

木造梁と RC スラブからなる 床構造の歩行時振動予測評価と実測結果 — 熊谷組福井本店スラブの設計と実測 —

土居龍斗* 前川利雄* 佐部哲治** 仙葉香織***

近年、環境面への配慮から木材を建築物の構造躯体に導入する事例が増えている。当社では、熊谷組福井本店の建て替えにおいて木鋼ハイブリッド構造を採用した。熊谷組福井本店は、8m×14.4m の無柱の大空間を有し、床はコンクリートスラブと木の大梁からなる。無柱の大空間スラブでは人歩行時の床振動が他の在室者に不快感をもたらす可能性がある。そこで本報では、熊谷組福井本店の人歩行時の床振動について、設計時の事前解析、現地での測定、さらに測定後に修正解析モデルを作成し、事後解析を実施した。以上の結果を基に木材を柱梁の一部に使用した建物における人歩行時のコンクリートスラブの床振動の性状についてまとめた。

キーワード：床振動、人歩行、予測評価、振動測定、木質構造

1. はじめに

近年、持続可能な社会に移行すべく、中大規模の建築物の躯体にも木材を導入する事例が増えている。このような背景もあり、当社では熊谷組福井本店（以下、福井本店）の建て替えで木鋼ハイブリッド構造を採用した。

無柱の大空間においては、人歩行時の鉛直方向振動が他の在室者に不快感を及ぼす可能性がある。そのため、木造建築物においても、歩行振動に関する多くの検討がなされている。例えば神谷ら¹⁾は、木造家屋内における在室者の違いによる振動の違いを明らかにした。また、横山²⁾は、木造大スパン床における歩行振動に対する振動感覚や評価と対応する性能値の調査を実施した。

福井本店は、木の柱梁で構成された 8m×14.4m の無柱の大空間を持ち、床はコンクリートスラブとなっている。木材の構造躯体にコンクリートスラブが備わった構造における床振動調査の報告は少なく、特性自体も不明である。

そこで本報では、福井本店の床振動の性状について以下の手順で予測・調査を行った。

- ① 設計時の条件から線形 FEM 解析により人歩行時床振動を予測
- ② 実際の建物における床振動測定により設計時の事前解析の妥当性について確認
- ③ 実測値を参考に作成した修正モデルを用いて FEM 解析を実施し、人歩行時床振動を確認

本報では以上の結果から、木材の構造躯体にコンクリートスラブが仕様の床の振動性状についてまとめた。

2. 対象建物

Fig. 1 に対象とした福井本店の 3 階の伏図を示す。図中の破線で囲んで示した執務空間は 8m×14.4m の無柱空間で、床はコンクリートスラブと木の大梁からなる。本報では破線部の床振動に注目し、検討を行った。Fig. 2 に 2 通りの軸組図を示す。Table 1 に部材断面を、Table 2 に材料諸元を示す。Fig. 1, Fig. 2 中の大梁は、sG が鉄骨、wG が木材を利用している。床スラブのコンクリート強度は、設計では Fc27 となっている。木梁は鋼板挿入式ドリフトピン接合である。

