

地震時, 埋設管に作用する振動土圧について

大原 資生*・山本 哲朗*

On the Seismic Earth Pressure Acts on the Buried Pipe

Sukeo ŌHARA and Tetsuro YAMAMOTO

Abstract

The behaviour of the buried pipe during an earthquake was studied in vibrating tests used the shaking table. The buried pipe used was acrylic resins and it was set to the shaking box filled with dry sand. It is shown that the seismic earth pressure acts on the pipe increases remarkably with increase in depth of sand layer below the pipe, and decreases with increase in sand density. From this experimental result, it is concluded that, when the pipe is buried nearly on the base rock and soil around the pipe is sufficiently compacted, a damage of the pipe due to seismic force is small. And this conclusion is in excellent agreement with observation made on a damage of the pipe due to an earthquake.

2. まえがき

埋設管は地中構造物の代表的なものの一つであること, また液体および気体の輸送において有用性が高いことは周知のとおりである。現在, この埋設管の種類は多岐にわたっており, さらにその絶対量もますます増加している。しかし, 一方においては, 新潟地震に見られるように埋設管の震害が多く起こっていることはよく知られている。

埋設管の震害を減らすためには, まず適当なモデルを用いた室内実験あるいは現場実験によって地震時の埋設管さらに地盤の動的応答を検討し, 次にその結果に基づいて設計基準をもうけることが必要と考えられる。しかし, 地盤の動的応答をも考慮した埋設管の動的応答は, 擁壁, 岸壁などの構造物の場合¹⁾に比べてほとんど研究されていない。さらに埋設管の設計には明確な規準がもうけられていない。ある設計においては, 埋設管に作用する外力を計算する場合, 一時的かつ動的な地震力は管に自重や管に作用する土圧などの常時的かつ静的外力と同じように標準荷重に荷重修正係数をかけることで求められているが, 地震力のような動的な外力を静的な外力と同じように取り扱うことには問題があるように思われる。

そこでわれわれは埋設管の耐震性を考慮した設計に必要な基礎データを得るため, 次のような実験によって埋設管の動的応答を調べた。実験では振動台を用い, 台の上にのせられた砂箱の中に砂層を作り, それに強制振動を与えて箱の中に取り付けられた埋設管に作用する振動土圧を測定した。

埋設管に作用する振動土圧は震度, 砂層の密度, 土かぶり厚および岩盤からの埋設管の埋設高さによって変化することが予想されたので, それらの関係に注目して実験結果を整理してみた。

本論文はその実験および結果について述べたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は Photo. 1 に見られるような砂箱を取りつけた振動台を用いて行なわれた。振動台は載荷面積 1 m^2 で許容塔載重量は 0.5 t であり, 周期と振幅は運転中に連続的に変化できる。また, 振動は水平および垂直の2方向を与えることができる。砂箱は鋼板製で, 深さ, 幅および長さはそれぞれ $30 \times 58 \times 100 \text{ cm}$ である。さらに箱の振動方向に平行な壁には円筒状の管(これを以後, 埋設管と言う)が取り付けられるように孔があげられている。埋設管はアクリル製のものであり, 内径 5 cm , 肉厚 0.5 cm および長さ 55 cm である。こ

* 土木工学科

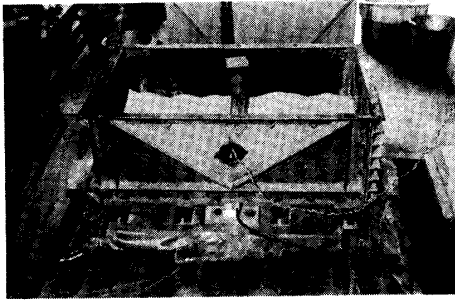


Photo. 1 Vibrating test apparatus.

