

地下鉄振動の振動伝搬性状について

- 振動実測調査を通じて -

森 下 真 行 斉 藤 芳 人
藤 橋 克 己 鶴 見 真 也^{*1}

要 旨

居住者の環境振動問題への関心が高まるにつれて、住環境に対する意識も変化しつつある。環境振動としては比較的大きな振動を発生する地下鉄などの近傍に建つ住宅に対しても、良好な居住空間が要求されてきている。居住者の要求レベルを満足するためには、設計段階から環境振動に対する居住性能を予測し評価する必要がある。しかしその予測精度は十分なものではなく、建設工事の進行とともに振動実測調査を実施し、その都度設計にフィードバックする方法がとられている。

本報告は、2 棟の建物およびその地盤にて実施した振動実測調査を通じて、地盤の距離減衰、杭および耐圧版の入力損失、建物内（上下・水平方向）振動伝搬性状およびスラブ増幅率についての傾向を把握するものである。得られた振動特性結果は、それぞれ既往の研究事例とも対応しており、妥当な結果であると思われる。本報告結果は、環境振動予測もしくは予測精度の改善に役立つ基礎資料として活用可能と思われる。

キーワード 地下鉄振動 / 上下振動 / 振動伝搬 / 距離減衰 / 入力損失 / スラブ増幅率

目 次

- | | |
|------------|--------------|
| 1 . はじめに | 4 . スラブによる増幅 |
| 2 . 振動実測調査 | 5 . まとめ |
| 3 . 測定結果 | 6 . おわりに |

PROPAGATION PROPERTIES OF SUBWAY-INDUCED VIBRATION THROUGH VIBRATION MEASUREMENT ON SITE

Tadayuki MORISHITA Yoshihito SAITO
Katsumi FUJHASHI Masaya TSURUMI

Synopsis:

As the concern for the environmental vibration problem rises, an excellent living environment has been demanded also even in the building near subway etc. In that case, it is necessary to forecast the residence performance to an environmental vibration from the design phase to satisfy the resident's demand level. However, the forecast accuracy is not enough, so the vibration measurement should be executed as the construction work advances in order to feedback to the design.

This report shows divergence decrease of the ground, input loss of pile and mat slab, the propagation properties of the vibration (top and bottom and horizontal direction) and vibration transmissibility of slab in building through the vibration measurement in the two buildings and the ground. The vibration characteristic results obtaining correspond to the past case. It seems that these results can be used for the environmental vibration forecast and improvement of forecast accuracy.

* 1 本店 建築営業第三部

1. はじめに

近年、居住者の環境振動問題への関心が高まるのを受けて、住環境に関する意識も変化し、その要求レベルも高まりつつある。地下鉄などの軌道交通近傍もしくは直上に、住居などの比較的良好な居住空間が要求される建物を建設する場合、地下鉄等の走行に起因する振動あるいは固体伝搬音の問題を無視することはできない。高まりつつある居住者の要求レベルを満足するためには、建物設計段階から環境振動に対する居住性能を検討・評価し、必要に応じて対策を実施する必要がある。しかしながら、設計段階で地下鉄等の走行に起因して発生する建物内振動もしくは固体伝搬音を精度良く予測することは非常に困難であり、建設工事の進行とともに振動実測調査を実施しその都度設計にフィードバックしながら対策を進める方法がとられている。

一般に地下鉄等の走行に起因する建物内振動を予測する場合、主に以下の方法が考えられる。

□ 地盤振動

建物建設予定地の地盤上で振動実測調査を実施し、地盤振動を把握する。振動調査点と建物建設地との間に距離的な差がある場合には、既往の距離減衰等を適用し建設地点の地盤振動を予測する。

