

論文 小型打撃試験装置を用いた道路橋遊間部の内部欠陥検知手法の実装

小宮 陸*1・林 充輝*2・池田 富士雄*3・村上 祐貴*4

要旨：本研究では、著者らが開発した道路橋遊間部内における浮きや剥離といった内部欠陥の検知を目的とした打撃試験装置の実構造物への適用性評価を行った。適用性評価に際し、打撃試験で得られた実構造物の周波数応答関数（伝達関数）と内部欠陥情報が既知である試験体の周波数応答関数を入力データとして自己組織化マップで複数回解析を行うことで実構造物の欠陥領域を評価する手法を提案した。新潟県内の道路橋2橋を対象として打撃試験を実施し、遊間幅が50mm～55mm程度の実橋梁遊間部において打撃試験が実施可能であることを確認した。

キーワード：遊間部, 打撃試験装置, 自己組織化マップ, 弾性波, 打音点検

1. はじめに

積雪寒冷地域では、路面凍結を防ぐ目的で、凍結防止剤が冬季に散布される。道路橋遊間部に焦点を当てると、止水材が脱落、損傷することにより凍結防止剤を含む路面水が流れ込み、上部構造の桁端部や、橋台、橋脚に鉄筋腐食が生じる場合のあることが問題となっている¹⁾。遊間部は幅が20～100mm程度と非常に狭小であり、目視点検や従来の打音点検の実施は困難である。現状では、CCDカメラの挿入による外観変状調査が行われているが、外観変状から第三者被害に繋がる浮きや剥離部を特定することは難しい。

このような背景のもと、著者らは、狭小な道路橋遊間部で打撃試験を可能とする打撃試験装置の開発と欠陥領域評価手法の検討を行ってきた。既往の研究では、人工欠陥を埋設した試験体で模擬した遊間部において欠陥領域評価を実施し、遊間部内では打撃音が反響し、打撃音による欠陥領域評価が困難であることを明らかにした²⁾。遊間部内の打撃音の反響対策として、打撃時の表面振動を計測する探触子を開発した³⁾。この探触子を利用することで、マイクロフォンの場合は埋設深さ30mm、直径300mmの欠陥領域までの検知にとどまったが、探触子を用いた場合は埋設深さ50mm、直径200mmの欠陥領域まで検知することが可能であった。

これらの結果は内部空洞を埋設した試験体で得られた結果であった。そこで本研究では、塩害環境下に置かれた実橋梁遊間部を対象として、本装置を用いた打撃試験に基づく橋梁内部欠陥（浮きや剥離）の評価手法について検討した。

2. 打撃装置の概要

図-1に打撃試験装置の構成を示す。打撃試験装置は、先端にローラーを有する可動式アームを外枠フレームに取り付けた移動・突っ張り機構および動力源であるソレノイドとハンマー部から成る打撃機構ユニットの2つで構成されている。突っ張り機構においては、装置の前後に取り付けたアームと、その支持部に取り付けたねじりバネにより遊間部における打撃時の安定性を確保した。打撃機構ユニットは、通電することによりソレノイ

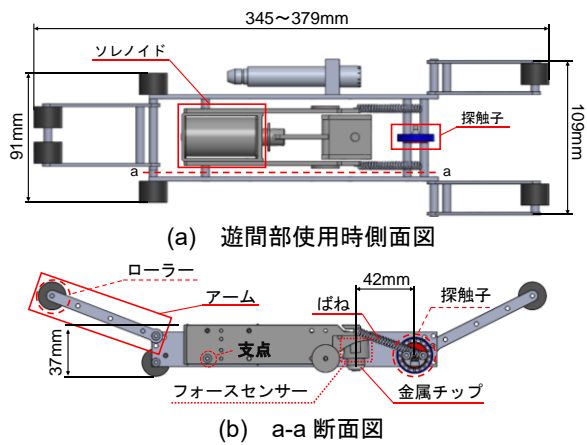


図-1 打撃試験装置の構成

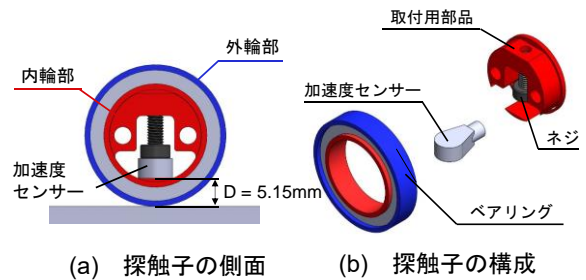


図-2 回転式探触子の概要

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)
 *2 長岡工業高等専門学校 電子機械システム工学専攻
 *3 長岡工業高等専門学校 機械工学科教授 博(工)
 *4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