の埋設管はアルミ棒（直径1 cm）で支持されており、それはアルミ棒で支えられた状態で砂箱内に固定された。

実験では、砂箱に気乾状態の豊浦砂を詰めて埋設管が砂中に埋められた状態とし、振動台を駆動して埋設管に作用する振動土圧および正弦波振動加速度を測定した。振動土圧はアルミ棒にはりつけられたヒズミゲージによって、また振動加速度は振動台に固定された加速度計によって電気的出力に変えられてペン書きレコーダに連続的に記録させた。

豊浦砂の粒度組成は Fig. 1 に見られるようである。またその他の物理的性質は次のとおりである。比重：2.630，均等係数：2.0，最大間ゲキ比：1.09，最小間ゲキ比：0.64。

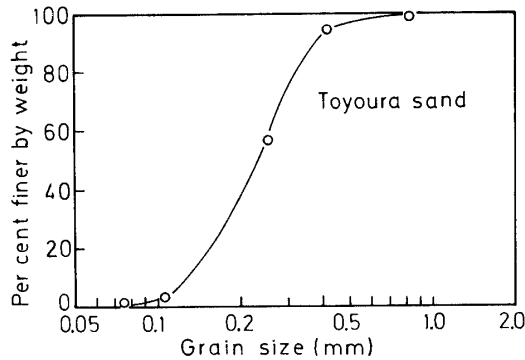


Fig. 1 Grain size distribution curve.

実験は水平あるいは垂直振動のいずれかを与えた状態で行なわれた。まず、豊浦砂は次に示す方法によって砂箱に詰められた。水平振動実験においては、埋設管は砂箱の底部からの高さ (H) が4, 14および24 cmのそれぞれに取り付けられた。なお振動によって生じる砂の沈下による埋設管の沈下を防止するために、埋設管と砂箱底部間には支持板が装着された。このようにして埋設管がセットされた砂箱に次の方法によって所定の砂かぶり厚 (h) を有する均一な砂層を作った。すなわち、気乾状態の砂をバスケットに入れてつり上

げ砂箱上約50 cmの高さからビニールホースを通じて砂箱に流し込むという方法である。このようにして詰められた砂層の単位体積重量は 1.32 g/cm^3 （相対密度：21.2%）であった。埋設管の取り付け高さ H および砂かぶり厚 h は Fig. 2 に示されている。

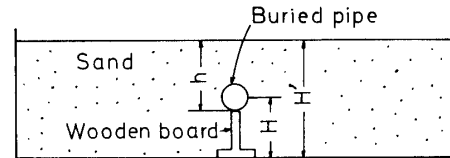


Fig. 2 Outline of the buried pipe and the shaking sand box filled with sand.

垂直振動実験においては、 H は14, 24 cmの2通りにした。この実験はまず、埋設管が取り付けられた砂箱に水平振動実験の場合と同じ方法で砂を埋設管底部まで詰めて砂層に震度0.2の水平振動を与えて砂を締め固めた。次に、砂箱に所定の砂かぶり厚まで砂を詰めた。ここで、埋設管から下部の砂層を締め固めたのは水平振動実験において埋設管と砂箱との間に支持板を設けたのと同じ理由による。

水平振動および垂直振動実験の両者において、振動加速度の振動数は3サイクルで、振幅を変化させて所定の震度の振動を与えた。地震における垂直震度は水平震度の半分程度であることを考慮して、水平振動実験の場合の震度はほぼ0.1, 0.2, 0.3および0.4，また垂直振動実験の場合のそれはおよそ0.1, 0.2とした。各震度における加振時間はすべて30秒とし、振動によって埋設管軸に直角方向に作用する振動土圧の測定を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 埋設管から上の土かぶり厚と振動土圧の関係

Fig. 3 (a), (b) はそれぞれ水平振動実験、垂直振動実験によって得られた代表的な実験記録の例である。この実験記録はいずれも埋設管を支えているアルミ棒の砂箱への取り付け高さ（以下埋設管の取り付け高さと言う）が14 cm，また埋設管底部から上の砂かぶり厚が19 cmの場合のものである。各記録において上、下の波形はそれぞれ埋設管に作用する振動土圧，砂層に与えられる振動加速度を表わしている。

