

## 地下埋設管の振動実験について

箕輪親宏\*

国立防災科学技術センター大型実験研究部

### Dynamic Experiment of an Underground Pipe

By

Chikahiro Minowa

*Research Division of Large Experiments National Research Center for  
Disaster Prevention No. 4489-1, Kurihara, Sakura-mura,  
Niihari-gun, Ibaraki-ken 300-32*

#### Abstract

This paper describes the dynamic tests of an underground pipe. A steel pipe of 60.5 m in length, and 140 mm in diameter was set in a trench which was refilled with sand. The pipe was excited by two methods. First, waves were generated from the shaking table. Secondly, an excitor was connected with the pipe. An axial strain of about  $15 \times 10^{-6}$  was measured in the test by the waves from the shaking table. In this test, the accelerations of the ground and the pipe were both 5—10 gals. The strain values might be explained by the wave propagation. The underground pipes strains for small vibrations may be explained by waves propagation of the ground.

#### まえがき

科学技術が進歩するとともに人間の生活をより便利に快適にするため、都市に電気、ガス、水道などの設備が施されるようになった。これら都市設備は美観ならびに都市計画上の理由により地下に埋設されることが多い。都市設備だけでなく最近の科学技術により発達した社会は災害の洗礼をほとんど受けておらず、特に地震に対しては多大な不安が抱かれている。

過去にこれら都市設備、すなわち地下埋設管が被害を受けた地震としては、国内で古くは関東大地震（1923年）、福井地震（1948年）、近年では新潟地震（1964年）、十勝沖地震（1968年）、伊豆半島沖地震（1974年）などがあり、海外ではサンフエルナンド地震<sup>1), 2), 5), 6), 10), 14)</sup>（1971年）がある。

被害の種類はまず地震による直接被害と間接被害に分けられる。直接被害としては地震地

---

\* 耐震実験室

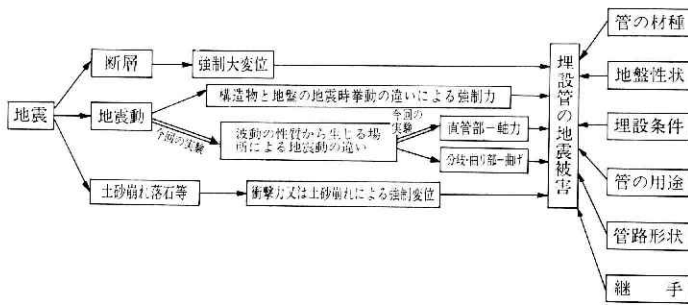
動による曲り部，分岐部の折れおよび抜け，直管部での圧壊および抜け，建物近傍での抜けおよび折れ等の被害などがあげられる，間接被害としては，地震による土砂崩れ，落石，地盤の流動化に伴う埋設管の被害をあげることができる．直接被害に注目した場合，曲り部分の被害は曲げモーメントによると推定され，直線部は軸力によると考えられる．これらの部分に継手があると，この所で変形を吸収しようとして管の抜けなどの被害が現われる．

表1は埋設管の地震被害に関係すると思われる項目をあげたものである．

埋設管の耐震性に関する研究<sup>3),7),11)</sup>は数多くあるが，ここでは地下埋設管の耐震性研究の第一歩として，振動台加振時の地盤振動を利用して直線状の埋設管の振動挙動を実験的に調べた．

なお，水道管のように内圧が加わった管路では地震時の内圧による被害が発生するが，こ

表 1 埋設管地震被害関連  
Table 1 Relation between the underground pipe damages and earthquakes



の件については小川信行の「水道管路の被害と地震時動水圧」(国立防災科学技術センター研究報告第15号，昭和51年10月)で論ぜられている．

## 1. 実験概要

地下埋設管の地震時の挙動を把握する第一歩として，茨城県の筑波研究学園都市にある大型実験研究部構内に長さ 60.5 m の直線管を埋設し，次の二つの方法で埋設管に振動を加え，埋設管の挙動を調べた．

- a) 大型振動台基礎から伝わる振動を利用する方法．
- b) 起振器を直接，埋設管に据付けて加振する方法．

加えた振動は a) の場合では正弦波とパルス波，b) では正弦波である．結果について述べてみると，a) の方法では管体軸方向の歪が  $15 \times 10^{-6}$  ほど，5 Hz～9 Hz の正弦波の振動で生じた．b) の方法では，管軸および管軸直交方向に起振したとき起振力の増加と共に曲げ歪が増加するのが測定された．

### 1.1 供試管および埋設条件

表 2 供試管概要  
Table 2 Outlines of steel pipes

外 径 2r	139.8 mm
内 径	130.8 mm
肉 厚	4.5 mm
断面 2 次モーメント I	438 cm <sup>4</sup>
断 面 積 S	19.13 cm <sup>2</sup>
断 面 係 数 Z	62.7 cm <sup>3</sup>
ヤ ン グ 率 E	2.1 × 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>
単位長さ重量	15 kg/m
鉄 の 比 重	7.8
外 周 φ	43.9 cm
切 口 断 面 積	153.5 cm <sup>2</sup>
み かけ 比 重	1.0

今回の実験において使用した管は JISG-G-3452 の口径 125-5、長さ 5.5 m のガス配管用炭素鋼管の白管である。この管の力学的諸定数を表 2 に示す。この鋼管をネジ込みソケットにより、11 本接続し、全長 60.5 m にし、図 1 に示すように埋設した。両端はネジ蓋により密封した。

埋設溝は写真 1 に示すように幅 1.0 m、深さ 0.7 m 長さ 62.5 m である。管は約 10 cm の厚さに敷きつめられたサンドマットの上に置かれ、砂でもって埋戻された。埋設深さは管上側

で約 40 cm である。埋設後、ブルドーザーにより砂を転圧した。

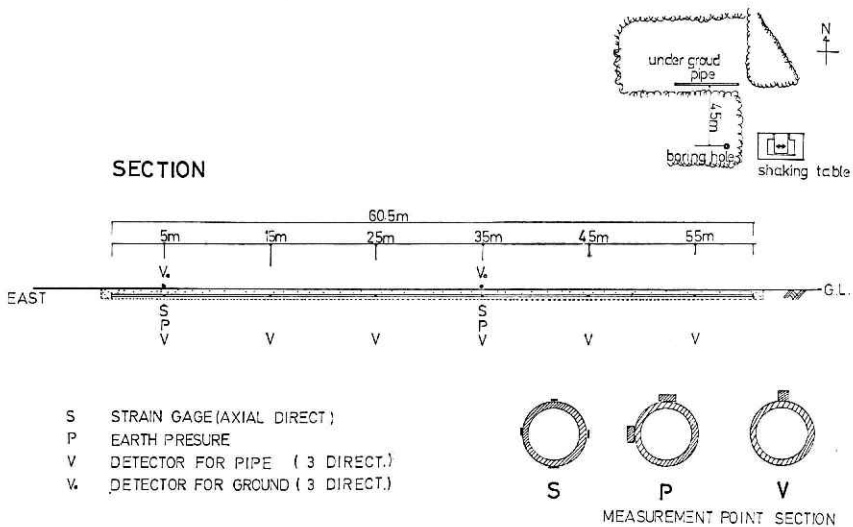


図 1 管埋設状況およびセンサー取付状況  
Fig. 1 Setting of sensors and pipe-line

### 1.2 地盤条件

図 1 のボウリング孔で地盤調査を行なった。その結果を表 3 に示す。管埋設地点は地盤調査地点といくらか離れているが、振動台建設当時の地盤調査結果および二次元振動台の地盤調査結果がこの結果と同様なのでこの表 3 が付近の地盤全体を代表すると考えられる。

### 1.3 埋戻し砂の性状

埋戻し砂をサンプリングし、単位体積重量他の土質試験を行なった。サンプリング地点は図 1 の 5 m、15、35 m、55 m 地点の深さ 10 cm、20 cm、30 cm の所である。

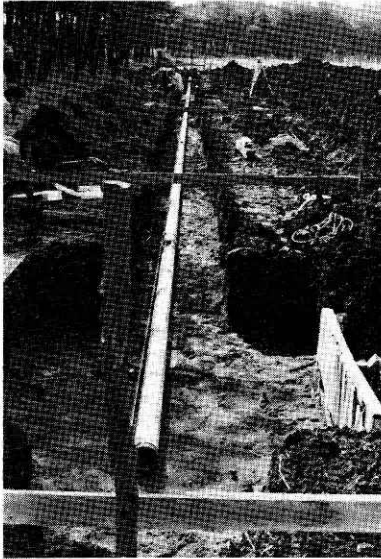


写真 1 管路埋設工事  
Picture 1 Pipe-line construction



写真 2 センサー取付状況  
Picture 2 Setting of sensors

試験結果を示すと次のようになる。

土質名 : レキ混り砂

60%粒径  $D_{60}$  : 0.3~0.38 mm

単位体積重量  $\rho$  : 1.66~2.02 g/cm<sup>3</sup>

深度 (m)	地質名	標準貫入試験 N値					Vs m/sec	Vp m/sec	$\rho$ g/cm <sup>2</sup>
		10	20	30	40	50			
1.70	ローム						82		1.3
3.40	凝灰質粘土						145	1150	1.6
4.80	粘土質シルト								
6.20	砂質シルト								
7.35	凝灰質粘土								
9.05	中砂						230	1800	1.7
10.65	礫混り中砂								
15.10	細砂								
16.90	砂混りシルト						400	1800	1.9
17.80	砂質シルト								
21.90	細砂						480	1800	1.7
23.60	粘土質シルト								
28.95	細砂						320	1800	1.7
31.60	砂混りシルト								
32.60	シルト混り細砂						406	1800	1.9
37.10	砂混りシルト								
38.80	細砂						406	1800	1.9
	礫混り中砂								

