

傾斜した基盤上における軟弱層の振動性状に関する研究

土質工学会地盤震害委員会

Research on the Vibration Characteristics of Sandy Soil Resting on the Underground Rigid Boundaries with Various Inclinations

By the Committee on Ground Damages, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineers, Tokyo

Abstract

In the past earthquake records, many examples of damages were reported, indicating that the extent of damage depends considerably on the local conditions of subsoil and does not necessarily have any consistent relationship with the distance from the epicenter of the earthquake. This fact suggests that shapes or stratification conditions of the ground may have significant influence on the enormous amplification of seismic waves at that location.

Principal objectives of the present investigation are, therefore, to find out, by experiments, whether there exists really the effect of wave amplification for some typical types of underground conditions. The types of ground conditions which we have studied are :

- (i) soft soil deposits resting upon the inclined rigid boundaries sloping at different angles downwards, and
- (ii) soft soil deposits lying in the inlet opening at different angles outwards, surrounded by firm vertical wall of soil or rock.

These artificial soil deposits are prepared with sand in a large test box 5.0 m long, 1.0 m deep and 0.5 m wide, in which an auxiliary setup can be installed to form several kinds of rigid boundaries as described above. By means of a vibration generator of eccentric type, vibrating force is applied at one end of the soil deposits and the wave can be allowed to propagate in the longitudinal direction of the box. At the other end of the box, the travelling vibration is disturbed by the presence of rigid boundaries. By measuring the acceleration of the vibration at various points on the surface of the deposits, the distribution of the acceleration in the longitudinal direction of the box is made known which permits to detect the magnitude of the disturbance resulting from the existence of the boundaries.

A series of tests made for various types of boundaries have led to the conclusion that there exist generally predominant effects of rigid boundaries on the wave propagation, and that these effects produce unfavorable situations resulting in the unusual magnification of wave in the vicinity of the boundaries.

はじめに

この報告は、昭和39年度 新潟地震防災総合研究費のうち、国立防災科学技術センターより土質工学会に依頼された「軟弱地盤における土質調査法に関する調査研究」に関してまとめたもののうち、特に実験的研究についてここにその概略を報告する。

なお、この依頼研究は次のメンバーによりすすめられた。

委員長 最上武雄

主査 大崎順彦, 三木五三郎

幹事 渡辺 隆, 遠藤正明, 金谷祐二, 石原研而

第1章 まえがき

軟弱な沖積層地盤や緩い砂質地盤は振動に対して敏感であり、地震動によって地盤自体が亀裂やすべりを生じて破かいしたり、地下水を放出して大きな沈下を生じたりする。わが国における主要な都市はほとんどこのような軟弱地盤地帯に位置しているために、地盤の被害がそのまま構造物の被害に結びつく可能性が大きく、被害の規模が拡大されかつ多方面にわたることになる。地盤の震害の原因は大別して考えてみると2つに分けられる。第1は地盤を構成する土の性質が振動に対して敏感であることに起因するものである。比較的新しい堆積で相対密度が小さく地下水面の高い砂質地盤や、鋭敏度の高い粘性地盤などでは、この種の原因による震害がおりやすい。第2の原因として挙げられるのは、地盤の成層状態又は堆積状態が地震動を拡大しやすい形状又は寸法を持っている場合である。土自体が比較的強度の大きいものであっても、地下の地層状態が振動を伝えやすい形状をしていると、地震動が局所的に増幅されてその附近の震害がきわだって大きくなることもある。

本研究の目的はこの第2の原因に関して、モデル実験によって定性的な検討を行なうことにある。各種の形状を有する模型の人工地盤を砂を用いて作製し、それに振動を加えて、振動の特性を調べた。

第2章 研究目的とその内容

2.1 震害を受けやすいと考えられる地盤の形状

自然の地盤の構造は非常に複雑であって、その詳細な部分まで考慮した地震動の伝播機構を知ることは不可能に近い。そこで、簡単でしかも代表的な地盤の構造を2種類だけ取り上げ、これについて実験を行なうことになった。複雑な形状の地盤であっても近似的な見方をすればこれらの分類のいずれかに属することが多いと考えられる。

