

道路交通による地盤振動への不規則振動論の適用

AN APPLICATION OF THE RANDOM VIBRATION THEORY
TO GROUND VIBRATIONS DUE TO ROAD TRAFFIC

北 村 泰 寿*・水 野 正 英**

By Yasutoshi KITAMURA and Masahide MIZUNO

1. まえがき

道路交通によって沿道に発生する振動はその要因が多く、時間的にも変動するためその取り扱いは複雑となる。特に、多車線で多車種の車両がランダムに混合する場合、沿道で測定した振動値をどのように整理すれば、その地点の振動の程度を表わしていることになるか評価しにくい問題である。このような沿道の振動に対する評価方法として、従来から二、三の方法が便宜的に使用されてきている。もちろん、これらの方法はそれぞれ長所を持っており、それぞれの測定目的に応じて測定者の判断によって採用されてきた。

a) 1車両が通過するときの振動値の最大値に注目して評価する方法

試験車走行試験のように発生する振動の程度を比較する場合、あるいは1車両によって発生する振動の距離減衰を求める場合などに適する。しかし、多車線で多車種の車両が通過するときの交通流の影響は考慮できない。

b) 「交通騒音測定法に準拠した方法」、すなわち5秒間隔瞬時値の累積度数曲線によって評価する方法

たとえば、中央値はこの値より大きい振動にばく露される時間と小さい振動にばく露される時間が同じとなる振動の値を示し、90%上、下限値は振動値の変動幅を表わしている。このため、変動する振動の程度を表わす指標として利用度が多い。また、最近、振動規制法として制定が急がれている道路交通振動に対する評価はこの評価方法に属している。しかし、5秒間隔瞬時値であるため、大きい振動値が発生しているとき、瞬時値として読み取らない場合が生じる。このため、読み取り個数をいくらに取るか、あるいは読み取り時間間隔をいくらにするかによってその指標は変動しやすく、この方法の問題

点もある。この点、振動規制法の制定は統一された方法によるデータの集積を可能とする。

c) 無差別ピーク値を読み取り、その度数分布あるいは累積度数曲線によって評価する方法

発生する振動のピーク値の分布について考察できる。また、度数分布における最頻値は自然交通状態での発生頻度の高い振動値を示す。このため、車種別の振動の程度を評価するときによく利用されるが、多車線で多車種の車両が通過する混合交通では無作為にピーク値を抽出することはかえって変動幅が大きくなる。このため、ピーク値の読み取り方法、さらにその処理方法になんらかの工夫が必要とされる。

d) ある時間帯において、あるレベルより大きい振動にばく露される回数、あるいはばく露時間によって評価する方法

この方法は、不規則に変動する沿道の振動を評価する場合、発生する振動の個々のピーク値の分布を求めるよりはむしろあるレベル（たとえば有感限界）を設定しておき、それを超える回数あるいはばく露時間を求めるこのほうが実情に合っているのではないかとする立場に立ったものである。特に、ばく露時間の評価については上記 b) の方法の不備を補ったものである。しかし、この方法は経験的に二、三のケースに用いられているにすぎないため、その有効性の裏付けがない。

以上のような種々の評価方法が考えられるが、著者らは従来から理論的に確立された手法で、不規則に変動する沿道の振動を評価したいと考えている。そして、その手法をもって沿道家屋の振動増幅特性あるいは居住する人間の感覚との対応などを処理していくたい。そこで、このような観点から上記の方法を見直すと、b) の方法は物理的な意味付けがはっきりしていないが、c) は不規則振動論における極値分布問題として、d) は同じくレベル超過値問題として取り扱える可能性を持っている。

* 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科教室

** 正会員 工修 川崎重工業（株）施設部

本研究では、これらの研究の第1段階として、多車線で多車種の車両が通過するとき沿道で実測した振動波形が正規定常不規則過程であると考え、d) で述べたレベル超過値の問題を不規則振動論によって取り扱う。なお、本研究では基礎的な検討を行うため、沿道の振動として地盤振動のみを対象として取り上げた。

2. 不規則振動論による超過回数

(1) 理論式の誘導

多車線で交通量が多く多車種の車両が通過する場合、発生する沿道の振動は定常不規則過程であると考えられる。いま、式の誘導はすでに成書¹⁾にも得られているので、途中の過程は省略してレベル超過回数および滞在時間の式を示すと次のようになる。

定常不規則関数 $X(t)$ がある レベル a を正に超過する単位時間当たりの平均超過回数を \bar{n}_a^+ , レベル a の上側に滞在する超過回数 1 回当たりの滞在時間を τ_a とすると次式が得られる.

$$\bar{x}_a = \frac{\int_a^{\infty} f(x) dx}{\int_0^{\infty} f(a, \dot{x}) \dot{x} d\dot{x}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに, $f(x)$ は不規則関数 $X(t)$ の確率密度関数であり, $f(x, \dot{x})$ は不規則関数 $X(t)$ とその導関数 $\dot{X}(t)$ の結合確率密度関数である。なお, 沿道の振動を取り扱う場合, その測定値の評価には振動速度あるいは振動レベル(振動加速度に人体感覚加重曲線による補正を行ったもの)が用いられることが考えられる。そこで, 本研究では定常不規則関数 $X(t)$ として, 振動速度波形を取り扱うこととする。したがって, その導関数である $\dot{X}(t)$ は振動加速度波形となる。

さらに、簡単に取り扱うため、沿道で実測される振動速度波形が正規定常不規則過程であると仮定する。この場合、式(1)、(2)は簡単な形となり次式のように得られる。

$$\bar{n}_a^+ = \frac{\sigma_a}{2\pi\sigma_n} \exp\left\{-\frac{(a-\bar{x})^2}{2\sigma_n^2}\right\} \quad \dots \quad (3)$$

$$\bar{\tau}_a = \frac{\pi \sigma_v}{\sigma_a} \exp \left\{ \frac{(a - \bar{x})^2}{2 \sigma_v^2} \right\} \left[1 - 2 \phi \left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma_v} \right) \right]$$

