

鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究（その3）

—防振軌道の固体音遮断性能—

Propagation Characteristics of Structure-Borne Sound Caused by Train (Part 3) — Cut-off Characteristics of Structure-Borne Sound of Floating Railway Track —

安 藤 啓 田 野 正 典 峯 村 敦 雄

要 約

鉄道軌道から発生する固体音を低減する手法として、ここでは防振軌道構法について報告する。まず既往の研究の紹介をし、さらに我々が手がけた京急上大岡駅とJR九州小倉駅の2例について、その概要を報告した。京急は軌道を使用しながらの改修工事であったため、軌道スラブは小割にして一つずつ夜中に交換しており、低減効果20dBを目標とした構法の採用で30dB程度得られた。JR小倉はダイヤを改正して本線を運行停止した状態での施工であったため、一体の軌道スラブの施工ができ、防振効果として30dBを目標とした工法の採用でそれ以上の効果が得られた。

目 次

- I. はじめに
- II. 既往の研究概要
- III. 京急上大岡駅の例
- IV. JR九州小倉駅の例
- V. おわりに

I. はじめに

鉄道からの固体音伝搬特性について(その1) (1), (その2) (2)と報告してきているが、ここでは(その3)として、固体音対策のうち最も効果的と思われる防振軌道構法についての検討結果を報告する。

軌道の防振対策の中で、軌道の低ばね化を図ったものとしては、バラストマットや防振枕木があるが、これについての固体音遮断効果については次回に報告予定である。

これと同様の発想から軌道全体を防振装置で支持する（以下防振軌道）構法の開発が進められてきている。国内においても幾つかの事例はある（3）,（4）もののその実績はまだ少ない。ここではまず既往の研究の概要を紹介し、その後我々が採用した京浜急行上大岡駅とJR九州小倉駅の二つの防振軌道施工例についての検討結果を報告する。

II. 既往の研究概要

防振軌道に関する研究報告の内、固体音分野まで検討している文献は以下の三つである。それぞれの文献についてその概要をまとめた。

1. コイルスプリングの例（5）

ドイツの市電に適用したコイルスプリングの実施例で、日本の建設会社の技術研究所による報告である。防振軌道の固有振動数は5Hzに設計し、減衰が5%としている。

実測は同一ポイントで防振材の有りの無しの測定ができないため、測定場所を変えて振動遮断効果を表示している。その結果について筆者らは、30Hz以上で20dB、100Hz以上で40dBと述べている。防振軌道の断面をFig.1に、振動低減効果をFig.2に示す。

この結果に対して我々は以下の指摘ができる。

- a. 固有（共振）振動数の位置が明確ではなく、強いてみれば10Hz程度に読みとれる。

- b. 10Hz以下の振動数においても振動低減効果が見られ、この効果を共振系以外の要因、すなわち地盤のインピーダンスの差や振動入力特性の差などと考えると、共振による効果は20dBのラインが0dBにあたり、63Hzバンドでは5～10dB、100Hzバンド

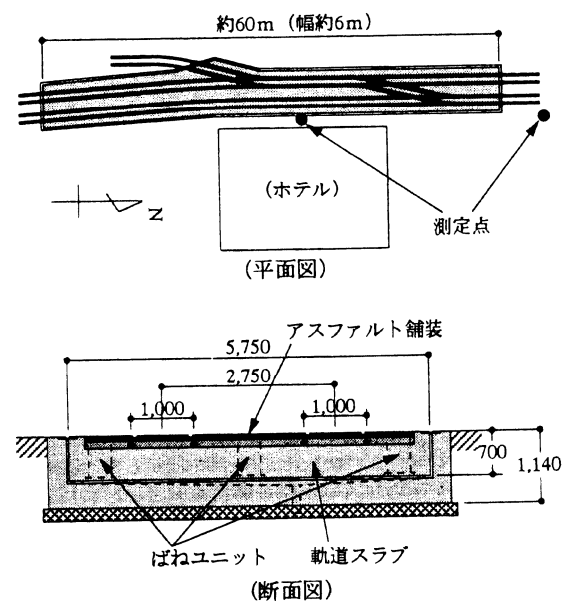


Fig.1 Floating Railway Track

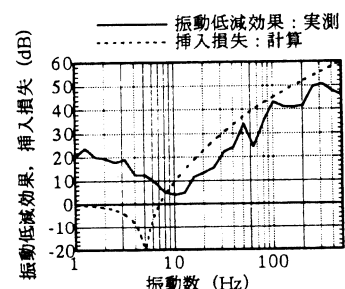


Fig.2 Isolation Characteristics of Fig. 1

キーワード：固体伝搬音，鉄道，軌道，防振，騒音，予測値，実測

でも20dB程度の遮断効果ではないかと推測する。

c. 減衰も非常に大きく10%以上と見える。

2. 防振ゴムとパッド併用の例 (6)

