秀治, 近藤恒樹, 橋本和朗, 沖元浩見, 中村剛裕: 腐食した円筒殻の曲げ座屈耐力に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.784-793, 2007.3.
- 5) 加藤雅史, 高木保志, 島田静雄: PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 341 号, pp.113-118, 1984.1.
- 6) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性, 土木学会論文集, 第 380 号, I-7, pp.355-364, 1987.4.
- 7) 吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, pp.516-534, 2010.8.
- 8) J. N. Juang and R. S. Pappa: An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.
- 9) A. K. Pandey, M. Biswas and M. M. Samman: Damage detection from changes in curvature mode shapes, Journal of sound and vibration, Vol.145, No.2, pp.321-332, 1991.
- 10) 水澤富作, 高木信治: 曲率変化に基づくはり構造物の損傷評価法について, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.21-29, 1992.3.
- 11) 大島義信, 山本亨輔, 杉浦邦征: 車両応答から推定した橋梁変位に基づく橋梁の損傷同定法, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.646-654, 2011.3.
- 12) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: 未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.258-267, 2007.3.
- 13) S. T. Peterson, D. I. Mclean, M. D. Symans, D. G. Pollock, W. F. Cofer, R. N. Emerson and K. J. Fridley: Application of dynamic system identification to timber beams I, Journal of structural engineering, Vol.127, No.4, pp.418-432, 2001.
- 14) S. Beskhyroun, T. Oshima, S. Mikami, and Y. Miyamori: Assessment of vibration-based damage identification techniques using localized excitation source, Journal of civil structural health monitoring, Vol.3, No.3, pp.207-223, 2013.
- 15) (社)日本道路協会: 車両用防護柵標準仕様・同解説, 2004.3.

(2014年9月24日受付)

(2015年2月1日受理)