

振動障害予測に関する研究

渡 辺 清 治
島 口 正 三 郎

概 要

公害問題を含めて建設工事における振動障害についての問題点は、無振動という工法機械的な問題もあるが、これには限界もあって、現時点で問題となるのは、その許容値と、許容値以下にするためへの施工計画と施工技術的な問題などが、最も大きな課題として存在しているように思われる。したがって、ここではこれらの問題点について現在までの研究成果から、今後のこれらの問題を含めた工事施工計画に必要不可欠である振動の予測の方法について、ある性状を見いだしたので、これをまとめたものである。

1. 振動許容値と規制基準

振動の許容基準値については、人体を対象として、振動公害基準がある。また工場機械などの物を対象として、許容値がある。現行におけるこれら許容基準について、各所で定められているものをまず紹介しよう。また世界的には ISO (国際標準化機構の略) の活動がある。

図-1 は、大島による正弦振動に対する怒限度曲線である。図-2 は、日本建築学会の“振動障害防止に関する設計基準値(案)”で、この基準は、適用範囲を主に建物にすえ付けた設備機械あるいは他の諸機械によって居室に発生する振動に関して設けられたものである。表-1 は、各都府県の振動公害基準値を示すものであり、表-2 は、最も新しい表示方法をとった新潟県の振動規制を示したものである。表-3 には、あまり使用されていないが、作業者の立場から定められたドイツ VDI (2059) の曲線を示した。図-3 は、これらの基準を速度表示したものである。上記基準値のほかに、筆者らがいままでに要求された精密機械の許容値について記すと、次のようなものがある。

電子顕微鏡	0.5gal
電子計算機	運転時 6.25 μ (5~25c/s)
	停止時 25.4 μ (5~25c/s)
電子工業工場	3.0 μ (20c/s)

工作機械の許容値について、図-4 に示す。図はロール研削盤の許容値である。

2. 公害意識の問題について

公害問題としてもう一つたいせつなことは、被害意識また公害意識という心理的な問題である。紙面の都

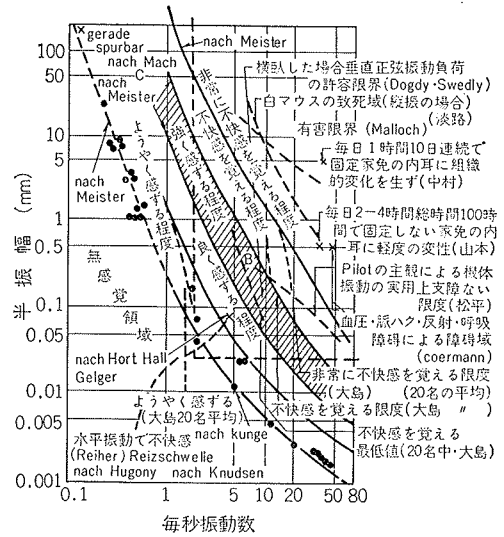


図-1 正弦波振動に対する怒限度 (大島)

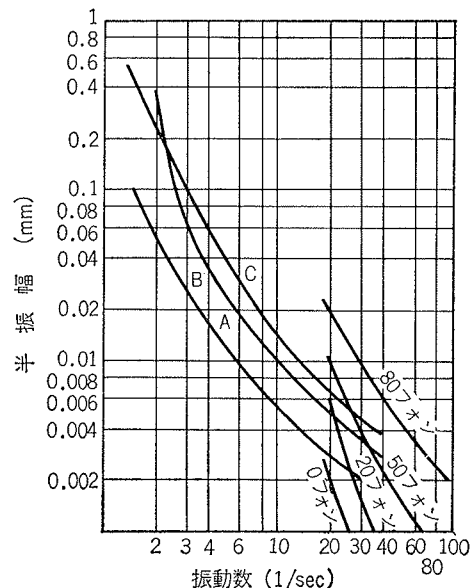


図-2 人体振動感覚曲線

時刻(時)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	0	2	4	6
東京都	-----												
大阪府	-----												
神奈川県	-----												
兵庫県	-----												
地域、地区	都府県	昼間	単夜間	夜間									
住居専用 (文教・兵庫県)	神奈川県 兵庫県	0.3 0.3	0 0	0 0									
住居	東京都 大阪府 神奈川県 兵庫県	0.3 0.5 0.6 0.6	— — 0.3 0.3	0 0.3 0 0									
商業工業	東京都 大阪府 神奈川県 兵庫県	1.1 1.0 0.9 0.9	— — 0.9 0.6	0.8 0.5 0 0.3									
工場適地	大阪府	1.0	—	0.5									
工業専用	東京都 大阪府 神奈川県 兵庫県	1.5 1.5 1.2 1.2	— — 1.2 1.2	1.1 0.7 0.3 0.6									
その他 (未指定)	大阪府 神奈川県	0.5 0.6	— 0.3	0.3 0									

