

鉄骨造建物の鉄道振動予測手法に関する検討

仲宗根 淳 * 濱田 弘行 **

鉄道軌道に近接して建物が建設された場合、その振動が伝播して予想以上に応答が増幅することがある。その状況において工場等で嫌振機器が設置されると、建物の応答がその機器の振動許容値を満足しないケースが発生し、製品歩留まりに影響する可能性がある。このことから鉄道振動の影響を予測するために鉄骨建物の振動測定と解析検討を実施した。本検討から入力損失の程度や建物内の応答倍率が解析検討で精度良く捉えられることを示す。またこれらの解析検討結果と建設前の振動測定結果を用いることで事前に鉄道振動の影響を比較的高周波数領域まで予測できることを示す。

キーワード：鉄道振動，入力損失，FEM，応答予測

1. はじめに

鉄道軌道に近接して建物が建設された場合、振動が建物に伝播し予想以上に応答が増幅することがある。このような状況にて工場等で嫌振機器が設置されると、嫌振機器には振動許容値が存在するため、応答値がその許容値を満足しない可能性があり製品歩留まりに影響することになる。また、最近の事務所ビルは大スパン化が進み、以前の建物に比較して一般に揺れやすい構造になっている場合が多い。そのような建物に床の固有周波数に近い振動が外部から伝播すると応答が増幅しやすく、居住性の観点で建物使用者の満足度が低下することが考えられる。

建物竣工後に振動障害が発生した場合の対処は簡単ではなく、計画段階で外部振動の影響を精度よく予測して設計に反映させることができれば、施主、設計者および施工者の共通の利点になる。

以上の背景から、鉄道振動の建物に対する影響を事前に把握する手法を検討する目的で事務所ビルの振動測定と解析検討を実施した。建物計画地の振動測定結果を用いて計画段階で鉄道振動に対する建物の応答を一定の精度で予測可能なことを報告する。

2. 振動測定

2.1 測定の概要

測定対象建物は関東地方の JR 線に近接して建設された鉄骨造 4 階建ての事務所ビルである。基礎は直接基礎（べた基礎：盤厚 30cm）を採用している。建物敷地は JR 線と境界を接しており、敷地境界から最短の鉄道軌道までは 3m 程度の距離にある。建物の位置関係および測定位置の概要を Fig.1 と Fig.2 に示す。図中の丸印は第 4 回測定時の耐圧盤上（1F と表記している）の測定位置を示して

いる。

振動測定は建物建設前から竣工にかけて Table1 に示す時点で 4 回実施した。

Table 1 振動測定の内容

測定	測定時点
第 1 回測定	工事着工前の更地上における測定
第 2 回測定	耐圧盤構築前の掘削底（捨てコンクリート上）における測定
第 3 回測定	耐圧盤打設後鉄骨建方前の耐圧盤上における測定
第 4 回測定	建物竣工後の各階床における測定

測定方向は水平 2 方向（線路方向が y 方向）と鉛直方向とした。測定時間は各サンプル 31 秒とし、サンプリング周波数は 512Hz としている。測定は上りと下りの両線に対し実施した。その測定結果を概観すると建物に近い上り線の応答が大きいことから、本報告の議論は全て上り線の測定データを基に実施している。

2.2 地盤上の測定結果

第 1 回から第 4 回の鉛直方向の測定結果を 1/3 オクターブ分析（ピークホールド）を行ない Fig.3～Fig.6 に示す。また、各回測定の 3 方向の平均値をまとめて Fig.7～Fig.9 に示す。

各測定の時期やサンプル数は異なるが、データに大きなバラツキはないことがわかる。4 測定中で工事着工前の応答が最も大きく、工事段階が進行するに従い、応答が小さくなる傾向が読み取れる。例えば、更地上（第 1 回測定）の z 方向は 25Hz 帯域で 3gal 程度であるが、建物竣工後（第 4 回測定）の測定では 30Hz 帯域で 0.6gal 程度になっている。また、耐圧盤打設後（第 3 回測定）と建物竣工後（第 4 回測定）の応答は大きく変わらない。

Fig.3～Fig.6 には参考として常時微動を点線で併記し

* 技術研究所 建築構造研究グループ

** 首都圏支店 建築事業部 設計統括部 構造設計部

ている（アベレージング処理で測定時間は 90 秒）。これらの図から 10Hz 帯域程度以下では鉄道振動と常時微動の傾向に大きな違いは無い。しかし、10Hz 帯域以上の比較的高い周波数領域で常時微動と鉄道振動の傾向は異なり、鉄道振動の優勢な成分が比較的高い周波数領域にあることを予想させる。