ただし、 $\phi(x)$ は

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad \dots \dots \dots (5)$$

で示される。ここで、 \bar{x} , σ_x は振動速度の平均値および標準偏差、 σ_a は振動加速度の標準偏差である。

(2) 沿道の振動への適用

前述の超過問題の理論を沿道の振動へ適用する場合、式(3), (4)からわかるように振動速度の平均値 \bar{x} , 標準偏差 σ_v および振動加速度の標準偏差 σ_a が必要である。いま、道路交通による沿道の振動のように定常的な振動の場合、平均値 \bar{x} はほぼ0とみなしてよい。したがって、 σ_v , σ_a の標準偏差を同時測定した振動速度、振動加速度の両実測波形より求める必要がある。しかし、実際に振動測定を実施する場合、同一振源状態に対して多点の同時測定を実施する必要があり、測定成分の制約は障害になることが多い。そこで、本節ではレベル超過回数をより簡単に求めるために、次のような理論値推定の2つの方法を考えてみる。

a) 第1の方法

振動速度波形のみが記録波形として得られているとき、振動速度波形から振動加速度の標準偏差を理論的に推定し、式(3)によって求める方法。

b) 第2の方法

振動速度の標準偏差と振動加速度の標準偏差の関係を調べて簡単な関係式を求めておき、振動速度の標準偏差のみを求めて式(3)よりレベル超過回数を求める方法.

ここで、上記の 2 つの方法についてその内容を簡単に説明しておく。第 1 の方法において、振動速度波形から振動加速度の標準偏差を求めるには、相関関数による方法とパワースペクトルによる方法が考えられる。まず、相関関数による場合、定常不規則関数 $X(t)$ の相関関数を $K_x(\tau)$ で表わすと、その導関数 $\dot{X}(t)$ の相関関数 $K_{\dot{X}}(\tau)$ は

となる。したがって、振動加速度の分散は式(6)において、 $\tau=0$ とすれば得られる。一方、パワースペクトルによる場合、定常不規則関数 $X(t)$ のパワースペクトルを $S_x(\omega)$ で表わすと、その導関数 $\dot{X}(t)$ のパワースペクトル $S_{\dot{x}}(\omega)$ は

となる。したがって、振動速度波形のパワースペクトルから振動加速度の分散は式(7)より次式のように求めることができる。

$$\sigma_a^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_a(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_v(\omega) d\omega \quad \dots\dots (8)$$

ただし、 $S_v(\omega)$ は振動速度の、 $S_a(\omega)$ は振動加速度のパワースペクトルを表わす。

一方、第2の方法においては振動速度と振動加速度の標準偏差の関係がわかっている必要がある。いま、振動速度の分散はそのパワースペクトルから次式のように表わせる。

$$\sigma_v^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_v(\omega) d\omega \quad \dots\dots(9)$$

しかるに、振動加速度の分散は式(8)のように表わされている。両式より、 σ_v^2 と σ_a^2 の関係は σ_v^2 が振動速度のパワースペクトルの面積であり、 σ_a^2 がその2次モーメントを表わしている。このため、 σ_a と σ_v の比は ω に関係することがわかる。その比は道路状況、通過車両の種類、波動伝播経路の地質などの影響を受け、発生する振動の振動数成分、すなわち実測される振動速度のパワースペクトルの形によって変動する。

しかし、式(3)においてレベル a を $a=0$ とすると、

$$\bar{n}_a^+ = \sigma_a / 2\pi \sigma_v \quad \dots\dots(10)$$

となり、上式は測定された振動速度波形のみかけの振動数を表わしている。すなわち、 σ_a/σ_v はみかけの角振動数を表わすことになる。一方、振動速度および振動加速度の振動値が正規分布するとすれば、振動速度の最大値(v_{max})、振動加速度の最大値(a_{max})は $v_{max} = 3\sigma_v$ および $a_{max} = 3\sigma_a$ なる関係が成り立ち、 σ_a/σ_v の比はほぼ a_{max}/v_{max} となる。これらの関係より、振動加速度と振動速度の標準偏差の比はほぼ一定の関係を示すのではないかと推定される。

そこで、いま振動速度の標準偏差と振動加速度の標準偏差の関係を

$$\sigma_a = C\sigma_v \quad (C : \text{rad/sec}) \quad \dots\dots(11)$$

とすれば、上式の C を調べることによって、任意レベルの超過回数は σ_v のみを求めることによって式(3)より推定することが可能となる。

3. 実測値と理論値の比較

前章で述べた理論超過回数が実際の沿道の地盤振動に対して適応しているかどうかの検討と次章で述べる種々の検討の資料を得るために実測を行った。

(1) 実験概要

測定場所は国道43号線(片側5車線)の神戸市東灘区青木と芦屋市精道町および国道2号線(片側4車線)の神戸市生田区東川崎町の3箇所である。それぞれの地点で実施した測定項目は表-1のようである。

実際の沿道の振動は信号機のため交通流が影響を受け定常性を満足していないと考えられる。このため、信号機の青から赤までを1サイクルとして、その中で車両の流れが最も激しいときの振動を測定し、定常性を満足しているものと考えることにする。また、それぞれの測定

