
投稿論文
Paper

公害振動における構造物の応答特性と水平振動計測の重要性について

IMPORTANCE OF MEASURING THE HORIZONTAL VIBRATION AND THE STRUCTURAL RESPONSE IN RESPECT TO PUBLIC DISTURBANCES DUE TO TRAFFIC AND BLASTING VIBRATION

国松 直*・三浦房紀**・今村 威***・中川浩二****

By Sunao KUNIMATSU, Fusanori MIURA, Takeshi IMAMURA and Koji NAKAGAWA

We have been paying attention only to the magnitude of vertical vibration levels at the surface ground for estimation of public disturbances due to traffic and blasting vibration. Inhabitants are, however, more sensitive to the vibration inside their houses than outside them. Moreover, the house is apt to vibrate horizontally. This implies the necessity of taking the structural response and the horizontal vibration into consideration when the vibration level inside of a house is discussed.

The purpose of this study is to investigate both the horizontal and the vertical vibration levels considering the response characteristics of the structure. In order to analyze the response characteristics of the structure from the vibration level, we adopted the methodology of the response spectrum. As the horizontal response is dominant in the vibration of the structure, especially in low frequency range, the importance of measuring the horizontal vibration is shown from the analyses performed.

Keywords: vibration level, response spectrum, traffic vibration, blasting vibration

1. 緒 言

鉄道や道路の沿線、あるいは工事現場に近接する地域の住民は常に振動にさらされており、この振動がある程度以上に大きくなると住民は不快感を覚え、さらには恐怖感をも覚えることになる。そのため、昭和51年に振動規制法が施行され、ある許容値以下になるように振動源に対して厳しい規制が行われるようになった。そしてその際の振動の評価単位としては振動に対する人体感覚を考慮に入れた振動レベルが一般に用いられている。

振動に対する直接的な人体の感覚は振動の継続時間とそれに含まれている周波数の2つの要因の影響を受ける。また、振動には水平振動と鉛直振動の各成分があるが、周波数に対する人体感覚は水平成分と鉛直成分とは異なることが知られている。一般に、交通や建設作業に伴って生じることの多い地動の8 Hz以上の周波数領域においては、振幅が同じであれば人体は鉛直振動を水

平振動よりもはるかに強く感じる¹⁾。したがって、振動レベルとしては鉛直振動に対するものがこれまで規制の対象とされ、計測されてきた。

しかしながら、住民が振動を深刻に感じるのは屋外、すなわち地盤上で作業しているときよりもむしろ屋内で静止しているときである。このことは住民の苦情の対象としての振動は地盤上の振動よりも家屋内の振動が問題になり得ることを意味する。さらに、家屋の固有振動数は多くの場合10 Hz以下²⁾であり、その結果家屋内の振動では10 Hz以下の振動が特に増幅される。そして、8 Hz以下では鉛直振動と水平振動に対する人体感覚の差は徐々に小さくなり、2.8 Hz以下では逆に水平振動を強く感じるようになる。これらのことを勘案すると、公害振動を評価するに際しては鉛直振動に対するレベルを評価するだけでは不十分であり、特に建物内での振動レベルをうんぬんする場合には水平振動に対する振動レベルに対しても十分注意を払わなければならないことが予想される。

そこで、本研究では発破振動および交通振動の水平・鉛直成分の同時観測を行い、これに建物の応答特性を加えて建物内での水平振動レベルおよび鉛直振動レベルを求め、両者の比較検討を行った。振動レベルを求めるには振動レベル計を用いるのが一般的であるが、計算機を

* 正会員 工修 山口大学助手 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(同上)

*** 宇部興産(株) 苅田セメント工場・工場長
(〒800-03 福岡県京都郡苅田町長浜)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

用いて数値的に振動レベルが求められれば構造物の応答解析を含めた一連の解析がすべて計算機内で行うことができ、効率よい広範囲にわたる解析が可能となる。したがって、ここでは計算機によるシミュレーションによって振動レベルを評価した。振動レベル計の計算機によるシミュレーションにはすでに著者らが開発したプログラム^{3),4)}を用いた。また、構造物の応答特性を考慮に入れた振動レベルの評価に、後述する応答スペクトルの概念を導入した。

2. 振動レベル計と計算機によるそのシミュレーション

計算機による振動レベル計のシミュレーション手法に関しては、すでに著者らの一連の研究^{3),4)}に詳しく述べているので、本章では、まず振動レベルの定義を述べ、これと振動レベル計の関係を説明し、次に振動レベル計のシミュレーション手法を簡単に述べる。

(1) 振動レベルと振動レベル計

振動レベル VL は次式で定義され、デシベル (dB) 表示される¹⁾。

$$VL = 20 \log_{10} (A/A_0) \quad (\text{dB}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 A_0 は基準となる加速度で $A_0 = 10^{-5} \text{m/s}^2$ である。また、 A は周波数に対する人体感覚補正を行った後の加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$A = [\sum A_n^2 \cdot 10^{c_n/10}]^{1/2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 A_n は周波数 f_n 成分の加速度実効値である。また c_n は f_n に対する相対レスポンスであり、図-1 に示す周波数特性を有する¹⁾。したがって、振動レベル計にはこの周波数特性を有する振動感覚補正回路が備えられている。

次に、式 (1) は継続時間が無限大の定常振動に対して定義された式であるから、車両の通過や発破による振動のように有限な継続時間を有する振動に対しては、この継続時間の影響を考慮に入れなければならない。図-

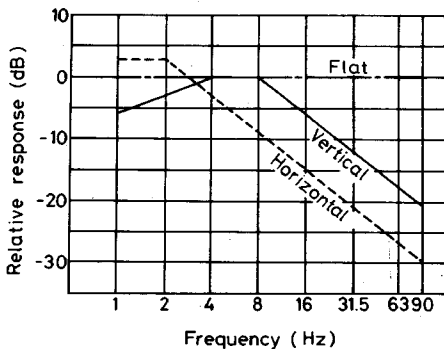


図-1 相対レスポンスと周波数の関係

2 は衝撃正弦振動 (ある時間間隔のみ正弦振動が継続する振動) の継続時間と人体感覚との関係を示したものである¹⁾。したがって、振動レベル計にはこの継続時間に対する補正回路も備えられており、具体的には振動レベル計の指示特性 (平滑時定数: 0.63 秒) に反映されている。

