

鉄道振動予測式における減衰定数の計算に関する研究

柳沢満夫

正会員 (株) トーニチコンサルタント 西日本支社 (〒530 大阪市北区万才町3-20)

本研究の目的は、地上線における鉄道振動予測式に組み込まれた幾何減衰定数 (n) と内部減衰定数 (a) を振動伝搬理論の定義に基づいて決定する方法を明らかにする事である。予備的作業として、解析に用いる振動レベルに関する測定データの減衰傾向を分析し、次に振動レベルの基準点を選定する。この結果に基づき実測データを用いて減衰定数を繰返し計算法により逆算して求める方法を提案する。また、この方法で計算した減衰傾向を分析し、地質と減衰定数を関連づける。

Key Words: railway vibration, vibration transmission, damping constant, geometric damping constant, internal damping constant

1. 研究の背景と目的

大都市の中心及び周辺部において通勤輸送を主体とする普通鉄道の環境アセスメント(開業後)では、騒音・振動・日照障害・電波障害・景観の5要素が主要環境要素である。これら主要環境要素のうち騒音と振動は、地元説明会等において沿線住民が強い関心を示す要素である。鉄道から発生する騒音と振動は不可分の関係にあるが、騒音と比較して振動は沿線に与える影響が低いと今まで思われていた。しかし、最近では騒音と同様、沿線住民の生活に影響を及ぼす重要な環境要素と見なされるようになり、鉄道振動に関する研究の重要性が増加している。

鉄道振動に関する環境アセスメントでは、現況調査・予測計算・環境保全対策が主要事項である。これらのうち、地元説明会等では予測計算された鉄道振動レベルの可否が議論の対象となり、予測結果の信頼性が最重要課題となっている。従って、鉄道振動レベルの予測モデルに関する信頼性向上の為、モデルを構成する各種定数の信頼性を向上させることが重要課題と考えられる。ここでは、特定の鉄道振動予測式における減衰定数の計算方法について提案し検証する。

地上に設置された鉄道から発生する振動レベルの予測は、①類似事例の参照、②経験的回帰式、③伝搬理論計算式、④実験的方法の、いずれかによる事が一般的である。現在実施されている都市鉄道の環境アセスメントでは、低い切土・盛土区間を含む地上線のみ環境アセスメントは少なく、ほとんどが高架鉄道の一部に地上線が取付け区間として存在するものである。これらの地上線区間では、「類似事例の参照」と「経験的回帰式」を単独

あるいは併用している場合が多い。次に採用されているのは「伝搬理論計算式」を用いた事例であり、「実験的方法」を採用した報告書は見受けられない。

伝搬理論計算式は、未だ確立した予測モデルとは言いがたい現状であるが、地盤振動の伝達と減衰を理論的に説明可能である。従って、理論的モデル構築に加え、地形・地質/列車長・種別/軌道構造・状況/その他に関する条件を各種係数として実測データ等から適正に設定し、予測式に組み込む事により今後の予測手法の主流になるものと考えられる。

本研究の目的は、現状では設定根拠があまり明白でないまま使用されている幾何減衰定数 (n) と内部減衰定数 (a) を適正に設定する方法を提案し、その方法を実測データで検証する事である。なお、定数の一般的傾向を把握するには大量のデータの収集と解析が必要であるが、ここではケース・スタディとして群馬県内の台地上にある在来鉄道の地上線を選定し、ここにおける鉄道振動測定の結果を用いて以後の解析を行う。測定箇所は低盛土を含む地上線の11測線×4測点であり、全測定列車数は171列車である。

2. 鉄道振動予測式の構造

地盤振動の基礎的理論によれば、点振動源により発生する波動には、P波(疎密波)及びS波(剪断波)のような実体波と、境界層の存在により発生する表面波がある事は古くから知られている。また、地表面を加振した場合の地表振動の伝搬の主体は表面波であり、この表面波の性質はS波と関係が深いといわれている。

振動源からの距離 R にある地点の振動振幅 (U_R) は、

距離減衰を幾何減衰と内部減衰の組み合わせとして次式で表せる^{1),2),3)}。

$$U_R = U_0 e^{-\alpha(R-R_0)} (R/R_0)^{-n} \quad (1)$$

ここに、 U_0 = 基準点の振動振幅

α = 内部減衰定数 = $2\pi hf/V_s$

h = 地盤の減衰定数

f = 周波数 (Hz)

V_s = S 波の伝搬速度 (m/s)

n = 幾何減衰定数

R = 振動源から予測地点までの距離 (m)

R_0 = 振動源から基準点までの距離 (m)

一般に地盤振動は、加速度レベルによって示される。

また、公害振動は加速度レベルを感覚補正した振動レベルにより表示するように振動規制法によって定められている。従って、公害振動としての解析の都合上、振動振幅によって示された式(1)を、式(2)のように振動レベルで表示³⁾⁻⁶⁾する方法が環境アセスメントでは一般的である。式(2)は点振動源を対象とする伝搬式である。一方、地表を走る鉄道は線振動源と考える方が物理的現象としては適当であるが、点振動源からの伝搬を表す式に含まれる各種定数を調整することにより、線振動源である地上鉄道の振動予測式として用いることが実務的に可能であると考えられる。従って、以下の検討では式(2)を地上鉄道の振動予測式として採用する。

$$VL = VL_0 - 20n \log(R/R_0) - 8.68\alpha(R - R_0) \quad (2)$$

ここに、 VL = 予測地点の振動レベル (dB)

VL_0 = 基準点の振動レベル (dB)

$$= a \log V + b$$

a, b = 定数

R = 振動源から予測地点までの距離 (m)

R_0 = 振動源から基準点までの距離 (m)

n = 幾何減衰定数

α = 内部減衰定数

3. 実測データの解析

予備的作業として、本研究に使用する振動レベルの測定結果(表-1)の減衰傾向を解析する。測定を行った鉄道沿線周辺の地形・地質は下記のとおりである。

- ① 鉄道は群馬県・前橋台地上の東西方向に位置する。
- ② 測定区間の路線延長は、利根川の西岸約 600 m(測線 No.1~3)と東岸の約 3,500 m(測線 No.4~13)である。
- ③ 利根川と台地は 10 m 程度の高低差であるが、測定地点は台地上にあり、ほぼ平坦である。
- ④ 沿線の一般的地質構成は、上から順に表土・シルト・泥流堆積物・砂礫である。砂礫層の上部は利根川に近い所では深く、離れると浅くなる。

表-1 振動レベル測定結果 (平均値) 単位: (dB)