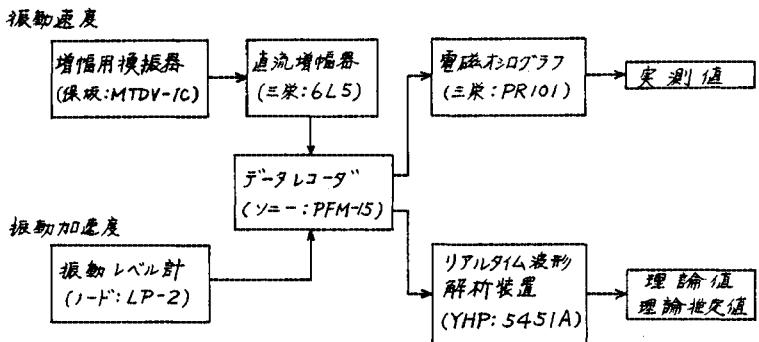


図-1 測定・処理ライン

表-1 測定項目

場 所	番 号	測 定 項 目	測定成分		備 考
			速 度	加 速 度	
青 木 (43号線)	第1回	実測値と理論値の対応	○	○	交通量の影響 49.8測定
	第2回	同 上	○	○	
	第3回	距離減衰状況	○	—	3点同時測定 50.10測定
精 道 町 (43号線)	第1回	実測値と理論値の対応	○	○	50.6測定
	第2回	距離減衰状況	○	—	3点同時測定 50.10測定
東川崎町 (2号線)	—	実測値と理論値の対応	○	○	49.9測定

点は信号機と信号機のほぼ中間の場所を選び、地盤上の測点は車線から直角方向に道路端を0mとして5m、10m、15m、20m点(距離減衰については25m点も測定)とした。それぞれの測定についてはおのおの10サイクル以上の測定を行い、その内から適当な個数についてそれぞれの処理を行った。測定・処理ラインの概要を図-1に示す。また、測定はすべて上下動について行っており、水平動については測定を実施していない。

(2) 実測結果の概要

実測した磁気記録は図-1に示すリアルタイム波形解析装置でA-D変換を行い、デジタル量で処理した。その際、記録の読み取り時間間隔は0.01secで行い、2048個(20.48秒)または1024個(10.24秒)の標本値について分散およびパワースペクトルを求めた。得られた各データのすべてを図示することは紙数の都合上できないため、一部分について図示する。

青木および東川崎町における5m点の振動速度のパワースペクトルを示すと図-2、3のようである。なお、図中に参考のためそのときの振動速度、振動加速度の標準偏差を付記してある。図-2より、10~13Hzに高いピークが見られる。図示しなかったが、同じ43号線の精道町においても似たような傾向である。一方、図-3

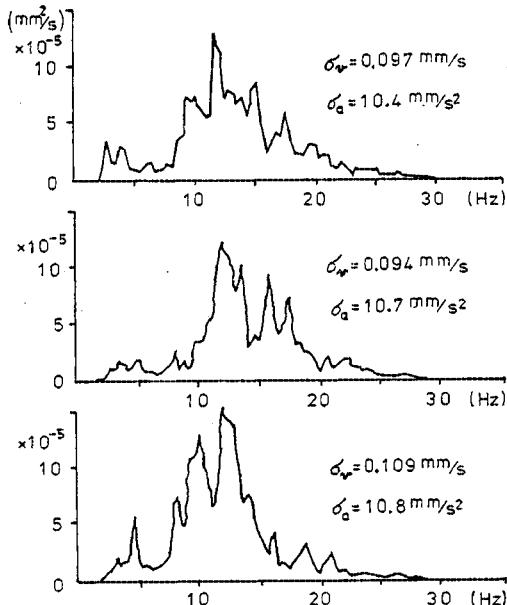


図-2 振動速度のパワースペクトル（青木第2回 5m点）

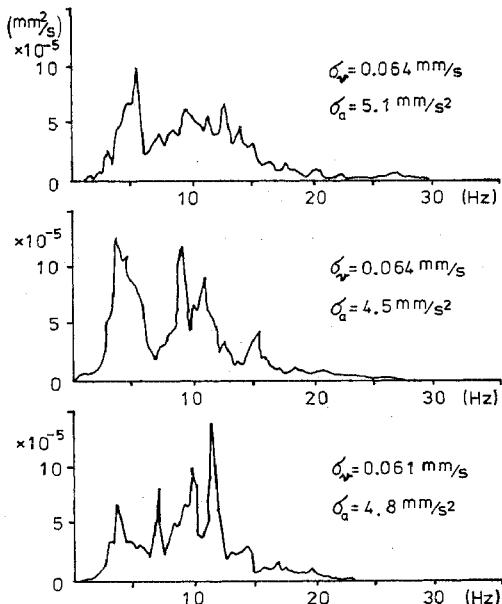


図-3 振動速度のパワースペクトル（東川崎町 5m点）

においては、10~13 Hz のピークのほかに 3~5 Hz に高いピークが見られる。道路状況としては国道 43 号線の方は 2 箇所ともコンクリート舗装であるのに対して国道 2 号線ではアスファルト舗装である。また、両国道とも中央部に阪神高速道路の高架道路が通っており、高架道路の構造形式等の違いの影響も考えられるが、今回の測定目的としては重要な問題ではないためくわしい調査は省略した。

(3) 実測値と理論値の比較

実測した地盤振動の定常性についてはそれぞれのデータについて平均値、分散、相関関数を求め時刻 t にかかわらず一定となることを確かめなければならない。しかし、全データについて比較しても厳密に定常性を満足しているかどうかの判断は難しい。ここでは、交通流が定常状態になった状態での沿道の振動は一応定常性を満足しているものとして話を進め、正規定常性を仮定して導かれる理論式(3)によって得られる理論値と実測波形から実際に数えた実測値を比較して工学的に判断する。なお、定常性の検討については式(8)で得られる振動加速度の分散と実測した振動加速度の分散を比べることによっても検討できるが、この検討については理論値推定の第1の方法で必要であるので、改めて述べることとしてここでは省略する。

各測定場所で得られた振動速度、振動加速度の同時実測波形から単位時間当たりのレベル超過回数を求める結果を図-4 および表-2~4 に示す。ここで、実測値はデータレコーダに集録した記録を記録紙上に再生し、各レベル値(たとえば 0.1, 0.2, 0.3 mm/sec) を超過する回数を数え、全時間(20 秒または 10 秒間)で除して単位時間当たりの超過回数を求めたものである。図-4 は 0.1 mm/sec を超過する単位時間当たりの超過回数を横軸に実測値、縦軸に理論値をとり示した。同図より、両者はほぼ一致していると思われる。表-2~4 は 0.2 および 0.3 mm/sec のレベルを超過する回数も含めて比較するため一括して表にしたものである。また、同表には測定時における信号機が青から赤まで 1 サイクル間の交通量を示してある。同表よりレベルの高い所では精度が悪くなってくる。これは正規分布として仮定した地盤振動の振動値が

