

平成 26 年度（一財）港湾空港総合技術センター 研究開発助成報告書

助 成 番 号 ：平成 26 年 5 月 9 日付 第 14－2 号

研究開発項目：（指定課題①）港湾、海岸及び空港の施設の健全度
評価に関する研究

鋼コンクリート接合部に鋼材腐食が 生じた港湾・海岸及び空港施設の 健全度評価手法の構築

平成 27 年 3 月 31 日

東 北 大 学
鈴 木 基 行

目 次

1. 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究と課題の整理	2
1.2.1 コンクリート埋め込み部における鋼材腐食に関する研究	2
1.2.2 円形鋼管柱の腐食劣化に関する研究	3
1.3 研究の目的	3
1.4 報告書の構成	4
2. 実験概要	7
2.1 概説	7
2.2 供試体諸元	7
2.3 電気腐食による鋼材の腐食促進試験	9
2.4 鋼管の曲げ振動試験	10
2.5 コンクリート部の縦振動試験	11
2.6 コンクリート部の超音波試験	12
3. 鋼材腐食と振動特性に関する実験データの整理	24
3.1 電食試験による鋼材の腐食とコンクリート部のひび割れ状況	24
3.2 鋼材腐食と振動特性の関係	26
3.2.1 鋼管の曲げ振動試験	26
3.2.2 コンクリート部の縦振動試験	28
3.2.3 コンクリート部の超音波試験	29
3.3 まとめ	31
4. 結論	58

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

我が国では、これまで高度経済成長期以来、大量の社会基盤構造物が建設されてきた。現在これらの多くが耐用年数を超えつつあり、今後、より多くの劣化損傷が顕著になることが予測される。一方で、社会資本整備の予算は近年減少傾向にあり、このような社会基盤構造物の全てを短期間で撤去・新設することは不可能である。従って、社会基盤構造物を資産とし、適切な維持管理を行い、継続的に活用していくことが重要である。適切な維持管理計画を策定するためには、これまで以上に効果的な点検や診断が必要である。

近年、港湾構造物や道路構造物などの劣化事例が多く報告されている。例えば、トラス橋では鋼とコンクリートの境界部においてトラス部材が破断する事態が相次いで発見された^{1.1)}。このような部位は、振動などにより鋼とコンクリートの付着が損失し、間隙に雨水や凍結防止剤が長期停滞することで、厳しい腐食環境に曝される。そのため、局所的に腐食が進行すると考えられている^{1.2)}。

このような鋼コンクリート埋め込み構造を持つものには、トラス部材のほかにも様々な場所で円形鋼管柱に見ることができる。特に、コンクリートに埋め込まれた円形鋼管柱については、経年とともに劣化が進行し、30年以上が経過したものでは、写真-1.1に示すように表面に著しい膨張が生じている、または、明らかな板厚減少が視認できるものが現れることが報告されている^{1.3)}。これは、雨水の浸入などにより、コンクリート基礎内部で鋼製柱が腐食することに起因する。このように、表面からは確認できない箇所での腐食が進行すると、構造

物の安全性や使用性を低下させる要因になる^{1.4)}。

一方で、現在の点検は目視点検が中心であり^{1.5)}、コンクリート内部での鋼材腐食を発見することは難しく、鋼材をはつり出す必要がある。しかし、円形鋼管柱が用いられている構造物は膨大な数に及び^{1.6)}、このような手法では多くの手間とコストがかかるために現実的でない。これからの腐食を有する鋼材基部の点検手法は、簡便かつコストや時間をかけないことが求められる。

1.2 既往の研究と課題の整理

1.2.1 コンクリート埋め込み部における鋼材腐食に関する研究

吉岡ら^{1.7)}は、コンクリート境界部において鋼材腐食が生じたトラス橋について、常時微動計測を行なった。トラス橋部材の健全部と損傷部では、固有振動数に有意な差は見られなかったが、破断に至った場合には明らかに固有振動数の低下が報告されている。

常時微動計測などの応答加速度からフーリエ解析によって伝達応答関数を得る手法と比較して、起振機を用いて調和振動を与えた振動試験は、周波数を連続的に増加させることで、定常応答に基づいて振動特性を精緻に評価できる。昨年度の研究では、H 型鋼がコンクリートに埋め込まれた形状の供試体を作製し、電食試験と小型起振機による振動試験を行った。これにより、H 型鋼の換算腐食率(腐食対象区間における平均質量減少率)が 2～3 % になるまでに、H 型鋼のたわみ振動について、減衰定数が健全時から 2～4 割程度増加する傾向が見られた。さらに、コンクリート基礎部の縦振動について、換算腐食率の増加に伴って、固有振動数が低下する傾向が見られた。しかし、昨年度の研究は腐食率 20 % 程度までを対象としており、さらに腐食が進行した状態での振動特性を調べるには至らなかった。また、昨年までの供試体実験は鋼板および H 型鋼を対

象としており、円形鋼管柱を埋め込んだ接合形式については検討していない。

1.2.2 円形鋼管柱の腐食劣化に関する研究

道路標識設置基準・同解説によれば、道路付属物柱の設計について、最小板厚が限界板厚より大きいことを満たすように基準が示されている。ここで、最小板厚は風荷重による片押しの静的荷重への耐力から算出される。

星野ら^{1,3)}は、一般国道にある一部の道路付属物において、経過年数別、路面境界部の条件別に損傷度判定を整理した。この調査から、路面境界部の条件によらず経年により腐食劣化が進行すること、特にコンクリートでは設置から 30 年程度から顕著な板厚減少が見られることがわかった。これらの点検は路面の掘削と目視によるものであり、実際の定期点検としては煩雑で、コストがかかるものである。

1.3 研究の目的

本研究の最終的な目標は、港湾構造物をはじめとする様々な過酷環境下での鋼コンクリート接合部や合成構造および複合構造の健全性を簡便に診断できる非破壊試験法と性能評価手法を確立することである。本研究では、特に非破壊検査による鋼材腐食量の推定に向けた基礎的データの収集を目的として、実験的検討を行う。

実験では、円形鋼管柱を模擬した接合部供試体を作製した。そして、供試体の鋼コンクリート埋め込み部において、電食により鋼材腐食を模擬し、段階的に進展する鋼材腐食と振動特性の関係を整理する。ここでは、鋼材腐食にともなう固有振動数や減衰定数の変化、超音波の伝搬速度の変化を検討する。そして、これらの振動試験の結果を踏まえて、振動特性の変化に基づく鋼管柱基部の鋼材腐食推定法の可能性を考察する。

1.4 報告書の構成

報告書の構成を以下に示す.

第 1 章では, 研究の背景と既往の研究について整理し, これらを踏まえた本研究の目的と本論文の構成について記述した.

第 2 章では, 実験手法の概要, 供試体諸元, 電食試験, 振動試験の概要について記載した.

第 3 章では, 実験の結果について記載し, 点検手法としての可能性について考察した.

第 4 章では, 本論文の結論を示す.

参考文献

- 1.1) 加藤光男：他人事ではない木曽川大橋の斜材破断，日経コンストラクション，2007年7月27日号，pp.64-67，2007.
- 1.2) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.299-311，2001.
- 1.3) 星野誠，玉越隆史：道路付属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討，土木学会第66回年次学術講演会，VI-231，pp.461-462，2011.
- 1.4) 中国新聞：子育てのページ ニュース，標識倒れ通学自動がいが
<http://www.chugoku-np.co.jp/kikaku/child/news/120601.html>
- 1.5) 国土交通省道路局国道・防災課：附属物（標識、照明施設等）の点検要項（案），
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_11.pdf
- 1.6) 交通安全施設の整備状況推移（全国）
<http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/pocket/01b.html>
- 1.7) 吉岡勉，山口宏樹，伊藤信，原田政彦：鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響，構造工学論文集，Vol.55A，pp.295-305，2009.
- 1.8) 岩岸現，柏宏樹，内藤英樹，鈴木基行：鋼コンクリート接合部に生じた鋼材腐食量の推定に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp. 1060-1073，2012.



写真－1.1 道路標識柱の腐食事例

2. 実験概要

2.1 概説

本研究では、円形鋼管柱を模擬した供試体を作製し、電食により鋼材腐食を促進させる。そして鋼材腐食率と振動特性に関する基礎的データを得ることにより、非破壊検査の可能性を考察する。

本実験のフローを図-2.1に示す。i)電食試験により、鋼部材を段階的に腐食させ、ii)所定の腐食率ごとに振動試験を行う。iii)電食終了後、クエン酸水素二アンモニウム水溶液を用いて鋼管の錆を除去し腐食率を測定する。振動試験は、鋼部材を対象とした曲げ振動試験と、コンクリート部を対象とした縦振動試験・超音波試験を行う。以下に、供試体諸元および実験概要を記す。

2.2 供試体諸元

供試体の寸法は、道路標識柱の設計を参考にして定めた。路側式標識のフーチング寸法について、表-2.1より、断面は500 mm 四方が一般的であると考えられる。

フーチング高さについて、道路標識設置基準・同解説では基礎天端に作用する曲げモーメントと基礎幅から最小高さが算出される²⁴⁾。表-2.1のように、独自の設計基準を設けている自治体もあるが^{22) 28)}、一定の傾向は見られなかった。そこで、高さについて、実験において転倒せずに安定することを目的として、高さを350 mmとした。

フーチングの配筋について、図-2.2のように設計した。路側式標識のフーチングの配筋について、国交省などによって定められた基準は存在しない。そこで、F型式標識の配筋²³⁾を参考に軸方向鉄筋・帯筋を配置し、さらに、供試体をクレーンで移動させるための

フックを設けた。

鋼管の寸法について、表－2.1 から、一般的な寸法である外径 60.5 mm，板厚 3.2 mm とした。鋼管の張り出し部の高さは 2400 mm とした。これは、標識板の下面までの高さが、総理府・建設省命令第 3 号「道路標識，区画線及び道路標示に関する命令」に定める標準値の 1800 mm となる値である。鋼管のコンクリートに埋め込まれた定着長は、表－2.1 から、フーチング底部までとした。

なお、鋼管には STK400 を用いた。鋼管の物性を表－2.2 に示す。また、コンクリートの配合および物性を表－2.3，2.4 に示す。

供試体は、電食対象区間がフーチング上面からの深さ 100 mm の HK100 供試体と、50 mm の HK50 供試体の 2 体を作製した。これは、路面に埋め込み部での道路標識柱の腐食に、路面から 40 mm ほどの深さのものが多いため²⁹⁾である。また、腐食区間の大きさと振動特性の変化の大きさの関係を調べるため、区間の異なる 2 種類を作製した。電食区間の調節は、鋼材に塗布されていた防食塗装をアセトンで除去することで行った。塗装は、写真－2.1 のように、HK100 では 1500 mm，HK50 では 100 mm を除去した。これは、それぞれの腐食対象区間であるフーチング上面から深さ 100 mm，50 mm までの区間に、張り出し部側に 50 mm の区間を加えたものである。これは、鋼管はコンクリート埋め込み部だけでなく張り出し部においてもフーチング上面近傍で腐食することが考えられるためである。

さらに、写真－2.2，図－2.2 に示したように、鋼管の上部に標識板をそれぞれ設置した。標識板は円形で、直径 600 mm，板厚 1 mm である。裏面には鋼管に取り付けるためのレールが付けられている。標識板は専用の金具を用いて、写真－2.3 のように取り付けた。標識板・レール・取り付け金具はいずれもアルミニウム合金製であり、あわせた重量は 1567 g である。

2.3 電気腐食による鋼材の腐食促進試験

コンクリート内部の鋼材腐食を模擬するにあたり、電気腐食試験（以下、電食）を行った。腐食促進試験として、貝沼ら^{2.10)}は、複合サイクル腐食試験機を用いて、5 % NaCl 溶液の噴霧と湿潤状態、乾燥状態を繰り返す方法を用いている。しかし、この方法では健全時の肌隙深さまでしか腐食が生じず、今回対象とするような埋め込み部の腐食実験には適用できない。実際の経年劣化と電食では鋼材の腐食性状が異なることが知られているが、本実験は埋め込み部で極めて大きい鋼材腐食を対象とするため、時間的な制約から、電食試験を行った。

今回の供試体では、鋼材からコンクリート表面までの距離が 460 mm 以上あり、フーチングに配筋がされていることから、コンクリート外部に電極を設けての電食は難しい。これまでの検討^{2.11), 2.12)}から、コンクリートかぶりの大きい構造物であっても、コンクリート内部に電極を設け、電極近傍で 5 % NaCl 溶液を供給することで、コンクリートに埋め込まれた鋼材の電食が可能であることが示されている。よって、本研究でも同様の手法を用いて電食を行う。コンクリート内部の電極の配置は、図-2.3 のようにした。また、5 % NaCl 溶液の供給のために電極とコンクリートの間に直径 10 mm の孔を開けている。なお、電極には内寸網目 25 mm の亀甲金網を使用している。

道路標識柱は、撤去・新設することが容易な構造物である。また、道路標識柱はトラス部材などのように交通荷重などを受け持つ部材ではないため、問題となるのは、倒壊して歩行者に当たるなどの第三者影響度が大きい場合である。よって、本研究では、重大な損傷を検出できることを目指し、鋼材腐食率 80 % を目標として電食を行った。

腐食率は、積算電流量で管理した。積算電流量とは、電流量 [A] と電食時間 [h] の積である。振動試験は、腐食率が 20 % 増大するごとに行った。これは、積算電流量が HK100 では 103.0 [A・h]、HK50 では 51.5 [A・h] にあたる。振動試験を行った間隔を表-2.6 に示す。これは、積算電流量と腐食率が比例関係にあるとして、電解式から算出した^{2.13)}。このと

きの比例定数（電気化学当量）は，本研究に先立って実施した，予備供試体を電食した際の，積算電流量と鋼材の質量減少量の関係から， $0.878 [\text{g/A} \cdot \text{h}]$ を得た．予備供試体の概要を図－2.4 に示す．鋼管は，断面寸法が本実験と等しいSGP 白管 (JIS G 3452 配管用炭素鋼管) を使用した．鋼管と，電食用の金網や塩水供給孔との距離も本実験と同一である．予備実験でのコンクリート配合および物性を表－2.7，2.8 に示す．

2.4 鋼管の曲げ振動試験

部材が劣化すると，剛性低下や機構の変化により，固有振動モードや固有振動数，減衰定数が変化する．そのため，固有振動数や減衰定数に関する研究は様々な報告がされている．例えば，式(2.1)に示すように，構造物の剛性低下に伴い固有振動数が低下するため，衝撃振動試験による橋脚の健全度評価や，強制振動試験による橋梁全体の健全度評価が報告されている．

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.1)$$

ここで， f は固有振動数， A は断面積， l はスパン， E は弾性係数， I は断面 2 次モーメントである．また，実橋梁を対象とした振動試験によって，剛性低下率と減衰定数との関係がまとめられており^{2.14), 2.15)}，剛性低下に伴って減衰定数が増加することが示されている．コンクリート埋込部における鋼材腐食と振動特性に関しては，ひび割れ発生の前後までに減衰定数が 2 倍程度まで増加する傾向があることが報告されている^{2.11), 2.12)}．

本実験の鋼部材の曲げ振動試験概略図を図－2.4 に示す．また，曲げ振動試験状況を写真－2.4 に示す．本試験は，鋼管の張り出し部に糸を結んで引っ張ることで初期変位を与え，糸を切ることで変位を開放し，自由振動を起こすものである．そして，自由振動における加速度－時刻関係をデータロガーで測定し，得られた波形をフーリエ変換することで，共振曲線(周波数－フーリエ振幅関係)を得る．初期変位は，図－2.5 に示したように，鋼

管の張り出し部の中央，すなわち鋼材の先端から 1200 mm の位置で与え，木綿製の水糸を使用した．また，糸の張力はばねばかりで計測し，49 N とする．加速度ピックアップは，糸を結んだ近傍に両面テープで接着している．データロガーは 1 ms ごとに加速度を計測しており， 0.1 m/s^2 刻みで加速度を測定する．計測は，加振から最長で 8192 ms 間行った．これは高速フーリエ変換に必要なデータ数を満たすため，またこの時間のうちに鋼管の振動が十分に小さくなるためである．

2.5 コンクリート部の縦振動試験

以降では，曲げ振動試験と異なる縦振動(疎密波)に着目したコンクリート部の強制振動試験を縦振動試験と呼ぶ．H 形鋼がコンクリートに埋め込まれた構造について，昨年度の検討では埋め込まれた鋼材の腐食率の増加に伴ってコンクリートの固有振動数が低下する傾向を確認している．本実験ではこの方法を用いて，固有振動数の変化を捉えることで，腐食によるコンクリートのひび割れや，コンクリートと鋼管の付着の損失を捉えた，腐食率推定の可能性を検討する．

コンクリート部の縦振動試験の概略と状況を図-2.6, 写真-2.5 に示す．本試験方法は，小型加振器を用いてコンクリートフーチングの側面から調和振動を与え，コンクリート部の応答加速度を測定し，共振曲線(周波数-応答加速度関係と周波数-位相関係)を得るものである．加振器は振動テーブルに貼付した制御加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)の値が一定の加速度振幅となるように，デジタル振動コントローラによって小型加振器の出力を自動制御している．また，加振器の振動テーブルとコンクリートを両面テープによって接着している．全ての供試体において，供試体の側面の上端，中央付近に加速度振幅 1.0 m/s^2 の調和振動を与え，1000 ～ 5000 Hz の範囲で5分間の掃引試験を行った．測定は，直角に交わる 2 方向(図-2.5 の EW 方向，NS 方向)に対して行った．計測加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)の貼付位置は，加振点の近傍とした．

2.6 コンクリート部の超音波試験

コンクリート部の超音波試験の概略と状況を図-2.6, 写真-2.6に示す。超音波試験は図-2.7のように、ひび割れや鋼コンクリートの付着損失を検出する試験である。超音波試験は、反射波や表面波、透過波を用いる方法があり、ひび割れや剥離の検出、伝播距離・伝播時間・ひび割れ位置からひび割れ深さの算出が可能である。本研究では、鋼材腐食によるコンクリートと鋼管の剥離や、コンクリート部に発生する腐食ひび割れの検出を期待している。なお、著者らが所有する試験装置は、24 kHzの発振・受振器による2探触子法である。弾性波を1秒間に3回送受信する。なお、発振・受振器とコンクリート間の隙間を埋めるためにグリスを接触媒質として用いた。計測は、コンクリート側面(図-2.7の①, ③)と上面(図-2.7の②)から、コンクリート縦振動試験と同様に、それぞれ直角に交わる2方向について行った。

参考文献

- 2.1) 日本道路協会：道路標識設置基準・同解説，pp.212-214，1986.
- 2.2) 北海道開発局：平成 20 年度北海道開発局道路設計要領
http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_doro/download/pdf/02/2-sankou6.pdf
- 2.3) 青森県県土整備部：標識類（IX）
<http://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kendo/seibikikaku/files/zusyu-09hyoushiki.pdf>
- 2.4) 笛吹市：路側式標識柱(単柱)強度計算書(基礎式)
<http://www.city.fuefuki.yamanashi.jp/file/3/4920bc2e66ef7.pdf>
- 2.5) 横浜市道路局：道路構造物標準図集
<http://www.city.yokohama.lg.jp/doro/gijutsukanri/zushu/download/h2304-01.pdf>
- 2.6) 岐阜県庁：第 11 章道路付属物
http://www.pref.gifu.lg.jp/kendo/michi-kawa-sabo/doro/gbridge/d_spc.data/DS001012.pdf
- 2.7) 鳥取県：警戒標識 WS
<http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/136167/WS.pdf>
- 2.8) 沖縄総合事務局：第 6 章道路付属物 http://www.dc.ogb.go.jp/kyoku/about/Gikan/doboku_kouji/pdf/05_dokousettsukei/douro_06_1.pdf
- 2.9) 星野誠，玉越隆史：道路付属物支柱基部の腐食発生傾向に関する検討，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-231，pp.461-462，2011.
- 2.10) 貝沼重信，細見直史，金仁泰，伊藤義人：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.97-114，2005.

