

屋内外の振動源に起因する建物の振動予測と対策

Prediction and Measures of Building Vibration Caused by Indoor and Outdoor Vibration Sources

峯村 敦雄 岩本 賢治

I. はじめに

道路の車両走行や建設工事、近接する工場の生産機器などで発生する振動が、建物内の居住性や精密機器工場の嫌振機器に影響を与えて問題となることがある。特に、外部振動源の場合には建設後に問題が起きてからの対策が困難なので予測には高い精度が求められる。

Fig. 1 に振動問題の検討フローを示す。外部振動源による建物内の応答を予測評価する場合に、主に以下の二つの方法が用いられる。

部分解析法：地盤-基礎-建物への伝播経路を分割し、地盤の応答（振動源位置から建物位置までの地盤の距離減衰）、基礎の応答（基礎による入力損失の評価）、建物の特性（基礎に対する建物応答位置までの伝達特性）を別々に求め、これらを掛け合わせて建物内の応答を評価する方法（Fig. 2）。

一体解析法：地盤→基礎→建物への伝播系を1つのモデルとして建物内の応答を直接評価する方法（Fig. 3）。

部分解析法は比較的簡易な計算で予測できるが、地盤-基礎-建物間の相互作用が表現できない。そこで、一実現象に近い振動の伝播特性を再現でき精度の高い予測が可能な一体解析法を開発した。

本編では一体解析法の概要を紹介する。また、本手法を用いた工事振動による近接建物への居住性能評価の予測事例と、近傍地

盤を加振した場合に、地盤対策有無の違いにより基礎上の応答がどのように変わるかを検討した一例を示す。

II. 一体解析の概要

一体解析法¹⁾は、耐震安全性の予測・評価などで実績のある地盤-基礎-建物の一体解析技術をベースとして周波数範囲の拡張などを行い、環境振動分野に適用するために開発した解析法である。

Fig. 4 に一体解析法のイメージ²⁾を示す。本図のように振動伝播だけでなく、さらに本解析法では対策法の低減効果についても同時に検討可能である。

建物と基礎を三次元FEMでモデル化して剛性を評価し、薄層要素法で求めた地盤柔性 $F_S(\omega)$ を用いて、次式により建物と基礎の変位 $U_B(\omega)$ を振動数ごとに解くことによって求める。

$$\begin{Bmatrix} F(\omega) \\ 0 \end{Bmatrix} = \left([F_S(\omega)]^{-1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_B - \omega^2 M_B \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} U_F(\omega) \\ U_B(\omega) \end{Bmatrix}$$

ここで

$F(\omega)$ ：加振力

$[F_S(\omega)]$ ：薄層要素法で求めた地盤柔性

$[K_B]$ ：建物と基礎の剛性マトリックス

$[M_B]$ ：建物と基礎の質量マトリックス

$U_F(\omega)$ ：加振点の変位、 $U_B(\omega)$ ：建物と基礎の変位

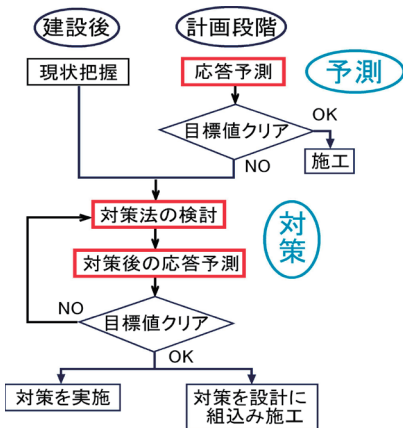


Fig. 1 振動問題検討フロー
(Consideration Flowchart of Vibration Problem)

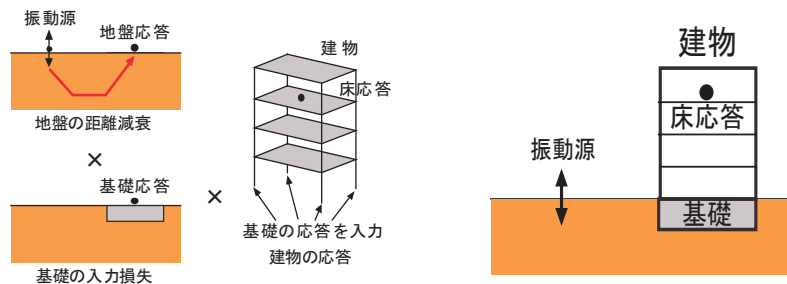


Fig. 2 分割した解析
(Separated Analysis Method)