Fig. 3 (a) から、砂層に与えられる振動加速度が増加する言いかえると震度が大きくなる時に、振動土圧は急激に大きくなるが、振動時間の経過にもなるとそれはほぼ一定となっていることがわかる。ところが、一

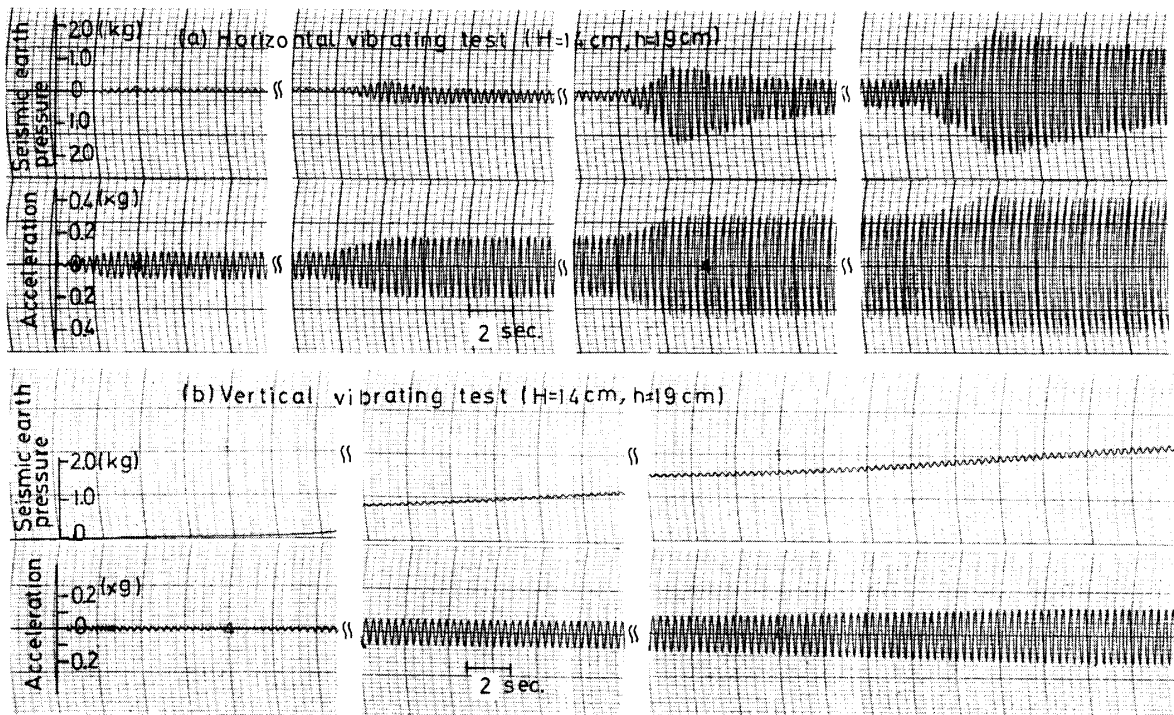


Fig. 3 Records of vibrating test.

度水平振動実験を行なった後、振動によって生じた砂の沈下量に相当するだけの砂を補充して二回目の振動実験を行なった場合には、震度をかえる段階での振動土圧の急激な増加は見られなかった。なお、砂箱に震度0.4までの振動を与えた一回目の実験後の砂層の単位体積重量は 1.38g/cm^3 （相対密度：40.6%）程度となり、それは振動実験を行なう前に比べて 0.1g/cm^3 程度増加していた。したがって一回目の実験に見られる振動土圧の急激な増大は砂層がゆるく詰っていたために振動による砂の動きが活発であったために生じたと考えられる。