振動発生源から建物建設予定地周辺地盤までをモデル化し、建設予定地の地盤振動を解析的に予測する。

□ 建物内振動

他の建物で実施した振動実測調査等を参考に建物内振動伝搬性状の特性を把握しておき、その特性を用いて建物内振動を予測する。

建物をモデル化し、解析的に建物内振動を予測する。最終的に地盤（上記 もしくは ）、建物内（同 もしくは ）の予測法を組み合わせ、地盤から建物内の振動を予測する。

本報告は、地下鉄振動の振動実測調査を通じて上記および に対する検討結果を示すものである。2 棟の建物およびその地盤において振動伝搬性状を把握するとともに、既往の研究との比較によりその妥当性を検討している。

2. 振動実測調査

2.1 建物概要および地下鉄との位置関係

図-1 および図-2 に振動実測調査を実施した 2 棟の建物の概要（以下、建物-A、建物-B と称す）および地下鉄との位置関係を、表-1 に各建物付近の土質調査結果をそれぞれ示す。建物-A は壁式 RC 造地上 11 階建の集合住宅であり、基礎構造は GL-26.2m 以深の砂礫層を支持層とした杭基礎である。地下鉄は建物に対して斜め方向に走行しており、地下鉄と建物との水平最短距離は約 8m である。地下鉄の土被りは約 4.2m、建物底面は GL-6m 付近である。建物-B は RC 造地上 4 階建の集合住宅であり、

基礎構造は直接基礎である。地下鉄は建物に対して斜め方向に走行しており、地下鉄と建物との水平最短距離は約 5m である。地下鉄の土被りは約 4.8m であり、建物底面は GL-2m 付近に位置している。

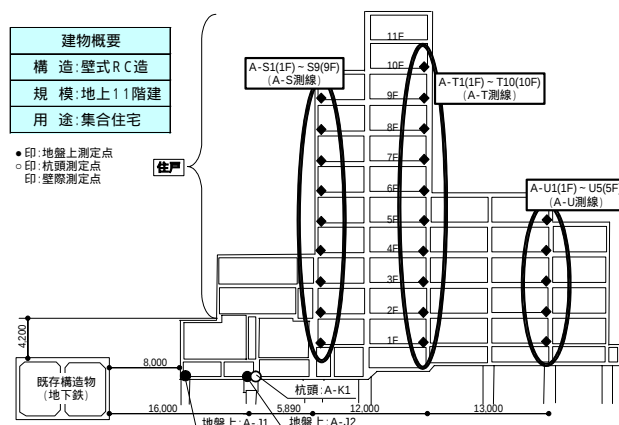


図-1 建物-A の建物概要

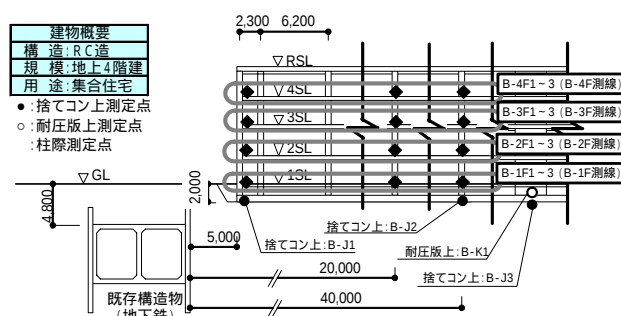


図-2 建物-B の建物概要

表-1 建物付近地盤の土質調査結果

建物-A			建物-B		
深度(m)	地質名	N値	深度(m)	地質名	N値
0.0-3.0	埋土	5	0.0-0.7	表土	-
-5.8	ローム	4	-3.8	ローム	2-3
-7.5	粘土質ローム	2	-4.5	粘土質ローム	1
-10.8	凝灰質粘土	3	4.5m以深	砂礫	50以上
-14.5	凝灰質粘土	10			
-17.2	細砂	30			
-24.5	シルト	9			
-26.2	細砂	50以上			
26.2m以深 (支持層)	砂礫	50以上			