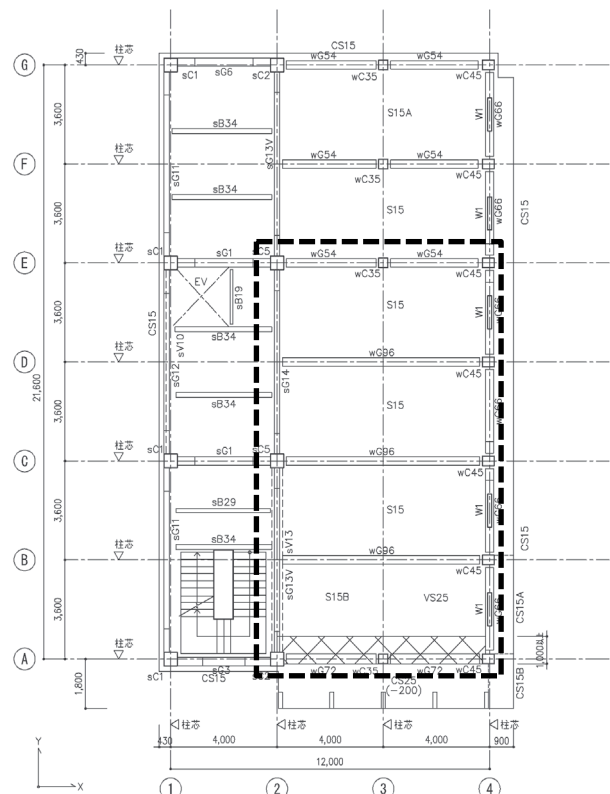


Fig. 1 福井本店 3 階伏図

* 技術本部 技術研究所 防災技術研究室
 ** 北陸支店 建築部 熊谷組福井本店作業所
 *** 建築事業本部 建築技術統括部 建築構造技術部

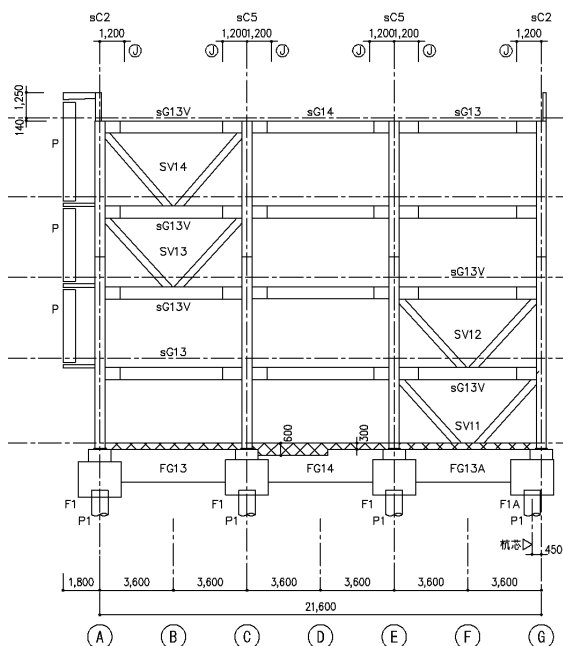


Fig. 2 福井本店 2通り軸組図

Table1 主要部材断面

	符号	部材断面
大梁	sG1	H-600×300×12×28
	sG3	H-588×300×12×20
	sG6	H-600×200×12×28
	sG11	H-588×300×12×20
	sG12	H-588×300×12×20
	sG13V	H-600×300×16×36
	sG14	H-588×300×12×20
	wG54	230×570
	wG66	300×600
小梁	sB19	H-198×99×4.5×7
	sB29	H-298×149×5.5×8
	sB34	H-346×174×6×9
	スラブ	符号 厚さ
	S15	150 mm

Table2 材料諸元

名称	ヤング係数[N/mm ²]	比重[N/m ³]
鉄骨	2.05×10^5	7.70×10^4
E95-F270 (からまつ)	9.50×10^3	5.00×10^3
コンクリート (Fc27)	2.27×10^4	2.40×10^4

3. 事前予測解析

3. 1 事前解析における振動床応答解析手法

解析モデルは立体フレームモデルとし、柱と梁は線材ビーム要素、スラブは板要素とした。スラブは等価な質量を持つ平板に置換し、異なるスパンでのスラブ段差は無視した。EVシャフトや、階段室は床開口として扱った。柱梁接合部にはフェース位置まで剛域を設けた。スラブの厚さ方向中心の位置を基準として、大梁、小梁にはオフセット(芯ずれ)を考慮した。境界条件は鉄骨大梁の接合部は剛接合、鉄骨小梁と木の梁の接合部はピン接合とした。上下階の柱中央はピン支持とした。また、減衰モデルはひずみエネルギー比例型とし、 $h=0.01$ と与えた。

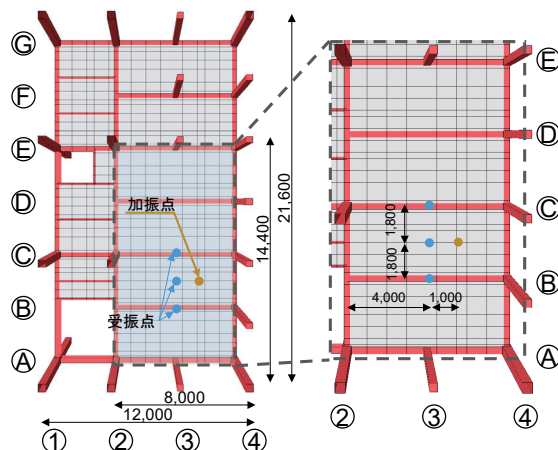


Fig. 3 事前解析の架構モデルと加振点・受振点

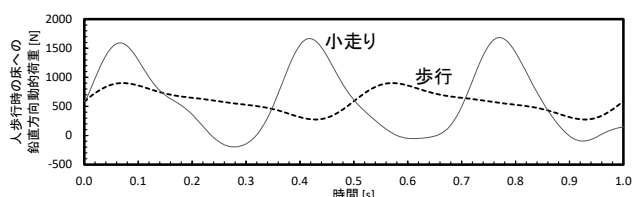


Fig. 4 鉛直方向動的荷重モデル

積載荷重は事務所の床設計用積載荷重の $2,900\text{N/m}^2$ と設定し各節点に均等に与えた。

本解析では、上記の架構モデルについて、固有値解析を行った。また、人歩行時を想定した鉛直方向の動的荷重を与え、時刻歴応答解析を行った。架構モデルと時刻歴応答解析における加振点、受振点を Fig. 3 に示す。歩行荷重モデルは、建築物荷重指針・同解説³⁾に則って与えた。歩行時と小走り時の床への鉛直方向動的荷重を Fig. 4 に示す。

3. 2 解析結果

3. 2. 1 固有振動数とモード形状

固有振動数と対応するモード形状を Fig. 5 に示す。Fig. 5 からのモード形状と z 方向の有効質量比から本報で注目する Fig. 1 の破線部については、1次モード (13.4 Hz) と2次モード (13.9 Hz) で鉛直振動が卓越していることが分かる。

モード形状に着目すると、1次モードから3次モードでは特に、スラブ中央にあたる3通りでの応答値が大きい。

3. 2. 2 居住性能評価結果

一人歩行時の床振動の時刻歴応答解析結果を居住性能評価指針⁴⁾に照らして検討した結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) は一人歩行時と一人小走り時におけるスラブ中央部の鉛直方向加速度の時刻歴応答波形である。

