

## 横断歩道橋の FEM モデルを用いた損傷同定手法の検討

Study on damage identification method used FE model of pedestrian bridge

|                  |       |                          |
|------------------|-------|--------------------------|
| 北見工業大学 大学院工学研究科  | 学生会員  | ○白川 雄太(Yuta Shirakawa)   |
| (株)オリエンタルコンサルタンツ | 正 会 員 | 門田 峰典(Takanori Kadota)   |
| 北見工業大学 工学部       | 正 会 員 | 宮森 保紀(Yasunori Miyamori) |
| 北海学園大学 工学部       | 正 会 員 | 小幡 卓司(Takashi Obata)     |
| 北見工業大学 工学部       | 正 会 員 | 齊藤 剛彦(Takehiko Saito)    |

## 1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化が進み、市民生活の安全性や利便性を損なう事例が発生するようになってきた<sup>1)</sup>。

我が国の社会インフラの多くは高度経済成長期以降に整備され、橋長 2m 以上の道路橋に着目すると、建設後 50 年以上経過するものの比率は、2013 年の約 18%から 2033 年には約 67 年に増加することが判明している<sup>2)</sup>。この数値は建設年度が不明な約 30 万橋は含まれておらず、実際はこれより多くの橋梁の老朽化が進行している。

横断歩道橋は、都市内の交通量増加に伴う交通安全施設として全国各地に整備され歩行者の安全確保に効果をもたらしてきたが、利用者の減少、老朽化、周辺環境の変化により取り扱いを見直す自治体が増加している<sup>3)</sup>。その一方で、都市のターミナル駅等に歩行者の通路を確保するため、多様な形式の横断歩道橋も設置されている。

横断歩道橋の維持管理は、道路橋同様 5 年に 1 度の近接目視点検が義務付けられているが、人員不足やコスト面、また、様々な性能を満たすため近年の構造物は構造が複雑化していることから経済的・効率的な維持管理手法の構築が求められている<sup>4)</sup>。

これらの複雑な形式の横断歩道橋では応答も複雑になるため、設計段階で動的な挙動を予測する必要がある<sup>5)</sup>。加えて、横断歩道橋は活荷重が小さくフレキシブルであり、動的な外力により振動しやすい特性を有しているため、動的設計の検討が必要である。また、最近では維持管理を効率化する観点から、センサにより得られた振動特性により損傷同定を行う可能性が検討されている。このような背景に対して、近年の構造解析ソフトウェアの充実により、構造物を精確に再現する 3 次元モデルが利用可能になりつつある。

本研究は、まず、横断歩道橋の実橋振動実験を実施し、固有振動特性を算出した<sup>6)</sup>。また、実測値を精確に再現するための 3 次元 FEM モデルを構築した<sup>7)</sup>。具体的には、現地踏査や撤去後の実測結果を踏まえた高精細な横断歩道橋の 3 次元 FEM モデルを構築した。また、損傷同定手法については、構造全体形の振動モードからは損傷による変化が明瞭ではないことから<sup>7)</sup>、デッキプレート振動モードの変化に着目し、モード変化を定量的に評価できる COMAC<sup>8)</sup>を用い検討した。具体的にはデッキプレート上面に腐食が生じたことを板厚の減肉で模擬し、減肉程度および部位の影響が振動特性に与える影響を把握した。本報は、振動特性を用いた損傷同定手法の構築に向けて基礎的な検討を行った結果を報告するものである。

## 2. 横断歩道橋のモデル化と固有振動解析

## 2.1. 対象橋梁

本研究の対象橋梁は、図-1 に示す札幌市内に 1968 年に架設された横断歩道橋である。支間長 20.75m、幅員 1.5m で主構造は鋼 2 主桁で鋼床版を有する。階段は交差する道路と平行に設置され、鋼管製の橋脚が主桁端部と階段踊り場に設置されている。なお、本橋は 2017 年 8 月に撤去された。