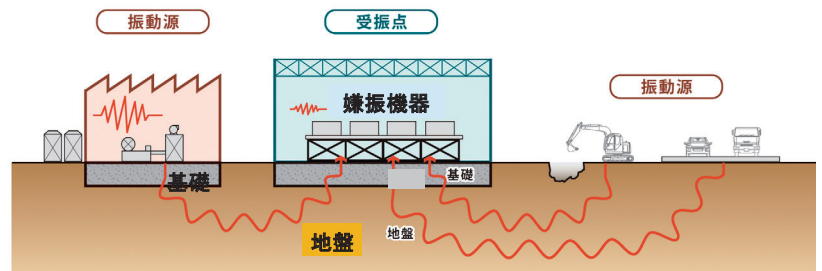


Fig. 4 一体解析法のイメージ
(Image of Integrated Analysis Method)

Ⅲ. 予測検討事例⁶⁾

1. 工事振動による建物床応答の予測評価例

工事振動による近接建物の応答予測評価例として、Fig. 5 に示すバックホウ走行による建物の3階スラブの応答を求めた例³⁾を示す。建物はS造3層2×4スパンで、基礎は厚さ1mのRCベタ基礎とした。

(1) 振動源 (バックホウ走行) の加振力

バックホウ走行により地盤に加わる外力 (即ち、予測解析に用いる加振力) は、バックホウ走行時の地盤振動測定結果とそのシミュレーション解析結果から Fig. 6 に示す手順で求めた。Fig. 6 には求めたバックホウ走行の加振力も示した。

- a. 測定で得られた振動源(バックホウ走行地点)から5m地点の応答波形をフーリエ変換する (時間領域→振動数領域)。
- b. 薄層要素法による周波数応答解析で、振動源位置に相当する地盤モデル上に単位加振力(1kN)を加え、5m地点での応答(振動数領域)を求める。
- c. 上記で求めたaをbで除することで加振力を算出する。

(2) 地盤と建物のモデル化

Fig. 7 に地盤モデルの概要を示す。地盤は2層とし、各層の層厚と物性値は図中に示した。地盤の解析には薄層要素法を用いたが、本法では成層地盤であること条件はあるものの、3次元FEMと違い地盤モデル側面の境界条件の影響を受けないこと、モデルの作成が簡易であること、計算時間がからないことなどのメリットがある。Fig. 8 に基礎と建物モデルの概要を示すが、建物のモデル化は3次元FEMで行い、壁や積載重量は考慮していない。解析に用いた部材の材料定数は図中に示したとおりである。

(3) バックホウ走行による建物床応答の解析結果

地盤-基礎-建物 一体解析モデルの振動源位置に上下方向の加振力1kNの正弦波(0.1~30.0Hzまで0.1Hz刻み)を入力した時の3階スラブ中央(Fig. 5の予測位置)上下方向での共振曲線(単

位:(cm/s²)/kN)とそのピーク振動数7.7Hzにおける振動モード図をFig. 9に示した。対象とする3階スラブ位置で1次モードを示していることが分かる。

(4) バックホウ走行による建物床の居住性能評価

バックホウ走行の加振力波形(Fig. 6)を地盤-基礎-建物 一体モデルに入力して求めた3階スラブ中央の応答波形と、これに1/3オクターブバンドパスフィルターを掛けて各バンドの波形最大値を居住性能評価曲線⁴⁾に照合した結果をFig. 10に示すが、8Hz帯域ではV-90を超えている。