以上のように、振動レベル計は図-1, 2 に示した周波数と継続時間に対する人体感覚特性を表現するための回路を内蔵しており、前者はフィルター回路として、後者は指示特性回路として与えられている。さらに、JIS C 1510 の解説において、90 Hz 以上の周波数に対して -12 dB/oct 以上の遮断特性をもたせることが望ましいと述べられている。以下本研究においては、前者、すなわち、図-1 に対応するフィルター回路を特に振動感覚補正回路とよび、90 Hz 以上の周波数に対するフィルター回路をフィルター補正回路とよぶことにする。

(2) 振動レベル計の数値シミュレーション

振動レベルを数値的に求めるには、上述の振動レベル計に内蔵されている 3 回路を数値的にシミュレーションすればよい。これらはデジタルシステム理論を用いることにより可能であり、その概略を述べると以下となる⁵⁾。なお、鉛直振動レベルと水平振動レベルとの相違点は図-1 に示した相対レスポンスのみであるから、振動レベル計の回路もこれに対応する振動感覚補正回路のみが異なり、他の 2 回路は共通となる。

a) フィルター補正回路:

90 Hz 以上の周波数に対して -12 dB/oct の特性で回路を設計すれば、入力加速度の時系列を $\{x\}$ とし、その第 n ステップ目を x_n とすると、それに対する出力 y_n は次式で与えられる。

$$y_n = (1 - 2e^{-a\Delta t} \cos(a\Delta t) + e^{-2a\Delta t}) \cdot x_{n-1} + 2e^{-a\Delta t} \cos(a\Delta t) y_{n-1} - e^{-2a\Delta t} y_{n-2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $a = 400.3$ であり、 Δt はサンプリング間隔 (s) である。

b) 振動感覚補正回路:

式 (3) で得られた y_n を改めて x_n とし、図-1 に示

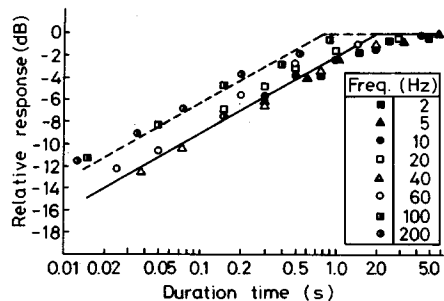


図-2 正弦振動の継続時間とレベル差の関係

した周波数特性をもつフィルターにこれを通して得られる出力 y_n は鉛直, 水平それぞれ次式で与えられる.

b-1) 鉛直方向

$$y_n = Kx_n - Ke^{-c\Delta t} [\cos(b\Delta t) + (c/b)\sin(b\Delta t)] \cdot x_{n-1} + 2e^{-c\Delta t} \cos(b\Delta t) y_{n-1} - e^{-2c\Delta t} y_{n-2} \dots (4 \cdot a)$$

ここに, $b=11.06$, $c=26.03$, K は Δt の関数で $K=0.00112+0.04827 \Delta t$ で与えられる.

b-2) 水平方向

$$y_n = K(1 - e^{-\omega\Delta t}) x_{n-1} + e^{-\omega\Delta t} y_{n-1} \dots (4 \cdot b)$$

ここに, $K=1.85$, $\omega=2\pi f$ で, $f=1.60$ (Hz) である.

c) 指示特性回路:

振動レベル計の指示値は以下に示す式 (5), (6), (7) で与えられる電気回路の第 n ステップ目の出力 V_{c_n} の対数で与えられる. すなわち, 式 (4・a) あるいは (4・b) で求めた y_n の二乗を V_{s_n} とすると ($V_{s_n} = y_n^2$),

c-1) 立ち上がり時 ($V_{s_n} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \geq V_{c_{n-1}}$)

$$V_{c_n} = (V_{s_n} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - V_{c_{n-1}}) \cdot (1 - e^{-\Delta t / \tau_1}) + V_{c_{n-1}} \dots (5)$$

c-2) 減衰時 ($V_{s_n} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) < V_{c_{n-1}}$)

i) $V_{s_n} \geq V_{c_{n-1}}$

$$V_{c_n} = (V_{c_{n-1}} - V_{s_n} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) e^{-\Delta t / \tau_2} + V_{s_n} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \dots (6)$$

ii) $V_{s_n} < V_{c_{n-1}}$

$$V_{c_n} = V_{c_{n-1}} e^{-\Delta t / \tau_2} \dots (7)$$

ここに, 時定数は $\tau_1 = CR_1R_2 / (R_1 + R_2)$, $\tau_2 = CR_2$ で表わされ, $C=100 \mu F$, $R_1=71000 \Omega$, $R_2=6950 \Omega$ であり, V_{c_n} は電圧として与えられる.

振動レベル計の指示値 (dB) は V_{c_n} を用いて次式で与えられる.

$$VL = 120 + 20 \cdot \log(\sqrt{V_{c_n}} / V_{max}) \dots (8)$$

ここに, $V_{max}=301.2$ である.

以上要約すると, 加速度の時系列 $\{x\}$ が振動レベル計に入力されると, まず式 (3) により 90 Hz 以上の周波数に対して -12 dB/oct のフィルターがかかり, 次に式 (4・a) または (4・b) によって図-1 に示す周波数特性の補正がなされ, さらにこれに式 (5)~(7) の指示特性によって図-2 に示す継続時間の補正がなされる. 以上の結果として, 最終的に式 (8) によってデシベル値 (時間の関数) が与えられることになる.

3. 家屋の振動応答を考慮に入れた振動レベルの評価法

(1) 振動レベルの応答スペクトル

応答スペクトルは, ある地動に対する振動系の最大応答を系の固有振動数の関数として表わしたものである.

この振動系としては, 線形 1 自由度系が一般に用いられ, 減衰定数がパラメーターとなる. 種々の地動に対して応答スペクトルを求めておけば, 振動系の固有振動数と減衰定数が判明しているときいちいち応答計算をすることなく, この応答スペクトルから振動系の最大値を推定することができる. 通常の応答スペクトルにおいては, 加速度, 速度, 変位の最大応答量がスペクトル表示される. 李ら⁶⁾は, 発破振動に対して応答スペクトルの概念を導入し, 発破振動の構造物への影響を検討するのに応答スペクトルを利用して行うことの有効性を示している. 本研究では構造物への影響ではなく, 公害振動の立場から 1 自由度系の応答加速度から求めた最大振動レベルを通常の応答スペクトルにならってスペクトル表示する. このようにして得られた振動レベルは地動の振動レベルではなく, 振動系の応答, 換言すれば構造物の応答から求めた振動レベルである. これによって, 構造物の動特性と人体感覚とを同時に考慮に入れた公害振動の考察が可能になる.