表 3 地盤調査結果  
Table 3 Result of boring surveys

乾燥密度 : 1.15~1.64 g/cm<sup>3</sup>

飽和度 : 36.5~96.0%

真比重 ; 2.68~2.71 g/cm<sup>3</sup>

自然含水比 : 11.8~23.3%

間 隙 比 : 0.65~0.88

一方、この埋戻し砂の弾性的性質は次のとおりである。P波速度：1000 m/sec, S波速度：105 m/sec,  $\rho$  を  $1.8 \text{ g/cm}^3$  と仮定すると。

ポアソン比 : 0.494, 剛性率 :  $203 \text{ kg/cm}^2$

ヤング率 :  $607 \text{ kg/cm}^2$

#### 1.4 測定方法

管体には、図1に示すように6カ所の測点を設けた。歪ゲージと土圧計は5 mと35 mの測点に、振動計はすべての測点6点に付けた。歪ゲージは管の上側、下側、両側面の計4ヶ所に張り付けた。歪ゲージの測定方向は管軸方向のみとした。土圧計は上側と片側面の2カ所に取付けた。振動計は管軸、管軸直角、上下方向の3方向測定できるものである。

地盤の振動は5 mと35 mの地表面で、管体と同じ振動計で測定した。その他、振動台実験では、振動台基礎に振動計を1カ所、加振方向に取付けた。起振機実験では起振機固定台に起振方向に応じて振動計を2カ所に取付けた。表4にこの実験で使用したセンサーの特性を示す。

表4 センサー特性  
Table 4 Characteristics of sensors

センサー	名 称	備 考
歪ゲージ	共和 KF-5-CI	防水型, 1ゲージ法
土 圧 計	共和 BE-2 KA	ダイヤフラム直径 88 mm, 最大容量 $2 \text{ kg/cm}^2$

セ ン サ ー	固有振動数	減 衰	測 定 位 置	測 定 項 目
ジオスペース Hs-28-215	28 Hz	—	管, 地盤	加速度
新興 BA-0.5 L	17 Hz	$1/\sqrt{2}$	起振器台	加速度
勝島 PK-130	3 Hz	10	起振器台	加速度
保坂 MTDH-IC	1 Hz	$1/\sqrt{2}$	振動台基礎	変位

管と地盤の振動測定に用いた HS-28-215 は加振振動数範囲で加加速度出力一定となるため、積分して加速度出力が一定とみなせるようにしている。

これら測定データはいったんデータレコーダーに記録し、バンドパス・フィルターを通して、ドリフト、高周波ノイズを取り除いて再生した。

#### 2. 振動台実験方法

振動台と埋設管の位置関係は、図1に示してある。

振動台を動かすと、その反力として振動台基礎に同等の力が伝わり、その振動は、地盤に

伝播する。この地盤振動は所によっては、振動台基礎のそれより大きくなることもある。この実験方法はこの地盤振動を利用して、埋設管に波動を作用させ、「管の振動および歪」と、「地盤の振動」を調べようとしたものである。

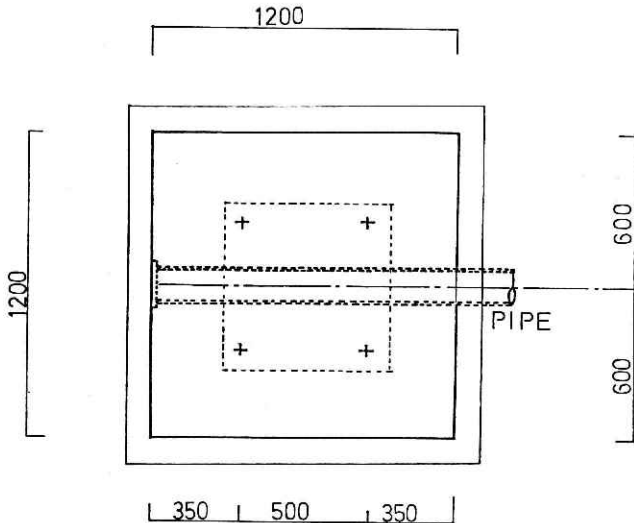
埋設管は振動台加振方向と管軸方向が一致するように設置されている。振動台基礎は  $39\text{m} \times 2.5\text{m}$  の底面を有しており、地下  $8.2\text{m}$  のしまった砂層に位置している。埋設管はこの基礎の中心から  $100\text{m}$  の円内に入っている。

この実験では大きな加振力を得るため、振動台に  $380\text{t}$  の砂箱を載せ、振動台負荷を  $540\text{t}$  にして加振した。加振波は振幅  $100\text{gal}$  の正弦波と、振幅  $5\text{mm}$  の矩形パルス波を用いた。正弦波の振動数は、 $1\text{Hz} \sim 10\text{Hz}$  まで  $0.25\text{Hz}$  きざみで、 $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$  まで  $0.5\text{Hz}$  きざみである。なお、この時の加振力は約  $54\text{t}$  である。

### 2-1 起振機実験方法

この実験では埋設管東端に、図2に示す起振機固定台を付けた。起振機は伊藤精機製 EX-100 DC を用いた。実験はこの起振機をコンクリート製の固定台にアンカーボルトで取付け、起振方向を管軸、管軸直交、上下に選び、計3回行なった。各方向の加振とも起振モーメントは  $40\text{kg}\cdot\text{cm}$  であり、起振力との関係は、図3のようになっている。起振振動数は  $2\text{Hz} \sim 10\text{Hz}$  まで  $0.5\text{Hz}$  きざみで、 $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$  まで  $0.25\text{Hz}$  きざみである。図3からも明らかなように  $10\text{Hz}$  以下の振動数では起振力は小さい。

固定台の重量は約  $1.6\text{t}$ 、起振機重量は約  $10\text{t}$  であり、固定台表面は地表面から約  $20\text{cm}$



PLAN

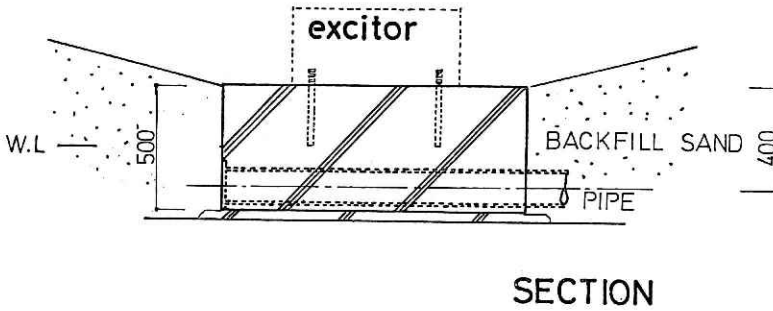


図2 起振機取付台  
Fig. 2 Table for the excitor

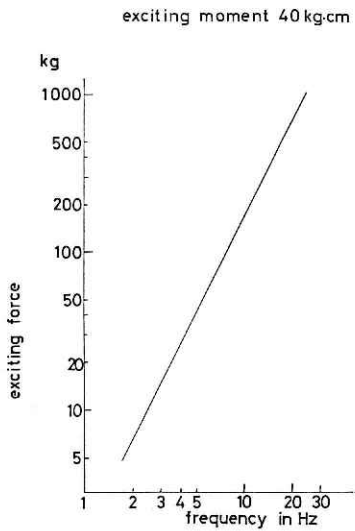


図3 起振機の起振モーメントと起振力の関係  
Fig. 3 Relation between exciting moments and exciting forces

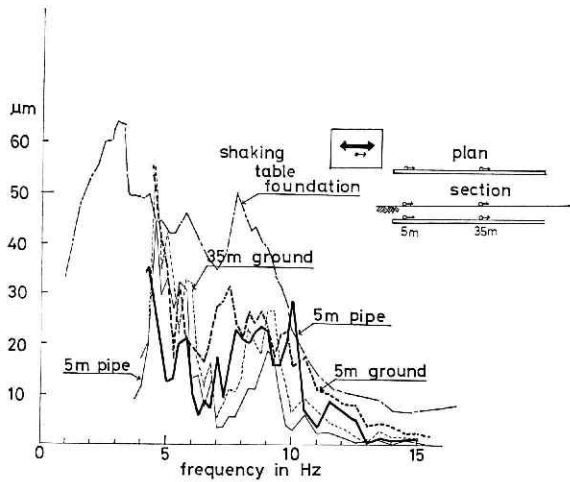


図4 振動台実験管変位および地盤変位管軸方向  
Fig. 4 Axial displacements of the pipe and ground in the test using the shaking table