(i) 傾斜した硬質基盤の上に横たわる軟弱地盤

岩盤又は洪積層の上に堆積している沖積層はその周辺において、図-1(a)のように、ある傾斜角で硬い地盤が地表面に露出していることもあるし、また図-1(b)のように地中においてその傾斜がとまっている場合もある。このような地形をもつ地盤が例えばその基底において水平方向の地震動を受けた場合を想定すると、地表面では一般に振動が増幅されるが、その度合は軟弱層の中央部より端部の方で大きいと考えられる。地中に誘起される応力を考えても、端部では一種の壁面効果が現われるた

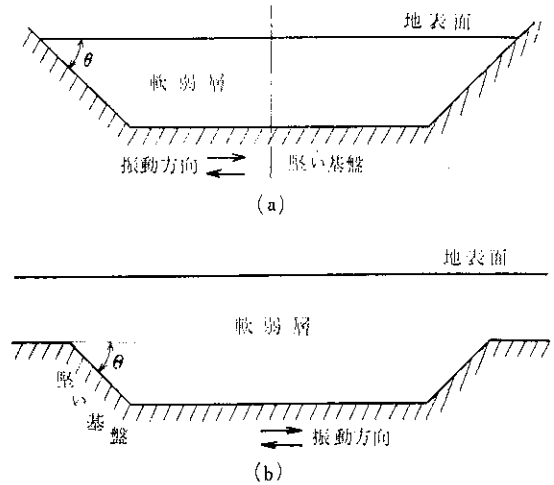


図-1 軟弱層の傾斜した境界
Types of inclined boundary.

めに応力が集中し、この附近の地盤の破かいは中央部に比べて顕著になると考えてよからう。

(ii) 湾の形をした硬質地盤壁によって囲まれている軟弱地盤

地盤の構成図を平面的に眺めた場合に図-2(a)のような湾の形状をした硬質地盤が軟弱地帯の周囲をとりまいていて、せばまった部分の軟弱地帯で地震波が異常に増幅される可能性がある。これは大洋から押し寄せる津波の波高がV字型の湾内で増大する現象と似ている。硬質な基底部分が図-2(b)に示すような水平方向の地震動を

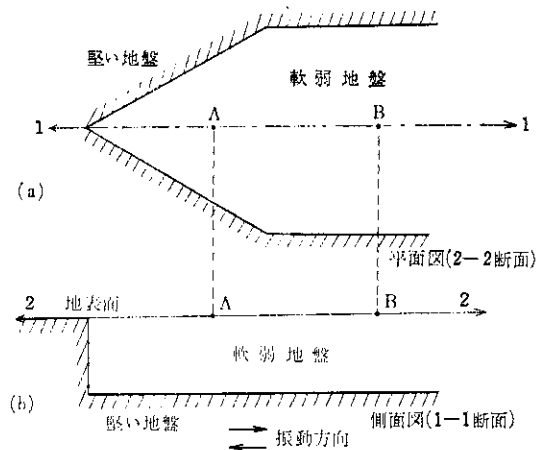


図-2 V字型軟弱層
V-shaped deposit of soft soil.

受けた場合、堅い壁の影響によって土が異常に圧縮され応力集中をおこして破かいすることがあると想定される。

2.2 問題にしている地盤形状の規模

地震動は波動現象であるので地盤の形状は同じであっても、その規模が大きい時と小さい時とはその効果は全く異なったものになる。つまり、地盤内を伝播する波の波長に対して、どの位の深さの軟弱地盤を対象にした実験を行なうかということを確認しておかねばならない。通常、軟弱な沖積層の中を伝わる横波の速度は50～500 m/sec 位のものである。一方、新潟地震等のような沖積層における地震記録によると振動の周期はかなり大きく、2～5秒程度であることがわかっている。従って波長は10～250 m のオーダーであると考えられる。土質工学的に問題になる地盤の厚さは地下30 m 位のオー

ダーであるから、この程度の軟弱層が堅い基盤の上によって振動している状態を1つのモデルとして採用するとすれば、波長は一般に層厚より大きいものと考えて差し支えないであろう。このようなわけで、本研究では、第1次のモードだけが表われるような比較的浅い地盤の剪断振動について、境界の影響を調べることに主眼がおかれている。