(2) 振動レベルの応答スペクトルの作成

振動レベルの応答スペクトル作成の手順を図-3 に示す. すなわち, まず図-3(a) に示す 1 自由度のばね-質点モデルに観測加速度記録 $\ddot{z}_0(t)$ を入力して, 応答計算, すなわち次式で与えられる運動方程式を解くことによって絶対応答加速度 ($\ddot{z}_0(t) + \ddot{x}(t)$) を求める.

$$\ddot{x} + 4\pi f_0 h \dot{x} + 4\pi^2 f_0^2 x = -\ddot{z}_0 \dots (9)$$

ここに, x は相対変位, f_0 は系の固有振動数, h は減衰定数, \cdot は時間に関する微分を意味する.

次に, 求めた ($\ddot{z}_0(t) + \ddot{x}(t)$) を式 (3) の入力の時系列 $\{x\}$ としてシミュレーションプログラムを用いて VL の時刻歴を求める (図-3(b)). その最大値 VL_{max} を h をパラメーターとする f_0 の関数として求めスペクトル図を求める (図-3(c)).

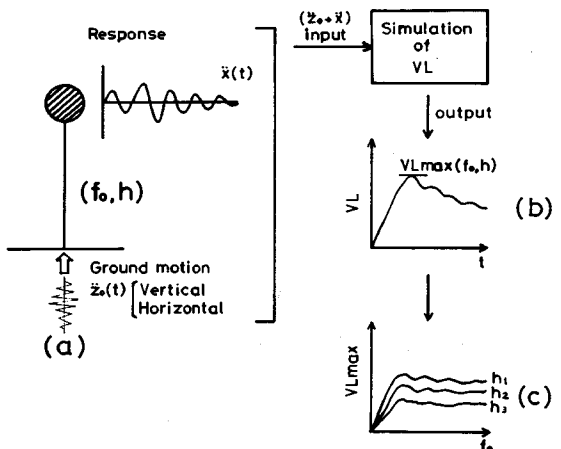


図-3 振動レベルの応答スペクトル作成手順

次章においては、この手順によって求めた振動レベルの応答スペクトルを用いて、実際の構造物（家屋）の固有振動数近傍の周波数領域において水平および鉛直振動レベルの比較検討を行う。

4. 解析結果と考察

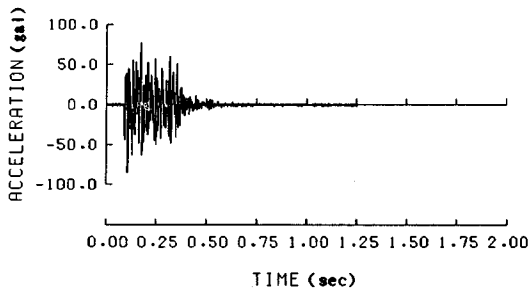
観測加速度記録は、その振動源によってかなり異なる周波数成分をもつ。そこで、本研究においては発破振動と交通振動を取り上げ、後者については通常の舗装道路上と高架の高速道路橋上を通過する自動車による振動をその対象とした。ここで、水平振動の方向は発破振動に関しては発破点からほぼ放射方向に、交通振動に対しては舗装道路の場合には道路と直角方向のみ、高架道路の場合には橋軸直角方向と橋軸方向をとった。

(1) 発破振動

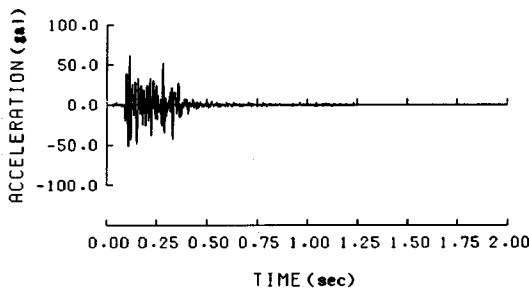
観測加速度記録としては、石灰石鉱山の操業ベンチ発破から生じる振動を100~300 m離れた岩盤上と400~800 m離れた地盤上で測定したものをを用いた。

a) 岩盤上の記録

図4(a)に岩盤上で観測された鉛直方向の加速度波形の代表例 ($VL_{max}=65.8$ dB) を、図5にそれを入力したときの1自由度系 ($f_0=10$ Hz, $h=0.05$) の絶対応答加速度波形を、図6にその絶対応答加速度を入力したときの振動レベルの時刻歴 ($VL_{max}=69.1$ dB) を、さらに図7(a)にこうして求めた振動レベルの応答ス



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図4 岩盤上で観測された発破振動加速度波形

ペクトルを示す。図中の1点鎖線は人間の感覚いき値である振動レベルが60 dBの線である。図4(b)、図7(b)に、同じ地点で観測された水平方向の加速度波形 ($VL_{max}=55.8$ dB) と、それから求めた応答スペクトルを示す。

図7(a)、(b)の鉛直および水平方向の振動レベルの応答スペクトルを比較すると以下のことがわかる。

i) 鉛直方向では周波数（固有振動数）が高くなるに従って振動レベルは増大し、約17 Hz以上では減衰定数 $h=0.0$ の場合を除いてほぼ一定のレベルとなっている。これに対して水平方向では、10 Hz くらいまではほぼ一定のレベルにあり、その後徐々にレベルは増大し、約28 Hz以上になると再びほぼ一定の振動レベルとなっている。

ii) ほぼ全周波数領域において、鉛直成分の方が振動レベルは高い。

上述第ii)項をさらに詳しく調べるために、図8に水平振動レベルの鉛直振動レベルに対する比（以下レベル比と称する）を示した。地盤上での観測波形に対する水平振動レベルの鉛直振動レベルに対する比は0.85

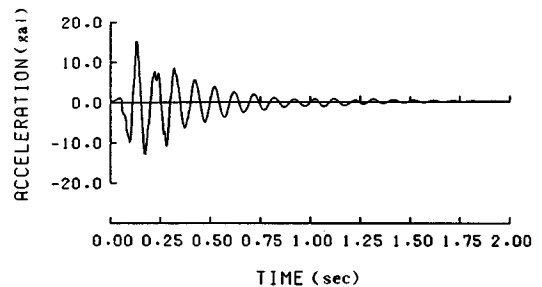


図5 1自由度系の絶対応答加速度波形 ($f_0=10$ Hz, $h=0.05$)