(1) 概要

この報告はJ R東日本の恵比寿駅の再開発工事に採用した防振スラブ並びにフローティングスラブの施工例である。対象建物は15階と8階建ての2棟からなり、建物中央部のエキスパンションジョイント部でFig.3に示す二つの軌道構造を使い分けている。8階建物では防振スラブを用い、1スラブマット下に30tf/cmのばね定数を持つゴムパッドを10枚(1スラブマットの長さ5m)により建物床で支持するのに対して、15階建物のフローティングスラブでは線路直角方向の大梁(10mスパン)上のみで60tf/cmのばね定数のゴムパッドを2個で支持している。ただし、フローティングスラブの上部ゴムマットは防振軌道と同様である。測定は図中の軌道の通過、停車、発車の電車を対象とし、軌道面、軌道下大梁上、近傍柱脚における振動加速度を測定している。また、各軌道のスラブマット上でインパルスハンマを用いた衝撃加振実験も実施している。結果は全てSlow-Peak値で評価している。

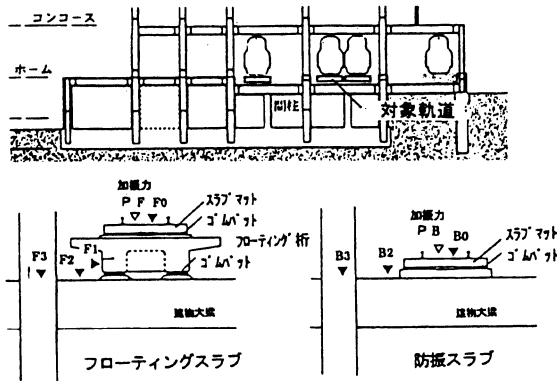


Fig.3 Floating Railway Track

(2) 軌道からの振動伝搬特性

a) インパルスハンマによる1点加振

フローティングスラブを1点加振したときの振動伝達特性を測定しており、その結果フローティングスラブの固有振動数である8Hz付近や大梁の固有振動数である30Hz付近にピークが見られ、全体としてやや右上がりの傾向を示していることが報告された。

b) 列車走行による振動伝搬特性

通過電車からの振動伝搬を近傍柱脚で測定した例をFig.4に示す。フローティングスラブでは固有振動数(8Hz)以下で防振スラブと大差がないが、全体的には3~20dBの防振効果が確認されている。軌道構造のばねを柔らかくする方法は、構造物の固有振動数に近づくことが懸念されるが、全体として伝搬エネルギーを減少させる効果があると述べている。また、通過速度の違いによる伝搬特性について、同じく近傍柱脚で測定した振動加速度をFig.5に示す。一般に