(注) 1. 単位速度mm/s 大阪府：被褥構造物と振源
2. 現在(案)のものを含む を精ぶ線で振源に
3. 測定方法 1mよった地点
東京都：敷地境界線で地 神奈川県：東京都に同じ
表で、上下動水平動の先 兵庫県：被害者敷地内の地
頭値の大きいほう 表最大値

表一 各都府県の振動公害基準値

区別	昼間基準	夜間基準
第一種区域	10 (8~18)	5 (18~8)
第二種区域		
第三種区域	15 (18~20)	10 (20~8)
第四種区域		

表二 新潟県の振動規制 (振動レベル)

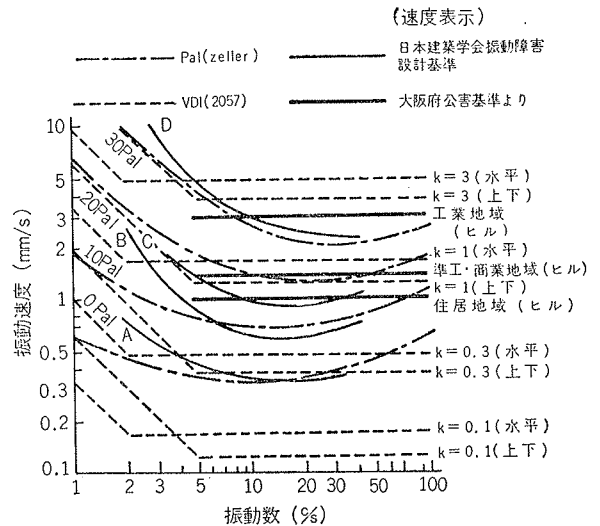
K 値 (VDI-2057)		
K 値	定義	作業
0.1	境界値, 振動感覚のはじまり 弱く感ずる, 不快でない, 十分耐えうる	差支えなし 差支えなし
0.1~0.3		
0.3~1	よく感ずる, 数時間の作用はある程度 不快, 忍びうる	なお差支えなし 支障あり, し かし可能
1~3	強く感ずる, 数時間の作用は正に不快 である, なお忍びうる。	
3~10	不快, 数時間の作用は耐えられない, 最高1時間要求しうる。	強く支障あり なおも可能
以下省略		

表三 VDIのK値

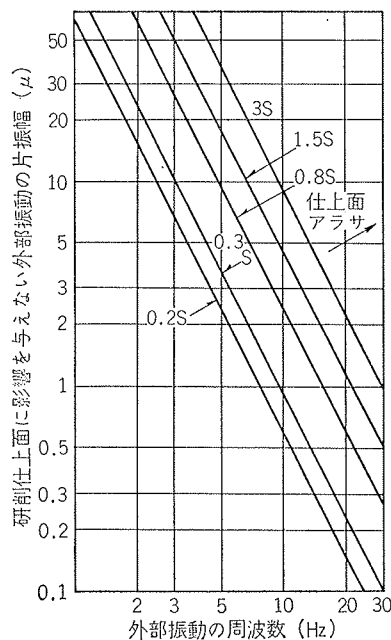
合でくわしく書けないが、要するに人体有感といった一連の基準と個人の感じる被害意識の問題で、アンケート調査などではよくその傾向がつかめる。一例として、土木学会関西支部騒音振動公害委員会と阪神高速道路公団とで調査された興味ある記録がある。

振動源に対して等振動速度領域を測定値から求め領域別にアンケートによる被害意識の調査を行なったものを紹介すると、まず領域の区分を4段階として、

- A外 無感苦情なし, 地盤上下0.15mm/sec. 以下,
- A~B 多少苦情がある。住宅地域夜間領域
- B~D はっきり苦情がでる。準工業地域夜間領域
- D外 強い苦情がでる 商業地域夜間領域