## 2.2. 横断歩道橋のモデル化

横断歩道橋のモデル化は、有限要素解析プログラムである midas NFX<sup>9)</sup>を用いた。

モデルに使用する要素は、鋼主桁や鋼床版などの薄肉部材に対しシェル要素、モルタルやアスファルトの面状に重なる要素に対しソリッド要素、横構や鋼製高欄に対し梁要素でモデル化した。また、支持条件は直接基礎であることから、鉛直方向、水平方向ともに橋脚下端を完全固定としている。

高欄のモデル化に際し、上部の笠木には現場継手部が存在し構造的に連続していない。しかしながら、本橋における継手位置に関する記録がないことに加え、継手位置は横断歩道橋により様々である。このため、予備的な解析を行い、継手位置を支間中央から 5900mm の位置とし要素を部分的に消去した。また、実橋では橋脚下部に根巻コンクリートが施工されているが、現地の状況等から判断するに橋脚と根巻コンクリートの境界に腐食による隙間が存在することや、予備的な解析からコンクリートの有無は固有振動特性に影響が無いことが判明したため、モデル化を省略している。

横断歩道橋の断面図を図-2 に示し、断面構成は撤去後に行った実測結果を用いている。対象橋梁のデッキプレートは厚さは 4.5mm であるが腐食が生じていたため、一律 0.3mm 減肉させ 4.2mm、その上にモルタルが 50mm、アスファルトが 25mm 敷設されているモデルとした。

横断歩道橋の部材には腐食が生じていたため、板厚計測を実施し、把握した減肉量をモデルの板厚に反映させている。具体的には、階段蹴上げ部に対し一律 0.6mm 減肉、地覆プレートに対し 0.5mm 減肉、橋脚の地表から 0.9~2.2m の車道に面する範囲に対し 3.0mm 減肉、地表から 0.2~2.2m の範囲に対し 0.5mm 減肉、R 橋脚の地表から 1.0m の車道に面する範囲に対し 0.5mm 減肉させた。以上の条件から構築した横断歩道橋の FEM モデルの全景を図-3 に示す。

### 2.3. 固有振動解析結果と考察

FEM モデルの妥当性を検証するため実測値と解析値の比較を行い、その結果である固有振動数を表-1 に示す。また、表中の( )内は実測値に対する解析値の比を示し、固有振動数の有効数字は実測値に合わせ小数第1位までとしている。

加振方向に一致する曲げモードでは、曲げ3次モードで3%の誤差があるものの、曲げ1次モード、曲げ2次モードでは誤差がない。また、橋軸水平モードは3%、橋軸直角モードは1%の誤差があるが、誤差の範囲は微小であり、精確に再現できている。その一方、ねじれモードでは、ねじれ1次モードは2%と誤差は小さいが、ねじれ2次モードでは16%と誤差が大きく整合性が低い。剛性等の差が原因として考えられる。

以上から、ねじれ2次モードに比較的大きな誤差が生じているものの、全体的な実測値との比較結果を踏まえると、概ね整合しているモデルであると考えられる。

## 3. 損傷に伴う振動特性の変化による損傷同定の検討

### 3.1. デッキプレートの損傷

デッキプレート形式を有する横断歩道橋は、橋面からの雨水の浸透によりデッキプレート上面に滞水し、目視が不可能な箇所にて腐食が進行する維持管理上の課題を有している。これに加え、デッキプレート継目からの漏水による下面の腐食も生じる傾向がある。デッキプレートは許容応力に対して余裕がある設計となっており、健全時は設計荷重に対し十分な耐力を有しているが<sup>10)</sup>、実際はデッキプレートが完全欠損することもあり、正確な減肉量を把握すべき部位である。しかし、実点検業務では超音波による板厚計測は実施されておらず、板厚計測が不可能な部位は、表面の損傷状況から健全度を判断している。また、跨線橋の場合デッキプレート下面に近接できず、遠望目視となっている。