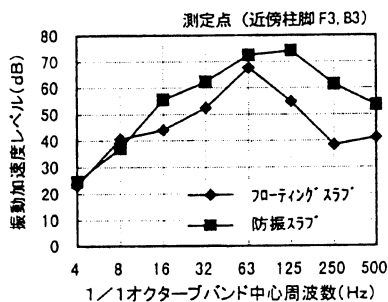


Fig.4 Vibration Propagation by Train

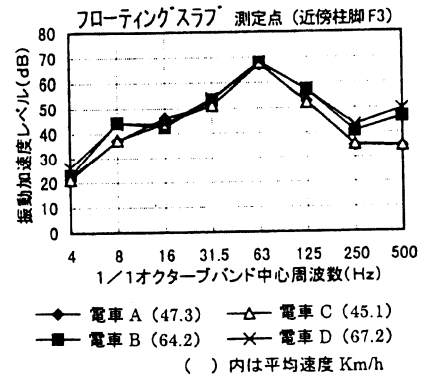


Fig.5 Vibration Characteristics with Train

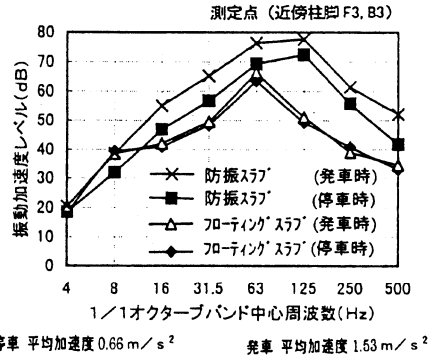


Fig.6 Vibration Difference between Start and Stop

通過時を等速運動とみなすと進行方向の加速度は生じないが、車両重量の遍在や軌道剛性の変化などにより速度に応じて衝撃力は大きくなる傾向がある。しかし、防振スラブで若干バラツキはあるが、16~63Hz付近までその差はほとんどない。等速走行の場合、振動伝搬特性において両軌道とも速度依存性は少ないと思われる。停車時(減速)と発車時(加速)の建物側の振動伝搬特性を軌道構造別にFig.6で比較した。平均加速度の違いにより防振スラブでは停車時と発車時で差がでていたが、フローティングスラブではその差はほとんどない。これらについて軌道構造や軌道の支持条件など検討課題としている。

(3) まとめ

電車走行時の伝搬特性は速度や加速度の変化に余り影響しないことが判明した。フローティングスラブでの振動伝搬特性は軌道のポイント支持の特徴から1点加振に近く、また、防振スラブに比べ防振特性が高いことが分かった。今後は、軌道と一体となった建物内での振動伝搬について検討していく必要があるとの見解を報告している。

3. 実験線による防振ゴムとコイルばねの実験例⁽⁷⁾

実験線により各種の防振ゴムとコイルばねを利用した軌道防振の効果を確認した報告である。

(1) 実験の概要

実験線は全長が約40mあり、Fig.7に示すように、長さ約24mの軌道スラブとその前後に敷設した約8mの軌道スラブを26基の防振装置で約4m間隔で支持したものである。軌道スラブの断面は幅2500mm、厚さ約600mmである。

実験は加振機実験と走行実験を行っており、加振機実験では軌道スラブ中央に電磁式の加振機を設置してその応答を測定している。加振振動数範囲は5~40Hzである。走行実験は2両編成の試験電車を「惰行」、「加速」、「減速」の各パターンで運行している。この場合の測定項目は、走行安全性と防振効果である。

(2) 実験結果

採用した防振材は詳細は不明の部分もあるが、防振ゴム3種とコイルばね1種であり、Fig.8に鉛直方向の防振効果の比較を示した。また走行速度による防振効果の比較をFig.9に示した。これはコイル