図一 人体振動感覚曲線 (速度表示)



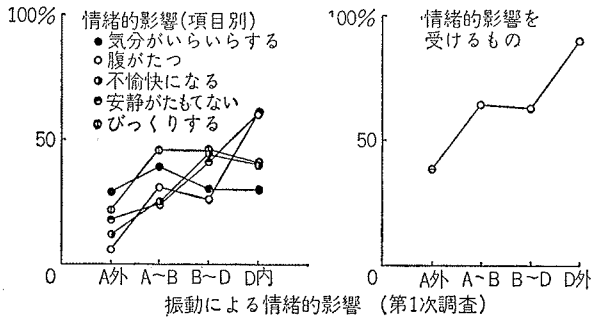
図四 面粗度と外部振動の関係

	1	2	3
A 外 0.15mm/s以下	トラック 48%	くい打 10%	工場機械 8%
A~B 0.3mm/s	トラック 50%	くい打 25%	その他の建設工事 10%
B~D 0.5mm/s	くい打 45%	その他の建設工事 15%	トラック 5%
D 外 1.0mm/s	くい打 90%		

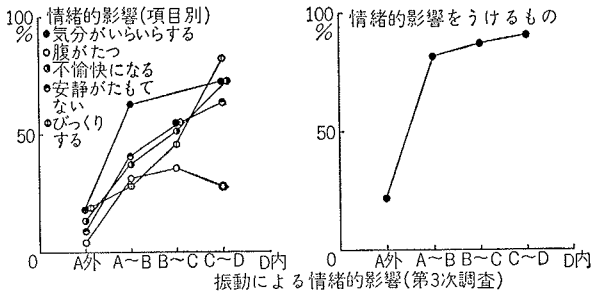
表一 4

振動の情緒的影響について、㊶気分がいらいらする。㊷腹が立つ。㊸不愉快になる。㊹安静が保てない。㊺びっくりする。という分類と領域を比較すると、バイプロハンマーとくい打ちとでは多少反応が異