下った所にある。重心は固定台のほぼ中央と考えられ、重心回りの慣性モーメントは  $2.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$  である。

### 3. 振動台実験結果

#### a) 正弦波実験結果

図4～図15に実験結果を示す。図4は加振方向すなわち管軸方向の測定結果であり、変位振幅を振動数に対し、プロットしてある。埋設管と地表の変位は加速度記録から換算したものである。加速度記録の場合1 Hz～5 Hzの記録では高振動数成分が含まれているため、大きく現われている所があり変位に換算するには難点がある。だが5 Hz以上の振動数範囲では測定記録はほとんど加振振動数成分だけでノイズはほとんど含んでいない。図4から振動

台基礎では 1 Hz～10 Hz で大きな振幅を示し、10 Hz 以後急激に小さくなっているのがわかる。特に 5 Hz～9 Hz にかけては振動台基礎と地盤で構成する振動系の固有振動数があり、加速度で見ると振動が大きく、8 Hz では約 12.6 gal ほどになっている。地盤および埋設管もこの振動数範囲 (5 Hz～10 Hz) で大きな振動を、各方向の成分とも示している。図 5 は上下方向の測定結果である。

地盤と埋設管の振幅を比べると、上下方向では振幅および振動数特性とも大変よく類似している。しかし管軸方向では振動数特性は類似しているが、振幅は全般に地盤の方が大きめである。特に管軸方向の振動モードを 6, 7, 8 図に示す。ここで特に、目立つのは、埋設管の西端に近い 55 m の地点の振幅が全ての振動数で大きくなっていることである。

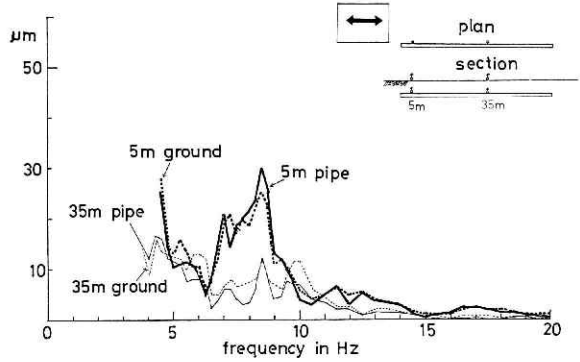


図 5 振動台実験管変位および地盤変位 (上下方向)

Fig. 5 Up-down displacements of the pipe and ground in the test using the shaking table

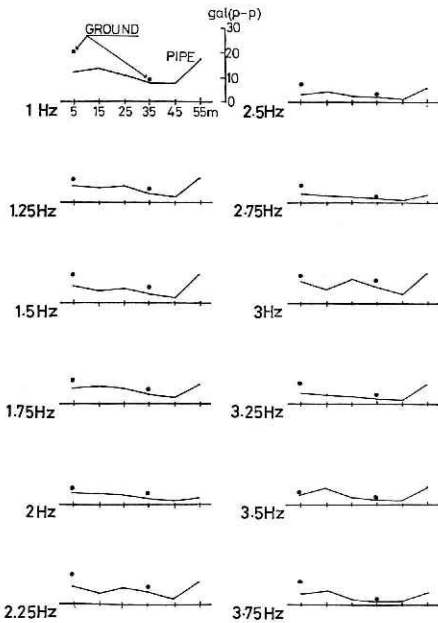


図 6 振動台実験埋設管振動モード  
Fig. 6 Vibrational modes for axial component in the test using the shaking table

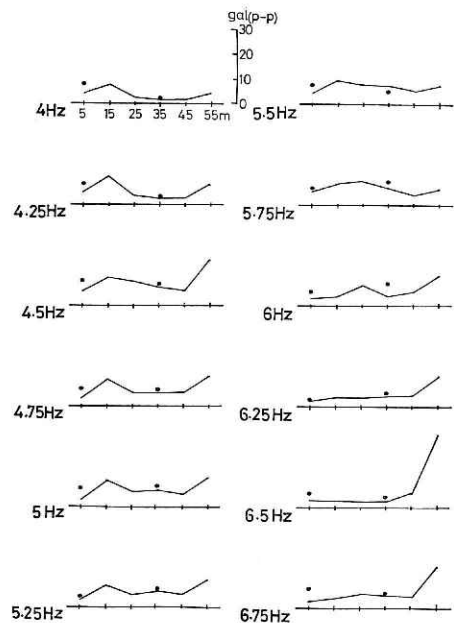


図 7 振動台実験埋設管振動モード  
Fig. 7 Vibrational modes for axial component in the test using the shaking table



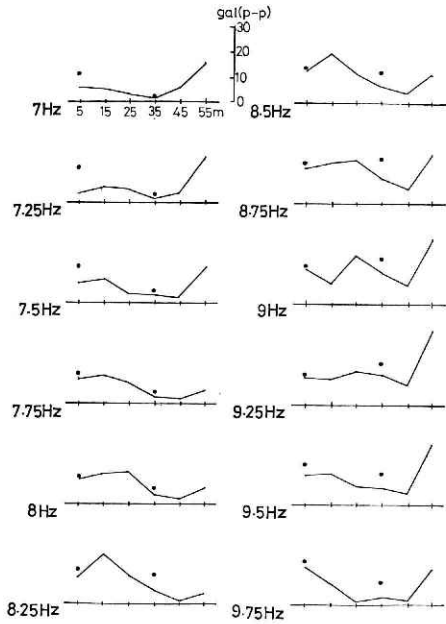


図 8 振動台実験埋設管振動モード  
Fig. 8 Vibrational modes for axial component in the test using the shaking table

次に歪について見ると、4 Hz～9.5 Hz で加振振動数の歪が生じているのがわかる。図 9～12 にその代表的な波形を載せる。低振動数の加振時でも 1.75 Hz のとき加振振動数成分の安定した  $5 \times 10^{-6}$  弱の歪を測定することができた。4 Hz から 9.5 Hz までの歪波形は埋設管の加速度が安定した波形であるにもかかわらず、かなり不安定なもので 10 波ほど歪波が続くと消えてしまい、しばらくしてまた生じるような波形であった。この時の歪は約  $15 \times 10^{-6}$  ほどで、歪波形は加速度波形に比べ乱れが大きい。一方、一断面四カ所の歪はほとんど同じ値を示しており、これらの歪が軸力によって生じていることを物語っている。この歪は 5 m, 35 m 地点ともほぼ同じ値であったので、図 13 に 35 m 地点だけの歪振動数に対しプロットしたものを示す。図 14 にこのときの土圧を示す。これから管軸直角

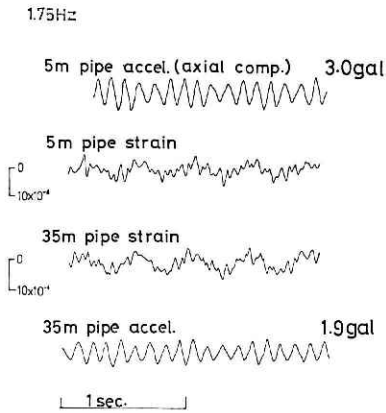


図 9 振動台実験埋設管振動および歪波形 (1.75 Hz)  
Fig. 9 Acceleration waves and strain waves of the pipes

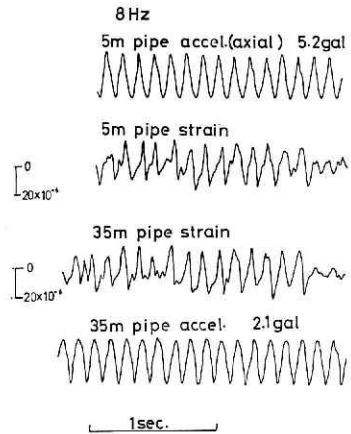


図 10 振動台実験埋設管振動および歪波形 (5.5 Hz)  
Fig. 10 Acceleration waves and strain waves of the pipes

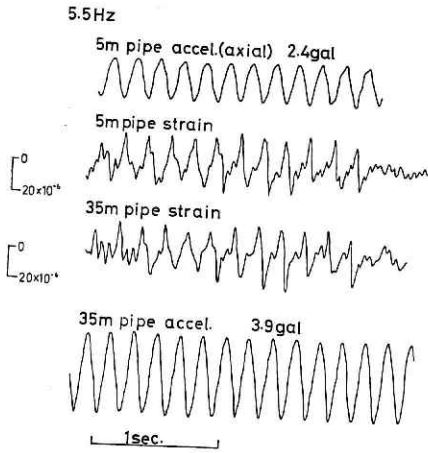


図 11 振動台実験埋設管振動および歪波形 (8.0 Hz)  
Fig. 11 Acceleration waves and strain waves of the pipes

