トンネル近接建物への交通振動の伝搬特性に関する研究

A STUDY ON PROPAGATION PROPERTIES OF TRAFFIC VIBRATION FROM TUNNEL TO NEAR BUILDING

武居 泰*, 藤井 光治郎**, 伊 積 康 彦*, 中 井 正 一***
*Yasushi TAKEI, Kojiro FUJII, Yasuhiko IZUMI
and Shoichi NAKAI*

In order to predict the level of vibration and structure-borne sound of a building near the underground railway tracks, it is essential to investigate vibration propagation from the ground to the foundation of the building. Therefore, the authors proposed a simple prediction method of vibration propagation from the ground to pile-foundations based on the dynamic-substructure method, which was able to consider the soil-structure-interaction. In the method, input vibration to pile-foundations and response ratio of upper-structures with the dynamic-soil-spring were calculated. We predicted the vibration propagation from the tunnel to the buildings of three types, and confirmed that the predicted results were similar to the measurements.

Keywords : traffic vibration, underground railway, tunnel, propagation of vibration, pile foundation, soil-structure interaction

交通振動, 地下鉄道, トンネル, 振動伝搬, 杭基礎, 動的相互作用

1. はじめに

建物が密集している都市部では、既設の建物に近接して鉄道を敷設したり、既設の鉄道軌道に近接して建物を建設するケースが多く見られる。特に、地下鉄道の場合、トンネル躯体と建物基礎が数メートルの距離で接近することがあり、列車走行に伴い発生する振動による建物内の体感振動や振動に起因する固体音が問題となる場合がある。このような振動の伝搬特性は、加振源（車両－軌道系）、発生源側構造物、地盤、受振側建物の特性と関連した複雑な問題となるため、建物内の振動を精度よく予測するためには、各伝搬経路における特性を把握する必要がある。特に、地盤から建物基礎への振動伝搬については、予測を行う上で重要な要素を占めるが、地盤－基礎連成系の動的相互作用を考慮する必要がある。

耐震構造分野では、地盤と建物の動的相互作用問題は古くから研究が進められ、2000年に告示化された限界耐力計算法¹⁾の中にも動的地盤ばねや基礎入力動の考え方が導入され、一般建物の設計に動的相互作用の影響が考慮されるようになってきた。ただし、耐震分野では、主な対象は周波数が10Hz程度以下の水平動であり、交通振動で対象とする高周波数領域の上下動まで含めたものではない。

交通振動に適用できる地盤から建物基礎への簡易な振動伝搬評価手法として、直接基礎に対しては、地盤振動の位相差を考慮した入力損失の算定式が山原²⁾などにより提案され、実測結果との比較も行われている³⁾。深沢ら⁴⁾は、地震動の入力損失フィルタを微振動に適用し直接基礎の水平動の予測を行っている。高木ら⁵⁾は、動

的サブストラクチャ法¹²⁾を適用し、布基礎を有する建物の上下振動予測を行っている。

一方、杭基礎に対しては、汎用的な評価手法として、実測結果を統計処理する方法が提案されているが⁶⁾⁷⁾、動的相互作用を考慮した実用的な評価手法は確立されていない。動的相互作用を考慮できる振動予測手法として、有限要素法等による地盤－建物系モデルの数値解析手法が適用される場合が多い⁸⁾。筆者らも、実大建物を対象として二次元有限要素法により振動伝搬解析を行い、実測結果との比較をしてきたが⁹⁾¹⁰⁾、杭基礎を二次元でモデル化することの妥当性について詳細な検討はしていない。三次元解析として、高野ら¹¹⁾は薄層要素法により地表面点加振時の基礎梁を含めた群杭基礎の入力損失について検討している。しかし、鉄道振動は対象とする周波数が地震動より高いため、解析モデルの要素を十分細かく分割する必要があり、トンネル－地盤－建物系のような複雑なモデルを三次元で解析することは、モデル化の労力や計算時間等から実用的な手法とは言えない。

筆者らは、杭基礎への振動伝搬性状を把握するため、比較的規模の大きいトンネル－地盤－架構系の縮小模型を用いた加振実験を実施し、動的サブストラクチャ法の考え方にに基づき、動的相互作用（入力の相互作用と慣性の相互作用）の影響を考慮できる簡易な振動予測手法を提案し、実験結果との対応が良好であることを示した¹³⁾。本論文では、トンネルに近接する実大建物を対象として、トンネル、地表面および建物の振動実測結果を示すとともに、提案した手法に

* 財鉄道総合技術研究所 主任研究員・工修

** 元財鉄道総合技術研究所 主任研究員・工修

*** 千葉大学工学部都市環境システム学科 教授・工博

Senior Researcher, Railway Technical Research Institute, M. Eng.