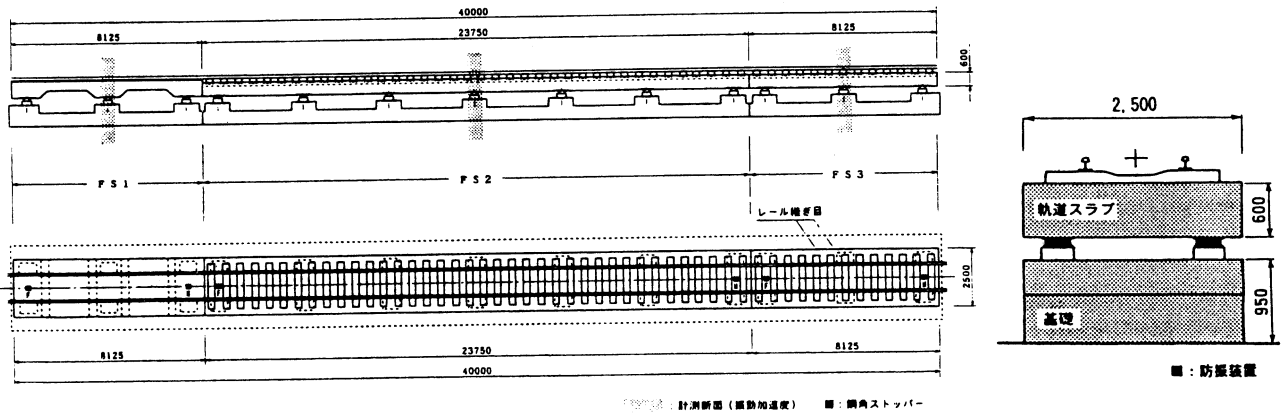


Fig.7 Outline of Test Railway

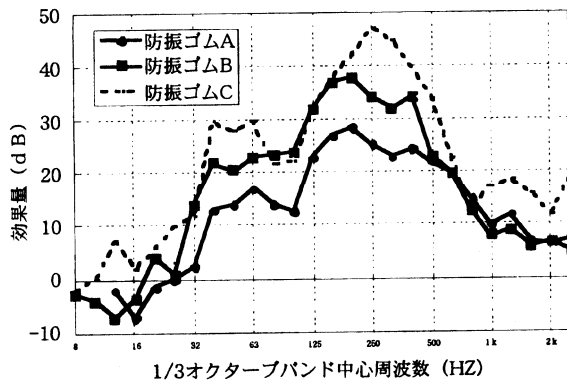


Fig.8 Vibration Isolation Effect

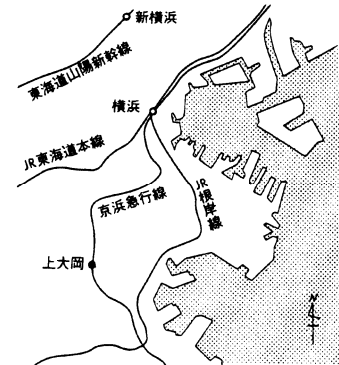


Fig.10 Station Site

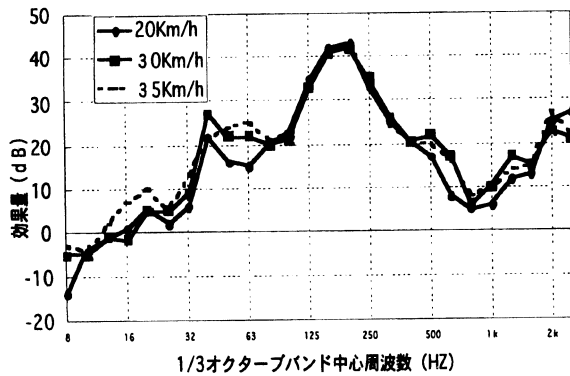


Fig.9 Difference of Isolation Effect for Train Speed

ばねの例であるが、防振ゴムの場合には若干速度依存性もみられるもののその影響度合いは明確ではないとの見解を報告している。

(3) まとめ

報告のまとめとして以下の点をあげている。

- a)減衰率は防振ゴム5～7%,コイルばね2～3%でゴムの方が大きい。
- b)コイルばねの防振装置の剛性は静的でも動的でも同様の値。
- c)振動加速度レベルで16～20dBの防振効果が認められた。
- d)走行速度や防振装置の剛性に関わらず、40～630Hzの広範囲に渡り、15dB以上の防振効果が得られた。

III. 京急上大岡駅の例

1. 建物の概要

京浜急行電鉄株式会社の上大岡駅は、横浜市港南区に位置し1日に約15万人も利用する、交通の拠点駅である。この駅を全て高架橋として作り替え、新たにホームの地下と上空にデパートを作る計画



Photo 1 Complete View of this Building

Table 1 Outline of Building

工事	期間	1991年1月から1996年9月
敷	地	面積; 12,534m ² 地域; 商業地域, 防火地域
規	模	建築面積; 9,614m ² 延床面積; 106,737m ² 軒高; 59.21m
構	造	階数; 地上12階, 地下3階 直接基礎 地下部分RC並びにSRC造 上部2造
建物用途		物販店並びに駅事務室 地上2階部分がプラットホーム 地上11～12階が機械式駐車設備

が実現された。

1991年1月より駅ビルの再開発工事を開始し、地下3階地上12階建てのデパートが、1996年10月にオープンした。駅ビルには2階部分に上下線合わせて四つの軌道を有しており、軌道の幅はホームも含めて合計40mある。ホームの全長は225mあり、そのうち約90mがビルの梁で軌道を受け、さらに柱が軌道のそばから立ち上がる構造となっている。この区間では列車の走行によって生ずる振動がビルの躯体を伝わり、各階の壁、床、天井から騒音として放射され、デパートの利用客に不快感を与えることとなる。