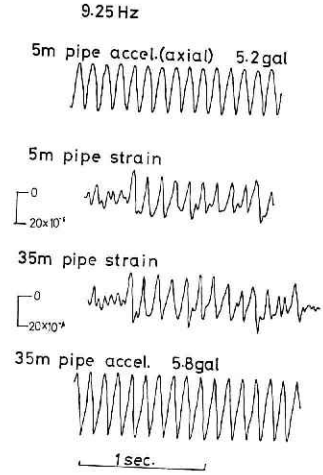


図 12 振動台実験埋設管振動および歪波形 (9.25 Hz)  
Fig. 12 Acceleration waves and strain waves of the pipes

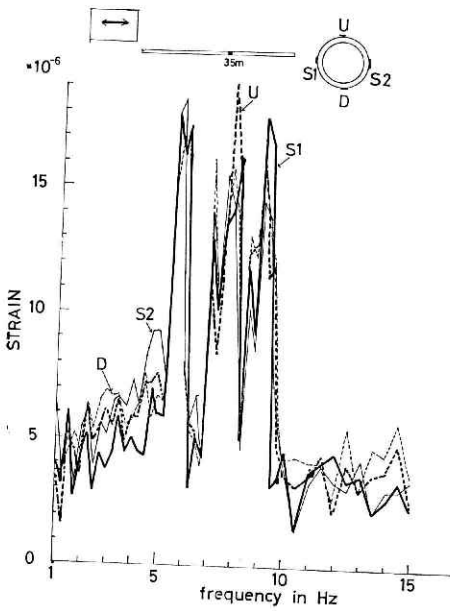


図 13 振動台実験埋設管 35m 地点の歪量  
Fig. 13 Relation between strains and forced frequencies at the point of 35m

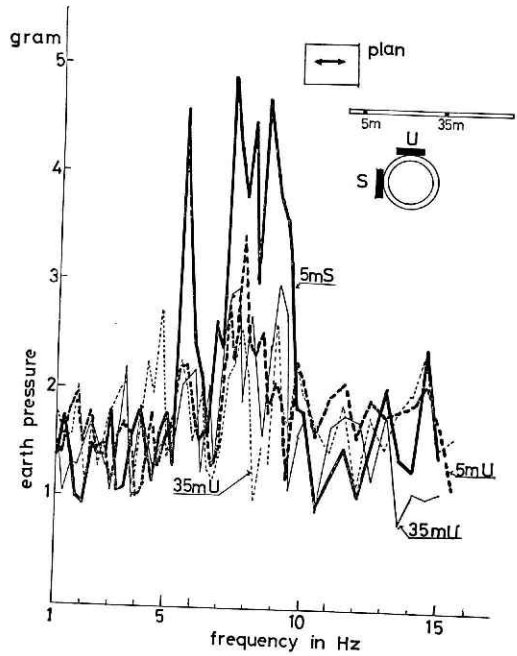


図 14 振動台実験埋設管 5 m, 35 地点土圧  
Fig. 14 Relation between earth-pressures and forced frequencies at the point of 5m and 35m

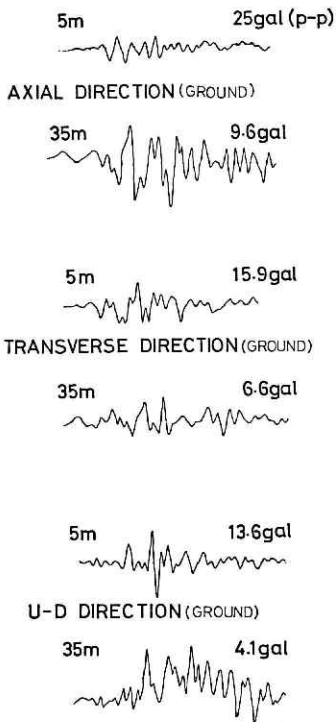


図 15 パルス波実験地盤波形  
Fig. 15 Measured waves of the ground by a pulse shock

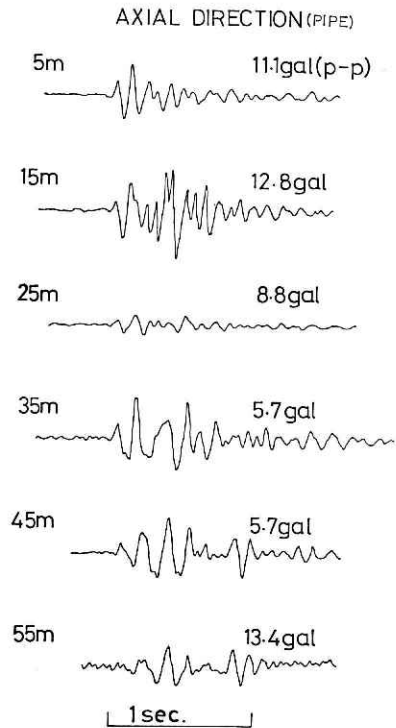


図 16 パルス波実験埋設管波形  
管軸方向成分  
Fig. 16 Measured waves of the pipe by a pulse shock

方向に力が加わっていたことがわかる。この土圧もやはり 5 Hz~10 Hz の間で大きな値を示している。四つの土圧計の中で 5 m の側面の土圧計が一番大きな値であった。

#### b) 矩形パルス波実験

図15に地盤の波形，図16，17，18に埋設管の波形を示す。正弦波同様，35 m 地点の管軸直角方向成分で管の振動の方が地盤の振動より大きくなっているのを除いて，地盤の方が大きな値を示している波形は管地盤とも類似している。矩形パルス波実験でもやはり 55 m 地点で振動が大きい。測点別に波形を見ると，振動数成分も最大値が起る時点も不規則であるが，地盤も埋設管も伝播する波の速度は波形が類似していることから，ほぼ同じと考えられる。管の管軸方向成分の波動から伝播速度を推定すると，5 m と 45 m の初動から P 波の速度は約 1,000 m/sec，5 m と 55 m の最大振幅から S 波は約 150 m/sec とみられるが，確定的なことは判明せず，測定区間でかなりのばらつきがある。

この矩形パルス波実験では歪はほとんど生じていない。

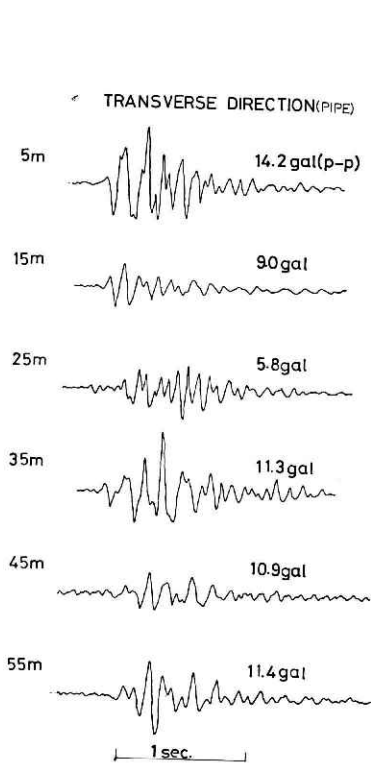


図 17 パルス波実験埋設管波形  
(管軸直交方向成分)  
Fig. 17 Measured waves of the  
pipe by a pulse shock

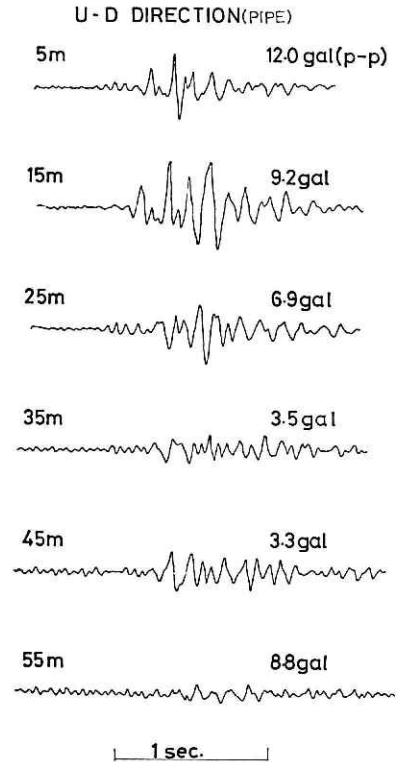


図 18 パルス波実験埋設管波形  
上下方向成分  
Fig. 18 Measured waves of the  
pipe by a pulse shock

#### 4. 起振機実験結果

##### a) 管軸方向起振実験

起振機固定台の動きを図 19 に示した。固定台で上下動が水平動の 7 割ほど生じている。また A 点と B 点の値が違うことから、埋設管が固定台の動きに影響し、埋設管側に寄った回転中心を有するロッキング振動をしているのがわかる。振動数が高くなるに従い振幅が増すが、これは起振力の増加によるものである。この振動数範囲では固定台に明確な共振点はみられない。