測線	測定回数	6.5m	10m	20m	30m
No.1	18	65.1	59.1	53.7	48.5
No.2	9	74.0	70.7	61.6	49.0
No.3	16	67.8	64.6	58.9	56.2
No.4	19	70.1	70.8	64.7	58.8
No.5	12	74.6	68.2	62.3	48.2
No.6	19	70.4	67.3	55.5	51.9
No.7	17	68.8	66.6	60.8	51.8
No.9	18	69.8	69.2	60.8	52.4
No.10	12	71.8	65.6	62.4	47.4
No.12	15	67.7	66.5	58.8	52.7
No.13	16	70.9	62.9	55.3	52.4
合計	171	-	-	-	-

(注) 測定場所: 群馬県、地上線及び低盛土区間

測定日: 昭和52年11月15日~16日

昭和53年4月20日~24日

測定列車: 中距離電車, 3~11両/編成

表-2 相対振動レベル (平均値) 単位: (dB)

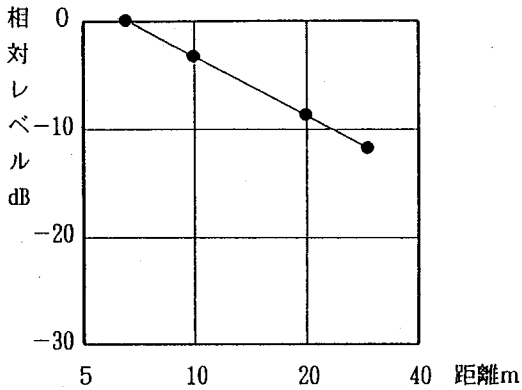
測線	6.5m	10m	20m	30m
No.1	0	-6.0	-11.4	-16.6
No.2	0	-3.3	-12.4	-25.0
No.3	0	-3.2	-8.9	-11.6
No.4	0	+0.7	-5.4	-11.3
No.5	0	-6.4	-12.3	-26.4
No.6	0	-3.1	-14.9	-18.5
No.7	0	-2.2	-8.0	-17.0
No.9	0	-0.6	-9.0	-17.4
No.10	0	-6.2	-9.4	-24.4
No.12	0	-1.2	-8.9	-15.3
No.13	0	-8.0	-15.6	-18.5

⑤ 利根川の兩岸における橋台付近では岩が露頭しているが、測定地点の観察では岩は見えない。

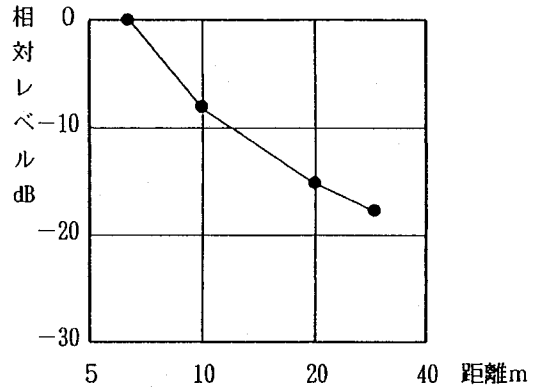
⑥ 測定地点の地盤種別は岩と軟弱地盤の間である。減衰定数 n と α の計算に使用する測定結果の一般的減衰傾向を視覚的に把握するため、表-1 に示す振動レベルの測定結果を相対レベルに換算し、表-2 と図-1 に示す。また、距離と減衰量の関係を表-3 に示す。以後の解析では全て各測定点における平均値を用いる。

表-2・表-3 及び図-1 から距離減衰の傾向を分析すると次の事が分かる。

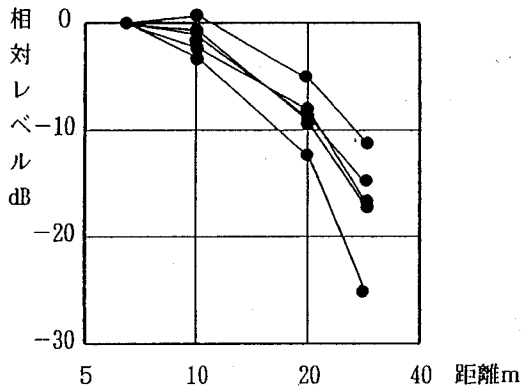
- ① 6.5 m~10 m 間の距離減衰は、No.4 測線を除き 0.6~8.0 dB/1.5 倍距離であり、平均値は約 4 dB/1.5 倍距離である。相対レベルの「ばらつき」は 10~20 m 間より大きい、20~30 m 間よりは小さい。



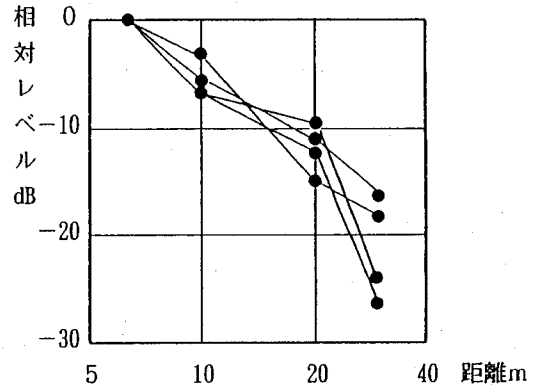
(a) 測線No.3の距離減衰図



(c) 測線No.13の距離減衰図



(b) 測線No. 2, 4, 7, 9, 12 の距離減衰図



(d) 測線No. 1, 5, 6, 10 の距離減衰図

図-1 距離減衰図

表-3 距離減衰の傾向

距離	距離減衰 dB	標準偏差 σ_n
6.5m~10m	平均 3.7/1.5倍距離	2.43
10m~20m	平均 7.0/倍距離	2.18
20m~30m	平均 7.9/1.5倍距離	4.21

- ② 10~20 m間の距離減衰は、3.2~11.8 dB/倍距離の間にあり、平均値は約7 dB/倍距離である。振動レベルの「ばらつき」は最小である。
- ③ 20~30 m間の距離減衰は、2.7~15.0 dB/1.5倍距離の間にあり、平均値は約8 dB/倍距離である。相対レベルの「ばらつき」は最大である。
- ④ 振動源から遠くなるほど距離減衰の勾配は大きくなる場合が多いが、逆のケースも存在する。
- ⑤ 30 m地点の相対レベルを5 dB間隔で分類すると、下記の4ケースとなる。
 - 10 dB 前後 (7.5~12.5 dB) : No. 3, 4
 - 15 dB 前後 (12.5~17.5 dB) : No. 1, 7, 9, 12
 - 20 dB 前後 (17.5~22.5 dB) : No. 6, 13

25 dB 前後 (22.5~27.5 dB) : No. 2, 5, 10

- ⑥ 距離 (横軸, 対数) と振動レベル (縦軸) をプロットした場合の減衰曲線は、図-1 (a)~(d) に示すように、直線的減衰から指数関数的減衰まで各種存在するが下記の理由により、いずれの場合も伝搬理論計算式の当てはめが適当である。

