

地盤振動と対策について (第1報)

齋藤二郎 小出忠男
木村 薫

Ground Vibrations and Countermeasures (Part 1)

Jiro Saito Tadao Koide
Kaoru Kimura

Abstract

There are the following two kinds of methods as countermeasures for reducing ground vibrations due to factory machinery, vehicle traffic, construction work, etc.: (1) Investigation of vibration sources and attenuation of vibration. (2) Interception or alleviation of vibration along the vibration propagation course. This report is on measurements in regard to (1) of ground vibrations at the surface and underground which accompany pile driving work. As for (2), it has been empirically clarified that open trenches are effective. However, there is the question of maintenance of such trenches as permanent vibration reduction countermeasures. The authors tried a vibration reduction method based on a vibration damping wall using blister urethane material and found not only that the vibration reduction effect was good, but that durability in contact with the ground was also superior.

概 要

工場機械、交通車両、建設工事などによる地盤の振動を軽減する対策として次の方法がある。① 振動発生源の探求、および振動消去。② 振動伝ばん経路の振動遮断、あるいは軽減。本報告は、①について、杭打工事に伴う地盤振動を地表、地中についての測定例を示す。②について、空溝が効果的であることが経験的に判明している。しかし恒久的な振動軽減対策として、溝の保全上に問題がある。そこで防振材料を埋設し防振壁による振動軽減方法を試みた。壁材料として発泡ウレタンの使用を考え実験を行なった。その結果は振動軽減効果はもとより、地盤に対する強度など恒久性に優れていることが判明した。

1. まえがき

工場機械、交通車両、建設工事などによる地盤振動の近接家屋やその他構造物などにおよぼす影響が問題になり、各種振動と地盤条件との関連性が調査、研究されるとともに、その対策を積極的に取組むことが都市の発展、機械、特に施工機械の発達に伴い重要な問題となった。

本報告は、地盤振動の対策として振動発生源の探求、およびその消去、軽減することと、振動の伝ばん経路での遮断の方法が考えられるが、前者の立場から、発生源の一つである杭打工事に伴う地盤振動について調査した結果を対策の一資料として役立ようとするものである。後者の立場からは遮断方法として防振壁材料の選定とその遮断性状についての試験を実施することとした。