2.3 地盤形状と震害との関係を示す事例

過去における震害例において、以上にのべたような地盤形状と震害との関係を明確に示しうるデータは少ない。昭和18年9月に発生した鳥取地震は鳥取市を中心とする沖積層地帯に大きな被害をもたらしたが、その震害の分布は軟弱地盤の形状とかなり密接な関係をもっていたといわれている。図-3は地震後に行なった弾性波地下探査による横波の速度の深さ方向の変化と倒壊家屋の

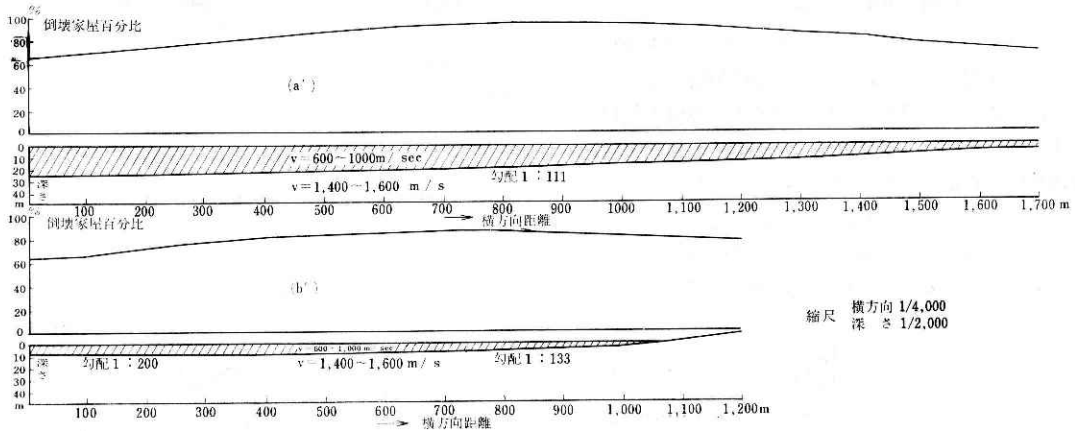


図-3 地盤と震害との関係 (鳥取地震)
Relation between ground condition and damage (Tottori earthquake).

百分比との関係を図示したものである。横波の速度が1000m/sec以下の表層を軟弱層であるとみなし、それ以上の深部を基底部であるとみなすと、軟弱層の深い地域よりもむしろ、基底との境界が傾斜している部分の方が、被害が多かったように思える。この例では、境界の傾斜角が1/100程度で非常にゆるやかであるために、果して境界の壁面効果によってこのような震害分布になったかどうか疑わしい点もある。しかし今までの震害調査では数10 m程度の範囲内で詳細な地盤調査を行ない、それと震害分布との関係を検討した例がないので、もっと傾

斜角が急な場合の実証例をここにあげることはできない。今後、このような狭い範囲での調査が行きとどいて実施されれば、§2.1にのべたような地盤形状の効果を立証することができるものと思う。

第3章 研究計画と実験装置について

3.1 振動装置の型式

以上のような主旨に従って軟弱地層の振動性状を調べようとする場合に、いかなるタイプの実験装置が最も適しているか検討してみる必要がある。従来、構造物又

は土圧の模型実験に最もよく用いられてきた型式は振動台型式で、これは模型構造物に接している土塊全体を一体として振動させる方式である。この方式だと長周期で振幅の大きい振動をうるには適しているが、土塊全体を振動させるので、土の剛体的変位が大部分を占めて、土自体の変形による振動が小さくなる欠点がある。一方、地震時における地盤の強度、沈下等は土全体の剛体的振動よりも、土自体の変形を伴う振動と、より密接な関係を持っていると考えられる。従って、本研究の目的より考えて、従来の振動台型式を採用するより、土の一部に強制振動を与えて土塊中に波動を起こす実験方式の方がより好ましいと判断された。このようなわけで以下にのべる波動型式の実験装置を作製することになった。