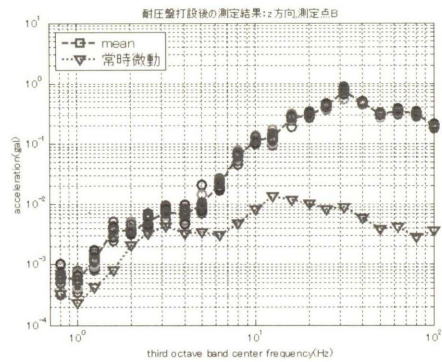
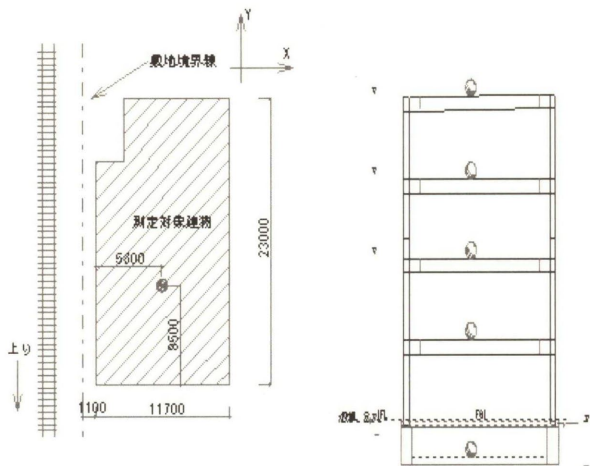


Fig. 5 第3回測定 (z方向)

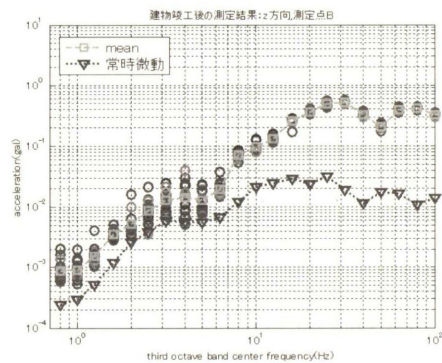


Fig. 6 第4回測定 (z方向)

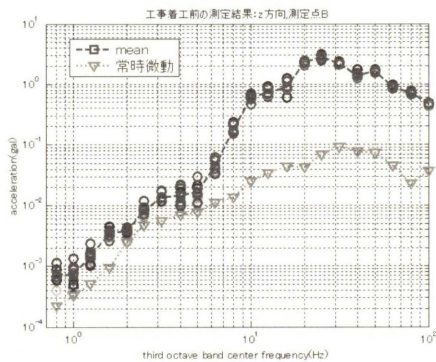


Fig. 3 第1回測定 (z方向)

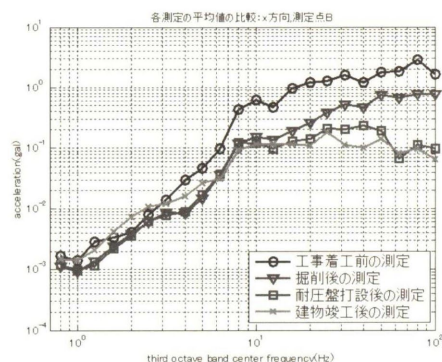


Fig. 7 4測定結果の比較 (x方向)

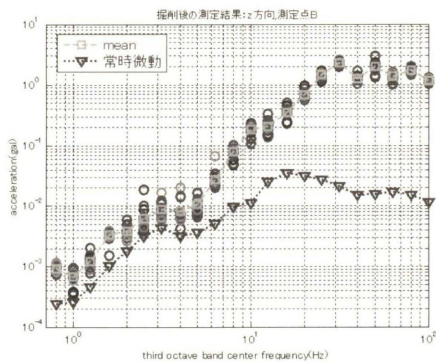


Fig. 4 第2回測定 (z方向)

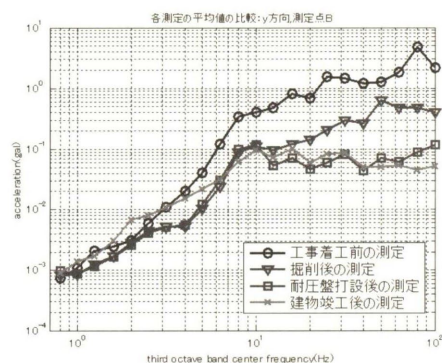


Fig. 8 4測定結果の比較 (y方向)

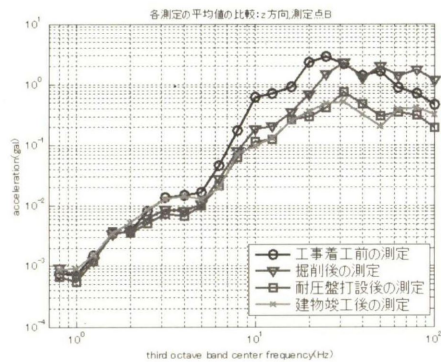


Fig. 9 測定結果の比較 (z 方向)