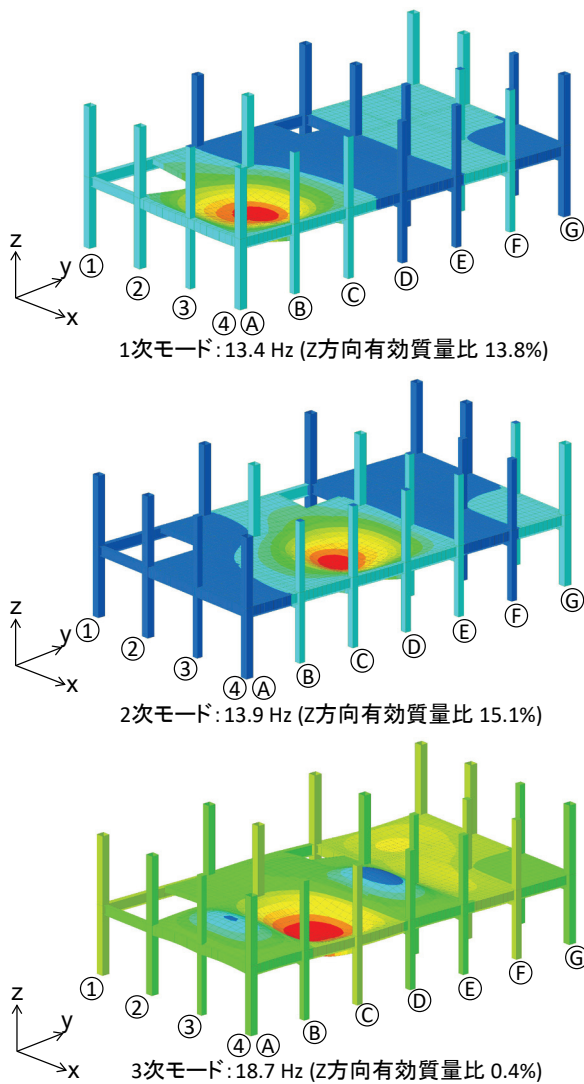
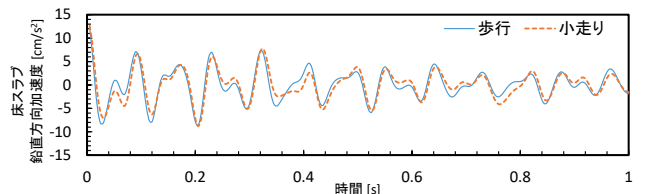


Fig. 5 固有振動数とモード形状

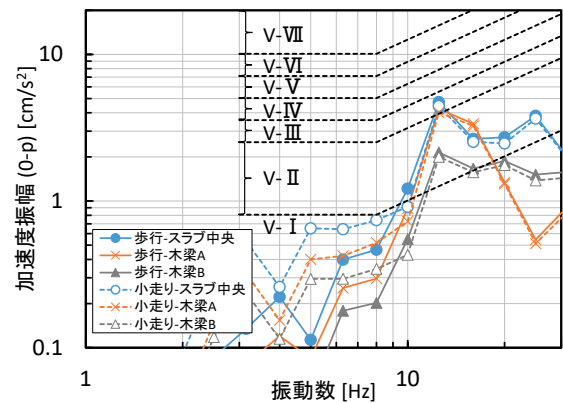
Fig. 6 (b) は居住性能評価指針による評価曲線 (Fig. 6 (b) 中, 黒破線) と1/3 オクターブバンド分析結果 (Fig. 6

Table 3 鉛直振動に関する評価レベル⁴⁾

評価レベル	評価の観点	気になり具合	不快
V-VII		非常に気になる	かなり不快である
V-VI		かなり気になる	やや不快である
V-V		やや気になる	
V-IV		あまり気にならない	あまり不快でない
V-III			
V-II		ほとんど感じない	



(a) 時刻歴応答解析結果



(b) 鉛直成分の1/3 オクターブバンド分析結果

Fig. 6 歩行時床振動応答解析結果

(b) 中, 青線, オレンジ線) との比較である. ここで, Table 3 に鉛直振動に対する居住性能評価レベルを示す. Fig. 6 (b) において, 固有値解析で算出された1次モードの固有振動数 13.4 Hz 付近に着目すると, 加速度振幅が最大となっており, 1人歩行時, 1人小走り時とともにV-III相当となっている. 受振点は, モード解析で1次モードにおいて振幅が大きい. 歩行時の床振動解析でも,

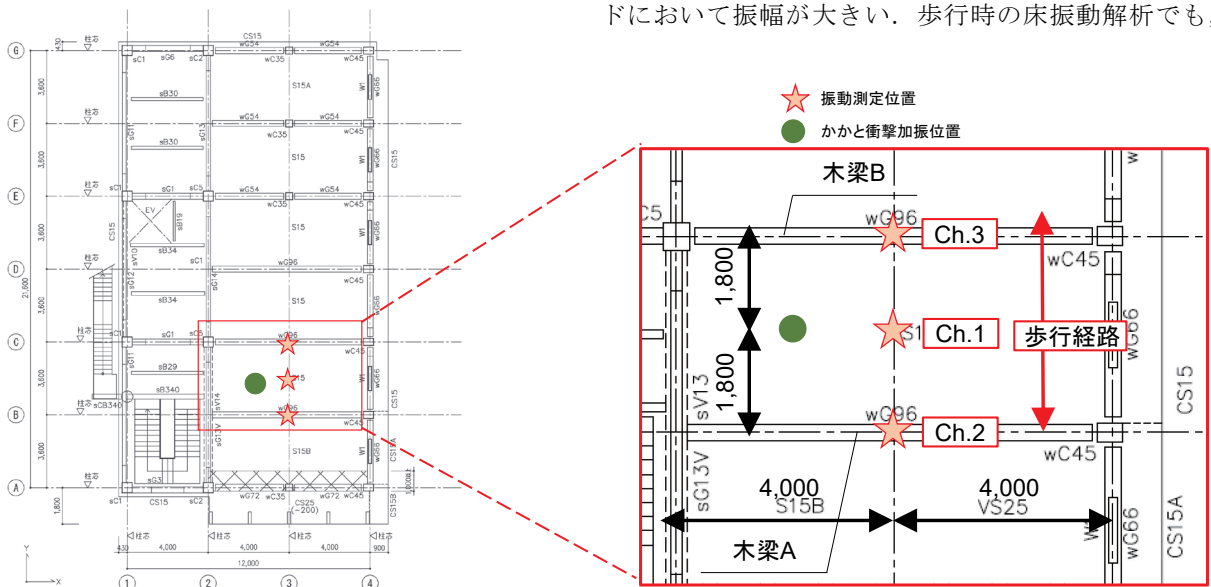
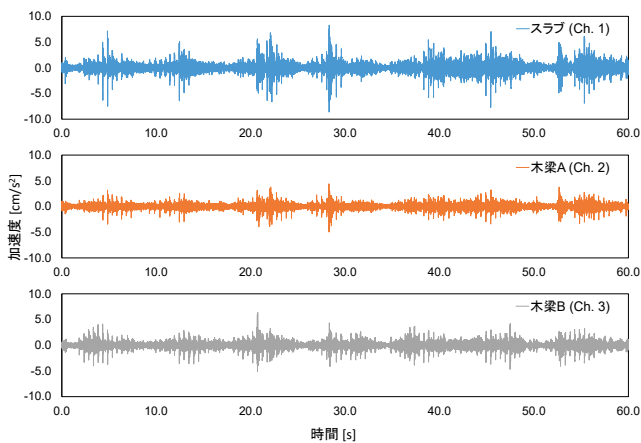
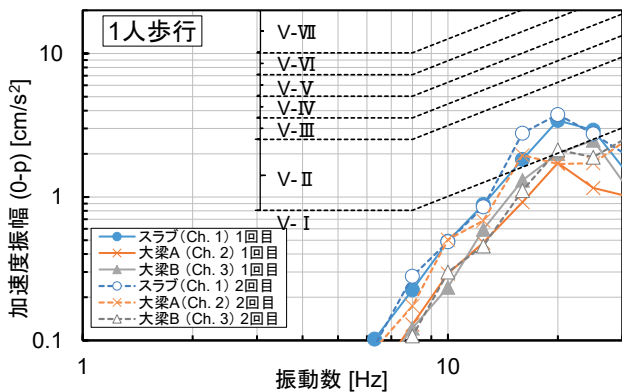