3.2 実験装置の規模と実物との相似性

次に、実験槽の中の土の運動機構がどの程度現地盤の地震時の挙動を具現しているかという相似性の問題がおこる。地震時の地盤の挙動を決定づける要素はかなり多いので、それらをすべて一様に縮小させた模型実験を行なうことは不可能に近い。しかし、弾性地盤であると考えれば、本研究の実験がどの程度の地震と地盤の規模に相当するか、大よその見当はつくであろう。模型実験では普通幾何学的相似と力学的相似の2つの相似則をみたしていることが必要である。詳しい式の誘導はここでは省略するが、結果のみを示すと次式の条件をみたすようにモデルの加速度 a_m とモデルの振動周期 T_m をえらばよいことがわかる。

$$a_m = \frac{1}{\lambda^2} \frac{A_m}{A_p} a_p \dots\dots\dots(1)$$

$$T_m = \lambda T_p \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 A_m 、 A_p はそれぞれモデルと実物の振動振幅、 λ はモデルと実物のスケールの比つまり縮尺、を表わすものとする。 a_p 、 T_p はそれぞれ実物の加速度および振動周期を表わすものとする。地震記録からえられる実物に対する諸数値の範囲を次のようにえらんでみる。

$$a_p = 0.1 \sim 0.3 \text{ g}, A_p = 15 \text{ cm}, T_p = 0.1 \sim 4.0 \text{ sec}$$

また実験を行なうに当って最適と考えられた振幅 A_m を $A_m = 0.05 \text{ cm}$ として、これらの数値を(1)、(2)式に代入し、 a_m と T_m の値を λ の関数として図示すると図-4がえられる。この実験装置では T_m が 0.15 sec 以下になると検出が不可能になり、0.05 sec 以上の振動は起振機に無理がかかるので結局実験で用いる周期は $T_m = 0.05 \sim 0.15 \text{ sec}$ である。また適切なデータが取れる加速度の範囲は $a_m = 0.1 \sim 0.5 \text{ g}$ である。これらの範囲は図

の右側に記してある。実際に観測される地震動の加速度および周期の中で、(1)(2)の相似則をみたして、実験的に実現しうる範囲をハッチによって図に示しておいた。この図より、大まかにいって、 $\lambda = 1/10 \sim 1/50$ 程度、つまり実物地盤の層厚に換算して 10~50m 位の軟弱層に対応するモデル実験であると考えておけば大過ないと思われる。

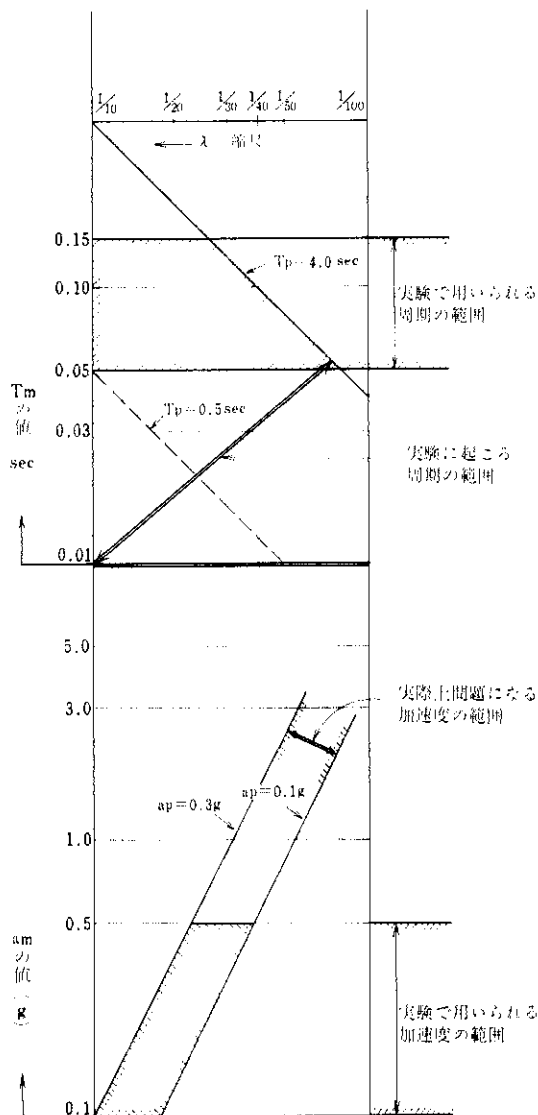


図-4 模型実験の結果が適用しうると考えられる
 実際地盤の規模
 Extent of the existing ground to which the
 results of model experiment may be appli-
 cable.