上大岡駅位置図をFig.10に示す。また、Table 1に建物の概要を示し、鉄道との関係が分かるような建物の航空写真をPhoto 1に示す。

2. 事前予測

(1) 鉄道からの固体音予測の方法

施主からの要求を満足させるために、JVの中で当社を幹事会社として、JV4社の音響・振動の研究者が共同してWGを組織して検討を開始した。

検討は、まず第一に鉄道からの騒音影響をどの程度に押さえるかの目標値の設定から活動を開始した。続いて鉄道の加振力を知るための測定を実施し、その加振力の測定から、竣工時の騒音環境の予測をし、目標値との比較検討を実施した。その後、予測の妥当性を確認するため、個別にフローティングスラブ単体のモックアップモデルの振動遮断性能確認実験や、フローティングスラブ施工時と竣工時に測定を実施し、騒音環境の確保を行ってきた。

その結果、新設軌道部分については、最も振動遮断効果が高い工法として軌道床版全体をゴム製の弾性支承で支える防振軌道（フローティングスラブ）を採用する、既設構造部分ではバラストマットを用いて対応することにした。ここではフローティングスラブの振動遮断効果について述べる。

(2) 固体音検討フロー

固体音の検討フローをFig.11に示す。検討は建物に振動が入力するまでの過程である鉄道の軌道と建物との位置関係（近接か、同一建物内か）が一番問題となるが、建物内の振動伝搬に関しては、全て同様である。

3. モックアップモデル

モックアップモデル実験風景をPhoto 2に示す。測定は床単体の実験モーダル解析、荷重をかけたときの防振材上下の伝達率、バラストやレールを敷設し衝撃荷重を加えたときの応答等である。Fig.12にバラスト上のレールに5cm高さから輪軸を落下させた衝撃荷重時とインパルスハンマによる衝撃加振の応答の平均的な値を示す。インパルスハンマによる応答の場合は16Hzバンドに共振のある比較的一般的な振動応答特性を示しているが、輪軸落下の場合はそれ以外に20Hzや80Hzバンドにもピークが表れる特異な応答となっている。加振条件の非線形性といえよう。

いずれの場合でも63Hzバンドにおいて概ね20dBの振動低減効果が認められた。

4. 採用した防振構法

Fig.13に振動対策区間の側面図を示す。振動対策区間の中央は既設の地下構造物がある関係で、この区間はフローティングスラブは採用できず、バラストマットというゴムマットを2枚敷き、その前後の新設区間についてフローティングスラブを採用している。

Fig.14にフローティングスラブの標準配置図の断面図を、Fig.15に平面図を示す。このスラブの標準的な大きさは、長さ4.25m、幅3.45mで1枚当たり15tのプレキャストコンクリート床版である。弾性支承は約25cm角で厚さ6cmの天然ゴム製で、8個の弾性支承で1枚の床版を支える構造であり、製作をブリヂストンに依頼した。合計で68枚のこのスラブを鉄道営業中の深夜に4カ月かけて、1～2枚ずつ交換していくという、初めてのケースの工事であった。

弾性支承は将来交換することも考えねばならず、それを想定して

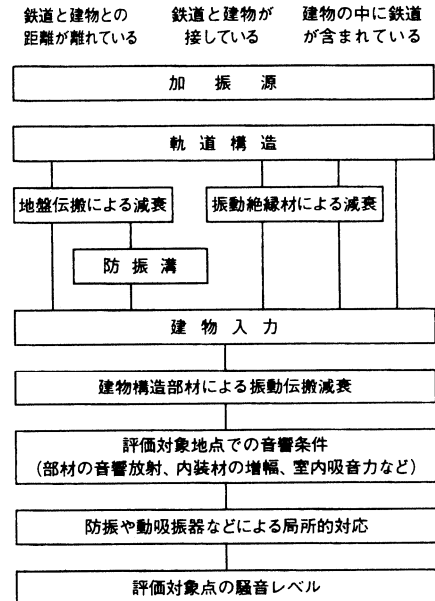


Fig.11 Flow Chart of Structure-borne Sound Examination
Table 2 Prediction Value of Noise Level

