病院内における道路上空通路の 歩行振動評価

THE EVALUATION OF VIBRATION CAUSED BY HUMAN WALKING IN OVER-ROAD HOSPITAL CONNECTING-BRIDGE

富澤徹弥 ——— * 1 豆田祥平 ——— * 2
BAE KUNKUK — * 3 角 友太郎 ——— * 3
武藤 学 ——— * 4

Tetsuya TOMIZAWA — * 1 Shouhei MAMEDA — * 2
Kunkuk BAE ——— * 3 Yutaro SUMI ——— * 3
Manabu MUTO ——— * 4

キーワード：
病院, 上空通路, 歩行振動, 振動測定

Keywords:
Hospital, Connecting-bridge, Human Walking Vibration, Vibration Measurement

We measured human-induced walking vibrations in an over-road hospital connecting-bridge.
When walked upon at a fixed frequency by 4 people, the passage had a livability equivalent to the performance required of a typical residential building.
Even when walked upon with 12 people, the performance was such that the impact on the habitability of patient room is small.
In addition, the dominant frequency and damping constants were extracted from the Fourier spectrum of recorded vibrations.
In the vertical direction, the natural frequency and the damping constant were estimated to be 9 Hz and 3.26% respectively.

1. はじめに

本稿は、2 棟の建物を繋ぐ道路上空通路の歩行振動実験に関する技術報告である。対象建物は、熊本県に建つ産婦人科病院であり、増築部分である新棟と既存棟の間に公道を挟んでいる。2016 年熊本地震を機に、地震時の安全確保および地震後の機能維持のため、新棟には免震構造を採用し、既存棟と新棟を安全かつ衛生的に往来することが可能な道路上空通路を計画した。道路上空通路は新棟から長スパンの片持ち構造としており、利用者の歩行振動に起因する不快な振動の発生が危惧される。しかしながら、建築物の用途上、妊産婦や新生児らが安心して利用できる必要があり、竣工後に振動対策を実施することも困難であることから、設計時における床振動特性評価の妥当性を検証する目的として、竣工直前に歩行振動実験を行っている。本稿はその結果について報告を行うものである。

建築空間における環境振動評価には、日本建築学会より刊行されている『建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説』（以下、「居住性能評価指針」）¹⁾が用いられることが多い。居住性能評価指針には、鉄骨造大スパンの事例も多く報告されており、本報告もそれら環境振動データのさらなる蓄積と今後の大スパン構造物の設計に資する内容となるものと考えられる。

2. 建築物概要

対象とした建築物は、地上 10 階、柱 SRC 造、梁 S 造の純ラーメン構造である。建築面積約 765m²、延床面積約 5300m²、桁行（X）方向 32.7m、梁間（Y）方向 17.0m の平面形状を有する建築物であ

図 1 代表伏軸図

本稿は文献 4) に発表した内容を再構成し、加筆・修正したものである。

¹⁾ 明治大学理工学部建築学科 専任講師・博士（工学）
〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
²⁾ 松尾建設
³⁾ 構造計画研究所
⁴⁾ 日本防振

¹⁾ Senior Assistant Prof., Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.
²⁾ MATSUO CONSTRUCTION, CO., LTD.
³⁾ KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.
⁴⁾ NIHON BOUSHIN Co., Ltd.

り、病室、医局、食堂、地域交流の多目的空間を有する病院として、2019年11月に竣工した。図1に本建築物の代表的な伏軸図を示す。

歩行振動評価を行った道路上空通路は桁行長さ18.18m、幅4.0mであり、写真1に示すように、建物の6,8階の2層を通路として連結する3層構造である。既存棟側の狭い敷地条件等から新棟より片持ち構造とし、水平鉛直ブレースと束材より片持ち部の剛性を確保し、金属屋根とALC床で軽量化を図っている。なお、既存棟は耐震構造、新棟は免震構造であり、3次元の変形に対応するエキスパンションジョイント（以下「Exp.J」）により、片持ち上空通路の複雑な挙動に追従できるようにしている。片持ち部は、地震時に生じる先端の鉛直変位がExp.Jの可動域に対し2倍程度の安全率をもつように十分な架構剛性を確保し、特に束材については、常時の圧縮力に加えて、地震時に生じる上下動を考慮した荷重に対して、部材長の2倍の座屈長さを想定した断面により剛性を確保している。