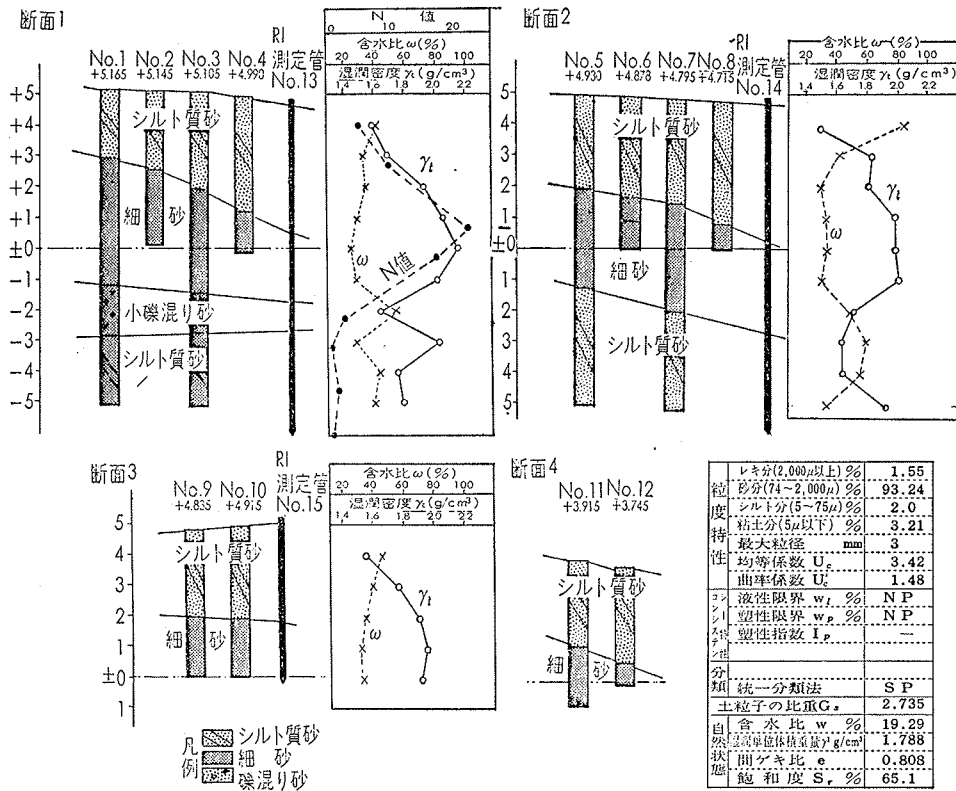
2. 杭打ち工事に伴う地盤振動

2.1. 地盤状況

地盤振動調査の実施地点は熊本市野田町の川尻バイパス加勢川橋建設現場右岸提外地で、橋台を構築するため堤防を移設した跡地である。地盤は深度2m~6mに、最大粒径3mm、60%粒径0.41mm、均等係数3.42、曲率係数1.48、相対密度27.1%の緩い砂層のある深度38mまで軟弱な地層構成である。図一1に測定計器を設置した地盤の地層構成、N値、およびRIによる初期密度、含水比を合わせて附記した。図一2には杭打止め地盤までの土質柱状図を示す。

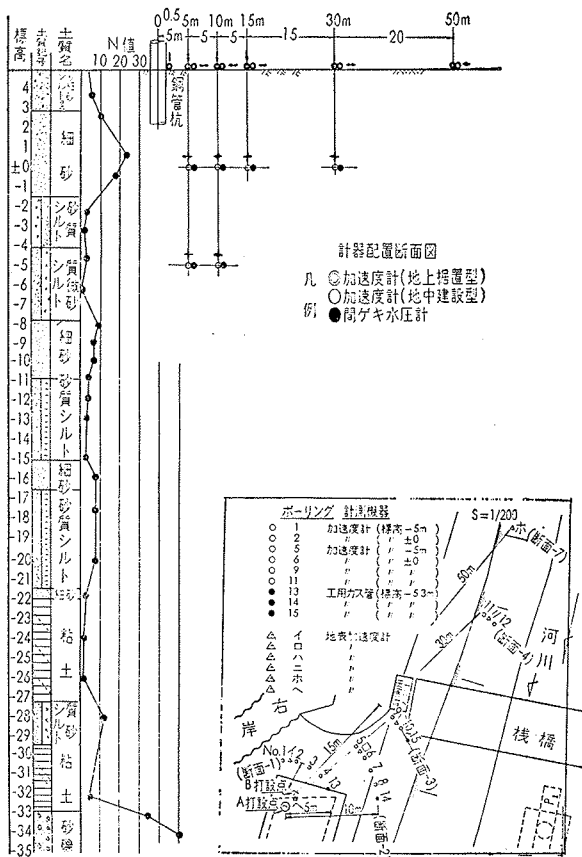
2.2. 測定の概要

振動源として仮設鋼矢板(YSP-IV、長さ14m)をバイプロハンマ(NI-40K)による打込み、および引抜きと、鋼管杭(800mmφ、先端開口、長さ40m)を



図一 測定計器設置地盤状況

図三 計器配置断面図



図二 土質柱状図

図四 測定点平面図

ディーゼルハンマ K-42 (神鋼製) による打設によるものとした。測定は地表6測定点, 地中5m に4測定点, 地中10mに2測定点の垂直方向, 杭方向の水平方向の2成分の加速度を断面, 平面についてそれぞれ図一3, 図一4に示すごとく設置した。