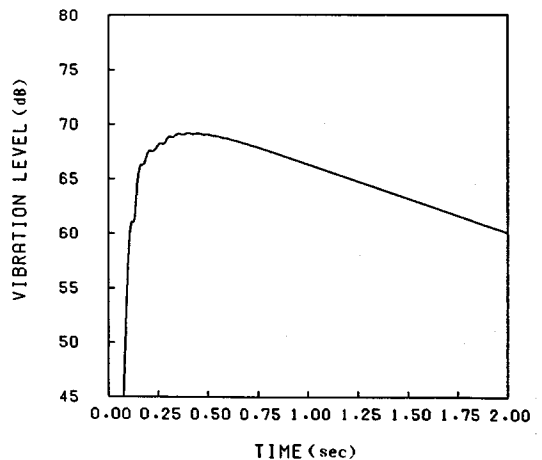


図6 図5の波形に対する振動レベルの時刻歴

(55.8 dB/65.8 dB) であるが構造物の応答を考慮すればこの比は図にみられるように構造物の固有振動数と減衰定数によって複雑に変化することがわかる。一般的な傾向として図-1に示された相対レスポンスからわかるように低周波数域では人体の水平振動に対する感覚が敏感なため、水平振動レベルが鉛直振動レベルより大きく、ごく周波数が低いところではレベル比は1.0を越えることになる。しかし、周波数が高くなるとこの比は漸減し、

ほぼ横ばいの傾向を示す。高周波数側でのこの比はほとんど1.0以下であるが、発破振動波形の卓越周波数の影響により図中の27 Hz付近にみられるようなピークを示すことがある。

ところで、このレベル比がいくら大きくても、振動レベルそのものが低ければ水平振動レベルは問題にならない。そこで、図-8中に減衰定数の大きさに分けて、水平方向の応答の振動レベルが人体に不快感を与える感覚いき値と考えられる60 dBを越える周波数の範囲を実線あるいは破線で示した。したがって、この線の範囲内において、レベル比が1.0以上であれば鉛直振動レベルよりも水平振動レベルが高く、しかもその大きさも60 dB以上であり、人体に対する不快感が水平振動によりもたらされることになる。

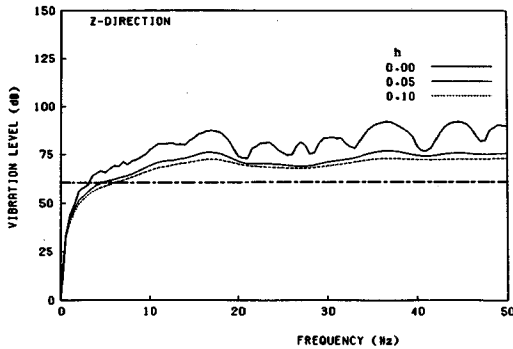
図からみられるようにレベル比が1.0より大きく、かつ振動レベルが60 dBを越す範囲は $h=0.0$ の26~28 Hz 近くを除いてない。

異なる発破条件、異なる距離に対して岩盤上で得られた他の6地点での記録（したがって合計7地点）に対しても、ほぼ同様の結果が得られた。

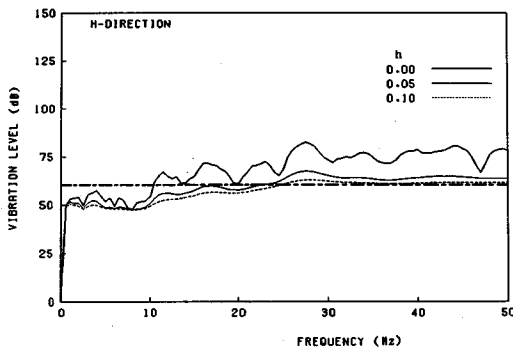
このことから、岩盤上にある一般的な家屋（固有振動数が数 Hz~10 Hz 程度）については発破振動に対して、鉛直振動成分をモニタリングしておけばよいといえる。

b) 地盤上の記録

図-9(a), (b) に地盤上で観測された代表的な鉛直加速度記録 ($VL_{max} = 52.8$ dB) および水平加速度記録



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図-7 振動レベルの応答スペクトル (発破振動：岩盤上)

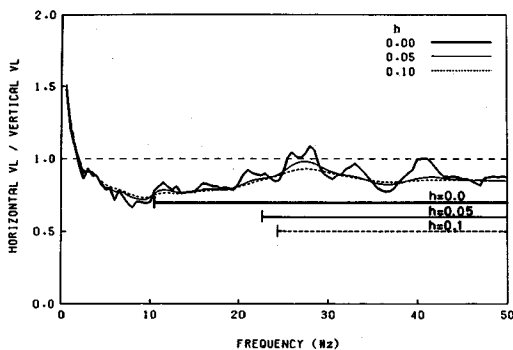
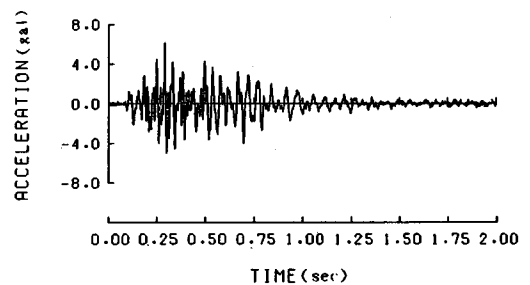
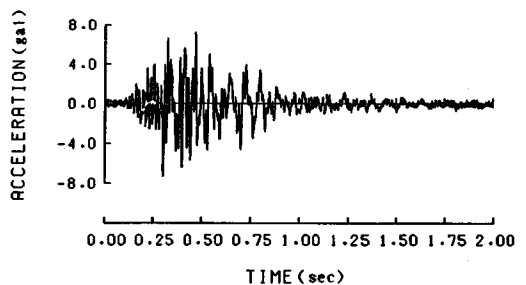


図-8 水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比 (発破振動：岩盤上)



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図-9 地盤上で観測された発破振動加速度波形

($VL_{max}=48.9\text{ dB}$) を、図-10(a), (b) にそれらに対して求めた振動レベルの応答スペクトルを示す。図-9(a), (b) の加速度記録には図-4(a), (b) の岩盤上の記録と比較して、低い周波数成分が多く含まれていることが認められる。