実際に埋設管を地盤に埋設する場合は管の周囲の土は締固められるので、震度が変わる時に埋設管に作用する振動土圧は突然に大きくなることはないと思われる。そこで、われわれは実験結果を整理するに当たっては、振動土圧は土圧振幅が安定した時の半振幅の値で表わすことにした。

Fig. 3 (b) において土圧振幅の中心が基線から次第にずれているが、これは埋設管が上かぶり圧によってある程度たわんでいることを示す。

Fig. 4, 5 はそれぞれ水平振動および垂直振動実験結果に基づいて震度と埋設管に作用する振動土圧の関係で整理したものである。図中、実線、破線で示される曲線はそれぞれ砂層がゆるい状態で行なった一回目の実験結果、砂層が締まった状態で行なった二回目の実験結果を示している。曲線はすべて7ないし8個の

測定値の平均的な値をもとにして描かれている。また、 H, h は Fig. 2 に図示されているものに対応する。

本実験においては埋設管に作用する振動土圧の長さ方向の分布は測定しないで、便宜上、管全体に作用する土圧合力を測定するようにした。そこで実験結果は振動土圧合力の作用点があるものと考えて整理されている。土圧合力の大きさとヒズミゲージのヒズミ量との関係は実験中におけるヒズミゲージの破損の有無を調べることもかねて実験中に数回求めたが、その関係は線形であり、また再現性のあることが確められた。

さて、Fig. 4 から、埋設管が締固めを行なう前の砂層中および締固めを行なった後の砂層中に埋設された両方の測定において、各埋設管の砂箱への取り付け高さ H での水平振動土圧は、震度 k_h が増加すると著しく大きくなり、また砂かぶり厚 h が増大するとわずかに大きくなるのがわかる。 $h=3\text{cm}$ すなわち砂層表面がちょうど埋設管の中央部に一致する場合であるが、この場合は水平振動土圧が他のいずれの砂かぶり厚で実験を行なって得られたそれらに比べて著しく小さい。これは埋設管が完全に砂層中に埋設されていないことに起因するものである。ところで、埋設管から上の砂かぶり厚と振動土圧の関係は本実験で用いたのと同じ状態の砂を砂箱に詰めて箱の壁面に取りつけた3つの土圧計によって振動土圧の深さ方向の分布を測定した結果 (Fig. 6) とよく対応している。ここで Fig. 4 (a)

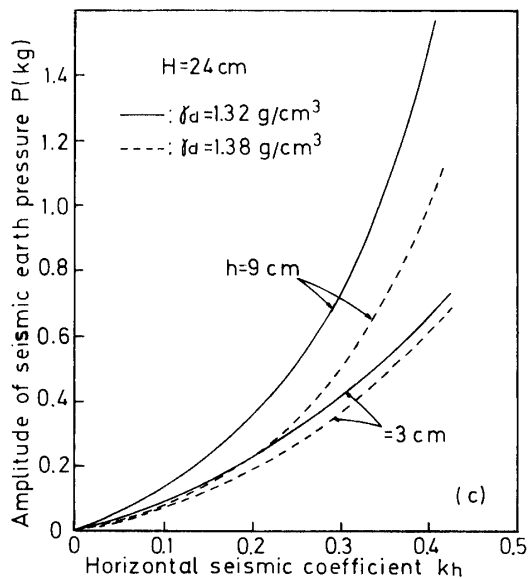
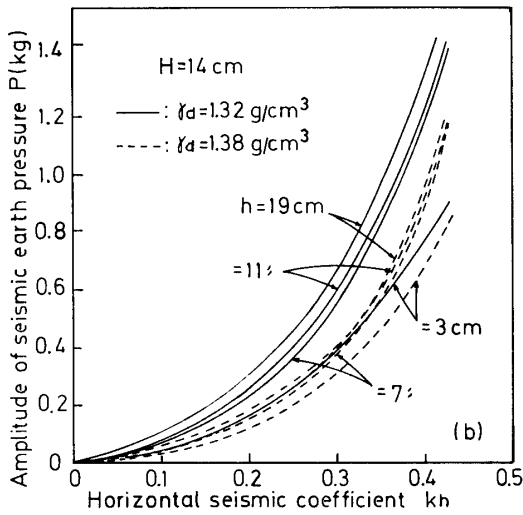
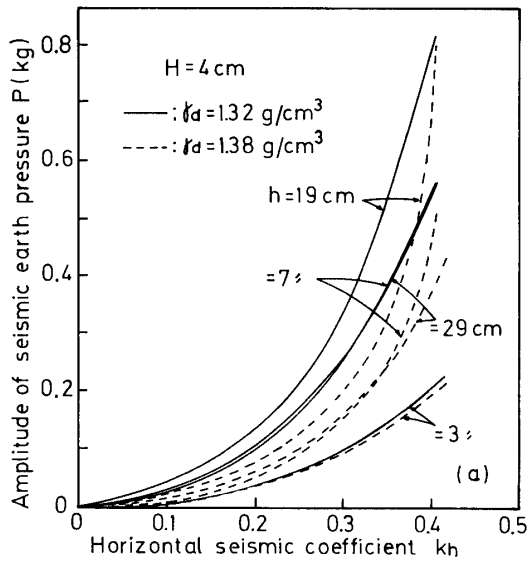