- 2.11) 内藤英樹, 伊東知哉, 青木峻二, 鈴木基行: 鋼材腐食が生じた鋼コンクリート接合部の振動特性に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1060-1073, 2011.
- 2.12) 岩岸現, 柏宏樹, 内藤英樹, 鈴木基行: 鋼コンクリート接合部に生じた鋼材腐食量の推定に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 1060-1073, 2012.
- 2.13) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.97-105, 1987.
- 2.14) 吉岡勉, 山口宏樹, 伊藤信, 原田政彦: 鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.295-305, 2009.
- 2.15) 古川愛子, 大塚久哲, 清野純史, 梅林福太郎: 微動・自由振動・起振実験に基づく振動特性のばらつきと検出可能な損傷レベル, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1015-1026, 2005.

表－2.1 各自治体の路側式標識設計基準

自治体	鋼製支柱					フーチング	
	材質	高さ [mm]	外径 [mm]	板厚 [mm]	埋め込み深さ	幅 [mm]	高さ [mm]
北海道 開発局	STK400 SS400	1800	76.3	2.8	記載なし	500	900
青森県	STK400	1800	60.5	2.3	フーチング 底面まで	500	500
				2.8			600
				3.2			700
			76.3	2.8			800
				3.2			900
山梨県 笛吹市	STK400	1500	60.5	2.3	フーチング 底面まで	500	700
神奈川県 横浜市	記載なし	1800	60.5	2.3	フーチング 底面まで	500	420
		2500		3.8			630
岐阜県	記載なし	1800	60.5	2.8	記載なし	500	600
		2500		3.2			
鳥取県	STK400	1800	60.5	2.3	200[mm]	500	60
		2500					80
沖縄総合 事務局	STK SGP	1800~ 2500	60.5	3.2	600[mm]	500	700
					700[mm]		800

表－2.2 鋼管の物性

寸法 [mm]	鋼種	降伏強度 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]
60.5×3.2×2750	STK400	396	442	60

表-2.3 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材 (砂)	細骨材 (砕砂)	粗骨材	混和剤 (AE 減水剤)
20	170	291	530	304	1031	3.49

表-2.4 コンクリートの物性

圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
30.5	19	24200	33000	2400

表-2.5 電食速度

目標腐食率[%]		0~10	10~12.5	12.5~20	20~40	40~60	60~80
電流量 [A]	HK50	0.179	0.594	0.594	0.247	0.181	0.136
	HK100	0.359	0.585	0.580	0.497	0.382	0.271

表-2.6 測定間隔(各積算電流量)

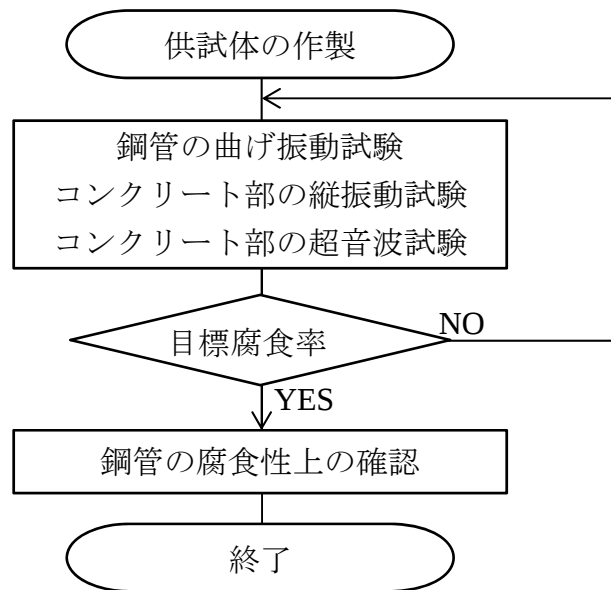
	積算電流量[A/h]				
	0	51.5	103.0	154.5	206.0
HK50	0	51.5	103.0	154.5	206.0
HK100	0	103.0	206.0	309.0	412.0

表-2.7 予備供試体コンクリートの示方配合

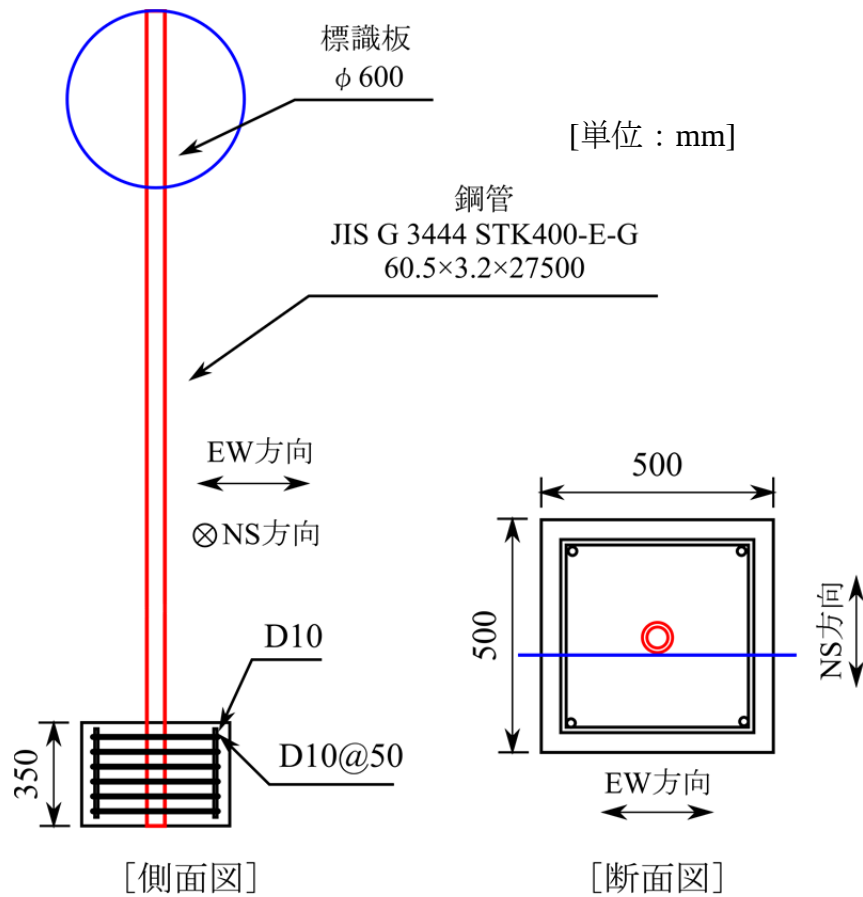
粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	173	318	501	1048	3.18

表-2.8 予備供試体コンクリートの物性

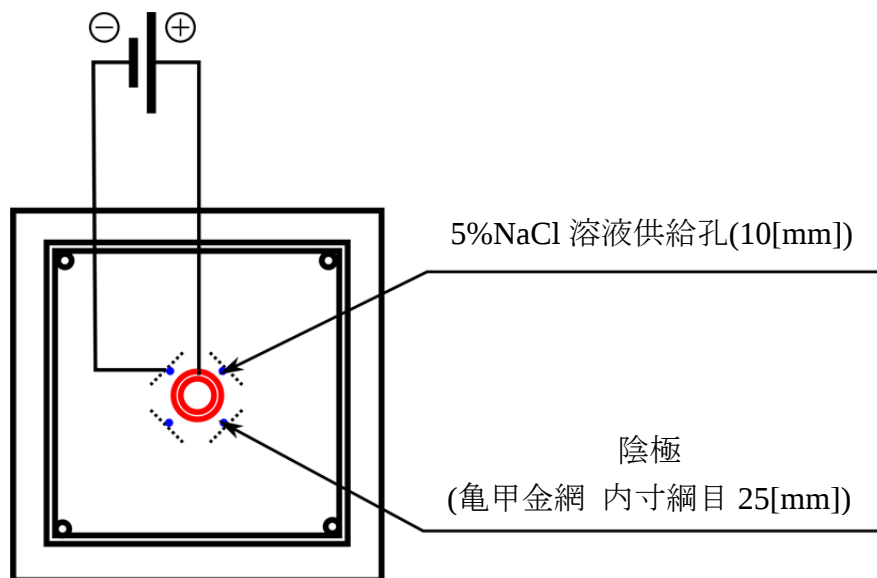
圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
39.0	25600	33500	2340



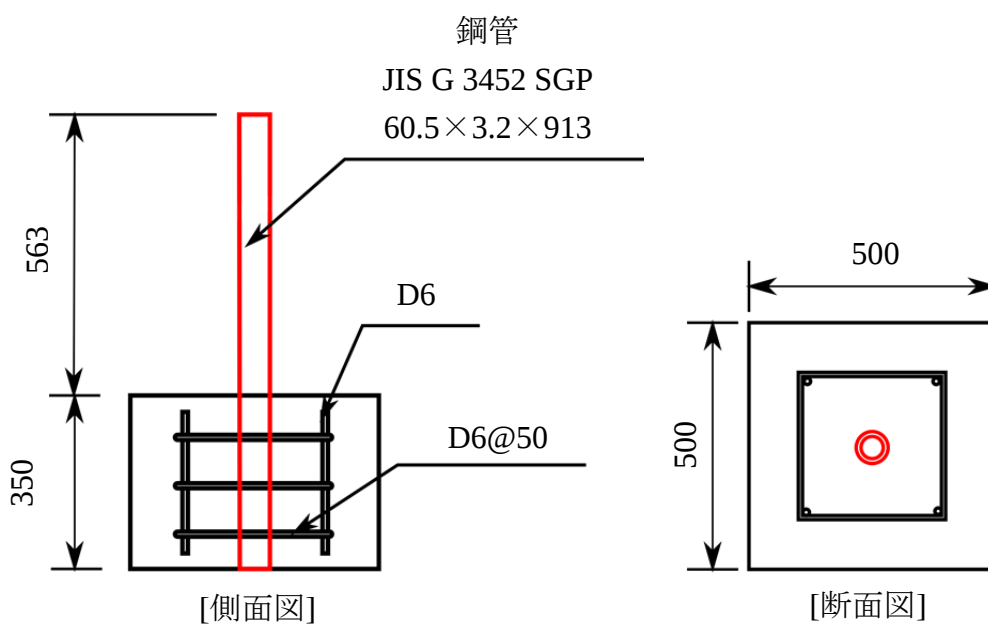
図－2.1 実験のフロー



図－2.2 供試体概要



図－2.3 電食概略図



図－2.4 予備供試体概略図

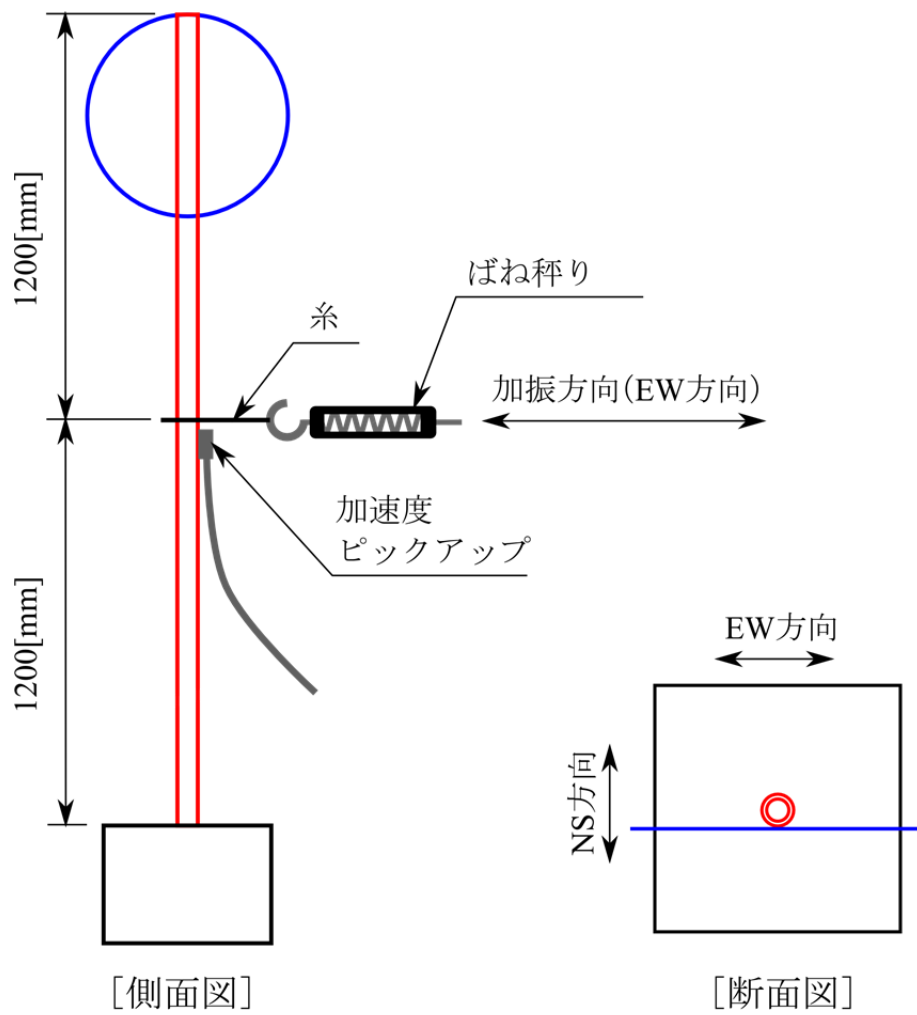


図-2.5 鋼管曲げ振動試験概略図

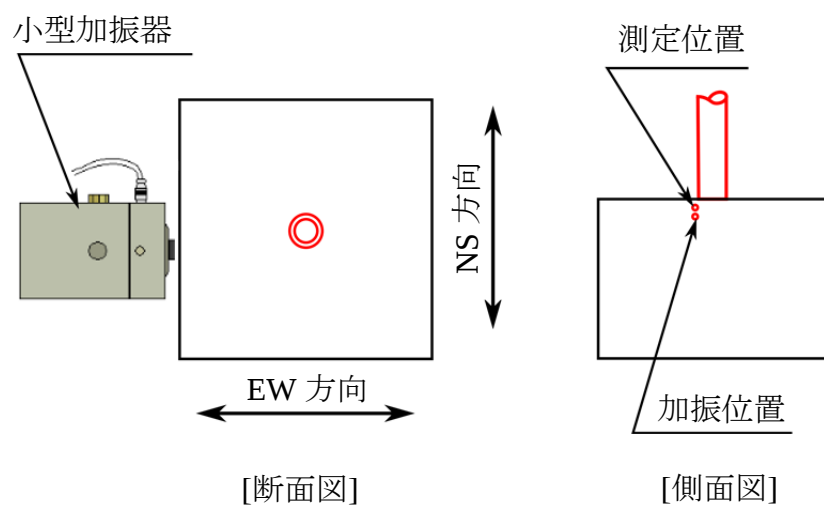
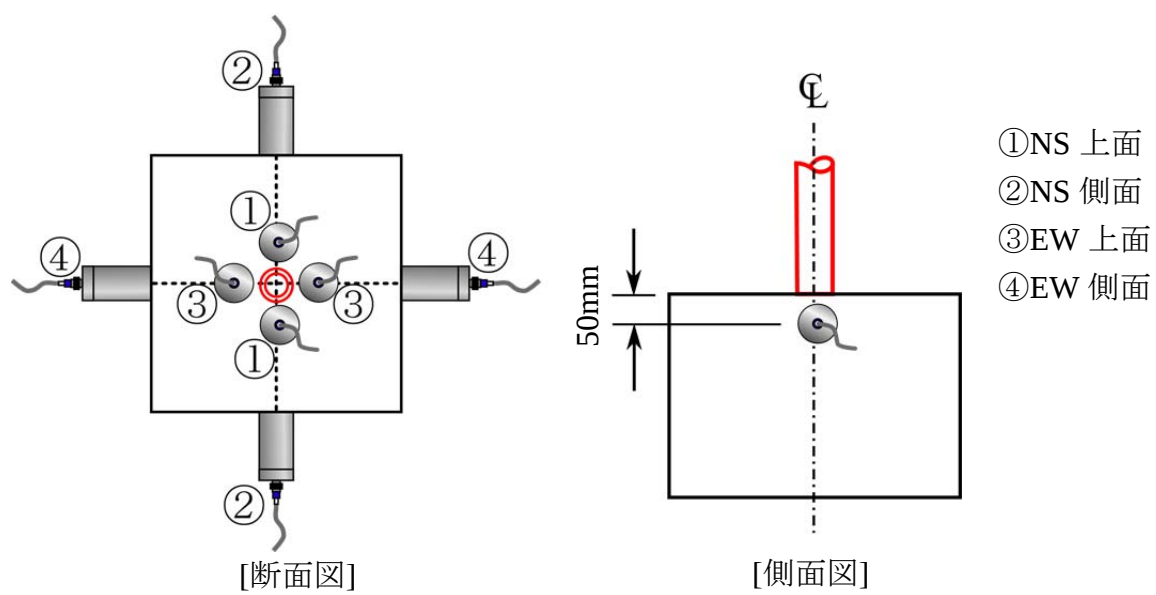
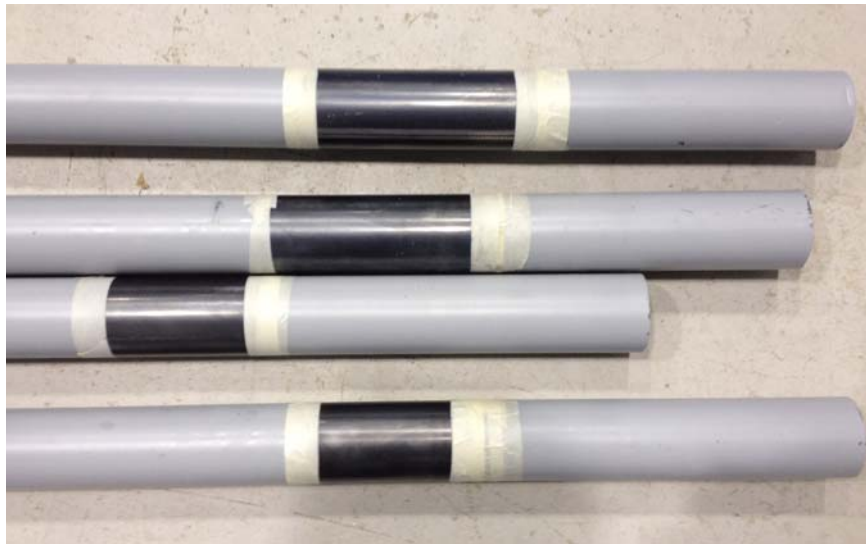