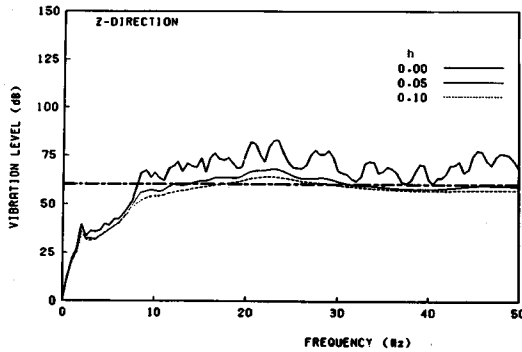
次に、図-10(a), (b) に示したスペクトルの比を求め、これを図-11 に示した。周波数の増加に対するレベル比の変化の傾向は岩盤上の場合と似ているが、約 15 Hz

くらいまでは水平振動レベルの方が一般的に高くなるのがわかる。しかも、 $h=0.0$ の場合には 9 Hz 以上のほぼ全周波数域で、 $h=0.05$ の場合にも 10~16 Hz の周波数域で水平振動レベルが 60 dB を越えている。すなわち、これは減衰定数の小さい家屋に対しては固有振動数 10 Hz 前後の場合に水平振動レベルが鉛直振動レベルより大きくなる可能性があることを示している。したがって、振動レベルのモニタリングとしては両方向を行う方が好ましいといえる。

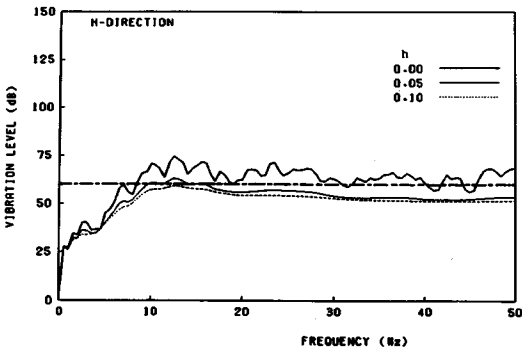
(2) 交通振動

a) 平坦地の幹線道路沿線の振動

平坦地の国道沿線で、切土と思われる場所、およびやや盛ったと思われる場所の 2 か所 (測定場所は路肩、振源からの距離は数 m) を選び、種々の重量車両の通過に対して合計 20 回の測定を行った。それぞれの場所での振動波形に特に大きな相違はみられなかったことから解析例としては盛土部に対するものを取り、その例に対する加速度記録およびそれに対する振動レベルの応答スペクトルを図-12(a) ($VL_{max}=57.7\text{ dB}$), (b) ($VL_{max}=40.5\text{ dB}$), 13(a), (b) に示す。(a) は鉛直成分、(b) は水平成分に対するものである。水平振動の振動レベルがほぼ 60 dB 以下であるのに対して鉛直振動のそれはかなり大きい値が得られている。図-14 はレベル比であり、かなり低い周波数で 1.0 を横切り、その後はほぼ一定値を保つ傾向にある。水平振動レベルは 15~30 Hz 間に $h=0.0$ で 60 dB を越える範囲が存在するがその範



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図-10 振動レベルの応答スペクトル (発破振動：地盤上)

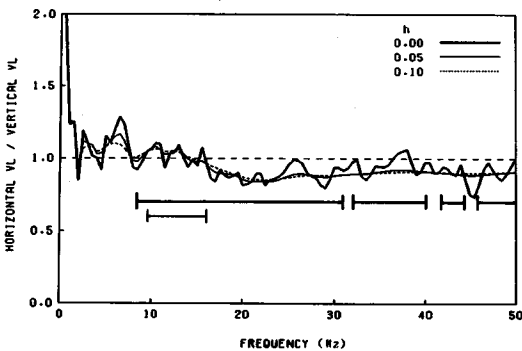
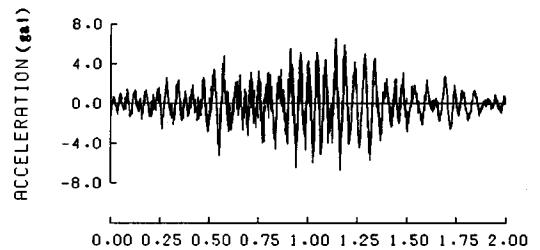
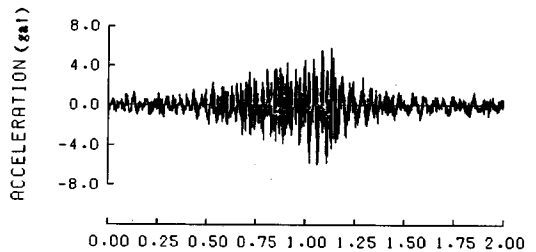


図-11 水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比 (発破振動：地盤上)



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図-12 幹線道路沿線の交通振動加速度波形

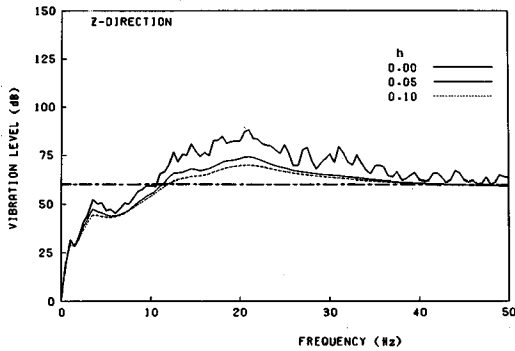
囲でのレベル比は1.0以下である。したがって、この種の交通振動の場合には鉛直振動に対して振動レベルをモニタリングしておけばよいといえよう。

b) 高架道路下における振動

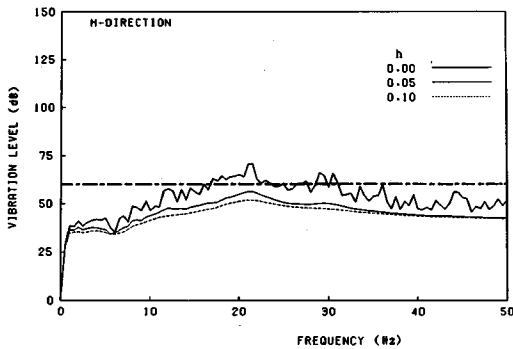
b-1) 橋脚直下

図一15(a), (b), (c) に高速道路の高架直下の地表面で観測された鉛直および水平2成分、計3成分の加速度記録 ($VL_{max}(Z) = 53.2 \text{ dB}$, $VL_{max}(X) = 56.0 \text{ dB}$,

