

鉄道からの固体音伝播特性に関する研究（その5）

—バラストマットの遮断性能—

Propagation Characteristics of Structure-Borne Sound Caused by Trains

— Part 5: Vibration Cut-off Characteristics of Ballast Mat —

安 藤 啓
鴈 原 康 夫¹⁾

要 約

鉄道からの固体音対策の一手法としてバラストマットがある。バラストマット適用による固体音・振動等の低減効果の調査を営業列車走行のもとで、同一形状の高架橋を利用して、実施する機会を得たので、その結果を報告する。

測定項目は、固体音領域の振動測定に加え、体感振動領域の振動測定と枕木沈下量であり、調査対象のバラストマットは組合せ等含めて5種類とした。

(1) 固体音領域の振動測定によって、バラストマット等の固体音に関する低減効果が把握され、最も低減効果の大きいのは、バネ定数が2.8 t/cm と5.5 t/cm の2枚重ねであり、続いて2.8 t/cm, 5.5 t/cm, 12 t/cm の順であった。

(2) 体感振動領域の振動測定によって、バラストマット等の体感振動に関する低減効果が把握され、その効果を高架柱の上下方向について述べると、オールパスで10~20dB 減であり、振動遮断性能の大きい順序は、固体音と同様であった。

(3) 枕木沈下測定によって、道床砂利（マットなし）、バラストマット（5種類）、バラスト道床用防振枕木の列車走行に伴う沈下性状が把握された。枕木の沈下量は列車走行の安全性に関わり、ある一定の値以下に制限されるべきものである。今回の測定結果では、この沈下量は1.6~4.3mm であった。

目 次

- I. はじめに
- II. 調査概要
- III. 測定上の共通事項
- IV. 固体音域の測定結果
- V. 体感振動測定結果
- VI. 枕木沈下測定結果
- VII. おわりに

I. はじめに

鉄道からの固体音伝播特性に関しては、過去3カ年にわたり（その1）から（その4）と報告してきている。（その1）¹⁾では、鉄道からの固体音伝播特性の解析と対策案の効果の予測を、（その2）²⁾では鉄道の加振力特性を、（その3）³⁾ではフローティング軌道の固体音遮断性能の測定結果を、そして（その4）⁴⁾では実際にフローティング軌道を施工したケースの測定結果と予測値との比較に関して報告してきた。

今回、新駅ビルの列車走行に伴う固体音対策の一手法として、鉄道軌道の固体音対策として比較的容易に利用できるバラストマットの採用が検討された。そのためバラストマットの固体音や振動等の低減効果の調査を、同一形状の高架橋を利用して、営業列車走行のもとで実施する機会を得たので結果を報告する。

II. 調査概要

駅再開工事に伴い、計画建物内を貫通する軌道部及び高架部に、バラスト及びバラストマットを敷設する予定である。バラストマットとはゴムシート状の防振材であり、軌道下部のバラスト（砂利）と基盤との間に挿入して振動絶縁を狙う材料である。これを用いた場合の騒音や振動の低減効果は、未だ明らかではなく、個々の構築、道床、軌道の構造に左右されることがよく知られている。このため、実際の営業線にある同一形状の高架橋部を利用し、上り線側に5種類のバラストマットを敷設した試験区間を、また下り線側には有道床防振枕木の施工区間を作り、各々の区間で固体音領域と体感振動領域の振動及び枕木の沈下量を調査した。

1. 防振材の種類

今回の調査では1800*900のマットを3種類用意した。それぞれバネ定数表示で12t/cm, 5.5t/cm, 2.8t/cm である。このバネ定数は300mm 角で厚さ25mm のテストピースを用いて測定された静的バネの大きさを示しており、実際の使用状態とは異なっているが、バラストマットを区別するための呼称とした。このうち2.8t/cm のバラストマットは柔らかすぎるため、砂利がゴムに食い込む可能性があり、それを防止するために砂利とゴムの間にFRPの板を挿入し、耐圧版としている。また防振枕木は枕木脚部にゴムシートを貼りつけたものである。そのゴムのバネ定数は、100mm 角で20mm 厚のテストピースによる測定結果によると、9t/cm であった。