また使用計器の仕様を表一に示す。これら計器による測定は全深度(矢板14m, 杭40m)にわたり連続記録を取った。

計器	型式	特性	数量		
加	変換器	地上	共和電業製	歪タイ	2
		地中	東京測器製	2G 0~33Hz	7
			東京測器製	1G 0~22Hz	2
速	増幅器	動歪測定器	共和電業製	AM-2G 0~33Hz	6
		東京測器製	D.P.M-6F	3	
			DT-6B	1	
度	記録器	三栄測器製	FR-102型 12成分	3	
		電磁オシログラフ	ガルバー固有振動数300Hz		

表一 測定計器仕様

2.3. 測定結果と検討

仮設鋼矢板, 鋼管杭の打設により得られた加速度測定記録での最大波形から求めた各測定点の加速度レベルを距離による減衰性状, 地中断面の加速度分布, 垂直一水平方向の加速度分布について分析した。

2.3.1. 距離による加速度の減衰 仮設鋼矢板の打設時の加速度の距離減衰を図一5に, 引抜き時の減衰を図一6にパイロハンマによる加速度のバラツキが

あるため最大、最小値をむすんだ一例を示す。

垂直方向の地中、地表の加速度レベルは同程度かやや低い傾向に対して、水平方向の地中の加速度レベルは地表に対して著しく低い。また地表の水平方向の加速度は打設時には垂直方向と同程度であったのが引抜き時には高いレベルになっている。これは鋼矢板打設時と引抜き時の振動発生源が地盤の抵抗などにより異なるためであろう。

鋼管杭打設時の距離減衰の例を図一7、図一8に地表での垂直、水平方向の加速度の距離減衰を、図一9、図一10に地中5mでの距離減衰を表わす。図中の数字は杭貫入深度を示し、 $-3\text{dB}/2d$ 、 $-6\text{dB}/2d$ (d : 距離) の勾配は表面波、実体波のそれぞれの距離減衰の勾配である。杭貫入深度7mを境に加速度レベルが低下することが知られるが、垂直方向の地表、地中5mの加速度レベルは近距離で同程であったが、距離減衰は地表で勾配が $3\text{dB}/2d$ 、と $6\text{dB}/2d$ の中間であるのに対し、地中5mでは $6\text{dB}/2d$ の勾配である。

一方、水平方向の加速度は逆の現象を示すととも地中5mの加速度レベルは著しく低い。地表の距離30m点で、杭貫入深度31m~40mの加速度と11m~30mの場合では30gal, 20galに分離している。このように、地中の水平方向の加速度レベルが低いこと、距離減衰が $-3\text{dB}/2d$ に近いことは波動が Rayleigh 波的な性質だけでなく、緩い砂層地盤が水平方向の振動を伝わりにくくする性質を持つもの、また杭貫入時の振動発生機構などに起因するものと考えられる。

2.3.2. 地中断面の加速度分布 12カ所の加速度測定点で得られた結果をもとに等加速度レベル線を描いた一例を示す。図一11は鋼矢板打設時と引抜き時を上段に、下段に鋼管杭打設時の貫入深度5mの場合の分

布図である。打設杭、打設方法が異なるため相違するが、垂直方向の加速度が大きく異なり、特に地中の5m砂層地盤の加速度レベルは著しく低いことが知られる。

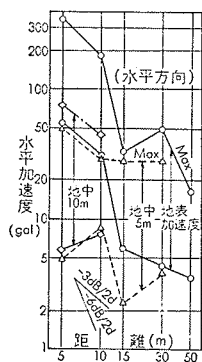
図一12は鋼管杭貫入深度とともに変化する加速度200gal, 100galの分布線を図示した。貫入深度7m, 砂質シルト層までは分布線が最大に広がり、以後10m附近で最少となり再び広い分布範囲へ移動し杭貫入深度20~40mになるとほぼ一定の分布範囲を示すように移行する。貫入深度7mで最大になるのは、上層の砂層による貫入抵抗、閉側抵抗の増大によるものと考えられる。水平方向の分布はあたかも水平載荷時の杭の水平変位に似て急激に収束する円すい状の分布を示す。これは杭打設時の杭頭の水平方向の振動によるものと考えられる。