2.2 振動測定概要

(1) 振動実測調査方法

測定は、両建物ともに以下の条件で実施した。

- 測定波形：振動加速度波形
- 測定方向：鉛直方向
- 測定間隔：0.001 秒（1000Hz）
- 地下鉄測定本数：5 本（建物側軌道走行列車のみ）

(2) 測定工程および振動実測点

図-1 および 2 には振動実測調査点を併せて示してある。また、表-2 に振動実測調査工程(建物建設工事進捗状況)を示す。建物-A に関しては杭施工後、9 階および屋上階躯体打設完了後の計 3 回振動実測調査を実施した。杭施工後に、地盤上 A-J1、J2 の 2 測定点および杭頭 A-K1 測定点で測定を実施している。A-J2 測定点と A-K1 測定点は地下鉄からの距離がほぼ等しい地点である。建物内の A-S1～9 測定点(以下、A-S 測線と呼ぶ)および A-T1～10 測定点(以下、A-T 測線と呼ぶ)は、それぞれ平面内の同一の壁際とし、A-S 測線に関しては 1 階から 9 階まで、A-T 測線に関しては 1 階から 10 階まで、A-U 測線に関しては 1 階から 5 階までを調査の対象とした。建物高さ方向に関しては測定工程が 2 回に別れるため、中間階付近に共通測定点を設け測定結果が連続となるように配慮した。建物-B に関しては捨てコン打設後、1 階および屋上階躯体打設完了後の計 3 回振動実測調査を実施した。まず捨てコン打設後に、捨てコン上 B-J1～3 の 3 測定点で測定を実施した。次いで耐圧版上 B-K1 測定点(捨てコン上 B-J3 測定点上に施工した耐圧版上の測定点である)にて測定を実施した。屋上躯体完成後に建物水平方向の測定を実施した。B-1F1～3 測定点(以下、B-1F 測線と呼ぶ)は 1 階の測定点、同じく B-2F1～3 測定点(以下、B-2F 測線と呼ぶ)は 2 階、B-3F1～3 測定点(以下、B-3F 測線と呼ぶ)は 3 階、B-4F1～3 測定点(以下、B-4F 測線と呼ぶ)は 4 階に位置する測定点である。末尾番号は 1 が最も地下鉄側の測定点(以下、B-1 測線と称す)を、2 は建物中央付近の測定点(以下、B-2 測線と称す)を、3 は最も地下鉄から離れた測定点(以下、B-3 測線と称す)をそれぞれ示している。

(3) 分析方法

各測定点で得られた加速度波形に対して、中心周波数が 20 から 125Hz の範囲で 1/3 オクターブ分析を実施し、各周波数帯域の振動加速度レベルを求めた。なお、振動加速度レベルは列車通過時間幅で処理している。最終的に、周波数帯域毎に地下鉄通過 5 本分の振動加速度レベルの平均値を求め、その測定点での代表値と見なした。

3. 測定結果

3.1 地盤の距離減衰

ここでは、振動実測調査結果より地盤振動の入力レベルおよび距離減衰の傾向を把握する。

図-3 に建物-A の地盤上(A-J1)測定点で得られた加速度波形の例を、図-4 に建物-B の捨てコン上(B-J1)測定点で得られた加速度波形の例をそれぞれ示す。A-J1 測定点は地下鉄通過の影響を受ける時間は約 10 秒間であり、その間に最大で 32cm/s^2 程度の振動加速度が発生している。B-J1 測定点は地下鉄通過の影響を受ける時間は約 6

表-2 振動実測調査工程

測定回	項目	建物-A	建物-B
1 回目	測定時 状況	杭施工後	捨てコン 打設後
	測定 場所	地盤上(A-J1,2) 杭頭(A-K1)	捨てコン上 (B-J1～3)
2 回目	測定時 状況	9階躯体 打設完了後	1階躯体 打設後
	測定 場所	1階～6階壁際 (A-S1～6)：A-S測線 (A-T1～6)：A-T測線 (A-U1～5)：A-U測線	基礎上 (B-K1)
3 回目	測定時 状況	屋上階躯体 打設完了後	屋上階躯体 打設完了後
	測定 場所	5階～10階壁際 (A-S5～9)：A-S測線 (A-T5～10)：A-T測線	柱脚近傍 (B-1F1～3)：B-1F測線 (B-2F1～3)：B-2F測線 (B-3F1～3)：B-3F測線 (B-4F1～3)：B-4F測線