図-1 (a) : 直線的減衰傾向である。伝搬理論計算式では α が小さい場合には減衰曲線が直線に近づく。従って、伝搬理論計算式の当てはめが適当である。

図-1 (b) : 指数関数的減衰であり、No. 4 測線以外は伝搬理論計算式の当てはめが最適の場合である。No. 4 測線の 10 m 測定点は基準点よりレベルが高く問題が残されているが、例外的測定結果と考えられる。全体的減衰傾向としては伝搬理論計算式の当てはめが適当である。

図-1 (c) : 図-1 (b) とは逆の凹型減衰傾向である。予測値と実測値の乖離は遠距離になるほど大きくなる傾向であるが、今回測定した 40 m 程度までであれば、その「ばらつき程度」は許容範囲に収まるものと考えられる。

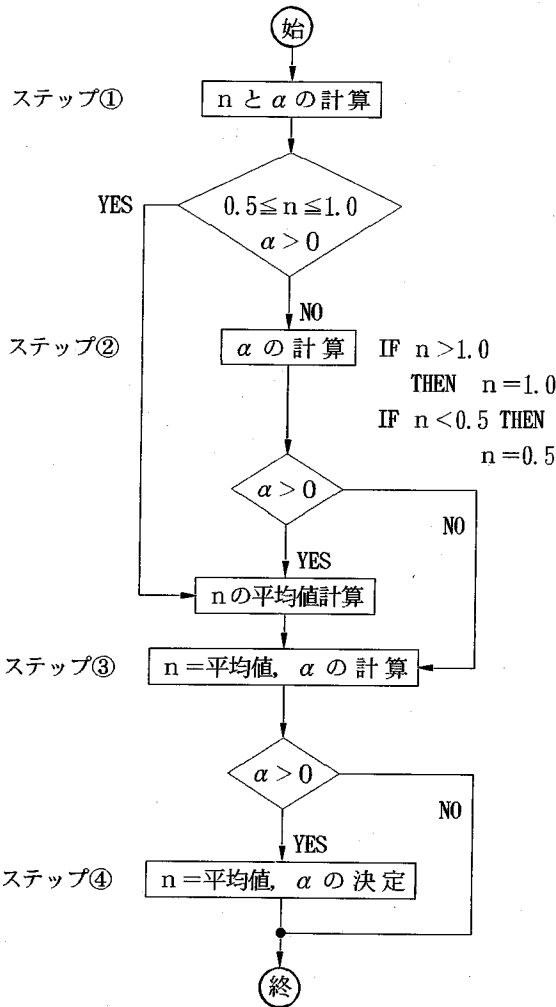


図-2 n と α の計算に関する流れ図

従って、伝搬理論計算式の当てはめが可能である。

図-1 (d) : 10 m または 20 m の中間測定点において指数関数的減衰傾向から乖離する場合もあるが、全体的減衰傾向は伝搬理論計算式の当てはめが適当である。

4. 減衰定数の計算方法

前項では使用する実測データの減衰傾向に関する分析を行った。ここでは、これらの結果を基にして、幾何減衰定数 (n) と内部減衰定数 (α) を振動レベルの測定値から計算する手順を図-2 の流れ図に示す。

図-2 の流れにおいて、最初は各測線毎に実測した振動レベルを式(2)に代入し n と α に関する連立方程式を作成し数学的解を求める。次に振動基礎理論に示された標準的定数 (付録-1 参照) 及び既存データの解析 (付録-2 参照) によって設定した n と α の制限範囲にある

かどうかを判定する。具体的な制限範囲の設定は、次のとおりである。対象とする鉄道振動は、振動源から 50 m 程度までの表面波と実体波が合成された波動である。従って、表面波と実体波の構成比に基づき n は 0.5 ~ 1.0 ~ 2.0 の範囲となる。一方、円形フーチングに関する振動エネルギーの 2/3 は表面波によって伝達されるという計算結果²⁾を考慮すれば、幾何減衰定数 n は 2.0 より小さく、さらに 1.0 よりも小さく、0.5 に近づく。この結果と付録-1 ~ 2 を総合的に判断し、 $0.5 \leq n \leq 1.0$ と設定する。以後、この範囲に収まるまで、繰り返し計算によって n と α の最適値に収斂させるものとする。

5. 実測データによる減衰定数の計算

(1) 制約条件

振動伝搬理論式を基本とする地上線の鉄道振動予測式に含まれる幾何減衰と内部減衰の和を距離減衰と定義する。距離減衰は地盤の影響を強く受けるが地盤の土質構成はかなり複雑であり、その他、地下水あるいは地形の影響を受ける事は容易に推定できる。それ故、振動伝搬の減衰に関する定数、即ち幾何減衰定数 (n) と内部減衰定数 (α) を適確に決定することは困難である。更に、これらの定数を振動レベルの測定値から求める方法は、入手可能な土質データによっても制限される場合が多い。

ここでは、振動レベルの減衰状況は表-2 に示す測定値を解析し、土質については鉄道構造物の全体図に示された「地質」と「N 値」を参考にする。次に、両者の関連を推定して、地質別の定数 (n, α) を決定する。従って、振動の伝搬速度や地盤の卓越周波数は、地質と N 値による「地盤の固さ」から推定する程度となる。

(2) 振動レベルの基準点の選定

列車走行によって発生する地盤振動の中心となる振動源はレール直下と考えられるが、この位置における振動レベルを現地測定により求める事は困難である。従って、振動源に出来るだけ近い点に代替振動源を設け、これを基準点と名付けて振動源の振動レベルを代表させるものとする。今後は基準点を距離減衰の原点として基準点以遠における振動の伝搬計算を行うものとする。

各測定点における振動レベルと列車速度の関係式から選定を行う。振動レベル (VL) と列車速度 (V) に関する経験式 $VL = a + b \log V$ を用い、距離別の振動レベルと列車速度の関係式における相関係数を算出する。次に、この計算結果のうち、最も相関係数の大きい地点を基準点に選定する。171 列車について計算した VL と V の関係及び、相関係数 r を表-4 に示す。

表-4 より、6.5 m 地点の相関係数が最大であり、また振動源に最近接しているため、基準点として 6.5 m 地点

表-4 振動レベルと列車速度の関係

距離	振動レベルと列車速度の関係式	相関係数r
6.5m	$VL = 56.3 + 7.55 \log V$	0.315
10.0m	$VL = 58.8 + 4.20 \log V$	0.135
20.0m	$VL = 43.1 + 9.10 \log V$	0.309
30.0m	$VL = 41.2 + 6.14 \log V$	0.206