図-2.6 コンクリート縦試験概略図



図一2.7 超音波試験概略図



写真－2.1 鋼管の塗装を除去した様子



[HK50]

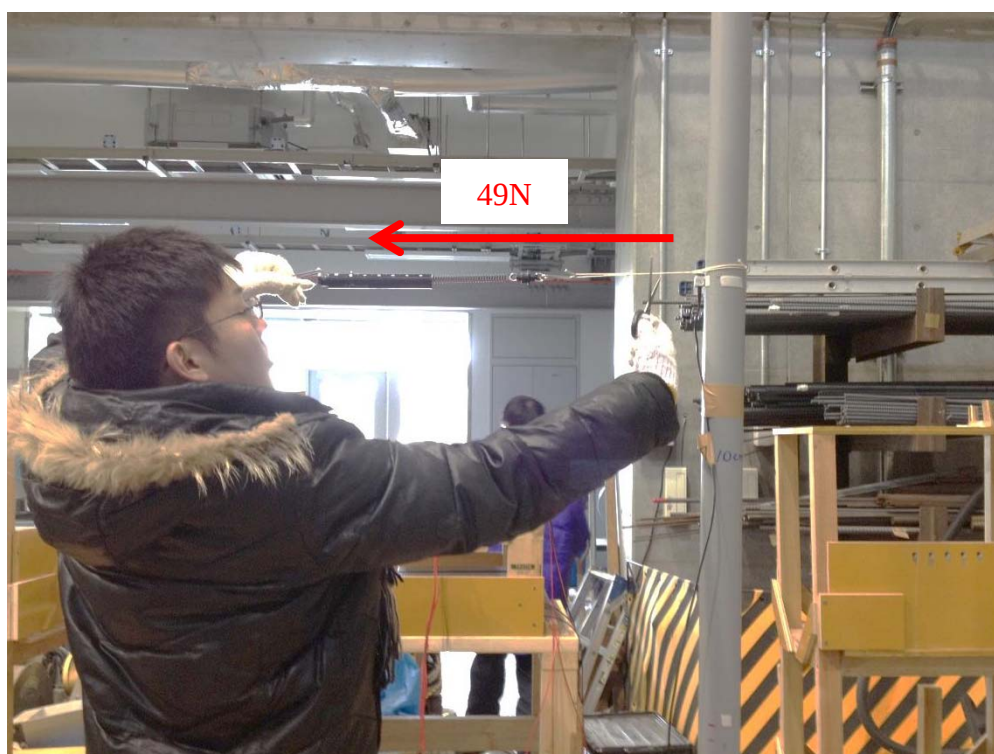


[HK100]

写真－2.2 供試体概要



写真－2.3 看板を取り付けた様子



写真－2.4 鋼材曲げ振動試験の様子



写真-2.5 コンクリート縦振動試験の様子

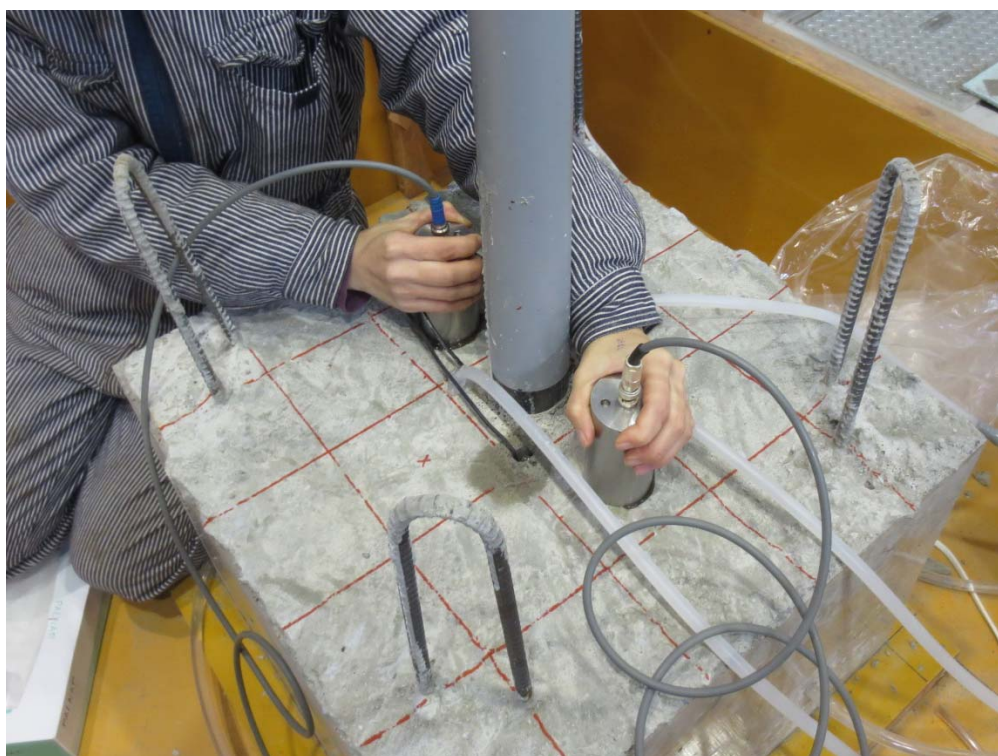


写真-2.6 超音波試験(上面)の様子

3. 鋼材腐食と振動特性に関する実験データの整理

3.1 電食試験による鋼材の腐食とコンクリート部のひび割れ状況

はつり出す前の鋼材腐食の状況を写真-3.1~3.4 に示す。写真-3.3, 3.4 に示すように、鋼管とコンクリートの隙間や鋼管の内側を伝って、底面に腐食生成物が漏出していた。電食中、腐食区間で循環していた NaCl 水溶液には、赤褐色の腐食生成物が多く混入していた。さらに、わずかに黒色や黒緑色の沈殿も生じていた。よって、電食試験により褐色のオキシ水酸化鉄が主に生成されたと推察される。黒色の沈殿は四酸化三鉄であり、黒緑色の沈殿は、溶出した Fe^{2+} が酸化してオキシ水酸化鉄や四酸化三鉄になる前の状態である緑さびである。オキシ水酸化鉄と四酸化三鉄は電食により生成される代表的な腐食生成物であり、オキシ水酸化鉄は溶出した Fe^{2+} の酸化が容易な場合に、四酸化三鉄は酸素が十分に存在しない場合に生成される³¹⁾。電食実験において、構造上、NaCl 水溶液の循環部は一部が開路となっており、常に大気に触れている。よって、供給していた NaCl 水溶液に大気中の酸素が溶け込むことで、 Fe^{2+} は酸化が容易な環境にあり、オキシ水酸化鉄の生成が卓越したと考えられる。写真-3.1, 3.2 に示すように、鋼管とコンクリートの隙間からは、赤褐色、黒色のほか、黄色、黄緑色の腐食生成物が滲み出していた、この黄色、黄緑色の腐食生成物は、それぞれ塩化鉄(Ⅱ)、塩化鉄(Ⅲ)であると考えられる。フーチング上面には、腐食生成物とともに漏出した NaCl 水溶液が溜まっており、溶液中の水が蒸発して NaCl 濃度が高くなることで、塩化物イオンと鉄イオンとの反応が卓越したと推察される。

電食終了後、電食による鋼材腐食の状況を写真-3.4, 3.5 に示す。いずれの供試体においても、金網や塩水供給孔の近傍で著しく腐食が起こり、鋼管を貫通する孔が複数できた。このように局所的に腐食が進行した理由として、電食実験の影響が考えられる。図-2.3

で示したように、鋼管の断面は円形である一方で、陰極となる金網は鋼管を囲んだ正方形に配置されているため、陰極と鋼管との距離は一樣ではない。さらに、電食反応に必要な NaCl 水溶液は、陰極と鋼管とが最も近接する位置から供給される。このため、陰極と近い位置の鋼管が突出して電食反応をしやすい状況にあったと考えられる。また、鋼管の継ぎ目においても腐食の局所的な進行が見られ、貫通する孔が開いた（写真-3.4, 3.5 の北東面）。さらに、いずれの供試体においても、コンクリート表面近傍に局部腐食がみられた。これは既往の研究の傾向と一致するものであり^{32), 33)}、構造上、鋼管とコンクリートの隙間に NaCl 水溶液が溜まったためと考えられる。また、腐食対象としていない区間においても電食による孔食が生成されていた。この傾向は HK100 供試体で顕著であった。

電食終了後、鋼管の質量を測定し、腐食率を求めた。まず、鋼管から腐食区間の前後を切り出して質量を測定した。そして、切り出された鋼管の質量から健全部の質量を差し引いて腐食区間の質量を求め、電食前の腐食区間の質量と比較することで腐食率を算出した。ここで、腐食していない鋼材（健全部と電食前の腐食区間）の質量は、鋼材の寸法と密度から求め、腐食区間外の腐食は無視した。実験終了後に確認した腐食率（腐食対象区間における鋼材の平均質量減少率）を表-3.1 に示す。HK50 では腐食率約 46 % まで、HK100 では約 39 % まで腐食した。この腐食率はいずれも予備供試体の電食から算定された腐食率 80 % を大きく下回る。この理由として、予備供試体で用いた鋼管の組成が HK50, HK100 とは異なることや、予備供試体での電食が腐食率 8.7 % までであったことにより、電気化学当量を厳密に得られていなかったことが推測される。さらに、今回の実験では腐食が局所化し、陰極近くでは板厚の全てが反応した地点もあり、腐食率が大きい段階では、電流量に対して腐食の進行が十分でなかった可能性が考えられる。HK50 に比べ HK100 の腐食率が小さくなった要因としては、腐食区間のコントロールが不十分だったことが考えられる。

次に、鋼材腐食に伴うコンクリート部のひび割れ状況について記述する。図-3.1, 3.2

にひび割れ進展図を示す。ひび割れの確認は、コンクリートフーチングの上面と側面において、目視によって行った。ここで、換算腐食率とは、表-3.1 に示した実験終了後の鋼管腐食率と積算電流量が比例すると仮定したときに、積算電流量から推定される腐食率(質量減少率)である。

HK50 では換算腐食率 17.4 % で、コンクリート上面において、かぶりが最小となる向きに沿った外側からのひび割れが発生した。その後、換算腐食率 28.9 % で東側の側面にひび割れが発生した。側面のひび割れは、上面で発生していたひび割れが進展することで発生した。換算腐食率 46.5 % ではすべての側面にひび割れが生じた。

HK100 では換算腐食率 17.4 % までに、上面においては鋼管から放射線状に広がる向きにひび割れが発生した。側面においても、同時期に、上面のひび割れとつながる形でひび割れが確認できた。また、腐食率の増大にともなって、ひび割れの発生と延長がみられた。

3.2 鋼材腐食と振動特性の関係

3.2.1 鋼管の曲げ振動試験

本項では、表-2.8 の電食時間ごとに鋼管の曲げ振動試験を行い、振動特性の変化を整理する。振動試験から得られる情報は固有振動数や減衰定数などがある。固有振動数については、鋼板や H 形鋼を対象とした既往の研究^{32), 33)}において、腐食率 28 % までの範囲において有用な変化が見られていない。一方で、腐食ひび割れが発生する以前の腐食率が極めて小さい段階において、減衰定数は 2 倍程度まで増加することが知られている。いずれにおいても、腐食率が 40 % 前後と大きい場合についての検討はされておらず、今回は固有振動数と減衰定数に着目してデータを整理する。

構造物や部材は、連続体または多自由度系である。多自由度系の共振曲線(周波数-加速度関係)は図-3.3 に示すように、1 自由度系の共振曲線の重ね合わせで表現することが可能である。しかし、ある固有モードの固有振動数付近では、その固有モードが軽減衰で

ある場合、図-3.3 の 1 次成分のようにその固有モードの応答が卓越している。このような場合、その共振峰近傍の共振曲線は 1 自由度系であると見做して、その固有モードの特性を独立に算出することができる。

減衰定数は、共振曲線からハーフパワー法を用いて算出する。ハーフパワー法とは、共振点 f_n の両側に、図-3.4 のようにハーフパワー点（振幅が最大振幅の $1/\sqrt{2}$ である点）をとったとき、式(3.1) から減衰定数 ζ が求められるものである。

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \quad (3.1)$$

本実験において、ばらつきを考慮し、自由振動の測定は各供試体、各方向、各腐食率においてそれぞれ 10 回ずつ行った。そして、共振曲線から得られた固有振動数や減衰定数の変動係数が最大で 3 % 程度と十分に小さいことを確認した。

a) 共振曲線

鋼管の曲げ振動試験から得られた時刻歴加速度応答の一例を図-3.5～3.8 に示す。それをフーリエ変換した共振曲線（周波数－フーリエ振幅関係）を図-3.9～3.12 に示す。

ここで、片持ち梁における n 次モードの固有振動数 f_n は、以下の式により求められる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_n}{2\pi} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.2)$$

ここで 1 次モード f_1 を求めるとき、 $\lambda_{n(n=1)}$ は定数で 1.875 を用いる。 E はヤング率、 I は断面二次モーメント、 ρ は密度、 A は断面積である。標識板および取り付け金具を無視して式(3.2) から得られた HK50, HK100 の固有振動数は 10.7 Hz であった。そこで、図-3.9 ～3.12 における 6.0～7.7 Hz のピークが近傍にあり、曲げ振動の 1 次モードによるものだと考えられる。なお、HK100 の EW 方向、HK50 の EW 方向、NS 方向において、60 Hz 近辺にもピークが存在するが、本実験においてはこのモードの特定には至らなかった。

b) 固有振動数

換算腐食率(積算電流量)と、共振曲線から得られた固有振動数の関係を図-3.13, 3.14 に示す。図の縦軸の固有振動数比とは、健全時の減固有振動数を基準とした各腐食率の固有振動数である。全ての供試体において、腐食率の増加に伴う固有振動数の変化は見られなかった。

c) 減衰定数

換算腐食率(積算電流量)と、減衰定数比との関係を図-3.15, 3.16 に示す。図の縦軸の減衰定数比とは、健全時の減衰定数を基準とした各腐食率の減衰定数である。

全ての供試体において、腐食率の増加に伴う減衰定数の変化は見られなかった。なお、既往の研究においては、腐食ひび割れ発生以前において減衰定数比が2倍ほどに大きくなる傾向が見られている。今回、ひび割れ発生が確認されたのは腐食率15%前後の時であるが、それ以前においてこのような傾向は見られない。これは、実際のひび割れの発生が電食後初めて計測を行った腐食率10%前後より前であったためと考えられる。

3.2.2 コンクリート部の縦振動試験

本項では、表-2.8 の電食時間ごとにコンクリート部の縦振動試験を行い、振動特性の変化を整理する。以降では固有振動数と減衰定数に着目して実験データを整理する。

a) 共振曲線

コンクリート部の縦振動試験から得られた共振曲線の一例を図-3.17~3.20 に示す。コンクリートのテストピース($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$)より得られた1次固有振動数9276Hzから、鋼管や鉄筋の影響を無視し、コンクリートの断面寸法から供試体の1次固有振動数を求めると、3710 Hzとなる。よって今回はその近辺にある3200 Hz前後のピークに着目して整理した。ただし、このピークにおけるモードの特定には至らなかった。これは、供試体下面の型枠が打設時から取り外されなかったため、コンクリートフーチングの下面の変位が型枠に拘

束されることで、想定した縦振動の全体 1 次モードが十分に励起されなかったためであると考えられる。

b) 固有振動数

換算腐食率(積算電流量)と固有振動数比の関係を図-3.21, 3.22 に示す。

HK50 供試体では、NS 方向においては、腐食率が 30 % 以上で固有振動数が 5 % ほど低下したが、EW 方向における明確な変化は見られなかった。HK100 供試体では腐食率が大きくなるに連れて固有振動数が低下する傾向が見られ、特に EW 方向において顕著であった。固有振動数比の低下率は最大で 10 % 程度であった。またこの低下傾向は腐食率 30 % 程度以上では見られなかった。フーチング断面の対称性にもかかわらず、方向によって変化率が異なる原因は、コンクリートのひびわれの方向や鋼材の腐食性状が不均一であることが考えられる。

以上から、腐食区間が 100 mm 程度と大きな支柱の劣化について、縦振動試験における固有振動数の変化率から鋼材腐食が推定できる可能性が示唆された。しかし、明確に全体縦振動のモードを捉えることはできなかった。また、固有振動数の変化率は、腐食率と腐食区間の両者に依存するため、現状では固有振動数比から腐食区間や腐食率をそれぞれ独立に推定することはできないと考えられ、今後のデータの蓄積が必要である。

3.2.3 コンクリート部の超音波試験

本項では、表-2.8 の電食時間ごとに、図-2.7 に示した測定方向についてコンクリート部の超音波試験を行い、探触子間の距離と伝播時間から見かけ上の伝播速度を求め、その変化率を整理した。探触子間の距離は上面からの測定では 200mm、側面からの測定では 500mm である。

換算腐食率(積算電流量)と見かけ上の伝播速度比の関係を図-3.23～3.26 に示す。上面における測定では、全ての供試体において、腐食率(積算電流量)が大きくなるにつれて見

かけ上の伝播速度が低下した。またその傾向はHK100 供試体において顕著であり、伝搬速度費は最大でおよそ 25 % 低下した。HK50 における低下は 5 % 程度であった。側面における測定では、HK100 では、腐食率が大きくなるに連れて見かけ上の伝播速度が 5 % 程度低下した。HK50 では伝搬速度比の変化は見られなかった。ここで、側面における測定で伝播速度の変化が小さかった理由として、図-3.27 のように超音波が伝播するとき、伝播経路において腐食区間の比率が小さいために腐食による劣化が十分に検出されなかったことが推察される。

以上から、腐食区間が 100 mm 程度と大きな支柱の劣化について、上面から測定した超音波試験において、見かけ上の伝播速度の変化率から鋼材腐食が推定できる可能性が示唆された。

なお、複数回の測定のうち半数以下ではあったが、HK100・EW 方向の腐食率 38.5 % でも、伝播速度が健全時の 7 割程度の値を示す場合があった。これは超音波試験の性質によるものと考えられる。超音波試験では、超音波の伝播時間のうち最短のものが測定される。よって、超音波の伝播時間が最短となる経路においてコンクリート同士や鋼コンクリート間の一体性が不安定な場合、伝播時間は最短経路によるものと、その次に伝播時間の短い経路によるものとの 2 種類が測定されうる。このようにして、HK100 の腐食率 28.9 % 以降では、ひび割れの発生や付着の剥離が遷移期にあったと考えられる。

ここで、上面からの測定において、図-3.27 の経路で超音波が伝達しており、腐食区間において健全時では鋼材中を、腐食後はコンクリート中を伝達したとする。このとき、見かけ上の伝播速度は、腐食後では健全時の 87%に減少する。一方で、実験における腐食後の伝搬速度比は 70 % 前後まで低下しており、腐食による鋼管とコンクリートの付着の剥離だけではなく、腐食ひびわれによる影響も受けていると考えられる。

3.3 まとめ

本章では路側式標識を模擬した供試体を作製し、電食による段階的な鋼材腐食と振動特性との関係を整理した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 鋼管の電食試験では、質量減少量から求めた腐食率には供試体ごとにばらつきがあった。腐食性状は、2つの供試体に共通して、陰極と近接する部分で顕著な断面欠損が生じ、穴が空いた。また、コンクリート表面近傍においても顕著な断面欠損が生じた。
- 2) 鋼管の振動試験では、鋼材腐食の進展や腐食区間の大小に関わらず、減衰定数、固有振動数ともに明確な変化は見られなかった。
- 3) コンクリート部の縦振動試験では、全体縦振動の1次モードを明確に捉えることはできなかった。しかし、特定のピークに着目したところ、鋼材の腐食進展により固有振動数がわずかに低下する傾向が見られた。また、その傾向は腐食区間が 100 mm の供試体において顕著であった。
- 4) 超音波試験では、コンクリートフーチングの上面から鋼管の両側で測定したものについて、鋼材の腐食進展に伴って伝搬速度が低下する傾向が見られた。またその傾向は腐食区間が 100 mm の供試体において顕著であった。

以上から、非破壊検査の展望として、コンクリート部の縦振動試験、上面からの超音波試験によって腐食の有無が検出できると考えられる。ただし、これは腐食区間が 100 mm と大きいものに限られる。なお、上記の知見は限られた実験から得られた。このため、汎用的な非破壊検査に向けて、広範な諸元や様々な鋼材腐食性状に対する基礎的データの充足が必要である。

参考文献

- 3.1) 森川雅行，関博，奥村隆：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.97-105，1987.
- 3.2) 内藤英樹，伊東知哉，青木峻二，鈴木基行：鋼材腐食が生じた鋼コンクリート接合部の振動特性に関する基礎的検討，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 1060-1073，2011.
- 3.3) 岩岸現，柏宏樹，内藤英樹，鈴木基行：鋼コンクリート接合部に生じた鋼材腐食量の推定に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34， No. 2， pp. 1060-1073， 2012.