図 20, 21 に管軸方向と上下方向の埋設管と地盤の振動を示す。管軸方向の 5 m 地点の埋設管と地盤はほぼ同じ動きをしている。図 22 に管軸方向の振動のモードを表わす。この図から 25 m 地点から極端に振幅が小さくなるのがわかる。図 23 は 5 m 地点の土圧である。上向土圧が起振力の増加と共に大きな値を示しているの上、下方向に地盤反力が生じたのがわかる。歪は非常に小さく、35 m 地点では、歪はほとんど生じていないが、5 m の地点では管

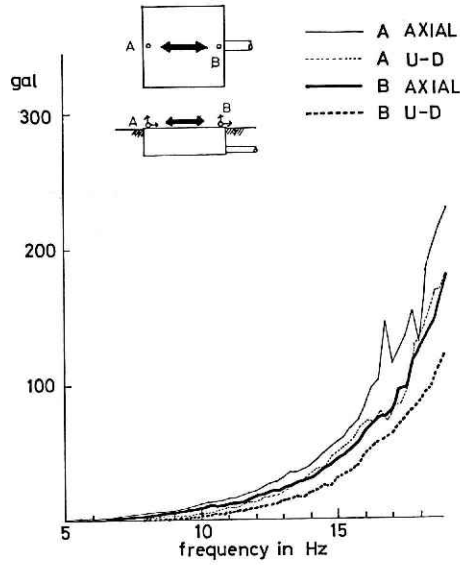


図 19 管軸方向起振時の起振機台の振動

Fig. 19 Vibrations of the table excited in axial direction

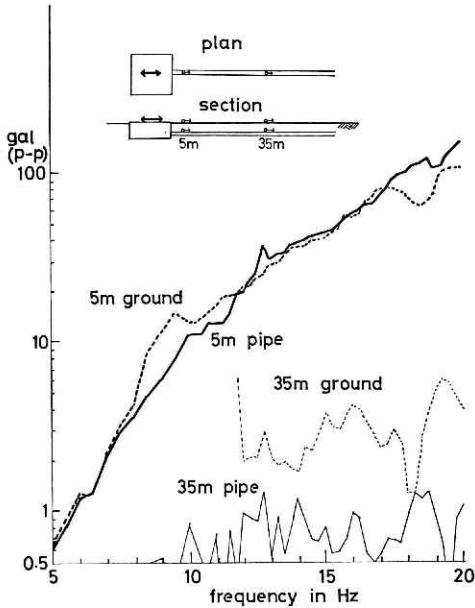


図 20 管軸方向起振時の埋設管と地盤の振動(管軸方向成分)

Fig. 20 Axial vibrations of the pipe and ground excited in axial direction

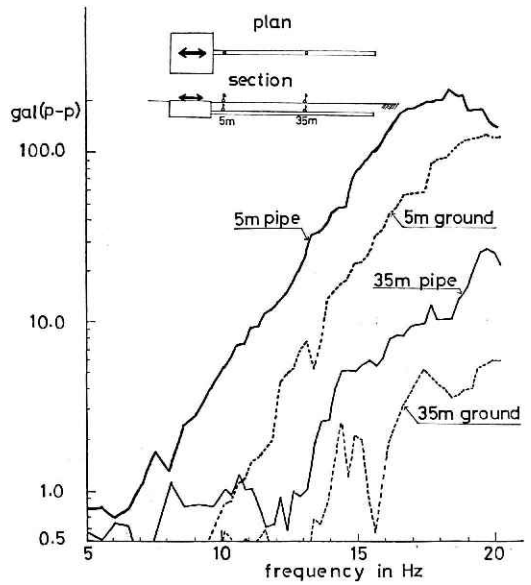


図 21 管軸方向起振時の埋設管と地盤の振動(上下方向成分)

Fig. 21 Up-down vibrations of the pipe and ground excited in axial direction

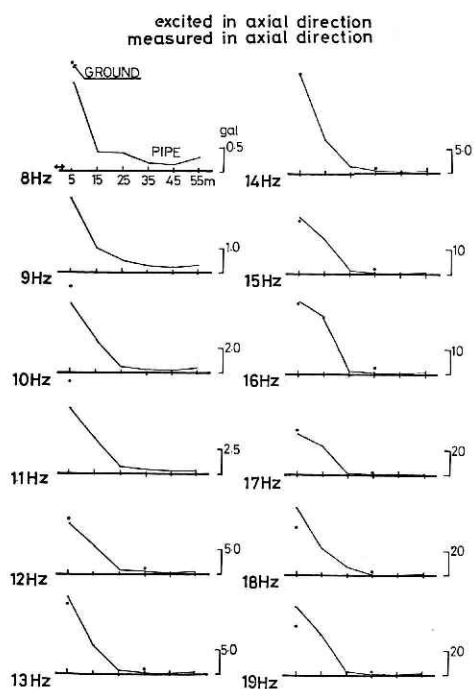


図 22 管軸方向起振時の管軸方向振動モード  
 Fig. 22 Axial vibration modes of the pipe excited in axial direction

の上側、側面の歪ゲージとも起振力の増加に従い大きくなっているが、上側と側面では値が違う、これらから推定すると埋設管には軸力とかなりの曲げが生じていると思われる。

**b) 管軸直交方向起振実験**

固定台中央下に回転中心を有するロッキング振動を固定台がしているのが図 24 からわかる。前項同様固定台には明瞭な共振点は見られない。埋設管と地盤の起振方向の振動は、図 25 に示すように 5 m, 35 m 地点ともほぼ同じである。このときの埋設管の振動モードは、図 25 に示すように 5 m, 35 m の地点から急激に小さくなっている。土圧すなわち管面反力は、5 m の側面の土圧計が比較

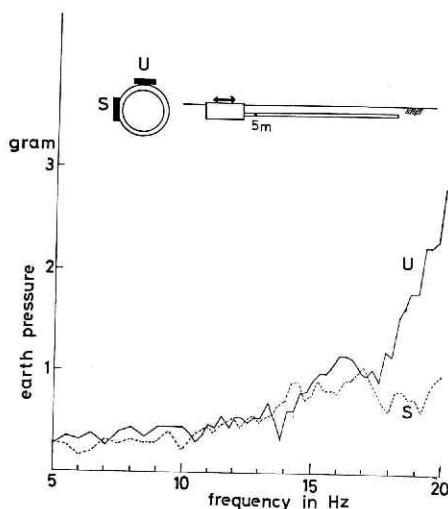


図 23 管軸方向起振時の埋設管 5 m 地点土圧  
 Fig. 23 Earth-pressures at the point of 5m excited in axial direction

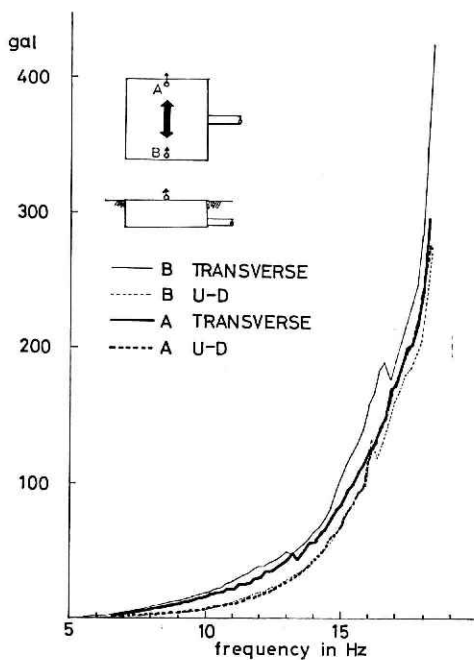


図 24 管軸直交方向起振時の起振機台の振動  
 Fig. 24 Vibrations of the table excited in transverse direction

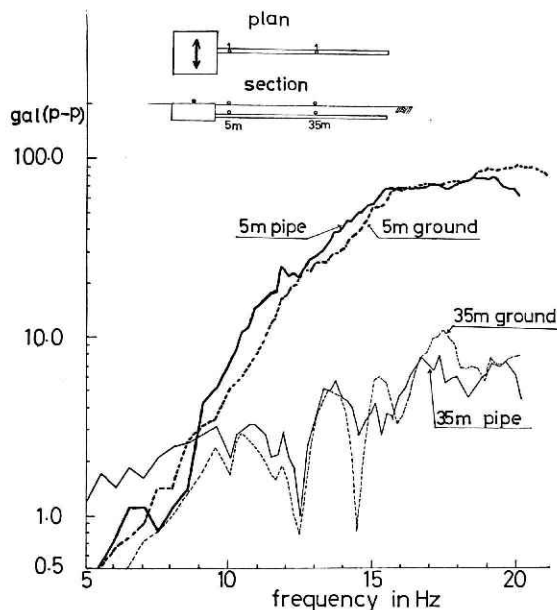


図 25 管軸直交方向起振時の埋設管と地盤の振動 (管軸直交方向成分)  
 Fig. 25 Transverse vibrations of the pipe and ground excited in transverse direction