垂直方向の分布は杭貫入深度による変動が著しいが、一定の勾配を持っている。しかし距離15m以遠での低い加速度レベルの分布線は地表部分だけが著しく広い分布範囲になっている。

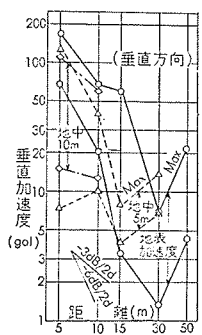
2.3.3. 最大波形の伝ぱん時間

地表距離0.5mの垂直加速度の初動を伝ぱん時間の規準とし、図一12中に示すごとく最大波形の山から山の規準時間よりの伝ぱん時間 t_1 , t_2 を縦軸に杭貫入深度を横軸にとり、それぞれの測定点の地表での距離減衰

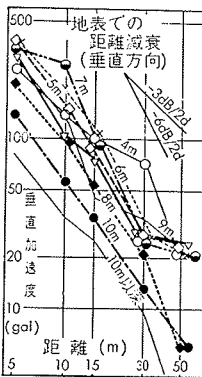
地表での最大波形の伝ぱん時間は垂直、水平方向の加速度とも同様な傾向を示す。特に杭貫入深度20m前後では地表、地中の最大波形の現われる伝ぱん時間は距離30mまでが著しく遅くなる。また距離10m地点



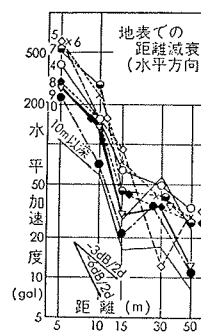
図一5 鋼矢板打設時の距離減衰



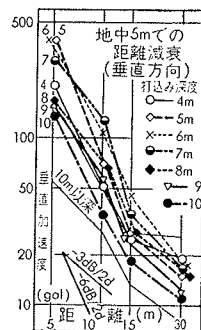
図一6 鋼矢板引抜き時の距離減衰



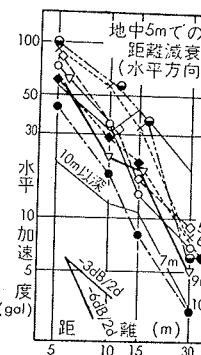
図一7 鋼管杭打設時の地表での距離減衰



図一8 鋼管杭打設時の地表での距離減衰



図一9 鋼管杭打設時の地中5mでの距離減衰



図一10 鋼管杭打設時の地中5mでの距離減衰

の地中10mにおける水平方向の加速度は逆に垂直方向に比べて著しく遅い。

周期については、地表と地中の性状が異なる。

特に、地中の周期は距離が遠のくほど長くなる。

また杭貫入深度の増大とともに、上下方向の周期は短くなるが、水平方向の周期は測定点により異なり、

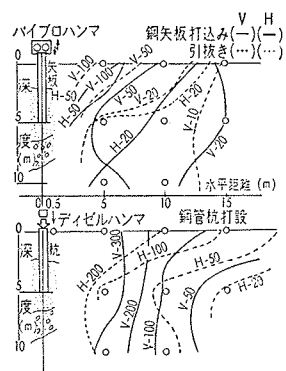


図-11 地中断面の加速度分布

長くなり再び短くなる傾向がみられる。

畠山によれば、これは地表面に近い地盤が動き易く、杭周辺の土質が杭とともに動くことによる生じる仮想質量の増大により周期は短くなる。

これは、水平方向の加速度によく表われているが、地上に露出している杭が打込まれるにしたがい側面抵抗が増大し、次第に周期が短くなるためであろう。波形を見ると、貫入深度40mでは他の深度と異なり、約0.2sec後に再び最大に近い波形が見られる。すなわち他の深度で見られる最大波形の次の2, 3波が同程度のレベルで続く現象は見られない。一方貫入深度の現象は周期が長くなる傾向からも反射波の影響によるものと考えられる。