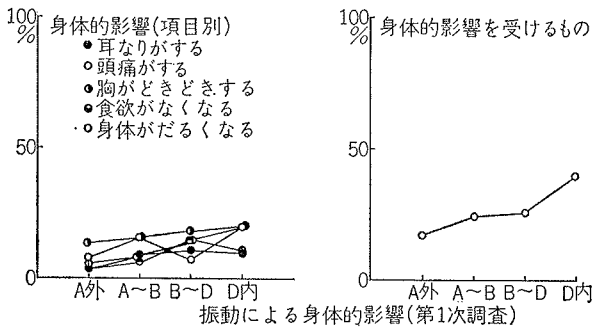
なる。A外, A~Bの立上りがくいのほうが大きい。



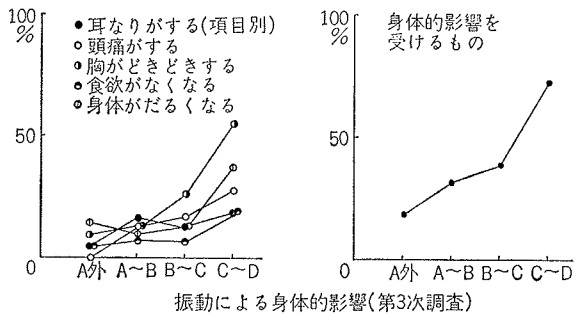
図一五 バイプロハンマーによるくいの引抜き



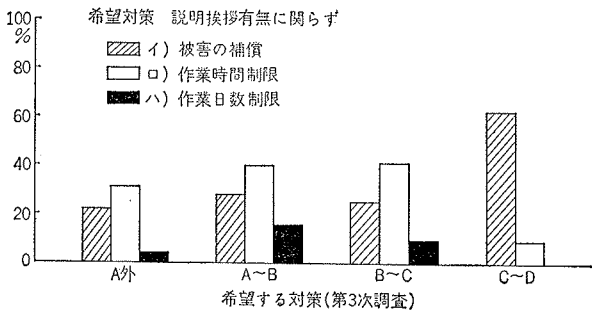
図一六 矢板打込み



図一七 バイプロハンマーによるくいの引抜き



図一八 矢板打込み



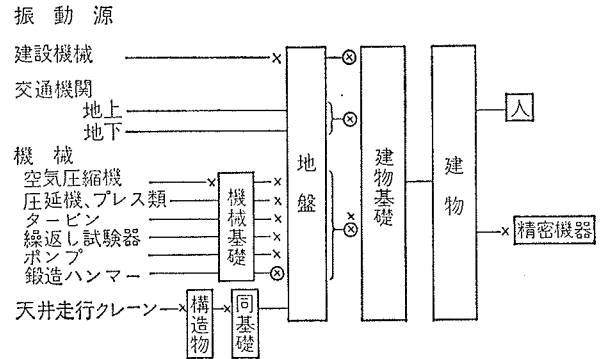
図一九 希望対策

振動の人体への影響について、①耳鳴りがする。②頭痛がする。③胸がどきどきする。④食欲がなくなる。⑤身体がだるくなる。この結果から、パイプロハンマーよりくいの打ちのほうが影響が大きいことがわかる。

工事目的に対する反応としては、公共事業の場合、A~Dどの区分においても60%以上がやむをえないという回答をだしている。希望する対策については、図一9のようになり、Dに近づくほど補償の要求が強くなっている。A~Cまでは作業時間制限の要求が多いことがめだつ。ここに示した二、三の例をよく熟読してもらおうと、振動に対する一般の人々の被害意識の傾向がおぼろげながらつかめたことと思う。このことはこれらの問題の処理に当たってはたいへん重要なことなので参考にあげてみた。

3. 振動障害防止対策の考え方

振動の防止方法には、いわゆる防止、遮断、絶縁と3つの方法が考えられるが、これが実施に当たって、振動がどのような振動伝達経路を通して、障害を及ぼしているかを知り、どの時点において防振処置を講じるのが最善かを知る必要がある。この関係を図式化すると図一10のごとくなる。



図一10 振動の伝達経路と防振処理

図は、防振すなわち振動の軽減を考慮のうえ設計すべきところにはX印、そのうち防振支持など特定の防振方法を取り施工上注意を要するところにはO印がつけられている。これらの防振方法は、理論上、①周期特性を利用する。②伝達率を少なくするに大別できる。また防振の定石ともいわれることは、振動源を小さくし、振源距離からの距離をできるだけ離すことである。たとえば、建設機械の場合は、無音無振動工法をとるとか、交通機関においては路床、路盤をよくするとか、機械類はバランスのとれた質量不平衡力の小さいものを選択するとか、まずとるべき手段であり、そのうえで防振がなされるのが順序である。

図一10に示すように、建設工事における振動はその

ほとんどが地盤を媒体として生じている。そのためくい打ち振動あるいは工事機械等による振動源および距離減衰振動を明らかにすることができると、前項までに説明した公害基準意識などを考慮に入れて、振動公害も考えての施工計画をするうえでも、防振対策をとるうえでもたいへん有益となる。しかし、この問題は地盤構成、波動の伝播などの複雑さから困難な問題ではあるが不可能なことではない。

4. 振動の予測の試み

筆者らは、数年にわたり受託調査してきた実測データをもとに、振動の予測について検討を試みてきたが、二、三の予測の成功のみ、多少の足がかりが得られてきた。その最も取り組みやすいのは、距離減衰の問題である。これは工場のレイアウトとして、工場敷地内のどこに振動する機械をすえるかが、また振動をきらうものがあるとき、どの範囲までくい打ち振動を与えてよいかの問題になったときに役立つ。

図一11のように縦軸に振動量(変位, 速度, 加速度)を示し、横軸に振源距離をとってグラフ化すると、一般に双曲線で表わされる。いま、このグラフを同様な方法で両対数グラフに描き表わすと、図一12のごとく直線表示となる。図一12は、振動量とあわせ音響関係で適用されているある基準値に対する減衰量デシベル(dB)を用い、エネルギーレベル(以下、振動レベルと呼ぶ)で表わしたものである。