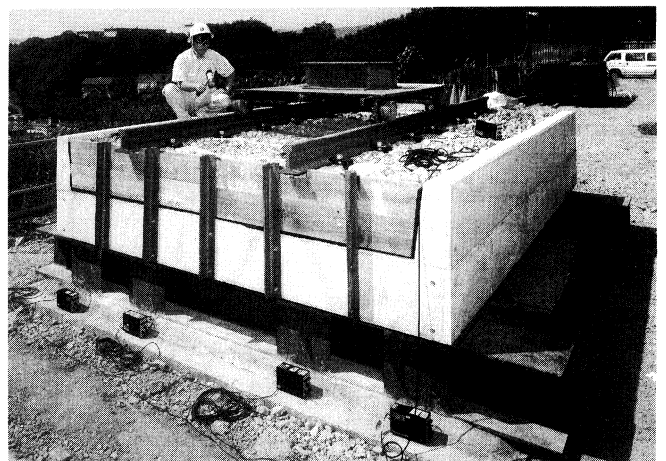


Photo 2 Mock-up Model of Floating Slab

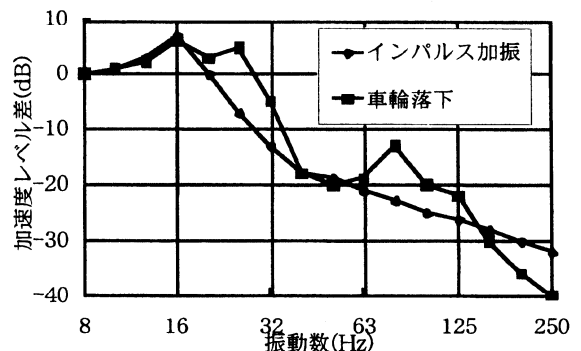


Fig.12 Vibration Isolation of Mock-up

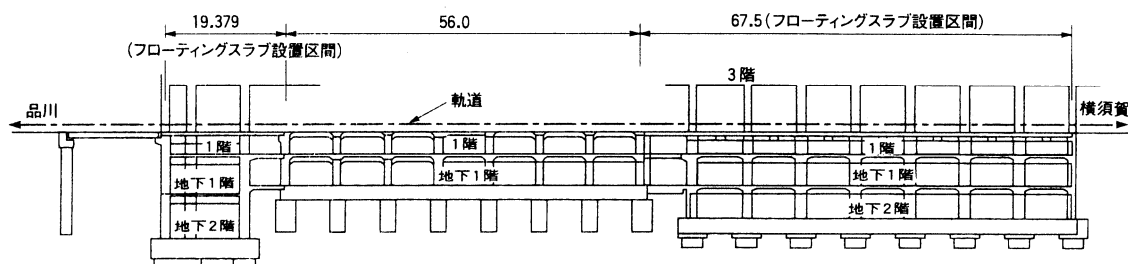


Fig.13 Section of Vibration Countermeasure

Table 3 Measurement Result

評価点	実測値		予測値
	L_{eq}	L_{MAX}	L_{eq}
B.1	54~57	57~65	48
1 F	64~66	67~72	71
3 F	34~42	38~48	45
5 F	32~35	35~39	37