表－3.1 鋼管の腐食率(質量減少量)

供試体名	切り出し部 長さ [mm]	健全部 長さ [mm]	電食後 腐食区間 質量 [g]	電食前 腐食区間 質量 [g]	質量 減少率 [%]	積算 電流量 [A・h]
HK50	155.2	105.2	110.1	205.6	38.5	206.0
HK100	233.1	133.1	252.9	411.3	46.5	412.0

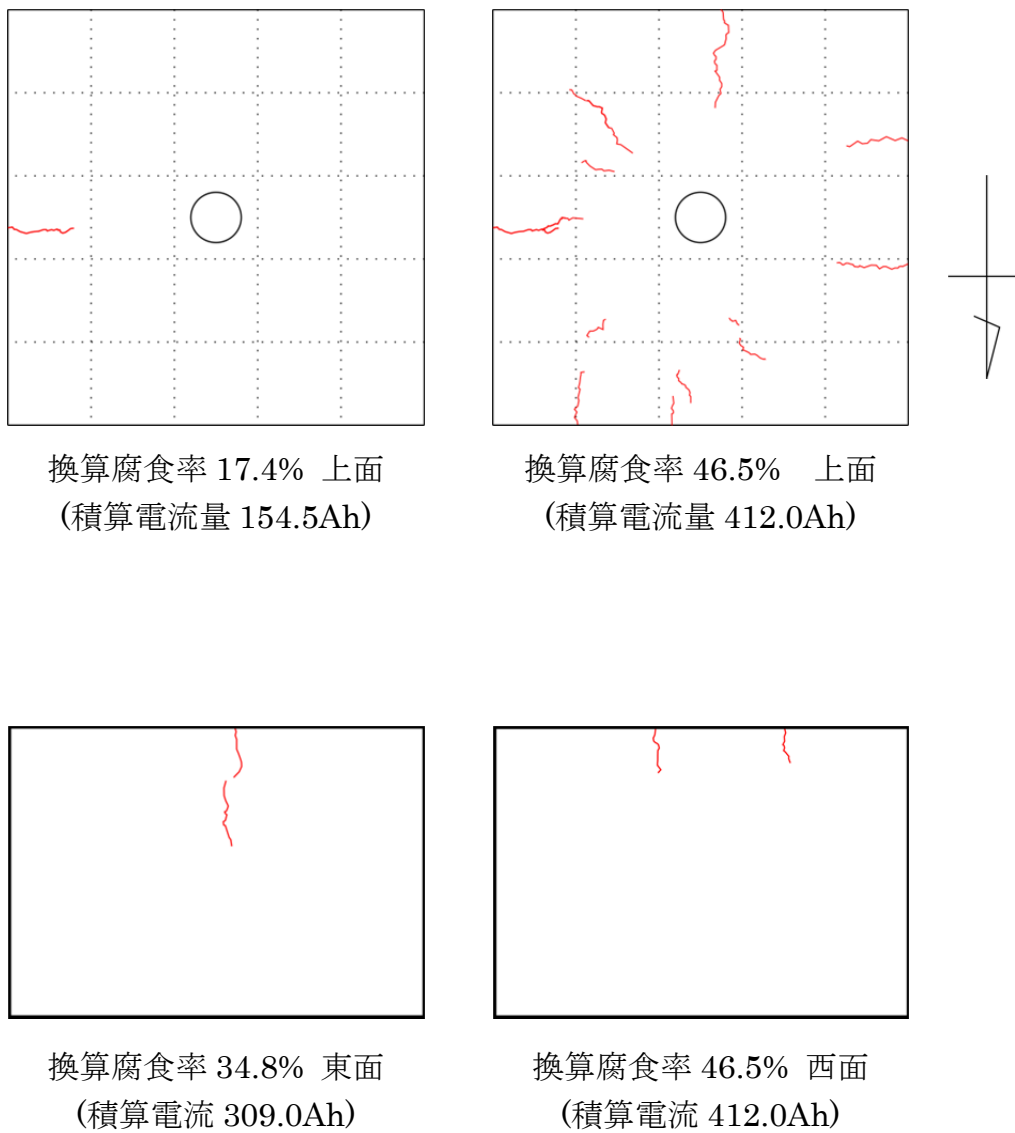
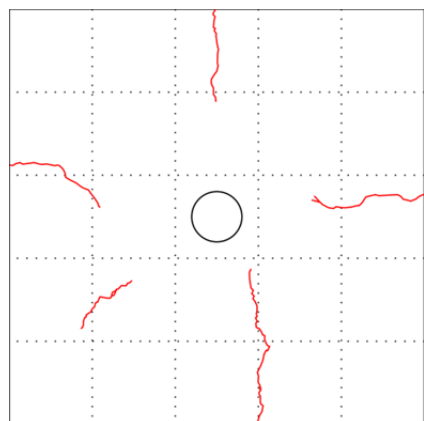
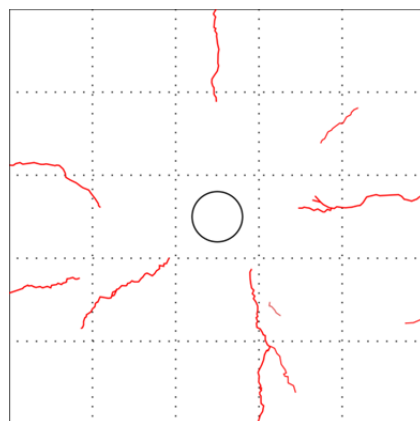


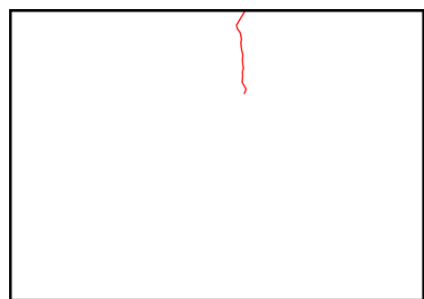
図-3.1 HK50 ひび割れ進展図



換算腐食率 14.4% 上面
(積算電流量 77.3Ah)



換算腐食率 38.5% 上面
(積算電流量 206.0Ah)



換算腐食率 14.4% 西面
(積算電流量 77.3Ah)



換算腐食率 38.5% 西面
(積算電流量 206.0Ah)

図-3.2 HK100 ひび割れ進展図

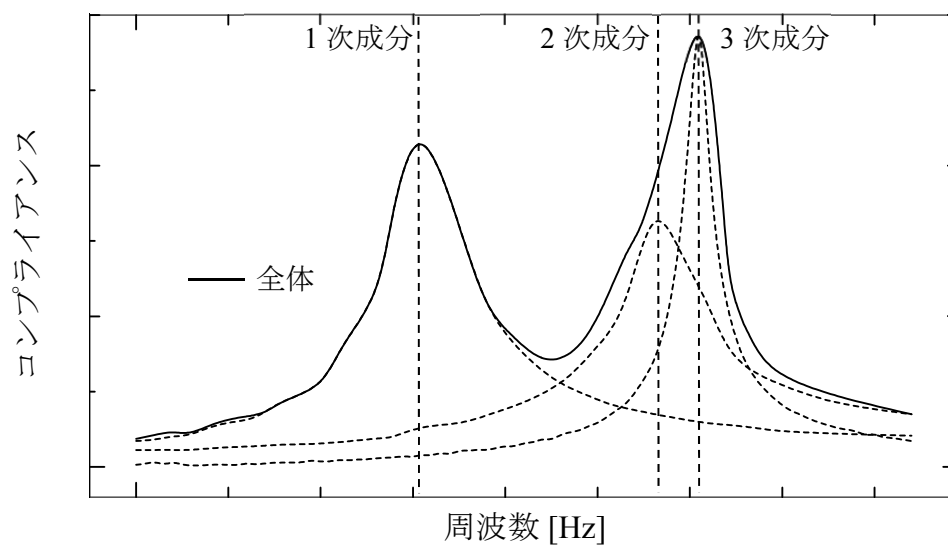


図-3.3 多自由度系の周波数応答曲線

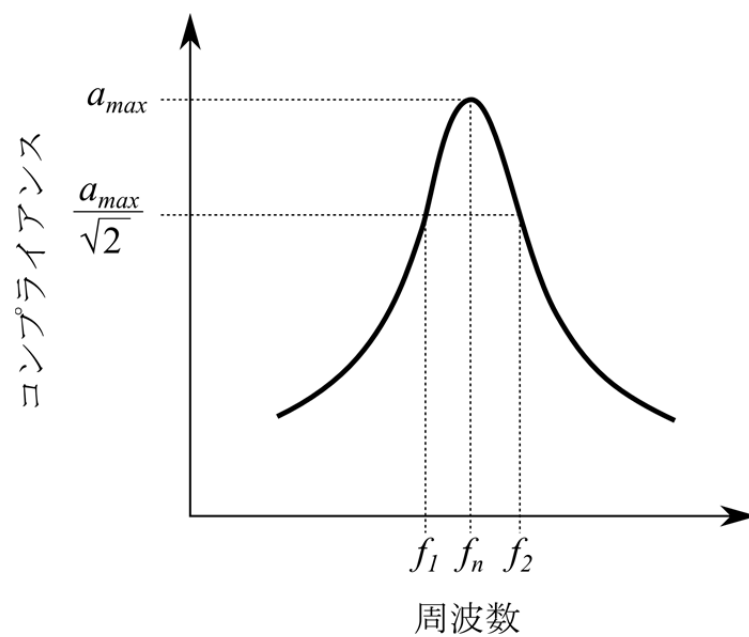


図-3.4 ハーフパワー法概要図

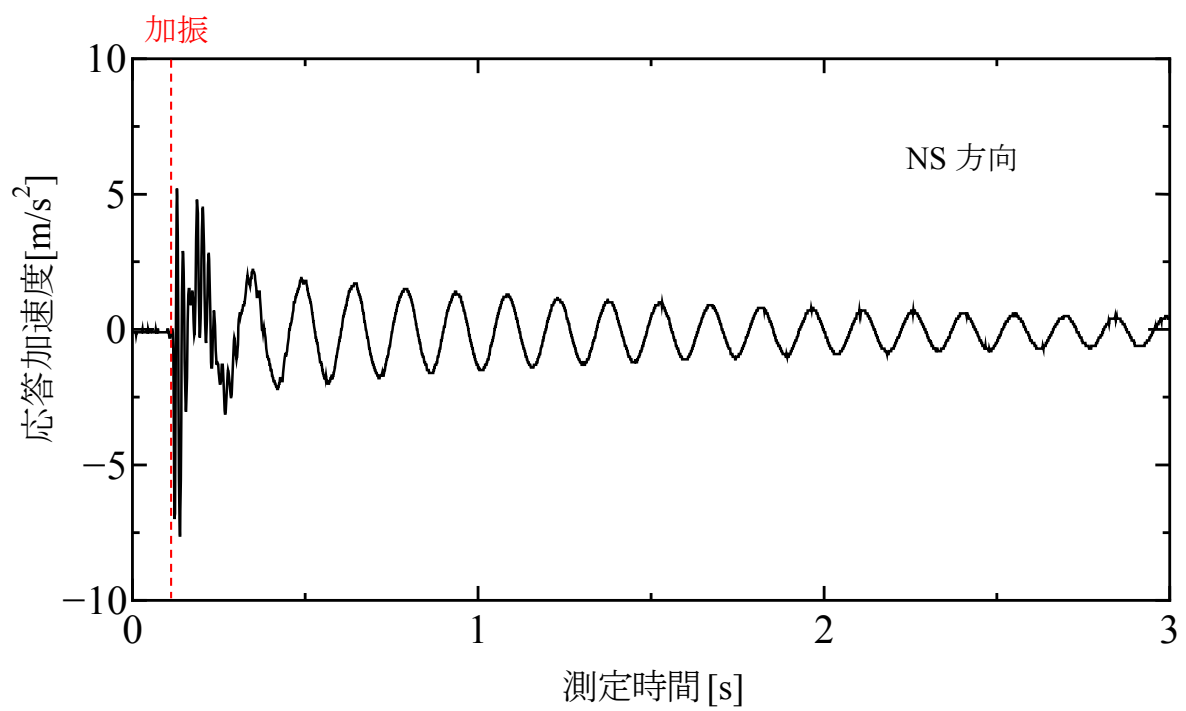
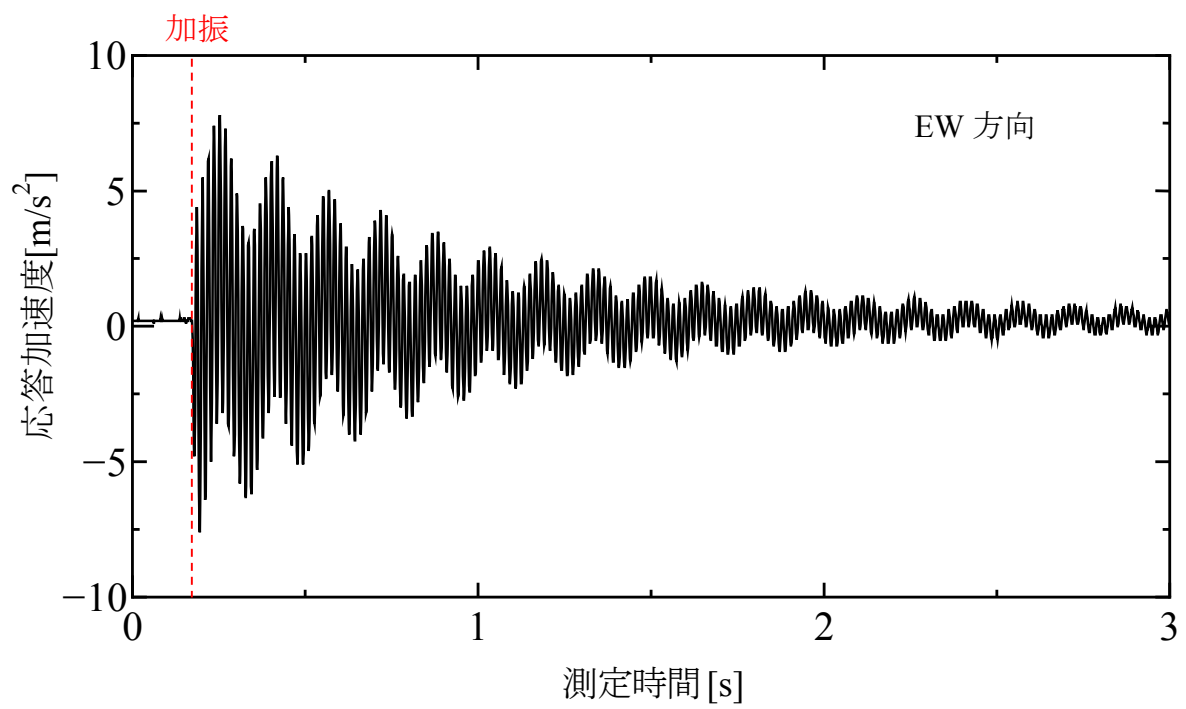


図-3.5 HK50 の時刻歴加速度応答(健全時)

