

電車走行時の地盤と建物基礎への振動伝播性状に関する研究

Propagation Characteristics of Ground-Foundation by Train Vibrations

石橋 敏久 八幡 夏恵子
堀越 清視 桜庭 和子

要 約

電車の走行により生じる振動は、50Hz 以上の高振動数成分が卓越する。この振動が地盤を介し建物の基礎部から建物内に伝播し固体音発生の原因となる。線路に近接する建物内の応答予測法を提案する目的で、線路沿いに位置する既存の事務所ビル（RC造6階）と建設中の集合住宅（SRC造15階）において電車走行時の地盤と建物基礎部及び建物内での振動測定を実施した。本論文では測定結果と主に2次元FEMによる応答解析結果から、地盤の距離減衰や建物基礎への入力による応答の低減効果に着目してその性状について論じる。また、これらの結果から電車走行時の加振力特性や位相速度による地盤構造の推定に關し検討を行う。

目 次

- I. はじめに
- II. 既存の事務所の測定
- III. 建設中の集合住宅の測定
- IV. 電車走行時の加振力の推定
- V. 位相速度による地盤構造の推定
- VI. まとめ

I. はじめに

居住性確保の観点から、交通機関や工場、工事、人間の歩行等による振動（環境振動）に対する要求性能が高くなり、居住空間での振動が問題となることも多い。建物建設後の対策は一般に困難で大きかりとなることから事前に振動の応答予測を行い、その対策を設計に反映させることが必要である。そのため、精度の高い応答予測法を確立することが重要となる。

電車の走行により生じる振動は、50Hz 以上の高振動数成分が卓越することから線路に近接する建物内で振動ばかりでなく固体音の発生の原因にもなる。電車走行時の建物内での応答予測法を提案する目的で、線路際に位置する既存及び建設中の建物に対し振動測定を実施した。本論文では、地盤の伝播特性と基礎への入力による低減効果に着目し実測結果と2次元FEM解析結果の比較・検討を行った。なお、地盤及び基礎を含む広域のモデルに対しFEM解析で100Hz 以上の高振動数範囲まで扱った例ほとんど見られないことから、2次元FEM解析でどの程度まで実現象を表し得るかに注目した検討を行う。

Fig.1に示すように、電車走行時の振動は、地盤を伝わり建物の基礎部に入力して建物内に伝播する。従って、走行時の加振力特性、地盤の伝播特性、建物基礎への入力特性及び建物上部構造の振動特性が把握できれば建物

内での振動応答予測が可能となる。Fig.2に、電車走行時の地盤の伝播特性、基礎部への入力による低減効果の現象を把握するために実施した測定ケースとこれに対応する解析モデルの関係を示した。

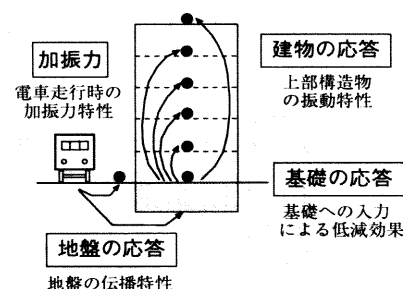


Fig.1 電車走行時の建物への振動伝播
(Propagation of Vibration by Train Running)

検討方法 特性把握	既存建物の測定	建設中建物の測定	解析モデル
地盤の応答 (地盤の伝播特性)	(a) 建物近傍地盤 	(d) さら地状態 	(g) 地盤モデル 加振
基礎の応答	(b) 建物1階部分 	(e) 基礎完成時 	(h) 地盤+基礎モデル 加振
基礎への入力 による低減効果 (基礎有無の差)	(c) = (b) - (a)	(f) = (e) - (d)	(i) = (h) - (g)

Fig.2 測定ケースと解析モデルの関係
(Relation between Measurement Case and Analytical Model)

キーワード：電車振動、振動伝播性状、振動測定、
地盤－基礎、距離減衰、基礎入力低減、
2次元FEM、3次元波動論、表面波、位相速度

II. 既存の事務所ビルの測定

1. 測定概要

測定場所は都内私鉄の駅近くの事務所ビルで6m幅の道路を隔てて線路に接している。Fig.3に建物の概要及び測定位置を示した。建物はRC造6階建てで線路に近い1スパンだけ地下階があり、他の1階部分は布基礎でラップルコンクリートによりGL-5mでN値50の砂礫層に支持されている。測定位置は線路際の地盤の他、線路からの距離がほぼ等しい地盤と建物1階を中心とした13点で、1時間の加速度記録を同時測定した。電車は上下2線が走行し、上り線が建物側で前方200m程度先に駅があるため建物前を減速して通過する。ここでは、上り電車走行時の上下成分の応答に着目して検討を行う。

