

実測結果に基づく FEM モデルを用いた横断歩道橋の動的応答解析

Dynamic responses analysis of a pedestrian bridge under human walking used FE model based on the actual survey result

北見工業大学 学生員 ○白川 雄太
北見工業大学 正会員 宮森 保紀

(株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 門田 峰典
北海学園大学 正会員 小幡 卓司

1. はじめに

歩道橋は、社会インフラを構成する一つであり、高度経済成長期に都市内の交通安全施設として多数整備されてきたが、老朽化や周辺環境の変化などを理由に取り扱いを見直す自治体が増加している。その一方で、主要都市の駅や大規模集客施設の周辺などで歩行者の通行を確保するため、意匠的にも優れた様々な歩道橋が設置されている。

これらの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易い特性を有する。このため、歩道橋の振動に対する設計段階での評価方法についての研究が行われている^(例えば 1)2)。近年は、3次元有限要素解析技術と電子計算機の発展により、2次部材や添加物も含んだ詳細なモデルに対する振動解析が可能になりつつある。その一方で、様々な利用者に配慮した設計も必要であり、動的設計に必要な歩行外力モデルについても高度化の余地がある。

本研究は、歩道橋の実橋振動実験を行い、人間の歩行による動的応答量を算出した³⁾。また、実測値を正確に再現するため、現地踏査の結果を踏まえた歩道橋の3次元 FEM モデルを構築した⁴⁾。これに対し、文献⁵⁾で提案したパラメータを参考に歩行外力モデルを構築し動的応答量を算出した。本報は、実橋振動実験における実測値と構築した歩行外力の解析結果を比較し、今後の歩行外力モデルの高度化に向け基礎的な検討を行った結果を報告するものである。

2. 実橋振動実験

2.1. 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、図-1 に示す札幌市内に 1968 年に架設された歩道橋である。図-2 に示すように支間長 20.75m、幅員 1.5m で主構造は鋼 2 主桁で鋼床版を有する。なお、本橋は 2017 年 8 月に撤去されており、撤去後に断面寸法などの詳細を実測している。

2.2. 測定条件

実験は 2016 年 11 月 1 日に行った³⁾。測定に用いたセンサーは、主桁の橋面上に MEMSIC 製 Imote2 無線センサー計 5 基を図-2 に示す配置で行い、サンプリング周波数は 280Hz、計測時間は 60 秒間とした。

加振方法は、人間 1 名が本橋の曲げ 1 次モードである約 4Hz の 1/2 となる 2Hz の一定歩調でセンサー①から⑤へ歩行し、一定歩調を維持するため電子メトロノームを携帯した。

2.3. 実験結果と考察

動的応答量の算出には支間中央点のデータを用い、その結果を表-1 に示す。図-2 のセンサー①で 1 歩目の振動を検出した時刻から、歩行終了時刻での時刻歴応答加速度を抽出し最大値、実効値を算出した。最大値は 2000 年と比べ約 20% の変動があり、過去の実測値との差が明確にある。しかし、



図-1 実験対象橋梁

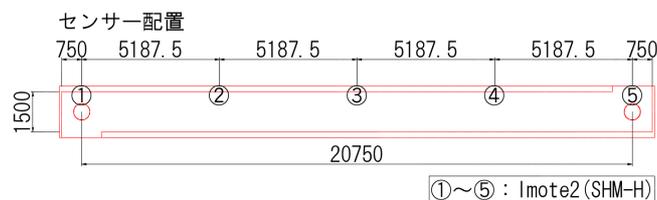


図-2 主桁平面図・センサー配置図

同時に実施した固有振動特性の実験結果³⁾から、曲げ 1 次モードの固有振動特性は 2000 年から殆ど変化しておらず、歩行振動数も電子メトロノームで管理している。以上より、動的応答量は歩道橋の経年変化の影響よりも歩行による起振力の違いが大きいと考えられる。動的な歩行外力は足裏が踵から地面に接地し、爪先で蹴り出すまでの動きにより定義できるが、実際の動的応答量は歩行振動数の他にも歩き方、体格差などに影響を受けると考えられる。

