

高所空間の 在来線騒音に 関する研究



石川 聡史*



白神 亮*



柳沼 謙一*



増田 達*

これまで在来線の高所空間における騒音特性については十分に把握されていなかったため、高所空間を含めた騒音測定を実施した。また、騒音測定結果を踏まえて、盛土区間および平地区間の高所空間に伝搬する車両下部音の指向特性を表す補正式を、鉄道総研式による予測と実測の差から仰角 θ をパラメータとして導出した。導出した補正式を他の測定列車の予測に適用してその有効性を検証した結果、概ね2dBの差で沿線の高所空間における騒音レベルを予測できることが明らかになった。

●キーワード：在来線騒音、高所空間、在来線騒音予測、指向性

1. はじめに

都市部では在来線の沿線に近接して建築物が建てられている場合が多く、これらの建築物の上層階に対する騒音が問題となることがある。また、近年の鉄道の新設工事や連続立体交差化などの大規模な改良工事での環境影響評価では、これまでの水平方向の騒音予測だけでなく、高さ方向の予測も必要とされる場合がある。このように、在来線沿線建築物の上層階に対する騒音予測の必要性が高まっている一方で、在来線の高所空間の騒音特性は十分に把握されていない。そこで、在来線沿線において高所空間を含めた騒音測定を行い、騒音特性の把握を行った。また、騒音測定結果を踏まえて、既往の騒音予測式（鉄道総研予測式「在来鉄道騒音の予測手法に関する検討（2005年1月）」）の高所空間への適用方法について検討を行った。

2. 高所空間の在来線騒音特性の把握

2.1 測定箇所

構造形式による騒音特性の違いを把握するため、測定箇所として以下の3箇所を選定した。

- (1) 平地区間
- (2) 盛土高架区間
- (3) コンクリート高架橋区間（防音壁あり）

2.2 測定概要

測定範囲の断面を図1に示す。測定は高所作業車を使用して、軌道中心から水平方向に6.25～31.25m、高さ方向に地面から1.2～25mの範囲で行った。盛土高架区間について

は、軌道中心から6.25mの位置は盛土に支障するため、10mの位置で測定を行った。騒音計の設置方法は、高所作業車からロープをぶら下げ、騒音計とケーブルを固定した。さらに、軌道近傍にも騒音計を設置した。また、コンクリート高架橋区間は防音壁の天端および高架橋直下にも騒音計を設置して測定を行った。

2.3 測定結果

それぞれの箇所の平均的なケースを用いて、軌道近傍の騒音ピークレベルを0とした場合の各測定点での騒音レベルの相対値を図2に示す。

(1) 平地区間

列車騒音は軌道近傍を中心として空間全体に広がっているが、音源に対して斜め方向にやや強い指向性がみられた。地上1.2mの地点では、上方よりも水平方向に対する距離減衰量が大きくなる傾向がみられた。

(2) 盛土高架区間

平地区間と同様に、列車騒音は軌道近傍を中心として空間全体に広がっているが、平地区間と同様に音源に対して斜め上方にやや強い指向性がみられた。音源より下方（高さ1.2mおよび5.0m）の地点では、音源より上方の地点よりも全体的に騒音が小さくなる傾向がみられた。

(3) コンクリート高架橋区間（防音壁あり）

列車騒音は防音壁の天端を中心として、斜め上方に広がっている。これは、防音壁が設置されているため、車両と防音壁の間で多重反射をした後、防音壁の天端から放射されているものと考えられる。盛土高架区間と同様に、音源より下方（高さ1.2mおよび5.0m）の地点は音源より上方の地点よりも全体的に小さくなった。これは、防