ドに発生する吸引力を、リンクによってハンマー部に伝達し、ハンマー部を振り下ろすことで打撃を行う機構となっている。ハンマー部は、フォースセンサー（最大使用荷重：2224N）と金属チップ（打撃面の直径：5mm）で構成されている。

上述したように道路橋遊間幅は20mm～100mm程度であり、試験者が立ち入り、加速度センサーを設置することは難しいことから、図-2に示すような回転体中心部に加速度センサーを取り付けた探触子を開発した。この探触子は、図-2(b)に示すようにベアリング、取付用部品および加速度センサー（測定周波数範囲：0.3～20×10³Hz）で構成されている。本探触子の内輪部は2つのピンで打撃試験装置の外側フレームと一体化し、打撃試験装置の移動時に外輪部のみが回転することになる。これにより加速度センサーが打撃面および打撃位置と一定の距離を保ちながら、打撃試験を行うことができる。探触子は図-1に示す位置に取り付け、探触子と図-1(b)に示す前後のローラーの三点で壁面に接触することでベアリングが確実に打撃面に接触する。打撃試験装置および探触子の詳細は参考文献³⁾を参照されたい。

3. 実験概要

3.1 対象とした構造物

新潟県内にある道路橋2橋（以降、A橋、B橋と称す）の遊間部内を、本装置を用いて打撃試験を行った。A橋、B橋ともに、小遊間を構成する両側面に対して打撃試験を行った。A橋およびB橋の遊間幅はそれぞれ55mmおよび約50mm程度である。A橋については1回、B橋については再現性を確認するために測定日を変えて2回測定を行った。

3.2 打撃試験装置の移動

遊間部における打撃試験装置の移動には、可動式ワイヤーを用いた。図-3に示すように遊間部外側の上部工底面に金属系アンカーを用いて支柱を固定し、その支柱上にワイヤーを設置する。打撃試験装置はワイヤー設置部を回転駆動させることにより奥行き方向、上下移動させることにより上下方向の移動が可能となり、遊間部全面を打撃することができる。

3.3 打撃試験方法

打撃試験は上部工底面から100mm、250mmおよび400mmの高さに対して長手方向に250mm間隔で行った。計測における加速度センサーとフォースセンサのサンプリング周波数、周波数範囲、およびデータ数は、それぞれ25.6×10³Hz、0～10×10³Hz、2048とし、3回の打撃の平均値とした（パワースペクトル加算平均）。フォースセンサで取得した時刻歴入力波形と、加速度センサーで取得した時刻歴応答波形を高速フーリエ変換し、周波



(a) 遊間部外



(b) 遊間部内

図-3 ワイヤーシステム設置状況

数応答関数（伝達関数）を算出した。周波数応答関数の定義式は式(1)であるが、本研究では測定ノイズの影響を低減させるため式(2)より算出した。

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)} \quad (1)$$

$$= \frac{B(f)A(f)^*}{A(f)A(f)^*} = \frac{C_{AB}(f)}{P_{AA}(f)} \quad (2)$$

ここで、 $H(f)$ ：周波数応答関数、 $A(f)$ ：入力の周波数スペクトル、 $B(f)$ ：応答の周波数スペクトル、 $A(f)^*$ ：入力の周波数スペクトルの複素共役、 $C_{AB}(f)$ ：入力と応答のクロススペクトル、 $P_{AA}(f)$ ：入力のパワースペクトルである。

3.4 SOMを用いた欠陥領域評価手法

打撃時の卓越周波数や最大振幅は同一欠陥上で一様ではないため、欠陥領域を同定する閾値の設定が難しく、特定の物理量に着目した欠陥領域評価が困難である。著者らは多次元データを教師無しでクラスタリング可能な自己組織化マップ（Self-Organizing Maps, 以下 SOM）を用い、各打撃点における周波数応答関数（入力：インパルスハンマー、出力：加速度センサー）を入力データとして SOM でクラスタリングを行うことで、欠陥領域評価を試みた⁴⁾。その結果、コンクリート内部に埋設した欠陥領域を、深さは90mm、直径は200mmまで検知できることを報告している。一方、SOMは教師なし学習を行うニューラルネットワークの一種であり、各クラスタ

