

道路交通振動の発生レベル予測手法の開発について

建設省土木研究所 正員 桂樹正隆
 同上 同上 成田信之
 同上 同上 谷口栄一

1. まえがき

道路交通振動は自動車排出ガスによる大気汚染、自動車交通騒音とともに道路公害として行政面からも早期の解決を迫られている重要な今日的課題である。昭和51年の「振動規制法」の法制化および「振動レベル計」のJIS規格化は、振動公害規制の根拠を与えたものであり、道路交通振動についてはその測定器、測定方法、測定単位、限度値が統一されたと同時に、道路交通振動の大きさを限度値を越え、生活環境が著しく損われている場合には、道路管理者に対して必要な措置を講ずることが要求されることとなった。このため道路管理者にとりては、道路建設等の事業の実施に伴う環境影響評価を推進する必要性が従来以上に強くなり、合理的な予測手法および有効適切な対策工法の確立が重要な課題となっている。

このような情勢を踏まえて、土木研究所ではこれらの問題の解決のために種々の調査研究を実施してきたところであるが、本報告はこれらの中から対象道路を平面道路に限った場合の道路周辺での道路交通振動の発生レベル予測手法の開発についてその成果をとりまとめたものである。

内容は大きく2つに分けて記述した。第2章では道路近傍での発生レベルの予測について、また第3章では距離減衰の問題をとりまとめた。なお、執筆は第2章を第1、第3章を第2筆者がそれぞれ担当した。

2. 平面道路近傍での発生レベルの予測手法

2.1 基本的な考え方

道路交通振動の評価値は、時刻とともに変化する振動レベル(VL)を5秒間隔で読みとった100個の瞬時値の80%レンジの上端値(L10, dB)で表わすことが原則とされている¹⁾。即ち、500秒を評価時間とした時のVLの統計処理値として評価値が定義されている。したがって、交通振動レベルの合理的な予測手法の確立に当りては、単一車の走行に伴って発生する振動レベルの大きさを正確に把握するとともに、評価時間内に通過する交通量およびその車種構成、走行速度等を考慮する必要がある。ここに報告する平面道路近傍での発生レベルの予測手法は、図-1に示すフローにより導かれたものであり、ある特定地点で観測された単一車走行時発生振動レベルと、想定された交通条件を満足するようにシミュレートされた交通流とを組み合わせた結果を定式化した予測基本値(L10*)に、予測対象道路が異なる

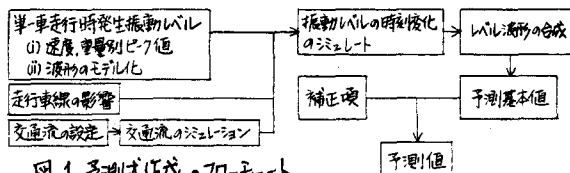


図-1 予測式作成のフローチャート

表-1 単一車走行時発生振動レベル

単位: dB

車種 重量 (ton)	乗車 用車 類	小型車類		大 型 車 類							
		0 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 6	6 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~
0 ~ 10	30.0	30.0	30.0	31.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
10 ~ 20	30.0	34.0	39.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0
20 ~ 30	31.6	40.5	46.7	48.8	49.4	49.3	49.3	49.3	49.3	49.3	49.3
30 ~ 40	35.3	44.6	51.1	53.6	55.0	55.9	56.7	57.1	57.1	57.1	57.1
40 ~ 50	38.2	47.5	54.0	56.3	57.4	58.2	59.2	59.8	60.2	60.7	60.7
50 ~ 60	40.4	49.4	55.7	58.1	59.3	60.1	61.5	62.3	63.0	64.0	64.0
60 ~ 70	41.3	50.5	56.9	59.0	60.1	61.4	62.5	64.0	65.5	66.0	66.0
70 ~ 80	42.0	51.0	57.0	59.0	60.5	61.5	63.5	66.0	66.0	66.0	66.0
80 ~ 90	42.5	52.0	57.5	59.5	61.0	62.5	64.5	66.0	66.0	66.0	66.0
90 ~	43.0	52.0	57.5	60.0	61.0	62.5	65.0	66.0	66.0	66.0	66.0

する交通量およびその車種構成、走行速度等を考慮する必要がある。ここに報告する平面道路近傍での発生レベルの予測手法は、図-1に示すフローにより導かれたものであり、ある特定地点で観測された単一車走行時発生振動レベルと、想定された交通条件を満足するようにシミュレートされた交通流とを組み合わせた結果を定式化した予測基本値(L10*)に、予測対象道路が異なる