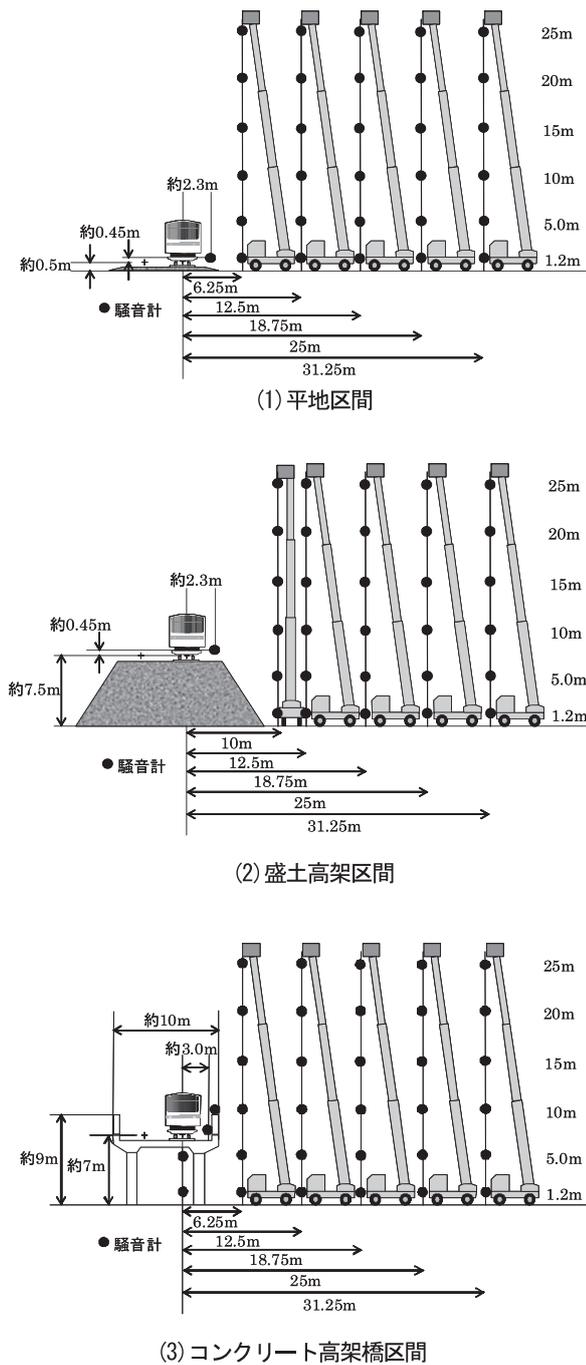


図1 騒音測定断面図

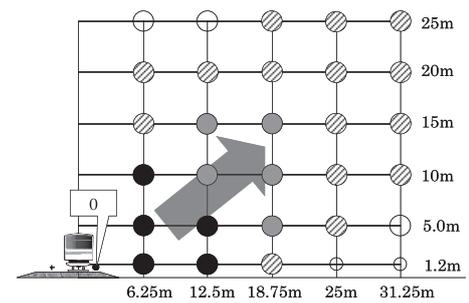
音壁による回折による影響であると考えられる。

以上より、通常の騒音評価点である地上からの高さ1.2m地点よりも上方の地点のほうが、騒音が大きくなることが明らかになった。高さ方向の騒音を評価するにあたっては、これらの騒音特性を考慮していくことが必要である。