を採用する。

$$\therefore VL_0 = VL_{6.5} = 56.3 + 7.55 \log V$$

(3) 幾何減衰定数及び内部減衰定数の計算

ステップ ①: nとαを測定値から計算する

最初のステップでは、振動理論伝搬式の当はめにより nとαの連立方程式を作成し解を求める。解が振動基礎理論に適合しない場合には、調整を行い次のステップに進む。

nとαに関する連立方程式は式(2)から次のように誘導出来る。即ち、6.5m、10m、20mと30mの4測点から構成される測線におけるJ測点とK測点の2測点から、振動レベル予測式は次式のように示される。

$$VL_J = VL_0 - 20n \log(R_J/R_0) - 8.68\alpha(R_J - R_0) \quad (3)$$

$$VL_K = VL_0 - 20n \log(R_K/R_0) - 8.68\alpha(R_K - R_0) \quad (4)$$

ここに、VL₀: 基準点の振動レベル (dB)

VL_J: J測点の振動レベル (dB)

VL_K: K測点の振動レベル (dB)

R₀: 振動源から基準点までの距離 (m)

R_J: 振動源からJ測点までの距離 (m)

R_K: 振動源からK測点までの距離 (m)

式(3)と式(4)は同時に成立するので、連立方程式として解く為、式(3)から式(4)を除算すると式(5)が求まる。

$$VL_J - VL_K = 20n \log(R_K/R_J) + 8.68\alpha(R_K - R_J) \quad (5)$$

次に、式(5)の両辺を 8.68(R_K - R_J) で除算し整理すると式(6)となる。

$$(VL_J - VL_K) / 8.68(R_K - R_J) = \alpha + 20n \log(R_K/R_J) / 8.68(R_K - R_J) \quad (6)$$

ここに、

$$Y = (VL_J - VL_K) / 8.68(R_K - R_J) \quad (7)$$

$$X = 20 \log(R_K/R_J) / 8.68(R_K - R_J) \quad (8)$$

最後に、式(7)と式(8)を式(6)に代入すると式(9)が得られる。

$$Y = \alpha + nX \quad (9)$$

式(9)は2測点の振動レベルを1組としたαとnの関係式であり、1組の測点では測定した列車本数(9~18列車)の数だけ式が成立する。しかし、ここでは代表例について全列車数について計算を行いチェックした結果、平均振動レベルを用いても大差ない結果が得られる

表-5 nとαを算出する為の測定点の組み合わせ

組合	J測点	K測点
1	6.5m	10.0m
2	6.5m	20.0m
3	6.5m	30.0m
4	10.0m	20.0m
5	10.0m	30.0m
6	20.0m	30.0m

表-6 nとαを算出する為のデータ (No.6側線)

	距離		振動レベル dB	
	J測点	K測点	J測点	K測点
1	6.5m	10.0m	70.4	67.3
2	6.5m	20.0m	70.4	55.5
3	6.5m	30.0m	70.4	51.9
4	10.0m	20.0m	67.3	55.5
5	10.0m	30.0m	67.3	51.9
6	20.0m	30.0m	55.5	51.9

計算結果: n=0.5946, α=0.0544

表-7 ステップ①の計算結果

側線	幾何減衰定数		内部減衰定数		総合判定
	n	判定	α	判定	
No.1	1.7523	不可	-0.0343	不可	不可
No.2	-0.3902	不可	0.1471	可	不可
No.3	0.8823	可	-0.0003	不可	不可
No.4	-1.1663	不可	0.1325	可	不可
No.5	0.7943	可	0.0740	可	可(*)
No.6	0.5946	可	0.0544	可	可(*)
No.7	-0.3295	不可	0.1039	可	不可
No.9	-0.9834	不可	0.1502	可	不可
No.10	0.6355	可	0.0732	可	可(*)
No.12	-0.4278	不可	0.1024	可	不可
No.13	2.8330	不可	-0.0947	不可	不可

(注) * 0.5 ≤ n ≤ 1.0 及び α > 0

事が判明したので、ここでは平均振動レベルによって計算を行う。従って、表-5に示すように1測線当たり6本のαとnの関係式(9)が求まるので、最小二乗法によってnとαを計算する。

このステップにおける計算例を次に示す。

表-1の測定結果を用い、表-6と同様にして全測線について最小二乗法により求めた数学的解であるnとαを表-7に示す。

ステップ ②: n=仮定値としてαを計算する

内部減衰定数αは土質の強い影響を受ける定数であり、その範囲を検討の初期の段階で特定することは非常

表一8 ステップ②の計算結果

側線	幾何減衰定数		内部減衰定数		総合判定
	n	適用	α	判定	
No.1	1.000	仮定	0.0205	可	可
No.2	0.500	仮定	0.0823	可	可
No.3	0.8823	計算	-0.0003	不可	不可 $\alpha < 0$
No.4	0.500	仮定	0.0113	可	可
No.5	0.7943	計算	0.0740	可	可:ステップ①と同-
No.6	0.5946	計算	0.0544	可	可:ステップ①と同-
No.7	0.5000	仮定	0.0436	可	可
No.9	0.5000	仮定	0.0423	可	可
No.10	0.6355	計算	0.0732	可	可:ステップ①と同-
No.12	0.5000	仮定	0.0349	可	可
No.13	1.0000	仮定	0.0387	可	可

(注) nの適用欄: 計算=ステップ①の計算結果

表一9 α の度数分布

α	度数
0.01	2
0.02	0
0.03	1
0.04	3

(注) α : 中心値を示す

に困難である。従って、ここでは経験的に範囲を特定しやすい幾何減衰定数 n に着目して計算を進める。

測定された実際の鉄道振動は表面波と実体波の複合した波動であり、振動伝搬基礎理論の一般的知識によれば、 $0.5 \leq n \leq 1.0$ である。従って、表一7において総合判定が「不可」となった8測線について $n > 1.0$ の場合は $n = 1.0$ と仮定し、また、 $n < 0.5$ の場合には $n = 0.5$ と仮定して再計算を行い、その結果を表一8に示す。なお、測線 No. 5, 6, 10 については、ステップ①の計算結果を、そのまま記載してある。

表一8の計算結果から、 $\alpha < 0$ となった測線 No. 3 を除く残りの10測線について検討する。幾何減衰定数は $n = 0.5 \sim 1.0$ の範囲であり平均値は $n = 0.65$ となる。内部減衰定数 α は $0.01 \sim 0.08$ の範囲であり、表一9に示すように $0.01, 0.04$ と 0.07 の3グループに大別出来る。

このよう n と α について、かなり整理されてきたが、未だ $\alpha < 0$ の測線があるので次のステップに進むものとする。

ステップ③: $n = \text{平均値} = 0.65$ として α を計算する

幾何減衰定数 n については、振動伝搬基礎理論によれば表面波では $n = 0.5$ 、実体波では $n = 1.0$ である。一方、実際の鉄道振動の伝搬は表面波と実体波の複合した波動であり通常は $0.5 \sim 1.0$ の範囲にあるが、経験的には $n =$