ることによる路面平坦性、地盤条件の影響を定量化した補正項を加えたものとして予測式にまとめたものである。即ち、単一車走行時の発生レベルは特定地点での実測値に補正項を加えることで表現し、評価時間内での交通流の影響はシミュレーションによって考慮した。

2.2 予測基本値 (L_{10}^*)

(a) 単一車走行時発生振動レベル

予測基本値を求める基礎資料としての単一車走行時発生振動レベルピーク値は、16号線袖ヶ浦地区（平面道路）で実施した調査結果²⁾を用いることとした。この調査では、単独走行車両を対象

に走行速度と埋設型車両重量計により車両重量を測定し、一方その車両の通過に伴い発生する鉛直方向地盤振動を対象車線中央から道路軸方向向に3.4m離れた地点で測定した。実測値の整理に当っては重量、車速別の平均発生振動レベルを求めたが、その結果を表-1に示す。また、振動レベルの暗振動レベルからこのピーク値へ立ち上がり及びピーク値から暗振動レベルへ下降の形状は、同地点での観測結果から図-2のようにモデル化した。

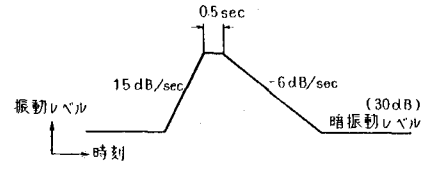


図-2 基本波形のモデル化

表-2 走行車線の影響

走行車線	1	2	3	4	5	6	7	8
第1車線走行時に対するレベル差 (dB)	0	3	6	8	10	11	12	12

(b) 走行車線の影響

(a)で述べた振動レベルのピーク値は最接近側車線を車両が通過した時の値であるので、この車線以遠の車線を通過した場合には、走行位置に応じて表-1の値を低減させる必要がある。この低減量を表-2に示すが、これらの値は全て車線については実測値であり、その他については推定値である³⁾。

(c) 交通流の設定

予測基本値 (L_{10}^*) の算出式を求めるためには、考え得るすべての交通流の状態を設定した上で L_{10}^* のシミュレーション計算を行い、その結果を定式化する必要がある。そこで今回の作業では、交通量は1車線500秒間当たり30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350台の9ケース、車両混入率は大型車が10, 20, 30, 40, 50%の5ケース、走行速度は35, 45, 55, 65 km/hの4ケース、また対象道路の車線数は2, 4, 6, 8車線の4ケース、合計 $9 \times 5 \times 4 \times 4 = 720$ ケースの交通状態を設定した。

(d) 交通流のシミュレーション

このようにして設定された交通状態に対し、モンテカルロ法を用いて交通流シミュレーションを行い、各車線別に車両の対象地点通過時刻及び車種を割り当てる。この時、車両の到着時間間隔は指数分布に従うものとし、また車種については設定された混入率を満足するようなランダム割り当てとした。

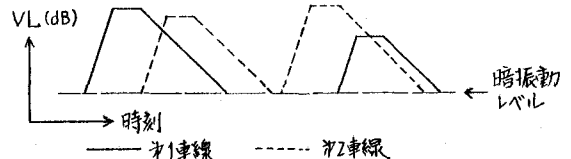


図-3 振動レベルの時刻変化のシミュレート

(e) 振動レベルの時刻変化のシミュレート

(a)~(d)で述べた結果をすべて統合すると、図-3に示す模式図のよう振動レベルの時刻変化の様子をシミュレートすることができる。車両の到着時間間隔が短い場合にはモデル化した波形が重なること

となるが、この部分の合成法は図-4に示すデシベルの和算式として既知のものを用いた。このようにして合成された1本の振動レベル波形に対して L_{10} の読みとりを行った。

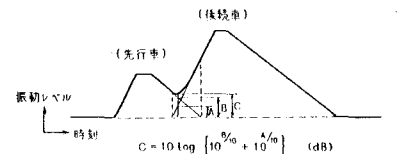


図-4 波形の合成

(f) 予測基本値の定式化

720 ケースの算定結果を定式化するために、次式で定義される等価交通量と L_{10} の関係も、車線数、走行速度別にプロットした。

$$Q_A^* = Q_1 + 2Q_2 + 12Q_3 \quad \text{--- (1)}$$

Q_A^* : 3車種分類等価交通量 (台/500秒/車線)