2. 防振材の配置と測定点

バラストマットの施工要領をFig.1~3に示す。上り線側の計測対象は高架1, 2, 3, 6, 7, 9, 10の7カ所、下り線側は高架

6', 7' の2カ所で、これらの内、高架橋 1, 7', 10 の3カ所は、測定結果の比較を目的としたバラストマット等は敷設されていない測定点である。また、図中の 12, 5.5, 2.8 の数字は、用いたバラストマットのバネ定数を示している。高架6', 7' は防振枕木を施工した点である。

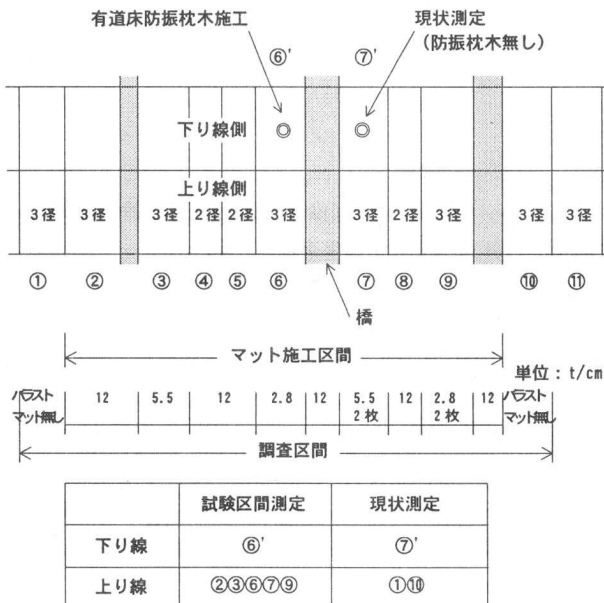


Fig.1 Plan of Measurement Section

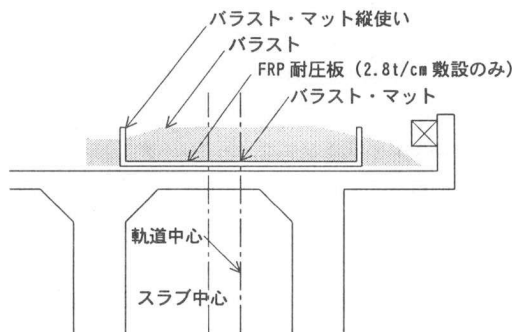


Fig.2 Section of Railway

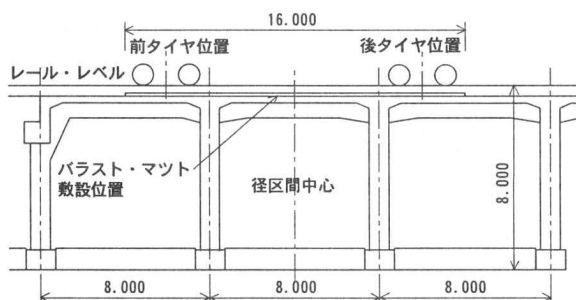


Fig.3 Section of a Overhead Railway Train

振動加速度レベルの測定点は高架橋下面のスラブ中央部と柱際部分の2カ所を設定した。測定方向については、上下方向をZ方向、橋軸方向をX方向、橋軸直角方向をY方向としている。計測システ