このため本検討では、デッキプレートの健全度を合理的に判断する手法を開発するため、減肉時の振動特性の変化に着目した損傷同定手法の検討を行った。具体的には、デッキプレート上面に腐食が発生したと仮定し、部材厚を減少させた場合の振動特性の変化を把握した。

### 3.2. 減肉条件

デッキプレート減肉の検討ケースは、パネルが一律で減肉する部分減肉条件、部分減肉条件の中でも局部的に減肉する局部減肉条件の2ケースとした。ここでのパネルとは、図-4 に示すように横桁間のデッキプレートを指し、図中の①～⑩の数字はパネル番号かつ、床版下面にセンサを設置することを想定した際の計測点番号である。

部分減肉条件では、支間中央付近のパネル④、支点付近のパネル⑨に対し減肉を行い、減肉量は表-2 に示すように、デッキプレート板厚の10%、20%、30%、40%、50%、60%減肉の計6パターン、対象モードは各パネルのモード振幅が最大となるデッキプレートのモードとした。局部減肉条件では、図-5 に示すようにパネルの中央付近のみ減肉させ、対象パネル、対象モードは部分減肉条件と同一である。



図-1 対象橋梁

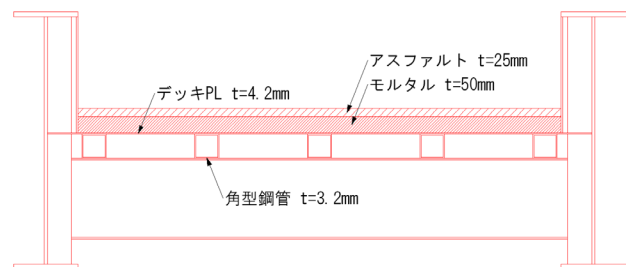


図-2 横断歩道橋断面図

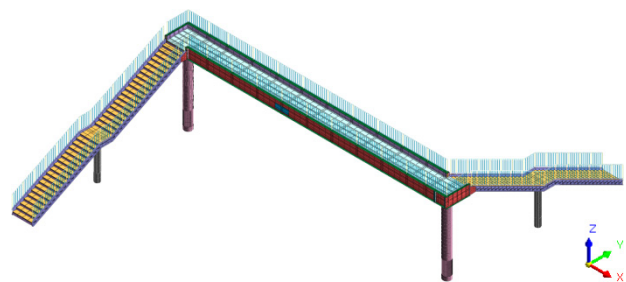


図-3 FEM モデル全景

表-1 固有振動解析結果

|   | Mode     | 実測値(Hz) | 解析値(Hz)     |
|---|----------|---------|-------------|
| 1 | 橋軸水平モード  | 3.2     | 3.3 (1.03)  |
| 2 | 曲げ1次モード  | 4.1     | 4.1 (1.00)  |
| 3 | ねじれ1次モード | 6.4     | 6.3 (0.98)  |
| 4 | 橋軸直角モード  | 8.2     | 8.3 (1.01)  |
| 5 | 曲げ2次モード  | 13.5    | 13.5 (1.00) |
| 6 | ねじれ2次モード | 15.9    | 18.4 (1.16) |
| 7 | 曲げ3次モード  | 26.6    | 27.5 (1.03) |

損傷同定手法の検討にはモード形状の変化を計測点毎に評価できる Coordinate Modal Assurance Criterion : COMAC<sup>8)</sup>を用いた。COMAC は計測点に対するモード形状の相関性を把握するための指標であり、式(1)で算出できる。相関性は0～1の値で示され、1に近ければ相関性が強いことを表す。 $j$  は計測点、 $N$  は対象モード数、 $\{\phi_o\}_i$  は健全時の  $i$  次モードベクトル、 $\{\phi_D\}_i$  は損傷時の  $i$  次モ