Q_1, Q_2, Q_3 : それぞれ乗用車種, 小型貨物車種, 大型車種の台数 (台/500秒/車線)

(1)式中の2, 12の係数の決定過程は文献(4)にゆずり, 結果の一部を図-5に示す。これより交通量を等価交通量として評価した場合, L_{10} との相関が非常に強いことが理解されよう。しかし実際の定式化に当っては, 使い易さを考慮して(2)式で定義される2車種分類等価交通量を用い, (3)式の予測基本式に含まれる定数 a, b を最小二乗法により求めた。

$$Q^* = Q_1 + 12Q_2 \quad \text{--- (2)}$$

Q^* : 2車種分類等価交通量 (台/500秒/車線)

Q_1, Q_2 : それぞれ小型車種, 大型車種の台数 (台/500秒/車線)

$$L_{10} = a \cdot \log(\log Q^*) + b \quad \text{--- (3)}$$

a, b : 車線数, 走行速度により定まる定数

この結果を表-3に示す。

2.3 補正項

(a) 路面平坦性による補正項(α_G)

路面平坦性が交通振動レベルに及ぼす影響が非常に大きいことはよく知られている。この影響を定量的に把握するために, 全国の国道13ヶ所において, 路面補修工事前後に路面平坦性と振動レベル(L_{10})の実際測定を実施した。図-6は各地点において24回測定された L_{10} の平均値と路面平坦性(標準偏差 σ : mm)との関係を図化したものであり, これより両者の関係は約4dB/mmであることが読みとれる。一方, 表-1の結果を得た地点の路面平坦性は $\sigma = 2.2$ であるので, α_G は次式で表現される。

$$\alpha_G = 4 \cdot (\sigma - 2.2) \quad \text{--- (4)}$$

σ : 路面平坦性標準偏差 (mm)

(b) 地盤条件による補正項(α_f)

振動レベル(VL)は測定された地盤振動加速度に, 図-7にその特性を示す鉛直振動感覚補正フィルターによる振動周波数の重み付けを行った判定単位であるので, 振動周波数も振動レベル(L_{10})を決定する重要な要因の一つである。したがって, 今回の予測式の作成に当っては地盤条件を振動周波数(f)で表わすこととした。一方, 表-1の結果を得た地点の f は15Hzであるので, α_f は図-7に示すように $f = 15\text{Hz}$ の時に $\alpha_f = 0$

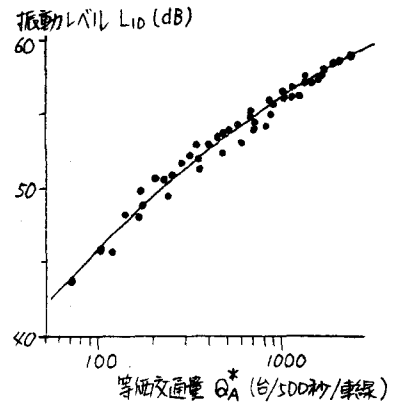


図-5 シェルソンの結果(8車線, 35km/h)

表-3 定数 a, b (2車種分類)

車線数 速度 (km/h)	2		4		6		8	
	a	b	a	b	a	b	a	b
3.5	65.8	24.3	58.3	28.2	56.9	29.1	57.0	29.2
4.5	65.7	27.1	58.4	31.0	56.8	31.9	56.8	32.0
5.5	67.9	28.4	59.2	32.7	57.4	33.7	57.1	34.0
6.5	70.0	28.8	62.4	33.0	60.1	34.2	59.7	34.5