測定系

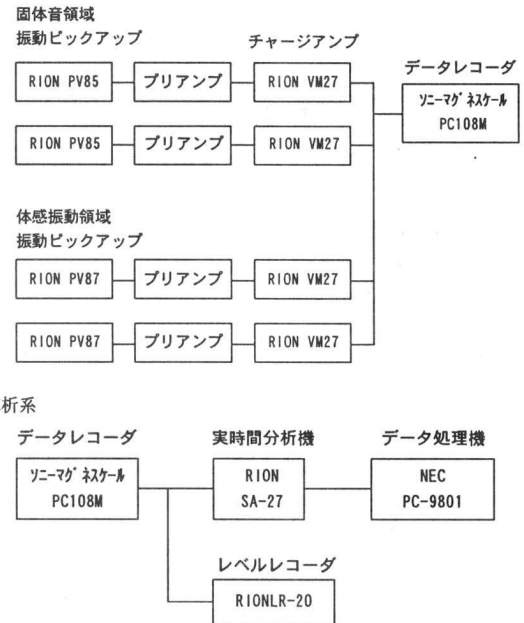


Fig.4 Block Diagram of Vibration Acceleration Measurement

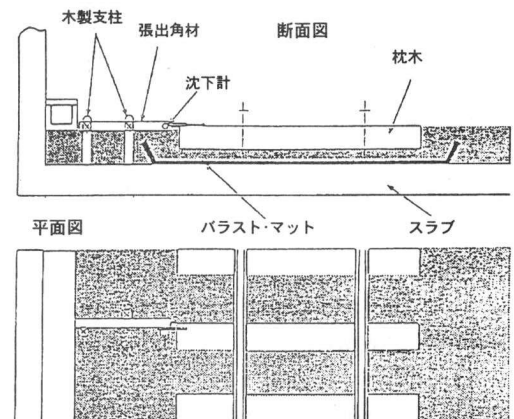


Fig.5 Measurement System of Sinking of Sleeper

ムを Fig. 4 に示し、枕木の沈下測定の要領を Fig. 5 に示した。

3. 測定対象列車

計測対象の列車は、快速特急、特急、急行、普通の4車種で、上り、下り、それぞれ5列車を選定した。枕木沈下量の測定システムを利用して通過時の車速を推定している。

Ⅲ. 測定上の共通事項

1. 測定評価点

今回のスラブ振動測定では、一つの高架橋当たり基本的にはスラブ中央と柱際の2箇所設けている。それらの振動加速度を比較すると、当然ながらスラブ中央の方が大きい。関与する音響放射面積を考えると、柱際や梁に比べてスラブの占める割合が大きいことから、最終的に騒音レベルで評価される固体音領域の測定評価点は、スラブ中央の測定結果を用いて行うものとする。このため、効果判定については、若干安全側の結果になる。また、体感振動領域では、伝搬する力そのものを評価する関係から、構造体の影響を受け難い柱際

の測定点を評価点として用いた。

2. 周波数範囲

固体音領域の測定は、1/3 オクターブバンド中心周波数で 25Hz～2500Hz の範囲としているが、バラストマットの対策効果を検討するのに、25Hz～160Hz の範囲（特に鉄道振動では 40Hz～125Hz の範囲）に着目し、さらにオクターブバンド中心周波数に変換して、検討する方が分かりやすい。したがって本報告においては固体音領域の周波数範囲としては、オクターブバンド中心周波数 31.5Hz、63Hz、125Hz の 3 周波数バンドを表示して、バラストマットの対策効果を検討する。体感振動領域については、評価との関係で、2.5Hz～100Hz の 1/3 オクターブバンド分析結果で表示する。

IV. 固体音領域の測定結果

Fig.6～Fig.9 に、高架 1～高架 9 について、列車種別ごとのオールパス値及びオクターブバンド中心周波数の 31.5Hz、63Hz、125Hz の振動加速度レベルを示す。

電車の種類ごとのバラツキが多少あるが、おおよそ、高架 1 から高架 9 に向かって右下がりの傾向となり、バネ定数の小さい方が振動加速度レベルは低くなっている。

振動加速度レベルの差（低減効果）をとってみると、高架 1 におけるスラブ中央での振動加速度レベルを基準とし、オクターブバンド中心周波数の 31.5Hz、63Hz、125Hz ごとに、かつ列車種別ごとの比較してみた。

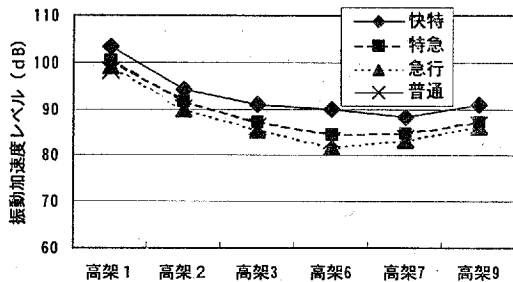


Fig.6 Vibration Acceleration Level at All-pass Value

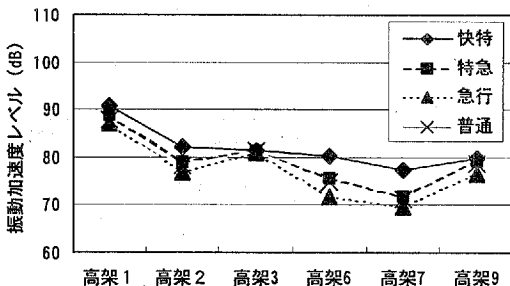


Fig.7 Vibration Acceleration Level at 31.5Hz

(1) オールパス値

まず、Fig.10 にオールパス値の平均値における列車種別ごとの振動加速度レベル差を示す。データのバラツキは少ない。以下にバラストマットの種別をばね定数と枚数で表示する。振動加速度レベル差は 2.8 t/cm×2 が最も低減効果があり、続いて 5.5t/cm×2 であり、さらに 5.5t/cm×1 と 2.8t/cm×1 が同程度で並んでいる。続いて 12t/cm×1 と防振枕木が同程度といった順となっている。

