横断歩道橋の動的応答量の実測値と FEM モデルによる動的解析の比較

Comparison of dynamic responses of measurement and numerical simulation of a pedestrian bridge under human walking

北見工業大学	学生員	〇白川	雄太	(Yuta Shirakawa)
㈱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	正会員	宮森	保紀	(Yasunori Miyamori)
北海学園大学	正会員	小幡	卓司	(Takashi Obata)
北見工業大学		中野	慎人	(Masato Nakano)

1. まえがき

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¹⁾。 我が国の社会インフラの多くは高度経済成長期に以降に 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%に増加することが分かっている²⁾。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、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量増加に伴う交通安全施 設として全国各地に多数整備され歩行者の安全確保に効 果をもたらしてきたが、老朽化や周辺の交通環境の変化、 新たな社会基盤施設の整備、景観上好ましくないなどを 理由に取り扱いを見直す自治体が増加している³⁾。一方 で大都市のターミナル駅周辺や、イベント会場などで大 量の歩行者の通行を確保するために、意匠的にも優れた 様々な歩道橋が設置されている。

近年の構造物は、様々な性能を満たすため構造が非常 に複雑になりつつあるため、設計段階で動的な挙動を予 測する必要がある⁴⁾。その中でも歩道橋は活荷重が小さ くフレキシブルであるため、動的な外力により振動しや すい特性を有する。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多くの研究が行われている ^{例えば5),6)}。近年では、3次元有限要素解析技術とコンピュ ータの進歩により、構造物の2次部材や添加物も含めた 詳細なモデル化により振動解析を行うことが可能になり つつある。一方で、ユニバーサルデザインの観点から多 様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させる余地がある。

本研究では、まず歩道橋の振動測定実験を行い、人間 の歩行による動的応答量を算出した⁷⁾。また、実測値を 精確に再現するための FEM モデルを構築した。具体的 には本橋に竣工図がないことから現地踏査を行い橋梁の 構造形式や現状を把握し、その結果を踏まえ高精細な横 断歩道橋の3次元 FEM モデルを構築した⁸⁾。これに対し て、文献9)で提案した歩行外力パラメータを参考に複数 の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複数の歩行 外力の解析結果を比較して、今後の歩行外力モデルの高 度化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. 振動計測実験

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年に架設された横断歩道橋である。図-2 に示すよう に支間長は 20.75m、幅員 1.5m で主構造は鋼 2 主桁で鋼 床版を有する。階段は交差してい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. 計測条件

実験は 2016 年 11 月 1 日に行った⁷⁾。天気は曇天で実 験中の最低気温は 3℃、最高気温は 6℃を歩道橋に設置 した温度計で記録した。

本実験は図-2 に示すセンサー配置で行った。測定に用 いたセンサーは主桁部の橋面上に MEMSIC 製 Imote2 無 線センター(SHM-H)計 5 基である。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の一定歩調とし、橋面上のセンサ 一①から⑤の方向へ歩行し、2Hzの一定歩調を維持する ため、歩行者は電子メトロノームを携帯した。この2Hz の振動数は一般的な人間の歩行振動数とされ、歩道橋の 振動使用性の照査でも考慮される歩行振動数である¹⁰。 歩行時間の測定にはストップウォッチを用い、加振者自 身が歩行開始から歩行終了のタイミングで計測した。

2.3. データ処理方法

動的応答量の算出には支間中央点のデータを使用する。 60秒間のデータから、図-2のセンサー①で1歩目の振動 を検出した時刻から、歩行終了時刻までの時刻歴応答加 速度を抽出し、最大値、実効値を算出した。歩行時間は ストップウォッチで計測した時間、歩行速度は支間長を 歩行速度で除した値、加速度の絶対値が最大となったも のを最大値とし、実効値は式(1)で求めた。x_iは各時刻の 加速度、N は歩行時間とサンプリング周波数を乗じたデ ータ点数である。

実効値(*RMS*) =
$$\sqrt{\frac{I}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i)^2}$$
 (1)