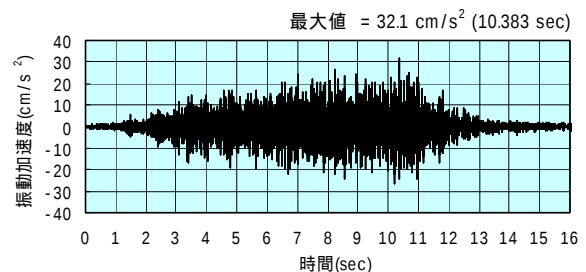


図-3 建物-A 地盤上(A-J1)測定点の加速度波形例

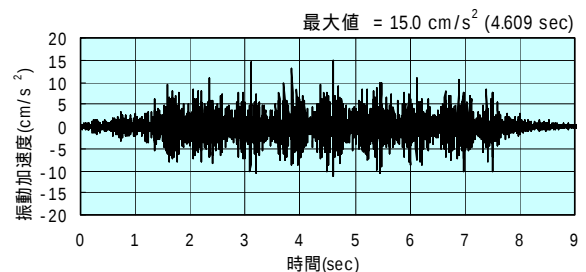


図-4 建物-B 地盤上(B-J1)測定点の加速度波形例

秒間であり、その間に最大で 15cm/s^2 程度の振動加速度が発生している。

図-5 に建物-A の地盤上(A-J1、J2)および建物-B の捨てコン上(B-J1、2)測定点の測定結果より求めた振動加速度レベルを示す。建物-A の地下鉄側測定点(A-J1)では 50Hz から 100Hz 帯域の範囲にピークを有し、最大で 70dB 程度の振動加速度レベルを示す。地下鉄から離れた測定点(A-J2)では同じく 60 から 65dB であることがわかる。建物-B の地下鉄側測定点(B-J1)では 40Hz から 100Hz 帯域の範囲にピークを有し、最大で 60dB 程度の振動加速度レベルを示す。地下鉄から離れた測定点(B-J2)では同じく 40dB 程度であることがわかる。

図-6 に両建物地盤上測定結果より求めた距離減衰効果を示す。一般に距離減衰を表現する場合、各測定状況(例

えば、加振源からの距離、測定点間の距離）が異なることや地盤の距離減衰特性を考慮して、加振源からの距離が倍となった場合の相対低減量で表現する方法が用いられている．よって、本報でも距離減衰効果は地下鉄からの距離を倍距離(D.D)とした場合の距離減衰効果として示すこととする．両地盤ともに 40Hz 帯域以上の領域および AP 値 (20Hz から 125Hz 帯域の合成値) で 6 から 8dB /D.D の距離減衰効果を示している．31.5Hz 帯域以下の領域では周波数が低くなるほど距離減衰効果も小さくなる傾向を示している．建物-A 地盤の 25Hz 帯域以下では逆に増幅する傾向を示している．これは杭による影響が現れたものと思われる．

3.2 杭による入力損失効果

ここでは、建物-A の地盤上および杭頭の振動実測調査結果より杭による入力損失効果について検討を行う．ここでの入力損失とは、振動が伝搬し杭にぶつかった際に地盤と杭の間で入 - 反射を起こす、また杭によって地盤の動きが拘束される、こと等により振動が伝わりにくくなる現象のことである．

図-7 に地下鉄からの水平距離がほぼ等しい地盤上測定点 (A-J2) と杭頭測定点(A-K1)での測定結果より求めた振動加速度レベルおよびそのレベル差を示す．なお、測定した杭径はφ 1300 である．杭頭測定点(A-K1)では 40Hz から 100Hz 帯域の範囲にピークを有し、最大で 55dB 程度の振動加速度レベルを示す．両測定結果の差は杭による入力損失効果を示しており、40Hz および 50Hz 帯域で最小値 6dB ,125Hz 帯域で最大値 14dB を示す範囲に分布する結果であった．既往の研究 1)によれば、杭の入力損失効果は 20Hz から 100Hz 帯域において概ね 10 から 20dB である．本測定結果は既往の研究の下限付近に位置している．よって、杭による入力損失効果は 20Hz から 125Hz 帯域の範囲内で平均した場合 10dB 程度を見込むことが可能であると思われる．