Fig. 7 振動測定位置と歩行経路

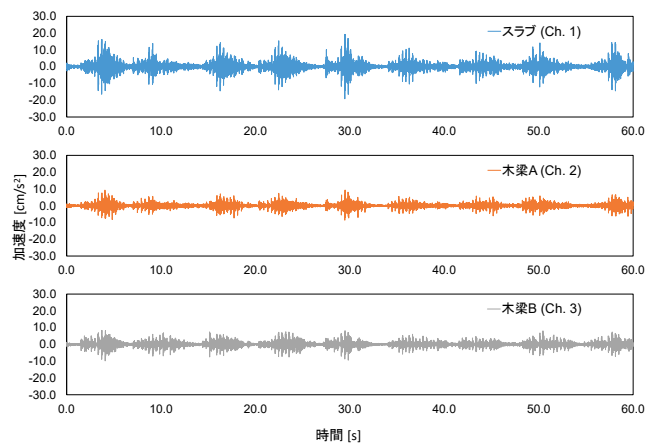


(a) 時刻歴応答波形

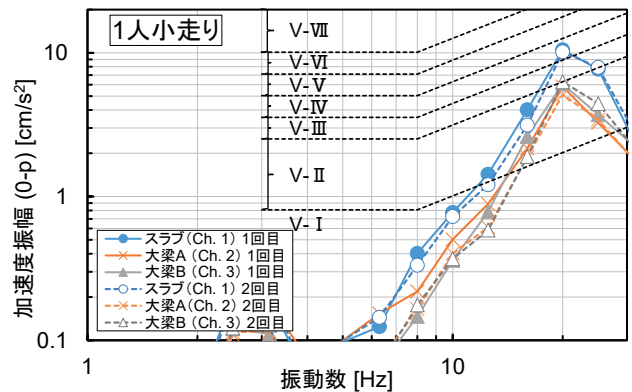


(b) 鉛直成分の1/3 オクターブバンド分析結果

Fig. 8 1人歩行時振動測定結果



(a) 時刻歴応答波形



(b) 鉛直成分の1/3 オクターブバンド分析結果

Fig. 9 1人小走り時振動測定結果

13.4Hz 付近で大きな値を示した。本結果は、前項で示したモード解析の結果と整合していると言える。

4. 振動測定結果

4.1 1人歩行時測定結果

現地における振動測定は事前解析の条件を踏まえ、Fig.1の破線部で実施した。測定方法としては、定点に加速度計を設置してその周りで歩行し、鉛直方向加速度を測定した。振動測定位置と歩行経路をFig.7に示す。Ch.1は床スラブ中央付近、Ch.2は一端が柱で、もう一端が梁に接合された木製大梁（以下、木梁A）上、Ch.3は両端が柱に接合された木製大梁（以下、木梁B）上に設置した。測定にはサーボ型加速度センサーを使用した。測定時のサンプリング周波数は512Hz、測定時間は60sとした。また、測定は2回行った。

Fig.8に一人歩行時の測定結果を示す。Fig.8(a)に示されている時刻歴応答加速度波形は、上からCh.1（スラブ中央）、Ch.2（木梁A）、Ch.3（木梁B）の1回目の測定結果である。Fig.8(b)は1/3オクターブバンド分析結果である。2度の測定におけるばらつきは小さく、スラブ中央部においては20HzでV-II、木梁Aや木梁B上においては、最も大きな値でもV-Iと、人体に感じる影響は