Fig.4に、地盤と建物1階の応答及び線路からの距離が等しい1階と地盤の位置での応答差の1/3オクターブ分析結果を示す。これらの結果は、1電車通過時30秒間の測定記録を1000HzでA/D変換して1/3オクターブ分析を行い、10電車分の平均値として示した。なお、分析は公害振動計のFast特性相当の時定数を用いLmaxで表した。地盤では主に63Hz帯が卓越しており、線路から遠ざかるにつれて応答が小さくなっていること、1階と地盤の応答差から16Hz帯以上で建物への入力による低減効果が明瞭に表れていることが分かる。

2. 解析方法

測定対象の地盤と建物基礎部をモデル化して2次元FEM解析を行った。解析モデルは、それぞれ地盤の測定と建物1階の測定に対応する地盤のみのモデルと地盤+基礎のモデル (Fig.2 (a), (b), (g), (h) 参照) とした。Fig.5に地盤+基礎の解析モデルを示す。地盤は柱状図を参考に2層とし、それらの物性値を図中に示したが、VsはN値との

関係から求めた。建物基礎部は地下階やスラブ下のラップルコンクリート部分を考慮したモデル化を行った。FEMのメッシュサイズは150Hzまでを解析対象とし、地盤1層目は25cm、2層目は75cmとした。加振位置は建物から10mの位置とし、加振力1tonfで上下方向に定常加振(10~150Hzを10Hz刻み)を行って地盤や基礎上各点(2mピッチ)で上下成分の絶対加速度を求めた。

3. 測定結果と解析結果の比較

(1) 地盤の距離減衰

Fig.6に、測定結果と2次元FEM解析結果による地盤の距離減衰を示した。図は、線路(解析では加振位置)から4m地点を0dBとして示している。また、解析ではFig.6に示した地盤の減衰定数一律2%の結果と、測定地盤の土質の平均的な減衰定数(1層目5%, 2層目6%)を用いた結果を示した。さらに、半無限2層地盤とした3次元波動論により求めた結果も併せて示した。なお、このモデルの地盤の層厚及び物性値は2次元FEM解析と同じ値(減衰は2層共2%)とした。

図の結果を比較すると、測定結果(図の●)はFEM解析の2層地盤の減衰定数を5%, 6%とした結果と比較的対応すること、3次元波動論の結果(図の○)は測定結果に近い値を示すことが分かる。3次元の現象に対し3次元解析で検討することが妥当であるが、3次元波動論では基礎が存在する場合の解析は困難なため基礎による低減効果については2次元FEM解析による検討を行う。

(2) 建物への入力による低減効果

測定結果による建物内1階と地盤の応答差を、2次元FEM解析の

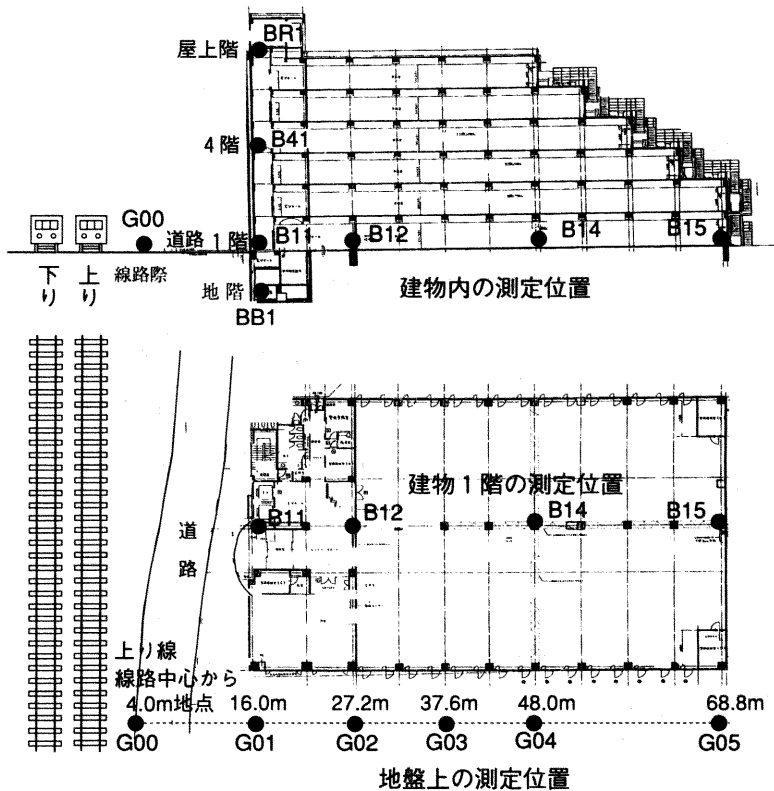


Fig.3 測定の概要
(Outline of Measurements)

