

横断歩道橋のデッキプレート床版に生じる腐食損傷と 振動特性の関係に関する数値解析

An analytical study on the relationship between corrosion and vibration characteristics of the deck slab of the pedestrian overpass

北見工業大学 工学部	○学生会員	長谷川皓生 (Hiroki Hasegawa)
北見工業大学 工学部	正会員	門田峰典 (Takanori Kadota)
北見工業大学 工学部	正会員	齊藤剛彦 (Takehiko Saito)
北海道大学 大学院工学研究院	正会員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)

1. はじめに

我が国の社会インフラの多くは高度経済成長期に建設され、近年、老朽化の進行が顕著となっている。例えば横断歩道橋に着目すると、2022年現在、健全度がIIIおよびIVとなる割合は全体の23%である¹⁾。横断歩道橋の定期点検は、道路橋同様、5年に1度の近接目視点検が義務付けられる^{2),3)}。交通量が多い道路を交差することから、点検時には交通規制を実施し、高所作業車による近接が基本となる。このため、横断歩道橋は、点検が難しく、コストがかかる構造物と言える。

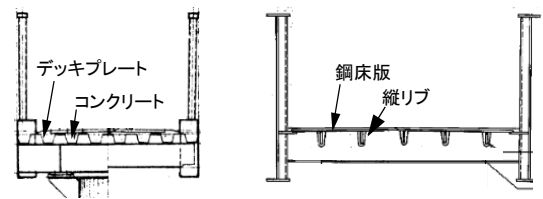
ここで、横断歩道橋に生じる損傷に着目すると、滞水による腐食が顕著に生じやすい傾向があり、特に、デッキプレート上面は、舗装の劣化に伴う雨水の浸透により、目視困難な部材で腐食が発生する。点検では、舗装の劣化状態と床版下面の変状の関係性から床版の健全度を判定しているが、時間的制約がある中で、効率的に健全度を把握する手法が求められる。そのような中、計測によって得られた物理量の変化から、部材の変状を検出しようとする構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring: SHM) の点検への適用について期待が高まっている。著者らは、これまで横断歩道橋への SHM の適用性に関する検討を行ってきた^{4),5)}。ただし、これらは主桁や鋼床版を対象としたものであり、維持管理上の課題を有するデッキプレート床版に着目した検討は実施できていない。

そこで本研究では、デッキプレート床版の基本的な振動特性を把握することを目的に、FEM モデルを用いた固有振動解析を実施し、腐食による減肉の範囲および程度が固有振動数およびモード形状に及ぼす影響を把握した。具体的には、健全状態、デッキプレートの上段および下段ごとに一律減肉量とする一律減肉、減肉を狭い範囲に限定した部分減肉の3ケースについて検討した。

2. 標準設計横断歩道橋に対する SHM の適用性

2.1 標準設計の概要

高度経済成長期において、インフラの整備に伴う自動車の普及により、交通事故が多発した。そこで、歩行者が安全に道路を横断できるよう、急速に横断歩道橋が整備された。その際、業務の簡素化や製作精度向上を目的



(a) 1967年標準設計⁶⁾ (b) 1984年標準設計⁷⁾
図-1 標準設計の床版形式 (断面図に加筆)

として、建設省が標準設計を制定した。基準の発刊を時系列に整理すると、1967年に立体横断施設設置要領 (案)・横断歩道橋設計指針解説⁶⁾、土木構造物標準設計⁷⁾、その後1984年に標準設計の手引き⁸⁾、1985年に標準設計⁹⁾が制定されている。

標準設計に示される床版形式は2種類存在し、図-1(a)のデッキプレート床版形式と、図-1(b)の鋼床版形式がある。デッキプレート床版形式は、波型のデッキプレート (3.2mm) とその凹部に打設されたコンクリートで構成される。一方、鋼床版形式は、6mmの板を縦リブで補強した形式となる。この鋼床版形式は1984年の標準設計から適用されており、デッキプレート床版に比べて架設数は少ないと推察される。

2.2 横断歩道橋の維持管理上の課題

横断歩道橋は部材の多くが鋼部材で構成されていること、地覆の立ち上がりや階段部などで凹凸が多く、滞水しやすい形状であることから、腐食損傷が発生する。腐食の進展経路として、2パターン挙げられる。1つ目は、舗装やモルタルのひび割れから雨水が浸透し、デッキプレート上面で腐食が発生して欠損に至るパターンである。これにより、欠損部から直下に位置する横桁や主桁下フランジも滞水し、腐食が進展する。2つ目は、腐食による地覆板の欠損を起点として地覆内部に漏水し、デッキプレート上面および主桁腹板が腐食するパターンである。これも同様に、欠損部から直下に位置する部材の腐食を誘発する。図-2および図-3には、実際の損傷状況を示す。