$VL_{max}(Y) = 52.0 \text{ dB}$) を示す。ここで、() 内の Z は鉛直方向成分, X は橋軸直角方向水平成分, Y は橋軸方向水平成分を意味する。図一16(a), (b), (c) にそれらに対して求めた振動レベルの応答スペクトルを示す。地表面の観測記録の振動レベルは前述のとおり鉛直方向, X 方向, Y 方向それぞれ 53.2 dB, 56.0 dB, 52.0 dB と 60 dB 以下であるが応答スペクトルは振動方向にかかわらず 3 Hz 前後でピークを示し、その値が 60 dB を越えている。図一17 は X 方向の鉛直方向に対する、図一18 は Y 方向の鉛直方向に対するレベル比である。レベル比の形状は発破振動、交通振動の結果とよく似ているが、ほぼ一定となるレベル比の値が他の場合に比べて大きく、1.0 前後であることがわかる。また、応答の水平振動レベルの大きさについては上述のとおり低い周波数から 60 dB を越える範囲が存在し、しかもその範囲でレベル比が 1.0 を越える場合がある。なお、レベル比が 1.0 を越える範囲は X 方向の場合に広いようである。また、合計 5 回の測定に対する結果もこれと同様であった。

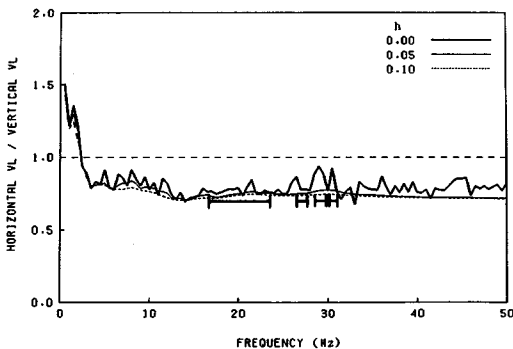


(a) 鉛直方向

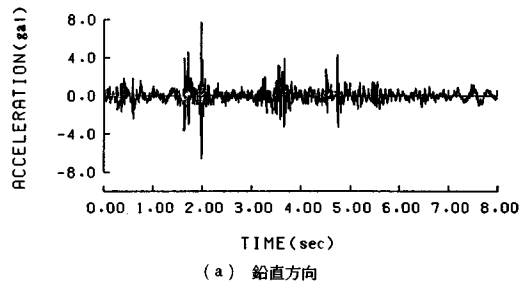


(b) 水平方向

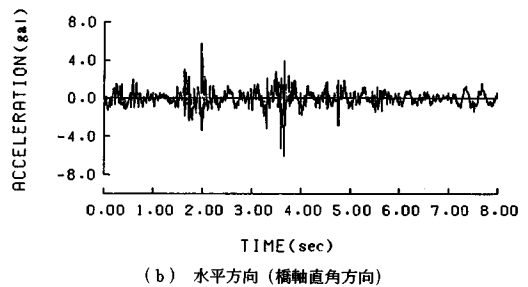
図一13 振動レベルの応答スペクトル
(交通振動：幹線道路沿線)



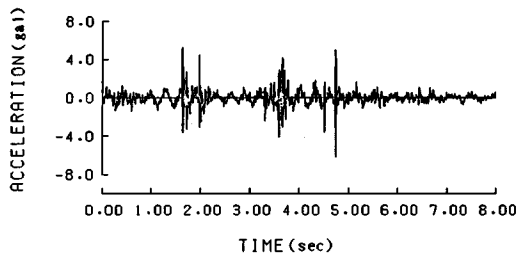
図一14 水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比
(交通振動：幹線道路沿線)



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向 (橋軸直角方向)



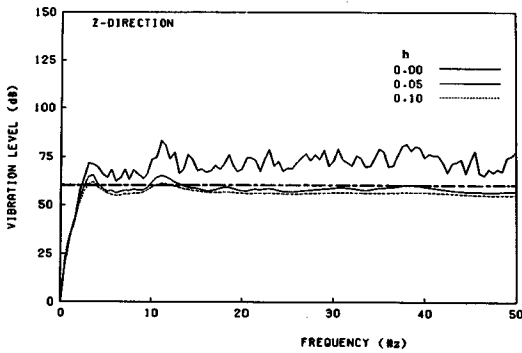
(c) 水平方向 (橋軸方向)

図一15 高架道路橋脚直下の交通振動加速度波形

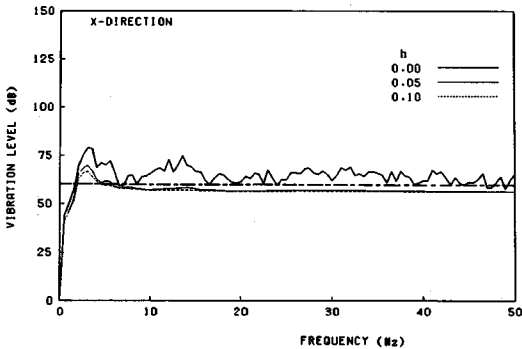
したがって、橋脚に近い家屋の場合には鉛直、水平の両方向をモニタリングする必要がある。特に水平方向のモニタリングの場合には測定方向にも注意する必要がある。

b-2) 高架から100m地点上にある家屋

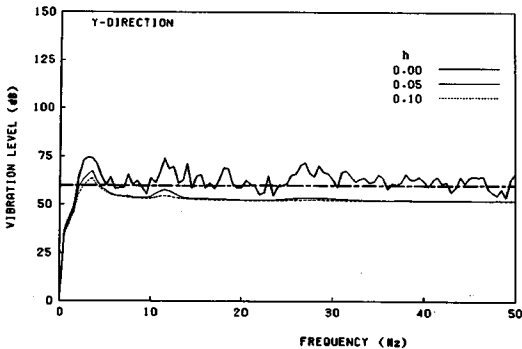
図一19(a), (b), (c) に高架の橋脚から約100m離れた地表面において観測された3成分の加速度記録 (Z方向: $VL_{max}=37.1$ dB, X方向: $VL_{max}=40.2$ dB, Y方向: $VL_{max}=39.2$ dB) を、図一20(a), (b), (c) にそれらに対して求めた振動レベルの応答スペクトルを示