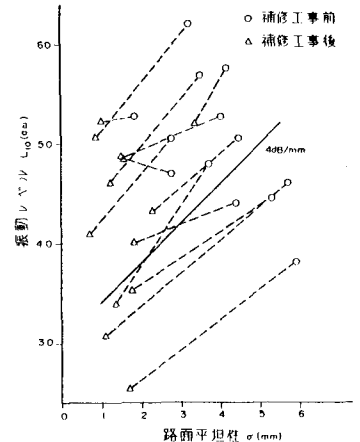


図-6 路面補修工事前後の振動レベル

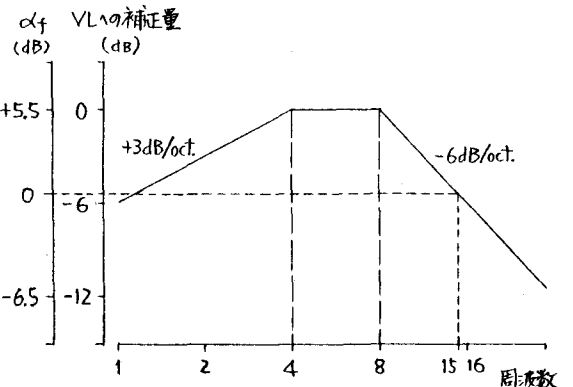


図-7 鉛直振動感覚補正特性

(dB) となるように鉛直振動感覚補正特性を平行移動させたものを用いた。これを式で表現すると次式となる。

$$\alpha_f = \begin{cases} -10 \cdot (\log 4/f) + 5.5 & (f < 4) \\ +5.5 & (4 \leq f < 8) \quad \text{--- (5)} \\ -20 \cdot (\log f/8) + 5.5 & (8 \leq f) \end{cases}$$

f : 地盤振動の周波数 (Hz)

2.4 平面道路近傍での発生レベルの予測式

前節までの結果から以下の予測式を提案する。

$$\hat{L}_{10} = a \cdot \log(\log Q^*) + b + \alpha_s + \alpha_f \quad \text{--- (6)}$$

$\hat{L}_{10}$: 最外側車線中央から 3.4 m 地点に

おける L_{10} の予測値 (dB)

a, b : 定数 (表-3)

Q^* : 2 車種分類等価交通量 (12) 式)

α_s : 路面平均性による補正項 (14) 式)

α_f : 地盤条件による補正項 (15) 式)

2.5 予測式の精度検証

本予測式の精度を検証するため、平面道路 35 箇所において L_{10} の実測調査を行い、この結果と (6) 式より算出される予測値とを比較した。実測調査では最外側車線中央から 5 m 地点で測定がなされたため、(6) 式の対象地点と 1.6 m の差があるが、これに対しては (6) 式による算出結果に一律 -1.1 dB の距離減衰 (-2 dB/倍距離に相当) を加えることにより 5 m 地点での予測値とした。また、各地点では 18 回の測定が実施されたが、その各々の測定に対する誤差 (予測値 - 実測値) 18 個の平均値を当該地点の予測誤差 (ε) と定義した。図-8 は ε の頻度分布を示すものであり、これより (i) 本予測式が安全側であること、(ii) ± 4 dB の誤差範囲に 23 地点 (全体の約 65%) が入ること、が理解される。

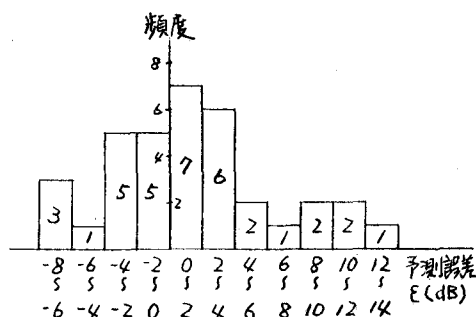


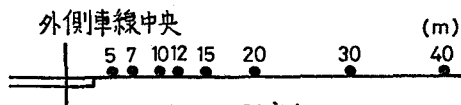
図-8 予測誤差の頻度分布

3. 距離減衰の予測手法

道路交通振動の防除対策の1つとして、環境施設帯 (道路と民地の間の宅間) を設置することが考えられる。筆者らは振動公害を防止するためには道路と民家との間にどのくらいの距離があればよいかわかるために、地盤振動の距離減衰の研究を行ってきた⁵⁾⁶⁾。ここでは昭和52,53年に建設省が実施した道路交通振動調査の結果について報告し、道路交通振動の距離減衰予測表を提案する。

3.1 調査方法

全国の国道 60 地点 (昭和52年度は29地点、53年度は31地点) において実交通による振動レベル (L_{10}) の距離減衰を測定した。調査地点はすべて平面道路であり、1地点を除く他の調査地点は2車線道路である。地盤振動測定には公害用振動計を用い、図-9に示すように道路両方向に外側車線中央から 40 m までの8点で鉛直方向振動を測定した。また、20 m 地点において深さ