Fig. 4 Relationships between amplitude of seismic earth pressure P and horizontal seismic coefficient k_h .

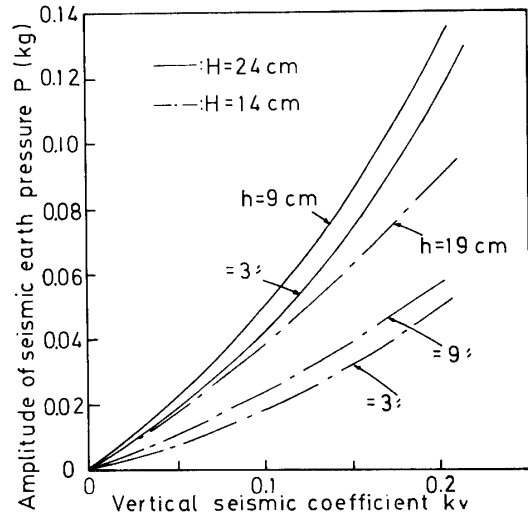


Fig. 5 Relationships between amplitude of seismic earth pressure P and vertical seismic coefficient k_v .

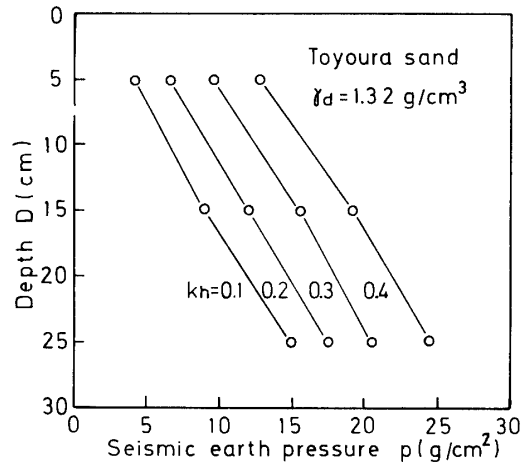


Fig. 6 Seismic earth pressure p acted on the rigid wall at three different heights.