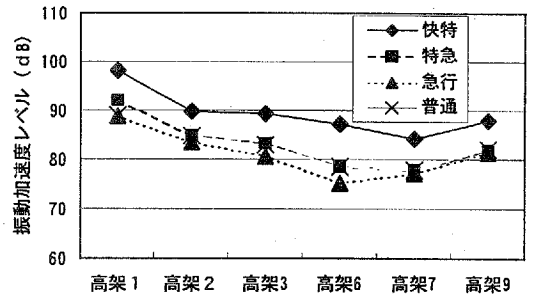


Fig.8 Vibration Acceleration Level at 63Hz

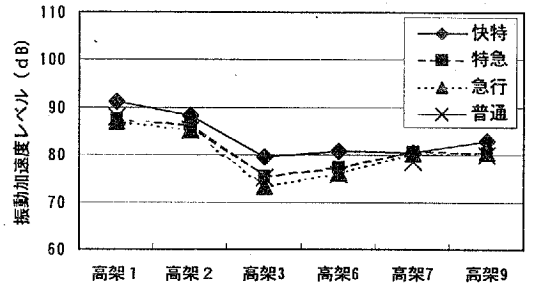


Fig.9 Vibration Acceleration Level at 125Hz

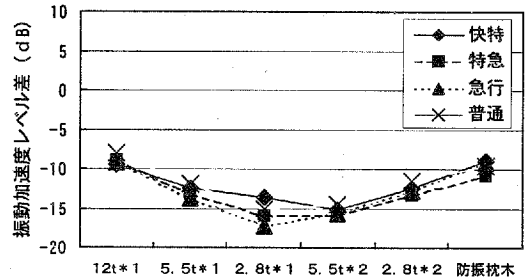


Fig.10 Vibration Cut-off Effect at All-pass Value

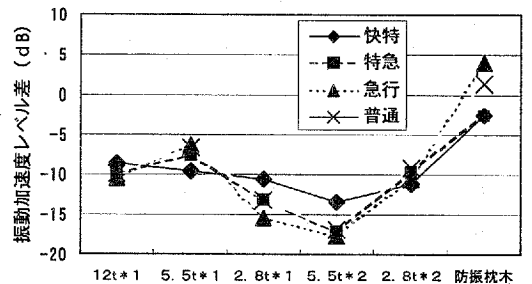


Fig.11 Vibration Cut-off Effect at 31.5Hz

(2) 31.5Hzについて

Fig.11 に、31.5Hz の平均値における列車種別ごとの振動加速度レベル差を示す。データのバラツキは快速特急の場合が大きく、急行の場合に少ない。特急・急行・普通と快速特急でやや違いがあり、快速特急の方が低減効果はやや少ないが、全体的な傾向は似ている。

効果の多い順は 5.5t/cm 2 枚重ねが最も低減効果があり、次いで 2.8 t/cm×1 であり、さらに 2.8 t/cm×2 と 12 t/cm×1 が続き、5.5 t/cm×1、防振枕木の順となっている。

なお、バラストマットについては全ての低減効果が-5dB に達しているのに対して、防振枕木については低減効果が-5dB に達しておらず、急行と普通の場合にはかえって振動加速度レベルが大きくなっ

ている。

(3) 63Hz について

Fig.12 に、63Hz の平均値における列車種別ごとの振動加速度レベル差を示す。データのバラツキは全体に少なく、特に急行の場合に少ない。快速特急・特急・急行・普通とも違いがなく、全体的な傾向は似ている。ただし、最も低減効果があるのは列車ごとに違っており、快速特急と普通の場合、 $5.5 \text{ t/cm} \times 2$ 、急行の場合は $2.8 \text{ t/cm} \times 1$ であった。また、特急の場合に最も低減効果があるのは $5.5 \text{ t/cm} \times 2$ と、 $2.8 \text{ t/cm} \times 1$ であり、両者の低減効果はほぼ等しい。