(5) 地中壁による対策検討結果

対策として地盤にRCの地中壁を設置した場合の低減効果を予測した。

Fig. 11に建物と地中壁の位置関係を示す。加振位置から1m、建物から2mの位置で、地中壁は幅2m、深さ5mで、長さは建物長さと同合わせ31.2mとした。

地中壁を設置した場合の3階スラブ中央の応答波形と居住性能評価結果をFig. 12に示した。地中壁によりV-70程度まで低減されると予測できる。

2. 一体解析法を用いた基礎の振動低減検討

(1) 解析条件

外部振動源が地盤上にある場合を想定して、加振位置から離れた基礎上の評価位置(基礎中央)の応答を評価した。基礎における応答低減を、地盤改良及び地中壁によって図ることを考え、地盤-基礎の一体解析モデルを用いて検討を行った。

(2) 解析モデル

Fig. 13に対策なしの地盤・基礎モデルを示す。地盤は2層とし地盤の物性値は図中に示した。基礎は、平面サイズが10m×15mで厚さが2mとし、表層地盤内に埋め込まれている。基礎端部から5m離れた地盤を上下方向1kNで加振し、基礎中央の上下の変位応答(cm/kN)を求めた。

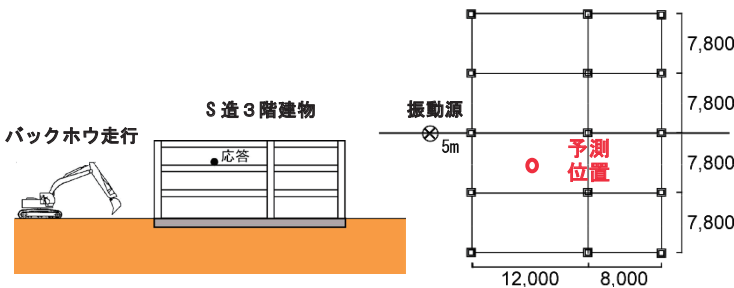


Fig. 5 バックホウ走行時の建物床の解析例
(Analysis Example of Building Floor Vibration during Backhoe Driving)

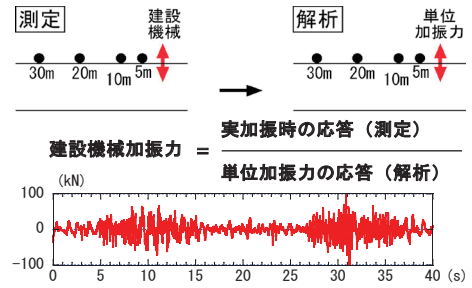


Fig. 6 加振力の求め方と加振力波形
(Calculation Method of Excitation Force and Excitation Force Waveform)

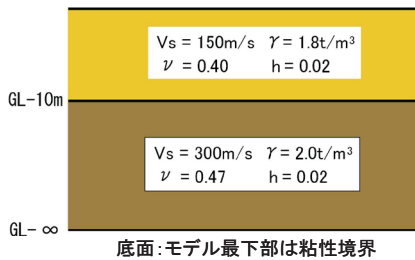


Fig. 7 解析に用いた地盤モデル
(Soil Property for Analysis)

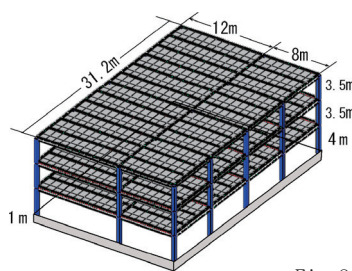


Fig. 8 基礎と建物モデル

部材	E N/mm ²	γ kN/m ³	ν ポアソン比	h 減衰定数
柱・梁 S	205800	76.44	0.3	0.02
床部分 RC	20580	23.52	0.167	0.03

(Foundation and Building Model Used for Analysis)

Fig. 14 に地盤改良の解析モデルを示す。地盤改良は基礎直下の基礎全面にわたり行い、厚さ 4m で、硬い 2 層地盤に達しているものとした。改良体の V_s は 2 層目地盤と同じ 400m/s とした。Fig. 15 に地中壁を設置した解析モデルを示す。地中壁は RC で、厚さ 2m、長さ 15m で 2 層地盤に支持されているものとした。設置位置は、建物端部から 2m である。