3.3 耐圧版による入力損失効果

ここでは、建物-B 捨てコン上および耐圧版上の振動実測調査結果より耐圧版による入力損失効果について検討を行う．耐圧版による入力損失とは、杭の場合と同様、振動が伝搬し耐圧版にぶつかった際に地盤と耐圧版の間で入 - 反射を起こす、また耐圧版によって地盤の動きが拘束されること等により振動が伝わりにくくなる現象のことである．

図-8 に捨てコン上(B-J3)と耐圧版上(B-K1)との測定結果より求めた振動加速度レベルおよびそのレベル差を示す．50Hz 帯域以上の領域において 12dB 程度の低減効果が認められる．31.5Hz および 40Hz 帯域は 6dB 程度まで低下し、それ以下の周波数領域では帯域によるばらつきが大きい．既往の研究 2)によれば耐圧版の入力損失効果

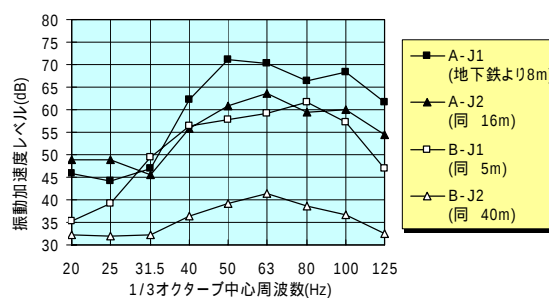


図-5 地盤の振動加速度レベル

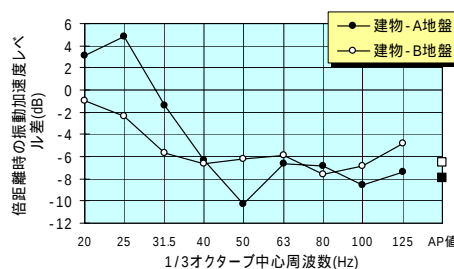


図-6 地盤の距離減衰効果

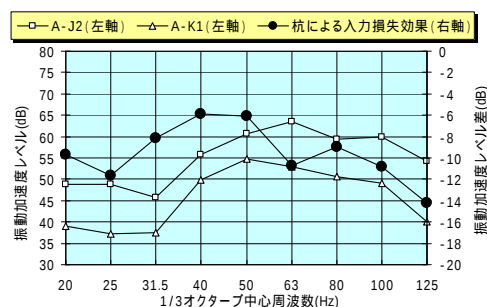


図-7 杭による入力損失効果 (建物-A)

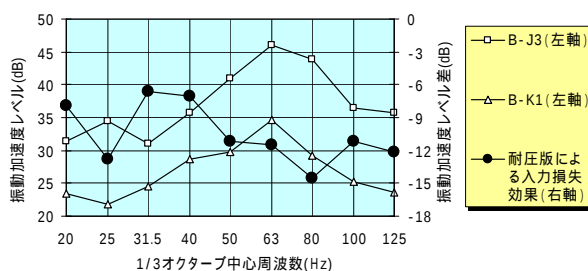


図-8 耐圧版による入力損失効果 (建物-B)

は 20Hz から 125Hz 帯域において 10 から 15dB 程度である．本測定結果で得られた 50Hz 帯域以上での入力損失効果は 12dB 程度であり、既往の研究範囲に入っており、妥当な結果であると考えられる．よって、耐圧版による入力損失効果は地下鉄通過時にピークとなる 50Hz 帯域以上の領域に対しては安全側の評価としても 10dB 程度は見込むことが可能であると思われる．一般に振動は杭および耐圧版を通じて建物内に伝搬する．よって杭基礎の場合は杭もしくは耐圧版としての入力損失効果 10dB 程度が基礎全体の入力損失であると考えられるべきである．