に注目すると、各震度において $h = 29$ cm の場合の水平振動土圧は $h = 19$ cm の場合のそれよりかえって小さくなっていることがわかる。土かぶり厚だけからみれば $H = 4$ cm, $h = 29$ cm の場合の土かぶり厚は Fig. 6 における砂層表面からの深さ (D) = 25 cm の場合とほぼ同じである。ところで、 $D = 25$ cm での振動土圧は他の 2 つの位置 ($D = 5, 15$ cm) でのそれより明らかに大きい。したがってこのことから、振動中における砂の変形は砂箱の中央部と壁面近くとは異なることが示唆される。なお、 k_h および h が同じ場合、水平振動土圧は埋設管が砂箱の上方に取りつけられるほど大きくなっている。振動土圧と埋設管の取り付け高さの関係については次節で述べる。

次に埋設管に作用する振動土圧が砂層を締固めない場合と締固めた場合とでどのように異なるかを Fig. 4 で見ると、 H, h が同じ場合、水平震度 k_h がおよそ 0.3 より小さい範囲では、砂層を締固めることによって、水平振動土圧は砂層を締固める前のそれのおよそ 1/2 に減少している。 k_h が 0.3 以上になると、砂層を締固めることによって生じる振動土圧の減少の割合は k_h が 0.3 以下の場合よりも小さくなっている。このように埋設管に作用する水平振動土圧が埋設管の周囲の砂層を締固めることによって減少するのは、振動による砂層の動きが小さくなるためと考えられる。したがって埋設管周辺の土を締固めると、地震時の振動土圧を軽減することができる。この結果は埋設管に作用する応力を軽減させる一つの方法として、埋設管は管の側方および下方の土を締固めを十分にしておき、埋戻しを行なうようにされていることと一致する。

次に Fig. 5 から、埋設管に作用する垂直振動土圧は各埋設管の取り付け高さにおいて、Fig. 4 に示された結果と同じように土かぶり厚が大きくなるにつれてわずかに増加していることがわかる。

実際の地震に際しては振動土圧は埋設管に対してあらゆる方向から作用する。また振動土圧の大きさは地震のもつ複雑な加速度波形によって影響されるであろう。本研究は埋設管を埋設した砂層に水平あるいは垂直方向の振動を与えて埋設管軸に直角方向に作用する振動土圧を測定したわけだが、両方の実験において砂層の作り方、管の取り付け方が違うという点はあるにしても、水平および垂直振動土圧は土かぶり厚との関係でほとんど同じ傾向にあることが注目される。

3.2 埋設管の埋設位置の岩盤からの高さとの振動土圧の関係

盛土内に設置された埋設管に働く土圧の計算法は種々あるが、それらのうち弾性理論解によると、盛土内垂直応力集中係数 K_H は管の支持方法のいかんにかかわらず、剛性管路に対しては 1 以上の値、また可撓性管路に対しては 1 とするよう定められている²⁾。この集中係数は基底土の剛性に依存するものであって、非常に剛性の大きい岩盤のような場合に大きい値となる。弾性理論解においては埋設管に作用する力として地震力のような動的な外力は考えられていないが、類推によって地震時に管に作用する土圧は管から下部の地盤条件と無関係とは言えないであろう。

そこで埋設管に作用する振動土圧と管の岩盤からの埋設高さとの関係を検討した。水平振動実験の場合、振動によって生ずる砂の沈下による埋設管の沈下を防

ぐために、埋設管と砂箱の底部との間には支持板が装着されていた。したがって埋設管の砂箱に対する装着の程度は支持板の高さが低い換言すると埋設管が箱の底部に近く設置された場合に大きいと言える。すなわち埋設管が箱の底部の近くに埋設されるほど、それは堅固な岩盤の近くに支持されていることを意味する。