このような損傷に対して、実際の定期点検では、デッキプレート床版下面の損傷状況および橋面の変状から健全度を判断している。つまり、損傷の要因となるデッキプレート上面の腐食状況は、直接的に把握できない。デッキプレート床版形式は、鋼床版形式に比べて断面形状

が波型となることから、雨水が滞水しても排水されにくく、加えて、デッキプレート厚が3.2mmと薄い。腐食発生後は早期に欠損に至る特徴があり、過去には、桁下に腐食片が落下する事故が生じている。このことから、効率的にデッキプレート上面の健全度を把握する手法が求められる。

2.3 横断歩道橋へのSHMの適用性

SHMで対象とする物理量として、ひずみや加速度が挙げられる。ひずみは、疲労き裂といった局所的な損傷の把握に有効となるが、腐食や欠損などの多くの損傷は発生位置が明確ではないことから、多点計測によって広い範囲をカバーする必要がある。一方で、橋梁全体や部材単位に着目する場合には、加速度を計測することが効果的となる。加速度から得られる振動特性（固有振動数、固有モード形状、減衰定数）は、主に剛性と質量に影響を受ける。着目する横断歩道橋のデッキプレート厚は3.2mmと薄く、腐食による剛性低下率が大きいいため、加速度によるSHMが有効となる。

さらに、中長期的なSHMを実施する場合は、計測データに含まれるノイズや温度変化の影響を適切に除外する必要があり、そのためには、計測データの傾向を踏まえて検討することが重要となる。横断歩道橋は、完全受注生産である道路橋と異なり、上記の標準設計が存在し、構造のパターンが少ない。このため、蓄積したデータを有効に活用できる。このことから、横断歩道橋はSHMに適した構造物と言える。

3. 解析モデル

3.1 解析対象

解析の対象は、今後振動実験を予定している図-4に示す供試体とする。供試体は標準設計と同様の断面諸元とし、横桁3本分となる長さ4200mmの範囲を対象とした。床版支間は1700mm、桁高は600mmとなる。主桁と横桁で囲まれた床版範囲（以降、パネルと呼称する）に対して、一方は健全状態、一方は損傷状態とする。各列の名称は、図-4の図中に示すように、上段が数字、下段が英字で表している。

3.2 解析モデル

本研究では、有限要素法解析プログラムであるmidas NFXを用いてモデル化を実施し、Lanczos法による固有振動解析を行った。対象とする床版形式は、1967年の標準設計で整備された歩道橋が多いこと、波型で滞水しやすいことから、デッキプレート床版形式とした。

支持条件は、供試体の下フランジ四隅をボルトで固定することを想定し、図-5に着色した下フランジ幅方向の節点を全方向に対して完全固定とした。

モデルに使用する要素として、主桁やデッキプレートなどの薄肉部材に対してはシェル要素、コンクリートや舗装といった、面状に重なり厚みがある要素に対してはソリッド要素をそれぞれ適用した。