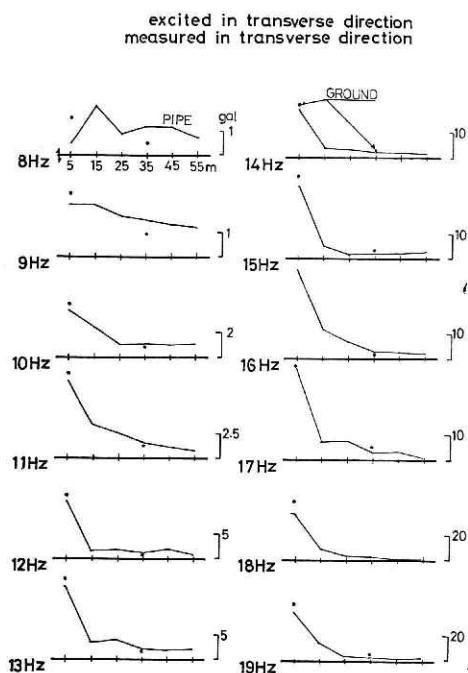


図 26 管軸直交方向起振時の管軸直交方向振動モード  
 Fig. 26 Transverse vibration modes excited in transverse direction

的大きな値を示している。これらから、曲げが埋設管に作用していると思われる。

なおこの実験のきき 17 Hz で起振機固定台付近の埋戻し砂が液状化した。

### c) 上下方向起振実験

このときも固定台には共振点はみられず、前の 2 方向の起振に比べ、埋設管に生じた振動は小さく、起振力の増加に伴う歪の増加はみられなかった。

## 5. 振動台実験結果の検討

### (i) 埋設管の振動と歪について

地盤と埋設管の間にすべりが生じない場合は埋設管を伝わる波動の位相速度と埋設管に生ずる歪が推定できる。波動は距離によって減衰しないとし、記号を次のように定める<sup>4), 12)</sup>

$V_p$  : 管軸方向に伝わる見かけの縦波の位相速度。

$V_s$  : 管軸方向に伝わる見かけの横波の位相速度。

$\omega$  : 角振動数。

$u, v$  : 測点の管軸, 管軸直交方向の変位。

仮定波形は次のようなものである。

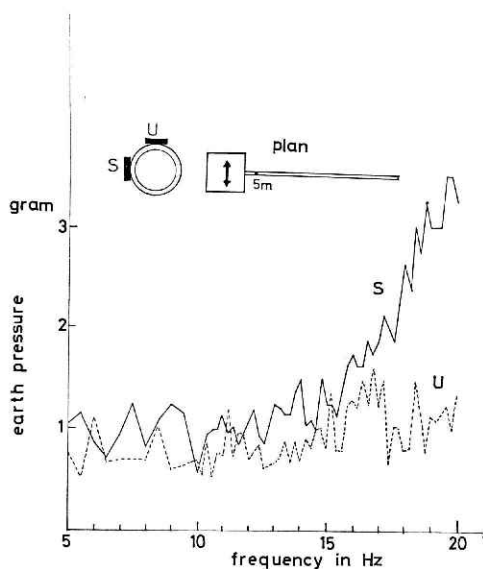


図 27 管直交方向起振時の埋設管  
5 m地点土圧  
Fig. 27 Earth-pressure at the point  
of 5m excited in transverse  
direction

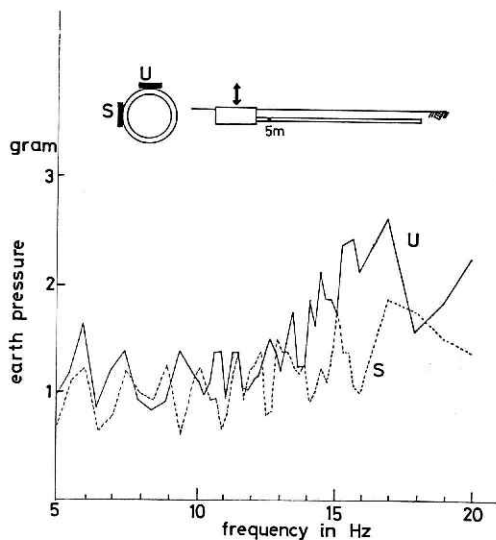


図 29 上下方向起振時の埋設管地点土圧  
Fig. 29 Earth-pressure at the point of  
5m excited in up-down direction

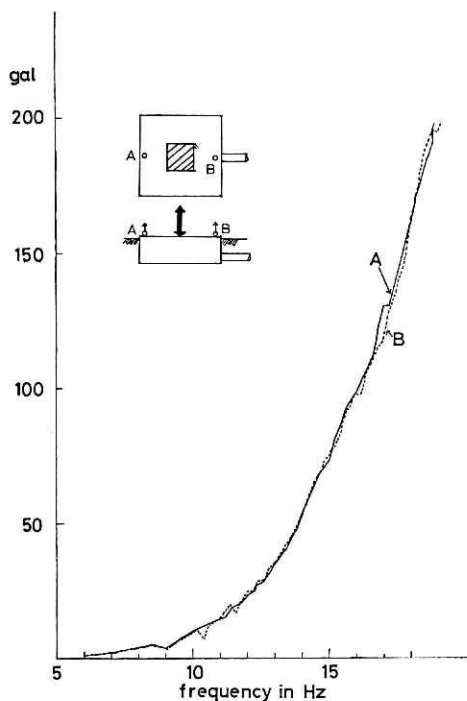


図 28 上下方向起振時の起振機台の  
振動  
Fig. 28 Vibrations of the table excited  
in up-down direction

$$u = A \sin\left(\frac{\omega}{V_p} x\right), \quad v = B \sin\left(\frac{\omega}{V_s} x\right)$$

u すなわち見かけの従波で軸力が発生し、軸歪  $\epsilon_a$  が生じる。

$$\epsilon_a = \frac{du}{dx} = \frac{A\omega}{V_p} \cos\left(\frac{\omega}{V_p} x\right) \quad (1)$$

v すなわち見かけの横波で曲げが起り、曲げ歪  $\epsilon_b$  が生じる。

$$\epsilon_b = -\gamma \frac{d^2v}{dx^2} = \gamma \frac{B\omega^2}{V_p^2} \sin\left(\frac{\omega}{V_p} x\right) \quad (2)$$

$$(\epsilon_b)_{max}/(E_a)_{max} = \gamma B\omega V_p / AV_s^2 \text{ となる。}$$

この比は  $\omega$  に伴ない直線的に増加するが、分母の  $V_p/V_s^2$  の値が利き 1 より、はるか小さな値になる。仮に見かけの横波の振幅が見かけの縦波の振幅の 2 倍あり、速度検層の結果でよく見られるように  $V_p = 300 \text{ m}$ ,



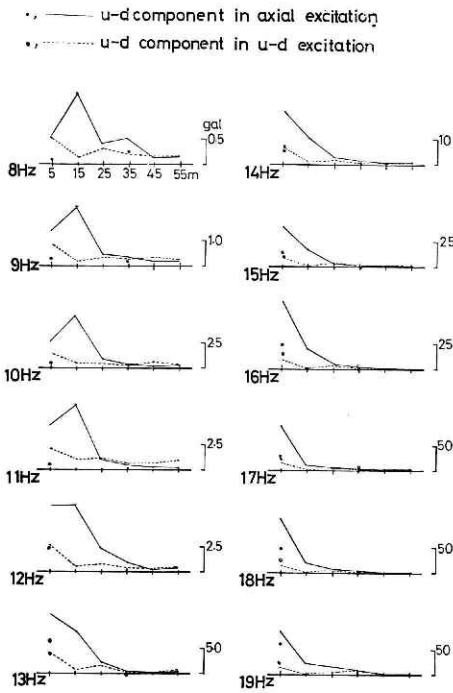


図 30 上下および管5m軸方向起振時  
上下方向振動モード  
Fig. 30 Up-down vibration modes  
excited in up-down direction  
and axial direction

$V_s=100$  m として、この埋設管についてこの比を求めると 10 Hz では 0.24 となり、5 Hz では 0.13 になる。  $V_p$  の値が  $V_s$  の値に近づくとこの比はさらに小さくなり  $\epsilon_s$  は無視してよいほどである。

次に、地盤と埋設管の間にすべりが生じた場合の歪を考える曲げ歪はすべりが生じても影響を受けないと考えられるので軸歪だけを調べる。ここで  $f$  を単位面積当りの最大摩擦力、 $L$  を波長 ( $L=2\pi V_p/\omega$ ) として、軸歪と変位を求めると次のようになる。

$$u = \frac{f\phi}{ES} \left( \frac{L}{4}x - \frac{x^2}{2} \right), \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$$

$$u_{max} = \frac{f\phi L^2}{32ES}, \quad x = \frac{L}{4} \quad (3)$$

$$\epsilon_{\omega} = \frac{f\phi}{ES} \left( \frac{L}{4} - x \right), \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{4}$$

$$\epsilon_{\omega max} = \frac{f\phi L}{4ES}, \quad x = 0 \quad (4)$$

となり、変位は位置の 2 次関数、歪は 1 次関数の形をした分布になる。これらの式を適用する

には、波の位相速度を決定しなければならない。振動台から伝播する波動の位相速度には、成層地盤の影響があり、実体波の他に、加振方向にはレイレイ波、加振直角方向にはラブ波が生じ分散性が現われる。この振動台の場合、地下 8.2 m の S 波速度 230 m/sec の層に位置し、埋設管は表層の約 100 m/sec の層に埋まっている。このことから理論的に位相速度を求めるのは大変難しい。表 5 に、加速度波形から読取った管路を伝わる管軸方向の波動の位相速度、および管路の振幅と歪から式(1)に基づいて推定した位相速度を示す。式から出した位相速度と実測位相速度の間にはかなりの相違があり、振動数によるバラツキも大きい。このようなバラツキを生じた原因としては埋設管に生じている振動が、図 6,7,8 に示すように大きい所があったり、小さい所があったりして一様でないことが考えられる。しかし埋設管の振動モード管歪と位相速度にどのように関係するか、まだ明らかになっておらず、今後の検討事項として残る。なお、5 m と 35 m 地点の管歪の値はほとんど同じであり、顕著な位相差も見られなかった。