3. 振動測定計画

振動測定は既存棟と新棟との通路として利用される6階および8階部分において、実際の歩行による床の応答加速度を測定する歩行振動試験と、固有振動数、減衰定数を求めるための常時微動測定およびかかと衝撃加振試験を行った。図2に上空通路内部の平面図を示す。図中の▼は床応答加速度の測定位置を示しており、測定はすべて鉛直方向としている。通路内に加え、居住性の観点から新棟側の通路直近である6階のナースステーションにも加速度計を設置し、通路歩行時における居室内の鉛直方向振動を測定し、居住性能を評価することとした。居住性能の評価は、居住性能評価指針に基づき、加速度測定結果から1/3オクターブバンド分析による加速度最大値(0-p)を求め、知覚確率により評価を行う。

表1に試験ケース、写真2および3に上空通路の内観、歩行試験時の様子を示す。歩行試験は成人による普通歩行を想定し、デジタルメトロノームのリズムに合わせ、2.0Hzでのピッチ（同調）歩行により通路内を1往復することで加振を行った。加振力による応答変化を把握するため、歩行人数は2人、4人、12人の3パターンとし、隊列は歩行人数が2人および4人の場合は横1列、12人の場合は4名3列として可能な限り歩幅とリズムを合わせて歩行した。また、ピッチ歩行に加え、本建築物の通常使用時を想定したランダム歩行についても併せて測定を行い、知覚確率による評価を行う。測定に使用した機器を表2に示す。なお、測定にあたり、サンプリング周波数は128Hzとしている。

4. 実験結果および考察

4.1 歩行時振動の知覚確率による性能評価

図3に歩行人数2人、4人、12人における6階ピッチ歩行に対する性能評価曲線を示す。図より、最大となる測定点にはややばらつきがあるものの、全体的な傾向としては特定の振動数によらず、歩行人数が増えるほど床応答加速度は大きくなっている。2人歩行時では、すべての測定点においてV-10の性能を上回る評価となっているが、4人歩行時では最大V-30程度の評価となっている。さらに、12人歩行時では最大V-70～90程度の評価となり、通路内に位置する70%以上の人が揺れを感じる結果となっているが、いずれの歩行人数においても通路直近のナースステーションの床応答加速度は

写真1 上空通路の外観（左：既存棟，右：新棟）

※「NS」は「ナースステーション」を表す

図2 通路平面図（6階および8階）

表1 加振による試験ケース

加振方法	加振点	人数	加振方向	加振振動数
かかと衝撃加振	6F-3	1人	鉛直 下向き	—
	8F-3			
ピッチ歩行	6F通路全体	2人		2.0Hz
		4人		
		12人		
ランダム歩行	8F通路全体	12人		—
	6F通路全体	12人

写真2 上空通路内観

写真3 12人歩行の様子

表2 主な使用機器

測定器名	型式	メーカー	備考
サーボ型 加速度センサー	MG-102S	特許機器（株）	1台/測点
低域振動計	OSP-06	特許機器（株）	6ch型
データロガー	RS1	特許機器（株）	—

図3 6階ピッチ歩行時の性能評価曲線

図4 12名ランダム歩行時の性能評価曲線（6F 歩行時）

図5 12名ランダム歩行時の性能評価曲線（8F 歩行時）

V-10 レベルより十分小さな値であり、6階において12人程度のピッチ歩行が生じたとしても当該階のナースステーションを含む病室等の居住性に及ぼす影響は小さいと判断できる。また、床の鉛直振動に対する一般市民の意識調査を行った既往の研究²⁾によれば、自宅への市民の要求性能は概ね V-30~50 程度であることから、図3(b)より歩行人数が4人程度であれば、上空通路内においても自宅への要求性能を満たす程度の十分な居住性能を有していると考えられる。

次に、ピッチ歩行時およびランダム歩行時における床応答加速度の比較を行う。図4、図5に12名による6階および8階ランダム歩行時の6階通路内およびナースステーションの性能評価曲線を示す。図3(c)および図4による比較から、ランダム歩行時の床応答加速度にはピッチ歩行時のように加振振動数付近に応答が大きく出る傾向はなく、加振する振動数が揃っているピッチ歩行時の方がランダム歩行時よりも全体的に床応答加速度がやや大きくなっている。また、図5より8階ランダム歩行時における6階の床応答加速度を見ると、全体的に応答レベルは当該階歩行時より小さく、最大でも V-30 程度である。振動数 8~9Hz においてやや応答値が大きく出ているが、これは本通路の鉛直方向の1次固有振動数であり、当該階歩行時に生じる直接的な振動の影響がないことから、構造的な特徴がより顕著に表れているものと考えられる。