Former Senior Researcher, Railway Technical Research Institute, M. Eng.

Prof., Dept. of Urban Environment Systems, Faculty of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

図1 測定対象（ケースA [A建物]）

より建物への振動伝搬を予測し、実測結果と比較することにより予測手法の妥当性について考察する。なお、地下鉄道では、一般的に上下振動が問題となり、また、環境アセスメントにおいても上下振動を評価していることなどから、本論では上下振動を対象とする。

2. トンネル・地盤－建物の振動測定

2.1 測定概要

(1)測定対象

測定対象はトンネル・地盤・建物条件がそれぞれ異なる3地点（ケースA～C）とした。建物形状、トンネルと建物の位置関係、地盤条件および振動測定位置を図1～3、トンネル形状・土被りなどの諸元を表1に示す。各ケースとも建物の隅角部近傍にトンネルが斜め方向に位置している。建設順序はトンネルが建物より後で、軌道側で防振対策が施されているが、建物側の防振対策は特に施されていない。建物は全て杭基礎を有するコンクリート系建物で、用途は集合住宅である。

ケースAのトンネルは、単線シールドトンネルで、軌道構造はバラスト軌道で防振まくらぎとゴムマットを併設している。地盤は表層近くに砂礫層がありその下は粘性土で、トンネル中心付近以下が杭の支持層となる砂礫層である。地盤のせん断波速度(V_s)は、近隣敷地で実施したPS検層結果を参考にした。A建物は、SRC造の地上12階建てでトンネル側面と杭中心の最小離れは約3.0mである。杭基礎は、直径1000mm、長さ約20mの場所打ちRC杭で、柱1本当たり2本の杭で支持している。

ケースBは土被りの大きい単線シールドトンネルで、小型車両用の小断面トンネルである。地盤は表層に軟弱な粘土層があり、GL-11m以深はN値50以上の砂質土である。 V_s はN値より推定し

図2 測定対象（ケースB [B建物]）

図3 測定対象（ケースC [C建物]）

表1 トンネル、軌道構造、列車諸元

	ケースA	ケースB	ケースC
トンネル	単線シールド (外径7.1m)	単線シールド (外径5.3m)	複線開削 (7.2×8.6m)
土被り	19.7m	29.1m	2.7m
軌道構造	バラスト (防振まくらぎ+ ゴムマット)	コンクリート直結 (防振まくらぎ)	コイルばね フローティング
車両諸元	20m/両 10両編成	16m/両 8両編成	20m/両 6両編成
運転速度	58km/h	40km/h	80km/h

た¹⁴⁾。軌道構造は、コンクリート直結軌道で防振まくらぎが設置されている。B建物は、RC造の地上4階建て（一部平屋）で、トンネルの一部が建物の下に重なっている。杭基礎は、直径350mm、長さ約13mのRC既製杭で、柱1本当たり3～5本の杭で支持している。

図5 1階柱脚に対する地表面の振動加速度レベル差(振動伝搬量)

図6 振動伝搬予測フロー

の傾向が報告されている。ケースCでは防振効果の高い軌道が用いられているため振動が小さく、周波数特性は8~10Hz付近の軌道構造の共振と思われる小さなピークを除き160Hzまでほぼ平坦であった。地表面振動は、ケースAでは80Hz以上で、ケースBでは16Hz以上でトンネル内（上下方向）に対し大きく減衰した。ケースCではトンネル内（上下方向）と比べ周波数によっては増幅した。これは、トンネル躯体の振動や施工時に表層地盤が乱された影響などが考えられる。建物1階柱脚では、各ケースともトンネル内や地表面に対し減衰し、高周波数ほど顕著であった。

(2) 地表面と建物基礎の振動比較

地表面と建物基礎の振動性状を比較するため、建物 1 階柱脚に対する地表面の振動加速度レベル差（振動伝搬量）を図 5 に示す。振動伝搬量は各ケースとも概ね同じ傾向を示し、100Hz 程度までは高周波数になるほど大きくなった。

3. トンネルから建物への振動伝搬予測

3.1 予測手法の概要

建物内に伝搬する鉄道振動を予測する上で、地盤から建物基礎への振動伝搬は重要な要素を占める。そこで、地盤と建物の動的相互作用を考慮した杭基礎への振動伝搬を予測する簡易な手法を構築するため、前節に示した実大建物を対象として検討した。