への欠陥情報（位置，深さ，大きさ）の関連付けは，解析者が別に行う必要がある。したがって，欠陥情報があらかじめ既知である試験体を対象とした解析では，各クラスタへの欠陥情報の関連付けは可能であるが，実構造物を対象とした場合には欠陥情報は未知であるため，各クラスタへの欠陥情報の関連付けは容易ではない。そこで，本研究では欠陥情報が未知の実構造物の打撃試験データと欠陥情報が既知の打撃試験データを同時にクラスタリングすることで各クラスタに欠陥情報を関連付ける。

本研究における解析フローを図-4に示す。まず，実構造物の打撃試験データと欠陥情報が既知の試験体の打撃試験データを同時に SOM でクラスタリングを行う（1回目の解析）。実構造物の打撃試験データが属するクラスタのケースとしては，試験体健全部と実構造物のデータが属するケース①，試験体健全部，試験体欠陥部および実構造物のデータが属するケース②，試験体欠陥部と実構造物のデータが属するケース③，実構造物のデータのみが属するケース④の4つのケースである。

本解析では，ケース①およびケース②は健全あるいは欠陥検知不能と判定し，ケース③については欠陥と判定する。ケース④についてはケース①～③とは異なり，クラスタ内に欠陥情報の紐づいた試験体データが存在しないため，欠陥判定はクラスタのプロファイルに着目して行う。ここでプロファイルとは，各次元の全クラスタの平均値に対する各クラスタの平均値の偏差である。本解析に用いた打撃点の多くは健全部であることから，全体の平均値は健全部に近づくと考えられ，偏差の小さいクラスタに分類された打撃点は健全部，偏差の大きいクラスタに分類された打撃点は欠陥部であると考えられる。そこで，クラスタ毎に各次元の偏差を二乗して総和（以下二乗和と称する）を算出し，ケース③において欠陥判定したクラスタ群の二乗和の最小値より大きいクラスタは欠陥，小さいクラスタは健全あるいは検知不能と判定する。

SOMによる解析では，入力データの中に特徴量の大きいデータ群が存在している場合，クラスタを細分化しても特徴量の大きいデータ群の中でクラスタが細分化され，特徴量の小さいデータ群のクラスタリングが上手くいかない場合がある。そこで本解析では，1回目の解析で欠陥判定された打撃データを除外し，上述の解析を行う（2回目の解析）。欠陥判定されたデータを取り除くことで，特徴量の大きいデータ群の中でクラスタが細分化されることを抑制する。さらに，2回目の解析で欠陥判定となったクラスタの打撃データを取り除き，3回目の解析を行う。