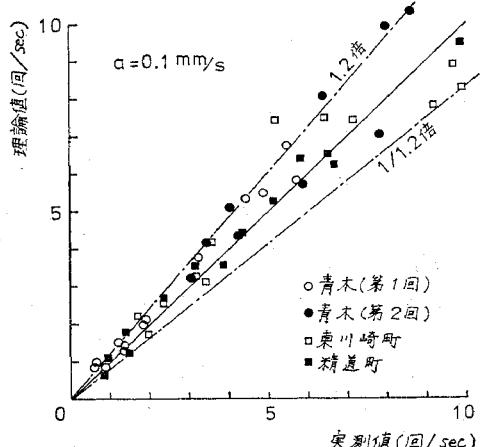
図-4 単位時間当たりのレベル超過回数について
実測値と理論値の比較

表-2 単位時間当たりのレベル超過回数(青木)

距離	交通量		0.1 mm/s		0.2 mm/s		0.3 mm/s	
	大型	小型	実測値	理論値	実測値	理論値	実測値	理論値
第1回								
5 m	2	44	5.63	5.99	0.48	0.45	0	0.01
	3	42	4.89	5.57	0.41	0.28	0.05	0.00
	5	48	5.49	6.90	1.13	0.45	0.14	0.01
10 m	1	49	3.88	3.23	0.09	0.04	0	0.00
	2	40	1.20	1.58	0	0.00	0	0.00
	2	43	1.85	2.07	0.09	0.01	0	0.00
15 m	1	38	1.31	1.30	0	0.00	0	0.00
	5	43	0.99	0.49	0	0.00	0	0.00
	3	42	1.83	2.15	0.09	0.01	0	0.00
20 m	7	44	0.87	0.98	0	0.00	0	0.00
	4	46	1.31	1.41	0	0.00	0	0.00
	1	39	0.63	1.09	0	0.00	0	0.00
第2回								
5 m	10	100	8.04	10.01	2.06	2.05	0.23	0.15
	8	104	8.64	10.41	2.05	2.91	0.18	0.35
	7	119	11.07	10.41	3.16	2.91	0.64	0.35
10 m	11	89	6.47	8.16	1.35	1.30	0.09	0.06
	11	104	7.84	7.09	1.47	1.63	0.14	0.09
	8	102	4.51	5.39	0.51	0.20	0	0.00
15 m	4	111	4.27	4.43	0.19	0.09	0	0.00
	5	92	4.06	5.18	0.55	0.19	0.14	0.00
	11	89	5.86	5.82	0.36	0.30	0.05	0.00
20 m	6	96	3.16	3.29	0.14	0.05	0	0.00
	3	79	3.50	4.26	0.37	0.10	0	0.00
	4	87	3.40	3.18	0.14	0.05	0	0.00

注：交通量；青から赤まで1サイクルの交通量

表-3 単位時間当たりのレベル超過回数(精道町)

距離	交通量		0.1 mm/s		0.2 mm/s		0.3 mm/s	
	大型	小型	実測値	理論値	実測値	理論値	実測値	理論値
5 m	22	52	1.0	1.12	0	0.00	0	0.00
	24	48	1.4	1.31	0	0.00	0	0.00
	26	50	5.2	5.30	0.2	0.12	0	0.00
	30	60	5.9	6.42	0.4	0.58	0.2	0.01
	39	53	6.8	6.39	0.3	0.41	0	0.00
	36	68	0.9	0.70	0	0.00	0	0.00
	37	56	3.9	3.66	0	0.03	0	0.00
10 m	25	58	3.3	3.35	0	0.04	0	0.00
	24	44	5.0	4.82	0.2	0.15	0	0.00
	24	46	—	2.53	—	0.12	—	0.00
	25	57	2.2	2.21	0	0.01	0	0.00
	30	70	2.5	2.15	0	0.01	0	0.00
20 m	28	68	1.6	1.82	0	0.00	0	0.00
	31	67	0.7	0.99	0	0.00	0	0.00
	27	70	1.2	1.40	0	0.00	0	0.00

注：交通量；青から赤まで1サイクルの交通量

正規分布より外れてくることが考えられる。特に、実測波形において高いレベルを1回超えるか超えないかが非常に影響してくるためやむを得ないところである。

なお、青木(表-2)においては交通量の多い方が超過回数も増しているが、精道町(表-3)における結果では大型車の混入率が増しているにもかかわらず超過回数は

表-4 単位時間当たりのレベル超過回数(東川崎町)

距離	交通量		0.1 mm/s		0.2 mm/s		0.3 mm/s	
	大型	小型	実測値	理論値	実測値	理論値	実測値	理論値
5 m	12	66	4.08	3.70	0.25	0.10	0	0.00
	9	63	4.58	3.30	0.24	0.08	0.05	0.00
	11	54	3.13	3.27	0.10	0.06	0	0.00
15 m	12	50	1.89	1.70	0	0.00	0	0.00
	15	55	2.36	2.71	0	0.02	0	0.00
	15	57	1.67	2.33	0.09	0.01	0	0.00
15 m	20	66	9.76	8.96	2.22	2.24	0.39	0.22
	15	58	9.91	8.32	2.00	1.15	0.47	0.04
	16	58	9.15	8.32	2.37	1.20	0.52	0.05
20 m	18	50	5.14	7.53	1.48	0.99	0.38	0.03
	10	54	7.26	7.52	0.93	0.85	0.33	0.02
	24	63	6.50	7.51	0.89	0.81	0.22	0.02