振動伝搬予測フローを図6に示す。動的サブストラクチャ法の考え方にに基づき、建物を杭頭位置で仮想的に切断し、杭頭位置の振動（建物への入力振動）と動的地盤ばねを取り付けた上部構造モデルの応答倍率から、建物の振動を予測する。なお、本検討では、建物振動の予測位置はトンネルに近接する1階柱脚とし、対象上限周波数は125Hzとする。

杭の動的地盤ばねについては、地盤や杭の条件から計算式¹⁷⁾（付録1参照）により簡便に求めることができる（以下、簡便法）。各建物とも基礎は全て群杭であることから、ばね定数（実部）の算定では群杭係数を考慮し、減衰係数（虚部）の算定では図7に示すように杭で囲まれる範囲を杭基礎底面とみなして等価基礎半径を求める。なお、杭以外からの振動伝搬として、基礎スラブ部分（以下、パイルキャップ）の底面（杭で囲まれた範囲以外）からの伝搬を考慮し、地表面直接基礎と仮定してDGC理論¹⁸⁾により動的地盤ばねを算定し、杭の地盤ばねに付加する。

建物への入力振動については、杭の鉛直剛性が周辺地盤に対し相対的に十分大きいことから、杭先端と杭周の動的地盤ばねのばね定数に比例して地盤から杭へ振動が入力されると仮定して、(1)式に示すように地中部の振動加速度を加重平均して求める。このような入力の相互作用の考え方は、限界耐力計算法¹⁾における地下部分が存在する場合の建物への入力地震動の算定手法と同様である。杭位置における地中部振動（ A_{sb} 、 A_{si} 、 A_{sp} ）は、地盤—トンネル系モデルの2次元有限要素法（FEM）解析により求める。トンネルから地中部・地表面への振動伝搬予測において、2次元FEM解析が有効であることは、実測結果との比較から確認している¹⁹⁾。また、シールドトンネルについては、トンネルから地盤への周波数帯毎の減衰を表す算定式（以下、距離減衰式）が提案されているため²⁰⁾（付録2参照）、ケースA、Bにおいて数値解析を用いない略算手法として適用し、地中部振動を求める。

$$A_s(f) = 20 \cdot \log(\alpha \cdot 10^{A_{sb}(f)/20} + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot 10^{A_{si}(f)/20} + \gamma \cdot 10^{A_{sp}(f)/20}) \quad \cdots (1)$$

$$A_{sb}(f) = H_{sb}(f) + A_M(f)$$

$$A_{si}(f) = H_{si}(f) + A_M(f)$$

$$A_{sp}(f) = H_{sp}(f) + A_M(f)$$

$A_s(f)$: 建物への入力振動の振動加速度レベル (dB)

$A_{sb}(f)$: 地中部（杭先端位置）の振動加速度レベル (dB)

$A_{si}(f)$: 地中部（杭周位置）の振動加速度レベル (dB)

（杭長方向に n 分割する場合、 $i=1 \sim n$ となる）

$A_{sp}(f)$: 地中部（パイルキャップ底面位置）の振動加速度レベル (dB)

$H_{sb}(f)$: トンネル内から地中部（杭先端位置）への振動伝搬量 (dB)

$H_{si}(f)$: トンネル内から地中部（杭周位置）への振動伝搬量 (dB)

$H_{sp}(f)$: トンネル内から地中部（パイルキャップ底面位置）への

振動伝搬量 (dB)

$A_M(f)$: トンネル内の振動加速度レベル[実測値] (dB)

f : 1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)

α : 杭先端の地盤ばね定数比率（ $=k_b/(k_b + \sum_{i=1}^n k_i + k_p)$ ）

β_i : 杭周(i 層)の地盤ばね定数比率（ $=k_i/(k_b + \sum_{i=1}^n k_i + k_p)$ ）

γ : パイルキャップ底面の地盤ばね定数比率（ $=k_p/(k_b + \sum_{i=1}^n k_i + k_p)$ ）

k_b : 杭先端の動的地盤ばねのばね定数

k_i : 杭周(i 層)の動的地盤ばねのばね定数

k_p : パイルキャップ底面（杭範囲以外）の動的地盤ばねのばね定数

次に、地盤ばね—上部構造系の慣性の相互作用を考慮するため、1階の質点に杭の動的地盤ばね（ばね要素と減衰要素）を取り付け

た質点モデルの動的解析により入力振動に対する建物の応答倍率を求める。動的地盤ばねの付加質量は全質量に対して小さいため無視するが、1階の質点にはパイルキャップ・基礎梁の質量を考慮する。上部構造のモデル化範囲はトンネルに最も近接する1スパンとし（図1参照）、各階の質量を一つの質点に集約し、各質点間を繋ぐ上下ばねは、柱と壁の鉛直剛性（柱・壁の断面積×弾性係数/階高）から求める。地盤ばね下端をインパルス加振したときの1階質点の応答を時刻歴応答解析により求め、応答結果を周波数変換して入力に対する応答倍率を求める。減衰はレーリー型とし、減衰定数は対象周波数範囲（5～160Hz）で約2%になるように設定する。