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向 (橋軸直角方向)

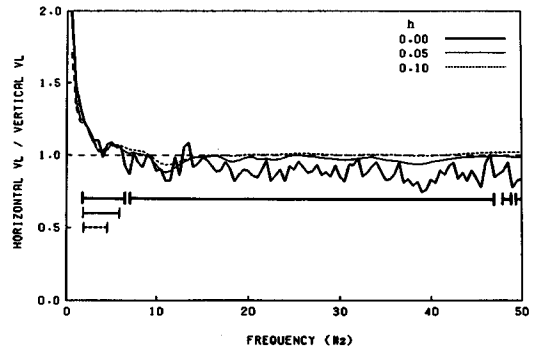


(c) 水平方向 (橋軸方向)

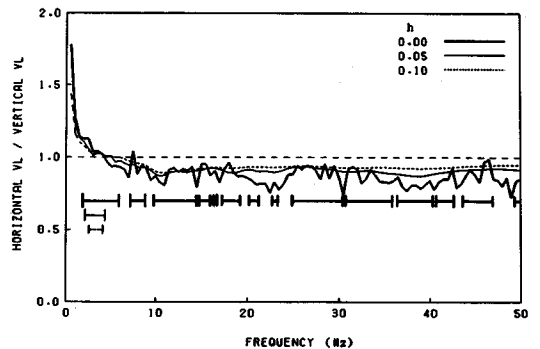
図一16 振動レベルの応答スペクトル (交通振動: 橋脚直下)

す。この付近一帯は静かな住宅地であり、高架橋脚から100m離れているが、他に振動源となるものは見当たらず、また交通流と振幅との対応もみられることから、この点における振動は高架から伝わってくるものと考えてもよからう。さて、応答スペクトルと橋脚直下の結果と同様に振動方向にかかわらず3Hz前後でピークを示し、その後減少したのちに平坦なスペクトル特性を示している。平坦なスペクトル特性を示す領域での応答振動レベルは鉛直方向の $h=0.0$ を除いてはほぼ40dBであり、人体が全く振動を感じないレベルであるが、3Hz付近のピークでは、特に水平2成分では $h=0.1$ で50dB, $h=0.05$ では55dB, さらに $h=0.0$ では60dBを越えて、人体を感じる程度まで増幅されている。

図一21, 22はそれぞれX成分とY成分のZ成分に対するレベル比を示している。この図において他の振動源の場合と大きく異なるのは $h=0.05$ においてはごく狭い周波数領域においてのみ鉛直振動レベルの方が大きくなっており、 $h=0.1$ においてはすべての周波数領域において水平振動レベルが鉛直振動レベルを上回っている点である。これと、上述したように3Hz付近では振動レベルは人体を感じる程度までに増幅される可能



図一17 橋軸直角方向水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比 (交通振動: 橋脚直下)



図一18 橋軸方向水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比 (交通振動: 橋脚直下)

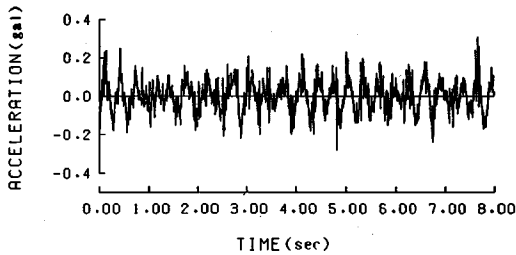
性があること、さらに一般の家屋の固有振動数が2~10 Hzであることを勘案すると、鉛直よりもむしろ、水平の振動レベルをモニタリングすべきであるといえる。

そこで、この結論の妥当性を示すために、高架道路からの交通振動を上記観測点に建つ家屋内で振動レベル計を用いて水平、鉛直同時観測した例を表一に示す。観測の対象とした家屋は鉄骨4階建てで、3階および4階が観測点である。観測成分は水平2成分と鉛直成分の計3成分である。測定にあたってはピックアップ(リオン製PV-83)を直接壁側の床面上に配置した。観測加速度波形からこの家屋の固有振動数は約3 Hzであることが認められた。この表より水平2成分は3階、4階のいずれの場合も鉛直成分より大きく、その大きさも60 dBに近い。すなわち、この結果は前述の数値シミュレーション結果の妥当性を示しているといえよう。

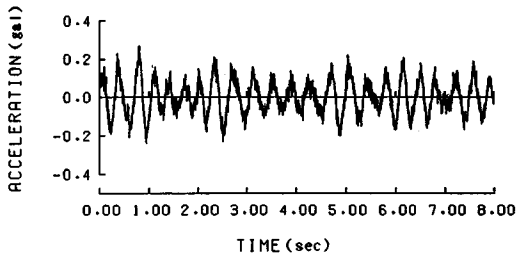
5. 結 論

本研究は構造物の動的応答特性を考慮に入れて、発破振動および交通振動の振動レベルを評価し、水平振動の

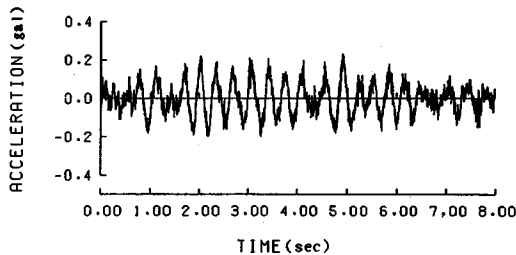
計測の重要性を示したものである。構造物の応答を考慮に入れるに際しては、構造物の固有振動数および減衰定数、さらには振動方向(水平振動が卓越するか鉛直振動が卓越するか)等について配慮しなければならない。前2者については耐震工学の分野でよく用いられている応答スペクトルの概念を用いて表現すると便利である。また振動方向については、構造物の振動特性を考慮すると従来鉛直方向のみが注目されていたが、水平方向の振動レベルも考えなければならない可能性がある。



(a) 鉛直方向

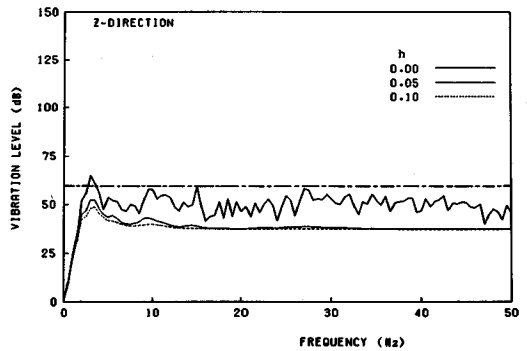


(b) 水平方向(橋軸直角方向)