ードベクトルである。

$$\text{COMAC}(j) = \frac{\sum_{i=1}^N |\{\varphi_o\}_i^j \{\varphi_D\}_i^j|^2}{\sum_{i=1}^N [\{\varphi_o\}_i^j]^2 \sum_{i=1}^N [\{\varphi_D\}_i^j]^2} \quad (1)$$

### 3.3. 検討結果と考察

損傷同定手法の検討結果として図-6a), b)に部分減肉条件のCOMACを, 図-7 a), b)に局部減肉条件のCOMACを示す。また, 本検討における対象モード( $i$ )は, デッキプレートが振動する 92.5Hz~98.5Hz の 15 モード( $N=15$ )とした。計測点( $j$ )は 1~10 のパネル番号である。

#### (1) 部分減肉条件

図-6a)にパネル④の結果を示す。減肉量 60%ではCOMACが 0.9 以下となるが, 減肉量 10%~50%ではCOMACが 0.9 以上となり, 相関性の低い結果となった。しかし, 全ての減肉パターンでパネル④のCOMACが最小であり, 減肉パネルとCOMACが最小を示す計測点は一致している。なお, 減肉量が増大するにしたがってパネル④と対称のパネル⑦でもCOMACが低下しているが, その理由については今後さらに検討が必要である。

図-6b)にパネル⑨の結果を示す。全ての減肉パターンでCOMACが 0.9 以上となり, 相関性の低い結果となった。減肉量 10%~30%ではパネル⑨のCOMACが最小を示しているが, 減肉量 40%~60%では隣接するパネル⑩でCOMACが最小を示す結果となり, 減肉パネルとCOMACが最小を示す計測点は一致していない。原因として, 支点付近であり橋脚や階段の影響を受け挙動が複雑になっているためと考えられる。

以上から, 支間中央付近では減肉パネルとCOMACが最小を示す計測点の整合性があり, 減肉量が多いほどCOMACが低下している。しかし, 支点付近では橋脚や階段の影響を受けると考えられるため, 減肉パネルとCOMACが最小を示す計測点の整合性が低い。

#### (2) 局部減肉条件

図-7a)にパネル④の結果を示す。COMACの低下量そのものは部分減肉条件よりかなり小さいが, 減肉したパネル④を中心にCOMACが低下している。減肉量 50%, 60%では減肉パネルとCOMACが最も低下する計測点が一致しており, 減肉量が多い場合は断面二次モーメントが小さいデッキプレートの水平面であっても正確に同定できている。しかし, 減肉量 10%~40%では, 減肉を施したパネル④ではなく, 隣接するパネル⑤でCOMACが最小を示している。原因として, 減肉程度が微小な場合, 減肉が生じているパネルと隣接するパネルにまで剛性低下の影響が相対的に広がる傾向にあり, 対象とする振動範囲でパネル⑤のモード振幅の変化が大きかったことから, 減肉程度が小さい場合にパネル④よりパネル⑤のCOMACが低下したと考えられる。

図-7b)にパネル⑨の結果を示す。減肉量 10%~40%では隣接するパネル⑩でCOMACが最小を示す結果に, 減肉量 50%, 60%ではパネル⑦でCOMACが最小を示す結果となり, 減肉量に関係なく減肉パネルとCOMACが最小を示す計測点は一致していない。