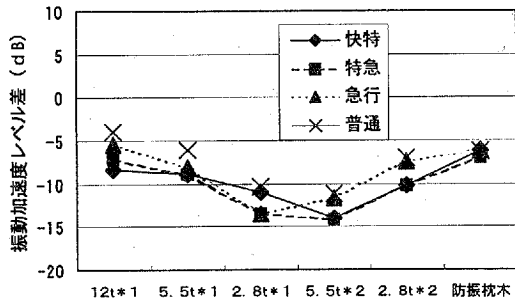


Fig.12 Vibration Cut-off Effect at 63Hz

(4) 125Hz について

Fig.13 に、125Hz の平均値における列車種別ごとの振動加速度レベル差を示す。快速特急・特急・急行・普通とも違いがなく、全体的な傾向は似ており、最も低減効果があるのが $5.5 \text{ t/cm} \times 1$ の場合である。次いで、 $2.8 \text{ t/cm} \times 1$ となり、この両者の低減効果は -10dB に達している。なお、 $5.5 \text{ t/cm} \times 2$ と、 $2.8 \text{ t/cm} \times 2$ の場合、低減効果は -10dB に達していないが、高架6～高架9については高架10による影響もあることから、低減効果が少な目になっている可能性がある。ただし、快速特急の場合には、 $5.5 \text{ t/cm} \times 2$ でも、低減効果はほぼ -10dB に達しており、 $5.5 \text{ t/cm} \times 1$ と $2.8 \text{ t/cm} \times 1$ との差は殆どない。したがって、125Hz については、 $12 \text{ t/cm} \times 1$ を除いて、バラストマットの低減効果は -10dB 以上になるものと推定される。なお、防振枕木については、低減効果が -10dB に達していない。

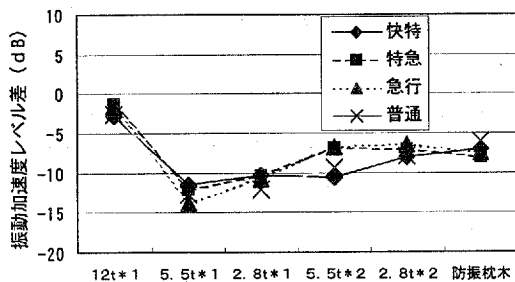


Fig.13 Vibration Cut-off Effect at 125Hz

2. 固体音領域についての考察

バラストマット・防振枕木の低減効果について総合的に判断してみると、低減効果の大きい順は、①バラストマット $5.5 \text{ t/cm} \times 2$ 、②バラストマット $2.8 \text{ t/cm} \times 1$ 、③バラストマット $5.5 \text{ t/cm} \times 1$ 、④バラストマット $12 \text{ t/cm} \times 1$ 、⑤防振枕木である。

ただし、高架9のバラストマット $2.8 \text{ t/cm} \times 2$ については、測定結果によると②と③の中間に位置するが、隣接する高架10のバラスト道床からの影響を考慮すると、①と同等以上の性能を有している

ものと推定される。

前項の結果を見ると、オールパス値では、高架3、高架6、高架7、高架9において、全平均値で 12dB 以上の低減効果が確認された。しかし、高架9（最も柔らかいバラストマットと耐圧板）では、それより堅め即ちバネ定数の大きいバラストマットを用いた場合の方が低減効果は大きいという結果になっている。

また、31.5Hz、63Hz、125Hz の3周波数帯で比較すると、例えば高架6の結果に注目すると、31.5Hz 帯では 13dB の効果であるのに対して、63Hz 帯では 12.1dB、125Hz 帯では 10.8dB と、周波数が大きくなるにつれて効果が小さくなり、この傾向は高架3と高架6'を除く高架で共通して見られる。

このようにバラストマットを用いた場合の、列車走行に伴う支配的な周波数帯における振動の低減効果は単純には発揮されず、特定の周波数または周波数帯では、効果が低下する。この現象は、多質点系の振動影響により、効果量に周波数特性を持つためであろう。この特性は定性的には把握されているが、定量的には、列車走行の加振力とその周波数、軌道構造、構造物側の応答特性等に依存するため、複雑で十分に把握はされていない。

ここでは、上述の周波数によって変化する現象の一因となる構造物側の条件について、実測データと固有値解析の両面から若干の検討を試みる。

(1) 実測データの分析

列車通過直後の減衰過程に着目して、高架6で快速特急通過時のスラブ中心における実測波形をFFT周波数分析して、スラブの固有振動数を調べて見ると、Fig.14 に示す結果が得られた。パワースペクトルでは、13Hz 前後、27Hz 前後、42Hz 前後、65Hz 前後に卓越する振動が認められた。しかし、同じ快速特急の場合でもこの卓越ピークが明瞭ではないケースもあった。