注：交通量；青から赤まで1サイクルの交通量

少ない。これは青木の方が路面状態が悪かったためである。また、交通量との対応については、実際の測定時間(20秒または10秒間)に対する車両台数と車種混合率の対応を求めていないため、今後これらの点について検討する必要がある。一方、東川崎町では15m、20mの方が5m、10mに対する超過回数より多くなっているが、測点として5m、10mは舗装面上であり、15m、20mは地盤上であること以外にその原因についてはよくわかっていない。

図-4および表-2~4で得られた結果より、沿道の地盤振動において高いレベルについては精度が悪くなるが、実際の波形から数えた超過回数と振動速度、振動加速度の標準偏差より求めた理論値はほぼ一致すると考えてもよいであろうと思われる。このことより、沿道の地盤振動の振動波形を正規定常不規則過程であると仮定して不規則振動論によるレベル超過値問題を多車線で多車種の車両が通過する沿道の振動問題に適用し、種々の検討ができると考える。

4. 理論値推定法による二、三の検討

前章での結果より定常不規則振動論の適用は許されるものとして、2.(2)で述べた理論値推定法の検討とこれらを用いて得られる結果について考察する。

(1) 理論値推定における問題点

理論値推定の第1の方法で必要な振動加速度の標準偏差を式(8)によって振動速度波形のパワースペクトルから求め、実測の振動加速度波形から得られる標準偏差と比較すると図-5のように得られる。なお、ここでパワースペクトルによる方法を用いたのは、本研究での波形処理がA・D変換したデジタル量で取り扱われているため、数值微分を用いる相関関数による方法はうまくい

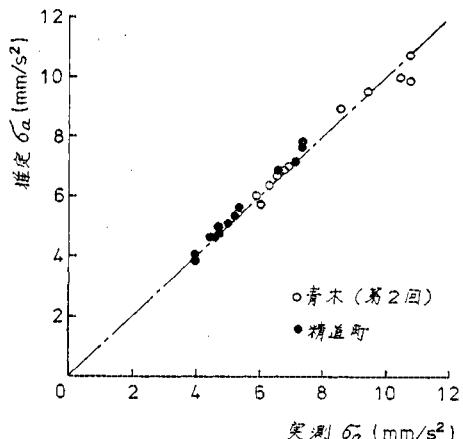


図-5 実測の振動加速度の標準偏差と振動速度より推定した振動加速度の標準偏差の比較

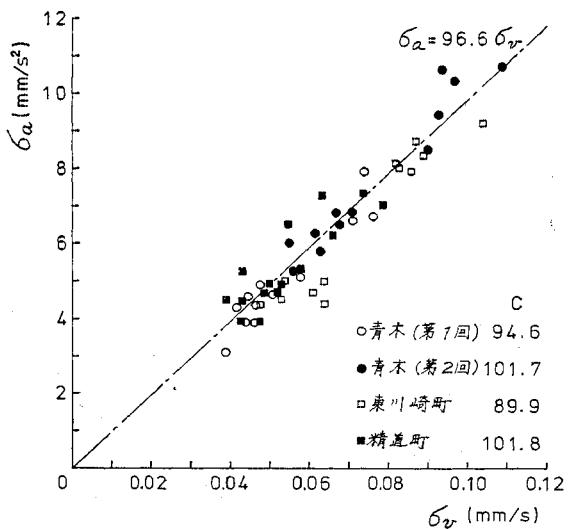


図-6 振動速度の標準偏差と振動加速度の標準偏差の関係

かなかつたためである。同図より振動加速度の標準偏差の理論推定値と実測値は良く一致していることがわかる。このことより沿道の地盤振動波形を定常不規則過程と考えることができる。したがって、振動加速度波形を実測することなく、振動速度波形より振動加速度の標準偏差を精度よく求めることができる。

一方、第2の方法で必要となる振動加速度の標準偏差と振動速度の標準偏差の関係をそれぞれ実測波形より計算し比較すると 図-6 のようになる。同図より式(11)の係数 C の平均値を求めると次のような関係式として得られる。

同図にはそれぞれの場所での C の平均値を示してあるが、それほどのばらつきは見られない。これは、3.(2)で述べたパワースペクトルにおいて、いずれの測定場所

においても 10~13 Hz の振動が卓越し、これが C の値に影響していることからいえる。なお、東川崎町においては低振動数成分も卓越しているが、式(8)より振動加速度の分散 σ_a^2 に対する影響は 10~13 Hz のピークほど C の値に影響を与えない。このため若干小さくなっているが、他の測定場所と比べてそれほど小さくなっていない。

図-5, 6 の関係を考慮して、理論値推定の 2 つの方法で得られた単位時間当たりの超過回数を理論値と比較して示すと表-5, 6 のように得られる。同表の単位時間当たりの超過回数は計算値として求まるため何んらかの値を持つわけであるが、本研究で取り扱った 10~20 秒間程度の超過回数として考える場合、余り小さい値は意味を持たないため 0.00 として表示した。同表より、理論値推定の方法で得られた値はいずれも理論値と一致しており、理論値推定法の適用は問題がない。

ここで、レベル超過回数に与える影響要因について考察してみると、次のようなことがいえる。いま、式(3)において、レベル超過回数に影響を与える変数は振動速度および振動加速度の標準偏差 σ_v , σ_a である。しかるに、図-6 の結果から σ_a/σ_v は 96.6 前後の値を示し、測定場所の違いおよび振源距離の違いによっても 20~30% 程度しか変動していない。そこで、次に式(3)における指標項の影響について考察するため、式(3)を $\bar{x}=0$ として次のように書き直す。

$$\bar{n}_a^+ = \frac{C}{2\pi} \exp\left\{-\frac{a^2}{2\sigma_a^2}\right\} \dots \quad (13)$$