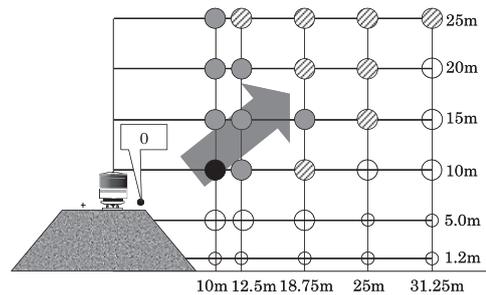
3. 高所空間を含めた在来線騒音予測式の提案

3.1 開発概要

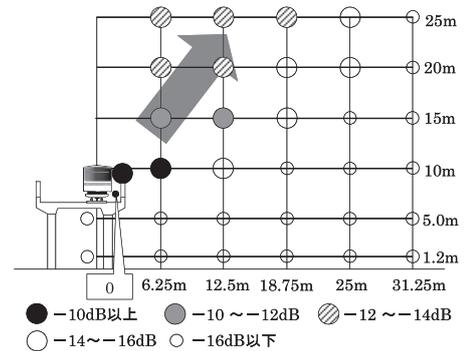
在来線鉄道騒音予測については、環境省指針「在来鉄



(1) 平地区間



(2) 盛土高架区間



(3) コンクリート高架橋区間

図2 軌道近傍を0とした相対騒音レベル

道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」(1995年)に対応して、主に地上1.2m高さ付近で測定された騒音データをもとに構築され、当該高さにおける騒音予測として活用されている。現状での騒音予測式では、音源の鉛直面内の指向特性や防音壁と車体による音の反射の影響が考慮されていないため、高所空間での騒音予測式の妥当性について検証する必要がある。

今回の高所空間を含めた在来線沿線での騒音の実測値と既往の在来線騒音予測式(鉄道総研予測式「在来鉄道騒音の予測手法に関する検討(2005年1月)」)から算出した予測値を比較した結果、構造形式に係わらず軌道よりも高い位置で実測値と比較して予測値が2~5dB程度過大となった。したがって、設計段階における高所空間対策工が過大なものになる可能性があり、そのため合理的な設計施

工に資する予測手法が必要と考えられる。そこで軌道よりも高い受音位置での騒音予測精度を向上させるために、高所空間を含めた在来線騒音予測式を構築することとした。

3.2 検討概要

既往の騒音予測式（鉄道総研予測式）は、エネルギーベースの騒音値（等価騒音レベル L_{Aeq} や単発騒音暴露レベル L_{AE} ）を求める方法である。ただし、既往の騒音予測式で設定された主要音源のパワーレベル L_W と実測値との差も予測と実測が乖離する要因となるため、実測データに基づく音源パワーの推定を行う。各測定点での単発騒音暴露レベル L_{AE} の予測値は、レール近傍点での単発騒音暴露レベル L_{AE} から算出したパワーレベル L_W をもとに算出した。

パワーレベル L_W はレール近傍点での単発騒音暴露レベル L_{AE} をもとに式(1)（参考文献1より引用）より、列車速度 v (m/s)、列車の走行軌道から観測点までの最短距離 r (m) から算出する。

$$\begin{aligned} L_{AE} &= L_W - 10 \log(4 \times v \times r) \\ &= L_W - 6 - 10 \log(v) - 10 \log(r) \\ \therefore L_W &= L_{AE} + 6 + 10 \log(v) + 10 \log(r) \quad \dots (1) \end{aligned}$$

次に、単発騒音暴露レベル L_{AE} の実測値と予測値の空間分布特性の比較を行い、両者のレベル差の空間分布について検討した。鉄道総研予測式により算出した単発騒音暴露レベル L_{AE} の予測値と実測値の差 Δ を補正值として定義し、高所空間の任意の測定点での補正值 Δ を求める予測式を算出した。今回は盛土高架区間および平地区間について検討を行ったので、その内容について報告する。

3.3 検討結果

3.3.1 盛土高架区間

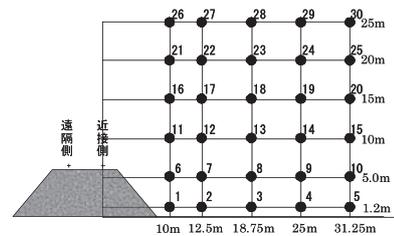
分析対象の列車は車両形式A・15両編成および車両形式B・15両編成とした。それぞれの列車について、レール近傍点での単発騒音暴露レベル L_{AE} をもとに式(1)からパワーレベル L_W を算出するとともに、そのパワーレベル L_W から推定した単発騒音暴露レベルの予測値と実測した単発騒音暴露レベルのレベル差、すなわち補正值 Δ を算出した。車両形式A・15両編成および車両形式B・15両編成の単発騒音暴露レベルの予測値と実測値の差を表1に示す。