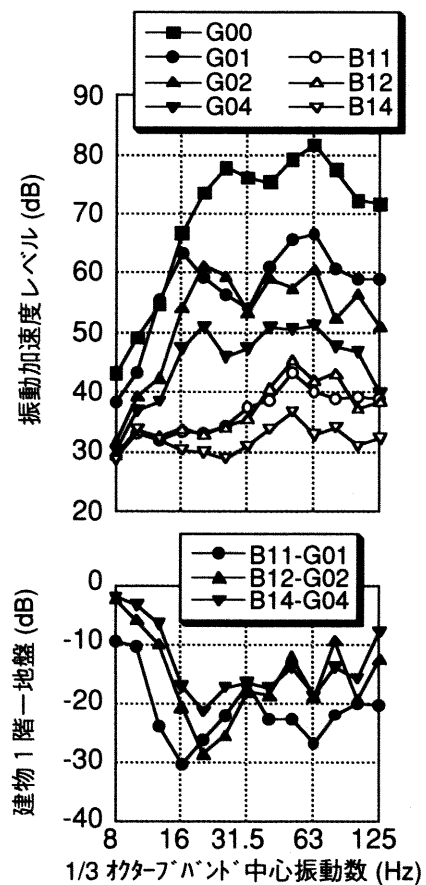
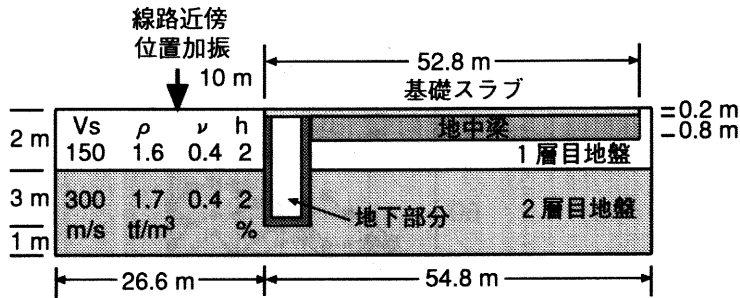


Fig.4 測定結果
(Measurement Results)



側面：伝達境界、底面：粘性境界

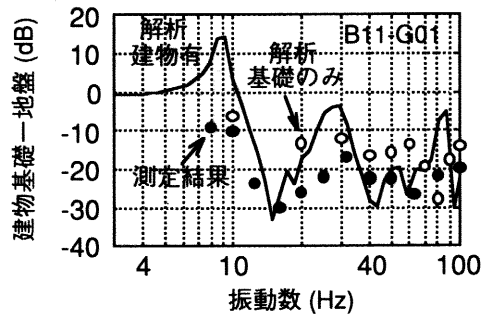
Fig.5 2次元FEM解析モデル
(2 Dimensional F.E.M. Model)

Fig.7 建物基礎への入力による低減効果

(Transmission Loss Characteristics of the Foundation)

地盤+基礎と地盤のみの応答差 (図の○) と比較して Fig.7 に示した。測定結果は6階建て建物の1階の応答を用いており、建物をモデル化していない基礎だけの解析モデルと直接対応しないことから、建物上部を6質点にモデル化した地盤+基礎+建物モデルによる解析を行い図に実線で示した。なお、建物モデルの1次振動数は測定結果の15Hzに合わせ、減衰定数は2%とした。

図では振動数の刻みがそれぞれ異なるため詳細な比較は困難であるが、15Hz付近の落ち込み方など測定結果は基礎のみの解析に比べ建物の解析結果に近い傾向を示していると言える。

Ⅲ. 建設中の集合住宅の測定

1. 測定概要

前述の既存建物の測定では、建物1階での応答には建物上部の影響が含まれている可能性があること、Fig.2に示した解析モデル (図の(g), (h)) と測定ケース (図の(a), (b)) の直接的な対応がつかないことから、解析モデルと対応する状態での測定 (図の(d), (e)) を計画し、線路に近接する建設中の集合住宅現場での測定を実施した。