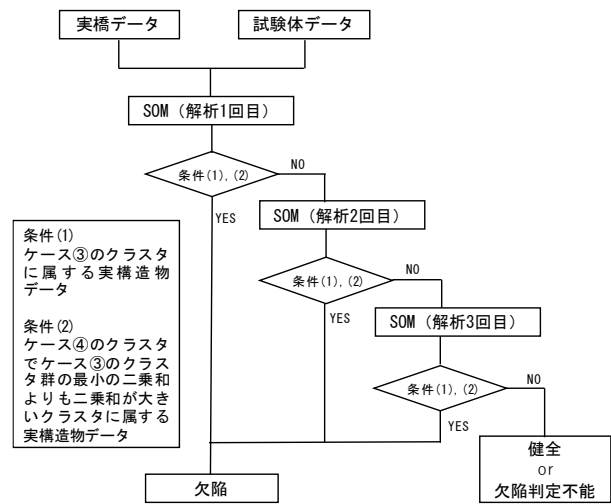


図-4 解析フロー

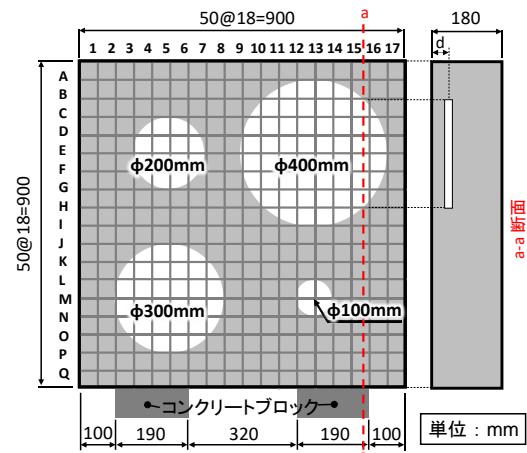


図-5 試験体概要

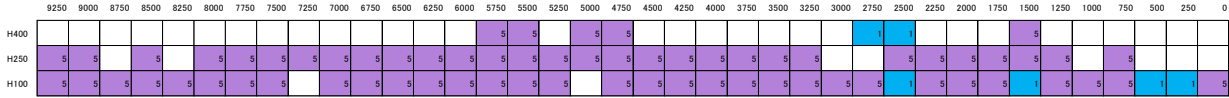
3.5 解析条件

本解析で用いる試験体の打撃試験データは図-5に示すように試験体内部に厚さ5mmのスチレンボードを成形した円盤状人工欠陥を埋設した試験体の打撃試験データとした。人工欠陥の埋設深さは，20mm，30mm，40mmおよび50mmとし，直径は100mm，200mm，300mmおよび400mmとした。打撃試験は，2つの試験体を鉛直支持し，遊間部を模擬して実施した（遊間幅は50mmおよび70mm）。図-5に示す50mm間隔のメッシュの交点を打撃した。ただし，最外縁の打撃点は打撃試験装置の構造上打撃できないため打撃は行っていない。また，欠陥を埋設していない健全試験体についても欠陥試験体と同様に遊間幅が50mmおよび70mmの打撃試験データを取得した。試験体の打撃試験についての詳細については参考文献³⁾を参照されたい。なお，サンプリング周波数等の測定条件は3.3節と同様である。

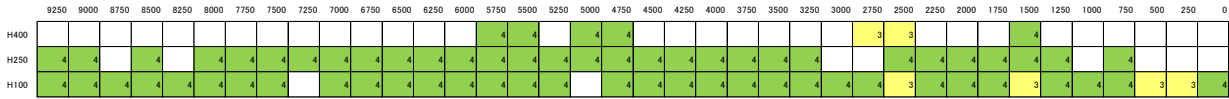
SOMに入力するデータには，野内らと同様，周波数応答面積を用いた。周波数応答面積の積分範囲は0～8000Hz，積分間隔は100Hzとし，1打撃点につき80次元の入力データを作成した。SOMによるクラスタリング



(a) 解析 1 回目

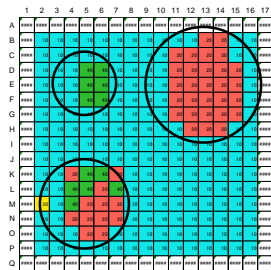


(b) 解析 2 回目

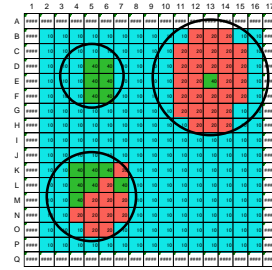


(c) 解析 3 回目

図-6 実構造物グレーディングマップ(上り線側)



(a) 幅:50mm—深:20mm
解析 1 回目



(b) 幅:70mm—深:20mm
解析 1 回目

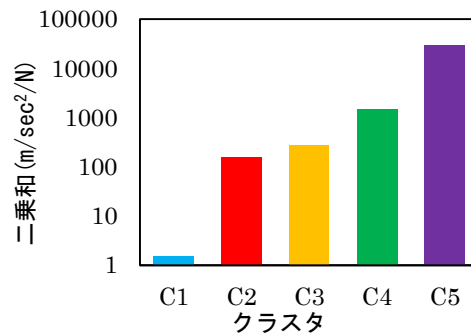
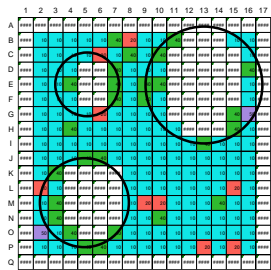
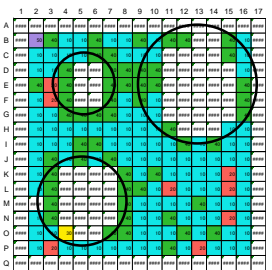