表一10 ステップ③の計算結果

側線	幾何減衰定数		内部減衰定数		総合判定
	n	適用	α	判定	
No.1	0.65	平均値	0.0459	可	可, c
No.2	0.65	平均値	0.0714	可	可, d
No.3	0.65	平均値	0.0166	可	可, a
No.4	0.65	平均値	0.0003	可	可, a
No.5	0.65	平均値	0.0845	可	可, d
No.6	0.65	平均値	0.0504	可	可, c
No.7	0.65	平均値	0.0327	可	可, b
No.9	0.65	平均値	0.0314	可	可, b
No.10	0.65	平均値	0.0722	可	可, d
No.12	0.65	平均値	0.0240	可	可, b
No.13	0.65	平均値	0.0641	可	可, d

(注) a~d: α の中心値と範囲

a: 中心値 $\alpha = 0.01$, 範囲 $0 < \alpha \leq 0.020$

b: 中心値 $\alpha = 0.03$, 範囲 $0.020 < \alpha \leq 0.040$

c: 中心値 $\alpha = 0.05$, 範囲 $0.040 < \alpha \leq 0.060$

d: 中心値 $\alpha = 0.07$, 範囲 $0.060 < \alpha$

0.75程度と考えられる。本研究では n と α の組み合わせとして測定値から n を推定する事を試みているが、ステップ②(表一8)で求めた平均値 $n = 0.65$ は n の一般的範囲とされる $0.5 \sim 1.0$ の範囲に収まっている。一方、前ステップでは $\alpha < 0$ のケースが残っている。これらの結果を考慮しステップ③では、全測線について平均値 $n = 0.65$ を適用し α を再計算する。計算結果を表一10に示す。

ステップ③の計算結果は、表一10に示すように最後まで問題として残っていた測線 No. 3 も $\alpha > 0$ となった。従って、全ての測線において n と α は振動伝搬基礎理論の一般知識に適合するものとなった。即ち、 $n = 0.65$ と設定すると、 α の範囲は $0.0003 \sim 0.0845$ となった。地形・地質及び距離減衰の傾向等を考慮すると、 α は 0.01 (測線 No. 3, 4), 0.03 (測線 No. 7, 9, 12), 0.05 (測線 No. 1, 6) 及び 0.07 (測線 No. 2, 5, 10, 13) のグループに大別出来る。ステップ②では、 α は $0.01/0.04/0.07$ のグループであったが、ステップ③では、このうち 0.04 が 0.03 と 0.05 に分かれたものと考えられる。

次に、測定値の距離減衰傾向と α (中心値) の関係を整理すると次のようになる。

図一1(a): $\alpha = 0.01$ (1測線)

図一1(b): $\alpha = 0.01$ (1測線), 0.03 (3測線), 0.07 (1測線)

図一1(c): $\alpha = 0.07$ (1測線)

図一1(d): $\alpha = 0.05$ (2測線), 0.07 (2測線)

$\alpha = 0.03$ は全測線の距離減衰傾向が図一1(b)の指数

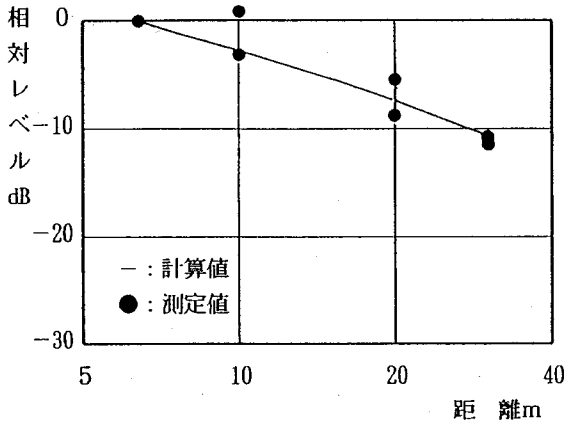


図-3 距離減衰図： $\alpha=0.01$

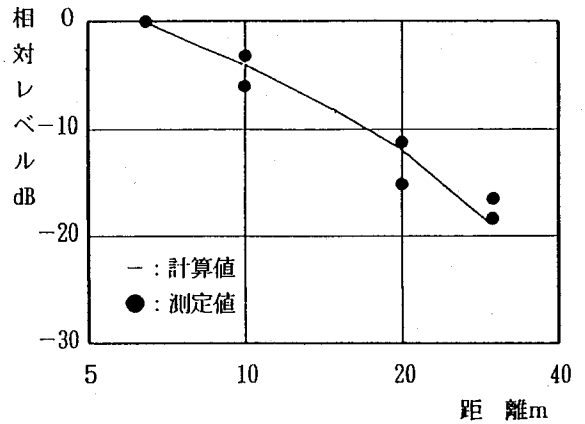


図-5 距離減衰図： $\alpha=0.05$

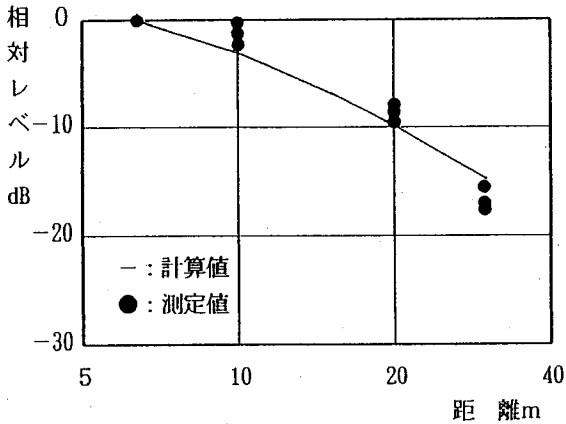


図-4 距離減衰図： $\alpha=0.03$

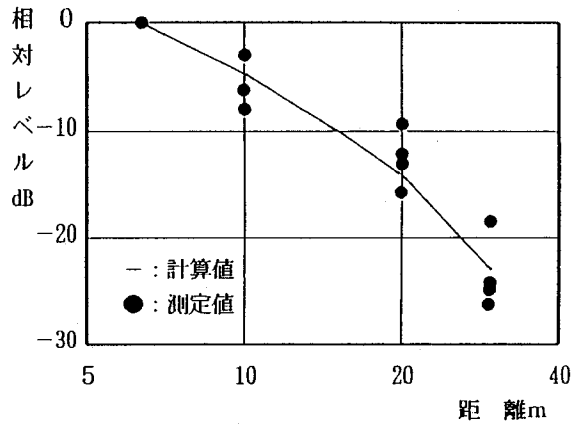


図-6 距離減衰図： $\alpha=0.07$

関数的減衰であり、 $\alpha=0.05$ は全測線の距離減衰傾向が図-1 (d)の形式である。一方、 $\alpha=0.01$ の距離減衰傾向は図-1 (a), (b), $\alpha=0.07$ では図-1 (b), (c), (d)の形式に分散している。従って、この程度のデータ数では、 α と距離減衰傾向形式の一般的傾向を把握することは困難である。