2.3 建物内の測定結果

第 4 回測定(建物竣工後)においては建物の各階においても測定を実施している。このデータを用いて鉄道振動の入力(耐圧盤上の測定結果)に対する上階の応答振幅比から増幅特性(伝達関数)を求めた。2 階～R 階の入力に対する各方向の増幅特性を Fig. 10～Fig. 12 に示す。なお、測定は 3ch で実施しているので、全階同時測定ではない。しかし、耐圧盤上の測定は基準位置として全ての測定ケースでデータを取得している。よって、図示した増幅特性は同時刻における同一加振源の測定結果から算定している。また、加速度計の設置は基本的に建物のほぼ中央で小梁上に位置している。ただし、後述する柱からスラブへの増幅を確認する測定ケース(4 階での測定)においては加速度計を小梁上ではなくスラブ中央および柱近傍に設置した。

水平方向の応答では 2Hz 帯域と 6.3Hz 帯域の増幅が顕著である。常時微動のフーリエスペクトルを確認すると、2Hz(x 方向と y 方向), 6Hz(x 方向), 7Hz(y 方向)に卓越成分を確認できるので建物の固有周波数が関係して応答が卓越していると考えられる。増幅率は最大で 10 倍を超えている。

鉛直方向では 2 階～4 階で 10Hz 帯域の増幅が顕著である。また屋上階は 6.3Hz 帯域に卓越周波数が存在する。増幅の程度は最大で 10 倍を超える値を示している。

なお、構造計算書に記載されている、層剛性と建物重量(竣工直後のため固定荷重のみを考慮した)から固有値解析を実施すると、x および y 方向ともに固有周波数は 1.2Hz となる。測定結果(2Hz)と若干差異があるが、振動振幅が地震に比較して小さいことから乾式の外壁の剛性が関与したことが要因の一つと考えられる。

Fig. 13 には 4 階の柱近傍に設置した加速度計から求めた増幅特性と、同階スラブ中央の加速度計から求めた増幅特性を比較している。スラブ中央に設置した加速度計の結果はスラブ応答による増幅のため当然柱近傍の加速度計の結果に比較して増幅の程度は大きくなる(同図の 10Hz 帯域で 10 倍程度の差があることが分る)。柱近傍位置での応答倍率は最大で 2 倍程度である。また高周波数側へ卓越周波数が移動していることがわかる。

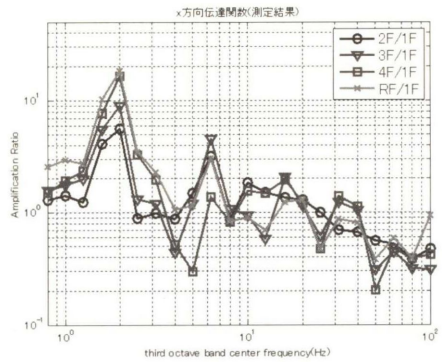


Fig. 10 建物内増幅特性 (x 方向)

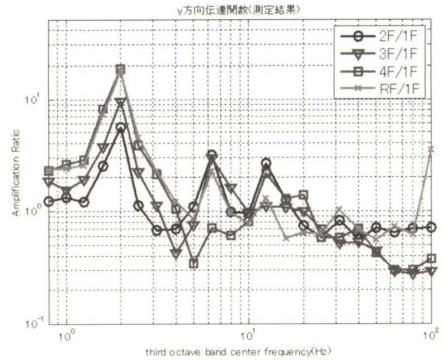


Fig. 11 建物内増幅特性 (y 方向)

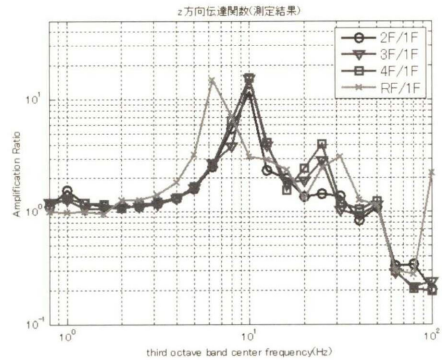


Fig. 12 建物内増幅特性 (z 方向)

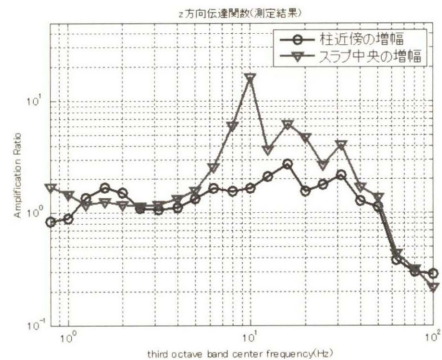


Fig. 13 建物内増幅特性 (z 方向)