表中の平均値は列車形式ごとのレベル差の算術平均値であり、偏差 σ はその標準偏差を表している。車両形式A、車両形式Bのいずれの列車形式の場合も個々の列車間のば

表1 単発騒音暴露レベルの予測値と実測値の差

<盛土区間>

Point	r(m)	H(m)	車両形式A・15両編成				車両形式B・15両編成			
			近接側		遠隔側		近接側		遠隔側	
			平均	偏差 σ	平均	偏差 σ	平均	偏差 σ	平均	偏差 σ
1	-10.00	1.2	-11.8	0.46	-14.5	0.47	-12.0	0.55	-13.9	0.19
2	-12.50	1.2	-9.7	0.45	-13.0	0.41	-10.0	0.56	-12.3	0.26
3	-18.75	1.2	-8.4	0.38	-11.4	0.45	-8.6	0.56	-10.7	0.23
4	-25.00	1.2	-7.2	0.32	-10.2	0.39	-7.4	0.63	-9.4	0.24
5	-31.25	1.2	-5.6	0.29	-8.7	0.28	-5.8	0.61	-7.9	0.22
6	-10.00	5	-6.6	0.27	-9.6	0.27	-6.8	0.58	-9.0	0.30
7	-12.50	5	-5.7	0.27	-8.9	0.25	-6.1	0.62	-8.4	0.28
8	-18.75	5	-4.0	0.35	-6.9	0.20	-4.5	0.64	-6.4	0.23
9	-25.00	5	-4.2	0.38	-6.8	0.19	-4.5	0.65	-6.2	0.23
10	-31.25	5	-3.9	0.34	-5.9	0.18	-4.2	0.59	-5.4	0.15
11	-10.00	10	-1.4	0.34	0.0	0.11	-1.8	0.62	0.5	0.30
12	-12.50	10	-1.7	0.31	-1.0	0.00	-2.1	0.62	-0.5	0.27
13	-18.75	10	-2.1	0.33	-2.1	0.07	-2.5	0.59	-1.6	0.22
14	-25.00	10	-2.1	0.40	-2.4	0.05	-2.3	0.66	-1.9	0.12
15	-31.25	10	-2.7	0.44	-3.1	0.04	-3.0	0.71	-2.5	0.14
16	-10.00	15	-1.4	0.42	-0.4	0.14	-1.7	0.62	0.2	0.44
17	-12.50	15	-0.1	0.42	0.5	0.16	-0.5	0.63	1.2	0.44
18	-18.75	15	-0.3	0.45	-0.2	0.16	-0.7	0.63	0.4	0.38
19	-25.00	15	-0.6	0.48	-0.9	0.10	-1.1	0.64	-0.4	0.27
20	-31.25	15	-0.9	0.50	-1.3	0.11	-1.2	0.74	-0.8	0.22
21	-10.00	20	-1.1	0.47	-0.4	0.11	-1.4	0.65	0.3	0.39
22	-12.50	20	-0.7	0.45	0.0	0.13	-1.1	0.63	0.7	0.44
23	-18.75	20	0.0	0.46	0.0	0.20	-0.3	0.70	0.6	0.47
24	-25.00	20	0.1	0.54	0.2	0.18	-0.2	0.63	0.8	0.40
25	-31.25	20	0.1	0.55	-0.1	0.20	-0.2	0.70	0.4	0.32
26	-10.00	25	-0.2	0.45	0.5	0.19	-0.5	0.67	1.0	0.37
27	-12.50	25	-1.4	0.49	-0.9	0.23	-1.7	0.67	-0.4	0.37
28	-18.75	25	0.8	0.47	0.6	0.23	0.4	0.62	1.2	0.47
29	-25.00	25	0.6	0.51	0.6	0.22	0.3	0.64	1.2	0.49
30	-31.25	25	0.9	0.56	1.0	0.27	0.6	0.77	1.4	0.46