以上から, 支間中央付近のパネルで減肉量が多い場

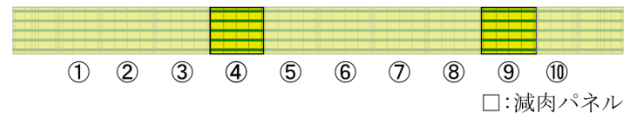


図-4 部分減肉位置

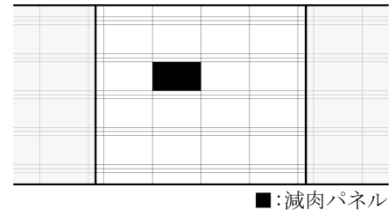
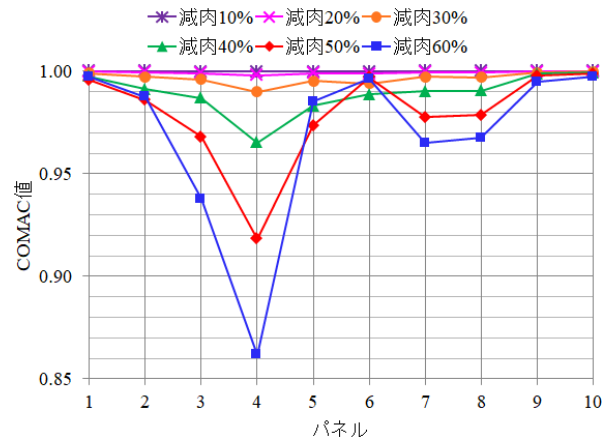


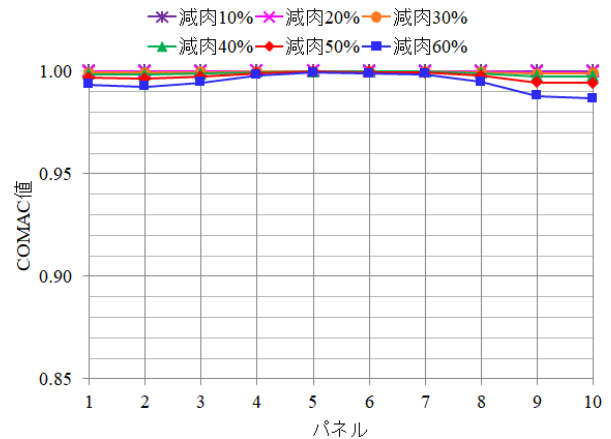
図-5 局部減肉位置

表-2 減肉パターン

|       | デッキプレート厚(mm) |
|-------|--------------|
| 健全    | 4.2          |
| 10%減肉 | 4.05         |
| 20%減肉 | 3.6          |
| 30%減肉 | 3.15         |
| 40%減肉 | 2.7          |
| 50%減肉 | 2.25         |
| 60%減肉 | 1.8          |



a) パネル④



b) パネル⑨

図-6 COMAC 値(部分減肉条件)

合、減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は一致しているが、支点付近では減肉量に関わらず減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は一致していない。したがって、減肉が局部的に生じる場合は COMAC の低下量が極めて小さく損傷同定は困難と考えられるが、実損傷として局所的に一部分のみが減肉することは考えにくく、実際はある程度の範囲に減肉が生じるため、支間中央点では検討結果より同定精度が向上すると推測できる。

これら 2 ケースの減肉条件の結果から、減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は完全に一致しておらず、減肉程度によっても異なる損傷位置が示される結果となった。COMAC の算出に用いたデッキプレートのモードは、各パネルの最大振幅を得るモードを選定しているが、デッキプレートのモード以外のモードも含んでいると推測できる。COMAC を用いた損傷同定の精度を向上させるには、算出時に用いるモードを精査する必要がある。

#### 4. おわりに

本研究は振動特性を用いた損傷同定手法の構築に向けて、横断歩道橋の 3 次元 FEM モデルを構築、デッキプレートに着目し、減肉程度および減肉部位が振動特性に与える影響について検証した。

構築した横断歩道橋の FEM モデルは、ねじれ 2 次モードの誤差が大きいほかのモードでは誤差が少なかったことから、概ね整合しているモデルであると考えられる。

デッキプレートの減肉程度および部位が振動特性に与える影響の把握では、部分減肉条件の支間中央付近においては、減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は一致しており、減肉量が多いほど COMAC が低下している。しかし、支点付近においては、減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は完全に一致しておらず、橋脚や階段の影響を受け挙動が複雑になっているためと考えられる。局部減肉条件の支間中央付近においては、減肉量が多い場合減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は一致しているが、支点付近では減肉パネルと COMAC が最小を示す計測点は一致していない。このため、COMAC 算出時に用いるモードを精査する必要がある。