3. 横断歩道橋の解析モデルと動的応答解析

3.1. 横断歩道橋のモデル化

実測値の妥当性を検証するため、Midas NFX を用いて有限要素法による動的応答解析を行った。

モデルでは、鋼製の薄肉部材はシェル要素、モルタル・アスファルトはソリッド要素、横構・高欄は梁要素でモデル化した。なお、高欄においては、上部の笠木は構造的に連続していないため部分的に要素を消去し、部材厚を減少させた。

支持条件は、鉛直方向は基本構造が直接基礎であることより橋脚下端を完全固定、水平方向は根巻きコンクリートにより拘束されることより根巻きコンクリート内の鋼管の範囲を完全固定とした。橋面構成は撤去後にに行った実測結果から、4.2mm のデッキプレート上に 50mm のモルタル、25mm のアスファルトが敷設されたモデルとした。また、現状の歩道橋の部材には腐食が生じていたため、把握した減肉量をモデルの板厚に反映させた。

キーワード 横断歩道橋, 歩行外力, 動的応答量, FEM モデル, 有限要素解析

連絡先 〒090-8507 北見市公園町 165 番地 TEL 0157-26-9472 (宮森保紀)

以上の条件より構築したモデルに対する固有振動解析の結果、曲げ1次モードの振動数は、実測値4.1Hzに対し、解析値4.1026Hzと誤差の少ない結果が得られた。

3.2. 歩行外力モデルと動的応答解析

動的応答解析で用いた歩行外力は、2000年の歩道橋の実橋振動実験などから同定したパラメータを基本として作成した⁵⁾。この歩行外力モデルは1歩の動的荷重を踵と爪先からの入力とし、その間を滑らかに接続させるような6変数からなるモデルである。

上記の外力を用いた予備解析の結果、動的応答量は実測値よりかなり小さくなった。文献⁵⁾で提案した外力の同定結果にはばらつきがあり、Irvin⁶⁾らによると歩行時の足にかかる力は体重の約3倍とされているため、元の歩行外力の衝撃係数を調整した歩行外力を図-3(a)のモデル1とした。図-3において、破線と点線はそれぞれ左右の足の歩行外力で、低いピークが踵の衝撃係数、高いピークが爪先の衝撃係数であり、爪先から踵間の衝撃係数を経て余弦波を用いて滑らかに接続している。また、左右の合計が実線で表されている。モデル1では実線はやや調和振動的な波形となっている。これに対し、接地時間を0.1s短くしたものが図-3(b)のモデル2であり、モデル1に比べやや衝撃的な入力になるとともに、左右の足が同時に接地する時間が短くなるため、衝撃係数の合計は小さくなっている。

動的応答解析における減衰は剛性比例減衰を用い、減衰定数は2Hz歩行実験で得られた0.0025、固有振動数はFEMモデルの固有振動解析結果である4.1026Hzとした。解析時間は20秒間、時間刻みは $\Delta t=0.01s$ である。

3.3. 動的応答解析結果と考察

動的応答解析の結果として図-4に支間1/2点の鉛直方向の時刻歴応答加速度を示す。(a),(b)の各図は歩行外力モデル1,2の解析結果であり、破線は2016年の実測値である。図-4(a),(b)の解析結果では支間中央通過直後に最大値に達する実測結果と整合しており、2000年の実験で得られた歩き終える直前の時間帯で最大振幅に達する傾向は現れなかった。(a),(b)の比較では、モデル1は4Hzの振動成分が卓越し、支間中央を通過後の振幅の減少は実測値より大きい。また、支間中央付近を通過の際にも多少の振幅の減少がある。モデル2は大きく卓越した振動成分がなく、モデル1と比べ複雑な挙動を示している。支間中央を通過後の振幅の減少は実測値と同様である。また、モデル1と2において振幅の減少の際に波形のうねりがあるが、時刻歴応答加速度の波形より入力した歩行外力モデルの影響を受けていると考えられる。