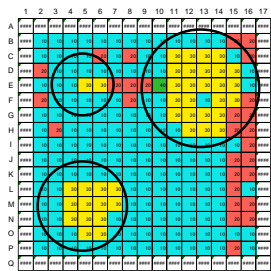
図-8 プロファイル二乗和



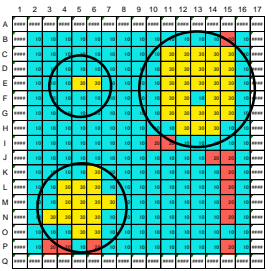
(c) 幅:50mm—深:20mm
解析 2 回目



(d) 幅:70mm—深:20mm
解析 2 回目



(e) 幅:50mm—深:30mm
解析 2 回目



(f) 幅:70mm—深:30mm
解析 2 回目

図-7 試験体グレーディングマップ(A橋上り線側)

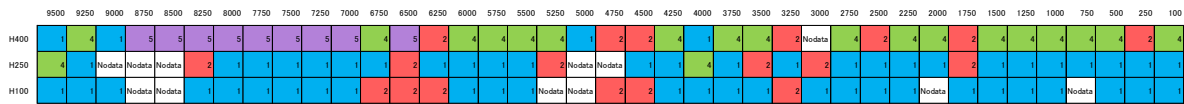
マップの作成には Viscovery SOMine 7.0 を使用し、野内らの研究を参考にノード数 2000、近傍半径 0.5、クラスタ数 5、クラスタ手法は凝集性のあるクラスタを算出する SOM-Ward に設定した⁴⁾。

4. 解析結果

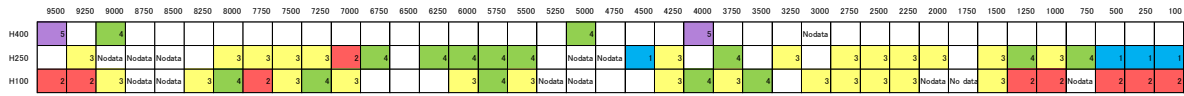
4.1 A 橋

図-6(a)に、SOMにより得られた上り線側のクラスタリング結果を試験体上の打撃位置に対応させたマップ(以下、グレーディングマップと称す)を示す。まず1回目の解析では図-7(a)、(b)に示すように、深さ 20mm の試験体の欠陥直径が 200mm~400mm の欠陥領域として分類されている。図-4 に示したフローに従い実構造物の欠陥判定を行う。図-7(a)、(b)に示すように、1回目の解析では、深さ 20mm の欠陥試験体の欠陥上に赤色、緑色および黄色のクラスタがあり、これらのクラスタにある打撃データは欠陥となる。図-6(a)に示した1回目の解析結果を反映した実構造物のグレーディングマップに着目すると、H400、9000mm の位置の打撃データが赤色のクラスタ、H400、8000mm および H400、4500mm の位置の打撃データが緑色のクラスタ、H400 の高さの多くの打撃データが黄色のクラスタに属する打撃点があり、条件(1)より欠陥判定となる。また、実構造物のみの打撃データが存在する紫色のクラスタは、図-8 に示す SOM によってクラスタリングされた各クラスタの二乗和から、試験体欠陥部が属するクラスタ (C2、C3、C4) よりも二乗和が大きいことから、条件(2)より欠陥と判定した。