単位 dBA

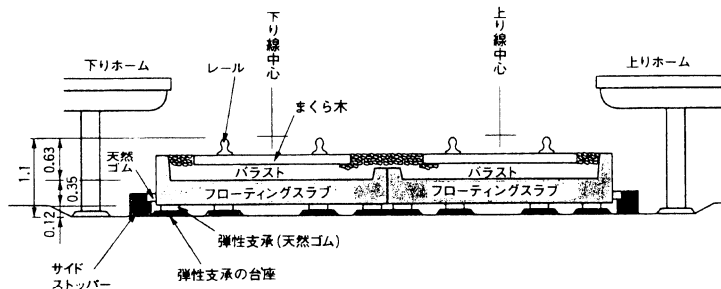


Fig.14 Section of Floating Railway Track

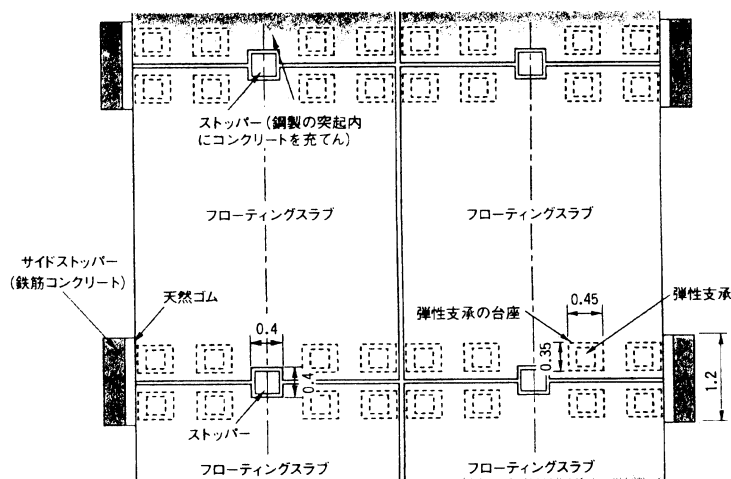


Fig.15 Standard Arrangement of Floating Slab

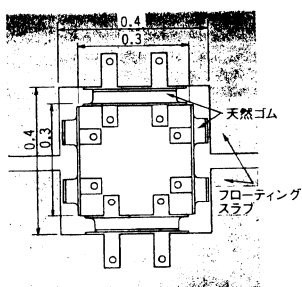


Fig.16 Side Stopper

軌道には固定されていない。そのため地震などの水平力には、Fig.16に詳細を示すようなスラブ周囲に設けたストッパーで対処することとした。各ストッパーは建物の躯体に固定してあるため、振動がスラブからストッパーへ、そして躯体まで伝わるのを防止しなければならない。そのために、スラブとストッパーの間にもフローティングスラブの弾性支承と同質のゴムを採用している。

5. 竣工測定結果

測定された加振力を基本にして、前項で示したフローティングスラブ等の防振効果や建物内の伝搬減衰を設定し建物竣工後の騒音環境を予測した。この場合の計算では空間の吸音力や放射面積などは無視した概略計算である。

竣工後の測定結果をTable 2に示した予測値と合わせてTable 3に示す。測定結果のうちB1では暗騒音レベルが高くその影響で予測値を上回る結果となっている。

IV. JR九州小倉駅の例

1. 建物の概要

JR九州小倉駅は北九州市小倉の中心的駅であり、1日に約10万人も利用する交通の拠点である。この駅を地上14階、地下3階建ての駅ビルに再開発されることとなった。

1995年1月より駅の解体工事から開始され、1998年3月に自由通路やモノレールも含めた駅やホテルが竣工した。この駅は8階から下が店舗、9階から上がホテルに利用される計画であり、さらにPhoto 3に示すように、この駅ビルの一階部分には1番線ホームのみ軌道が建物に組み込まれる形状となり、また3~4階部分にはモノレールが貫通しターミナル駅ともなる。この鉄道とモノレールは桁全体が構造上、駅建物と一体に施工されるため、建物9階以上のホテルに対してこれらが発生する振動や固体音の影響が懸念された。そのため、鉄道とモノレールの加振力測定から伝搬解析予測等を実施して、防振軌道の採用を始め多くの検討を加えた。建物の概要を以下のTable 4に示す。

騒音と振動に関する目標値、振動伝搬特性、竣工後の特性等については文献1)と8)に詳報したので参照されたい。

Table 4 Outline of Building

工事	期間	1995年1月から1998年3月
敷	地	面積; 16,180m ²
		地域; 商業地域, 防火地域
規	模	建築面積; 14,691m ²
		延床面積; 75,691m ²
		軒高; 55.1m
		階数; 地上14階, 地下3階
構	造	地下部分RC並びにSRC造
		上部S造
建物用途		駅舎, 店舗, ホテル, 駐車場, 他