上式は正規分布曲線の確率密度関数を与える式と同形である。式(13)を $\sigma_v=0.08$ と0.06について計算し、図示すると図-7のようになる。同図より σ_v のわずかな違いによって、レベル超過回数に与える影響は大きいことがわかる。特に、レベルが高い所では見掛け上その影響が大きくなる。これは、3.(3)で述べた実測値と理論値がレベルの高い所で一致しにくい原因の一つでもある。なお、参考のため国道43号線精道町における振動速度と振動加速度の標準偏差を表-7に示す。同表と表-3(あるいは表-6)に得られている超過回数を対

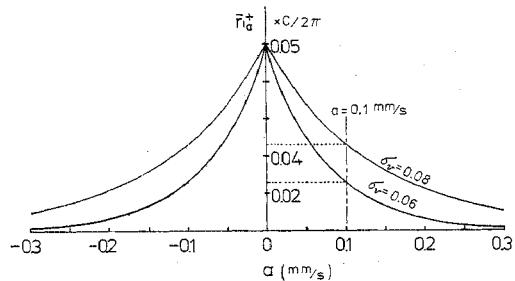


図-7 振動速度の標準偏差の変動による
レベル超過回数の変動

表-5 単位時間当たりのレベル超過回数（青木 第2回）

距離	理論値			理論値推定法(1)			理論値推定法(2)		
	0.1 mm/s	0.2 mm/s	0.3 mm/s	0.1 mm/s	0.2 mm/s	0.3 mm/s	0.1 mm/s	0.2 mm/s	0.3 mm/s
5 m	10.03	2.05	0.15	9.21	1.89	0.13	9.05	1.84	0.13
	10.41	2.91	0.35	8.87	1.62	0.10	8.75	1.60	0.09
	10.41	2.91	0.35	10.21	2.86	0.34	10.11	2.86	0.35
	11.16	3.21	0.40	10.31	2.96	0.37	—	—	—
10 m	8.16	1.30	0.06	8.45	1.34	0.06	8.31	1.30	0.06
	9.09	1.63	0.09	8.80	1.58	0.09	8.64	1.52	0.08
	5.39	0.20	0.00	5.19	0.19	0.00	5.06	0.18	0.00
	4.92	0.13	0.00	4.69	0.12	0.00	—	—	—
	4.26	0.08	0.00	4.16	0.08	0.00	—	—	—
15 m	4.43	0.09	0.00	4.18	0.08	0.00	4.19	0.08	0.00
	5.18	0.19	0.00	5.21	0.19	0.00	5.22	0.20	0.00
	5.82	0.30	0.00	5.79	0.30	0.00	5.71	0.29	0.00
	5.28	0.16	0.00	4.83	0.14	0.00	—	—	—
20 m	3.29	0.05	0.00	2.90	0.02	0.00	2.95	0.02	0.00
	4.26	0.10	0.00	4.45	0.10	0.00	4.37	0.10	0.00
	3.18	0.05	0.00	3.22	0.03	0.00	3.13	0.03	0.00
	3.85	0.05	0.00	3.57	0.04	0.00	—	—	—

注：推定法(2)は $C=96.6$ を使用して求めたレベル超過回数

表-6 単位時間当たりのレベル超過回数（精道町）

距離	理論値			理論値推定法(1)			理論値推定法(2)		
	0.1 mm/s	0.2 mm/s	0.3 mm/s	0.1 mm/s	0.2 mm/s	0.3 mm/s	0.1 mm/s	0.2 mm/s	0.3 mm/s
5 m	1.12	0.00	0.00	1.14	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00
	1.31	0.00	0.00	1.34	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00
	5.30	0.12	0.00	5.52	0.13	0.00	4.37	0.10	0.00
	6.42	0.58	0.01	6.51	0.59	0.01	6.91	0.62	0.01
	6.39	0.41	0.01	6.81	0.44	0.01	6.18	0.40	0.01
	0.70	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00
	3.66	0.03	0.00	3.77	0.03	0.00	2.95	0.02	0.00
10 m	3.35	0.04	0.00	3.48	0.04	0.00	3.48	0.04	0.00
	4.82	0.15	0.00	4.90	0.16	0.00	4.89	0.16	0.00
	2.53	0.01	0.00	2.58	0.01	0.00	—	—	—
	2.21	0.01	0.00	2.41	0.01	0.00	2.42	0.01	0.00
20 m	1.82	0.00	0.00	1.82	0.00	0.00	1.76	0.00	0.00
	0.99	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00
	1.40	0.00	0.00	1.37	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00

注：推定法(2)は $C=96.6$ を使用して求めたレベル超過回数

表-7 振動速度・振動加速度の標準偏差（精道町）

距離	σ_v (mm/s)	σ_a (mm/s ²)	σ_a/σ_v
5 m	0.043	4.5	104.7
	0.043	5.3	123.3
	0.063	7.4	117.5
	0.079	7.1	89.9
	0.074	7.4	100.0
	0.039	4.6	118.0
	0.055	6.6	120.0
10 m	0.058	5.4	93.1
	0.066	6.3	95.5
	0.053	5.0	94.3
	0.052	4.8	92.3
	0.050	5.0	100.0
20 m	0.048	4.8	100.0
	0.043	4.0	93.0
	0.047	4.0	85.1

照とすると上述の関係がよくわかる。

これらの結果より、振動加速度と振動速度の標準偏差の比は単位時間当たりのレベル超過回数には 20~30% 程度の影響しか与えないもので、一応この比を一定と考えると、沿道の地盤振動として振動速度の標準偏差を精度よく求めることが重要な問題となる。もちろん、今後の問題として振動加速度と振動速度の標準偏差の比 C が種々の場所でどのような値をとるかの検討は行われなければならない。