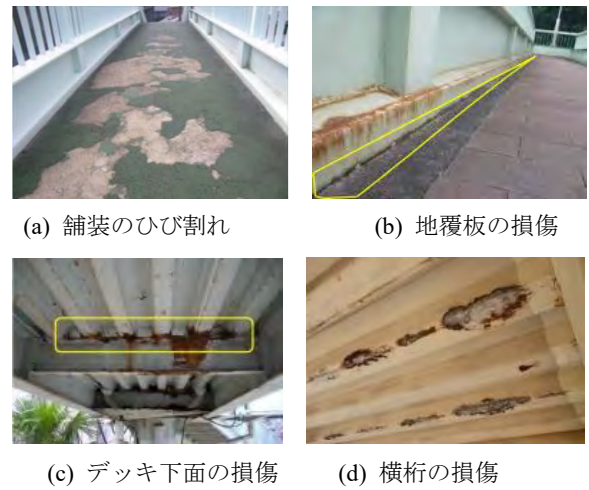


図-2 損傷状況³⁾

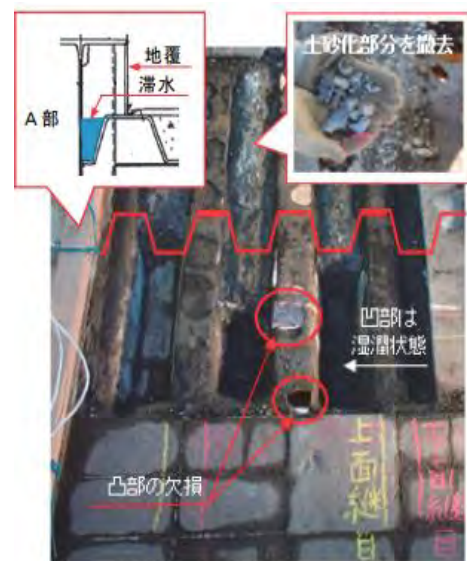


図-3 デッキプレート上面の損傷状況⁹⁾

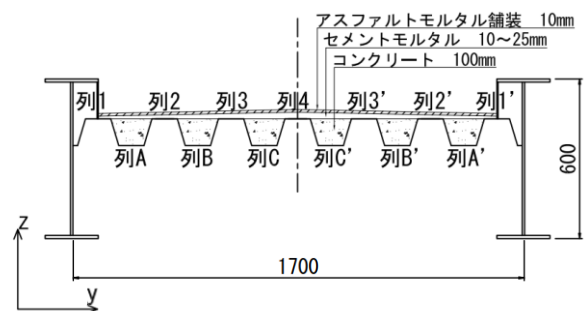


図-4 横断歩道橋供試体断面図

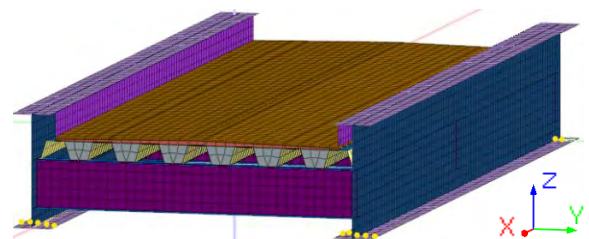


図-5 供試体 FEM モデル

3.3 物性値

表-1に、解析モデルに適用した物性値を示す。鋼材、コンクリートは道路橋示方書¹¹⁾に基づき設定した。モルタルは、明確な値がないことから、コンクリートと同じとし、アスファルトは、舗装設計便覧¹²⁾を参考に設定した。

表-1 FEMモデルに適用した物性値

	鋼	モルタル	舗装	コンクリート
ヤング率($\times 10^3\text{N/mm}^2$)	200	23.5	9	23.5
ポアソン比	0.3	0.2	0.35	0.2
質量密度(kN/m^3)	77.0	21.0	22.5	23.0

3.4 減肉条件

2 パネルの内、片方のパネルのデッキプレート厚を減少させ、減肉を模擬する。解析ケースとして、減肉していない健全状態、上段と下段ごとに一律な減肉量とする一律減肉、減肉範囲を狭い範囲に限定した部分減肉の3ケースを考えた。一律減肉では、デッキプレート厚を上段および下段の両方またはそれぞれを、健全時から20%、40%、60%減少させた組み合わせを設定した。また、一方の段のみが減肉していない場合も考えられるため、0%と20%の組み合わせも考慮した。なお、部分減肉の減肉条件は、4章の一律減肉の結果を踏まえ決定することにした。

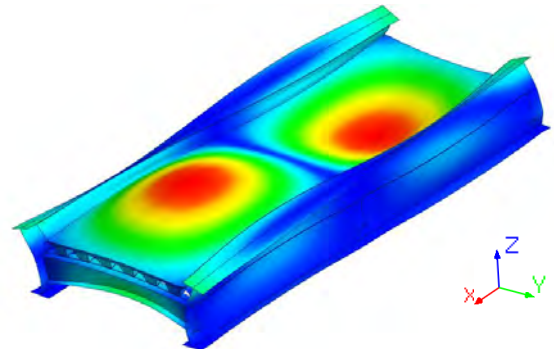


図-6 振動モード図

4. 解析結果

4.1 健全状態

両パネルが健全状態の床版1次モードは、固有振動数が69.868Hzとなった。モード形状は、図-6のように、主桁と横桁に囲まれた4辺固定版として振動することがわかる。