4.2 本上空通路の振動特性の考察

常時微動計測による結果から、本上空通路の構造上の固有振動数

図6 常時微動時のフーリエスペクトル

図7 かかと衝撃加振時のフーリエスペクトル

および減衰定数等の振動特性について分析する。図6に、6階および8階部分の常時微動時の時刻歴波形のフーリエスペクトルをそれぞれ示す。図より、新棟からの片持ち構造となっている上空通路の先端付近となる6F-3、6F-4、8F-3、8F-4では、図中▼で示す卓越振動数が6階および8階部分と同様の傾向を示しており、通路先端により近い6F-3、8F-3の方が振幅レベルは共にやや大きくなっている。図中▼で示す卓越振動数は概ね4Hz、9Hz、17Hz、32Hz前後であり、このうち、4HzについてはOAフロア床組から置き束およびOAフロア合板の割付、32Hzは加速度計が梁中央部に位置することから鉄骨梁のたわみ（積載を除く固定荷重で概ね0.3mm程度）による局所的な卓越振動数であると推定している。9Hz、17Hzについては次章の解析結果から、本通路全体の鉛直方向の固有振動数であると判断している。振幅レベルについては、32Hz前後での増幅が最も顕著ではあるものの、一般に30Hz以上の振動数は体感振動に与える影響は小さい。また、32Hz前後の増幅と比較すると、本通路全体の鉛直方向の振動モードである9Hz付近の増幅は小さく、設計時における十分な架構剛性の確保等、本通路利用時の振動障害を抑えるための設計意図が反映されているものと判断できる。

次に、本通路全体の鉛直方向1次モードと考えられる9Hz付近に着目して、さらなる考察を加える。鉛直方向1次モードの固有振動数と減衰定数について、常時微動およびかかと衝撃加振時のフーリエスペクトルより、固有振動数を5点ピーク法、減衰定数を $1/\sqrt{2}$ 法を適用して算出する³⁾。5点ピーク法では固有振動数近傍における5つの最大ピーク振動数を平均し、平均値に最も近いピーク振動数を固有振動数とする。 $1/\sqrt{2}$ 法では、ピーク振動数 f_n におけるピーク値 X_{max} を定め、その $1/\sqrt{2}$ 倍に相当する振動数幅 Δf_n を計算し、(1)式から減衰定数 h を求める。

$$h = \frac{\Delta f_n}{2 \cdot f_n} \quad (1)$$

図7は6F-4付近において、かかと衝撃加振を行った場合の6F-3、6F-4、6F-7のフーリエスペクトルを示している。図より、上空通路先端である6F-3において9Hz付近の振動数の振幅が最も大きくなっている。図6および図7のフーリエスペクトルより、本上空通路の鉛直方向1次モードの固有振動数および減衰定数を表3のようにそれぞれ算出した。フーリエ振幅レベルから考えると減衰定数はやや大きい値となっているが、本通路は非構造部材の割合が多いことがその要因と考えられる。

表3 本上空通路の振動特性

測定および加振方法	測定階	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
常時微動	6階	9.125	3.81
	8階	8.875	3.57
かかと衝撃加振	6階	9.000	2.40
平均値		9.000	3.26

図8 解析モデル図

表4 部材断面

記号	種別	サイズ
C1	鉄骨	P - 318.5 x 12
C2	SRC	RC : 1000 x 1000 HX - 700 x 200 x 12 x 22, HY - 700 x 300 x 12 x 19
G1, B1	鉄骨	H - 300 x 300 x 10 x 15
G2	鉄骨	H - 600 x 300 x 12 x 28
B2	鉄骨	H - 300 x 300 x 10 x 15
V1	鉄骨	P - 165.2 x 7.1
V2	鉄骨	P - 190.7 x 10
V3	鉄骨	P - 457.2 x 19
V4	鉄骨	P - 318.5 x 10.3

表5 床の固定荷重

記号	kN/m ²
S1	2.00
S2	3.00
S3	1.20
S4	0.60
S5	0.15
S6	0.50
W1	0.80

5. 固有値解析による検証

前章に示した測定結果に対して固有値解析による検証を行う。図8に解析モデル図を示す。解析モデルは通路部分を取り出した有限要素モデルとする。柱、梁およびブレースは梁要素およびトラス要素にてモデル化しており、床材については面内および面外剛性を有する板要素として、厚さ150mmのALC版をモデル化している。また、計算精度の観点から約0.6m四方のメッシュ分割とした。新棟側に面する節点（梁の中間節点を除く）は固定支持として、その他の節点については自由度を拘束しない。部材断面および荷重は表4、表5に示す通りである。検証解析における荷重は固定荷重のみを考慮し、積載荷重は考慮しない。解析ソフトウェアは株式会社マイダ