らつき（偏差）は小さく、ばらつきの95%信頼区間（ $\sigma \times 1.96$ ）は最大で1.5dBであること、また、車両形式A、車両形式Bの列車形式間での差もほとんど見られないことが分かる。すなわち、単発騒音暴露レベルに着目すれば、走行騒音の伝搬特性は列車形式に依らず安定していると言える。そこで、補正值 Δ を近接側列車と遠隔側列車でまとめ、仰角 θ で整理した結果を図3に示す。

ここで、仰角 θ は当該車線の軌道中心と観測点を結ぶ線分とレールレベル（水平線）の成す角度で、レールレベルを基準（ $\theta=0^\circ$ ）として上方向を正、下方向を負とした。図3は盛土法面に遮蔽される測定点（ $\theta < 0^\circ$ ）を除く補正值 Δ の近似線を示している。図3より、近接側列車では斜め上方 39° 、遠隔側列車で 36° が最大となる指向特性であることが分かる。仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ の範囲において近接側列車と遠隔側列車の近似式の差は $-1.0 \sim +0.5$ dBで比較的小さく、車線別の近似式を一つにまとめた平均近似式を作成した。車線別の近似式と平均近似式を式(2)に示す。

$$\left. \begin{aligned} \text{平均} : \Delta &= -0.00303 \theta^2 + 0.223 \theta - 3.77 \\ \text{近接側} : \Delta &= -0.00253 \theta^2 + 0.196 \theta - 3.88 \\ \text{遠隔側} : \Delta &= -0.00352 \theta^2 + 0.250 \theta - 3.66 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

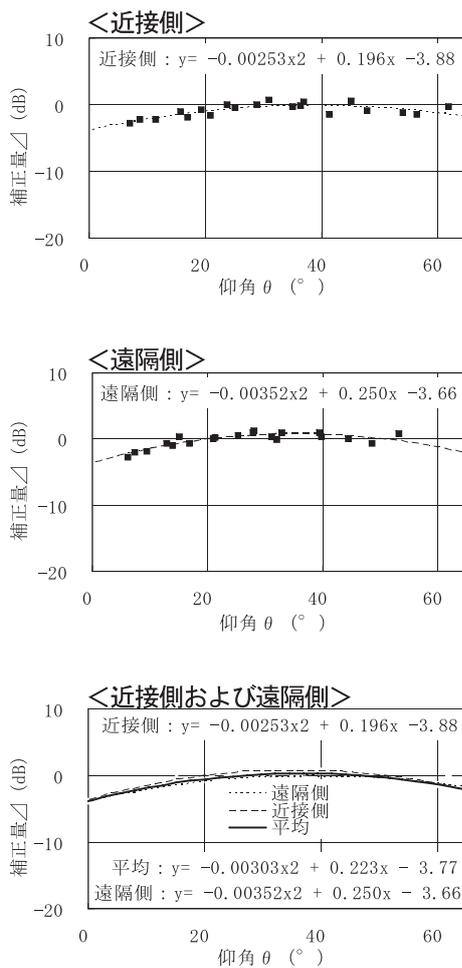


図3 盛土区間における補正值Δと仰角θの関係

仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ の適用範囲における各測定点での平均近似式(式(2))と実測値の差の平均は、近接側列車の場合で $-1.1 \sim +1.3\text{dB}$ ($\sigma = 0.49 \sim 0.68\text{dB}$)、遠隔側列車で $-0.5 \sim +1.4\text{dB}$ ($\sigma = 0.27 \sim 0.51\text{dB}$)であった。