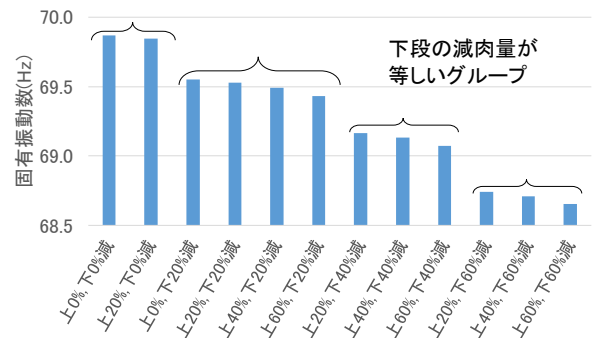


図-7 一律減肉時の固有振動数

4.2 一律減肉

図-7は一律減肉の場合の固有振動数の変化であり、横軸は、上段と下段の減肉量の組み合わせを表している。減肉量が増加すると固有振動数が低下することが確認できる。また、図中には、下段の減肉量が等しくなるケースをグルーピングしており、上段と下段の減肉量を比較すると、下段の減肉の方が固有振動数の低下が著しい傾向となる。

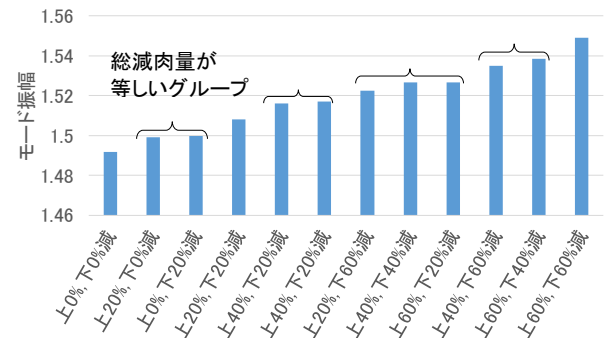


図-8 一律減肉時の損傷パネル中央のモード振幅

下段の減肉による固有振動数への影響が大きい理由を検討するため、断面中立軸の位置を算出した。主に振動している部材は床版であるため、主桁を除く床版と舗装のみの断面中立軸の位置を計算すると、デッキプレート床版の上段付近となった。断面中立軸から離れた下段が減肉することで、断面二次モーメントの減少が大きく、固有振動数へ与える影響が大きいことがわかる。

図-8は、損傷パネル中央となる節点におけるモード振幅を表している。図中には上段下段の総減肉量が等しくなるケースをグルーピングしており、総減肉量が多いほどモード振幅も大きくなる比例関係が確認できる。

以上から、部分減肉で考慮する条件は、固有振動数の変化の観点から下段を減肉させることが効果的だと考えた。また、床版は4辺固定版として振動することから、主桁による拘束の影響が大きい。つまり、主桁付近の列が減肉することで振動特性に影響を与えると考えた。

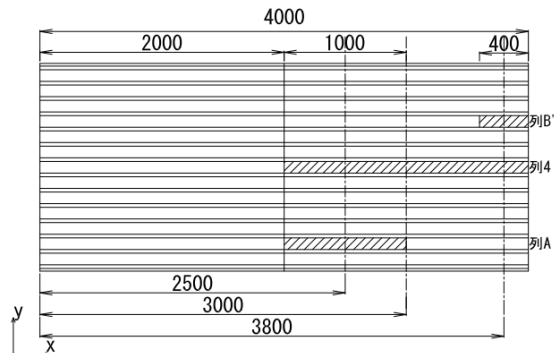


図-9 部分減肉の減肉範囲 (平面図)