● 振動測定点
図-9 地盤振動測定位置

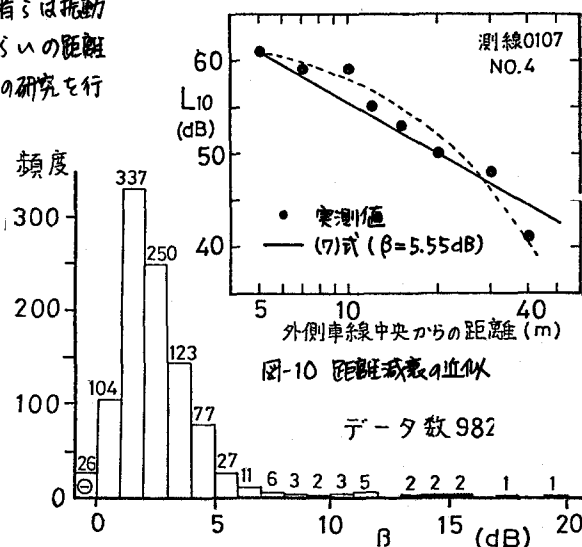


図-10 距離減衰の近似

データ数 982
図-11 倍距離に対する減衰量 β の分布

10mまでボーリングを実施し、標準貫入試験を行った。

3.2 距離減衰の表現方法

振動の距離減衰を表現する方法には種々あるが、ここでは式(7)を用いた。

$$VL = VL_1 - \beta \cdot (\log r / r_1) / \log 2 \quad \text{--- (7)}$$

VL : 距離 r の地点の振動レベル (L_{10})

VL_1 : 基準点 (振源より $r_1 = 5m$ の地点) の振動レベル (L_{10})

β : 倍距離に対する振動レベルの減少量 (dB)

図-10は(7)式による実測値の近似を表わしている。図-11は全データについての倍距離に対する減衰量 β の分布を示しており、1~3dBの範囲に全体の約60%が集中している。

3.3 距離減衰予測式の作成

表-4は砂地盤、粘性土地盤について基準点 (外側岸線中央より5m地点) の振動レベル、地盤振動数と β の関係を示している。基準点の振動レベルが大きくなると β は大きくなる傾向が見られるが、地盤振動数と β の間にはあまり良い相関が見られない。基準点の振動レベルが大きい程 β が大きくなる原因としては、土の減衰比は歪が大きくなる程大きくなることとが挙げられる。図-12は共振法により求めた粘性土の減衰比の判定例⁷⁾であり、交通振動で問題となるような微小歪領域においても拘束圧が低い(表面波が伝播する領域では拘束圧は極めて低い)場合には土の減衰比はおよそせん断弾性係数 G が歪依存性を持っていることを示している。一方、一般的に振動数が高くなると振動の距離減衰が大きくなることも理論的にも実験的にも確かめられている⁸⁾が、上述のように実際の交通振動ではそのような傾向が顕著には現れていない。その理由は実際の交通振動における卓越振動数はその変動範囲が狭いこと、および交通荷重による地盤振動は正弦波ではなく、種々の周波数成分を含んでいるためと考えられる。

砂地盤と粘性土地盤を比較すると、砂地盤の方が距離減衰が大きい傾向が見られる。この点については、交通振動に対応する $10^{-6} \sim 10^{-5}$ の歪レベルにおける土の減衰比の判定例は少ないが、 10^{-5} より大きい範囲においては砂の減衰比の方が粘土のそれより大きくなること

表-4(a) β の分布 (砂地盤) [] : 標準偏差 () : データ数

基準点の 振動数 (Hz)	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	55 ~ 60	60 ~ 65
10-15	0.0 [0.0] (0)	0.49 [0.53] (12)	1.02 [0.69] (7)	2.00 [1.35] (27)	3.41 [1.30] (11)	4.94 [0.36] (5)	5.69 [0.27] (4)
15-20	0.0 [0.0] (0)	3.04 [0.92] (16)	3.15 [1.84] (43)	2.18 [1.29] (59)	2.63 [0.92] (77)	3.63 [1.27] (26)	4.7 [1.53] (2)
20-25	1.72 [0.33] (5)	2.98 [1.54] (35)	4.37 [2.35] (49)	2.82 [1.79] (20)	2.78 [2.60] (41)	7.27 [3.71] (12)	13.27 [0.71] (3)
25-30	0.0 [0.0] (0)	1.70 [0.34] (9)	2.11 [0.84] (37)	1.74 [0.89] (20)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)
30-35	1.14 [0.0] (1)	1.35 [0.71] (11)	2.35 [0.42] (3)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)
35-40	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	1.78 [0.32] (17)	2.19 [0.0] (1)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)
40-45	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)
45-50	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	1.06 [0.39] (8)	1.36 [0.42] (10)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)