また、車両形式A・15両編成、車両形式B・15両編成をもとに作成した補正值Δの近似式の有効性を確認するため、車両形式A・10両編成、車両形式B・11両編成、車両形式C・6両編成の実測値との検証を行った。各測定点における予測値と実測値の差を表2に示す。予測計算の適用範囲(仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ Point11~30)で予測と実測は概ね一致しており、車両形式A・10両編成での予測と実測との差は、近接側列車で $-1.6 \sim +1.3\text{dB}$ 、遠隔側列車は $-2.0 \sim -0.3\text{dB}$ であった。また、同様にして、車両形式B・11両編成の両者の差は近接側で $-1.5 \sim +1.2\text{dB}$ 、遠隔側で $-2.0 \sim +0.3\text{dB}$ 、また、車両形式C・6両編成の両者の差は $-1.6 \sim +1.2\text{dB}$ であった。

したがって、(2)で導出した補正式を既往の在来線騒音予測式に付加することによって、列車形式や編成両数に依らず概ね2dBの差で沿線の高所空間における単発騒音レベルを予測できることが明らかになった。

表2 単発騒音暴露レベルの予測値と実測値の差
〈盛土高架区間における検証結果〉

Point	r(m)	H(m)	車両形式A・10両編成		車両形式B・11両編成		車両形式C・6両編成	
			近接側	遠隔側	近接側	遠隔側	近接側	遠隔側
1	-10.00	1.2	0.7	4.5	0.6	5.1	0.9	—
2	-12.50	1.2	0.2	4.0	0.1	4.4	0.7	—
3	-18.75	1.2	0.8	3.9	0.7	4.1	1.3	—
4	-25.00	1.2	0.4	3.1	0.6	3.5	1.2	—
5	-31.25	1.2	-0.6	1.9	-0.5	2.3	0.2	—
6	-10.00	5.0	1.0	4.0	1.1	4.1	1.6	—
7	-12.50	5.0	0.5	3.6	0.7	3.5	1.1	—
8	-18.75	5.0	-0.6	2.0	-0.6	1.8	0.0	—
9	-25.00	5.0	-0.3	1.9	-0.4	1.9	0.4	—
10	-31.25	5.0	-0.5	1.2	-0.6	1.1	0.1	—
11	-10.00	10.0	0.6	-2.0	0.5	-2.0	0.7	—
12	-12.50	10.0	0.5	-1.4	0.4	-1.2	0.9	—
13	-18.75	10.0	0.2	-0.9	0.1	-0.6	0.7	—
14	-25.00	10.0	-0.3	-0.9	-0.4	-0.6	0.2	—
15	-31.25	10.0	0.0	-0.5	-0.1	-0.1	0.5	—
16	-10.00	15.0	1.3	-0.4	1.2	-0.1	1.2	—
17	-12.50	15.0	0.2	-1.6	0.0	-1.2	0.3	—
18	-18.75	15.0	-0.1	-1.5	-0.3	-1.1	0.3	—
19	-25.00	15.0	-0.3	-1.3	-0.4	-0.9	0.5	—
20	-31.25	15.0	-0.6	-1.3	-0.6	-0.8	0.4	—
21	-10.00	20.0	0.1	-0.7	0.2	-0.2	-0.2	—
22	-12.50	20.0	0.2	-1.0	0.3	-0.5	0.1	—
23	-18.75	20.0	-0.2	-1.0	-0.2	-0.6	-0.1	—
24	-25.00	20.0	-0.5	-1.5	-0.6	-1.1	-0.2	—
25	-31.25	20.0	-0.7	-1.6	-0.8	-1.1	-0.3	—
26	-10.00	25.0	-1.6	-2.0	-1.5	-1.4	-1.6	—
27	-12.50	25.0	0.2	-0.3	0.2	0.3	0.1	—
28	-18.75	25.0	-1.0	-1.5	-0.9	-1.1	-1.2	—
29	-25.00	25.0	-0.7	-1.6	-0.7	-1.2	-0.8	—
30	-31.25	25.0	-1.2	-2.1	-1.2	-1.6	-1.1	—