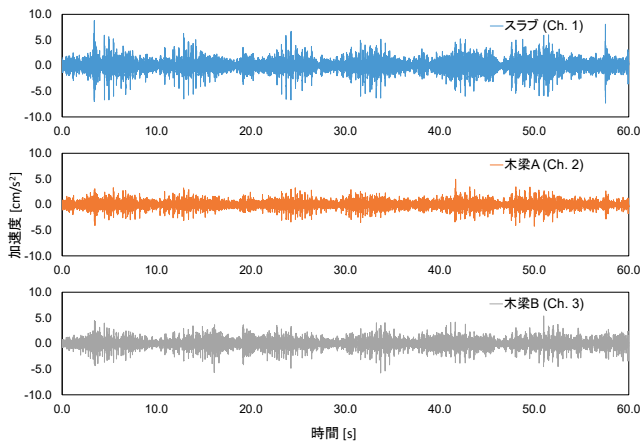
小さいと考えられる。

4.2 1人小走り時測定結果

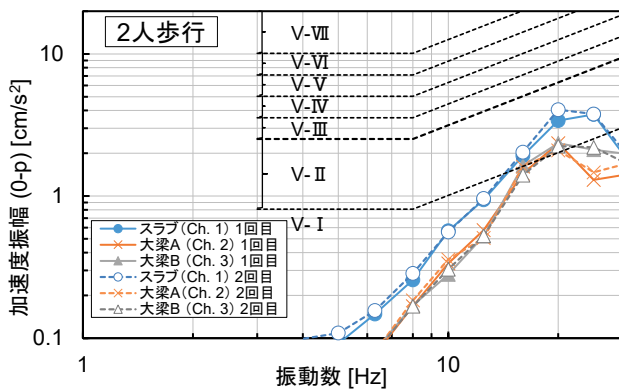
Fig.9に1人小走り時の測定結果を示す。測定にあつてのサンプリング周波数や、測定時間、歩行経路、測定回数に関しては1人歩行時と同じ条件で実施した。1人小走り時も1人歩行時と同様に全ての測定点で20Hzで加速度振幅が最大値を示した。特に、スラブ中央においては2回ともV-IVとなった。また、木梁A、木梁B上では20HzでV-IIIとなった。1人歩行時と比べても最大値が大きいことから、小走り時においては歩行時と比較しても床振動を感じやすく、場合によっては不快と感じる可能性も懸念される。しかし、事務所内での小走りをする事は少なく、居住性に与える影響は少ないと考えられる。

4.3 2人歩行時測定結果

Fig.10に2人歩行時の測定結果を示す。2人歩行時は、進行方向に2人が列をなして経路を歩行した。サンプリング周波数や測定時間、歩行経路、測定回数は1人歩行時の条件と同じである。Fig.10を見ると、Fig.8と比べて歩行者の直和の2倍とはなっていない。最大で20Hz時にV-IIとなった。2人の歩行は意図的に歩調を合わせることはしていないため、2人の接地のタイミングによって

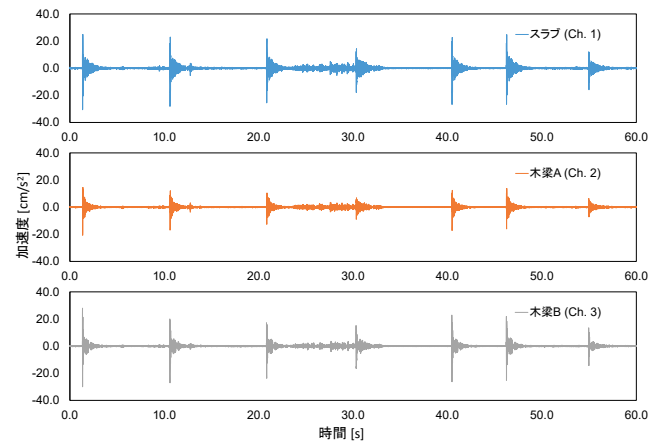


(a) 時刻歴応答波形

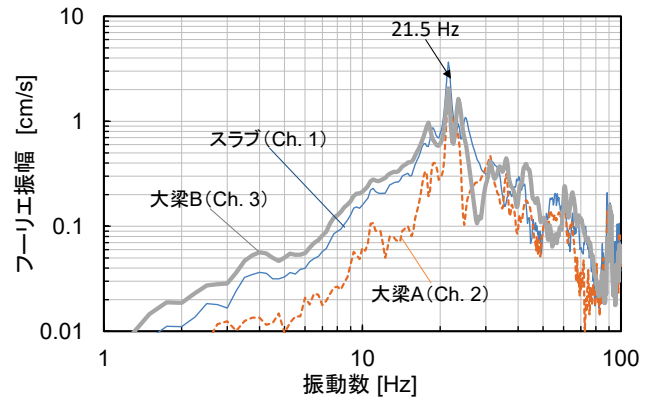


(b) 鉛直成分の1/3 オクターブバンド分析結果

Fig. 10 2人歩行時振動測定結果



(a) 時刻歴応答波形



(b) フーリエスペクトル

Fig. 11 かかと衝撃加振時測定結果

は、周期がずれることから、1人歩行の2倍の応答には至らなかったとみられる。

なお、前川ら⁵⁾によると、多人数で歩行した時の応答は、歩行人数の等倍ではなく、平方根倍に対応としている。本結果でも同様に、多人数で加振しても、人数の等倍ほどの応答に至らず、平方根倍程度の増加だった。

4. 4 固有振動数と減衰の同定

床の固有振動数と減衰比を求める目的で、かかと衝撃加振を行い、床の応答加速度を測定した結果を Fig. 11 に示す。Fig. 7 に示したかかと衝撃加振位置で加振し、測定位置は歩行時測定時と同じである。測定時間は 60s で、その間に 7 回のかかと衝撃加振を行った。

Fig. 11 (a) はかかと衝撃加振時における、加速度時刻歴応答波形を示す。Fig. 11 (b) は、Fig. 11 (a) の加速度波形をフーリエスペクトルとしたものを示す。全ての測定点で 21.5Hz で、フーリエ振幅が最大値を示している。鉛直振動に対しては、エリアー帯で 21.5Hz 付近で共振することが考えられる。これまでの歩行振動時の結果と照らし合わせると、かかと衝撃加振時で共振した 21.5Hz に近い 20Hz で加速度振幅が最大値を示しており、歩行振動時の応答と整合している。