(3) 解析結果

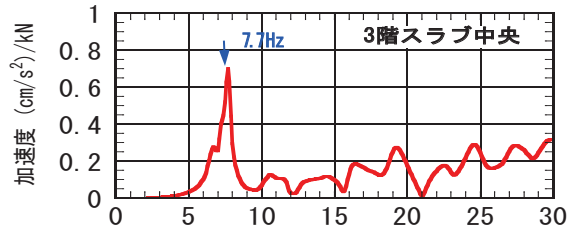
基礎中央での対策有無の共振曲線を Fig. 16 に示す。対策なしの基礎応答は 9.5Hz に卓越したピークが表れ、変位応答も大きいものに対し、地盤改良では、ほぼ同じ振動数になだらかなピークが表れ、ピーク周波数での変位は対策なしの 1/4 程度と小さくなっている。一方、地中壁では 16Hz 近傍になだらかなピークが見られ、その変位は地盤改良のピーク振幅値と同程度となっている。

(4) 対策有無のコンターの比較

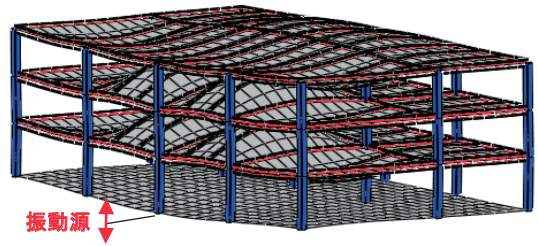
Fig. 17 に、9.5Hz と 16.0Hz おける変位コンターを示す。9.5Hz は、対策なしの基礎のピーク振動数であるが、対策なしの場合、加振源から放射状に振動が減衰しながら伝播しているのが分かる。その振動は基礎にも伝播している。一方、地盤改良では、加振源近傍では対策なしとほぼ同程度に伝播しているが、地盤改良体の影響で応答が小さくなり、基礎上での応答は対策なしに比べ大きく低減しているのが分かる。地中壁では、加振源からの振動は 1m 離れた地中壁でほぼ完全に遮断され基礎への伝播が抑えられている。16.0Hz は、地中壁でなだらかなピークを示すが、対策なしと地盤改良は 9.5Hz 加振時とは加振源からの振動伝播性状が異なり、基礎上では 9.5Hz 加振時より応答が低減している。一方、地中壁では 9.5Hz 加振時よりも加振源近傍で応答が大きく、基礎上でも 9.5Hz 加振時よりも応答が僅かに大きい。

IV. おわりに

外部振動源による建物内の応答を詳細に予測する場合に地盤-基礎-建物の一体解析法は有用で、実情に近い条件設定ができるため、対策や建物の設計変更などの検討にも役立っている。また、結果をコンター表示することで、伝播性状を把握でき低減効果の確認に有効である。



(a) 単位加振力(1kN)当たりの加速度応答



(b) 7.7Hz の振動モード図

Fig.9 建物の加速度応答とモード図

(Acceleration Response and Mode Shape of Building)

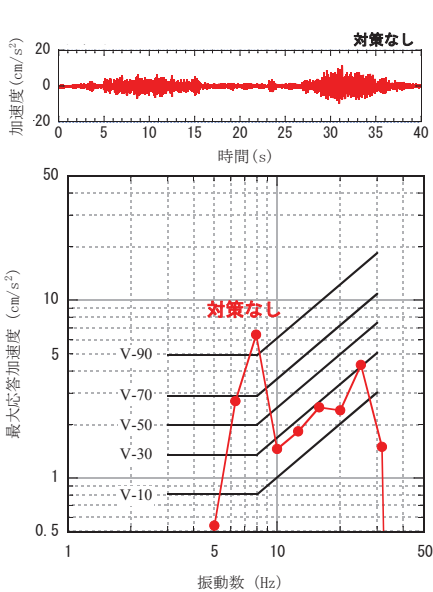


Fig. 10 対策なしの予測結果
(Predict the Result of the Previous Measures)