次にこの埋設管に生じ得る最大歪を、 $V_s$  をパラメーターに選び、振動数別に推定したものを表 6 に示す。この値を推定するのに用いた式は(4)式であり、摩擦力  $f$  は次のような定

地下埋設管の振動実験について—箕輪

表 5 計算位相速度と実測位相速度と実測位相速度  
Table 5 Phase velocities calculated and measured

a	b	c	d	e	f	g	h
加振振動数	5 m と 15 m の位相速度	5 m の測歪定	5 m の加速度 (p.p)	c, d から ①式による位相速度	35m の測歪定	35m の加速度 (p.p)	f, g から ①式による位相速度
1.75	—	$4 \times 10^{-6}$	1.2	136m/sl	$4 \times 10^{-6}$	—	—
5.25	125m/s	—	—	—	—	—	—
5.5	143	16.2	4.8	34.7	17.9	7.7	62.2m/s
5.75	250	16.3	5.6	47.5	16.4	6.7	56.5
6.0	250	12.4	3.0	32.0	17.5	3.7	28.0
6.25	125	5.7	2.0	44.6	3.1	4.2	172.5
6.5	100	4.8	3.0	76.5	5.1	2.6	62.4
6.75	67	12.5	2.6	24.5	4.3	4.8	131.6
7.0	67	10.9	6.6	68.8	13.0	1.4	12.2
7.25	83	16.8	4.0	26.1	10.2	1.5	16.1
7.5	83	15.6	8.1	55.1	13.6	2.6	20.3
7.75	67	16.6	10.7	66.1	14.1	2.8	20.4
8.0	77	16.2	10.4	63.8	15.8	4.2	26.4
8.25	83	11.7	11.0	60.6	5.0	6.0	115.7
8.5	71	12.2	12.7	91.4	11.8	6.4	50.7
8.75	83	12.6	14.0	101.0	9.2	9.0	88.9
9.0	77	18.7	14.2	67.1	17.8	12.1	60.1
9.25	77	14.4	10.5	62.7	16.8	11.6	59.4
9.5	77	11.3	11.5	83.0	3.2	6.7	175.4

表 6 埋設条件と伝播速度から定まる軸歪  
Table 6 Maximum strains decided by the phase velocities under buried conditions

振動数	Vs=50 m/s	Vs=100 m/s	Vs=150 m/s	Vs=300 m/s	Vs=1,000 m/s
0.25	$246 \times 10^{-6}$	$492 \times 10^{-6}$	$739 \times 10^{-6}$	$1,478 \times 10^{-6}$	$4,928 \times 10^{-6}$
0.5	$123 \times 10^{-6}$	246	369	739	2,464
0.75	$82 \times 10^{-6}$	164	246	492	1,642
1.0	$61 \times 10^{-6}$	122	185	369	1,232
2.0	$31 \times 10^{-6}$	62	92	184	616
3.0	$21 \times 10^{-6}$	41	61	123	410
4.0	$15 \times 10^{-6}$	30	46	92	308
5.0	$12 \times 10^{-6}$	24	37	74	246
6.0	$10 \times 10^{-6}$	20	31	61	205
7.0	$8.8 \times 10^{-6}$	17.6	26	52	176
8.0	$7.7 \times 10^{-6}$	15.4	23	46	154
9.0	$6.8 \times 10^{-6}$	13.6	20	41	136
10.0	$6.1 \times 10^{-6}$	12.2	18	37	122

数を仮定して求めている。

$\alpha$  : 摩擦係数, 0.5

$\rho$  : 砂の単位体積重量,  $1.8 \text{ t/m}^3$

$h$  : 土かぶり, 50 cm

すると摩擦力  $f$  は約  $45 \text{ g/cm}^2$  であり, 1 m 当り約  $2 \text{ kg/cm}$  である。

これから推定すると, 測定された歪が生ずるには  $100 \text{ m/sec}$  以上の伝播速度が必要になり, 5 m と 15 m 地点の振動からの伝播速度は少し小さい。もしも 5 m と 15 m の位相の読取りで一波長ずらして読むと, 伝播速度は  $300 \text{ m/sec} \sim 800 \text{ m/sec}$  になってしまう。しかしパルス実験では伝播速度は  $150 \text{ m/sec}$  前後と出ている。以上のことから判断すると伝播速度は,  $80 \text{ m/sec} \sim 250 \text{ m/sec}$  と考えられ, 歪の測定量は大きめであると考えられる。しかし 5 m と 35 m 地点の管歪の値がほぼ同じことと明確な位相差が現れていなかったことから波動の適用に疑問が残るが, 埋設管端部に軸力が加わり測定された管歪  $15 \times 10^{-8}$  が生じたとすると, 埋設管端部には約  $600 \text{ kg}$  の軸力が働かなければならない。このような力が作用するには砂の地盤係数が非常に大きく (数  $10 \text{ kg/cm}^3$  ほどの値), 端部の変位がミリメートル単位である必要があり, 考えられない。

管端部の振動が大きくなることは地盤の拘束がない地上の配管系では推定されるが, 地下埋設管でみかけの比重が 1 程度のものでこのように端部, 特に波動が管から出ていく端部が大きな振動を示すとは実験前には予想していなかった。これは埋設深さが浅いため地盤の拘束が十分でなかったためと, 地盤と埋設管の剛性の違いにより起ったと考えられるが, 今後さらに詳しい検討を加えなければならない。

ここで, 振動台実験の結果から直線状の埋設管について次のようなことを言える。

- (1) 埋設管の直線部では軸歪が卓越する。
- (2) 有限長の埋設管であると端部の振動が大きくなる。
- (3) 成層地盤での波動伝播を解明する必要がある。
- (4) 地盤と埋設管の静的および動的相互作用を解明する必要がある。

## 6. 起振機実験結果の検討

### (i) 起振機固定台の振動

管軸方向起振のときは, 埋設管の剛性の影響が強く起振機固定台の挙動に現れ, 管軸直交方向の起振に比べ振幅が半分ほどになっている。こ

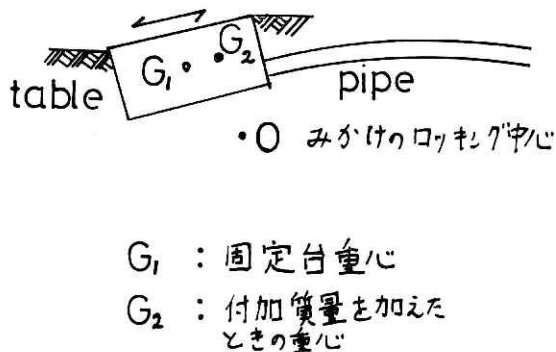


図 31 管軸方向起振時のロッキング振動  
Fig. 31 Outline of the rocking vibration excited in axial direction

これは管がバネとして働き、かつ付加質量も増したことを示している。付加質量の増し方が管方向に片寄っているため、31 図に示すようにロッキング中心のずれた振動をしていたものと推定される。

管軸直交方向起振のときは管の影響は固定台にほとんどなく、きれいなロッキング振動をしている。また上下方向起振のときも管の影響は見られない。管軸、管軸直交方向起振のときの「みかけのロッキング中心」は両方向とも台表面から 120 cm~80 cm の所にあると推定される。

ちなみにこの台のロッキング振動、および上下振動の特性を計算してみると次のようになる<sup>(2)</sup>。

地盤の水平バネ： $h_H = 5.6 \times 10^4 \text{ kg/cm}$

地盤の回転バネ： $h_R = 1.8 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$

固定台および起振機質量： $m = 1.7 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$

重心回りの慣性モーメント： $I = 2.38 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2$   $h_H$ ,  $h_R$  は埋戻し砂の性質を基に、半無限弾性理論から導かれた式を用いて算出した。これらから