また、床スラブの上下振動の影響を検討するため、Rayleigh-Ritz法²¹⁾を適用して矩形スラブ板モデルの1次モードの固有振動数と有効質量を求め、そのモードにおけるばね定数を算出し、各階質点に床スラブの振動系を表す1質点のばね—質量モデルを付加する。

建物への入力振動と建物の応答倍率から、建物の振動を(2)式より求める。

$$A_F(f) = A_S(f) + H_F(f) \quad \cdots (2)$$

$A_F(f)$: 建物（1階柱脚）の振動加速度レベル (dB)

$H_F(f)$: 入力振動に対する建物の応答倍率 (dB)

3.2 A 建物の振動予測

前節に示した手法により、A建物の振動予測を行った結果を以下に示す。

(1)動的地盤ばね

地盤および杭基礎の諸元から上下方向の動的地盤ばねを簡便法により求めた結果、パイルキャップ底面を含めた1基礎当たり（杭2本）のばね定数は $2.5 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 、減衰係数は $1.1 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ となった。比較として、杭をビーム要素、パイルキャップをソリッド要素、地盤を薄層要素とした地盤—杭系モデルの動的解析（以下、詳細法）を行い、パイルキャップ上面中央部を上下単位力で加振したときのパイルキャップの上下方向の応答変位から動的地盤ばねを求めた結果を、簡便法の結果と併せて図8に示す。動的地盤ばねの実部は、付加質量（ $4.5 \times 10^4 \text{ kg}$ ）の影響のため周波数が高くなるほど小さくなったが、静的ばね定数（周波数0Hz時）は $3.3 \times 10^6 \text{ kN/m}$ となり、簡便法の結果と概ね対応した。虚部については周波数が高いほど大きくなり、その傾き（減衰係数）は $2.1 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ となり簡便法に対し2倍程度大きくなった。この原因として、詳細法では埋

図7 簡便法による動的地盤ばね算定時の範囲

図8 簡便法と詳細法による動的地盤ばね（ケースA）

戻し土となるパイルキャップ側面の物性値を原地盤の値を用いて解析しているが、簡便法ではパイルキャップ側面を無視して求めていることなどが考えられる。なお、減衰係数が建物の応答倍率に与える影響については、本節(3)で検討する。

(2) 入力振動

トンネル地盤系の 2 次元 FEM モデル (図 9) の点加振解析により、トンネル側壁下部から地中部への振動伝搬量を求めた。振動伝搬量とトンネル側壁下部における実測値から求めたトンネルに最も近い杭位置における深さ方向の地中部の振動加速度レベルを図 10(a) に示す。杭底位置の振動は、トンネルとの位置関係等の影響により、杭底上方の地盤より特に大きくなった。簡便法により求めた杭先端と杭周の地盤ばね定数およびその比率を表 2 に示す。杭周については、約 5m 毎に分割した。各ばね定数の比率により地中部の振動加速度を加重平均して求めた振動加速度レベルを同図中に示す。また、距離減衰式により求めた地中部振動とその加重平均値を図 10(b) に示すが、距離減衰式では 63Hz 以上で杭底位置の振動は FEM 結果より小さくなり、加重平均値も 63Hz 以上でやや小さくなった。なお、参考として地表面の振動について、FEM および距離減衰式による解析値と実測値の比較を図 11 に示すが、FEM は実測値にほぼ対応したのに対し、距離減衰式は実測値に対し周波数によっては 10dB 程度小さくなった。