2016年の動的応答量と解析結果を比較し、最大値と実効値を表-2に示す。また、表中の()内には実測値に対する解析値の比を示す。表-2から、モデル1よりモデル2の方が2016年の実測値と整合している結果となった。

4. おわりに

本研究は、動的応答量の2016年の実測値を再現するべく、歩道橋の3次元FEMモデルを構築し、歩行外力を入力し解析結果を比較した。

実測値では、2000年と2016年の最大加速度に約20%の差があったが、固有振動特性に殆ど変化がなかったことより、歩き方や体格差が影響していると考えられる。

有限要素法による解析では、既往の研究に基づき歩行外力

表-1 動的応答量(実測値)

	歩行時間 (sec)	歩行速度 (m/s)	最大値 (gal)	実効値 (gal)
2016年	12.12	1.712	-43.73	21.33
2000年	13.55	1.528	-54.14	19.75

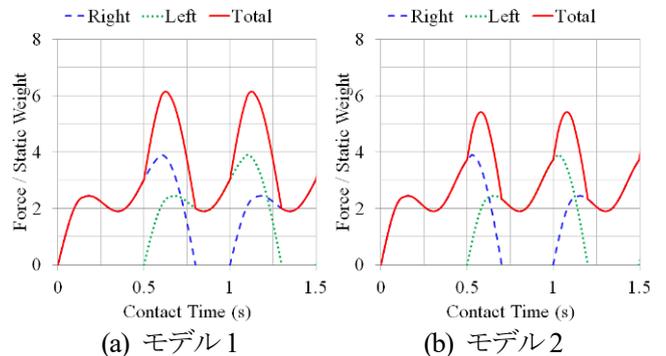


図-3 歩行外力モデル

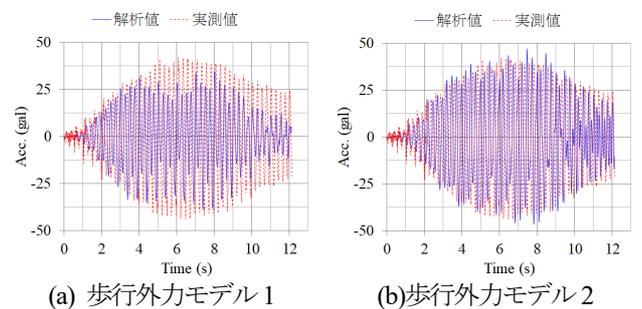


図-4 時刻歴応答加速度(解析値)

表-2 動的応答量(解析値)

	最大値 (gal)	実効値 (gal)
モデル1	-38.98 (0.89)	14.97 (0.70)
モデル2	47.11 (1.08)	19.20 (0.90)

を作成し、外力の大きさを調整したモデル1と足の接地時間を調整したモデル2を用いて解析した。その結果、モデル2の方が2016年の実測値と整合していた。

以上より、今回解析に用いた歩行外力モデルは人間の歩行の性質を表現しているが、実測値を正確に再現するには人間の歩行をより正確に再現した外力モデルを構築する必要がある。今後は、歩行による人間の各部位の動きを反映した歩行外力モデルを構築したうえで、実測値の再現性について検討する必要がある。

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学生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) 小堀, 梶川, 城戸: 振動感覚を考慮した歩道橋の設計, 橋梁と基礎, Vol.8, No.12, pp.23-29, 1974. 2) 田中, 加藤: 設計時における歩道橋の振動使用照査法, 土木学会論文集, No.471, I-24, pp.77-84, 1993. 3) 宮森, 白川, 張, 門田, 齊藤, 小幡: 老朽化した横断歩道橋の固有振動特性と動的応答量の経年比較, 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. 4) 門田: 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. 5) 宮森, 小幡, 林川, 佐藤: 歩道橋の動的応答に基づいた歩行外力モデルの同定に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.343-350, 2001. 6) Irvin 著, 齋藤, 高木 訳: 翻訳人体物理学動きと循環のメカニズムを探る-, エヌ・ティーエス, 2009.