3.3 建物高さ方向の振動分布性状

ここでは、建物-A（測線 A-S，T，および U）の振動実測調査結果より建物高さ方向の振動伝搬性状について検討を行う。

図-9 に建物高さ方向の振動加速度レベル分布性状を示す。なお、各階の振動加速度レベルは各測線 1 階の振動加速度レベルに対する相対値で表現している。先にも示したが A-S 測線および A-T 測線は中間階付近の上下で測定時期が異なるため、両測定時に共通測定階を設け連続性を配慮している。低い周波数帯域では全測線とも直線的な分布性状を示すが、周波数帯域が高くなるにつれ途中階で増減を繰り返す複雑な分布性状を示すようになる。直線的な分布性状を示す低い周波数帯域では、A-S 測線は測定最上階までほぼ同レベルで分布するが、A-T 測線および A-U 測線は測定上階ほど増幅する傾向にある。このような直線的な分布性状を示す周波数範囲では建物高さ方向の減衰はほとんど期待できないことが分かる。複雑な分布性状を示す高い周波数帯域では部分的に低減している階も見られるが、測定最上階では 1 階とほぼ同レベルの振動となっている。これは測定最上階が屋上階からの振動の跳ね返りや自由端境界である等の影響を受けて局所的に振動が大きくなるためであると考えられる。各測線での振動加速度レベル分布性状、増減の度合い等には若干の差が認められる。この原因として、A-S 測線は地下鉄側外壁面であるため主に壁を振動の伝搬経路としていること、A-T および U 測線は壁以外に隣接するスラブ、梁等からの振動の影響を受けていること、地下鉄からの距離が異なるため伝搬経路がより複雑になっていること、等の影響が考えられる。

既往の研究 3) では、建物内に電車軌道を有する鉄骨造建物における電車走行時の建物高さ方向の振動伝搬性状について実測調査による検討を報告している。これによれば、電車軌道側建物端柱通りについては、31.5Hz 帯域までは減衰傾向はなく、それ以上の周波数領域では上階ほど減衰する傾向を示すが、電車軌道逆側柱通りは、40Hz 帯域までは増幅傾向にあり、それ以上の周波数帯域では減衰傾向は示さない、との測定事例が報告されている。既往の研究と本測定とでは対象とする建物構造形式（鉄骨造と壁式鉄筋コンクリート造）および電車軌道位置（建物内軌道と地下鉄軌道）等が異なるが、その比較を試みる。本測定結果の地下鉄側柱通りでは、40Hz 帯域以上の領域では一律減衰する傾向ではなく、既往の研究とは相違する結果となった。これは先に挙げた構造形式の違いによるところが大きいと思われる。31.5Hz 帯域までの減衰傾向を示さない傾向は一致している。地下鉄逆側柱通りでは 31.5Hz 帯域までは増幅傾向にあり、40Hz 帯域以上の周波数領域では増減を伴っており減衰傾向を示すものではなく、その傾向は概ね既往の研究事例と一致する。