表-4(b) β の分布 (粘性土地盤) [] : 標準偏差 () : データ数

基準点の 振動数 (Hz)	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	55 ~ 60	60 ~ 65
5-10	0.0 [0.0] (0)	2.36 [0.0] (1)	1.93 [0.99] (13)	1.57 [1.13] (27)	2.75 [1.34] (11)	3.92 [0.50] (16)	4.21 [0.0] (1)
10-15	0.11 [0.52] (12)	1.00 [0.75] (8)	1.24 [0.63] (16)	1.61 [0.69] (50)	2.26 [1.04] (36)	4.15 [1.01] (14)	5.23 [0.03] (2)
15-20	0.0 [0.0] (0)	1.4 [0.44] (2)	1.80 [0.47] (11)	2.02 [1.14] (34)	1.50 [0.79] (33)	2.47 [0.88] (47)	3.17 [1.06] (5)
20-25	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	6.12 [0.0] (1)	3.07 [1.82] (14)	1.68 [0.68] (15)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)
25-30	3.15 [0.46] (6)	1.68 [2.00] (27)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)
30-35	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)	2.19 [0.67] (8)	2.69 [0.56] (10)	0.0 [0.0] (0)	0.0 [0.0] (0)

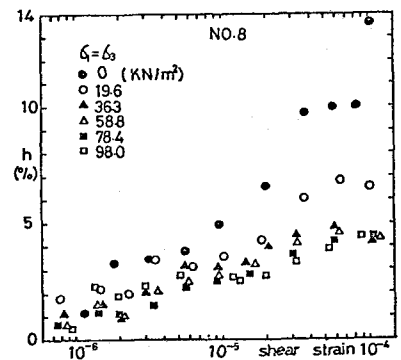


図-12 粘性土の減衰比の判定例

が実験により確認されている。

表-5に示す距離減衰予測表は、実用的な使い易さ、データ個数のバランス、理論的な結果との整合性等を考慮して表-4より作成したものである。

4. あとがき

土木研究所では道路交通振動に関する研究として、合理的な予測手法の開発および有効適切な防除工法の確立を目指した各種の調査を実施しているが、ここに報告した平面道路に対する予測式は、これまで一連の研究成果の極く一部であり、高架道路、益土道路における予測手法についても才1次第のとりまとめを既に終了している。現在では、これらの予測式の精度向上のための作業を実施している段階であり、一方、これと平行して舗装構造の改善、軟弱地盤処理、防振溝、防振壁の設置等の振動防除対策の効果の定量化についても現場実験を含めた研究を進めており、早急にこれらの成果をとりまとめる方針である。

最後に、本報告で紹介した資料には、建設省技術研究会道路部門指定課題「交通振動の対策に関する研究」の一環として収集された実験資料が数多く含まれていることを付記し、関係各位に感謝の意を表す次第である。

〔参考文献〕

- 1) 「振動規制法の施行について」, 建設省都市局長, 道路局長通達, 1977.1.25
- 2) 建設省, 「交通振動の対策に関する研究」, 才31回建設省技術研究会道路部門指定課題論文集, 1977.8, p.188~195
- 3) 建設省, 「交通振動の対策に関する研究」, 才32回建設省技術研究会道路部門指定課題論文集, 1978.11, p.80~81
- 4) 前掲3), p.90~91
- 5) 谷口, 小笠原, 「道路交通振動の伝播特性」, 土木技術資料, Vol.20, No.12, 1978
- 6) E.Taniguchi, K.Sawada, "Attenuation with Distance of Traffic-Induced Vibrations", Soils and Foundations, Vol.19, No.2, 1979
- 7) E.Taniguchi, H.Ogasawara, K.Sawada, "Effects of Shear Strain on the Dynamic Deformation Coefficients of Clays", Proc. of 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1978
- 8) 佐々木, 谷口, 吉村, 佐藤, 「地盤振動の距離減衰に関する現場実験」, 才14回土木工学研究発表会, 1979

表-5 距離減衰予測表

上段 β (dB) ():標準偏差 ():データ数

地質 \ 基準点のVL (40)	0~45	45~55	55~
粘土	1.3 (1.22) (92)	2.0 (1.33) (238)	3.1 (1.15) (85)
砂	2.5 (1.86) (515)		5.8 (4.18) (52)