なお、本橋の鉛直曲げ1次モードの固有振動数は4.1Hz、 減衰定数は0.01であった⁷⁾。

2.4. 実験結果と考察

支間中央点の歩行開始から歩行終了までの時刻歴応答 加速度を図-3 に示す。また、表-1 に動的応答量を示す。 図-3から曲げ1次モードの半分の振動数で歩行した場合 でも曲げ1次モードの振幅が大きくなっており、歩行者 が支間 1/2 点付近を歩行している時間帯で最大振幅に達 している。しかし、図-4 に示す 2000 年の実験⁹では、歩 き終える直前の時間帯で最大振幅に達しており、実験を 行った他の歩道橋全てで同様の傾向があった。また最大 値においても約20%の変動があり、過去の実測値との差 が明確にある。しかしながら、曲げ1次モードの固有振 動特性は2000年からほとんど変化しておらず、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、爪先でけり出すまでの動きによ り定義できるが、歩道橋の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. 歩道橋の解析モデルと歩行時の動的応答解析

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、有限要素法を用いた 動的応答解析を行った。解析ソフトは、有限要素法解析 プログラムである midas NFX¹¹⁾を用いた。

モデルに使用する要素として、鋼主桁や鋼床版などの 薄肉部材に対してシェル要素を、舗装やモルタルは面上 に重なる要素となるためソリッド要素を、支点上の面外 変形防止用に配置される横構や鋼製高欄はすべて梁要素 でモデル化した。

基本構造は直接基礎であること、人力加振によりフー チング下面に生じる軸力は微小であることから、橋脚下 端の鉛直方向支持条件は完全固定とした。水平方向につ いては、根巻きコンクリートにより変形が拘束されるこ とから、根巻きコンクリート内となる鋼管の範囲までを 完全固定とした。

横断歩道橋の現状の部材には腐食による減肉が生じて いるため、現地踏査で把握した減肉量をモデルの板厚に 反映させた。具体的には、階段蹴上げは一律 0.6mm 減少、 地覆プレートに対しては一律 0.5mm 減少させた。橋脚に ついては、地表から 0.9m~2.2m の車道に面する範囲に対 して板厚を 3mm 減少、その他となる根巻コンクリート天 端から 2.2m の範囲までを 0.5mm 減肉させた。R 側脚につ いては、地表から 1.0m の範囲で車道側となる面に対して 0.5mm 減少させた。

橋面構成は、4.2mmのデッキプレート上に各 25mmの モルタルとアスファルトが敷設されているモデルとした。 これらの条件より構築した解析モデル全景を図-5 に示す。

固有振動解析の結果、曲げ1次モードの固有振動数は 表-2に示すように、非常に誤差の少ない結果が得られた。

3.2. 歩行外カモデルと歩行位置

動的応答解析で用いた歩行外力は Blanchard¹²⁾らの研 究に基づき、文献 9) で 2000 年の歩道橋の振動計測実験



図-1 実験対象橋梁



図-4 2000年の時刻歴応答加速度(支間 1/2 点)

表-1 動的応答量

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

表-2 固有振動数の比較

実測値(Hz)	解析值(Hz)
4.1	4.1329

などから同定した歩行外力モデルを基本として作成した。 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。片足ずつ歩行周期毎交互に繰り返 しており、重ね合わせることで橋梁全体に作用する歩行 外力としている。

歩調となる歩行振動数は 2.0Hz であり、0.5s 毎に次の 歩行が開始する。最初に文献 9)の同定結果に基づいて歩 行外力モデルを構築した。このモデルでの荷重と体重の 比(衝撃係数)は最大で 1.3 程度であったが、予備的な解析 の結果、動的応答量はかなり小さくなった。文献 9)で提 案した歩行外力は同定結果にばらつきがあり、Irvin¹³ら によれば歩行により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て図-6(a) の歩行外力をモデル1とした。図-6 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。歩行 外力モデル1では実線はやや調和振動的な波形となって いる。

歩行外力モデル1に対して、地面への接地時間を0.1s 短くしたものが図-6(b)の歩行外力モデル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、合計の衝撃係数 は小さくなっている。さらに接地時間を短くして衝撃係 数を大きくしたものが図-6(c)の歩行外力モデル3である。 モデル3では、両足を合わせた波形が複雑な形状になっ ている。

歩行位置は橋軸方向から見て中央付近とし、歩幅を 900mm、歩数を 24 歩とした。実験では歩幅、歩数の記 録を取っていないため、本解析では支間長と歩行時間か ら計算した。歩行荷重は解析モデルに 900mm 毎の節点 がないため、近傍節点に荷重を分配した。