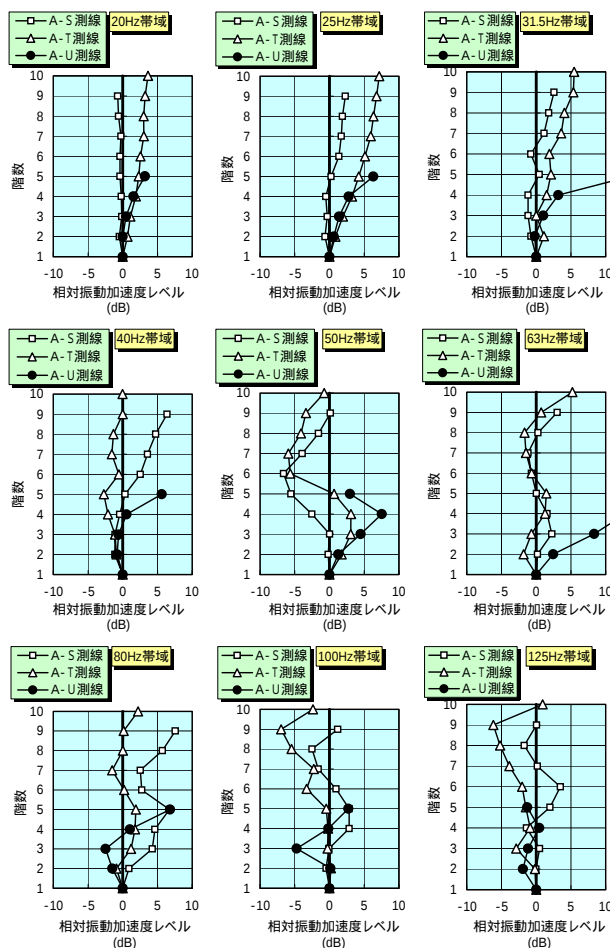


図-9 建物高さ方向の振動加速度レベル分布
(建物-A)

3.3 建物水平方向の振動分布性状

ここでは、建物-B（測線 B-1F，2F，3F および 4F）の振動実測調査結果より建物水平方向の振動伝搬性状について検討を行う。

図-10 に建物水平方向の振動加速度レベル分布性状を示す。なお、各階の振動加速度レベルは各測線の最も地下鉄側測定点の振動加速度レベルに対する相対値で表現している。25Hz から 50Hz 帯域における距離減衰は 6 から 14dB/D.D（測線 B-1F を基点と仮定）の範囲にあり、低い周波数帯域ほど距離減衰効果は小さくなる傾向を示す。ただし、階数による差はほとんど見られない。20Hz 帯域および 63Hz 帯域以上の領域では階数および測線による違いが明確である。20Hz 帯域および 80Hz と 125Hz 帯域の一部には増幅する場合も見られる。既往の研究 3) では、建物高さ方向と水平方向とは明らかに異なる傾向を示す、と報告されており、この傾向は概ね一致する。既往の研究事例（例えば 3）ではこの違いの要因として、建物高さ方向は縦波が、水平方向は曲げ波が支配的であるためである、と指摘している。本測定事例による傾向もこの要因であることが考えられるが、その詳細な検討に関しては今後の課題である。

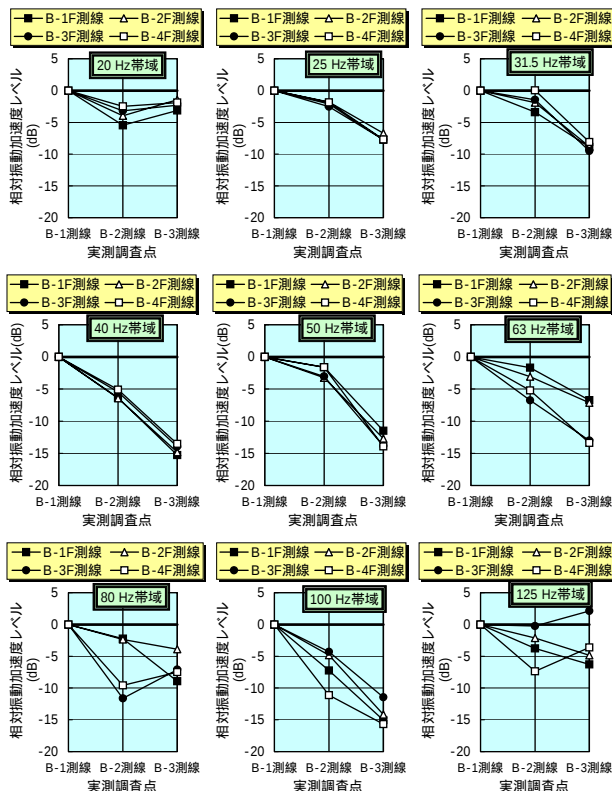


図-10 建物平面方向の振動加速度レベル分布性状 (建物-B)