測定場所はJR中央線の駅近くの集合住宅 (SRC造、地下1階、地上15階) の建設現場である。線路と建物基礎との位置関係を Fig.8 に示したが、線路は上り下り各2線ずつである。測定は4線全ての電車を対象とし、さら地状態、掘削後、基礎完成時、及び建屋完成時の各工事段階で地盤上、基礎上及び建物内について実施した。Fig.8中に測線を示したが、現場の工事状況によりさら地と他の測定での測線が異なっている。Fig.9に基礎形状と測定点位置を示す。基礎はべた基礎で深さ4mでN値50の砂礫層に支持されている。測定点は125Hzまでの分析及びFEM解析を実施することから高密度の配置 (線路近傍付

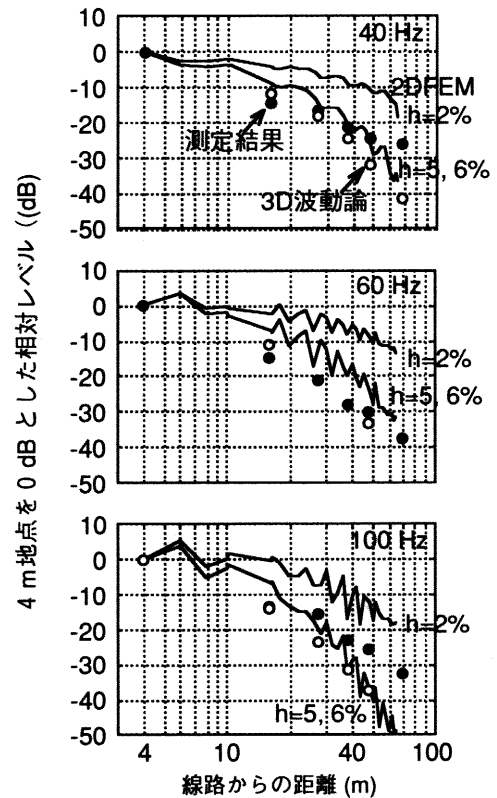


Fig.6 地盤の距離減衰

(Distance Attenuation of the Ground)

近では60cm間隔) とし、点数は原則として各測定とも敷地境界から反対側の基礎端部までの25点とし、上下方向加速度を中心に各測定とも2~3回に分けてそれぞれ1時間測定を行った。

ここでは、Fig.2 (d), (e) の測定ケースに対応するさら地状態と基礎完成時 (以下、基礎有と呼ぶ) の測定を対象とし、測線の違いに対し線路からの距離がほぼ等しい下り2番線走行時の上下成分の応答に着目して検討を行う。

測定結果は、Ⅱの既存建物の場合と同様な方法で1/3 octave分析結果の平均として示した。Fig.10にさら地状態の地盤と基礎有の基礎上の測定点の応答、及び線路から同距離にあるさら地と基礎有の測定点の応答差 (基礎有—さら地) の結果を示した。これらの結果から、基礎の存在による低減効果は20Hz以上で明瞭に表れ、振動数や測定位置による差が見られるものの全体的に10~20dB程度となっていることが分かる。なお、さら地状態と基礎有の測定における測線の違いは、敷地境界近傍地盤 (p01地点) での応答の比較から80Hz以下ではほとんど見られないことが分かった (文献1) 参照)。

2. 解析方法

測定対象の地盤と建物基礎部をモデル化して2次元FEM解析を行った。解析モデルは、さら地状態と基礎有の測定に対応させた地盤のみのモデルと地盤+基礎のモデル (Fig.2 (c), (d), (g), (h) 参照) を用いた。Fig.11に地盤+基礎の解析モデルを示す。地盤は柱状図を参考に2層とし、基礎の厚さは線路面からの実深さである3.6mとした。基礎の重量は基礎を無垢とした場合と、ピットや駐車場による空間部分 (Fig.9参照) を考慮して重量を半分 (以下、等価重量と呼ぶ) とした2ケースとした。モデルに与えた物性値を Table 1 に示すが、地盤の

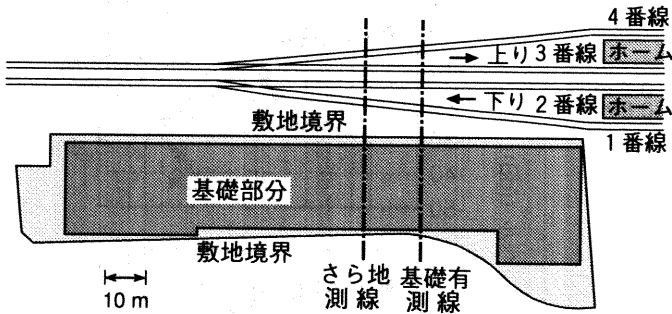


Fig.8 測定場所の概要

(Outline of the Measured Site)