3.3 実験装置の概要

実験装置は図-5 に示すようなもので、長さ 5.0 m、深さ 1.0m、幅 0.5m の人工地盤用の実験槽、モデル地盤に端部より振動を与える加振板、起振機およびモーター等から成り立っている。さらに実験槽の中に傾斜地盤およびV字型地盤を作るための仕切板を数枚準備した。実験槽は5ヶの基礎台に固定されており、端部で土に与えられる振動により、容器は振動せず、波動が土の中を伝わって行くようになっている。モーターを始動するとその回転はVベルトにより偏心クランク加振機を回転させる。加振機はコネクティングロッドを介して直接加振板に強制振動を与える。加振板は4枚の平行バネによって倒立弾性支持され、水平方向の正弦振動を人工地盤に伝えることになる。装置全体の性能は表1に示すごときものである。

表-1 装置の性能表
List of efficiencies of the equipment.

項 目	諸 元
装置の大きさ	約幅 1,200×奥行 7,000×高さ 1,300 mm
装置全体の重量	約 2,000 kg (電動機 220 kg を含む)
加振板の大きさ	500×500 mm
加振板の支持方法	4枚の平行板ばねによる倒立弾性支持
実験槽の大きさ	約幅 500×奥行 5,000×高さ 1,000 mm (内側寸法)
加振方式	可変偏心クランク、コネクティングロッド加振方式
振動方向	水平振動(実験槽の長手方向)
振動波形	変位波形にて正弦波に近いこと
振動数変更範囲	60~1,200 cpm (運転中連続可変, 手動制御)
可変偏心クランク加振機 全振幅変更範囲	0~100 mm (停止中連続可変, 手動制御) (注) 本実験装置の最大許容全振幅は 10 mm まで。
最大加振力容量	1,000 kg·g
駆動用電動機	三相超分巻巻流子電動機 6p, 3.7kW a 12,500/3,000 rpm 200/220V, 50/60~
操 作 盤	駆動電動機用電磁開閉器 (始動・停止ボタン) 1 振動数指示計 CLV-110 (交流発電機 AFG-1付) 1 表示灯 2

第4章 実験計画と実験結果

4.1 人工地盤の作製

所定の仕切板を設置してからホッパーによって容器内に砂を散布し、パイプレーターによってなるべく一様になるように締め固めた。用いた砂の粒径加積曲線は図-6 に示すごときもので、粒径は 0.1~2.0 mm でかなり一

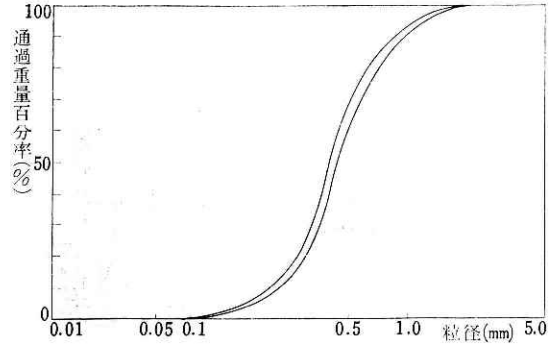


図-6 砂の粒径加積曲線
Particle size distribution of sand used for the test.

様な粒から成り立っている。

4.2 加速度の測定結果とその考察

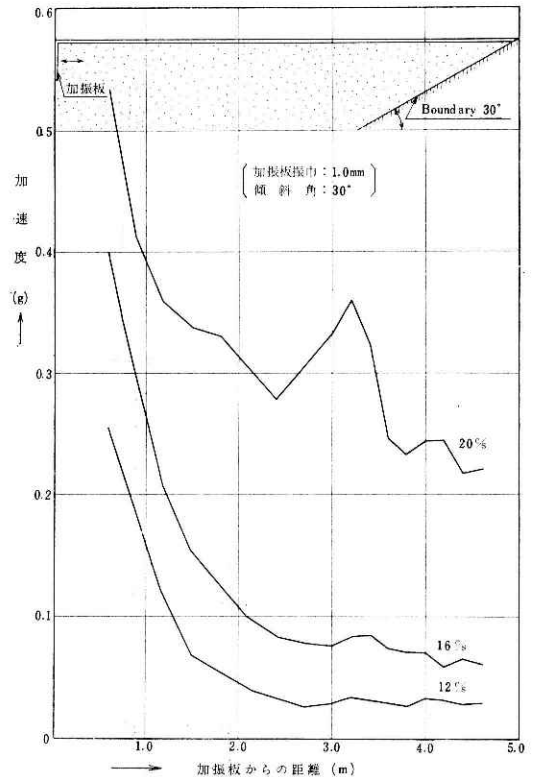


図-7 水平方向加速度分布
Distribution of acceleration in horizontal direction.