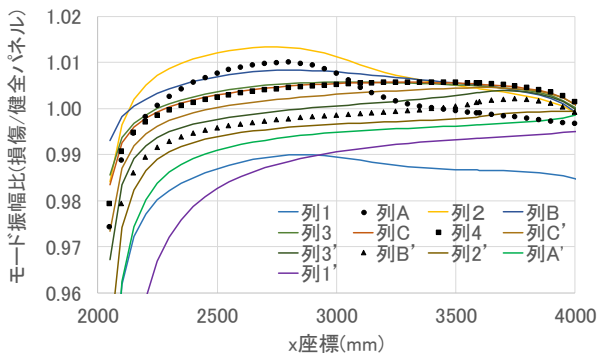


図-10 部分減肉のモード振幅比

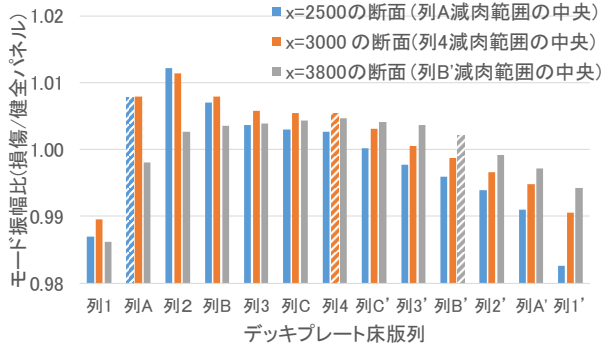


図-11 減肉範囲中央のモード振幅比

4.3 部分減肉

図-9の斜線位置が減肉範囲を表している。4.2 一律減肉で考察した通り、主桁付近となる列 A および列 B'の下段を減肉の対象とした。加えて、デッキプレート同士の継ぎ目には凹凸が生じ、滞水による腐食が発生しやすいことから、列 4 の上段も減肉の対象とした。減肉量は、列 A で 80% (2.6mm 減)、列 B' で 30% (1mm 減)、列 4 で 60% (2mm 減) とした。この減肉量は、実際の切削作業を考慮し、管理しやすい切削厚としたものである。なお、80%においては、欠損手前の状態を想定した。以降の検討では、上段および下段の中央の全節点を対象としてモード振幅比を算出する。

図-10 は部分減肉を行った場合のモード振幅比である。列 A と列 B'に着目すると、それぞれの減肉範囲である $x=2300\sim 3000$ と、 $x=3600\sim 3800$ でモード振幅比の著しい変化がみられる。しかし、列 4 のモード振幅比は、列のすべてを減肉したため、モード振幅比が他の列と同様に際立った変化が見られなかった。

図-11 は、図-10 から減肉範囲中央の x 座標の断面において、各列のモード振幅比を整理したものである。斜線は減肉範囲中央となる節点のモード振幅比を表している。減肉が生じる列 A、列 4、列 B'中のそれぞれの凡例を比較すると、減肉範囲中央の振幅比が大きくなる。 $x=2500$ の断面で比較すると、減肉が生じる列 A の振幅比は、列 2 を除いた全列の中で最も大きい。列 2 については、列 A に隣接するため、減肉の影響が大きく生じた結果と推測される。また、 $x=3000$ の断面で比較すると、全体的に列 2 を頂点とした右肩下がり傾向がある中、列 C および列 4 の振幅比が大きくなっている。これは列

4 に生じる減肉の影響であり、隣接する列 C も減肉の影響を受けていると考える。一方、 $x=3800$ の断面では、減肉による影響が明瞭ではなく、列 B'の減肉範囲および減肉量が小さいことが要因と考える。

以上結果を踏まえると、複数の列に対して減肉を与えた場合でも、減肉範囲となる節点の振幅比に着目することで、減肉の影響をより明確に把握できる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、維持管理上の課題があるデッキプレート床版の振動特性を把握するため、FEM モデルによる固有振動解析を行い、減肉による振動特性への影響を把握した。以下には、本研究によって得られた知見を示す。

一律減肉条件の結果、固有振動数は、下段の減肉に大きく影響を受けること、モード振幅は上段下段の総減肉量に比例することがわかった。

部分減肉条件の結果、減肉範囲の節点のモード振幅比が大きくなることから、振幅比に着目することで減肉の影響を把握できる可能性があると考えた。

今後は、供試体の振動実験を行い、実構造物における減肉と振動特性の関係を把握する。また、実測値と解析値を比較するとともに、解析にて細かな部分減肉のケースを設定し、減肉と振動特性を関係性を詳細に把握する。

参考文献

- 国土交通省：全国道路施設点検データベース (2022年12月6日閲覧)。
- 国土交通省道路局：歩道橋定期点検要領, 2019.
- 国土交通省道路局：横断歩道橋定期点検要領, 2019.
- 門田峰典, 宮森保紀, 綿崎良祐, 三上修一, 齊藤剛彦：実損傷を有する横断歩道橋の補修によるモード形状の変化, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.143-152, 2015.
- 門田峰典, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 白川雄太, 小幡卓司：腐食損傷した横断歩道橋に対する SHM の適用に向けた基礎的検討, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.261-272, 2021.
- 社団法人日本道路協会：立体横断施設設置要領(案)・横断歩道橋設計指針解説, 1967.
- 社団法人日本道路協会：土木構造物標準設計 V (横断歩道橋) 建設省制定, 1967.
- 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.
- 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 5, 立体横断施設-横断歩道橋・地下横断歩道の手引き, 1984.
- 白戸真大, 玉越隆史, 齊藤誠, 阿部勇一：横断歩道橋の健全性診断の事例, 現場に学ぶメンテナンス No.24, 土木技術資料, 60-2, 2018.
- 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2017.
- 社団法人日本道路協会：舗装設計便覧, 2006.