減衰比を求めるために用いたかかと衝撃時の加速度応答波形と減衰曲線を Fig. 12 に示す。Fig. 12 はスラブ上の

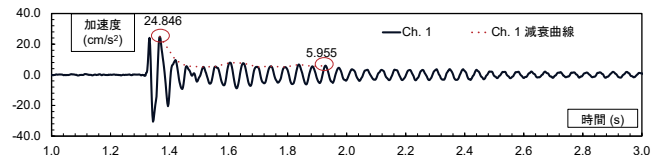


Fig. 12 かかと衝撃加振時の加速度時刻歴波形

波形のみとなっているが、木梁 A、木梁 B 上でもそれぞれ求めた。対数減衰法による対数減衰率の式を次に示す。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln d \quad (1)$$

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (2)$$

$$d_i = \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad (3)$$

ここに、

n : 取得したデータ数

d_i : i 番目の振幅比

a_i : i 番目の振幅

以上の式から減衰比を求めると、スラブで 0.028、木梁 A で 0.029、木梁 B で 0.044 となった。なお、減衰比を求めるために、振幅のデータ数は、かかとで床に衝撃が加わった時の最も大きい振幅から 10 データをとった。

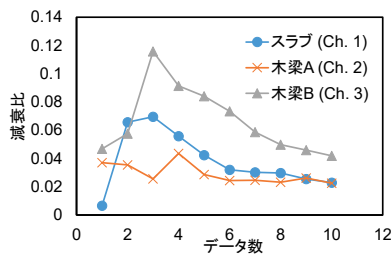


Fig. 13 振幅のデータ数と減衰比の関係

Fig. 13 に減衰比と振幅のデータ数との関係を示す. データ数が少ないうちは減衰比のばらつきも大きい, データ数を増やすと, 減衰比が一定の値に収束をしている.

今回減衰比を求めるにあたり, 採用したデータ数が少ないと, Fig. 13 に示すように, 減衰比のばらつきが大きいため, 減衰比が収束するデータ数 10 点を目安に求めた.

5. 事後解析結果

5. 1 新架構モデル

事前解析と, 現地測定では, 卓越振動数に大きな差異があった. 卓越振動数に差異が生じたのは次の原因が考えられる.

- ・事前解析では, 床荷重に積載荷重として, 事務所用の $2,900 \text{ (N/m}^2\text{)}$ を導入したが, 現地測定の際は, 積載荷重が存在しなかった.
- ・実際のコンクリートスラブの圧縮強度が設計時と比べて, 大きくなっていた.
- ・ブレースは設計において長期荷重を負担していない仮定としているため, Fig. 2 中に示している SV12 を事前解析では無視していた.
- ・木梁接合部の境界条件をピン接合としていたが, 実際はピン接合と比べて回転剛性を持っていた.

以上の原因を考慮し, 事後解析に向けて修正解析モデルを作成した. 以下に変更内容を示す.

- (モデルA) 事前解析モデルの積載荷重を0とした.
- (モデルB) モデルAに加えて, コンクリートスラブの, 現場での4週強度の圧縮試験の結果が平均 $\sigma_B=38.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ であったため, ヤング係数 $E=2.76 \times 10^4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ と与えた⁶⁾.
- (モデルC) モデルBに加えて, SV12を加味した. SV12は座屈拘束ブレースであるため, 芯材と同じ剛性を持つ断面の線材に置換した.
- (モデルD) モデルCに加えて, 木梁の境界条件は, ドリフトピンと木材の間に摩擦が存在することを考慮して, 剛接合とした.

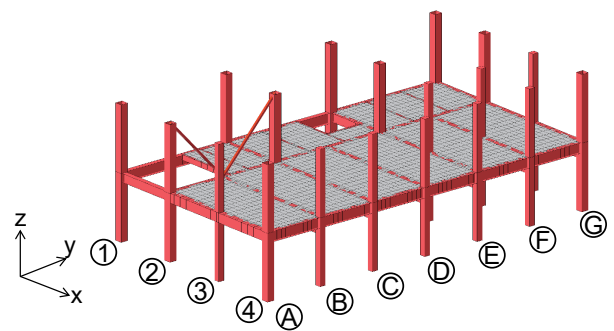
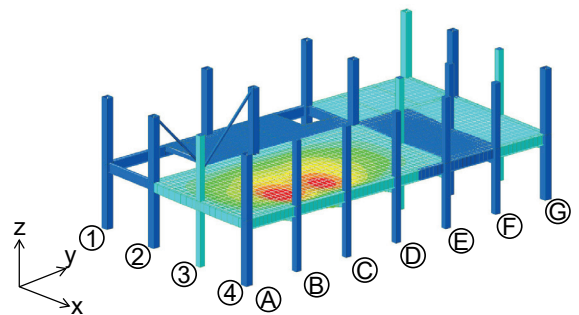
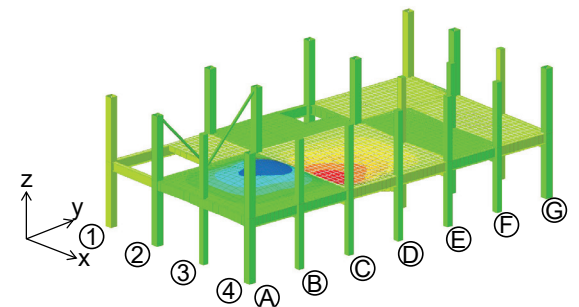


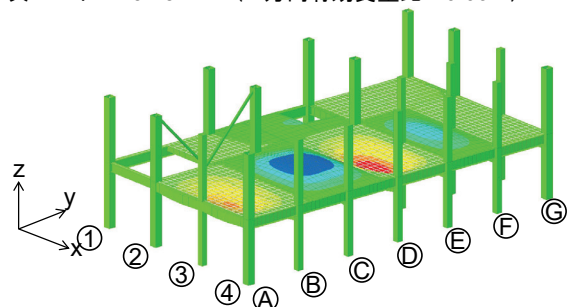
Fig. 14 事後解析の架構モデル (モデルD)