いろいろの境界をもった地盤の振動特性を知るために、加速度計を用いて、実験槽の長手方向の中心線に沿って加速度を測定した。オッシロペーパーに記録された加速度の波形を見ると必ずしも正弦波でなく、かなりの攪乱波が含まれているが、大体の近似として加速度の最大値を読みとり、これをプロットすると例えば図-7のようになる。さらに、各種の境界仕切板を用いた時のデータを一括して半対数グラフに表わすと図-8のようになる。この図で傾斜角や夾角は図-9~11の中に示してあるような角度である。図-7より境界の影響によって傾斜層附近の加速度が大きくなっていることが20c/sの場合については判然とわかる。しかし加速度が小さい時の影響がはっきりわからないことや、加速度の長手方向の減衰が激しいために境界の影響が数量的に表わしえないこと等の不便な点があるので、図-8を次のように考えて書き直してみる。図-8より、加振板からの距離(x とする)が2.7m位までは、境界の形が変わっても、振動数が一定であれば、減衰特性が大体同じであることがわかる。 $x \geq 2.7m$ 以上になると境界の影響がで

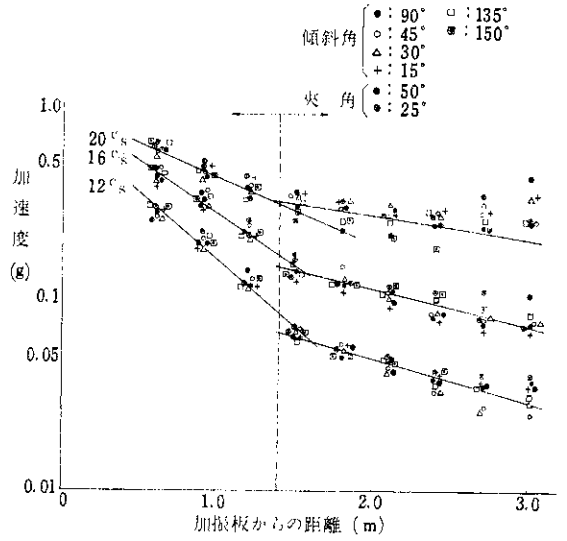


図-8 水平方向加速度の総括図
Results of tests representing the magnitude of acceleration in horizontal direction.