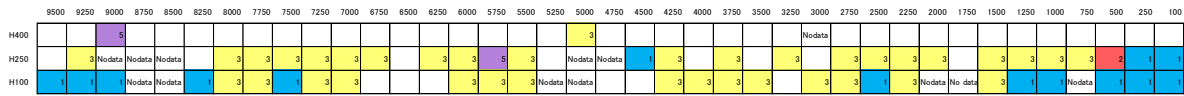
次に1回目の解析で欠陥判定された打撃データを取り



(a) 解析 1 回目

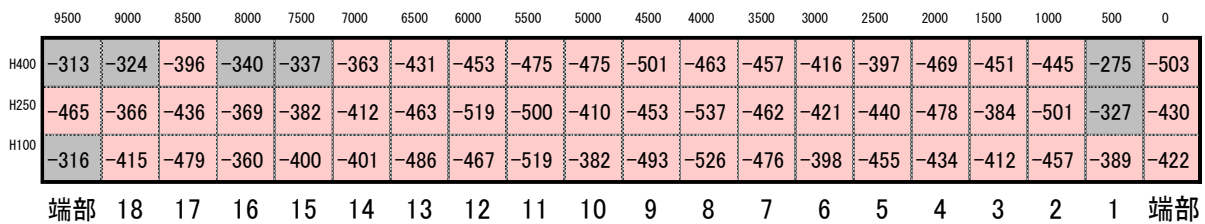


(b) 側解析 2 回目

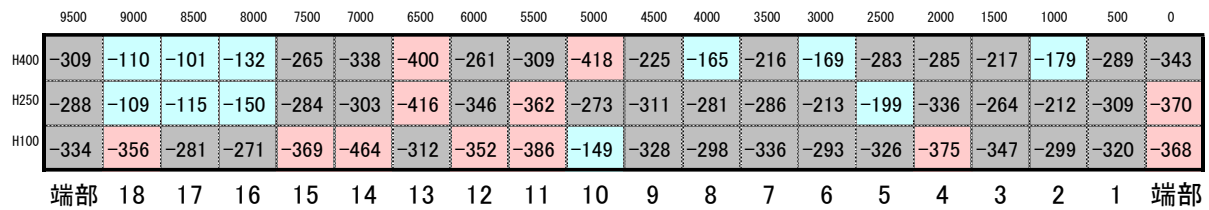


(c) 側解析 3 回目

図-9 グレーディングマップ(A 橋下り線側)



(a) 上り線側



(b) 下り線側

図-10 自然電位測定結果(A 橋)

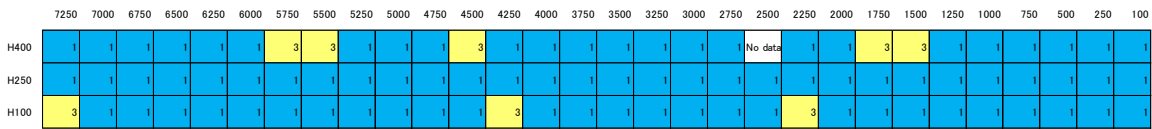
除き 2 回目の解析を行った。解析結果を図-6(b)に示す。なお、1 回目の解析と 2 回目の解析は独立しており、クラスタの色が同一であっても、全く別のクラスタであることに留意されたい。図-7(e), (f)より黄色のクラスタは条件(1)より欠陥と判定した。ただし、実構造物の打撃データには黄色のクラスタに属するデータは無かった。

黄色のクラスタを入力データから除外し 3 回目の解析を行った。3 回目では全てのクラスタが健全と判定されたため、最終的な欠陥領域は空白の箇所となる。

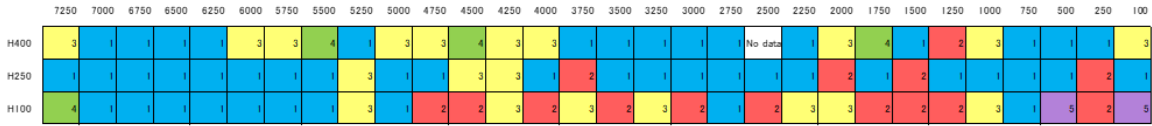
図-9 に下り線側の解析結果を示す。図中に示す「No data」は遊間部内に大きな不陸があり、計測ができなかった箇所である。図-4 に示したフローに従い欠陥判定を行った結果、1 回目の解析では青、紫色以外のクラスタが試験体欠陥上であったため、これらのクラスタに属するデータを条件(1)より欠陥判定とした。また、実構造物にある紫色のクラスタの二乗和は、試験体欠陥部のクラスタよりも大きかったことから条件(2)より欠陥と判定した。解析 2 回目では紫色のクラスタが欠陥と判定された。3 回目では緑色のクラスタが欠陥判定されたが、実