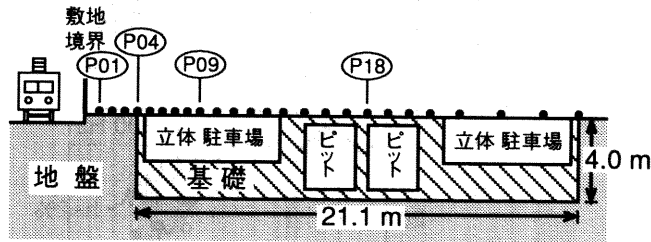


Fig.9 測定位置

(Position of Measured Points)

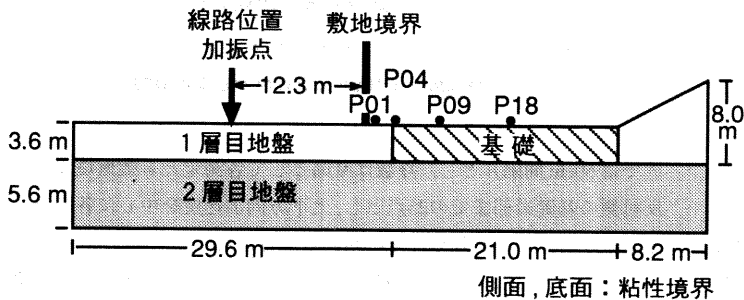


Fig.11 2次元 FEM 解析モデル

(2 Dimensional F.E.M. Model)

V_s は N 値との関係から求めた。また、FEM のメッシュサイズは 125Hz までを解析対象とするため 15cm とした。

解析は、下り 2 番線の線路位置を加振点とし加振力 1 tonf で上下方向に定常加振を行い、実測の測定点に対応する各位置での上下方向の絶対加速度を求めた。加振振動数は、1/9 オクターブの中心振動数としそれぞれ 1/3 オクターブ帯域に入る 3 つの振動数での結果のエネルギー平均を求め、この値を 1/3 オクターブ中心振動数の振動加速度レベルの値として実測結果と比較した。

3. 測定結果と解析結果の比較

(1) さら地状態の地盤の応答

Fig.12 に、P04 (線路側の基礎端部) 地点の測定結果で基準化した P09 と P18 地点でのさら地状態の測定結果と解析結果を併せて示した。解析結果は、ごく一部の振動数を除いて測定結果に対し 5dB 程度以内に入っており、測定結果として複数の電車の平均値を用いていることによるばらつきや僅かな測定位置の違いによっても値が変化することなどを考慮すれば、比較的良好な対応を示していると言える。

(2) 基礎有無の応答

Fig.13 に、線路に一番近い P01 (線路から 13m) 地点を 0dB として、

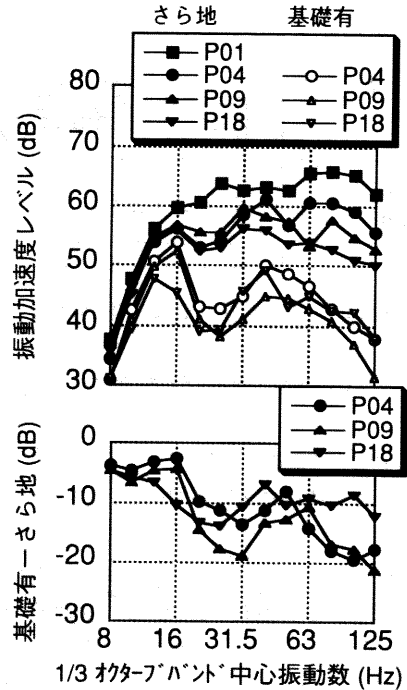


Fig.10 測定結果

(Measurement Results)

Table 1 地盤モデルの物性値
(Material Property of the Soil Model)

物性値	V_s m/s	γ t/m ³	ν	h %
1 層目地盤	150	1.6	0.4	2
2 層目地盤	300	1.7	0.4	2
基礎	1917	2.4	0.17	2

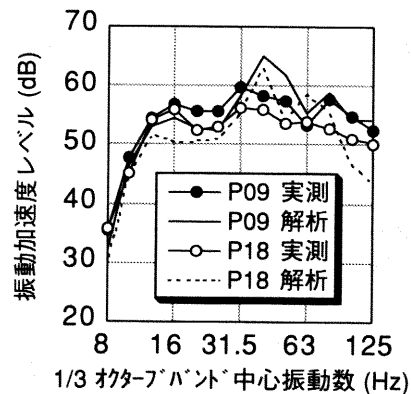


Fig.12 地盤の測定結果と解析結果の比較

(Comparison of Measurement Results and Analytical Results on the Ground)