3.3.2 平地区間

平地区間においても盛土高架区間と同様に鉄道総研式による予測値とそれらの実測値のレベル差を計算した。

分析対象の列車は車両形式D・6両編成とし、同速度で走行した近接側および遠隔側の各3列車を除く列車とした。単発騒音暴露レベルの予測値と実測値の差を表3に示す。近接側・遠隔側のいずれの走行車線においても、測定列車によるレベル差のばらつきは小さく、車両下部音の伝搬特性が安定していると言える。各走行車線で平均したレベル差、すなわち、平均補正值Δの空間分布を図4に示す(ただし、地表面吸収などの影響を強く受けると考えられる地上高さ12mの測定点(Point1~5)を除いた)。図4より、近接側列車では斜め上方 38° 、遠隔側列車で 37° が最大となる指向特性であることが分かる。

仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ の範囲において近接側列車と遠隔側列車の近似式の差は $+0.1 \sim +0.4\text{dB}$ と非常に小さいことから、走行車線別の近似曲線を一つの曲線で近似した。

車線別および平均の近似式を式(3)に示す。ここで、地上高さ12mの測定点を除く、各測定点での平均近似式(式(3))と実測値との差の平均は、近接側列車の場合で $-2.2 \sim +2.0\text{dB}$ ($\sigma = 0.34 \sim 0.62\text{dB}$)、遠隔側列車で $-1.5 \sim +0.9\text{dB}$ ($\sigma = 0.52 \sim 0.79\text{dB}$)であった。

$$\left. \begin{aligned} \text{平均} : \Delta &= -0.00197 \theta^2 + 0.146 \theta - 2.07 \\ \text{近接側} : \Delta &= -0.00204 \theta^2 + 0.154 \theta - 2.01 \\ \text{遠隔側} : \Delta &= -0.00189 \theta^2 + 0.140 \theta - 2.12 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

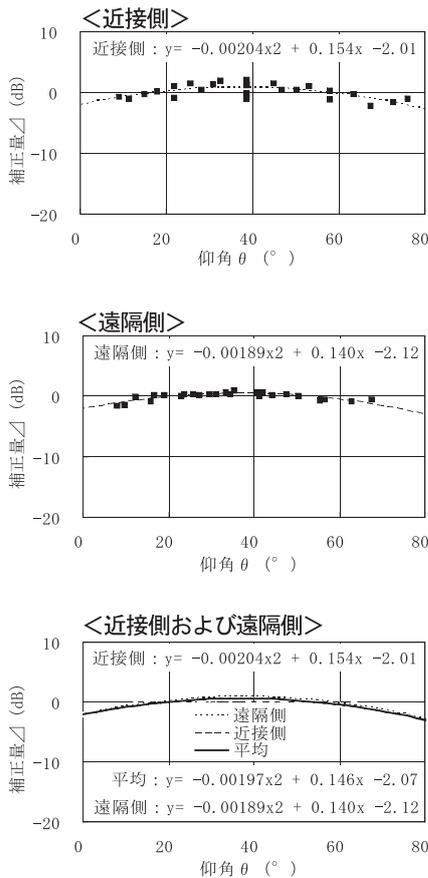


図4 平地区間における補正值Δと仰角θの関係

また、補正值Δの平均近似式(式(3))の有効性を確認するため、車両形式D・6両編成(同速度で走行した近接側・遠隔側各3列車)の実測値との検証を行った。検証の結果、予測計算の適用範囲(仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ Point6~30)で予測と実測は概ね一致しており、両者の差は近接側列車で $-0.4 \sim +2.1$ dB、遠隔側列車では $-0.4 \sim +0.9$ dBであった。

以上のように、盛土区間と同様に平地区間の高所空間に伝搬する車両下部音の指向特性を表す補正式を仰角θをパラメータとして導出した。導出した補正式を他の測定列車の予測に適用してその有効性を検証した結果、概ね2dBの差で沿線の高所空間における騒音レベルを予測できることが明らかになった。