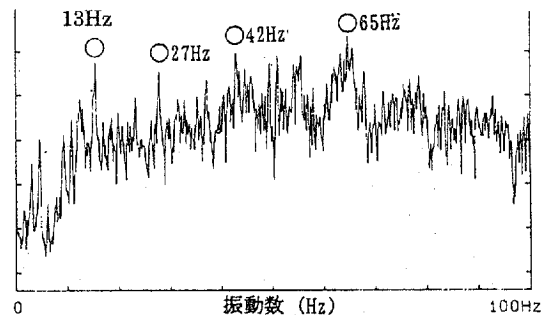


Fig.14 Power Spectrum of Slab Vibration (Measurement)

(2) 固有値解析

有限要素モデルによって固有値解析を行って、固有振動数を調べてみると、Fig.15 に示す結果が得られた。解析結果では1次振動数（長辺の単純モード）が約 26Hz、2次（長辺の単純モードと幅員方向のモードの合成）が約 41Hz、3次（長辺の2次モード）が約 68Hz であった。このような結果から、スラブの固有振動数に着目すると、固体音領域では、1/3 オクターブバンド中心周波数の 40Hz バンドと 63Hz バンドで両者の影響を受ける事が考えられ、スラブの固有振動数がバラストマットの低減効果を複雑にしている一因ともなっていると推定される。なお、実測波形のパワースペクトル分析による 13Hz

前後の卓越振動は、体感振動のところでも述べるが、この振動数はスラブの固有振動数から掛け離れているので、高架橋全体（地盤も含む）の振動に関係したものであると推定される。

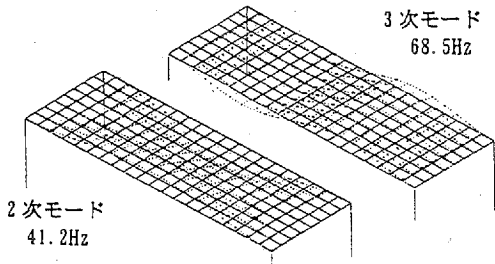


Fig.15 Eigen frequency of slab vibration (Analysis)

V. 体感振動測定結果

1. 加速度レベルオールパス値

(1) 上下方向加速度レベル

Fig.16 に快速特急、特急、急行、普通電車走行における各高架の柱上下方向加速度レベルオールパス値を、高架1柱を基準とした場合の相対加速度レベルで示す。同図によれば、電車の走行速度が大きくなるほど（普通、急行、特急、快速の電車種別順に）、相対加速度レベル差は少なくなる傾向が認められる。バラストマットの振動遮断効果はバネ定数が低くなるほど大きい。またこの効果は電車種別に関係なく、2枚重ねの方が効果は顕著であり、5.5 t/cm $\times$ 2 が6～7dB、2.8 t/cm $\times$ 2 が2～5dB 大きな結果になっている。ただし、加速度レベルのばらつきは、走行速度が大きい電車ほど大きい。

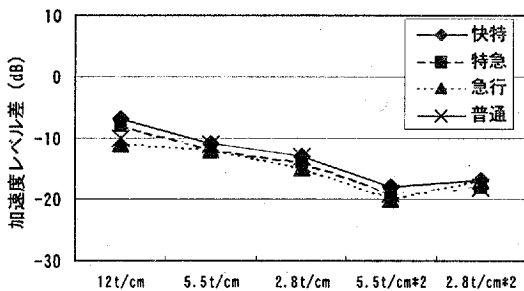


Fig.16 Measurement Result of Bodily Sensational Vibration (Up-down Direction)

(2) 水平方向加速度レベル

水平方向の振動については、高架10（基準点）と高架6の柱部分において振動を計測している。Fig.17 に高架10を基準としたX、Y方向の相対加速度レベルを示す。加速度レベル差は、両方向ともほぼ同じ値を示している。バラストマットはバネ定数2.8 t/cmを設置した点であるが、オーバーオールで7dB 前後低減しており、バラストマットによる防振効果が認められる。

2. 1/3 オクターブバンド加速度レベル

(1) 上下方向の1/3 オクターブ解析結果

代表的例として、Fig.18 は高架1における快特、特急、急行、普通の4種類の電車走行に伴う高架柱部分上下方向の振動に対する、1/3 オクターブバンド解析結果を示したものである。この結果による