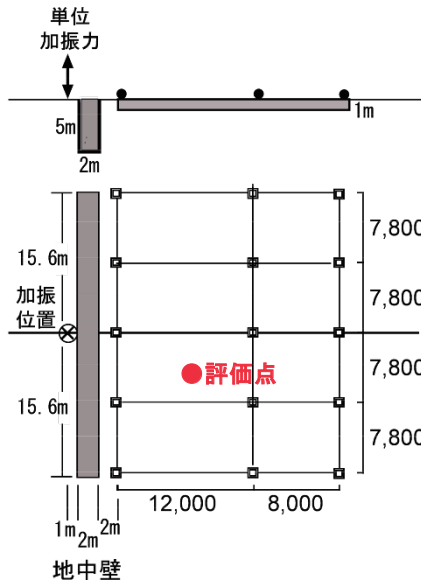


Fig. 11 地中壁設置による対策
(Measures to be Taken by Installing the Underground Wall)

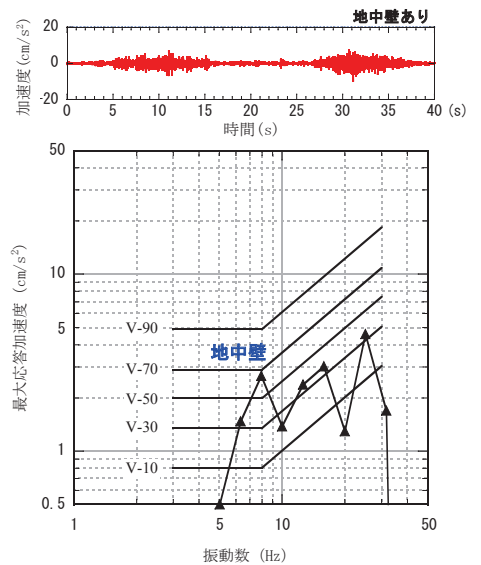


Fig. 12 地中壁ありの居住性能評価結果
(Predict the Result of the Previous Measures)

本技術は、ここに示した工事振動や道路・鉄道からの振動影響予測など振動源が建物の外にあるもののみならず、近年問題となっているライブホールなどでの「たてのりジャンプ」のように、建物内に振動源がある場合の予測や対策効果の評価にも有効であり、今後様々な場面で用いられることが期待される。

参考文献

- 1) 岩本賢治ほか；環境振動における入力損失に関する基礎的研究(その2) 地盤-基礎-建物の一体モデルによる検討, 日本建築学会大会,2007.8.
- 2) 鹿島 プレスリリース「工場などの合理的な環境振動対策のための予測解析手法を開発」,2010.4.
- 3) 第28回環境振動シンポジウム 環境振動における予測・シミュレーション技術の最前線,日本建築学会,2010.1.
- 4) 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, 丸善, 2004.5.
- 5) 石橋敏久ほか；外部振動源による地盤-基礎-建物 一体解, 日本建築学会大会, 2015.9, pp.323-326.

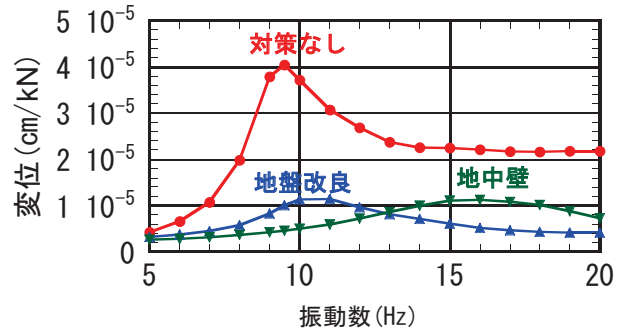


Fig. 16 基礎中央の変位応答特性 (Displacement Response Characteristics of the Foundation Center Point)