(2) 地盤振動の距離減衰

理論値推定の第1の方法を用いて、国道43号線青木および精道町における地盤振動の距離減衰をレベル超過回数および滞在時間の面からながめてみる。まず、両地点の振動速度の標準偏差の距離減衰を図-8, 9 に示す。測定は計測器の都合上 5 m, 10 m, 15 m および 5 m, 20 m, 25 m の2段階で実施した。したがって、同図は2段階での測定データを 5 m 点で合せて補正し図示したものである。20

m, 25 m でのばらつきは大きいが平均して示すと、図中の実線のように減衰していく状況がわかる。なお、青木の方が測定時における路面状況が悪く振動値が大きくなっている。また、青木の方は表面波の減衰を表わす距離の平方根に逆比例した減衰を示しているが、精道町の方はほぼ直線的に減衰している。

次に、補正して得られた個々の標準偏差について、単位時間当たりのレベル超過回数を求め平均値として図示すると 図-10, 11 のように得られる。同図より青木では高いレベルの超過回数もあるのに対し、精道町では 0.2 mm/sec 以上の超過回数はほぼ 0 とみなしえる程度である。また、青木における結果において、レベル 0.1 mm/sec から 0.2 mm/sec の間で 10 m 以遠のレベル超過回数は大きく減少している。すなわち、低いレベルには常にばく露されるが高いレベルの振動にばく露される回数

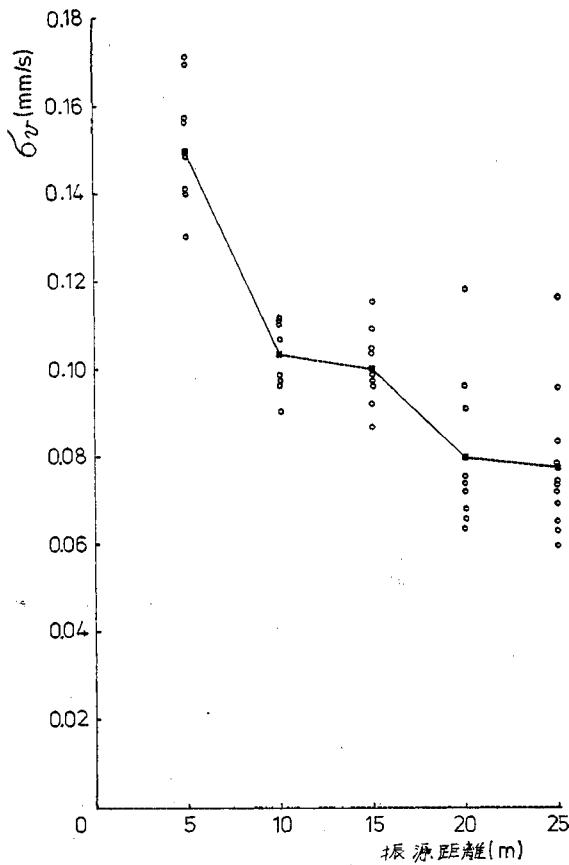


図-8 振動速度の標準偏差の距離減衰（青木）

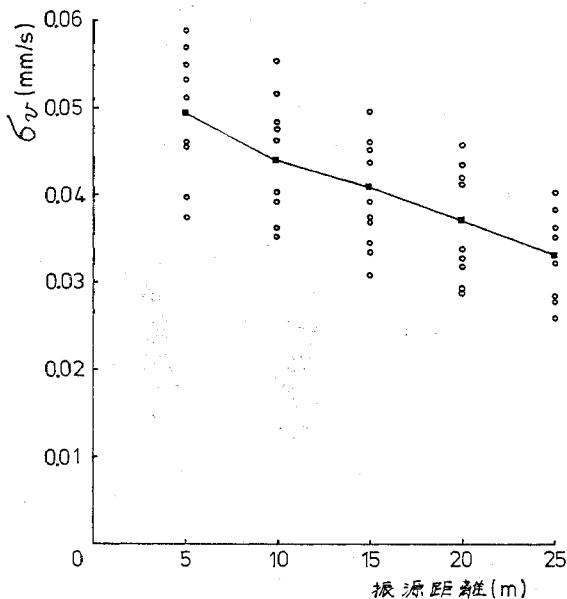


図-9 振動速度の標準偏差の距離減衰（精道町）

は急激に少なくなることを示している。参考のため、図-12 に青木における単位時間当りのレベル超過滞在時間の距離減衰を示す。同図は式(4)によりレベル超過 1 回当たりの滞在時間を求め、図-10 に得られている単位時間当りのレベル超過回数を掛けて単位時間当りの平均滞在時間を求めたものである。同図より、前述の各レベル値におけるばく露時間の関係がよくわかる。また、図-12 のような滞在時間による評価は沿道の振動のような不規則に変動する振動の評価をしていく上で 1 つの手法を示すものと考えられる。