2. 事前予測

この建物内のホテルに関する目標値は、騒音は40dB以下、振動は3～8Hzで加速度1.5cm/s²、8～63Hzは速度で0.3mm/s以下と設定した。

本件に関しては事前に振動解析予測をしており、この詳細は既に文献1)に報告している。文献では防振軌道の採用の有無で以下の差があると予測した。

■貨物列車通過時の騒音予想値

◇防振軌道なし；64dB

◇防振軌道あり；15dB

■モノレール発着時の騒音予想値

◇防振軌道なし；51dB

◇防振軌道あり；33dB

ただし、この予測値は防振ゴムが理想的に働くことと仮定しているため、貨物列車通過時の予測は防振効果が過大に評価されているためと考えられる。

3. 採用した防振構法

防振構造に要求される性能は、鉄道やモノレールが安全に走行でき、耐久性があり、振動を充分低減することである。今回使用した防振材は免震構造で実績のある積層ゴム系であり、耐候性がある被覆ゴムとクリープ率の小さい天然ゴムで構成されており、この防振材をFig.17に示すようなフローティング軌道基礎やFig.18に示すモノレール桁下に設置した。また、フローティング軌道基礎の長さは建物と同じであり、165mの範囲で建物と一体に施工した。

4. 竣工測定結果

竣工までの間に、ゴムの単体試験、防振スラブの荷重調整、防振スラブ施工後で線路未施工時の振動遮断性能確認実験等を実施した。このうち、最後の確認実験は加振源として、インパルスハンマ、

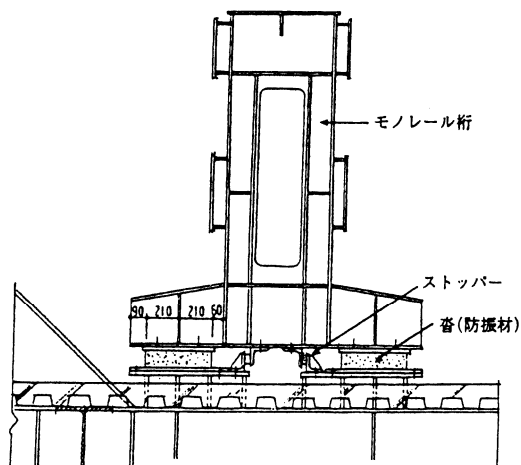


Fig.18 Floating System of Monorail

砂球、タイヤ、ゴムボールなどを用い、それぞれの衝撃を利用して各部の振動伝達や応答を確認したものである。振動応答に関しては各振動源毎に若干の差があるものの、性能は確保されていた。詳細は割愛する。

竣工時の騒音環境の測定結果は文献8)に詳報したため、ここでは最終の測定結果として代表的な客室における鉄道騒音の影響は30dBA程度であり、目標値を満足していたことを報告するにとどめる。

V. おわりに

鉄道からの固体音対策を目的として防振軌道に関して既往の文献の調査から、京急上大岡とJR九州小倉の両駅で筆者らが採用した防振軌道の概要を紹介し、その防振効果について報告した。京急上大岡駅では小割のフローテングスラブを採用し、振動遮断効果を20dB、JR九州小倉駅では一体型のフローテングスラブを採用し、その効果も30dBをそれぞれ目指した。実測の結果これらは満足していることが確認された。

本報告をまとめるに当たり、京浜急行電鉄(株)をはじめ、東急・清水・大林の研究JVWGのメンバー、JR九州、JR総研、その他当社A/E建築設計本部、情報システム部等の多くの協力を得た。関係各位に深謝する。

参考文献

- 1) 安藤他；鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究，鹿島技研年報，第44号。
- 2) 安藤他；鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究，鹿島技研年報，第45号。
- 3) 村上；東北新幹線赤羽台トンネルの施工，土木施工，26巻6号。
- 4) 山本他；列車振動防止を考慮したトンネル，トンネルと地下，10巻8号。
- 5) 鈴木他；コイルばね防振軌道の振動低減効果，建学講概1997年(40118)。
- 6) 大迫他；建物内防振軌道からの振動伝搬特性，建学講概，1997年(40121)。
- 7) 三輪他；防振道床の開発，東急技研所報，No.21～23。
- 8) 安藤他；鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究，鹿島技研年報，第46号。



Photo 3 Front View of Station

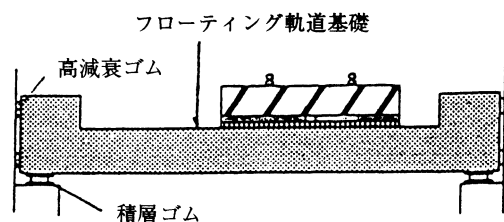


Fig.17 Floating Slab of Railway