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 2016 年の跳躍加振実験で得られた 0.01、固有 振動数は FEM モデルの固有振動解析結果である 4.1329Hz とした。解析時間は 20 秒間、時間刻みは *Δt*=0.01s である。

3.3. 動的応答解析結果と考察

動的応答解析結果として、支間 1/2 点の鉛直方向の時 刻歴応答加速度を図-7 に示す。(a)~(c)の各図は歩行外力 モデル1~3の解析結果であり、破線は図-3で示した 2016 年の実測値である。図-7(a),(b),(c)の各図から曲げ1次モ ードの半分の振動数で歩行した場合でも曲げ1次モード の振幅が大きくなっており、2016年の実測値と同様の傾 向が見られた。しかし、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)~(c)の時刻歴応答加速度を検討すると、モデル1 の(a)は、2Hzの振動数成分が比較的卓越し、支間中央を 通過後は振幅の減少が実測値より大きい。モデル2の(b) は、4Hzの振動成分が大きく、後半の振幅の減少は(a)よ り少ないが実測値より大きい。モデル3の(c)は、衝撃係



数を大きくしているにもかかわらず、振幅の増大はそれ 程でもなく、後半の振幅の減少は最も小さい。実測値と 解析値の固有振動数の差は約0.8%であるほか、図-6の歩 行外力モデルの卓越周期もそれぞれ異なることから、半 共振歩行で共振状態を発生させるには複数の条件が揃う 必要があると考えられる。

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-3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。各モデルの解析結果では、最大値、 実効値ともに多少のばらつきはあるが、概ね一致してい ると考えられる。以上の結果を総合すると、歩行外力モ デルが異なると時刻歴応答加速度には相応の違いが生じ るが、最大値や実効値ではそれほど変わらない。本研究 では、最も単純な歩道橋を対象として検討したが、より 複雑な形式の歩道橋では複数の振動モードが近接するな どで、より複雑な応答となるため、歩行外力についても さらに精度の良いモデルが必要となると考えられる。

4. おわりに

本研究では動的応答量における 2016 年の実測値を再 現するべく、高精細な横断歩道橋の 3 次元 FEM モデル を構築し複数の歩行外力を入力し解析し比較した。

実測値では、2000年と2016年では最大加速度に約20% の差があったが、固有振動特性には変化がほとんどなか ったことより、加振者の歩き方、体格差が影響している と考えられる。

有限要素法による動的応答解析では、2016年の実測値 と同様の傾向を示す結果となった。歩行外力モデルは既 往の研究に基づき作成し、外力の大きさを調整したモデ ル1と、足の接地時間や体重比を調整したモデル2,3を 用いて解析した。各モデルの解析結果は、時刻歴応答加 速度が歩行の後半で異なるが、最大値や実効値は概ね一 致していた。

以上より、今回解析に用いた歩行外カモデルは人間の 歩行の性質を表現しているが、実測値を精確に再現する には人間の歩行をより精確に再現した外力のモデルを構 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カ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】

- 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.
- 1. 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, 2016.
- 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.
- 5) 小堀為雄, 梶川康男, 城戸隆良: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.
- 6) 田中信治,加藤雅史:設計時における歩道橋の振動 使用性照査法,土木学会論文集,No.471,I-24, pp.77-84,1993.
- 7) 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.
- 8) 門田峰典:既設標準設計横断歩道橋の損傷傾向に着 目した構造ヘルスモニタリング手法に関する研究, 北見工業大学博士論文,2017.

表-3 動的応答量					
	最大値(gal)	実効値(gal)			
モデル1	-46.27 (1.06)	18.72 (0.88)			
モデル2	-48.52 (1.11)	21.90 (1.03)			
モデル3	-51.07 (1.17)	20.99 (0.98)			





- 宮森保紀,小幡卓司,林川俊郎,佐藤浩一: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.
- 日本道路協会:立体横断施設技術基準・同解説,丸 善,1979.
- 11) MIDAS Information Technology CCo., Ltd. : midas NFX, Analysis Manual, 2014.
- 12) Blanchard, J., Davis, B., L. and Smith, J., W. : Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Footbridges, UK, TRRL. Report SR, 275, 1977.
- Irvin, P., Herman 著, 齋藤太朗, 高木建次 翻: 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.