3. 振動対策

地盤振動の防止対策として、振動発生源の一つである杭打工事に伴って発生する場合についての一例を示した。

杭打工事は、場所打杭に対し施工性、経済性、安全性など幾多の有利性を持つが、騒音、振動公害に対しては群をぬいて大きな発生騒音、振動を持っている。近年各方面で騒音対策をなされているが、振動対策については皆無に近い状態である。これはこの一例に示されるごとく建設工事による振動が、工場などの振動と異なり多くが地盤の掘削、改良などを併うことから、工事機械と伝ばん媒介物(地盤)の分離は工事停止に結びつくなど複雑な問題が残されているからである。そこで振動対策として、発生機構、伝ばん機構、受振機構の3つの機構の探求、対策が考えられるが、今回の調査は伝ばん機構の探求を述べたが、この対策として、騒音防止にも見られる遮音壁のごとく、空溝や防振壁を設ける方法がある。空溝は伝ばん経路になる媒質(地盤)の除却により遮断する方法である。遮断効果としては、溝の深さ(h)と波長(λ)の比により決まってくる。例えば溝の深さと波長の比 $h/\lambda=0.3$ の場合、振幅は約 $1/2$ (6dB) 減少し、 $h/\lambda=0.6$ の場合には約 $1/4$ (12dB) 減少するようである。

杭打工事の振動遮断を実施する場合、杭貫入深度が10m以下の浅い時や地盤のN値が大きい時の振動レベルが高いこと、地中断面分布においては杭の近距離のみ地中深く同様な振動レベルになっている。しかし遠距離では杭貫入深度が深くなると反射波による影響からあまり杭貫入深度による差が見られない。よって、杭貫入深度の浅い時の振動を遮断する場合か、受振例で遮断する場合が考えられる。しかし、発生源の除去による先行掘削の方が有利である事が多い。遮断を実施