4. その他の検討課題

本章ではこれまで述べてきた以外の項目で、今後予測手法の適用範囲の拡大および精度の向上をしていく上で問題となる点を整理する。

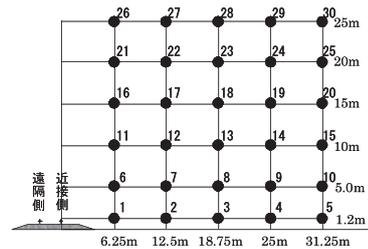
(1) 平地区間および盛土区間

本稿では平地区間および盛土区間のそれぞれについて補正值Δの近似式を算出したが、今後はそれぞれの近似

表3 単発騒音暴露レベルの予測値と実測値の差

<平地区間>

Point	r(m)	H(m)	車両形式D・6両編成			
			近接側		遠隔側	
			平均	偏差σ	平均	偏差σ
1	-6.25	1.2	-2.3	0.15	-2.1	0.45
2	-12.50	1.2	-1.8	0.26	-2.1	0.39
3	-18.75	1.2	-3.5	0.46	-4.0	0.49
4	-25.00	1.2	-4.8	0.45	-5.5	0.43
5	-31.25	1.2	-3.9	0.54	-5.2	0.46
6	-6.25	5.0	-1.1	0.34	0.3	0.52
7	-12.50	5.0	-1.0	0.41	0.2	0.79
8	-18.75	5.0	-0.3	0.47	-0.2	0.56
9	-25.00	5.0	-1.0	0.58	-1.4	0.59
10	-31.25	5.0	-0.7	0.56	-1.5	0.60
11	-6.25	10.0	-1.2	0.37	0.2	0.53
12	-12.50	10.0	-0.1	0.39	0.4	0.57
13	-18.75	10.0	0.5	0.48	0.3	0.62
14	-25.00	10.0	1.0	0.56	0.2	0.63
15	-31.25	10.0	0.2	0.57	-0.8	0.65
16	-6.25	15.0	-2.2	0.39	-0.7	0.57
17	-12.50	15.0	0.5	0.45	0.6	0.62
18	-18.75	15.0	1.2	0.48	0.6	0.63
19	-25.00	15.0	1.3	0.45	0.1	0.62
20	-31.25	15.0	1.5	0.48	0.0	0.69
21	-6.25	20.0	-1.6	0.53	-0.9	0.65
22	-12.50	20.0	0.3	0.53	0.0	0.69
23	-18.75	20.0	0.5	0.53	0.0	0.72
24	-25.00	20.0	1.3	0.56	0.4	0.76
25	-31.25	20.0	1.9	0.59	0.4	0.76
26	-6.25	25.0	-1.1	0.56	-0.6	0.74
27	-12.50	25.0	-0.3	0.60	-0.6	0.69
28	-18.75	25.0	1.0	0.56	0.4	0.63
29	-25.00	25.0	1.5	0.57	0.7	0.65
30	-31.25	25.0	2.0	0.62	0.9	0.78



曲線を一つの曲線に近似し、平地・盛土区間のいずれにも適用可能な補正式を導出する予定である。

(2) 車体と防音壁との間の多重反射の影響

防音壁を有する高架橋においては、車体-防音壁間の多重反射の影響を明らかにする必要がある。今後は防音壁の有無の違いによる予測手法を確立する予定である。

5. おわりに

構築した騒音予測式については、環境影響評価を行う際に使用できるよう学術的な評価を受けていく予定である。引き続き、防音壁を有する高架橋においても同様に予測式を構築する予定である。また、高所空間における騒音対策工についても検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 安部 由布子他：在来鉄道騒音の予測手法に関する検討、日本音響学会騒音振動研究会資料 N-2005-01、2005年1月
- 2) 白神 亮他：構造形式の違いによる在来線の騒音特性に関する一考察、平成20年度土木学会全国大会第63回年次学術講演会、2008年9月