本手法では、杭の鉛直剛性が周辺地盤に対し十分大きいことを前提としているが、実際には杭は剛体ではない。この影響を確認するため、地盤を薄層要素、杭（杭長 22m）をビーム要素でモデル化した単純な地盤－単杭系の点加振解析により、杭径 1m と 2m の場合について検討した。A 建物の杭基礎は群杭（杭径 1m×2 本）であるため、群杭と等価な断面積を有する単杭に換算すると杭径は 1.4m（杭体軸剛性： $1.55 \times 10^6 \text{ kN/m}$ ）に相当する。地中部（杭底から水平 6.5m 離れ）を点加振したときの加振点から杭頭への振動伝搬量と、杭を取り除いた地盤モデルによる地中部の振動伝搬量の加重平均を図 12 に示す。単杭の解析結果のほうが地盤の加重平均に対し高周波数範囲で杭径 2m の場合最大 5dB 程度、1m の場合最大 10dB 程度小さくなったが、この主な原因として、杭が完全な剛体ではないため杭頭では振動の小さい地表面付近の地盤の影響を受けたことが考えられる。以上より、本例では入力振動をやや過大評価する可能性があるが、実用上許容できる誤差であると考ええる。ただし、杭の軸剛

図 10 地中部の振動加速度レベル (ケース A)

表 2 地盤ばね定数と比率 (ケース A)

部位	地盤ばね定数 ^{*1} (kN/m)	比率
パイルキャップ ^{*2}	2.33×10^5	0.093
杭周(GL-2.8~-6.0m)	2.04×10^5	0.082
杭周(-6.0~-11.2m)	4.32×10^5	0.173
杭周(-11.2~-16.4m)	4.32×10^5	0.173
杭周(-16.4~-21.6m)	4.32×10^5	0.173
杭底	7.70×10^5	0.308
合計	2.50×10^6	1.0

*1: 1基礎当たり (杭2本分) の値

*2: 底面（杭で囲まれた範囲を除く）のみ考慮

図 11 地表面振動の解析値と実測値の比較 (ケース A)

図 12 単杭解析の加振点から杭頭への振動伝搬量と地中部の振動伝搬量の加重平均の比較

床モデルなし 床モデルあり

図 13 上部構造の質点モデル

図 14 入力振動に対する 1 階柱脚
の応答倍率（ケース A）

性がさらに小さい場合や杭長範囲で地中部の振動差が大きい場合には、入力振動の誤差がより大きくなる可能性がある。

(3)建物の振動モードと応答倍率

簡便法により求めた地盤ばねを取り付けた上部構造の質点モデル(図13)の固有値解析により、主要モードの固有振動数および有効質量比を求めた結果を表3に示す。床モデルの有無に関わらず、1次モードは地盤ばねが伸縮し上部構造の各質点が同位相で振動するモードとなり、有効質量の大半を占めた。床モデルがない場合には、2・3次モードは上部架構が振動するモードとなった。床モデルがある場合には、2次モードは床振動が卓越するモードとなり、3次以上は床を含めた上部架構が振動するモードであった。なお、床モデルのみの1次固有振動数は14.5Hzであった。

入力振動に対する1階質点の応答倍率を図14に示す。1次固有振動数では応答が増幅し、周波数が高くなるほど減衰が大きくなった。床モデルがない場合には、16Hzで大きく減衰したが、床モデルがある場合には、床スラブの振動の影響により16Hzでの減衰が少なくなった。

地盤ばねの減衰係数が応答倍率に与える影響を把握するため、簡便法で求めた減衰係数とその2倍の値を用いた場合について、応答倍率を比較した結果を図15に示す。1次モードの影響が大きいため、減衰係数を2倍にした場合、1次固有振動数付近(10Hz)では応答倍率がやや小さくなったが、高周波数域(80Hz以上)では逆に5dB程度大きくなった。地盤ばねの減衰係数に関しては、特にパイルキャップが大きい場合などでは埋戻し土の物性評価等も含め、さらに検討する必要がある。

(4)建物(1階柱脚)の振動予測

建物への入力振動と上部構造の応答倍率から求めた1階柱脚における振動予測結果と実測結果の比較を図16に示す。入力振動については、FEMで求めた場合と距離減衰式で求めた場合、応答倍率計算については、床モデルを考慮した場合としない場合について、それぞれの組み合わせを示している。16Hz以下では暗振動に近いため正確な比較はできないが、FEMの場合80Hz以上で解析値がやや大きくなったことを除き、予測結果と実測結果はよい対応を示した。FEMと距離減衰式の予測精度の比較は、地盤ばね等に起因する誤差の影響もあることから一概には言えないが、距離減衰式を用いた

図17 1階柱脚に対する地表面の振動伝搬量(ケースA)

図19 入力振動に対する1階柱脚の応答倍率(ケースB)

表5 固有振動数(ケースB) [Hz]