と、12Hz 近辺と40～63Hz に明確なピークが認められる。このうち、後者の40～63Hz に見られる大きなピークは、電車種別と相関が認められる。図より電車種別に対する柱上下方向の卓越振動数は、おおまかに以下のように読み取れる。

快特（快速特急）	63Hz
特急	50Hz
急行、普通	40Hz

Fig.19 は高架1の柱を基準とした相対加速度レベルを全車両について平均し、各高架別に示したものである。6.3～16Hz の成分については、2.8t/cm $\times$ 2 のバラストマットのみ若干の低減が見られるものの、それ以外については全て対策無しより3～7dB 増幅の傾向が

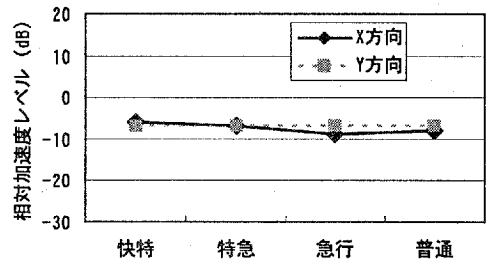


Fig.17 Measurement Result of Bodily Sensational Vibration (Horizontal Direction)

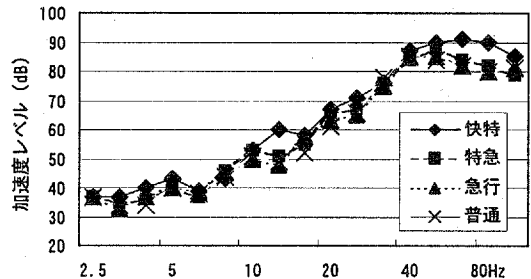


Fig.18 1/3 Octave Analysis of Up-down Vibration

見られる。20Hz 以上の成分に注目した場合には、バラストマットのバネ定数が小さくなるに従い、防振効果も大きくなる傾向を示している。ただし、5.5t/cm $\times$ 2 と2.8t/cm $\times$ 2 について振動低減効果を比較した場合、前者が若干大きい結果となっている。また、同じバネ定数を有するバラストマットの1枚と2枚重ねに対する防振効果は一部の振動数成分を除き、2枚重ねの方が振動を低減することが分かった。

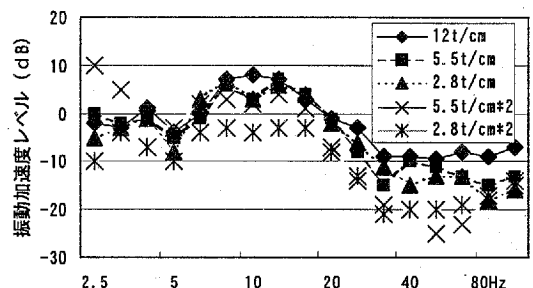


Fig.19 Vibration Cut-off Effect of Bodily Sensational Vibration

(2) 水平方向の1/3オクターブ解析結果

Fig.20 に水平各方向成分の相対加速度レベル差を電車種別毎に比較して示したものである。電車走行に伴う振動数成分に注目すると、水平方向の振動については、X、Y方向とも50Hz以上の振動数成分に対し、低減効果が見られる。

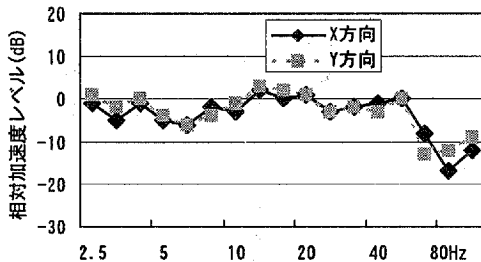


Fig.20 1/3 Octave Analysis of Horizontal Vibration

VI. 枕木沈下測定結果

枕木の沈下は、その上に車輪が位置している時に最大になっていると思われる。この測定波形から列車毎の最大沈下量及び列車速度を求めた結果の平均値を Fig.21 に示した。沈下量についてとりまとめると以下のとおりである。