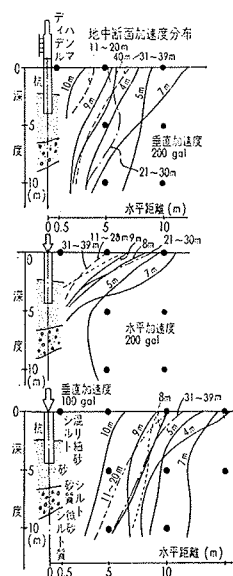


図-12 地中断面加速度分布

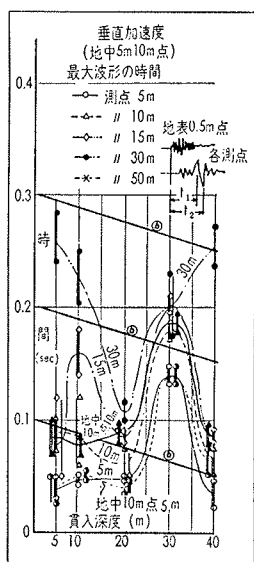


図-13 地中の垂直加速度最大波形の時間

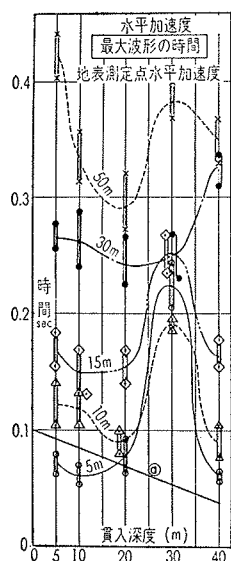


図-14 地表の水平加速度最大波形の時間

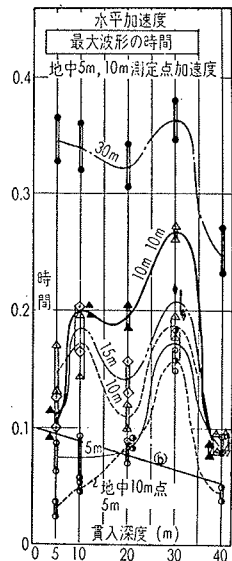


図-15 地中の水平加速度最大波形の時間

する場合には空溝の安定に問題がある。

すなわち空溝壁面の崩壊、雨水の溜まりによる、効果が低下するなどの危険性がある。このような場合に地盤と性状の異なる障壁を防振壁として有効な遮断効果があれば空溝に対し安全な伝ぱん経路での遮断材料となる。この方法は特に恒久的な対策として有効であるが、西村によれば、遮断効果の理論的な判定として、図-16のごとく地盤(I)に起こされた振動により、x-方向に伝ぱんしてHなる厚みの障壁(II)を通り、再び地盤(III)をx-方向に伝ぱんする場合、地盤(I)、(III)および障壁(II)を弾性体として(I)、(III)の密度 ρ_1 、縦波の伝ぱん速度 V_1 障壁(II)のそれらを ρ_1' 、 V_1' とした場合に、地盤(I)に入射してくる縦波 U_i が、 $x=0$ なる面へ直角に伝ぱんし、入射すると、 $x=0$ 面では(I)への反射波 U_r と(II)への掘折波 U_i' および $x=H$ 面での反射波 U_r' そして再び(III)へ屈折伝ぱんして行く U_i'' なる4種類の波動が誘起され、 U_i なる初期入射波と釣合いを保つことになる。いま U_i なる入射波が円振動数 ω をもった振幅 A_0 なる定常振動をする波とすると、

$$U_i = A_0 \sin \cdot h \cdot (V_1 t - x)$$

ただし、 $h = \omega / V_1$,

$$V_1 = [(1-\sigma)E / \{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho\}]^{1/2}$$

地盤(I)、(II)および(II)、(III)の境 $x=0$, および $x=H$ 面での波動の振幅比(又は伝達率)を T_w とすると、

$$T_w = \frac{4\alpha}{\sqrt{2\{2(1+\alpha^2)^2 - (1-\alpha^2)^2(1+\cos 2\beta h H)\}}} \dots (1)$$

ここで、 $\alpha = (V_1' \rho_1') / (V_1 \rho_1)$ (固有音響抵抗比, インピーダンス比) であり、縦波の速度比を $\beta = V_1 / V_1'$ とする。

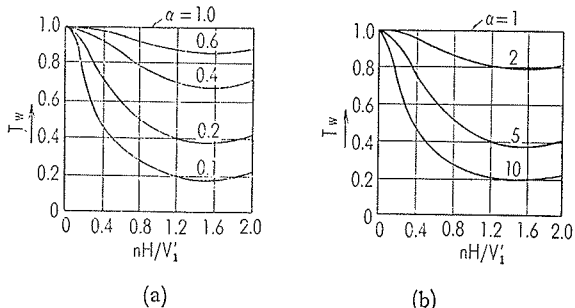


図-17 nH/V_1' と T_w の関係

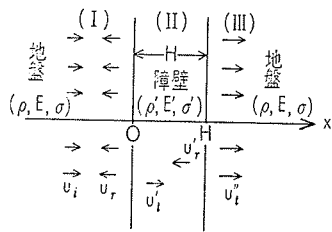


図-16 障壁の伝ぱん

そこで、 nH/V_1' を横軸に、 α を媒数として伝達率 T_w を図示すると図-17(a), (b)を得る。(a)は $0 < \alpha \leq 1$, (b)は $1 \leq \alpha$ の場合を示す。

この(1)式は横波についても同様に縦波の伝ぱん速度に対し、横波の伝ぱん速度にすればよい。

障壁が防振壁となり得るには防振材料の性状が土圧に耐える強度、保水による伝ぱん速度などの変化のない防水性で長期間品質が安定であること、また動的性状として伝ぱん速度、固有音響抵抗、動的弾性係数、ポアソン比が設置地盤に対し(1)式の伝達率 T_w をより小さくする条件になることが必要である。