	1次	2次	3次	4次
床モデルなし	15.2 (0.985)	55.6 (0.014)	96.0 (0.001)	—
床モデルあり	11.9 (0.467)	13.0 (0.002)	17.7 (0.518)	59.2 (0.012)

() 内は有効質量比

表3 固有振動数(ケースA) [Hz]

	1次	2次	3次	4次
床モデルなし	10.8 (0.940)	29.3 (0.057)	53.2 (0.003)	—
床モデルあり	10.1 (0.849)	14.3 (0.012)	17.2 (0.093)	32.3 (0.043)
参考:基礎固定(床モデルなし)	16.4 (0.773)	46.1 (0.103)	75.5 (0.041)	103 (0.024)

() 内は有効質量比

図15 減衰係数による応答倍率の比較(ケースA)

図16 1階柱脚における振動予測結果と実測結果の比較(ケースA)

表4 地盤ばね定数と比率(ケースB)

部位	地盤ばね定数*1 (kN/m)	比率
パイルキャップ*2	1.45×10^5	0.152
杭周(GL-0.7~-6.0m)	1.85×10^5	0.194
杭周(-6.0~-11.0m)	3.51×10^5	0.369
杭底	2.70×10^5	0.284
合計	9.51×10^5	1.0

*1: 1基礎当たり(杭4本分)の値

*2: 底面(杭で囲まれた範囲を除く)のみ考慮

図18 地中部の振動加速度レベル(ケースB)

場合でも実測結果との対応は概ね良好であった。また、床モデルの有無による差は、床スラブの振動の影響により16Hz付近で生じた。

FEMの場合について、建物1階柱脚に対する地表面の振動伝搬量について実測結果との比較を図17に示す。解析値のほうが全体的に5～10dB程度小さくなったが、双方の傾向は概ね一致した。

3.3 B、C建物の振動予測

A建物と同様に、B、C建物の振動予測結果を以下に示す。

(1) B建物

B建物について、簡便法による動的地盤ばねを表4、FEMおよび距離減衰式を用いて求めた建物への入力振動を図18に示す。FEMでは、地表面付近のほうが下層部より振動がやや大きくなったが、トンネルと杭が離れていることや杭長が短いこともあり、ケースAに対し地中部の振動分布の差は小さくなった。1基礎当たりの平均杭体軸剛性($6.72 \times 10^5 \text{ kN/m}$)はA建物より小さいが、地中部振動分布の差が小さいことから、杭剛性が入力振動の予測精度に与える影響は少ないと考える。固有値解析より求めた固有振動数および有効質量比を表5、入力振動に対する1階柱脚の応答倍率を図19に示す。質点系モデル(床モデルあり)の上下1次固有振動数はA建物よりやや大きく11.9Hzであった。予測した1階柱脚における振動加速度レベルと実測結果の比較を図20に示す。50Hz以上は暗振動に近いので正確な比較はできないが、全体的に解析値のほうが実測値よりやや大きくなったが、傾向は概ね一致した。

(2) C建物

C建物について、簡便法による動的地盤ばねを表5、FEMを用いて求めた建物への入力振動を図21に示す。B建物と同様に杭長が短いため、地中部の振動分布の差は小さかったが、土被りが小さいこともあり地表面付近のほうが杭底位置より振動がやや大きくなった。1基礎当たりの平均杭体軸剛性($1.38 \times 10^6 \text{ kN/m}$)はA建物と同程度である。固有値解析より求めた固有振動数および有効質量比を表7、入力振動に対する1階柱脚の応答倍率を図22に示す。質点系モデル(床モデルあり)の上下1次固有振動数は13.1Hzであった。予測した1階柱脚における振動加速度レベルと実測結果の比較を図23に示す。20Hz以上は暗振動に近いので正確な比較はできないが、6.3～16Hzでは、双方の傾向は概ね対応した。

3.4 予測精度

A、B、C建物について、1階柱脚における予測値と実測値を周波数帯ごとに比較した結果を図24に示す。各建物とも予測値は、入力振動をFEMにより求め、床スラブを考慮した質点系モデルで応答倍率を求めた場合の結果である。予測結果と実測結果の差は概ね5～10dBの範囲であり、予測結果のほうが実測結果より全体的に大きくなった。ケースBでは実測結果との差がやや大きくなったが、土被りが大きいので地盤物性の設定の誤差が影響した可能性がある。

図24 1階柱脚の振動加速度レベルの予測値と実測値比較(ケースA、B、C)

図20 1階柱脚における振動予測結果と実測結果の比較(ケースB)