4. スラブによる増幅

ここでは、柱もしくは壁を伝搬した振動がスラブでどの程度増幅するかをスラブ上での振動実測調査により把握する。

図-11 にスラブ振動実測調査点を示す。対象としたのは建物-A の1階に位置するスラブ厚 22cm の在来スラブである。振動測定点は壁際1カ所とスラブ中央1カ所の計2カ所とした。なお、地下鉄振動の実測調査に先駆けて実施した自由振動実験よりスラブの1次固有振動数は55.2Hz、1次の減衰定数は2.4%であることを確認している。

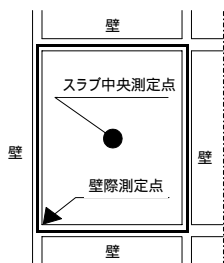


図-11 スラブ上測定点

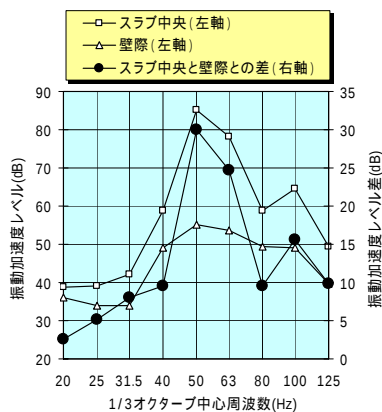


図-12 スラブ上測定結果

図-12 に壁際およびスラブ中央の振動加速度レベルとそのレベル差を示す。スラブ中央は壁際に比較して1次固有振動数を含む50Hz帯域で30dB程度増幅する結果となった。既往の研究3)によれば、柱脚に対するスラブ中央の増幅率はスラブの固有振動数成分を含む帯域で10から20dBである。本測定結果は既往の研究と比較すると増幅率が大きくなっており、見かけ上スラブの減衰定数が小さくなっている。これはスラブに対する入力、既往の研究では柱という点入力なのに対して、本測定事例では境界下の壁からの入力であり、この入力の違いが現れたものと思われる。

5. まとめ

建物内振動伝搬性状の把握を目的として、建物建設段階毎に地下鉄振動の振動実測調査を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 地盤の距離減衰は40Hz帯域以上で概ね6dB/Dであった。
- (2) 杭の入力損失効果は20Hzから125Hz帯域で6から14dBの範囲、耐圧版の入力損失効果は同じく6から15dBの範囲に分布している。
- (3) 建物高さ方向と水平方向の振動伝搬性状は異なる。高さ方向では地下鉄からの距離が離れても減衰傾向は見られないが、水平方向では地下鉄からの距離に比例して減衰する傾向を示す。
- (4) 壁際とスラブ中央では1例であるが、スラブの1次固有振動数を含む帯域で30dB程度増幅するとの結果を得た。

6. おわりに

数少ない実測調査例であるが地盤～基礎～柱・壁～スラブに至る振動伝搬性状について、その傾向を概ね把握した。今後はさらに振動実測調査例を積み重ねるとともに、地下鉄振動の精度良い予測の確立を図っていきたい。

精度良い予測を行うためには、地盤・建物の特性把握、解析精度の向上の他に、検討対象とすべき加振源データの存在が必要不可欠である。今後はそのような加振力予測手法についても検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) 吉原醇一，中村充他：地下鉄振動の伝搬性状に関する研究（その2），大林組技術研究所報，NO.43，pp.21-28，1991.8
- 2) 石橋敏久，八幡夏恵子他：電車走行時の地盤 - 基礎の振動伝搬性状（その1），日本建築学会学術講演梗概集，D-1，pp.343-345，1999.9
- 3) 川久保政茂，林田敏広，三輪晋也他，電車走行に伴う建物内振動伝搬の実態に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第523号，pp.7-14，1999.9