3. 測定結果の検討

3.1 入力損失

剛な基礎に振動が伝播した場合、振動の位相差を基礎が拘束するために、建物に入力する地動の有効な勢力が低減する入力損失¹⁾の存在が知られている。本測定にお

いても耐圧盤打設後には明確に応答が小さくなっていることが Fig. 7～Fig. 9 で確認できる。

Table2 に各測定時点における各測定サンプルの時刻歴波形の最大値を平均して比較している。第 4 回の測定結果は水平方向で第 1 回の約 10%，鉛直方向では約 20% に低減している。1/3 オクターブ分析結果と同様に加速度時刻歴波形の最大値においても測定方向に関わらず入力損失が確認できる。

Table 2 加速度時刻歴波形上の最大値 (gal)

方向	第1回測定	第2回測定	第3回測定	第4回測定
x 方向	4.60	1.20	0.64	0.55
y 方向	4.15	0.72	0.37	0.38
z 方向	6.36	3.66	1.40	1.26

Fig. 15～Fig. 17 には第 1 回測定に対する各測定の振幅比を文献¹⁾に示されている(1)式と共に示す。

$$\eta = \frac{V}{\pi B f} \sin\left(\frac{\pi B f}{V}\right)$$

(1)

ここで、 η は地動と基礎盤との振幅比、 V は表面波の速度 (m/sec)、 B は基礎幅 (m)、 f は周波数 (Hz) を示す。 V は Fig. 14 に示すボーリングデータを参照して表層の N 値を換算²⁾して求めたせん断波速度 $V_s=140\text{m/sec}$ を使用した。 B は建物短辺方向幅の 11.7m と建物長辺方向幅の 23.0m を使用した。以上を、(1)式に代入し、その包絡線を spline 補完により求め図中に示した。

Fig. 15～Fig. 17 から各方向で入力損失が確認できる。ただし、鉛直方向では 20Hz 帯域付近で入力損失量が頭打ちとなり、それ以上の帯域で損失量が減少する傾向を呈している。

既往の理論式である (1) 式は水平方向の測定結果を良好に近似している。 y 方向の損失量は(1)式中の B に長辺幅を用いると精度が向上している。

鉛直方向の入力損失量について (1) 式は 20Hz 帯域程度までは良好に近似している。しかし、それ以上の帯域では測定結果から求めた入力損失量が減少傾向のため、過大評価の結果を与えている。

第 2 回測定結果の 20Hz 帯域以上で振動方向に関わらず、入力損失量が低減している特徴がある。これは第 2 回測定は掘削後の耐圧盤構築前時点での測定結果であり、振動の位相差を拘束する躯体がないためと考えている。

一般的な鉄骨造事務所ビルでは、鉛直方向の 1 次固有周波数は 10Hz 前後である。その付近の周波数で建物竣工後は建設前の約 2 割程度に低減していることが分る。

Fig. 18 は剛基礎が基礎幅内にある波形を拘束するということから⁽¹⁾工事着工前の時刻歴波形(30Hz の low pass

filter 処理済)を波が基礎幅を移動する時間幅で移動平均し、1/3 オクターブ分析して耐圧盤打設後の測定と比較して示している。移動平均のような単純な演算によっても、工事着工前の測定結果から耐圧盤打設後の応答を概略把握できることがわかる。

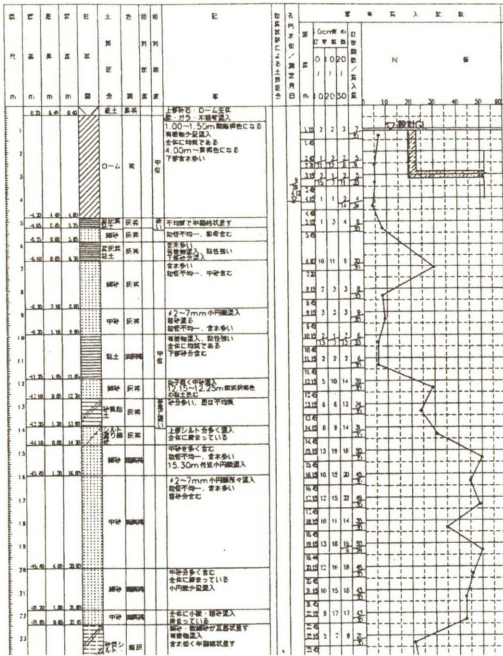


Fig. 14 土質柱状図

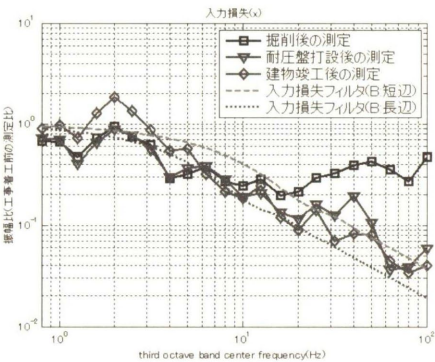


Fig. 15 入力損失 (x 方向)