主要な振動数でさら地状態及び基礎有の距離に対する測定結果と解析結果を併せて示した。さら地の状態では、測定と解析結果の対応は高振動数になると悪くなるものの、相対的に見ると解析結果は各振動数での距離減衰の傾向や地盤の高次モードと考えられる振幅の凹凸の表れ方など測定結果と対応していると言える。基礎有の結果では、16Hz

帯を除いて測定結果では基礎上の30m地点まではほぼ一定の値を示すのに対し解析結果では距離と共に減衰していること、基礎測定結果に見られる30m付近で値が増大する傾向が解析結果にも見られること、線路側の基礎端部に近い位置では測定結果は2種の基礎重量による解析結果(基礎無垢と等価重量)の範囲に入っているかこれに近い値を示していることなどが分かる。

(3) 基礎有無による低減効果

Fig.14に、主要振動数での距離に対する基礎有無(さら地状態と基礎有)の差を示した。測定結果は全体的に解析よりも低減効果が小さいが、測定結果に見られる各振動数での振幅の凹凸の表れ方は解析結果とほぼ対応している。

Fig.15に、1/3 octave分析結果による線路側の基礎端部付近でのさら地状態と基礎有の差を示した。測定結果は16Hz帯以下では解析結

果より小さいが、20Hz帯以上では2種の基礎重量による解析結果の範囲にはほぼ入っており、等価重量に近い結果を示している。線路からの距離が離れると地盤の距離減衰によりさら地状態での応答が小さくなり応答差が小さく評価されるため、低減効果はここで示したように線路に近い基礎上の応答から求めることが妥当である。

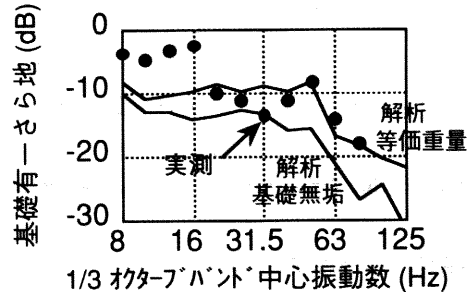


Fig.15 基礎への入力による低減効果
(Transmission Loss Characteristic of the Foundation)

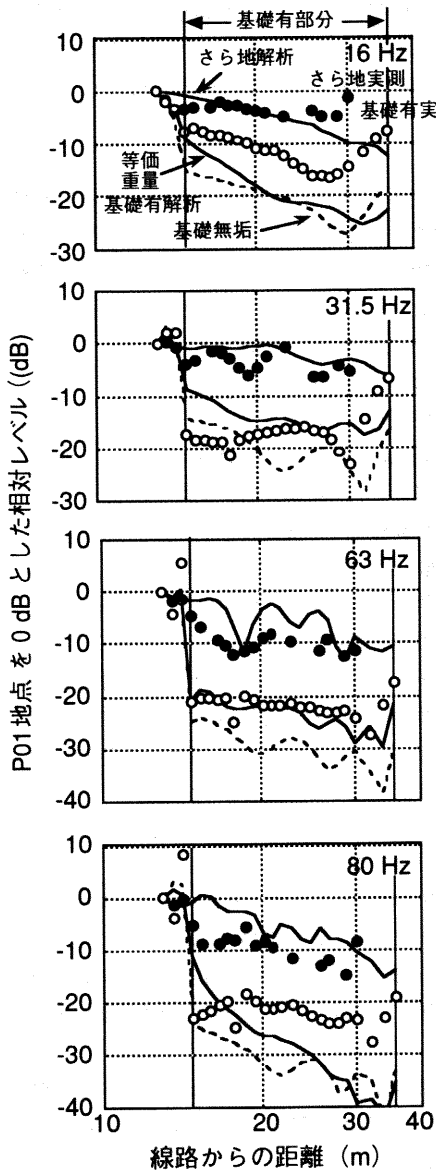


Fig.13 距離による地盤と基礎の応答
(Response of the Ground and the Foundation with Distance)