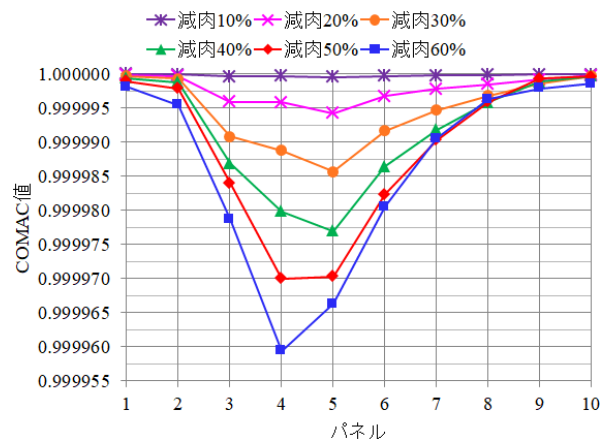
今後は、COMAC 算出時に用いる対象モードの選定方法を検討したうえで、振動特性による損傷同定手法の構築を行う必要がある。

#### 謝辞

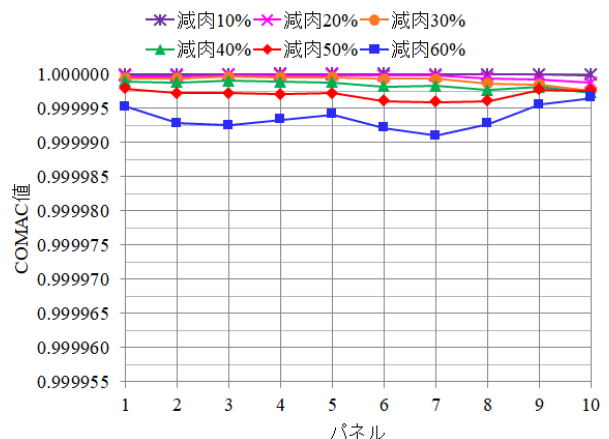
本研究の一部は、科学研究費 基盤研究(C)15K06176 によって実施されました。また、実験に際しては札幌市、株式会社エーティックならびに研究室の諸氏に協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日経コンストラクション (編)：インフラ事故，日経 BP 社，2013.
- 2) 国土交通省：国土交通白書，2016.
- 3) 札幌市：札幌市横断歩道橋の撤去に関する考え方，[www.city.sapporo.jp/kensetsu/dokan/hodokyo/hodokyo.html](http://www.city.sapporo.jp/kensetsu/dokan/hodokyo/hodokyo.html)，2016.



a) パネル④



b) パネル⑨

図-7 COMAC 値(局部減肉条件)

- 4) 国土技術研究センター：JICE REPORT，第25号，pp.18-23, 2014.
- 5) 土木学会 構造工学委員会(編)：構造工学シリーズ 橋梁振動モニタリングのガイドライン，丸善(株)，2000.
- 6) 宮森保紀，白川雄太，張友奇，門田峰典，齊藤剛彦，小幡卓司：老朽化した横断歩道橋の固有振動特性と動的応答の経年比較，土木学会北海道支部平成28年度論文報告集，第73号，A-018，2017.
- 7) 門田峰典：既設標準設計横断歩道橋の損傷傾向に着目した構造ヘルスマニタリング手法に関する研究，北見工業大学博士論文，2017.
- 8) NAJ Lieven and DJ Ewins: Spatial Correlation of Mode Shapes, the Coordinate Modal Assurance Criteria (COMAC), 6th IMAC, February 1988.
- 9) MIDAS Information Technology Co., Ltd. : midas NFX, Analysis Manual, 2014.
- 10) 社団法人全日本建設技術協会：建設省制定土木構造物標準設計第 5 巻 (横断歩道橋・地下横断歩道) の手引き，1984.