振動レベル(dB)について、距離減衰を見ると、次のような関係がある。

振源距離による振動の減衰が $-3\text{dB}/2\text{d}$ の勾配で表わされるとき、距離減衰は、距離2倍に対して振源

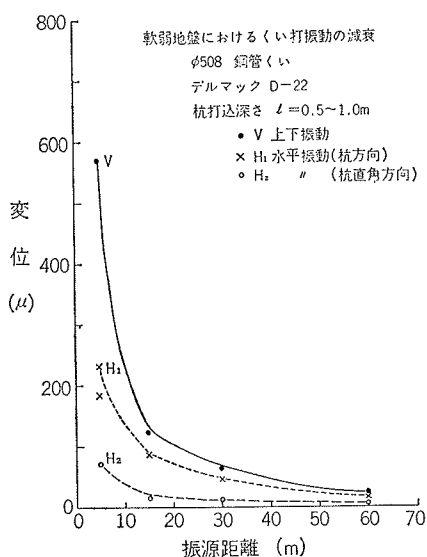
距離に逆比例した形で減衰することを示し、円状すなわち単純な表面波伝播による減衰性を表わす。同様に $-6\text{dB}/2\text{d}$ の場合は、距離2倍に対し、振源距離の逆2乗の形で球状に減衰することがわかる。これらのことを考慮のうえ、実測値について地盤の距離減衰を調査した。

図一12, 図一13はくい打ち、発破に対する振動レベルと距離の関係図である。地盤状況, くい打ち機種の相違から減衰は一定ではない。しかし全体としては、距離2倍に対して $-3\text{dB}/2\text{d}$ から $-6\text{dB}/2\text{d}$ の範囲内で減衰性を示す。

軟弱地盤におけるくい打ち振動あるいはG.L. -4m地点の人工地震の減衰は、距離2倍に対し、 $-3\text{dB}/2\text{d}$ 勾配の表面波伝播による減衰を示す傾向が見受けられるが、一般に $-6\text{dB}/2\text{d}$ の逆2乗則に近い減衰を示している。これらのことを考慮し、地盤構成を十分確認したうえである地点の振動が明白ならば、上記減衰勾配を利用して振動を予測することができると思う。

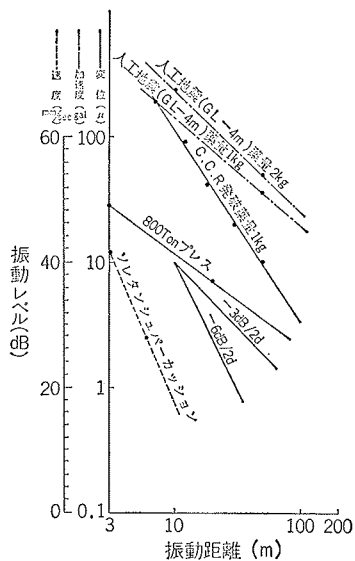
くい打ち振動が地下構造物に与える振動の予測について、図一14, 図一15の実測結果から次のような傾向が得られている。

図一14は、くい打ち振動の放水路への影響、図一15は、地下鉄工事への影響を調査した結果を示したものである。図一14, 図一15より、くい打ち振動が地下構造物に与える振動の最大値は、くいの貫入深さ、すなわちくいの先端位置が地下構造物とある角度(地盤の性状によって、最大値を示すときの角度は一定ではないが、実測値記録からはだいたい $20\sim 25$ 度、 $40\sim 50$ 度を示すとき最大値を示している。)を示すとき、その地点において最大振動を与えている。そのときの振動値につい