スアイティ開発・販売の midas iGen (Ver.881) とする。

固有値解析結果を図 9 に示す。1 次固有振動数は 9.25Hz であり、通路全体が上下に挙動し、方杖となる束材から先端部分で変形が大きくなるモードを示している。本モデルの全体質量は約 108ton であり、この 1 次モードの有効質量は約 68.1ton となっている。次に有意な有効質量を有するモードは 15 次と判断され、当該モードの固有振動数は 17.62Hz で、有効質量は約 8.7ton である。有効質量比や固有振動数、束材から先端部分における変形状から、本モードが通路全体の上下方向の 2 次モードと判断できる。これらは、前章における振動特性の分析と概ね対応していることが確認できる。

6. まとめ

2 棟の建物を繋ぐ病院内における道路上空通路の歩行振動測定を行った。居住性能評価指針に基づき歩行振動に対する評価を行ったところ、4 人ピッチ歩行時では本通路は一般的な市民の自宅への要求性能程度の居住性能を有しており、12 人歩行時では通路内では多くの人が揺れを感じるものの、通路直近の居室であるナースステーションの床応答加速度は V-10 レベルより十分小さな値であり、12 人程度の通路歩行が居室の居住性に及ぼす影響は小さいと判断できる結果となった。

また、常時微動時およびかかと衝撃加振時におけるフーリエスペクトルから卓越振動数を抽出し、解析結果と併せ、本上空通路の鉛直方向の 1 次モードの固有振動数は 9Hz と推定した。次に、9Hz 付近の卓越振動数に着目し、フーリエスペクトルから減衰定数は 3.26%程度と推定した。

一般に、人間は鉛直方向の振動の場合 2~4Hz 程度が最も敏感であり、通常の床の固有振動数の範囲では振動数が低いほど感じやすいといわれている。また、床の固有振動数が 10Hz 以下であると、人間の歩行、小走り等の動作との共振の可能性があると考えられている。本上空通路は新棟から出の長さ約 18m の片持ち構造となっており、設計時には振動障害を防ぐために構造部材には十分な剛性を持たせる配慮を行った。本測定による結果検証としても、4 人ピッチ歩行時では本上空通路は市民の自宅への要求性能程度の居住性能を有し、12 人程度の通路歩行においても居室の居住性には大きな影響はないと判断できる性能となっている。このことから、現時点においては構造設計上、振動障害の問題は生じていないものと予測できる。本病院は全室個室の産婦人科として、自室分娩可能な設備を有しており、現在の動線計画から本通路が緊急性の高い手術の

図 9 固有モード図

ための急速搬送に利用される可能性は稀である。しかしながら、病院という用途や今後の動線計画の変更などを考慮して、移動ベッドに患者を乗せた急速搬送などの緊急性のある加振状態を設定することで、さらに有用な結果を得ることができるものと考えられる。今後の建物使用にあたって、利用者による知覚判定アンケート等を実施し、環境測定データのさらなる蓄積と分析を試みることで、本測定結果がより有用なデータとなることも期待される。

7. あとがき

本稿は、福田理事長をはじめ、病院スタッフの方々のご快諾を得て執筆させて頂きました。関係各位に、ここに心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説、日本建築学会、2004.5
- 2) Chizuko NODA, Takashige ISHIKAWA : HABITABILITY GRADE OF FLOOR VIBRATION BASED ON RESIDENTS' CONSCIOUSNESS, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.638, pp. 435-441, 2009.4 (in Japanese)
野田千津子、石川孝重：床振動に対する居住者意識に基づいた性能ランクの設定に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 638 号、pp.435-441、2009.4
- 3) 西川孝夫、荒川利治、久田嘉章、曾田五月也、藤堂正喜、山村一繁：シリーズ<建築工学>4 建築の振動一応用編、朝倉書店、2008.8
- 4) 豆田祥平、富澤徹弥、BAE KUNKUK、角友太郎：病院内における道路上空通路の歩行振動評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II、pp.571-578、2020.9

[2020 年 5 月 19 日原稿受理 2020 年 7 月 20 日採用決定]