ステップ④： n と α の決定

前ステップまでの計算結果より、幾何減衰定数は $n=0.65$ と決定する。内部減衰定数は $\alpha=0.01/0.03/0.05$ と 0.07 の4ケースと決定する。これら4ケースの計算値と測定値を図-3～図-6に示す。

6. 考 察

(1) 計算値と実測値の比較

図-3～図-6に示した $\alpha=0.01\sim0.07$ における距離減衰の傾向を分析する。即ち、計算値と測定値の差について考察する。その為、計算値と測定値の差の絶対値を ΔL とし、表-11に示す。

内部減衰定数 α の値毎に考察する。 $\alpha=0.01\sim0.05$ では $\Delta L=0.9\sim3.4$ dBの範囲であり、 $\alpha=0.01$ の10m地点を除けば、 $\Delta L<3$ dBである。従って $n=0.65$ と $\alpha=0.01\sim0.05$ によって計算された距離減衰の傾向は良好である。一方、 $\alpha=0.07$ では $\Delta L=3.4\sim5.1$ dBであり $\alpha=0.01\sim0.05$ の場合と比較すると「ばらつき」が大きい。

次に距離別に考察する。10m地点全体では $\Delta L=2.0\sim3.4$ dBであるが、 $\alpha=0.01$ 及び $\alpha=0.07$ のケース($\Delta L=3.4$ dB)を除くと、 $\Delta L=2.0\sim2.7$ dBであり、計算値と測定値はかなり良く一致している。20m地点全体では $\Delta L=1.9\sim5.1$ dBであるが、 $\alpha=0.07$ のケース($\Delta L=5.1$ dB)を除くと、 $\Delta L=1.9\sim2.7$ dBであり、計算値と測定値はかなり良く一致している。30m地点全体では $\Delta L=0.9\sim4.4$ dBであるが、 $\alpha=0.07$ のケース($\Delta L=4.4$ dB)を除くと、 $\Delta L=0.9\sim2.6$ dBであり、計算値と測定値はかなり良く一致している。

(2) 地質と内部減衰定数(α)の関係

各種文献によれば、この地域の一般的地質は上層から

表-11 計算値と測定値の差 (相対レベル) 単位: dB

	種別	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.03$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.07$
10m	計算値①	-2.7	-3.3	-4.0	-4.6
	測定値②	+0.7	-0.6	-6.0	-8.0
	ΔL	3.4	2.7	2.0	3.4
15m	計算値①	-5.5	-6.9	-8.4	-9.9
	測定値②	—	—	—	—
	ΔL	—	—	—	—
20m	計算値①	-7.5	-9.9	-12.2	-14.5
	測定値②	-5.4	-8.0	-14.9	-9.4
	ΔL	2.1	1.9	2.7	5.1
30m	計算値①	-10.7	-14.8	-18.8	-22.9
	測定値②	-11.6	-17.4	-16.6	-18.5
	ΔL	0.9	2.6	2.2	4.4

(注) $n=0.65$

計算値①: 6.5m地点を±0dBとした相対レベル

測定値②: 計算値と離れが最大の測定値を示す

$\Delta L = (①-②)$ の絶対値

泥流・砂礫層・基盤で構成されている。利根川の両岸に着目すれば、上層から泥炭層・泥流堆積物・砂礫層となっている。ここに、泥炭層とは泥炭層を伴う火山灰質シルト層でありシルト層の厚さは3~5mである。泥流堆積物は安山岩質角礫と細粒基質からなり、かなり固結しており層厚は10~17mである。砂礫層は所々に火山砕屑物やシルト層をはさんでおり層厚は100m以上と推定されている^{7),8),9)}。

鉄道構造物設計の為にボーリング調査によれば、全体としては、2m程度の表土の下に硬い砂れき又は泥流堆積物のある地域である。なお、現地踏査の結果では利根川の両岸に岩盤が露頭しており場所によっては、かなり浅い所に岩盤が存在すると推測出来る。

上記の文献調査及びボーリング調査結果を測線毎に整理すると、この地域の地質は下記のとおりである。測線No.1~2区間は、ボーリングデータはないが測線No.5~7区間と同様、地表から0~2mは表土とシルト、2m~18mは泥流堆積物、18m以深は $N \geq 50$ の砂礫と推定する。測線No.3及び4付近は、ボーリングデータはないが、浅いところに岩盤が存在すると推定する。測線No.5~7区間はボーリングデータより、地表から0~2mは表土とシルト、2m~18mは泥流堆積物、18m以深は $N \geq 50$ の砂礫である。測線No.9~12区間はボーリングデータより、地表から0~2mは表土とシルト、2m以深は $N \geq 50$ の砂礫である。測線No.13はボーリングデータはないが、測線No.9~12区間と同一と推定する。どの区間についても地質の変化は激しいものと考えられる。

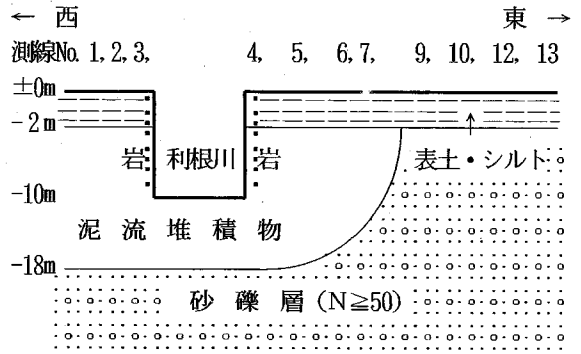


図-7 地質縦断面図 (模式図)

表-12 中央線武蔵境~東小金井間の周波数特性

	卓越周波数	レベル
加速度レベル	31.5Hz	67 dB
振動レベル	8	57
	20	57

(注) 10m地点

参考文献 10)より作成

表-13 山陰線丹波口~二条間の周波数特性

	卓越周波数	振動速度レベル
急行列車	25Hz	67 dB
各駅停車列車	40	61

(注) 6m地点

参考文献 11)より作成

次に、鉄道振動の周波数特性について検討する。今回の研究に用いた鉄道振動測定結果では、周波数分析が行われていないので、類似資料として中央線武蔵境~東小金井間及び、山陰線丹波口~二条間の測定結果を参考に検討し、列車走行時の周波数特性を推定する。

鉄道振動の周波数特性は一般的に20~50 Hzの範囲が卓越周波数であるが、ここでは表-12と表-13より、通勤電車の一般的卓越周波数は31.5 Hzと推定出来る。前述の推定に基づき本調査地域における卓越周波数は31.5 Hzと仮定する。