1次モード: 18.13 Hz (Z方向有効質量比: 23.47%)



2次モード: 19.25 Hz (Z方向有効質量比: 0.06%)



3次モード: 22.34 Hz (Z方向有効質量比: 0.21%)

Fig. 15 事後解析モデル(モデルD)の固有振動数とモード形状

Table 4 モデル毎の固有振動数

	1次モード	2次モード	3次モード
事前解析	13.4 Hz	13.9 Hz	18.6 Hz
モデルA	13.4 Hz	13.9 Hz	18.7 Hz
モデルB	13.7 Hz	14.2 Hz	19.4 Hz
モデルC	14.0 Hz	14.7 Hz	19.0 Hz
モデルD	18.1 Hz	19.3 Hz	22.3 Hz

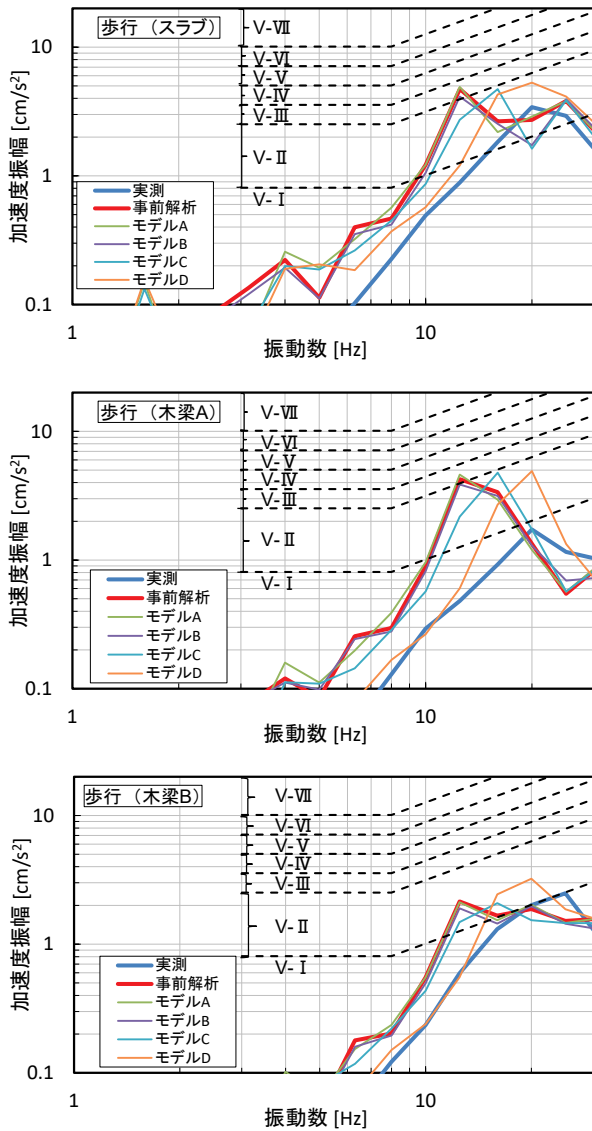


Fig. 16 1人歩行時の現地測定と事後解析の1/3オクターブバンド分析結果の比較

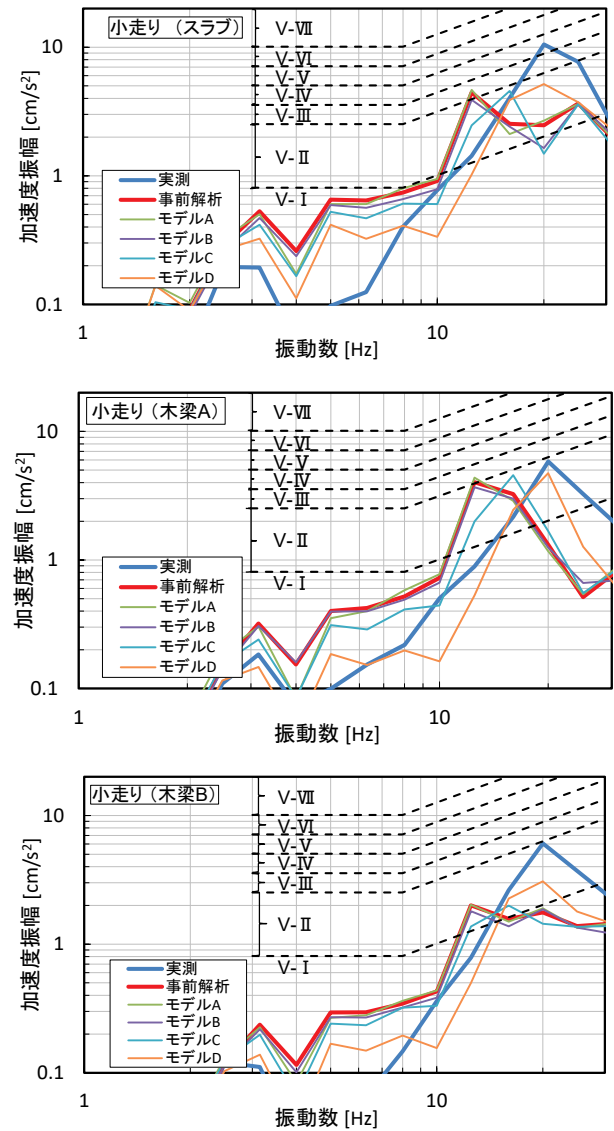


Fig. 17 1人小走り時の現地測定と事後解析の1/3オクターブバンド分析結果の比較

以上を踏まえて変更した事後解析モデルDをFig. 14に示す。事後解析モデルでも、事前解析モデルと同様に、固有値解析と、人歩行時を想定した鉛直方向の動的荷重を与えた時の時刻歴応答解析を行った。時刻歴応答解析における事後解析モデルの加振点と受振点は事前解析と同じである。