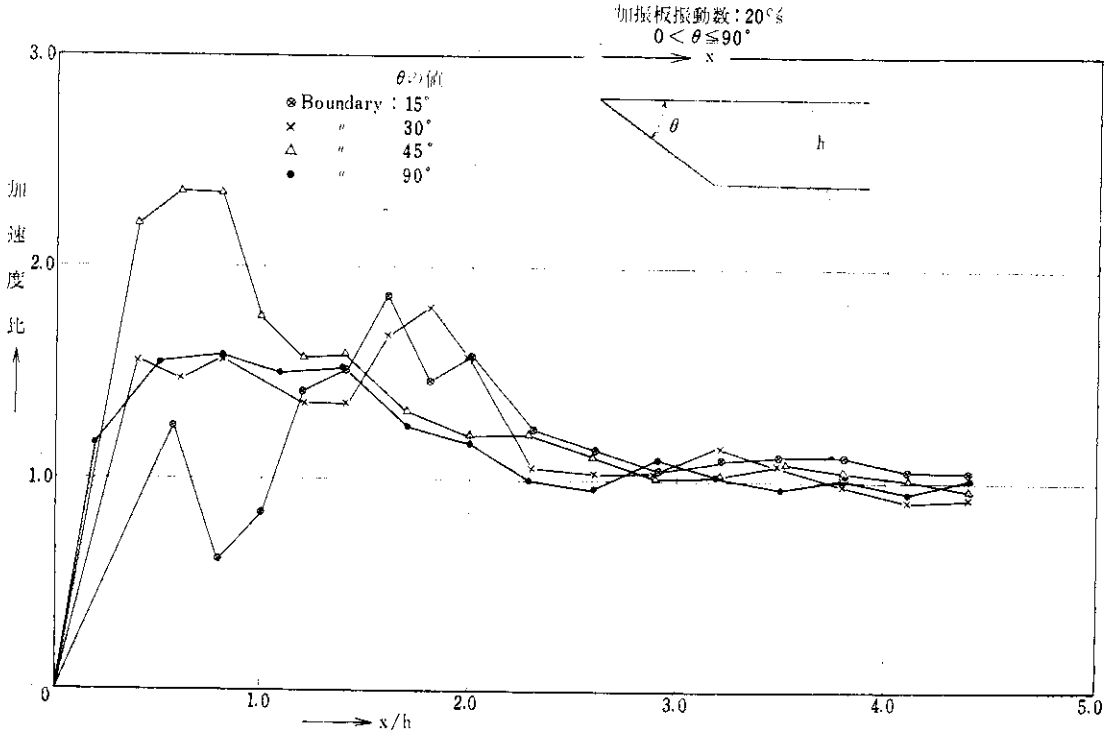


図-9 傾斜層の影響による加速度の増幅率
Magnification ratio of acceleration due to the effect of inclining boundary.

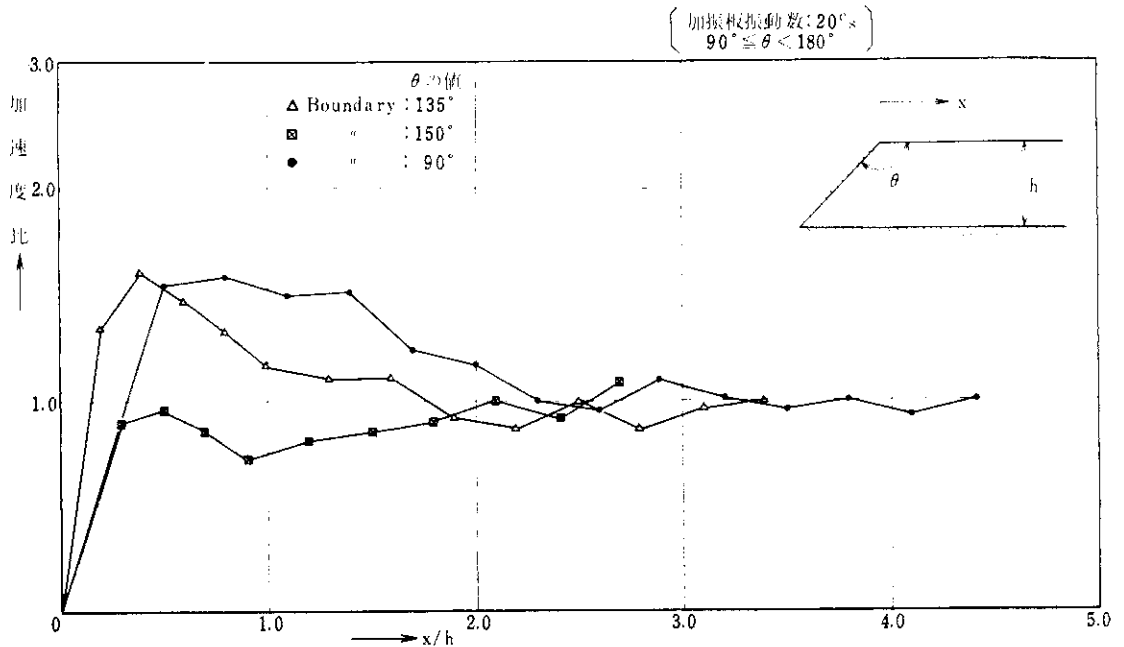


図-10 傾斜層の影響による加速度の増幅率
Magnification ratio of acceleration due to the effect of inclining boundary.