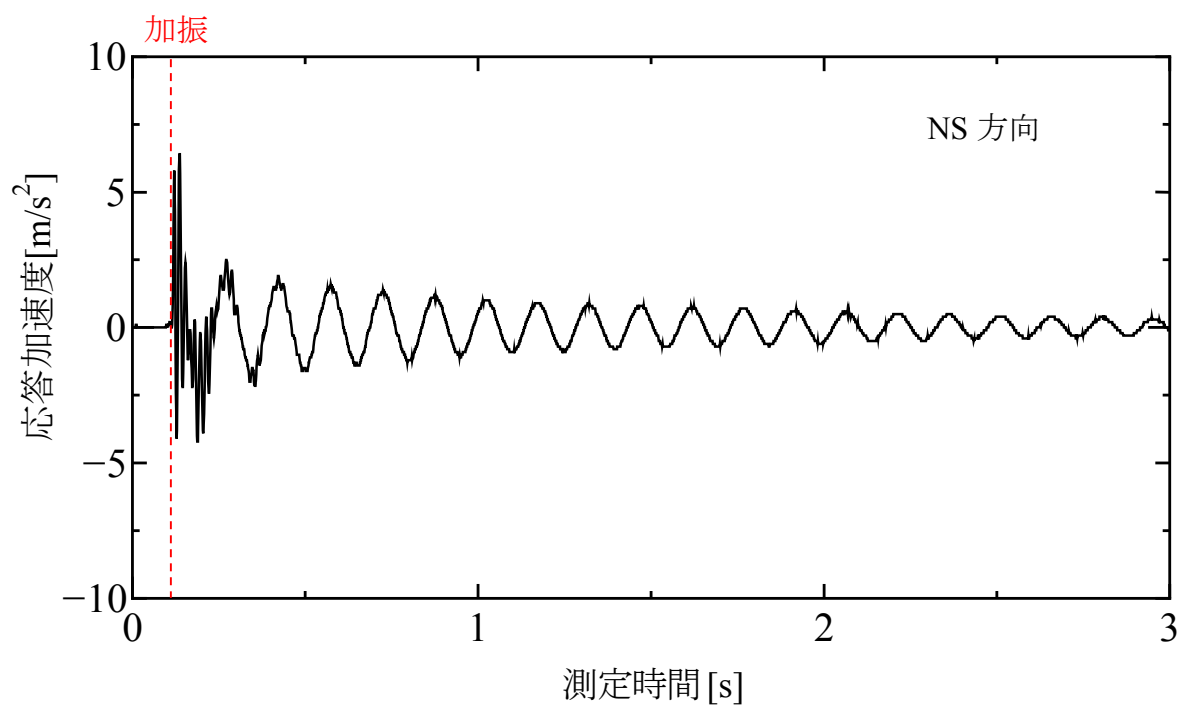
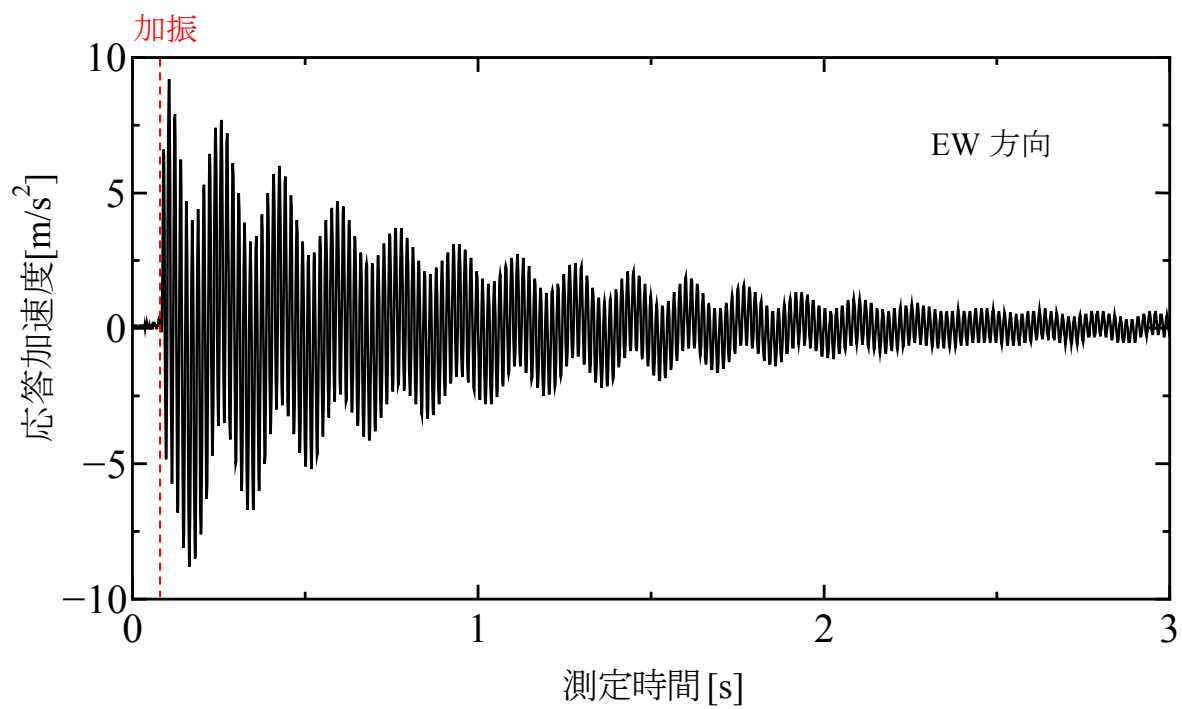


図-3.6 HK50 の時刻歴加速度応答(腐食率 46.5%)

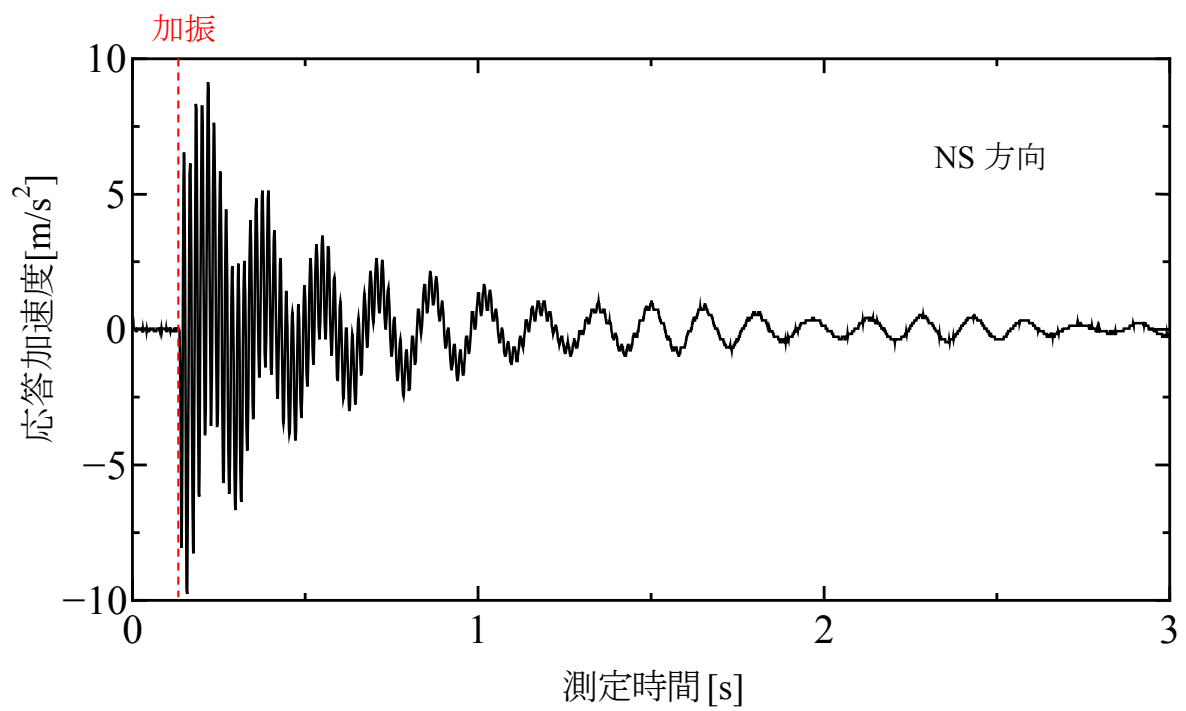
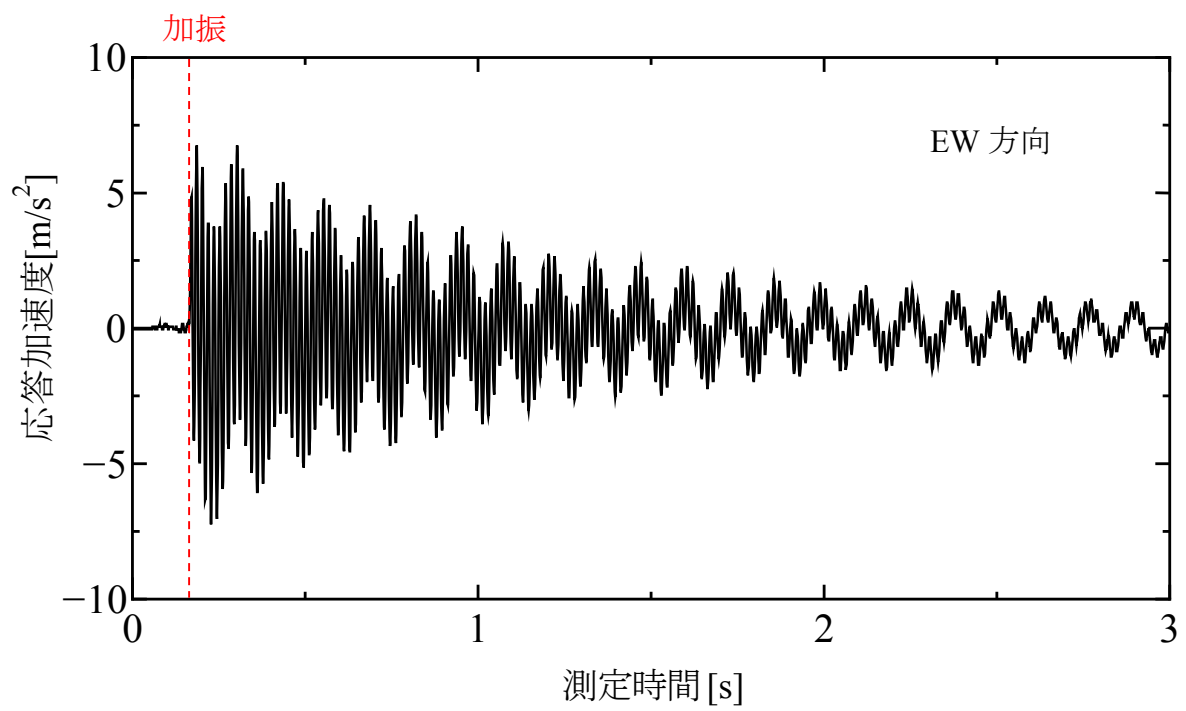


図-3.7 HK100 の時刻歴加速度応答(健全時)

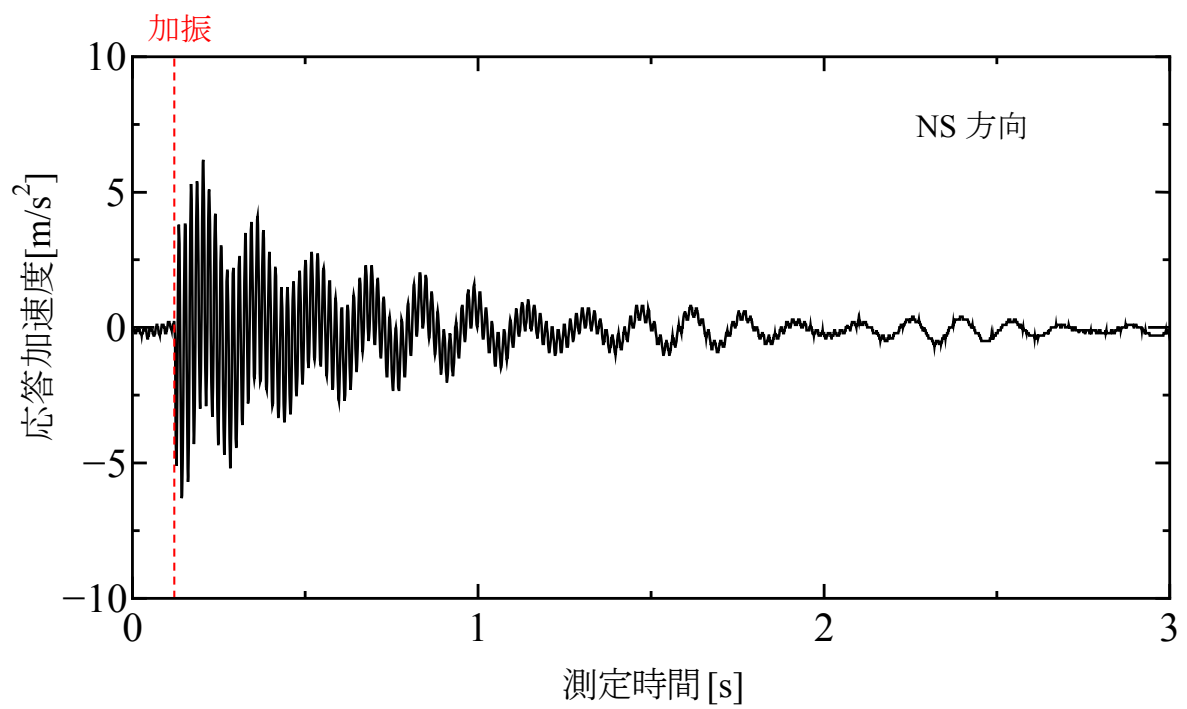
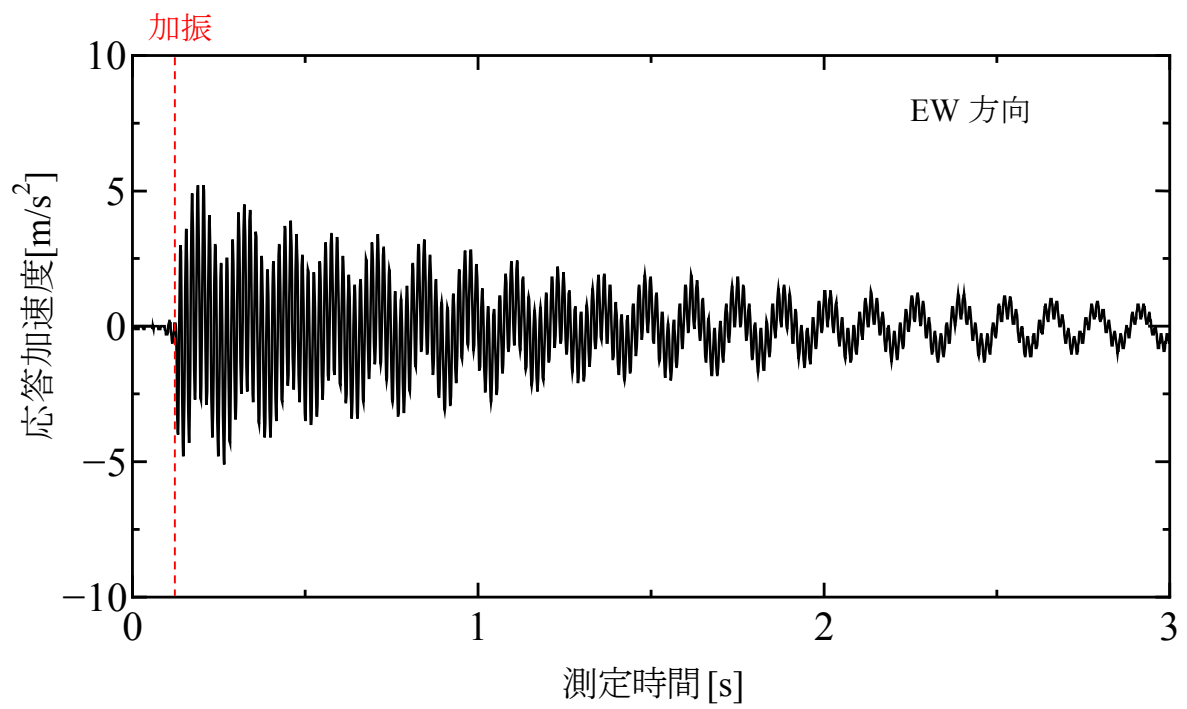


図-3.8 HK100 の時刻歴加速度応答(腐食率 38.5%)

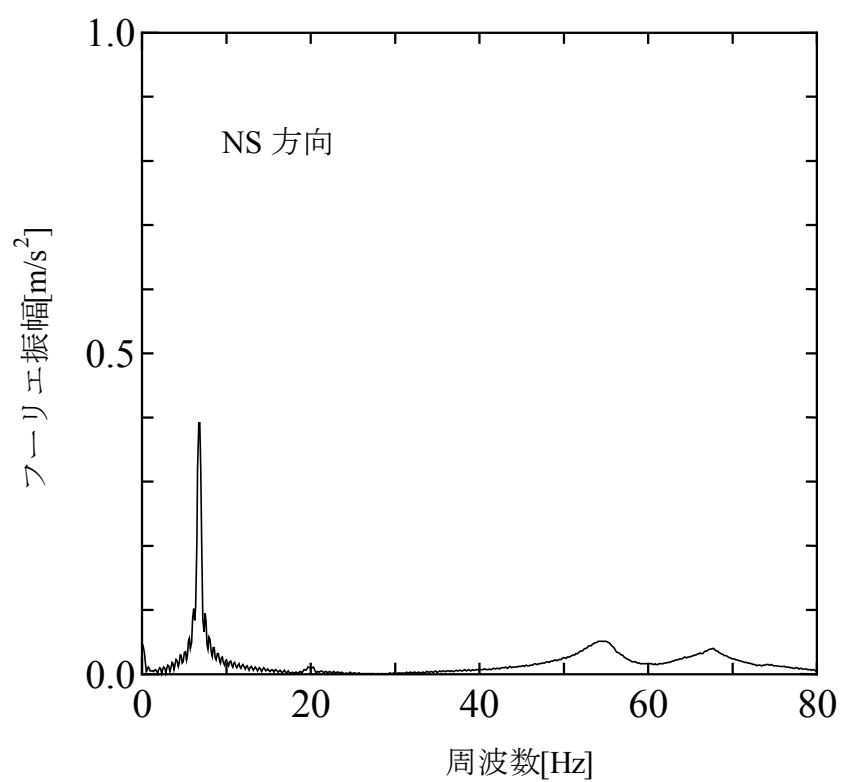
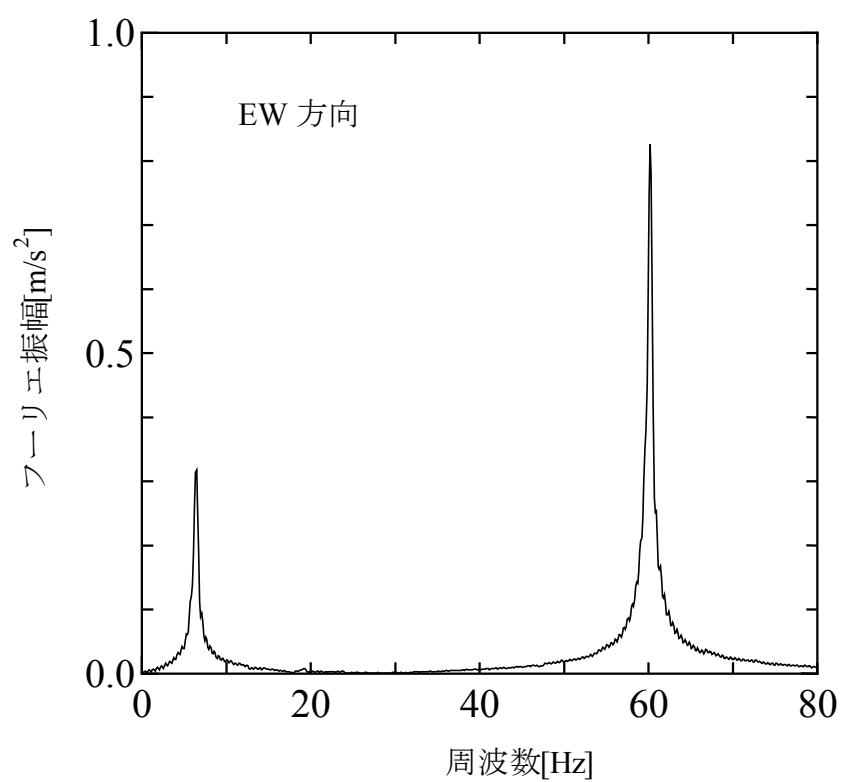