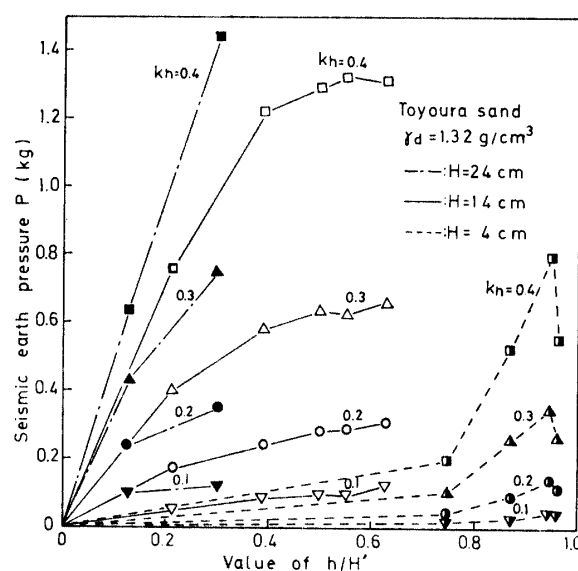


Fig. 7 Relationships between seismic earth pressure P and value of h/H' .

水平振動実験結果を基にして、振動土圧 P を縦座標に、埋設管から上の土かぶり厚と砂箱の底部からの全土かぶり厚との比 h/H' (Fig. 1 参照) を横座標に取って両者の関係をプロットしたところ、Fig. 7 に示される結果を得た。 $H=14$ cm および 24 cm の実験値は $H=4$ cm の場合に比べて h/H' の範囲が限られているが、実験範囲内において次のことが言える。すなわち前節で指摘したようにそれぞれの埋設管の取り付け高さにおいて、振動土圧は震度、土かぶり厚が大きくなるほど増加しているが、 h/H' および震度が同じ場合の振動土圧の値を比較して見ると、 $H=4$ cm での振動土圧は $H=14$ および 24 cm でのそれよりも著しく小さい。さらに、 $H=4$ cm における振動土圧は他の 2 つの場合に比べて震度が増加してもあまり大きくならない。これらの傾向は一度締固められた砂層中の埋設管に作用する振動土圧の測定結果においても認められた。

以上のことから、地震が起った場合、埋設管路に作用する振動土圧は管路が剛性の大きい岩盤の近くに埋設されている場合に小さいと考えられる。したがって埋設管路の地震時の安定性を振動土圧の大きさに限定して論じるならば、埋設管路の被害は管路が硬地盤近くに埋設された場合において小さいと言える。この結

論は埋設管路の震害の観察によって管路の被害は管路が地表下深くに埋設されている場合、また硬地盤上に埋設されている場合に小さいと報告されていることとよい対応が見られる。しかし、本実験では一本の短い埋設管だけを対象にしたので、管路取り付け部の振動時における挙動などは調べられなかった。実際問題として管路の接合部分の震害は大きいと考えられるから、今後、継手によって連結された埋設管の地震時における動的応答を検討する必要がある。

4. ま と め

地震時に埋設管に作用する振動土圧を調べることを目的として、実験を行なって振動土圧と震度、砂層の密度、土かぶり厚および岩盤からの埋設管の埋設高さとの関係を調べた。その結果、次のことが明らかにされた。

- 1) 埋設管に作用する水平および垂直振動土圧は震度が大きくなるにしたがって増加する。
- 2) 水平振動土圧は管周辺の砂層を締固めることす

なわち砂層の密度が大きくなることによって非常に小さくなる。この原因は締まった砂層では砂層の振動変位が小さくなるためと考えられる。

3) 水平および垂直振動土圧は埋設管から上の土かぶり厚が増加するにつれてわずかに増加する傾向が見られるが、土かぶり厚が同じ場合には、振動土圧は埋設管が硬地盤の近くに埋設されているほど著しく小さくなる。すなわち振動土圧に対する影響は前者のそれより後者の方が著しく大きい。

終りに本実験は本学技官藤井信夫氏および学生吉永光男、松浦龍浩両君の助力を得て行なわれたことを付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) H. Matuo and S. Ōhara: Tech. Repts. of the Yamaguchi Univ., Vol. 1, No. 4, pp. 455~466 (1976)
- 2) 原田千三: 埋設管設計法, 森北出版 (1975) pp. 13~20.

(昭和51年3月25日 受理)