表6 地盤ばね定数と比率(ケースC)

部位	地盤ばね定数 ^{*1} (kN/m)	比率
パイルキャップ ^{*2}	1.67×10^5	0.089
杭周(GL-2.0～-6.5m)	7.44×10^4	0.040
杭周(-6.5～-9.3m)	1.54×10^5	0.082
杭周(-9.3～-15.0m)	1.19×10^6	0.633
杭底	2.93×10^5	0.156
合計	1.88×10^6	1.0

*1: 1基礎当たり(杭3本分)の値

*2: 底面(杭で囲まれた範囲を除く)のみ考慮

図21 地中部の振動加速度レベル(ケースC) 図22 入力振動に対する1階柱脚の応答倍率(ケースC)

表7 固有振動数(ケースC) [Hz]

	1次	2次	3次	4次
床モデルなし	13.8 (0.962)	41.1 (0.036)	74.7 (0.002)	—
床モデルあり	13.1 (0.903)	20.2 (0.008)	24.1 (0.060)	45.7 (0.026)

()内は有効質量比

図23 1階柱脚における振動予測結果と実測結果の比較(ケースC)

4. まとめ

鉄道トンネルに近接する3地点の杭基礎を有する実大建物を対象として列車振動（上下振動）の伝搬性状を実測により把握するとともに、既報¹³⁾で示した模型実験に基づく振動伝搬予測手法を実大建物へ適用し、実測結果と比較することにより以下の知見が得られた。

(1) 入力との相互作用として杭の地盤ばね定数の比率で加重平均した地中部振動を入力振動とし、慣性の相互作用として地盤ばねを取り付けた上部構造モデルの応答倍率を考慮することにより、実大建物においてもトンネルから建物基礎への振動伝搬を概ね予測できる。

(2) トンネル、地盤、建物等の条件が異なる3地点の予測結果は、実測結果に対し5~10dB程度の差であった。予測結果の誤差の主な原因として考えられる杭の軸剛性等に起因する入力振動および杭の地盤ばねに起因する応答倍率について検討し、予測精度に与える影響を把握した。

(3) シールドトンネルでは、地中部の振動を距離減衰式で求めた場合でも予測精度は概ね確保できることから、本手法は、FEM等の煩雑な数値解析を用いずに地盤と建物の動的相互作用を考慮できる実用的な振動伝搬予測手法として有効である。

本振動予測ではトンネル内の振動が既知であることを前提としたが、地表面の振動のみ既知である場合でも、地中部の振動をFEM等で推定可能なため、本手法を適用できる。今後、トンネル以外に盛土や高架橋を列車が走行する場合についても検討していきたい。

謝辞

本研究における振動測定では、東京都の古田勝氏、鉄道総研の津野究氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 国土交通省ほか編：2001年版 限界耐力計算法の計算例とその解説，工学図書，2001
- 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社，1974
- 野口祐司，武居泰ほか4名：駅複合建物の鉄道振動伝搬特性 その1 工事進捗に伴う地盤・基礎の振動特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.151-152，2002
- 深沢尚宏，北村春幸，藤田隆史，浅野美次ほか2名：敷地地盤の微振動調査に基づく免震建物の微振動応答予測手法，日本建築学会技術報告集，第19号，pp.73-78，2004
- 高木正美，藤井俊二，曾田五月也：建物防振構法の効果に関する実験的，解析的研究，日本建築学会構造系論文集，第541号，pp.105-112，2001
- 藤井光治郎，蓮田常雄ほか1名：線路上空建物の振動騒音予測に関する研究 その3 振動・騒音予測法と建物への振動入力評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.1535-1536，1994
- 田中靖彦，富澤稔ほか2名：交通振動を受けるS造建物の環境振動予測手法，日本建築学会構造系論文集，第470号，pp.151-158，1995
- K.H.Chua, K.W.Lo, T.Balendra: Building Response due to Subway Train Traffic, Journal of Geotechnical Engineering, pp.747-754, 1995.11
- 武居泰，蓮田常雄ほか2名：線路上空建物の振動騒音予測に関する研究 その5 2次元FEMによる振動解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.1539-1540，1994
- 武居泰，藤井光治郎ほか2名：開削トンネルから地盤・建物への列車振動伝搬性状，鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2005)，pp.553-556，2006
- 高野真一郎，佐々木文夫：基礎の剛性を考慮した群杭基礎の動剛性と入力損失効果 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.201-202，2006
- 日本建築学会編：入門・建物と地盤との動的相互作用，1996
- 武居泰，中井正一ほか2名：トンネルー地盤ー架構系模型を用いた振動伝搬特性に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第616号，pp.17-24，2007
- 田沼辰雄ほか2名：地盤と震害，楨書店，1978
- 木村和夫，鈴木健司ほか4名：コイルばね防振軌道の設計と施工，鉄道