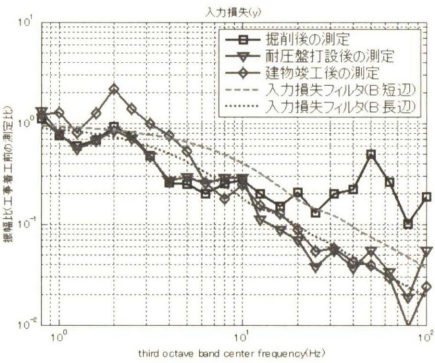


Fig. 16 入力損失 (y 方向)

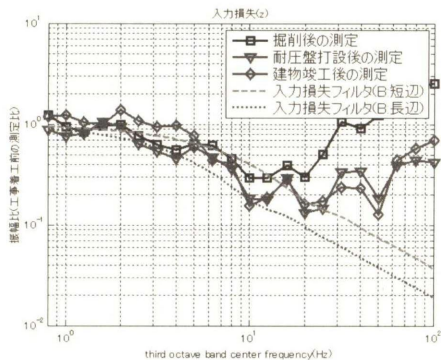


Fig. 17 入力損失 (z 方向)

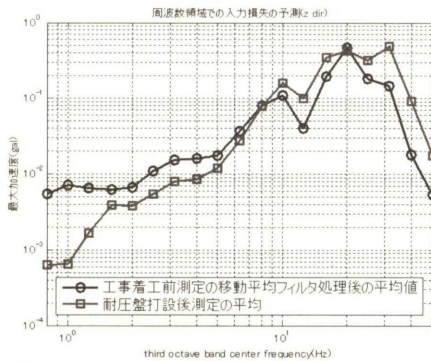


Fig. 18 波形の移動平均処理 (z 方向)

に示す、せん断波速度は Fig. 14 に示すボーリングデータを参照して N 値から換算²⁾して求めた。

解析は単位加振力を鉄道走行位置に与え、各節点の応答加速度を得る周波数応答解析を用いた。解析方向は鉛直方向とし、解析周波数範囲は 100Hz 帯域までとした。

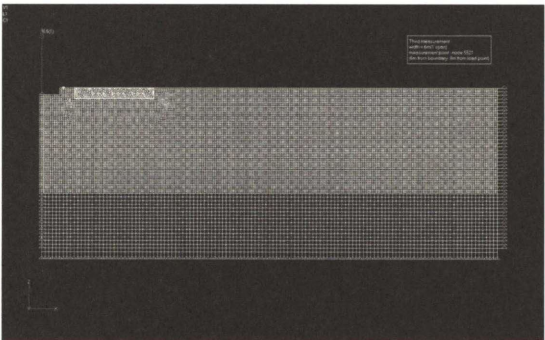


Fig. 19 地盤の解析モデル

Table 3 解析に使用した地盤定数

範囲 (mm)	N 値平 均	V _s (m/sec)	ρ (kg・sec ² /cm ⁴)	ν	h
GL±0～	5.3	140	1.5e-6	0.35	0.02
GL-4500					
GL-4500～	12.9	220	1.7e-6	0.35	0.02
GL-13500					
GL-13500～	44.0	320	1.8e-6	0.35	0.02
GL-21500					

解析結果を実測値と比較して Fig. 20 と Fig. 21 に示す。Fig. 20 は掘削後の測定結果（第 2 回測定結果）と解析結果を比較しており、Fig. 21 は耐圧盤打設後（第 3 回測定結果）の測定結果を解析結果と比較したものである。

解析結果は全体として入力損失量を過少評価している傾向がある。しかし、(1)式が損失量を過大に評価していた 20Hz 帯域以上について、FEM の結果は測定結果の性状は再現している。過少評価については、実際は 3 次元の現象である振動の伝播を 2 次元モデルで解析していること、地盤定数や境界要素、境界条件の設定等種々の要因が考えられる。解析結果を検証することを積み重ね今後の精度の向上が必要と考えている。

3. 2 FEM による解析検討

パーソナルコンピュータおよびプリポストソフトの性能向上で有限要素法 (FEM) が比較的簡単に使用できる環境になってきている。今回測定対象の建物のように比較的整形な形状であれば解析モデル作成の負担も大きくない。

2 次元および 3 次元の FEM により地盤の入力損失および対象建物内の増幅特性に関する解析的検討の結果を以下に示す。

3. 2. 1 入力損失の解析

2 次元 FEM で地盤の入力損失を解析した。具体的には第 1 回測定から第 3 回測定時点に対応する解析モデルを構築し、周波数応答解析を実行し、第 1 回測定に対する第 2, 3 回の振幅比を求め入力損失量とする。