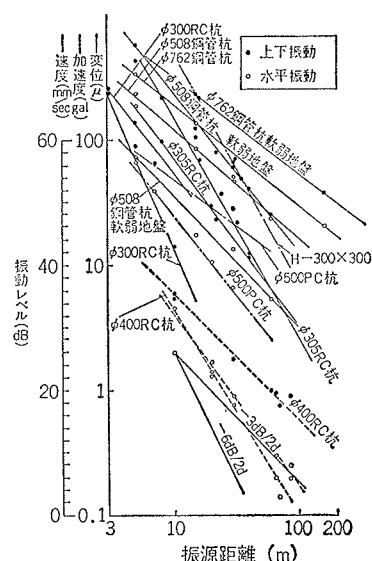


図一11 軟弱地盤におけるくい打ち振動の影響

脚注: $\text{dB}/2\text{d}$ の d は distance の略である



図一12 くい打ちによる減衰振動



図一13 発破による減衰振動

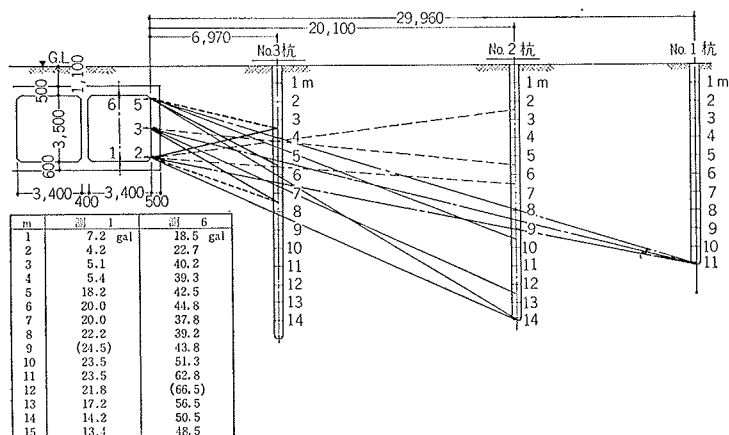


図-14 くい打ち振動の放水路への影響

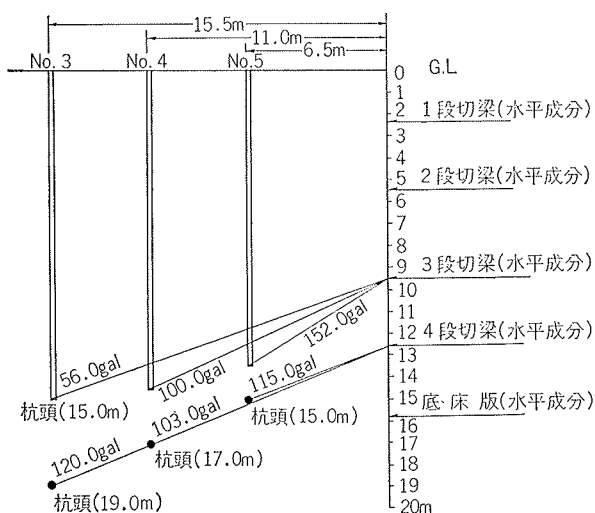


図-15 くい打ち振動の地下鉄工事への影響

では、前述の距離減衰と振動レベルとの関係をあわせて考えれば予測できるものとする。

R.C.造煙突倒壊による地盤振動の予測例

この種の問題について、完全解はいまのところ見当たらない。そこで次のごとく式を立てて煙突倒壊の速度(V)を求めた。

図-16は、煙突倒壊時の力のつりあいを示したもので、これより次の関係式が導かれる。

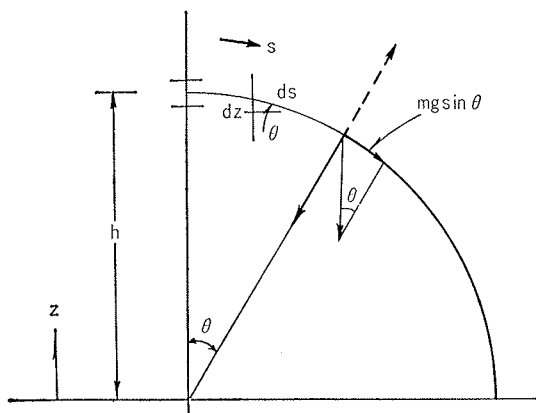


図-16

煙突が角度 θ の位置にあるとき、

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = mg \sin \theta \dots\dots(1)$$

$$\sin \theta = - \frac{dz}{ds} \dots\dots(2)$$

$$\therefore m \frac{d^2s}{dt^2} = - mg \frac{dz}{ds} \dots\dots(3)$$

(3)式の両辺に $\frac{ds}{dt}$ を乗じて、解を求めていくと(4)式が得られる。

$$V^2 = -2gz + C \dots\dots(4)$$

(4)式より、Vを求めると、

$z=h, V=0$ において

$$C = 2gh \dots\dots(5)$$

$$V^2 = 2g(h-z) \dots\dots(6)$$

$z=0$ において

$$V = \sqrt{2gh} \dots\dots(7)$$

を得る。

衝撃を受けたときの地盤の振動については、半無限体の地盤に衝撃を与える問題とすると解が複雑となるので、煙突を地盤上の Mass と考えて衝撃力を与えるとして、

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \dots\dots(8)$$

初期条件として $t=0$ のとき、 $x=0, \dot{x}=V_0$ とすれば

$$x = \frac{V_0}{\sqrt{1-h^2\omega_0^2}} e^{-h\omega_0 t} \sin \sqrt{1-h^2\omega_0^2} t \dots\dots(9)$$