図-3.9 HK50 のフーリエスペクトル(健全時)

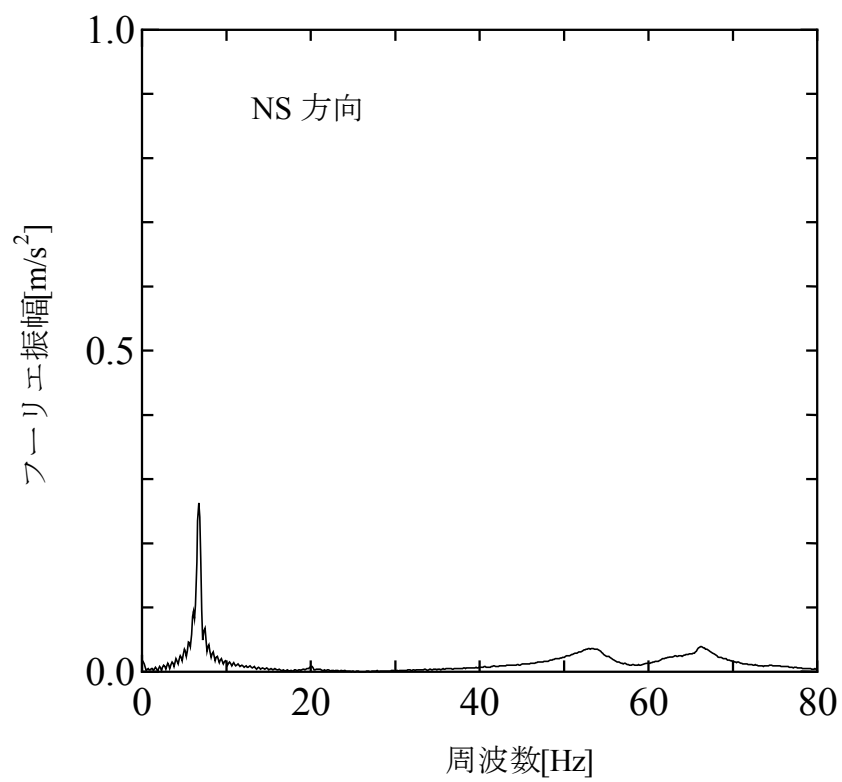
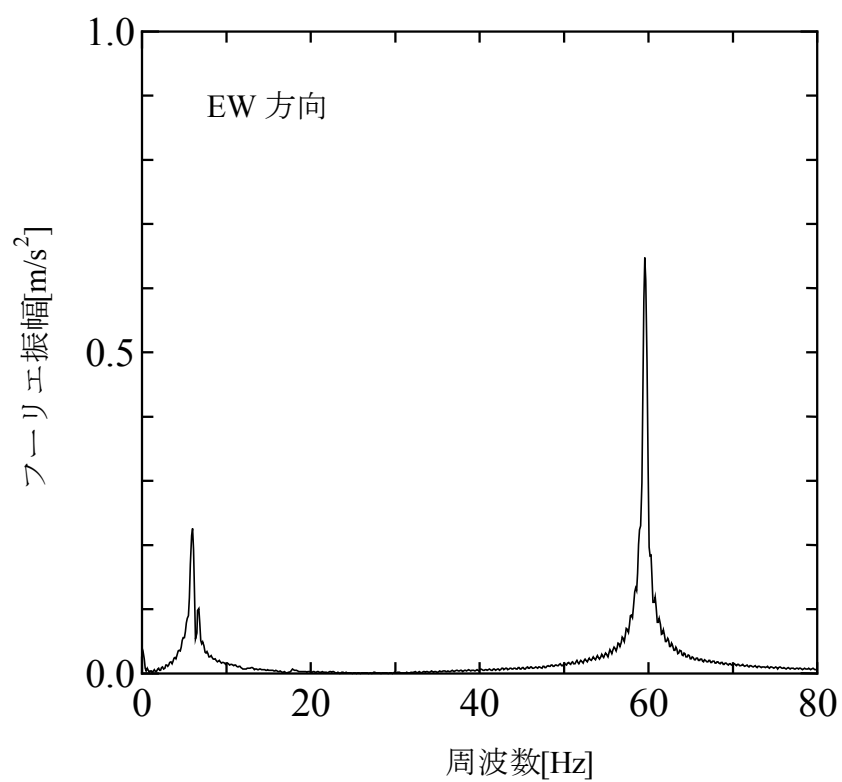


図-3.10 HK50 のフーリエスペクトル(腐食率 46.5%)

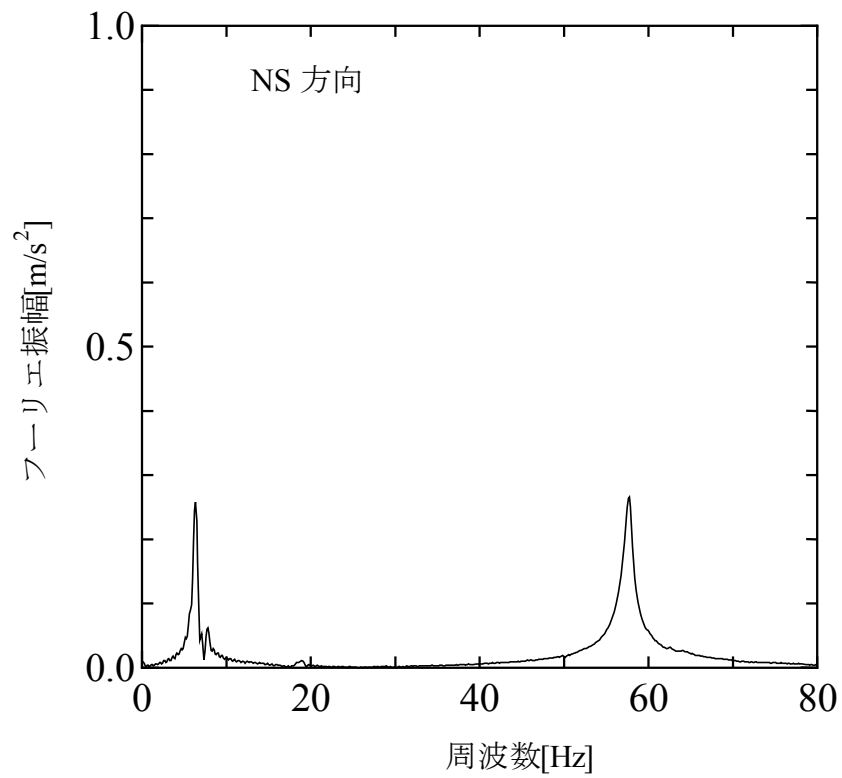
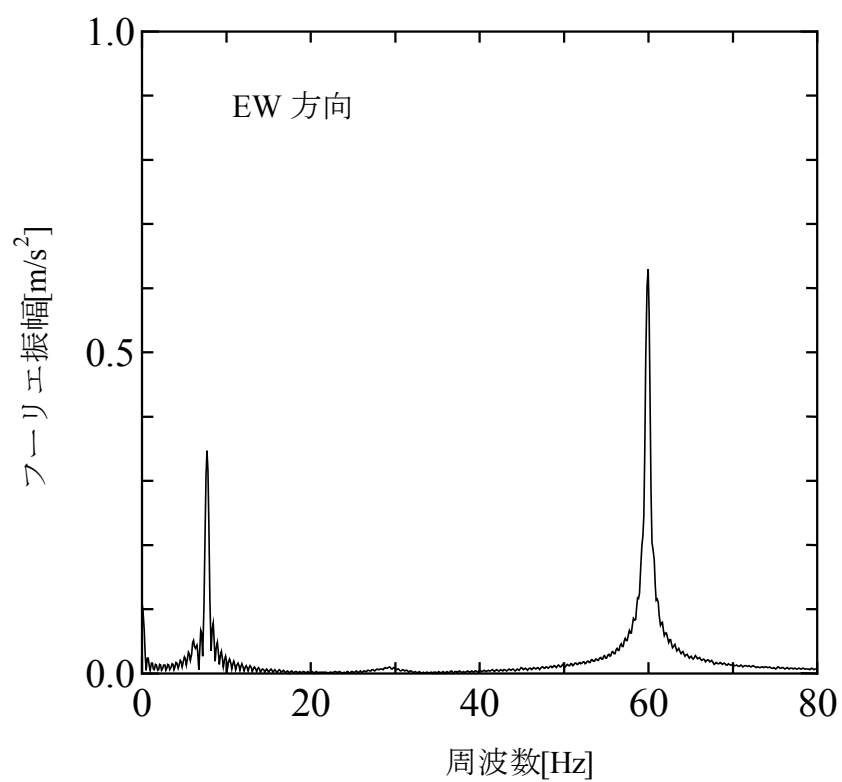


図-3.11 HK100 のフーリエスペクトル(健全時)

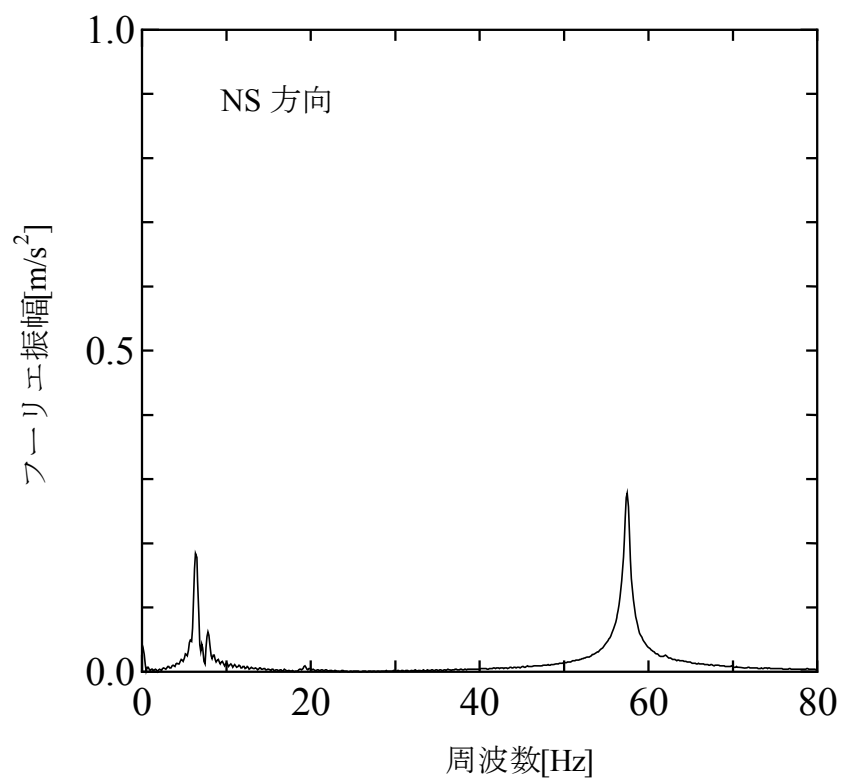
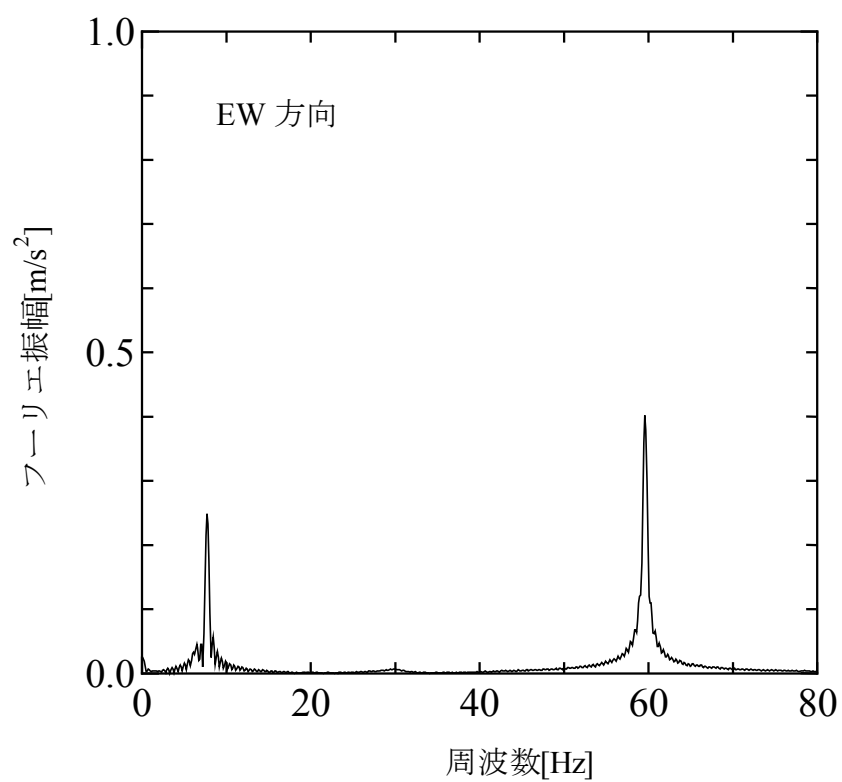
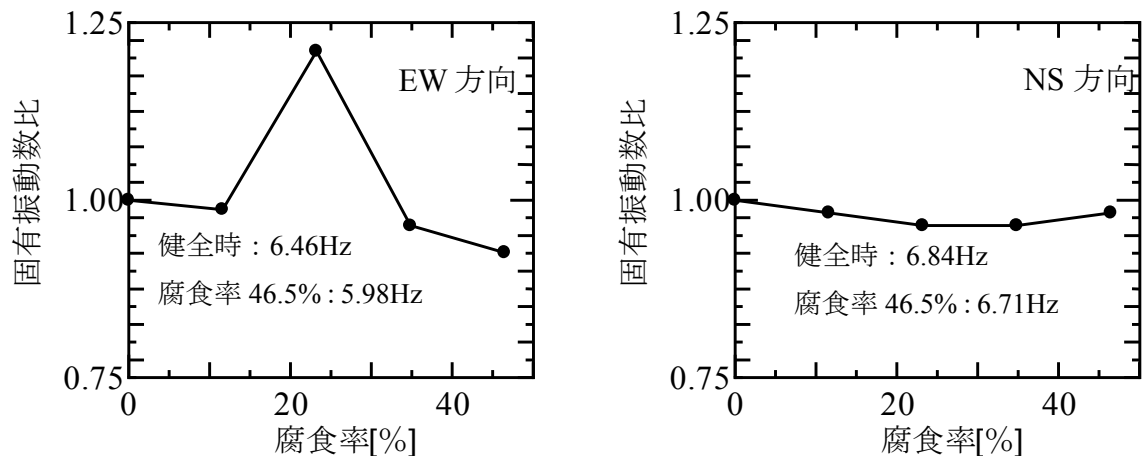
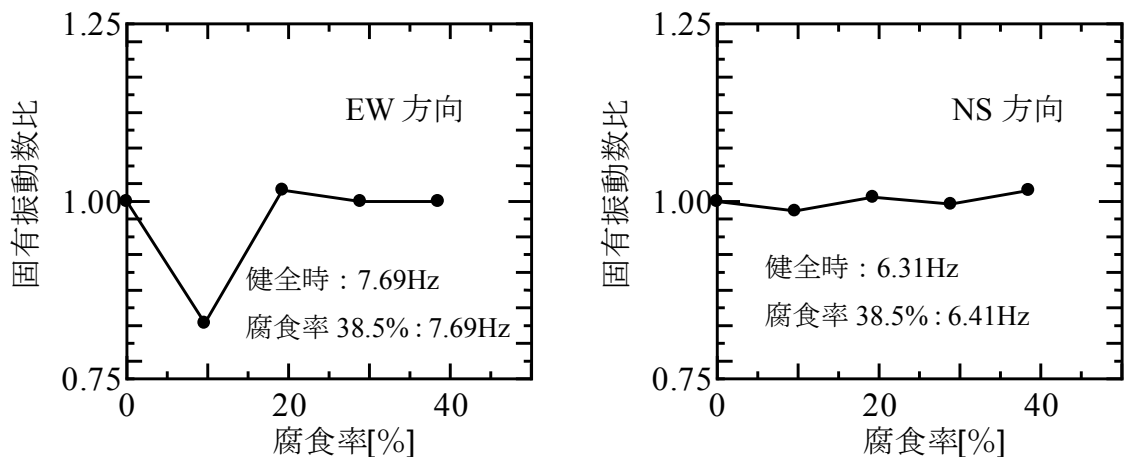


図-3.12 HK100 のフーリエスペクトル(腐食率 38.5%)