解析モデルを Fig. 19 に示す。図示したのは第 3 回測定 (耐圧盤打設後) に対応したモデルである。モデルは線路に直交する断面方向の 2 次元であり、鉄道走行位置で左右対称と見なしモデル化している。モデル化範囲は、Fig. 14 に示す土質柱状図を参照して、深さ方向で N 値 40 超程度の GL-22m 付近までとし、その範囲を 3 層に分割している。幅方向のモデル化範囲は 60m 程度とした。

地盤の有限要素はプレート要素とした。その要素分割は、解析の最大周波数で、せん断波波長の 1/5 程度を目安として決定した。具体的には上部 2 層は 1 辺を約 25cm、最下層は 1 辺を約 50cm としている。また、底面と側面には粘性境界を設置した。FEM に用いた地盤定数を Table 3

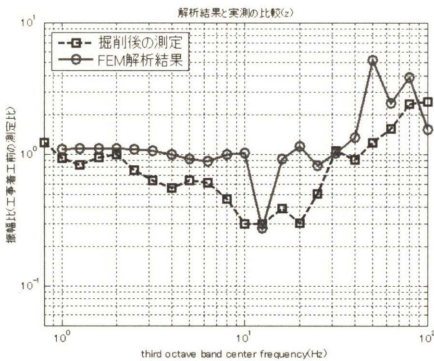


Fig. 20 FEM 解析結果と測定結果の比較

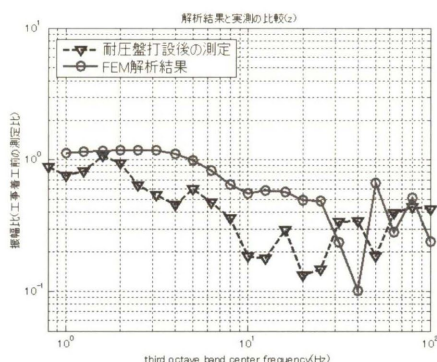


Fig. 21 FEM 解析結果と測定結果の比較

3.2.2 建物内増幅特性の解析

建物の増幅特性を検討する解析モデルを Fig. 22 に示す。同図に示すように解析モデルは建物全体をモデル化した。採用した有限要素は、柱梁はビーム要素、スラブはプレート要素である。

建物重量の評価は、竣工直後で施主入居前の測定のため、固定荷重のみとし積載荷重は考慮していない。減衰は構造減衰として与え、その値は鋼材については 2%、コンクリートは 5%としている。壁は乾式材料のため、重量のみを梁上に考慮して剛性には寄与させていない。鉄骨梁とスラブの合成効果は梁要素を offset させることで対応した。なお、相互作用の影響は無視しており相互作用バネ等はモデル化していない。

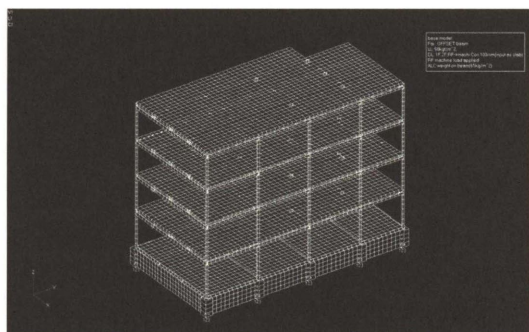


Fig. 22 建物の解析モデル

解析は耐圧盤直下に鉛直方向の単位加振力を入力する周波数応答解析を用いた。測定位置に対応する解析モデルの節点の応答から応答倍率を算定した。

解析結果と測定を比較して Fig. 23～Fig. 26 に示す。これらの図から全体として解析結果が測定結果を良好に近似できていることがわかる。

各階の 1 次の卓越周波数帯域に注目すると、2 階の結果が 1/3 帯域低い解析結果になっている以外は良好に周波数帯域と応答倍率を再現できている。2 次の卓越周波数帯域については、1 次卓越周波数に比較して再現程度は劣るものの、一定の精度で再現できている。有限要素法を用いることで要素分割に応じた高次のモードが再現できるため、その効果が表れていると考えられる。

耐圧盤直下から柱上への増幅特性を確認する目的で、4 階では柱近傍に測定位置を設けた測定を実施している。

Fig. 27 は柱近傍の測定結果と解析結果を比較したものである。建物中央付近小梁上の解析結果に比較して卓越周波数の対応はやや劣る。しかし、周波数全般の定性的性状や最大で 2 倍程度の増幅倍率になる点等は解析結果から読み取ることができる。