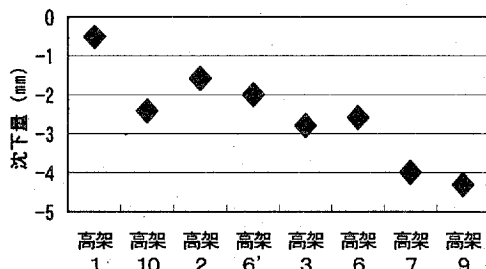


Fig.21 Sink Value of Sleeper at Train Running

- (1) 高架1はバラストマットが布設されておらず、枕木沈下量は0.3~0.6mmの範囲にあり、平均0.5mmで、列車種別による沈下量の差は小さく、同一列車の中でのバラツキも小さかった。
- (2) 高架10もバラストマットは布設されておらず、実測値は2.2~2.6mmの範囲にあり、平均2.4mmで、高架橋1と比較すると約5倍の大きさであった。このような違いが生じた理由は不明であるが、道床砂利に対する締め固めの差があったことと、この場所はわずかであるが曲線部であるという点である。
- (3) 高架2は12t/cmのバラストマットを1枚布設した場所で、実測値は1.4~1.8mmの範囲にあり、平均1.6mmで、列車種別による沈下量の差は少なく、同一列車の中でのバラツキも小さかった。
- (4) 高架6'は有道床防振マクラギを布設した場所で、実測値は1.8~2.3mmの範囲にあり、平均2.0mmで、列車種別による沈下量の差は小さい。
- (5) 高架3は5.5t/cmのバネ定数のバラストマットを1枚布設した場所で、実測値は2.4~3.2mmの範囲にあり、平均2.8mmであった。ここでは急行のみわずかに小さい値であり、特急と急行にバラツキが多少見られた。
- (6) 高架6は2.8t/cmのバラストマット1枚を布設した場所で、実測値は2.3~2.8mmの範囲にあり、平均2.6mmであった。こ

このバネ定数は高架橋3に比較して小さい(柔らかい)にもかかわらず、沈下量は小さく、これは補強板の影響と思われる。

(7) 高架7は5.5t/cmのバラストマットを2枚重を布設した場所でバネ定数としては、1枚の値の約1/2になると見做せる。実測値は3.5~4.4mmの範囲にあり、平均4.0mmであった。なお、列車種別による沈下量では、快速特急がわずかに大きく、同一列車の中でのバラツキでは、比較的大きかった。

(8) 高架9は2.8t/cmのバラストマットを2枚重ねて布設し、その上にFRP耐圧版を重ねて布設した場所である。実測値は3.6~4.6mmの範囲にあり、平均4.25mmであった。

以上が枕木の沈下測定結果の概要であるが、の中で高架7と9の結果に、列車種別による差または同一列車の中でのバラツキが特に認められたので、列車速度に関して調べた。その結果は Fig.22 に示すとおりで、列車速度では、快速特急が特に大きいと速度と沈下量との関係は認められず、その他の種別でも、特定の関係は認められなかった。バラツキが比較的大きい特急、急行、普通については、それらの列車が最寄りの駅で停車することと、高架7と9は駅に近かったので、列車の運転操作上の相違、例えば加速などの影響があったものと考えられる。

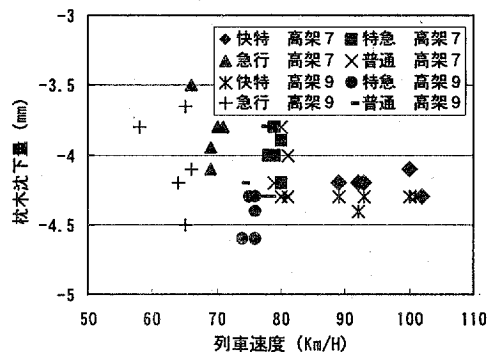


Fig.22 Relation of Sinking Value and Train Speed

VII. おわりに

本測定は実際の営業線を用いて、同一高架橋を利用してバラストマットや防振枕木の振動遮断効果やレール沈下量を測定した結果である。本調査は、新駅ビルの固体音検討の一環として実施したものであり、実施に際しては、駅J V工事事務所及びJ V各社の技術研究所研究員で構成される騒音・振動検討WG(鹿島、東急、大林、清水の4社)が担当し、結果の解析は幹事会社の鹿島が主体となり同騒音・振動検討WGが担当した。本報告はその共同成果である。電鉄の関係者を始めとして多くの方のご協力を得た。ここに感謝の意を表する。

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(その1), 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(その2), 鹿島技研年報, 第45号。
- 3) 安藤他; 鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究(その3), 鹿島技研年報, 第46号。
- 4) 安藤他; 鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究(その4), 鹿島技研年報, 第46号。