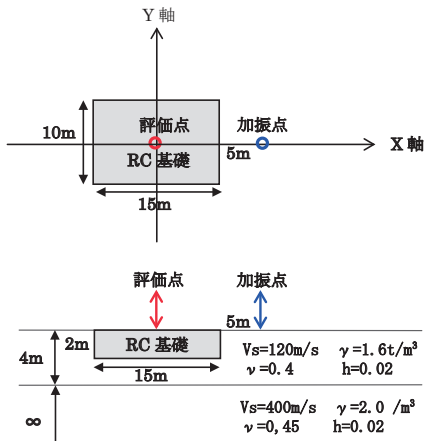


Fig. 13 対策なしの基礎応答解析モデル (Analysis Model of Basement Response without Measures)

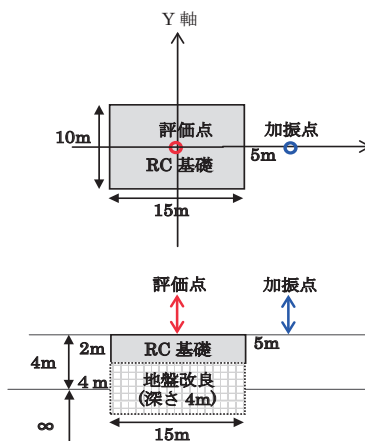


Fig. 14 地盤改良の基礎応答解析モデル (Analysis Model of Basement Response with Ground Improvement)

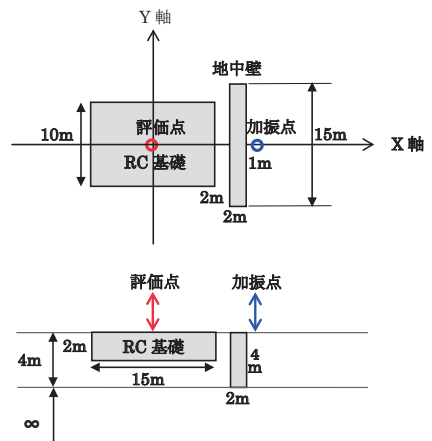


Fig. 15 地中壁の基礎応答解析モデル (Analysis Model of Basement Response with Underground Wall)

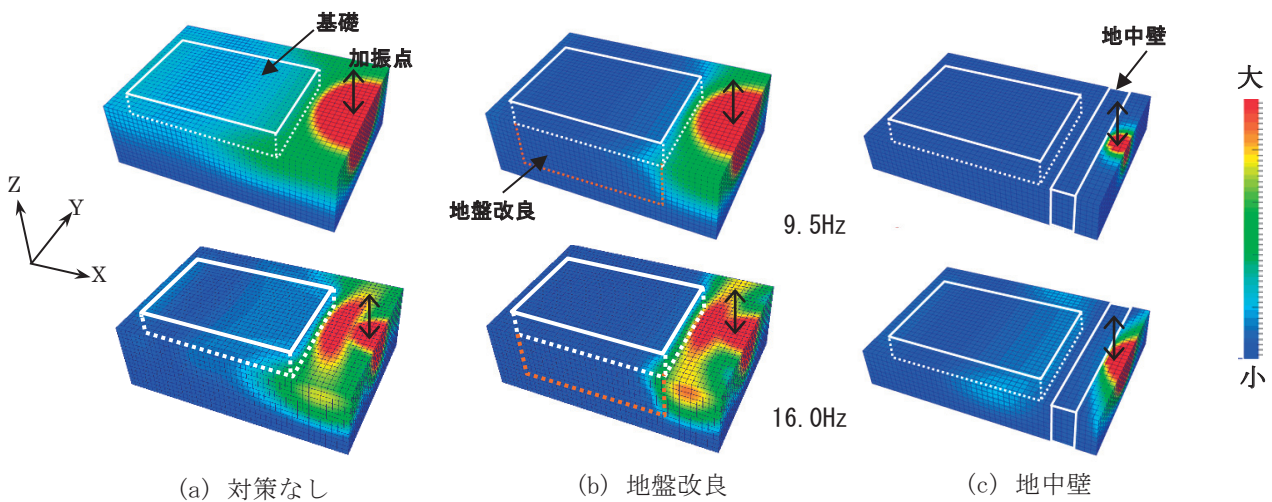


Fig. 17 変位コンター予測結果の比較 (Comparison of Displacement Contour Prediction Results)