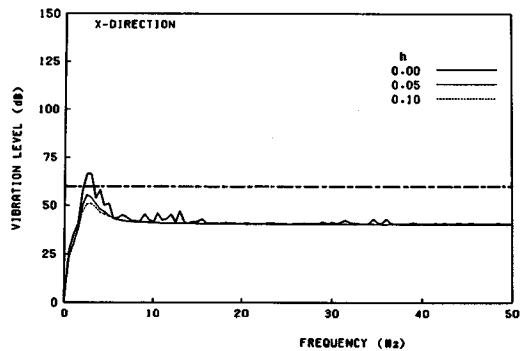


(c) 水平方向(橋軸方向)

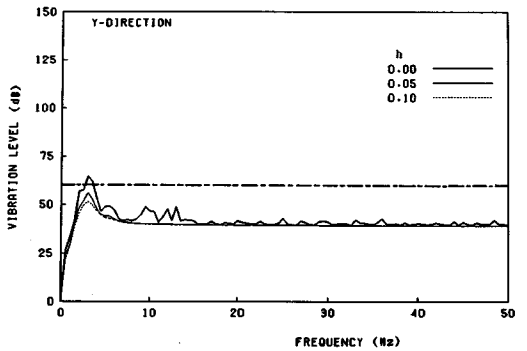
図一十九 高架道路から100 m地点の交通振動加速度波形



(a) 鉛直方向



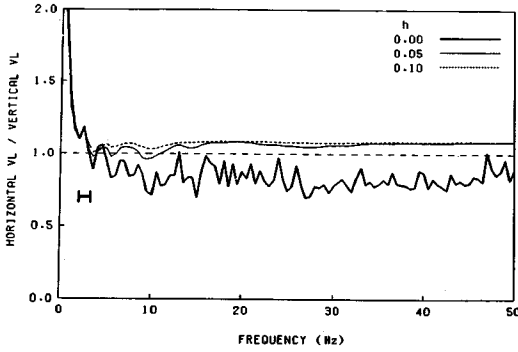
(b) 水平方向(橋軸直角方向)



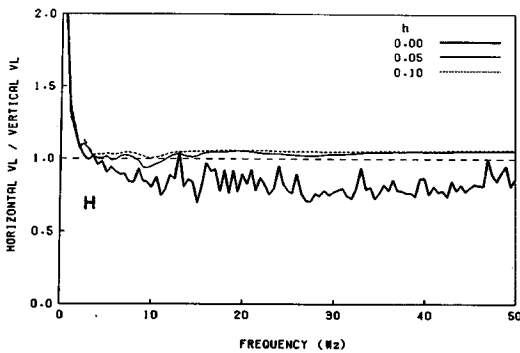
(c) 水平方向(橋軸方向)

図一二十 振動レベルの応答スペクトル

(交通振動：高架道路から100 m地点)



図—21 橋軸直角方向水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比 (交通振動：高架道路から100 m 地点)



図—22 橋軸方向水平振動レベルの鉛直振動レベルに対するレベル比 (交通振動：橋脚直下)

以上の観点から、本研究では振動レベルの応答スペクトルを表示する手法を提案した後、発破振動および交通振動の観測記録から鉛直および水平方向の振動レベルを求め、住民を対象とする公害振動計測における水平方向振動レベルの重要性を示した。

本研究によって得られた主な知見は以下のとおりである。

1) 発破振動に関して

岩盤上に構造物がある場合、一般に振動レベルは従来どおり鉛直方向の振動レベルでモニタリングすればよい。しかしながら、構造物の固有振動数が低い場合 (5~6 Hz 以下) には水平方向の振動レベルでモニタリングする必要がある場合がある。

一方、地盤上に構造物がある場合には、約 10 Hz 以下の固有振動数に対しては水平振動レベルの方が鉛直振動レベルよりも大きくなる可能性があることがわかった。

2) 交通振動に関して

平坦地にある道路からの振動に対しては、従来どおり

表—1 高架道路から 100 m 地点に建つ家屋内の振動レベル計測結果 (dB)

	3 F			4 F		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	51.3	59.4	43.6	55.1	62.7	47.6
2	50.3	59.4	43.6	52.1	59.9	42.7
3	51.3	59.2	43.4	55.1	57.5	42.8
4	53.5	59.9	46.9	52.1	61.0	45.6
5	52.7	60.0	46.9	51.9	55.3	42.1

鉛直方向の振動レベルによるモニタリングでよい。

高架道路の場合は構造物の固有振動数の大小にかかわらず水平方向の振動レベルが鉛直方向のそれを上回る傾向が強いというシミュレーション結果を得た。そして、家屋内における水平、鉛直振動レベルの同時観測結果もそれを裏付けるものであった。これは、振動レベルをモニタリングする場合に、水平方向の振動レベルを用いる必要があることを示すものである。

以上の結果は限られた振動源に対するものであり、一般的な結論を下すにはさらに多くのケーススタディが必要である。しかしながら、上述の結果より、従来振動レベルは鉛直方向のみのモニタリングで評価されていたが、構造物の応答特性を考慮に入れる場合には、鉛直方向のみならず、水平方向の振動レベルによりモニタリングする必要があるといえる。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、阪神道路公団計画部環境対策室の方々には振動記録の提供等多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 公害防止の技術と法規編集委員会編：公害防止の技術と法規 [振動編]，産業公害防止協会，1985。
- 2) 日本音響学会編：騒音・振動 (上)，コロナ社，1983。
- 3) 国松 直・中川浩二・三浦房紀・今村 威：発破振動における振動レベルの推定，土木学会論文集，第 367 号 / VI-4，pp. 45~51，1986。
- 4) 国松 直・三浦房紀・今村 威・中川浩二：振動レベル計の計算機によるシミュレーション，山口大学工学部研究報告，第 39 巻，第 1 号，1988。
- 5) 成田誠之助：デジタルシステム制御—理論と応用—，昭晃堂，1984。
- 6) 李 義雄・佐々宏一・伊藤一郎：発破振動とその応答スペクトルについて，日本鉱業会誌，第 95 巻，第 1094 号，pp. 13~18，1979。

(1988. 7. 14・受付)