これらの地質状況及び、地質と内部減衰定数 α との関係式(前出、式(1))を用いて検討する。

$$\text{内部減衰定数 } \alpha = 2\pi hf / V_s$$

ここに、 h : 減衰比=0.02~0.04 (交通振動)

f : 振動の周波数=31.5 Hz

V_s : 伝搬速度 粘土・シルト 100~300 m/s

砂・砂礫 150~350 m/s

風化岩・土丹 350~500 m/s

岩盤 400~800 m/s

これらの $h \cdot f \cdot V$ を α の式に代入すると、各組合わせに

表-14 内部減衰定数の計算

土質	内部減衰定数 α		
	最小値	最大値	平均値
粘土・シルト	0.013	0.079	0.05
砂・砂礫	0.011	0.053	0.03
風化岩・土丹	0.008	0.023	0.02
岩盤	0.005	0.020	0.01

表-15 地質と α の関係

測線	α の計算値と地質		既存資料から推定	備考
	α	α から推定		
1	0.05	粘土・シルト	泥流堆積物	
2	0.07	緩い粘土・シルト	泥流堆積物	
3	0.01	岩盤	泥流堆積物	利根川
4	0.01	岩盤	泥流堆積物	利根川
5	0.07	緩い粘土・シルト	泥流堆積物	
6	0.05	粘土・シルト	泥流堆積物	
7	0.03	砂・砂礫	泥流堆積物	
9	0.03	砂・砂礫	砂礫層	
10	0.07	緩い粘土・シルト	砂礫層	
12	0.03	砂・砂礫	砂礫層	
13	0.07	緩い粘土・シルト	砂礫層	

(注) 地質：表土（薄いシルト層含む）より下層
 泥流堆積物：岩塊・礫・砂礫・シルト等
 利根川：利根川に近い場所

より数種類の解が求まる。これらのうち、最大値・最小値と平均値を表-14 に示す。

表-10 の総合判定欄 α と表-14 の関係のみで当該地点の地質を評価することは困難である。従って、表-14 の計算結果を目安とし、地質と α の関係を表-15 に整理し地質概要を把握する。表-15 より、測線 No.1~7 区間の泥流堆積物では $\alpha=0.01\sim 0.07$ 、測線 No.9~13 区間の砂礫層では $\alpha=0.03\sim 0.07$ の範囲である。なお、測線 No.1~7 区間は、利根川両岸に近く岩盤の存在が推定出来る測線 No.3~4 を除くと、 $\alpha=0.03\sim 0.07$ の範囲である。従って、全区間において砂礫・砂・シルト・粘土が混在した地域であるが、場所によっては、いずれかの地質が卓越している場合あるいは、局所的に岩盤が存在していることがある。

次に、0.02 間隔に整理した α 計算値別に、地質との関係を考察する。

① $\alpha=0.01$ ：岩盤

該当する振動測定値は測線 No.3 と 4 のものであり、利根川の両岸近くに位置する。現地踏査の結果では、測線より更に河川に近い場所において岩が露頭しており、この地点でも岩盤の存在は理解出来る。

② $\alpha=0.03$ ：砂・砂礫

該当する測定値は測線 No.7, 9, 12 である。測線 No.7 は泥流堆積物であるが、砂礫成分の多い地質と考えれば、 α と地質の関係は説明できる。

測線 No.9 と 12 はボーリング調査によれば、2 m 程度の表土の下に硬い砂礫のある地域である。

③ $\alpha=0.05$ ：粘土・シルト

該当する測定値は測線 No.1 と 6 のものである。測線 No.1 は小河川の近くにあり粘土・シルト系の地質である。また、測線 No.6 は参考文献によれば火山灰質砂・シルトと考えられる。

④ $\alpha=0.07$ ：緩い粘土・シルト

該当する測定値は測線 No.2, 5, 10, 13 である。測線 No.2 と 5 は泥流堆積物であるが、当該地域では、この上に泥炭層を伴う火山灰質シルト層が重なっている場合がある。従って、緩い粘土・シルトと区分することは適当である。

測線 No.10 と 13 は砂礫層である。周辺の測線にはシルト層が多いこと及び、 α が大きいことから上層部にシルト系地層があるものと推定する。

⑤ 前項①~④から分かるように、かなり地質変化の激しい地域である。

(3) 幾何減衰定数 (n)

表-1 に示す測定値(群馬県)は、振動源から 30 m 以内における表面波と実体波が合成された波動である。表面波と実体波の合成波における n は、最小値では表面波の 0.5、最大値では実体波(自由表面)の 2.0 となる。しかし、表面波のエネルギー構成比は 2/3 程度なので、合成波における n は 0.5 に近付くものと考えられる。また、表-1 付 1 に示すステップ①における他の地域と群馬県の計算結果によれば、 $0.04 \leq n \leq 1.05$ の範囲であり、平均値は $n=0.51$ である。

これらの n に関する検討を考慮すれば、図-2 における範囲設定の $0.5 \leq n \leq 1.0$ 、それに基づく計算結果である $n=0.65$ は、この地形・地盤条件における n として妥当である。

なお、表-1 付 2 に示すように、他の地域における計算結果は、 $n=0.50\sim 0.85$ である。従って、図-2 に基づいて n と α を計算する場合には、ステップ②以降の n が適切に設定されているかどうか、地形と地盤条件を加味した検討を行いながら計算が進める必要がある。

7. 結 論

本研究では振動レベルの測定値から幾何減衰定数 n 及び、内部減衰定数 α を繰返し計算によって求める方法を提案した。次に、ケース・スタディとして群馬県内の

表一付1 幾何減衰定数 (n) : ステップ①

地域	測線数	n(ステップ①)	備考
東京都	2/2	0.45~0.52	
群馬県	3/11	0.59~0.79	表-7 参照
長野県	2/3	0.04~0.42	
香川県	2/3	0.52~0.63	
香川県	2/3	0.22~1.05	
長崎県	1/3	0.21	

(注) 測線数: n, α共に正の測線数/全測線数
測定範囲: 約50m

表一付2 幾何減衰定数 n と内部減衰定数 α

地域	測線数	n	α(中心値)
東京都	2	0.50	0.03
長野県	3	0.65	0.03~0.09
香川県	3	0.70	0.01~0.03
香川県	3	0.85	0.01~0.03
長崎県	3	0.85	0.05

台地上にある鉄道振動の測定値を使用して n 及び α を算出した。最後に、この方法により求めた内部減衰定数 α について、該当地域の地質と関連付けて分析し、その妥当性を検証した。本研究で得られた結論をまとめると減衰定数 n 及び α は下記の数値が適当である。