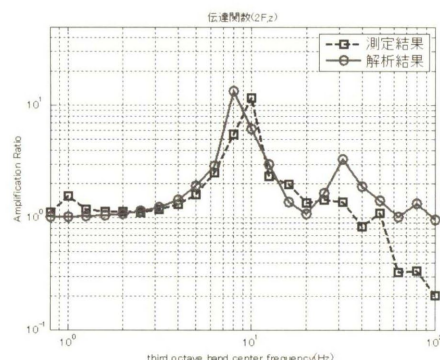


Fig. 23 建物内増幅特性 (2F/1F, z 方向)

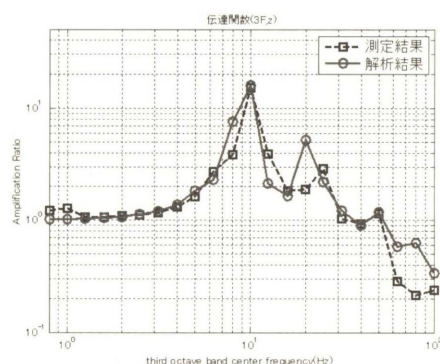


Fig. 24 建物内増幅特性 (3F/1F, z 方向)

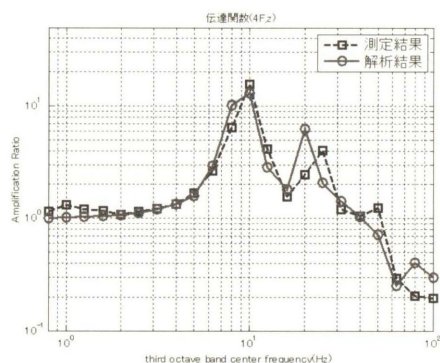


Fig. 25 建物内増幅特性 (4F/1F, z 方向)

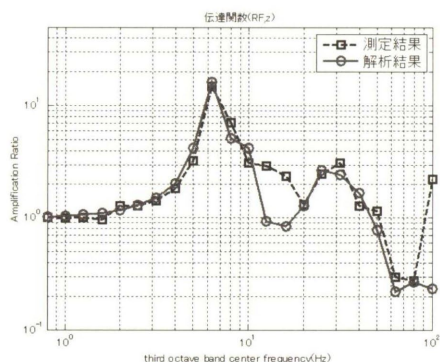


Fig. 26 建物内増幅特性 (RF/1F, z 方向)

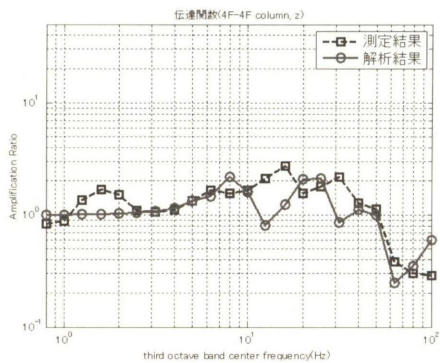


Fig. 27 建物内増幅特性 (4F_column/1F, z 方向)

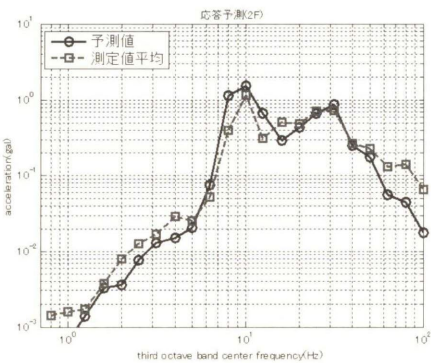


Fig. 29 応答予測結果 (2F)

3. 2. 3 床上応答の予測

建物建設前の測定結果から建物竣工後の各階鉛直方向
応答の予測を試みる。算定方法は地盤上の測定結果に入
力損失量と建物内の増幅特性を掛け合わせ各階の床応答
を (2) 式により求める。

床上応答 = 地盤測定結果 × 入力損失量 × 増幅特性 (2)

(2) 式は入力損失を考慮して更地上の測定結果を低減
し、それを建物に入力して周波数領域で応答を算定する
ことを表している。建物モデルで相互作用バネは考慮し
ていないので、慣性の相互作用は無視されている。

Fig. 28 上図は前述した建物建設前更地上(第 1 回測定)
の鉛直方向平均値である。(2) 式中の地盤の測定結果は
この値を用いる。また、同下図は入力損失フィルターを
示し、(1) 式の包絡線を 1/3 オクターブバンドスペクトル
で示している。(2) 式の入力損失量にはこれを用いる。
同建物内増幅特性については 3. 2. 2 に示した耐圧盤上か
ら各階への増幅特性を使用する。以上の 3 者を掛け合わ
すことで建物各階の鉛直方向応答を算定する。

結果を Fig. 29~Fig. 32 に示す。1 次の卓越周波数帯域
と応答加速度を精度良く予測していることが解る。2 次の
卓越周波数帯域についてもおおよそ 1/3 オクターブ帯域
程度の差異で性状を捉えている。また比較的高周波数帯
域まで測定結果と対応していることがわかる。