このような条件を満足する材料の一つとして独立気泡である発泡ウレタンが見い出された。これは薬液注入剤であるO・

材料	1	2	3
密度	$\rho = 0.03$	$\rho = 0.07$	$\rho = 0.2$
圧縮強度 kg/cm ²	2	18.0	65
曲げ強度 kg/cm	2.5	25.6	130.0
伝ぱん速度 P波 m/sec	111.3	182.5	
伝ぱん速度 S波 m/sec	36.2	58.0	65.59

表-2 発泡ウレタンの性状

Hと同系であり、現場発泡においても2液の混合により数拾秒で発泡、固結し施工性にすぐれた材料である。表-2に3種の性状の一例を示す。

また、この発泡ウレタンの動的性状の優れた一例として、図-18に示す両端支技の梁上に発泡ウレタンを置き、その上に荷重Wを搭載し、毎秒fなる上下振動 V_2 、荷重W(= $W_1 + nW_2$)の下端での上下振動 V_1 を加速度計で同時観測

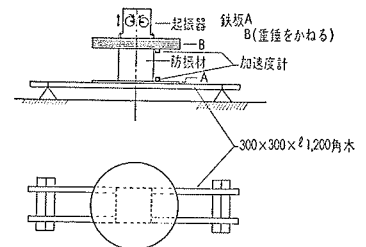


図-18 垂直方向防振試験

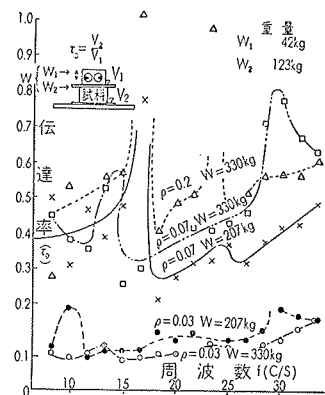


図-19 搭載荷重と伝達率

し、振動の伝達率 $T_D(=V_1/V_2)$ を求めた。その結果を図-19に示す。表-2に示した3種類の材料のブロック(横29cm, 幅19cm, 高さ19cm)について上載荷重を330kg, 207kgとした場合について、あたかも防振材料を機械基礎にほどこした機構として実験を行った。その結果、伝達率 T_D は密度の小ほど低い。測定した振動数範囲では明確な固有振動数は見られなかった。次に技術研究所内の野外で防振壁を幅30cm, 長さ5m, 深さ3mの板状の形状として実験地盤に設置した。地盤の性状は表-3に示す。

防振材料の性状は表-2の材料2を用いた。

(1)式より求めた理論上の伝達率 T_w は、定常振動を振動数30Hzで起振させた場合、固有音響抵抗比 $\alpha=0.03$, $nH/V'=0.314$ となり、 $T_w=0.21$ になる。

ただし、これは壁前面と背面での検討である。

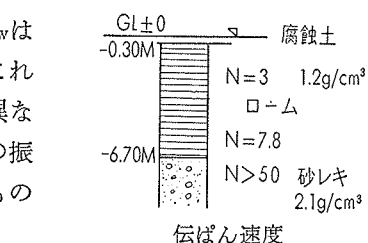
実験結果によれば、壁前後1mの地中1.5mの測定

点での測定によれば上下方向の振動で $T_w=0.35$, 水平方向の振動で $T_w=0.10$ になった。これは理論式と条件が異なるために上下方向の振動が大きくなったものと考えられる。

防振壁の研究
成果は第2報で
詳細な報告をす
る。

参考文献

「振動工学」西村源六郎：「第11章 防振」『Die Abschirmung von Erschütterungen durch Bodenschlitze』Hans-Toachin Dolling DIE BAVTECHMK 5/1970
土木学会講演集：畠山直隆 他2名, 第26回他



	表層	下層
S波	143 m/sec	466 m/sec
P波	380 m/sec	

表-3 地盤性状