5. 2 事後解析の結果

Table 4にモデル毎での固有振動数を示す。モデルAとBは、事前解析と同等の固有振動数となった。モデルCは1次固有振動数が14.0Hzと事前解析やモデルA、モデルBと比べてわずかに高くなった。モデルDは1次固有振動数が18.1Hzで、現場測定で実施した、かかと衝撃加振時の21.5Hzに最も近づいた。

モデルDの固有振動数とモード形状をFig. 15に示す。モード形状は事前解析と同様にスラブ中央で大きな応答

を示している。しかし、固有振動数が高くなっており、床全体が高い振動数で応答しやすくなったと言える。

Fig. 16に1人歩行時の実測結果と事後解析結果、さらに事前解析結果の比較を示す。事後解析モデルDの卓越振動数が事前解析に比べて、高振動数側に推移しており、加速度振幅の最大値を記録した振動数帯域が、実測結果と同じ20Hzとなったと考えられる。

モデルAは事前解析で想定した積載荷重を0としたモデルであり、モデル全体の重量は、事前解析モデルと比べて55%に低減された。しかし、固有振動数に与える影響が少ないことから、事前解析と同様な結果となったと考えられる。

モデルBはコンクリートスラブの強度を変更した。木梁と組み合わせた合成梁の剛性を事前解析モデルと比較したが、変化は微小だった。そのためモデルBも、事前解析と同様の結果と考えられる。

モデルCでは、座屈拘束ブレースを導入した。ブレース

スの導入によって、わずかに固有振動数が高くなったが、モデル D と比較すると低いことから、ブレースが及ぼす固有振動数への影響は小さいと考えられる。

モデル D では、木梁接合部を剛接合と設定して解析した。固有振動数が実測値に近づき、1/3 オクターブバンド分析結果でも実測値と同様に 20 Hz の帯域で加速度振幅の最大値を記録した。そのため、床振動に与える影響としては、木梁接合部をピンから剛接合に変更することが最も大きかったと言える。

6. まとめ

本報では、木鋼ハイブリッド構造を採用した、福井本店の床振動の性状について予測・調査した結果について報告した。本報の内容を以下にまとめる。

- ・設計時の解析では、1 人歩行、1 人小走り時ともに V-III 相当の評価だった。なお、1/3 オクターブバンド分析結果によると、1 人歩行、1 人小走り時ともに 13.4Hz 付近で最大の加速度振幅となった。この結果は、モード解析の結果と整合するものとなった。
- ・現地で実際に人歩行時の床振動を測定した。居住性能評価としては、1 人歩行時では最大で V-II 相当、1 人小走り時では V-IV 相当、2 人歩行時では最大 V-II 相当となった。2 人歩行時において、人数を増やしても応答自体の増加が小さいのは、2 名の歩行のタイミングを合わせていなかったからであると考えられる。
- ・現地でかかと衝撃加振時の測定結果から、固有振動数を求めた。固有振動数は 21.5Hz と、事前解析の結果とは異なるものだった。
- ・かかと衝撃加振時の測定結果から、減衰比を求めた。減

衰比は対数減衰法によって求め、スラブで 0.028、大梁 A で 0.029、大梁 B で 0.044 となった。

- ・事前解析と現地測定の結果の違いを考慮して、修正モデルを作成し、事後解析を実施した。修正事項としては、床の荷重を変更、コンクリートスラブの強度を変更、座屈拘束ブレースの導入、木梁接合部の境界条件の変更であり、最も影響が大きかったのは、木梁接合部の境界条件の変更だった。

本報のように、木を構造躯体に用いた大スパン床においては、調査事例が少なく、今後、より精緻に予測評価ができるように調査データを蓄積する予定である。

謝辞

北陸支店熊谷組福井本店作業所の皆様には、現地での振動測定に際し多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 神谷俊行, 小谷朋央貴, 佐野泰之, 富田隆太: 木造床振動測定時の人荷重の影響について, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 57 号, pp. 693-696, 2018 年 6 月.
- 2) 横山裕: 複数歩連続した歩行振動の性能値に関する基礎的検討, 木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法 (その 1), 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 691 号, pp. 689-695, 2013 年 9 月.
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015), 2015 年 2 月.
- 4) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018 年 11 月.
- 5) 前川利雄, 青木浩幸, 神前泰: 鉄骨造事務所ビル大型スラブの人歩行時床振動の予測と実測結果, 熊谷組技術研究報告, 第 76 号, pp. 33-38, 2017 年 12 月.
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010 年 2 月.

Prediction assessment and measurement results of the walking vibration of a floor structure consisting of timber beams and reinforced concrete (RC) slab: Design and measurement of slab at Kumagai Gumi's Fukui Office

Ryuto DOI, Toshio MAEGAWA, Tetsuji SABE, and Kaori SEMBA

Abstract

In recent years, timber has been increasingly used in the structural framework of buildings for environmental reasons. Kumagai Gumi rebuilt its Fukui Office, for example, into a hybrid structure of timber and steel. The Fukui Office has a large column-free space of 8 m by 14.4 m. The floor consists of slab concrete and large wooden beams. However, the floor vibrations caused by people walking on the large column-free slab may cause discomfort to other occupants. In this report, floor vibrations during human walking in the Fukui Office were analyzed in advance during design, measured on site, then analyzed with a modified analysis model incorporating the measurements. Based on the results, a summary is provided of the Characteristics of the floor vibrations in the reinforced concrete (RC) slab during human walking in a building containing timber as part of its columns and beams.

Key words: floor vibration, human walking, prediction assessment, vibration measurement, timber construction