図－3.13 HK50 鋼管の換算腐食率—固有振動数比関係



図－3.14 HK100 鋼管の換算腐食率—固有振動数比関係

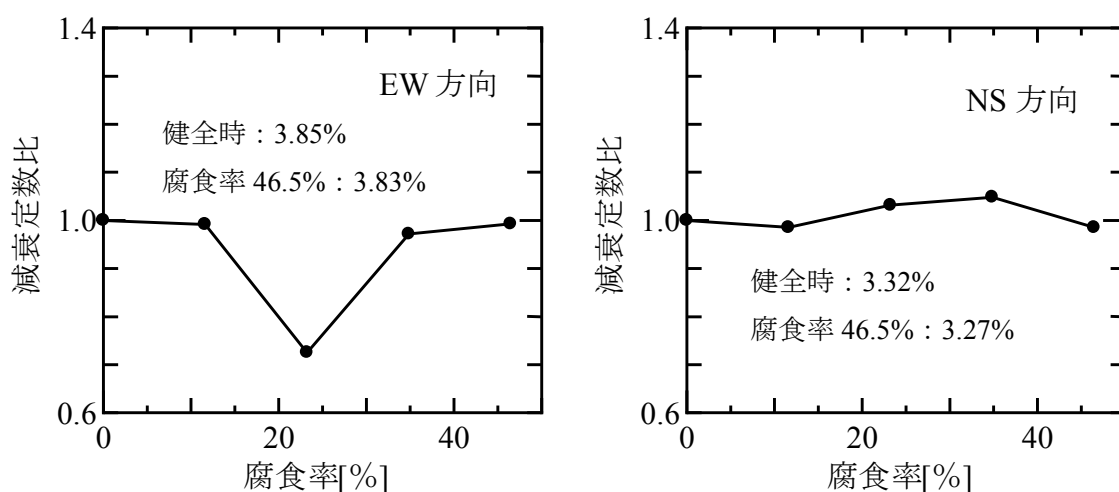


図-3.15 HK50 鋼管の換算腐食率—減衰定数比関係

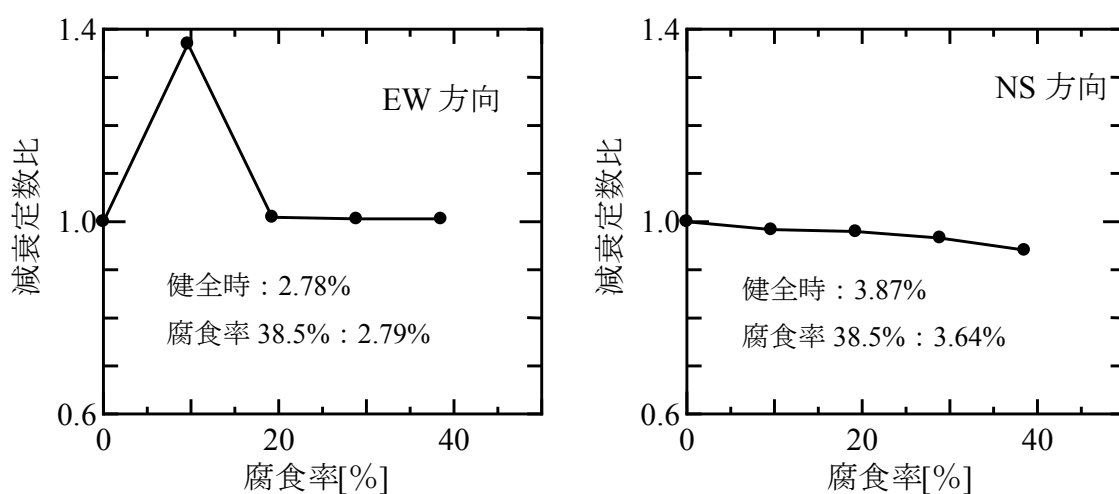


図-3.16 HK100 鋼管の換算腐食率—減衰定数比関係

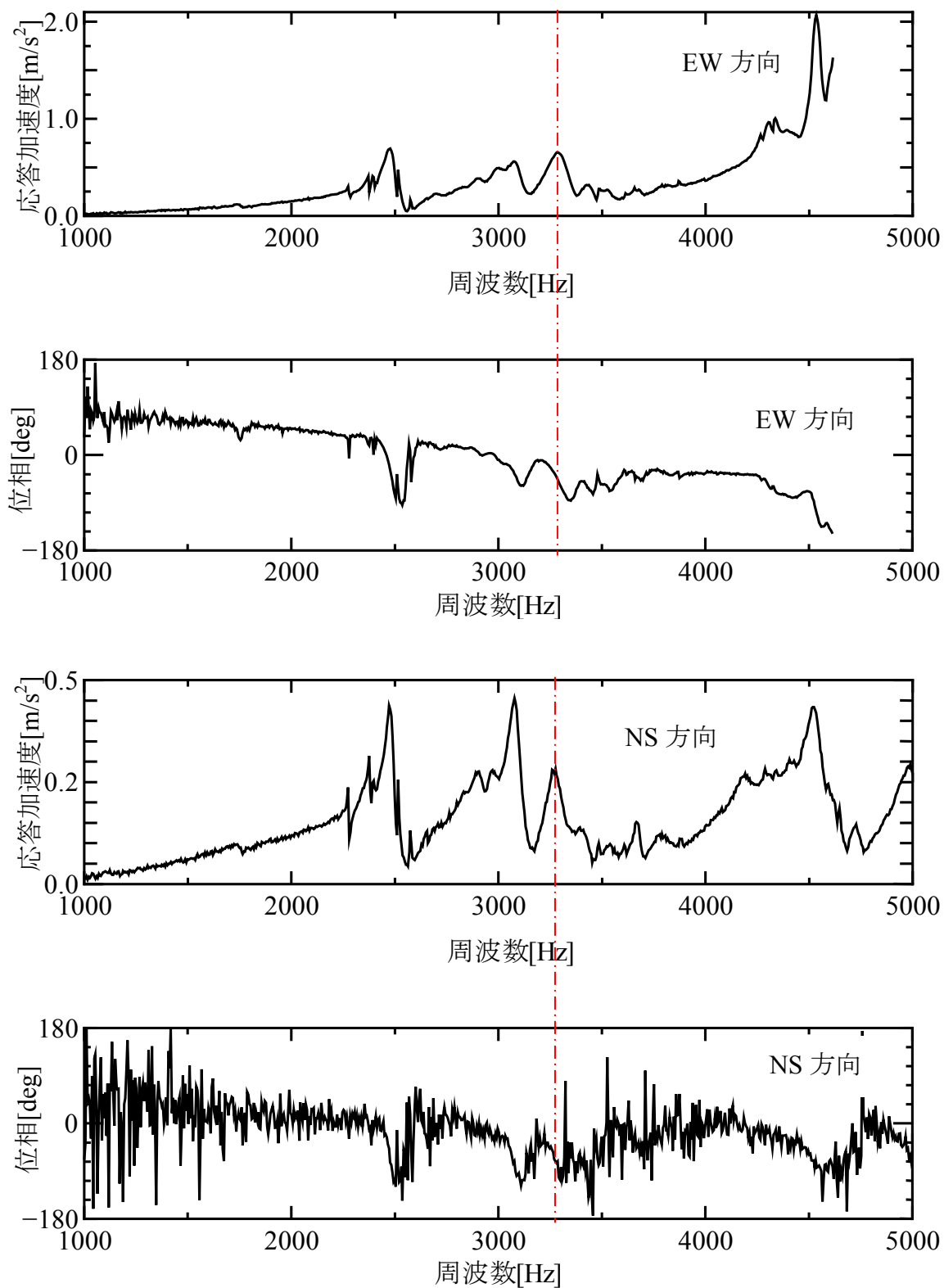


図-3.17 HK50 コンクリートフーチングの応答(健全時)

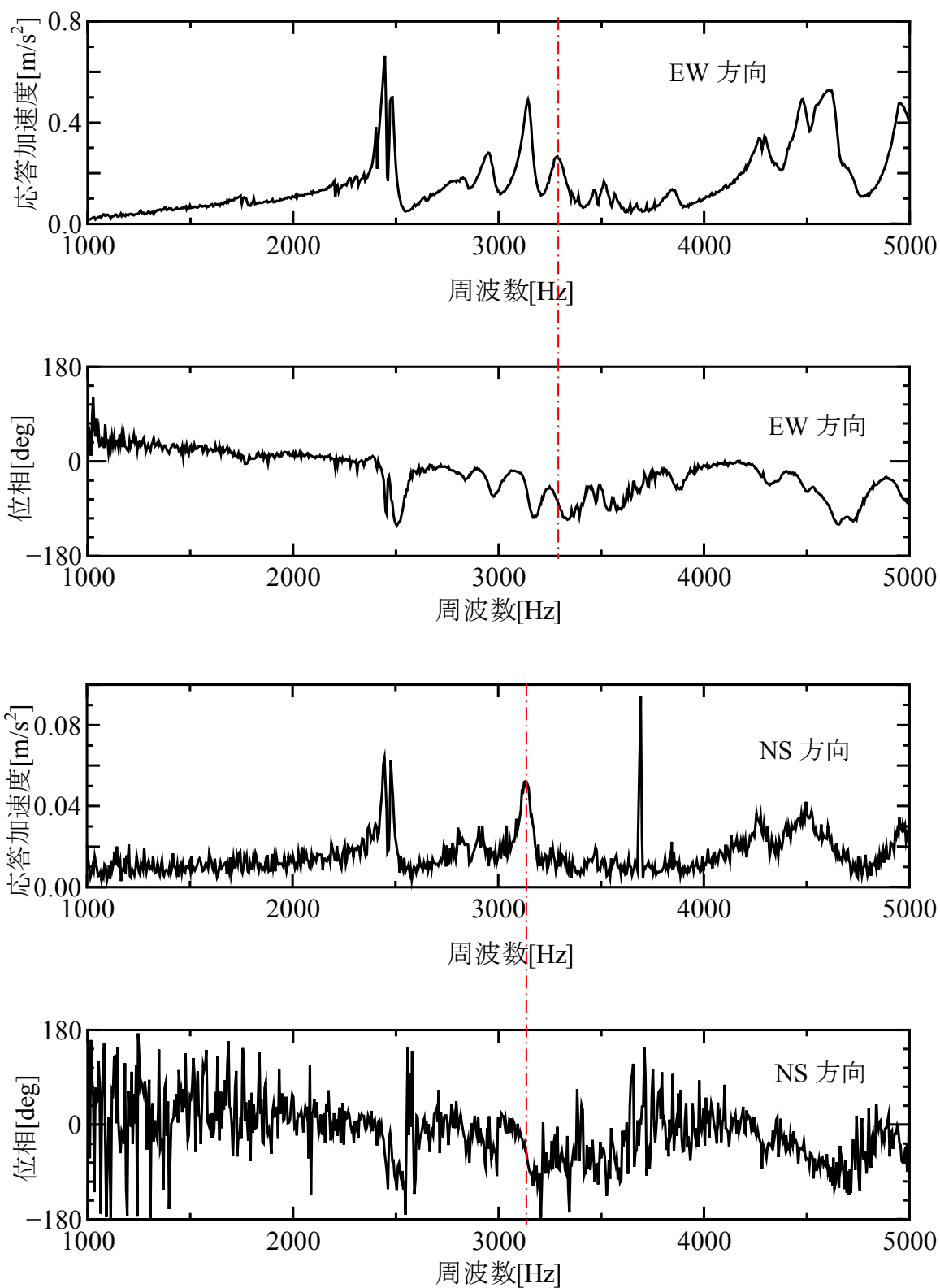


図-3.18 HK50 コンクリートフーチングの応答(腐食率 46.5%)

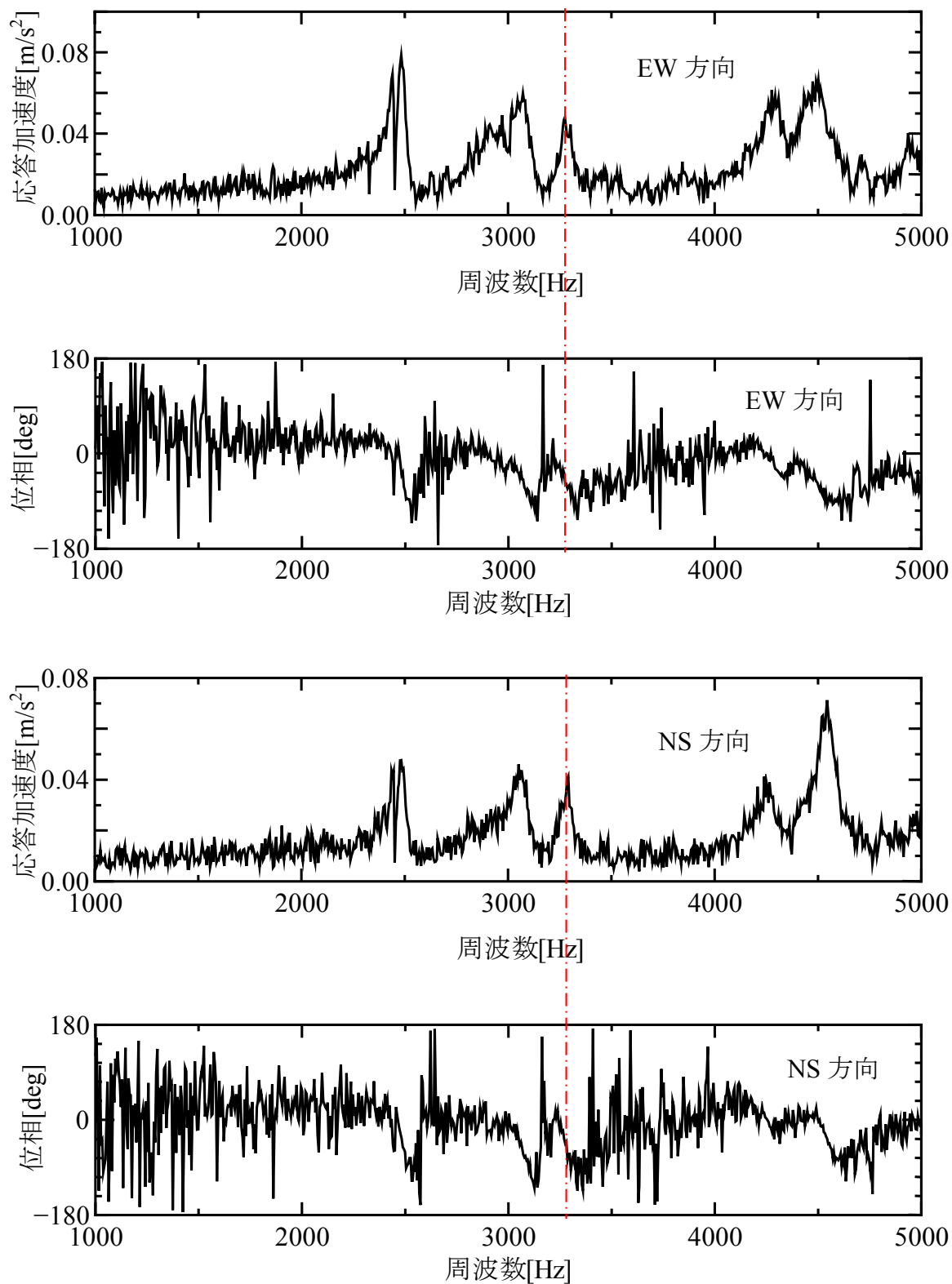


図-3.19 HK100 コンクリートフーチングの応答(健全時)

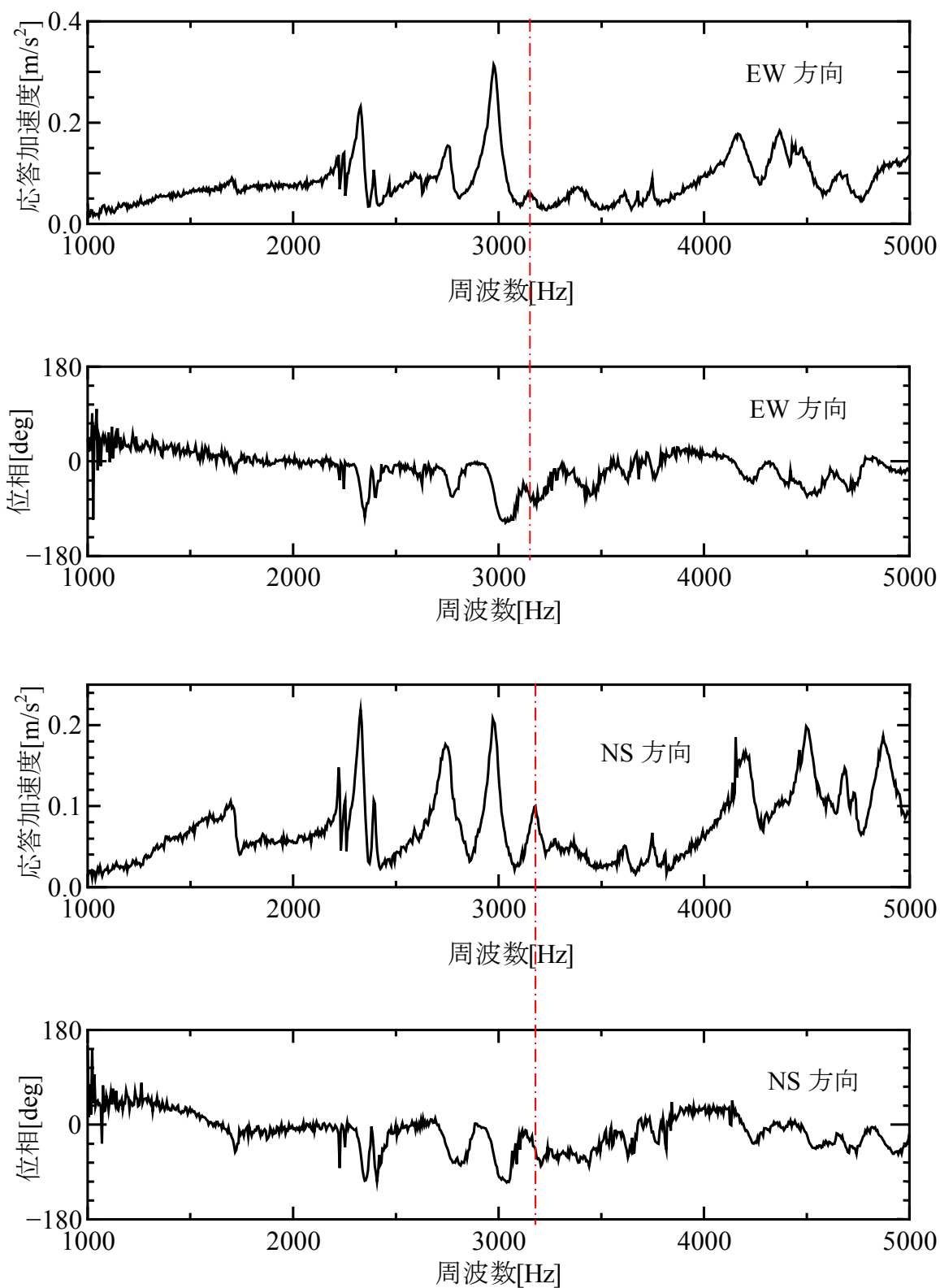


図-3.20 HK100 コンクリートフーチングの応答(腐食率 38.5%)