技術連合シンポジウム(J-RAIL2000)，pp.47-50，2000

- 古田勝，長嶋文雄：地下鉄走行に伴うシールドトンネル及び地盤系の動的応答解析とその計算例，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第4巻，pp.93-100，1994
- 日本建築学会編：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，日本建築学会，2006
- 小堀鐸二ほか3名：長方形基礎の Dynamic Ground Compliance その1 半無限弾性地盤上の場合，京都大学防災研究所年報，第10号A，pp.283-314，1967
- 藤井光治郎，武居泰ほか4名：地下鉄道近接建物の振動伝搬予測に関する研究 その2 2次元有限要素法によるトンネル函体ー地盤系振動解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.247-248，2004
- 津野究，古田勝ほか3名：地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性，土木学会論文集，No.792/Ⅲ-71，pp.185-197，2005
- 加藤泰正，本間俊雄：環境振動に関する床スラブ設計支援システムの開発，日本建築学会技術報告集，第7号，pp.169-174，1999
- 古田勝，長嶋文雄：地下鉄シールドトンネルの振動調査と解析例，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第1巻，pp.101-106，1991

付録1 簡便法による杭の動的地盤ばねの算定

文献17)を参考に、杭の上下地盤ばねを下式から求めている。

・杭周地盤ばね定数（単位長さ当たり）：

$$S_v = 2\pi G_e / \log_e(2r_m / B) \quad r_m = 2.5L(1 - \nu_e)$$

B ：杭径 L ：工学的基礎までの杭長 G_e ：表層地盤の平均せん断剛性

ν_e ：表層地盤の平均ボアソン比

・杭先端地盤ばね定数：

$$k_b = \frac{3\pi}{8} \frac{\pi G_b B}{2(1 - \nu_b)}$$

G_b ：支持層のせん断剛性 ν_b ：支持層のボアソン比

・地盤ばね定数(全体)：

$$K_{VS} = E_p A \beta_s \frac{E_p A \beta_s (1 - e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 + e^{-2\beta_s L})}{E_p A \beta_s (1 + e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 - e^{-2\beta_s L})}$$

$\beta_s^2 = S_v / E_p A$ E_p ：杭のヤング係数 A ：杭の断面積

・減衰係数： $C_S = h_{VS1} K_{VS} / (\pi f) + C_{VS2} (f - f_g) / f$ $C_{VS2} = \rho_b V_{Lab} \pi r_{V0}^2$

h_{VS1} ：支持層の減衰定数 f_g ：地盤の1次固有振動数(= $V_{sc} / 4L$)

f ：地盤ー建物連成系の上下1次固有振動数

V_{Lab} ：支持層のLysmerの波動速度(= $3.4 V_{sb} / \{\pi(1 - \nu_b)\}$)

r_{V0} ：ばね算定用の等価基礎半径

付録2 地盤振動の距離減衰式

文献20)を参考に、地中部の振動の減衰特性を下式より求める。

$$L_{VA}(f) - L_{VA0}(f) = -A \cdot \log_e(R / R_0)$$

$L_{VA}(f)$ ：地中部における1/3オクターブバンド分析による中心周波数 f (Hz)の振動加速度レベル(dB)

$L_{VA0}(f)$ ：トンネル側壁（アーチ部半径方向）の1/3オクターブバンド分析による中心周波数 f (Hz)の振動加速度レベル(dB)

R ：振動が地盤内を伝播する距離(m)（付図1参照）

R_0 ：振動源から基準点の距離（1mと仮定）

A ：減衰に関する係数

減衰に関する係数 A と周波数の関係を付図2に示す。文献20)では、地表面振動を対象として回帰式($A=0.15f$)を提案している。地中部振動の場合、実測値と比較すると16~50Hzで実測値のほうがやや大きくなったが、傾向は概ね一致するため、本予測では地表面振動に対する式を準用する。なお、アーチ部では、円周方向と半径方向で振動性状が類似していることや測定結果にばらつきが少ないこと等の理由から、基準とする振動(L_{VA0})をアーチ部半径方向としている²²⁾。

付図1 振動伝播距離(R)

付図2 係数Aと周波数の関係

(2007年9月10日原稿受理，2008年1月23日採用決定)