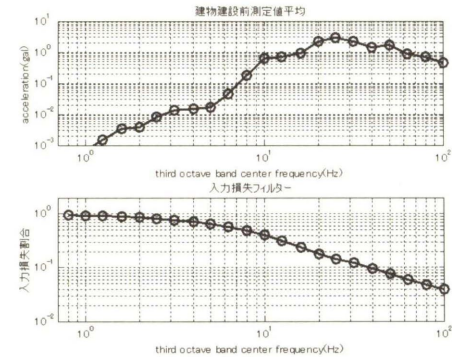


Fig. 28 建設前の測定値と入力損失フィルター

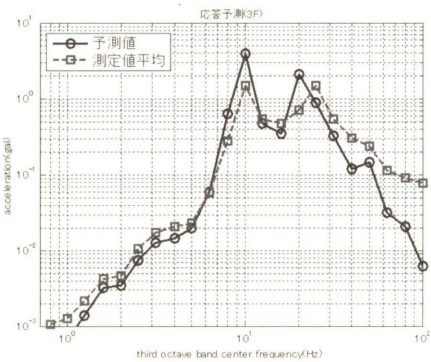


Fig. 30 応答予測結果 (3F)

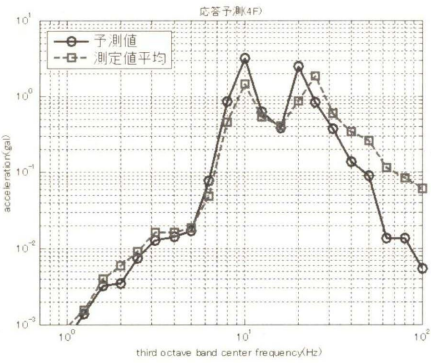


Fig. 31 応答予測結果 (4F)

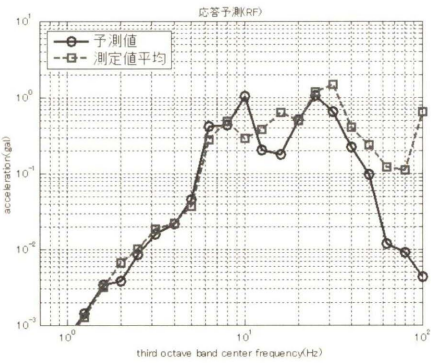


Fig. 32 応答予測結果 (RF)

4. まとめ

鉄道振動の影響を事前に予測することを目的として、鉄道に近接する鉄骨事務所ビルの振動測定と解析検討を実施した。以下に得られた結論を要約する。

- (1) 建設中に実施した 4 回の振動測定結果から既往の理論式で建物の入力損失が把握可能なことを確認した。また、2 次元の FEM を用いても入力損失量の把握が可能であることを確認した。
- (2) 建物内振動の増幅特性を FEM により解析した。3 次元 FEM を用いることで高次モードまで増幅特性が把握可能であることを確認した。
- (3) 建物建設前の振動測定結果、既往の入力損失の理論式および FEM によって得られる建物内での増幅特性から床上の鉛直方向応答が算定できることを示した。これから振動測定データを入手することで机上検討と組み合わせて建物建設前に応答量の把握が可能になった。

本論の検討対象は鉄骨造事務所ビル 1 棟のみである。他構造種別や他基礎形式に適用した場合の精度の検証は行っていない。さらに今回の測定では大きな影響は与えてなかったが相互作用バネの取り扱いも課題である。振動測定によるデータ収集とその解析検討を継続して精度向上を図っていく予定である。

謝辞

振動測定の実施にあたり(株)熊谷組首都圏支店の浅見泰生所長の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社。
- 2) Ohta, Y. and Goto, N. : Estimation of S-wave velocity in terms of characteristic indices of soil, Butsuri-Tanko, 29(4), 1976.

Response estimation of vibrations of a steel framed structure induced by train passage

Jun NAKASONE and Hiroyuki HAMADA

Abstract

This paper presents a estimation method of floor vibration induced by train passage. Analytical study of vertical vibration of ground and floor of a building are conducted, and there is a good accuracy between analytical results and measurements.

Main conclusions of this paper are shown as follows.

- (1) Vertical floor response of the building in frequency domain are predicted with good accuracy by using the equation (2) in this study
- (2) Amplified vibrations in upper floor are analyzed by FEM.
And the comparisons between the analysis and the measurements have good correspondence.
- (3) Vibration measurements that conducted during construction of the building confirmed that filtering effect of foundation slab can be traced by the equation (1)¹⁾ in this study.

Keywords : train vibration, filtering effect of foundation, FEM, response estimation.