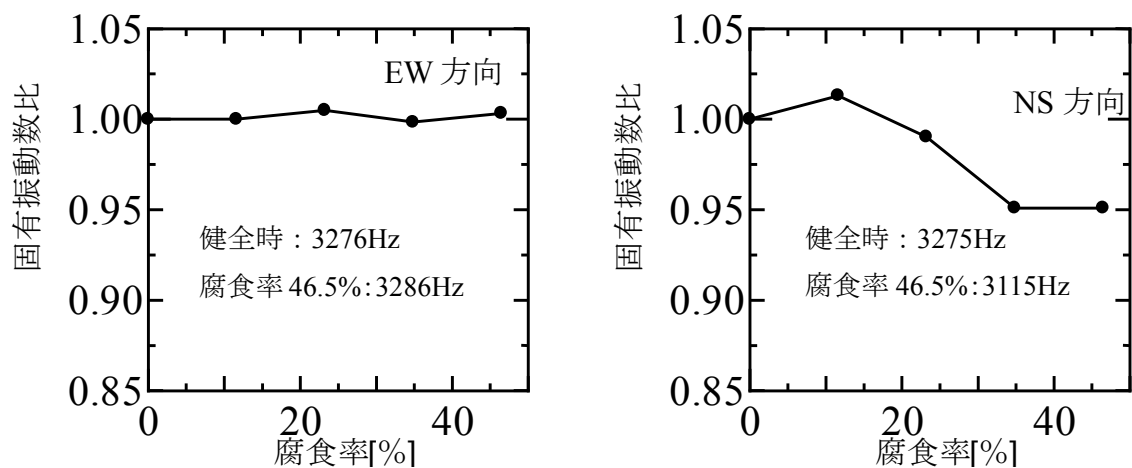


図-3.21 HK50 コンクリートフーチング換算腐食率—固有振動数比関係

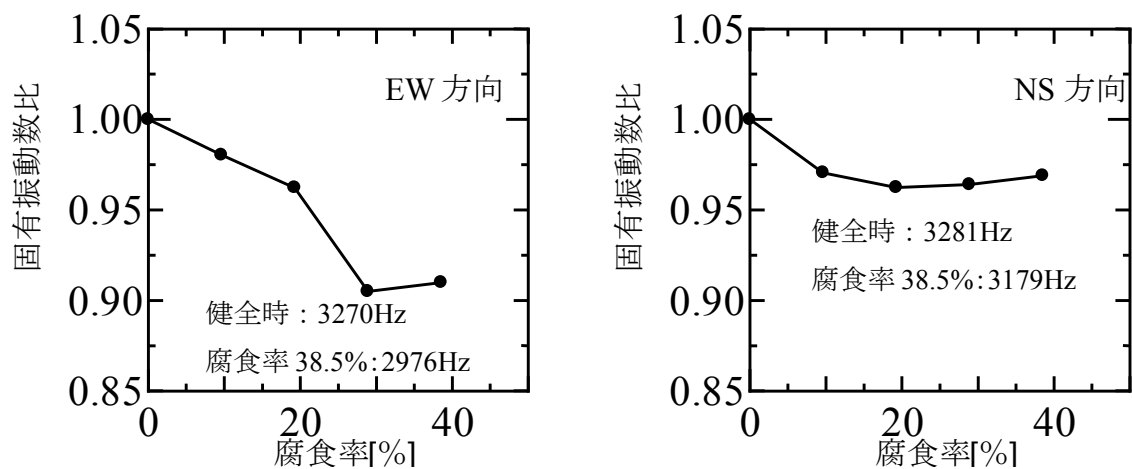


図-3.22 HK100 コンクリートフーチング換算腐食率—固有振動数比関係

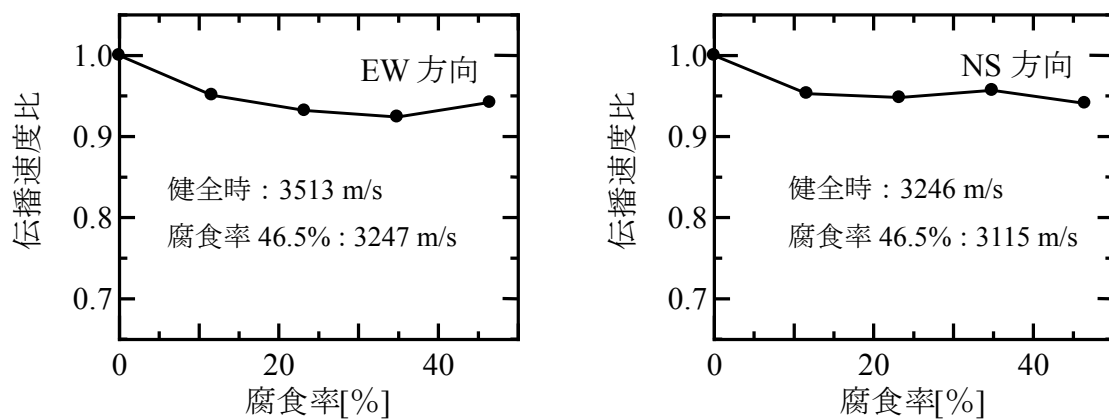


図-3.23 HK50 換算腐食率—超音波伝播速度比関係 (上面)

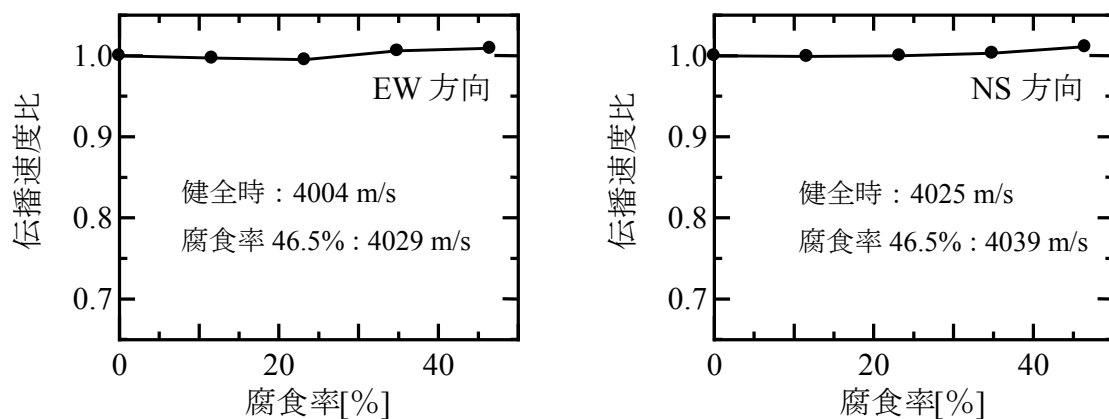


図-3.24 HK50 換算腐食率—超音波伝播速度比関係 (側面)

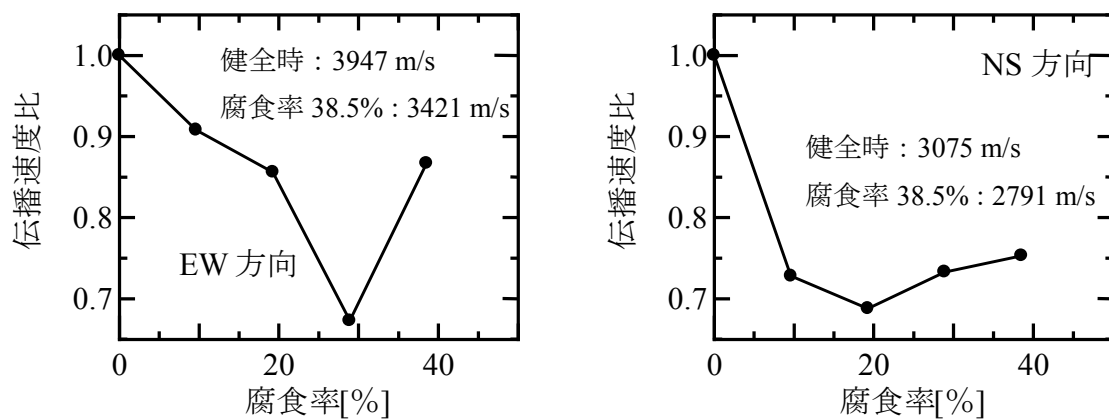


図-3.25 HK100 換算腐食率—超音波伝播速度比関係（上面）

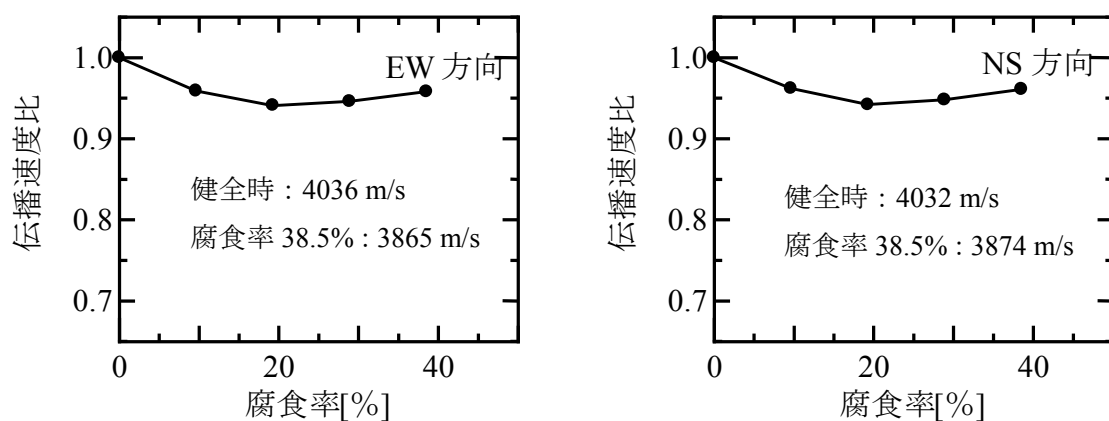
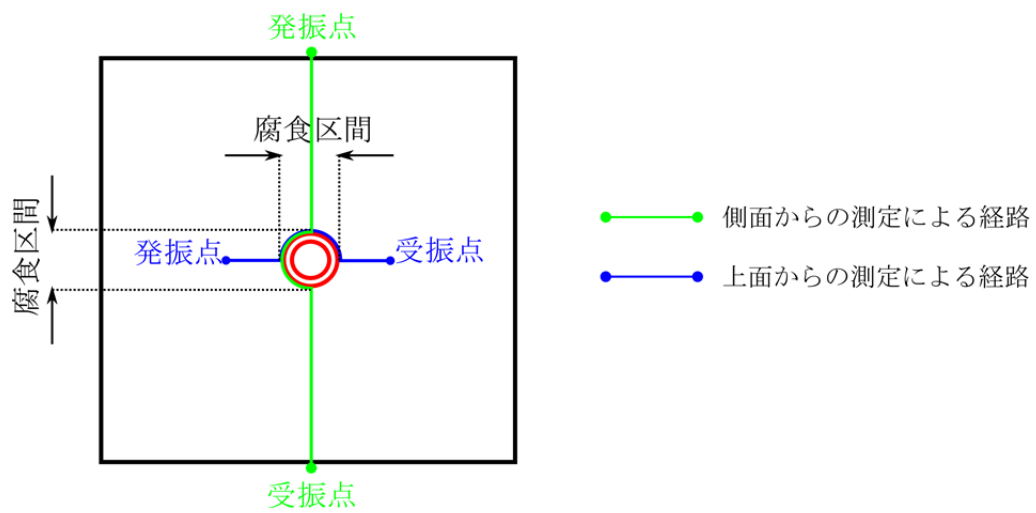
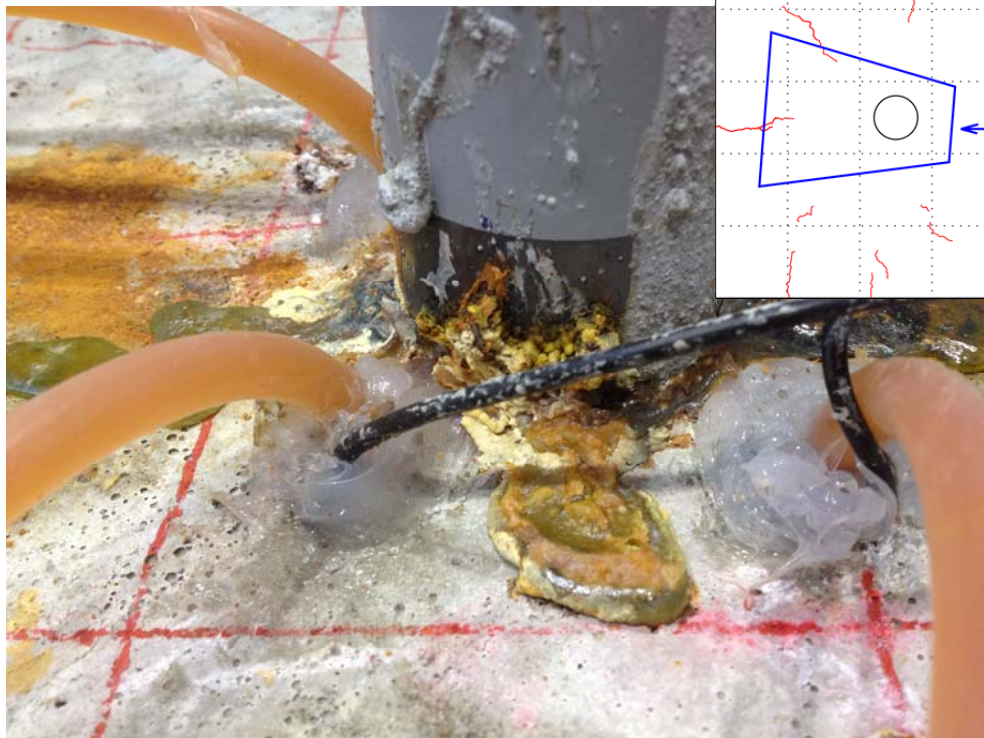


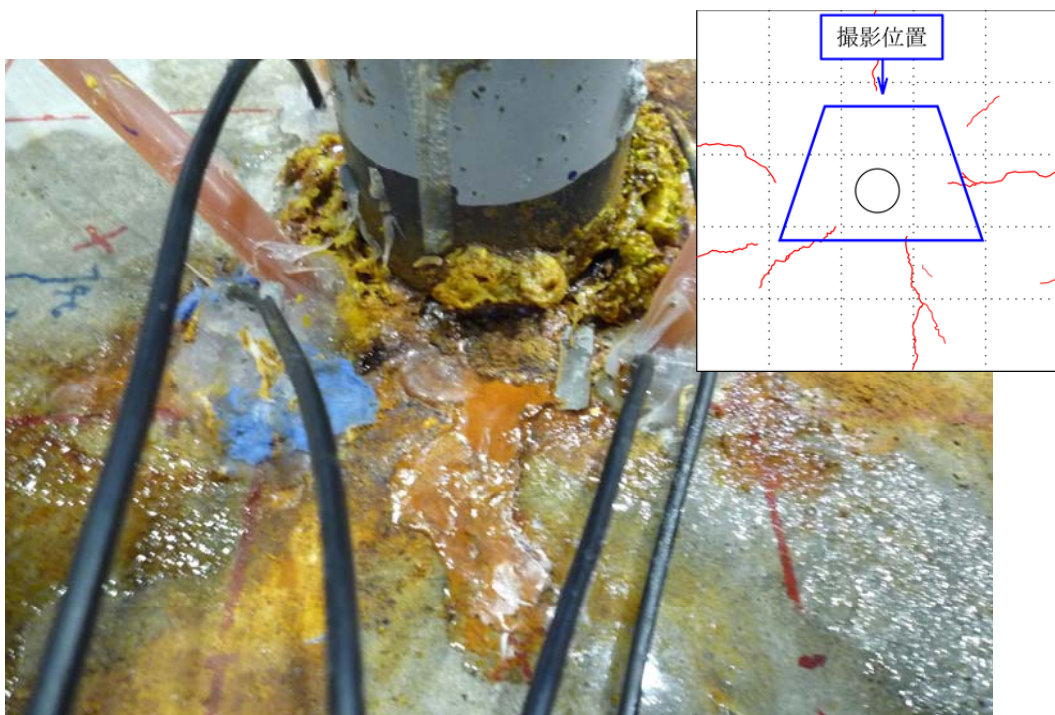
図-3.26 HK100 換算腐食率—超音波伝播速度比関係（側面）



図－3.27 超音波伝播の経路



写真－3.1 HK50 供試体 腐食率 34.8% 西側



写真－3.2 HK100 供試体 腐食率 38.5% 南側

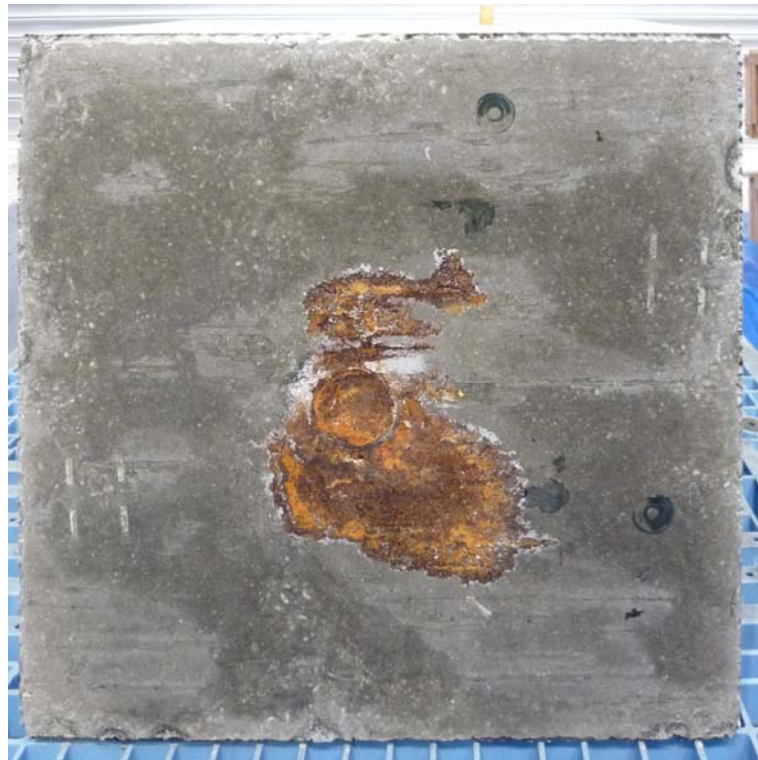
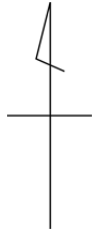


写真-3.3 HK50 供試体 腐食率 46.5% 底面

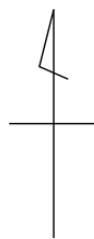


写真-3.4 HK100 供試体 腐食率 38.5% 底面



北東面

北西面

南西面

南東面

写真-3.5 HK50 供試体 腐食率 46.5%



北東面

北西面

南西面

南東面

写真-3.6 HK100 供試体 腐食率 38.5%

4. 結論

本研究では、円形鋼管柱のコンクリート埋め込み部において腐食する劣化性
状に着目し、振動試験や超音波試験による簡便な点検手法の確立を目的として、
供試体実験を行った。

実験では、路側式標識を模擬した供試体を作製した。そして、電食によって
供試体のコンクリート埋め込み部における鋼材腐食を促進し、振動試験により
鋼材およびコンクリートの振動特性に関するデータを収集した。供試体は、同
一寸法で鋼材腐食を促進させる区間を埋め込み深さ 50 mm までとする HK50、
および埋め込み深さ 100 mm までの HK100 の 2 体を作製した。

これらの供試体実験から得られた知見を以下に示す。

- 1) 鋼管たわみ振動試験においては、腐食の有無や腐食区間の大きさの違いによ
って、固有振動数と減衰定数は変化しなかった。
- 2) コンクリート部の縦振動試験では、固有振動数の低下から腐食の有無を判断
することが可能である。ただし腐食区間が鋼管の埋め込み深さ 50 mm まで
の場合は、腐食率 (腐食による鋼材の質量減少率) が 30 % 程度以上の腐食が
検出可能である。しかし、この試験において固有振動数の低下率は最大で
10 % 程度と小さく、また全体縦振動のモードを明確に得ることはできなか
った。
- 3) コンクリート部の超音波試験では、超音波伝播速度の低下から、鋼管が埋め
込み深さ 100 mm まで腐食している場合については、腐食率 30 % 程度以上
の腐食発生を検知することができる。

最後に、本研究に関する今後の課題を以下に示す。

- 1) 本研究で収集したデータは、腐食率が 40 % 程度までの振動特性であり、第三者影響度が増大するような大きな腐食率における傾向は不明である。また、振動特性の変化から腐食の有無は検出可能であると推察されるが、腐食率や腐食区間の大きさを検出することはできなかった。今後は基礎的データの蓄積とともに、非破壊試験の高度化も課題として挙げられた。
- 2) 本研究は供試体を用いて鋼材腐食促進試験を行った。今後は、実際の腐食環境下にある港湾構造物を対象とした現場試験の試行へと繋げていく。