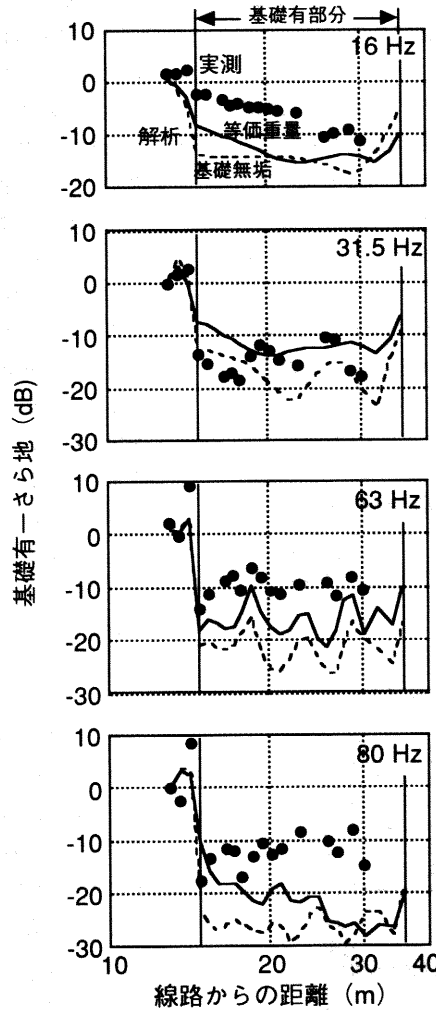


Fig.14 距離による基礎の低減効果
(Transmission Loss of the Foundation with Distance)

IV. 電車走行時の加振力特性の推定

本論では、測定と解析結果はすべて相対的な比較で示しているが、電車走行時の加振力特性が把握されれば定量的な応答予測(Fig.1参照)が可能となる。

ここではⅡで示した既存の事務所ビルの測定結果と3次元波動論による解析結果から線路位置での電車走行時の加振力の推定を試みた。

加振力は、線路際のG00(Fig.3参照、線路から4m)地点の測定結果と線路位置に加振力1 tonfを入力した同位置の解析結果から求めた。Fig.16の●がその結果であるが、これは8両編成の電車が通過した時の結果で1Nを100dBとした加振レベルで示している。図中の実線で示したものは、文献2)に示されている1車輪分の加振力(直接計測法による結果)である。この文献結果と比較するために文献3)を参考として本推定結果から1車輪分の加振力(8両分、片側車輪32個として●の結果-15dB)を求め、図中に○で示した。文献3)による図中の実線と本推定結果○を比較すると、全体的な傾向として両者は良く対応している。また、文献結果より小さい値となっているが本推定結果は駅の近くで速度が遅いことによるものと考えられる。なお、Fig.16中の文献2)の結果は著者が文献の図から数値を読み取ったものである。

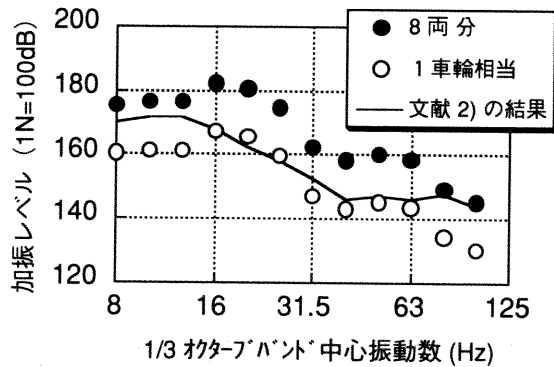


Fig.16 加振力特性の推定結果

(Calculated Exciting Force Characteristics by Train Running)

V. 位相速度による地盤構造の推定

解析に用いる地盤モデルの物性値を決定するに当たって、その拠り所を対象地盤の地盤調査結果に求めることになる。地盤調査でP S 検層が行われるのは希で、一般にはボーリング調査が行われ柱状図やN値の情報が得られる。本論でもこれらを基に地盤モデルの物性値を決定している。ここでは、Ⅲで示した電車走行時のさら地地盤の測定結果を用いて各測定点間の位相差から地盤構造の推定を試みた。

1. さら地地盤の測定結果

Ⅲでは下り2番線の測定結果を用いて検討を行ったが、ここでは線路の継ぎ目と思われる段差により各車輪の通過時の応答が明瞭に表れている下り1番線の測定結果に着目し検討を行う。下り1番線の線路に一番近いP01地点での応答加速度波形をFig.17に示したが、各車両(10両編成)の車輪1輪ずつの段差通過時に応答が大きくなっている。