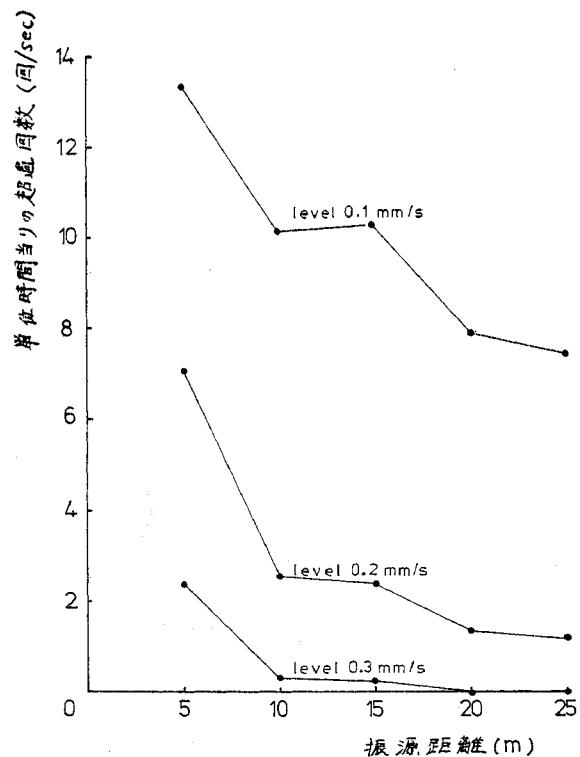


図-10 単位時間当りのレベル超過回数の距離減衰（青木）

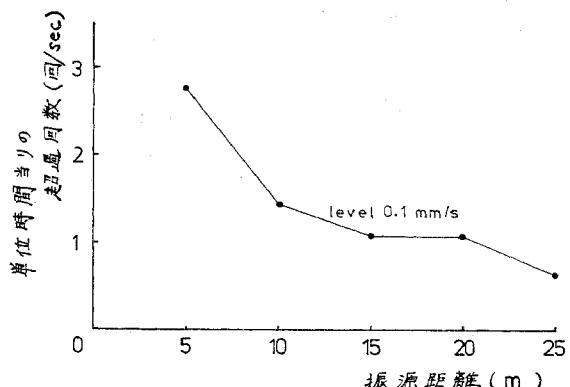


図-11 単位時間当りのレベル超過回数の距離減衰（精道町）

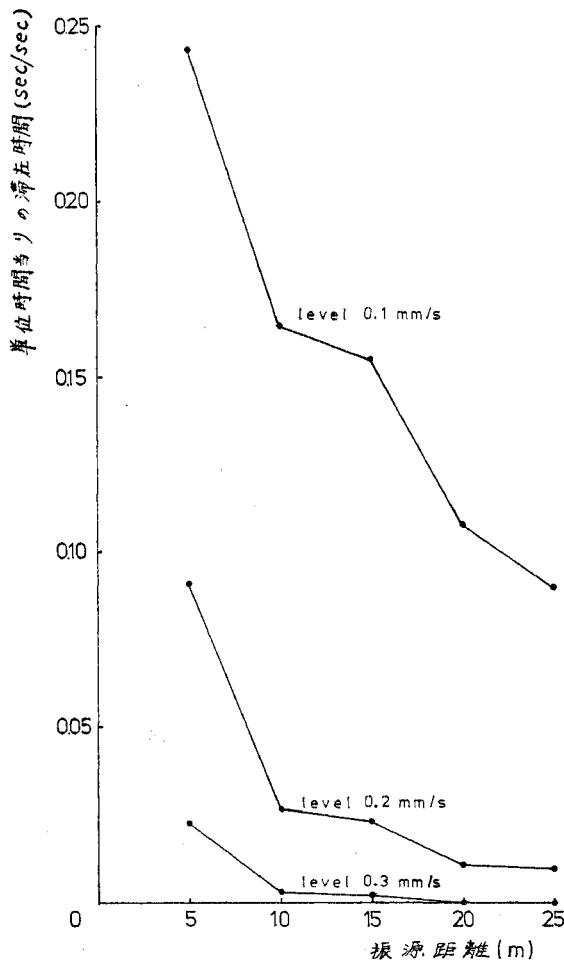


図-12 単位時間当たりの滞在時間の距離減衰（青木）

5. あとがき

本研究では、多車線で交通量が多く多車種の車両が通過するときの沿道の地盤振動への不規則振動論によるレベル超過値問題の適用を試みた。ここで得られた結果をまとめると次のようである。

(1) 正規定常不規則過程であると仮定して理論的に得られた結果、すなわち振動速度および振動加速度波形から得られた標準偏差を用いて計算した超過値と実測波形において直接数えた超過値がほぼ一致した。このことより、工学的にみて道路交通による沿道の地盤振動は正規定常不規則過程とみなし、不規則振動論によるレベル超過値問題を適用してもさしつかえないものと考えられる。

(2) 振動速度波形のパワースペクトルより振動加速度の標準偏差を求め実測の標準偏差とよく一致した。こ

のことより、沿道の地盤振動は定常不規則過程とみなすことができる。また、この推定した振動加速度の標準偏差を用いて求めた超過値は当然のことではあるが、理論値とよく一致していることより振動加速度波形の実測は不要となる。したがって、実際に測定を実施する場合、同一振源状態に対して多点同時測定を行うことが多く、測定成分の制約は障害になることが多いが、この点有利である。

(3) 振動速度と振動加速度の標準偏差の関係が比較的簡単な関係で近似できるため、振動の分散値のみを測定すれば任意レベルの超過回数が大体推定できる。また、この近似的な関係より、レベル超過回数に与える影響は、振動速度波形の分散値が重要であることがわかった。したがって、この場合簡単な分散値を求める計器を開発することによって短時間の処理で、その地点の振動の程度をレベル超過回数を用いて表わすことが可能である。

以上のようなであるが、今後の課題としては種々の状況のもとで実測を行い、道路交通による沿道の地盤振動が正規定常不規則過程として取り扱える限界と車線数、交通量などとの関係を明らかにしていく必要がある。また、超過値問題を取り扱うために簡単に振動波形の分散値を求めることのできる計器を製作し、超過値そのものの特性を把握していくことが必要である。なお、本研究では、まず手法の適用性について検討するため地盤振動のみを取り扱った。しかし、道路交通による沿道の振動公害を取り扱っていくうえで、家屋の振動特性の把握を取り上げていかなければならぬことはいうまでもない。したがって、同じ手法を用いて沿道の家屋振動への適用も考えており、次の機会にこれらの測定も実施し改めて報告したい。

終りに、本研究は本学会学術講演会における発表論文^{2), 3)}にデータの追加と考察に手を加えてまとめたもので、その際実験、数値計算等に神戸大学工学部学生 金好昭彦君の協力を得た。また、本研究を進めるにあたり適切な助言をいただいた 神戸大学 桜井春輔教授に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) たとえば、小西一郎・高岡宣善：構造動力学、丸善、pp. 171～225、1973.
- 2) 水野正英・北村泰寿：道路交通による地盤振動の評価について、昭和 50 年度関西支部年講講演概要集、III-22、昭和 50 年 5 月。
- 3) 北村泰寿・水野正英：不規則振動論による交通振動の評価、第 30 回年講講演概要集、III-49、昭和 50 年 10 月。

(1975.12.5・受付)