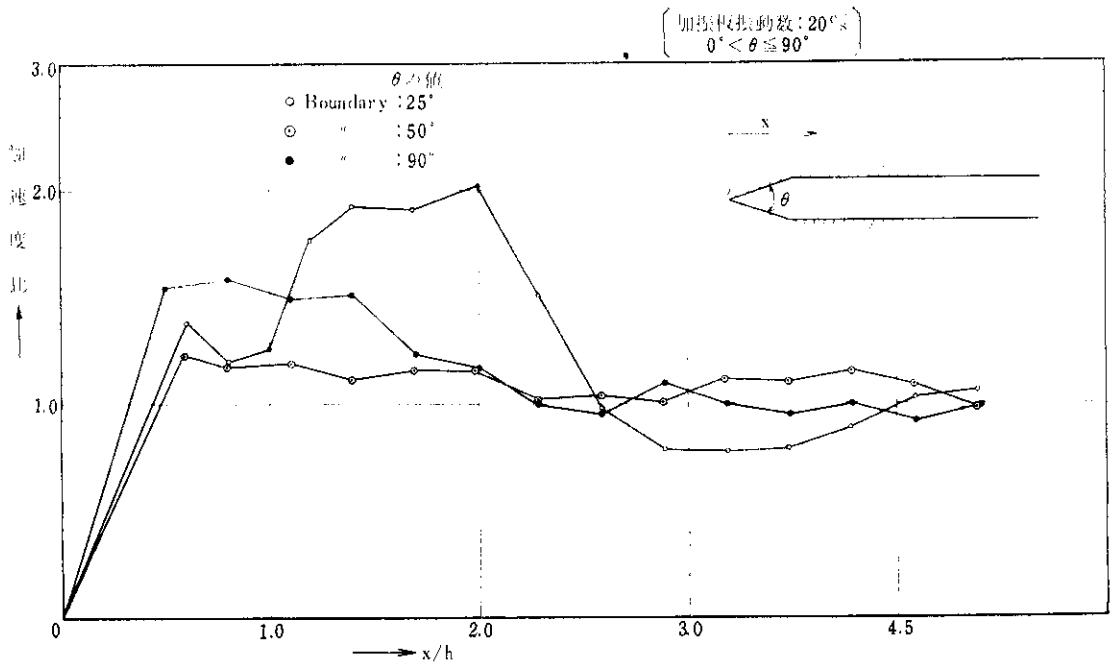


図-11 V字型地盤における加速度の増幅率
Magnification ratio of acceleration in V-shaped ground.

て、加速度は当然異なってくる。しかしこの境界がなく
て実験槽が無限に長くつづいてたと仮定した場合の減
衰特性はどのようになるであろうか。これを推定するた
めに $x \leq 2.7$ m のデータを代表しうる直線を図—8に
書きこみ、この直線が $x \geq 2.7$ m に対しても延長できると
仮定する。このようにして $x \geq 2.7$ m の領域における境
界がない場合の加速度減衰曲線が推定されると、実測値
とこの推定値の比をとることにより境界の影響を数量的
に表現できることになる。つまり、 $x < 2.7$ m の領域に
おける減衰特性がそのまま $x \geq 2.7$ m に対しても規
準的な加速度減衰を与えらるものと考え、この規準線よ
りのずれが境界の影響であると考えるのである。図—8に
はこの規準線が実線で示してあるが、 $x = 1.4$ m の点を
境にして2本の直線でこの規準線が表わされるものとし
た。以上のような考えにもとづいて整理した値が図—9
～11 に表してある。つまり、無限に長い軟弱層が剪断
振動をした時の表面の加速度を α_s とし、境界が存在す
る場合の剪断振動の加速度を $\alpha(x)$ とすると、 $\alpha(x)/\alpha_s$ の
値が図—9～11 の縦軸にプロットしてあるのである。こ
れらの図より次のことが結論される。

(i) 傾斜層の場合、すべて境界の影響がよく出てい

る。また傾斜層の勾配が増大するに従い、加速
度のピークが表われる位置が傾斜面の方へ寄っ
てくる傾向がある。

(ii) 傾斜角が 90° 以上の場合、境界の影響が次第に
小さくなっており、その影響が全く消滅するよ
うな傾斜角があることを暗示している。

(石原研一 記)

参 考 文 献

- 1) K. Kanai: On the Predominant Period of Earthquake Motion. Proc. of the Earthquake Research Institute, Vol. 40, p. 855 (1962)
- 2) L. S. Jacobsen: Motion of a Soil Subjected to a Simple Harmonic Ground Motion. Bull. Seismological Society of America, No. 3 (1930) p. 160
- 3) Report of Research Committee on Reclamation Works of Hachiro-gata. Japanese Soc. of Soil Mech. and Foundation Engineering (1965)
- 4) Report of Research Committee on the Investigations of Soft Grounds. Japanese Soc. of Soil Mech. and Foundation Engineering (1965)