2. 地盤構造の推定結果

4本の電車の各先頭及び最後尾車両の1台車分と各車両間で近接する2台車分毎に波形を分割(2秒間ずつ各電車11分割)し、2測定点

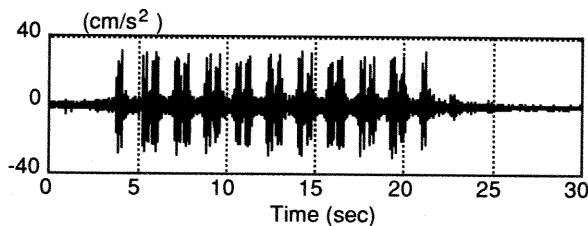


Fig.17 P01地点での測定波形

(Measured Wave Form at P01 point)

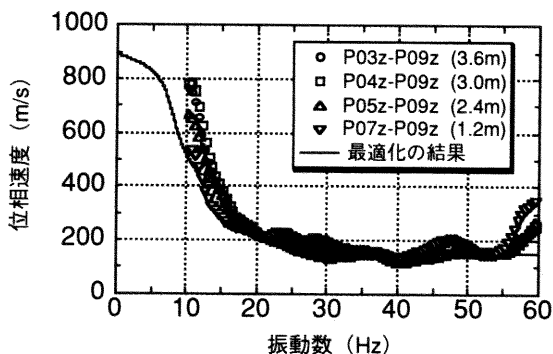


Fig.18 測定結果と最適化による位相速度

(Phase Velocity of Measurement Results and Optimization Curve)

間のアンサンブル平均によるクロススペクトル(ハニング10回)から位相遅れを求めた⁴⁾。この位相遅れと2点間距離の関係から位相速度を求めた。Fig.18にそれぞれP03, P04, P05, P07とP09の2点間での位相速度の周波数特性を示したが、Rayleigh波の分散性が明瞭に表れており、10Hzで位相速度が500~800 m/sの値で、振動数の増大と共に減少して30~55Hzの高振動数では150~200m/sに収束している。Rayleigh波の波長と地盤の深さとの関係から低い振動数では地盤深部まで含まれたRayleigh波の速度が、高振動数ではほぼ表層地盤の速度が表われているものと考えられる。

図の4組の位相速度の平均に対し地盤を3層の成層モデルと仮定した最適化⁵⁾を行い、逆解析により地盤のS波速度とその層厚を求めた。最適化により得られたRayleigh波の理論分散曲線を図中に実線で示した。実測結果はこの理論曲線の傾向と対応しており、特に20Hz以上の高振動数では位相速度の値も良く対応している。最適化による逆解析から求めたS波速度と層厚は、1層目が160m/s, 3m, 2層目が300m/s, 7m, 3層目が962m/s, ∞で、Table 1に示した地盤の柱状図とN値から推定したVsの値と良く対応していることが分かる。

VI. まとめ

電車走行時の建物内での振動の応答予測法を提案する目的で、線路沿いに位置する2つの建物の振動測定を実施した。地盤の伝播特性と基礎への入力による低減効果に着目して測定結果と2次元FEM解析結果の比較・検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 測定と解析結果から、高振動数までの基礎への入力による低減効果や地盤の距離減衰の特性が把握できた。
- 基礎による低減効果の距離による振幅分布形状は振動数に依存する。即ち、16Hzでは単調減少を示すが、高振動数になると地盤の高次モードの影響と考えられる振幅の凹凸が見られる。
- 地盤の距離減衰は高振動数になるほど大きくなる傾向を示すが、80Hz以上ではこの傾向はあまり明確には把握できない。
- 測定と解析の結果を用いて電車走行時の加振力特性が推定でき、定量的な振動予測が可能となる。
- 地盤の測定結果から求めた位相速度により表層の地盤構造が推定でき、地盤モデルの物性値決定の有効な手段となり得る。

今後、これらの知見を活かし、さらにデータを蓄積して建物内での応答予測評価についても検討を行っていくつもりである。

参考文献

- 石橋, 八幡, 堀越; 電車走行時の地盤-基礎の振動伝播性状(その1), (その2), 日本建築学会大会梗概集 Vol. D-1, 1999.9.
- 井上, 木村 他; 軌道上建築物に対する固体音制御のための列車走行時の加振力特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第432号, 1992.2.
- 木村, 井上 他; 電車走行時における加振力の軌道床への伝達特性と振動応答量の算出方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第454号, 1993.12.
- 石橋, 八幡, 堀越, 野澤; 電車走行時の地盤-基礎の振動伝播性状(その3), 日本建築学会大会梗概集 Vol. D-1, 2000.9.
- 山中, 石田; 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集 第468号, 1995.2.