また、一般に質量 m に F なる力を加えたとき、その運動はニュートンの法則から、

$$m\ddot{x} = F \dots\dots(10)$$

であるが、衝撃力というのは非常に大きな力を短時間 Δt だけ加わった場合をいうことから、上式を積分して Δt 間に速度は 0 から急速になり、外力 F は、 $\dot{x}=V$ であるから、

$$F = \frac{mV}{\Delta t} \dots\dots(11)$$

で求められる。また変位 x は、近似的に

$$x = \frac{F}{k \cdot A} \dots\dots(12)$$

k : 地盤のばね常数、地表面であることを考え $1 \sim 3 \text{ kg/cm}^3$ となる。

である。この式に(7)式で求めた V_0 を代入、 Δt を経験値から仮定すると F が求められる。これらの関係を図-17に示す。さらに(12)式から、変位振幅が計算される。しかし、このときの 0 m 地点における振幅は、前項に示したような距離 2 倍に対して、逆 2 乗則が成立するような振幅ではなく、むしろ逆 3 乗則に近いもので一

応、等価的振幅というべきものであろう。

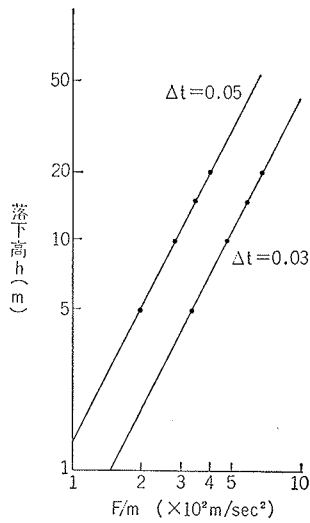


図-17

煙突倒壊時における地盤振動の数値計算例

高さ22mの R.C. 造煙突の解体工事に伴う地盤振動の推定を行なう。

煙突高さ $h=22\text{m}$ 、重量 $\approx 32.6\text{ ton}$ とするならば、速度(V)は、(7)式より $V \approx 20.8\text{ m/sec}$ となることがわかる。 Δt を決定する場合、いろいろ問題が存在するが、経験的に求めてみると $\Delta t=0.03\sim 0.07$ を示す。

$$F = \frac{32.5 \times 10^3}{9.8} \times 20.8 \div 0.05 \approx 1380\text{ ton}$$

$$x = \frac{1380 \times 10^3}{1.5 \times 22 \times 10^4} = 4.16\text{ cm}$$

が求められる。

いま、地盤の距離減衰を前項で示されるように距離2倍に対し、逆2乗則が成り立つものと仮定して、某病院の壁解体工事における実測値と対比させてみた。煙突の場合と壁とでは、倒壊時の状況が異なるが、予測した振動と実測値がほぼ似かよった数値を示していた。

壁倒壊による実測値は、振源距離から約21m地点において上下振動で 305μ であった。このときの壁体重量は、

$$W = 0.25 \times 16 \times 12 \times 0.24 = 11.5\text{ ton}$$

厚さ 幅 高さ

であった。

結 び

近年、振動障害(公害)に関する諸問題がますますふえている。これらの問題を処理するうえにおいても、振動の予測ができることは望ましい。本報告は、研究途上の資料の一部であるが、何かの参考となれば幸甚である。

参考文献

- 1) 土木学会関西支部：騒音・振動公害
- 2) 建築学会構造標準委員会振動分科会：建物の振動障害防止に関する設計基準値，建築雑誌 Vol. 74, No. 870, 昭34.5
- 3) 鳥海勲：振動の影響と怨限度，土木学会誌・51-4
- 4) 中川恭次：振動の怨限度，建築雑誌昭43.6
- 5) 労働科学研究所 大島正光：振動と生体：鉄鋼労働衛生 Vol. 2~1, 2, 3, 4, 1953年
- 6) 渡辺清治他：土木建築耐震設計施工，第9章，振動障害