構造物には緑色のクラスタに属する打撃データはなかった。したがって最終的な欠陥領域は空白の箇所となる。

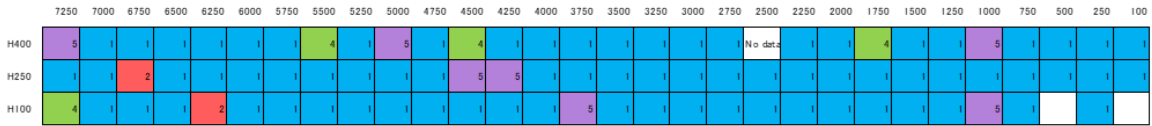
図-10 に自然電位の測定結果を示す。自然電位は遊間部内の打撃試験装置の移動に用いたワイヤシステムを利用して行った。まず、図-10(a)に示した上り線側では、遊間部全域にわたり、90%以上の確率で腐食あり ($E \leq -350\text{mV}$) となった。図-10(b)に示した下り線側では、一部の領域で90%以上の確率で腐食ありとなっているが、不確定 ($-350\text{mV} < E \leq -200\text{mV}$)、90%以上の確立で腐食無し ($-200\text{mV} < E$) となっている領域が多い。自然電位の結果のみで判断すれば、腐食劣化は、上り線側の方が進行していると判断される。しかしながら、上述した打撃試験の結果では、上り線側は 111 打撃データ中 41 打撃が欠陥と判定され、下り線側は 101 打撃データ中 50 打撃が欠陥と判定されており、下り線側の方が浮き・剥離部領域が大きい判定となった。これは、自然電位は鉄筋とコンクリート間の電位差から腐食のしやすい環境かどうかを判断する試験であり、腐食ひび割れや浮き・剥離を生じた加速期後期のような状態では電位差を正



(a) 解析 1 回目



(b) 解析 2 回目

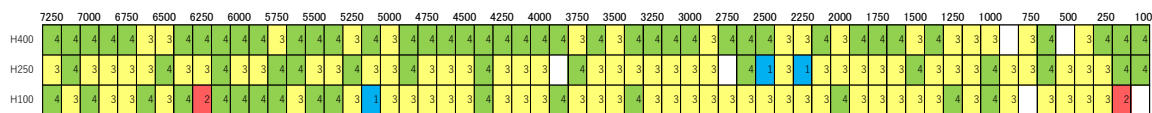


(c) 解析 3 回目

図-11 B 橋グレーディングマップ(富山側)



(a) 解析 1 回目



(b) 解析 2 回目

図-12 B 橋グレーディングマップ(富山側測定間隔変更)

確に計測出来ないためであり、電位差から腐食の判断は難しい。一方、打撃試験は浮きや剥離を生じた領域の判定には適しており、自然電位測定と打撃試験を併用することで遊間部の腐食劣化診断をより適切に行えると考えられる。

4.2 B 橋

B 橋のグレーディングマップを図-11 に示す。なお、B 橋下面部は既に補修を行っている。欠陥判定された箇所は空白の箇所であり、橋梁劣化はほとんど進んでいないと判断される。また、再現性を確認するため、別日に測定間隔を 250mm から 125mm の半分にして再試験を行った。解析結果を図-12 に示す。解析 2 回目ですべてのクラスが健全に判定されたため 3 回目は行っていない。橋梁が全体的に健全判定となっているとともに、H100～500mm に欠陥判定が確認され、再現性が確認できる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 遊間幅が 50mm～55mm 程度の実橋梁遊間部において本装置を用いた打撃試験が実施可能であることが確認された。
- (2) 欠陥情報が既知である試験体と実構造物の打撃試

験データを入力データとして SOM で複数回解析することにより、実橋梁遊間部における内部欠陥位置を判定した。解析結果の妥当性については今後、補修工事実施の際に確認する予定である。

謝辞

本研究を実施するに際し、株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟に協力頂いた。ここに記して謝辞を表す。

参考文献

- 1) 石川裕一：凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究，博士論文，2013
- 2) 志田爲御，高橋知也，池田富士雄，村上祐貴：打音点検装置を用いた道路橋遊間部の打音点検法，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，pp.1891-1896，2018.7
- 3) 志田爲御，高橋知也，池田富士雄，村上祐貴：小型打撃試験装置を用いた道路橋遊間部の欠陥領域評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，pp.1859-1864，2019
- 4) 野内彩可，村上祐貴，井山徹郎，外山茂浩：周波数応答関数を入力値として自己組織化マップに適用したコンクリート内部の欠陥領域評価，コンクリート工学年次論文集，29 巻，pp.87-100，2018