- ① 幾何減衰定数: $n=0.65$
- ② 内部減衰定数: $\alpha=0.01$ ……岩盤
 $\alpha=0.03$ ……砂・砂礫
 $\alpha=0.05$ ……粘土・シルト
 $\alpha=0.07$ ……緩い粘土・シルト

③ 解析条件

地形・地質: 台地上の泥流堆積物または砂礫層
対象列車: 中距離電車

解析範囲: 本文の振動データは線路中心から 30 m まで、付録-2, 3 は約 50 m

ただし、これらの距離減衰定数はケース・スタディの振動レベル測定値から求めた特定の地域における定数である事に注意を要する。即ち、幾何減衰定数 n については土質にかかわらず狭い範囲に収まるものと推定出来る。それに反し、内部減衰定数 α については、今後広い地域の各種土質に関する測定データを収集・解析し、一般的な「定数と土質の関係」を求める必要がある。

付録-1 幾何減衰定数 (n) の制限範囲-1

式(2)の幾何減衰項 $[20n \log(R/R_0)]$ のみに着目した場合の減衰傾向を考察する。振動基礎理論に基づき表面波では $n=0.5$, 無限弾性体の実体波では $n=1.0$, 半無限自由表面の実体波では $n=2.0$ なので、減衰傾向は下記

のように計算出来る。

表面波: $n=0.5$

$$-10 \log(R/R_0) \rightarrow -3 \text{ dB/倍距離}$$

実体波 (無限弾性体): $n=1.0$

$$-20 \log(R/R_0) \rightarrow -6 \text{ dB/倍距離}$$

実体波 (半無限自由表面): $n=2.0$

$$-40 \log(R/R_0) \rightarrow -12 \text{ dB/倍距離}$$

表-3 に示した測定値の減衰傾向は -7 dB/倍距離であり、今回の測定値を幾何減衰のみとすれば $n > 1.0$ である。しかし、実際の減衰は幾何減衰と内部減衰が合成されたものであり、α による減衰相当量だけ n は小さい数値になる。また、測定値には「ばらつき」があるので、これらの要因を考慮して、 $n \leq 1.0$ と設定する。

付録-2 幾何減衰定数 (n) の制限範囲-2

他の地域 (地質条件不明) における既存の振動レベル測定値から n を計算する。 $0.5 \leq n \leq 1.0$ の制限により調整を行う以前の計算結果での検討が必要と考え、ステップ①において n と α が共に正となった測線の計算結果を表一付1に示す。

上表の結果は $0.04 \leq n \leq 1.05$ 及び平均値 $n=0.51$ である。しかし、本論文で扱う鉄道振動は近距離の地盤振動であり、表面波と実体波が混合した波動と考えられる。従って、過去の経験より公害振動では $n=0.5 \sim 1.0$ が多いこと等を総合的に判断し、 $0.5 \leq n \leq 1.0$ と設定する。

付録-3 他の地域における n と α の計算結果

本研究の一般性を検証するため、表一付1と同一の振動レベル測定値を用いて n と α を計算する。計算方法は図-2のとおりである。

他の地域における計算結果は、表一付2に示すとおり $n=0.50 \sim 0.85$, $\alpha=0.01 \sim 0.09$ である。次に、本文の計算結果である $n=0.65$, $\alpha=0.01 \sim 0.07$ と比較検討する。本文の n 及び α は、他の地域における n 及び α の範囲内に収まっている。

両者を一体的に整理すると $n=0.50 \sim 0.85$, $\alpha=0.01 \sim 0.09$ である。今後、多数のデータを解析し、n と α を地質と関連付けて整理する必要があるが、概ね今回計算した範囲に収まるものと考えられる。

参考文献

- 1) 小林芳正: 建設における地盤振動の影響と防止, 鹿島出版会, pp.69-73, 1975年4月.
- 2) F.E. リチャート, J.R. ホール, R.D. ウッズ: 土と基礎の振動/地盤振動の基本的知識, 岩崎敏男・嶋津晃臣共訳, 鹿島出版会, pp.94-96, pp.264-267. 1975年9月.
- 3) 時田保夫: 振動防止技術, 日本音響学会編/音響工学講座 ⑤/騒音・振動(下), pp.180-187, コロナ社, 1982年1月.
- 4) 塩田正純: 地盤振動の伝搬経路における対策, 騒音制御,

- 第2巻2号, pp.20-28, 1978年4月.
- 5) 北川原徹, 原誠, 樋野親俊: 杭打ち機械の振動対策, 土と基礎, 第27巻8号, pp.33-40, 1979年8月.
 - 6) 北川原徹, 原誠, 樋野親俊: 低振動形杭打機の開発, 騒音制御 第4巻1号, pp.35-40, 1980年2月.
 - 7) 野村哲: 日曜の地学—5/群馬の地質をめぐって (改訂版), pp.15-22, 築地書館, 1984年1月.
 - 8) 磯崎義正: 関東地方の地下水, 地下水と井戸とポンプ, 25巻10号, pp.8-15, 1983年10月.
 - 9) 大森昌衛, 端山好和, 堀口万吉: 日本の地質3・関東地方, pp.180, 共立出版, 1986年10月.
 - 10) 上原幸雄, 青木一郎: 在来鉄道振動の高架構造における伝搬特性について, 東京都環境科学研究所年報 1988, pp.147-152, 1988年.
 - 11) 有坂松樹, 上田隆一: 鉄道高架化と騒音振動について, 土木技術, 33巻5号, pp.61-72, 1978年5月.
 - 12) 成瀬治典: 鉄道車両による環境振動の実測と予測, 日本音響学会騒音研究会資料, 資料番号 N 86-08-4, pp.1-8, 1986年8月.
 - 13) 藤掛敏夫: 鉄道振動の予測—道床への入力について, 神奈川県公害研究機関協議会第11回公害研究合同発表会講演要旨集, pp.13-15, 1987年6月.
 - 14) 青木一郎: 在来線鉄道振動の測定結果について—鉄道振動の予測と影響に関する研究—第2報—, 東京都環境科学研究所年報 1987, pp.173-179, 1987年.

(1995.6.14 受付)

RESEARCH REGARDING THE CALCULATION OF DAMPING CONSTANTS IN AN EQUATION TO FORECAST RAILWAY VIBRATION

Mitsuo YANAGISAWA

The aim of this paper is to make clear a method of determining the geometric damping constant (η) and the internal damping constant (α) incorporated in an equation to forecast railway vibration on surface lines, based on a definition of the theory of vibration transmission. An analysis is made of the damping tendency of the measured data pertaining to the vibration levels to be used in the analysis, followed by the selection of vibration level datum points. It is suggested that on the basis of the results of this, the damping constants be obtained by calculating backwards by the reiterative method, using the measured data. The paper also sets a relationship between the damping constants and geological features.