1 次のロッキング振動数  $f_1 = \omega_1 / 2\pi = 25 \text{ Hz}$

1 次のロッキング中心位置 (重心から)  $Z_1 = 114 \text{ cm}$

2 次のロッキング振動数  $f_2 = \omega_2 / 2\pi = 50 \text{ Hz}$

2 次のロッキング中心位置 (重心から)  $Z_2 = -11.6 \text{ cm}$

1 次、2 次の換算質量を  $M_1$ ,  $M_2$  とすると、質量比は次のようになる。

$$\xi_1 = M_1/m = 1.16, \quad \xi_2 = M_2/m = 11.46$$

起振位置を  $H_0$ , 測点位置を  $H$  とすると、測点の水平動は次のようになる。

$$u = \frac{e^{i\omega t}}{m\omega_1^2} \left\{ \left( 1 + \frac{H_0}{Z_1} \right) \left( 1 + \frac{H}{Z_1} \right) \frac{P}{\xi_1} F_1 + \left( 1 + \frac{H_0}{Z_2} \right) \left( 1 + \frac{H}{Z_2} \right) \frac{P}{\xi_2} \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 F_2 \right\}$$

$$F_j = \frac{1}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 + 2ih_j \left( \frac{\omega}{\omega_j} \right)} \quad j = 1, 2$$

ここで  $h_j$  減衰定数である。  $H_0 = 40 \text{ cm}$ ,  $H = 25 \text{ cm}$ , とすると  $u$  は次のようになる。

$$u = \frac{Pe^{i\omega t}}{m\omega_1^2} (1.42F_1 + 0.06F_2) \doteq \frac{Pe^{i\omega t}}{m\omega_1^2} 1.42F_1$$

実験では、起振モーメント  $40 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  であるから加速度は、

$$\ddot{u} = 0.034 \frac{\omega^2 \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2}{\sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right)^2 + 4h_1^2 \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2}}$$

表 7 ロッキング振動による起振機台の水平振動  
Table 7 Calculated and measured vibrations excited horizontally

振動数	10 Hz	11	12	13	14	15	16	17	18	19 Hz
計算値	24.4 gal	36.4	53.5	75.9	106.7	146.3	197.4	262.5	344.4	443.8
実験値	19.2	27.2	38.8	49.4	64.0	103.7	157.1	189.8	284.2	—

となる。表 7 は  $h_1=0.3$  と仮定して求めた  $\ddot{u}$  である。

次に上下起振の場合では、地盤の上下バネは  $k_v=8.42 \times 10^4$  kg/cm、共振動数は  $f_0=\omega_0/2\pi=34.7$  Hz となり、上下変位  $v$  は次のようになる。

$$v = \frac{P e^{i\omega t}}{m\omega_0^2} \frac{e^{i\theta}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

水平起振時と同じ起振モーメント 40 kg·cm であるから上下加速度  $\ddot{v}$  は次のようになる。

$$\ddot{v} = 0.024 \frac{\omega^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

表 8 は  $h=0.32$  と仮定して計算した  $\ddot{v}$  と、実測加速度である。

表 8 起振機台の上下振動  
Table 8 Calculated and measured vibrations excited up-down

振動数	10 Hz	11	12	13	14	15	16	17	18	19
計算値	8.6 gal	12.5	17.9	25.1	34.5	46.3	61.3	79.9	102.9	131.0
実験値	10.0	14.9	24.1	35.5	52.5	75.0	97.5	117.5	160.0	195.0

ロッキングモデルで計算した水平動の値が管軸直交方向起振時の起振方向成分に比べて大きかったのは計算で付加質量を見込まなかったため、また上下起振時の計算値が小さかったのは  $k_v$  を大きく見積ったためと考えられる。

(ii) 埋設管の振動について

起振機実験の埋設管のすべての振動について言えることは 25 m 地点からほとんど起振機の振動を感じず、感じてもし小さいことである埋設管の振動は管軸方向起振ではロッキングによる上下方向の曲げ振動と管軸方向振動であり、管軸直交方向起振では管軸直交方向の曲げ振動であり、上下方向起振では上下方向の曲げ振動であった。このような実験で曲げ振動が生じた場合は杭の水平方向加力の式を適用できると考えられる<sup>8)</sup>。

管軸直交起振の起振方向の振動成分では、15 Hz の振動機の所を見ると固定台の所で約 100 gal、5 m の所で約 30 gal、15 m の所で約 5 gal であった。杭頭の回転拘束の水平加力の

ときの第1不動点は  $L=3\pi/4\beta$  であり.  $\beta$  は  $\sqrt{k_H B/4EI}$ ,  $k_H$  は水平地盤係数,  $B$  は見付け幅 (14 cm) である. この式をこの管に適用する.

$k_H=1 \text{ kg/cm}^3$  だと  $\beta=0.008/\text{cm}$  で,  $L=294 \text{ cm}$  となる.

$k_H=2 \text{ kg/cm}^3$  だと,  $\beta=0.0095/\text{cm}$  で,  $L=247 \text{ cm}$  となる. 5 m の点は台から 3.8 m 離れた所であり, 台の所の 1/3 ほどの振動が出ていることから水平地盤係数  $k_H$  が  $1 \text{ kg/cm}^3$  より小さいものと推定される.

上下方向の振動については上下方向起振のときより管軸方向起振のときの方が大きい値が出ている. 管軸方向起振のとき管もロッキングの影響を強く受けることがわかる. これに反

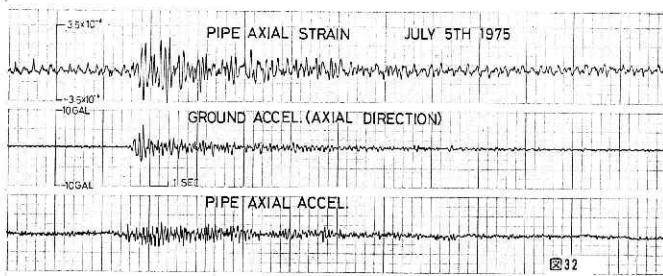


図 32 地震による埋設管の振動および歪 (1975年7月5日)  
Fig. 32 Vibrations and strains induced by earthquakes

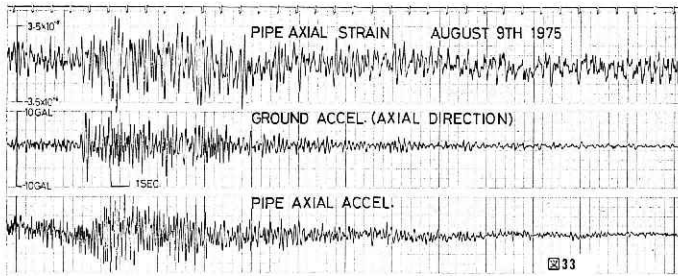


図 33 地震による埋設管の振動および歪 (1975年8月9日)  
Fig. 33 vibrations and strains induced by earthquakes

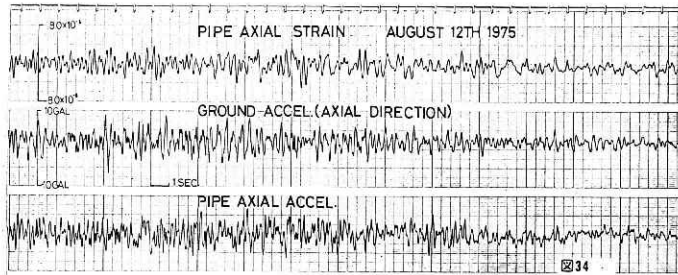


図 34 地震による埋設管の振動および歪 (1975年8月12日)  
Fig. 34 vibrations and strains induced by earthquakes

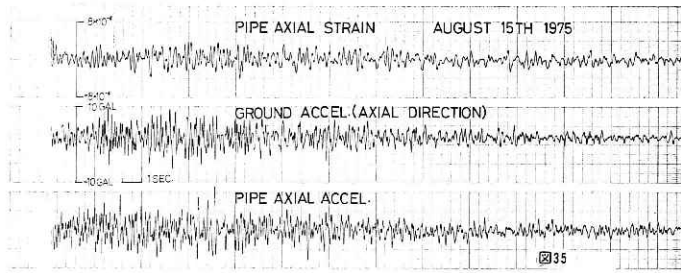


図 35 地震による埋設管の振動および歪 (1975年 8月15日)  
Fig. 35 vibrations and strains induced by earthquakes

して上下方向起振は管の振動に大きな影響を与えない。

管軸方向の振動は管軸方向起振のときが一番大きい。15 m から 25 m の所で振動はゼロに近くなっている。すなわち起振力は 25 m の所まででほとんど地盤に逃げてしまう。なおこの実験の起振力が直接管に作用したとした場合でも歪は  $15 \times 10^{-6}$  (20 Hz のときの起振力で) 以下である。

これらのことから構造物に繋がった管について次のようなことが言える。

- (1) 構造物の起振により曲げ、および軸力を受ける可能性が大きく、特に構造物がロッキングをする場合管の盛りなどを起す危険がある。

## 7. 地下埋設管の地震観測について

この管路を用いて地震観測を行っている。今までに 4 回ほど地震における管歪を捉えたのでその波形を図 32~35 に示す。この波形は管路中央の近くの 35 m 地点の管軸歪、管軸加速度、地表面管軸方向加速度である。歪波形には他の二つの波形に比べて高振動成分が現われていない。これは歪が速度に比例すると考えられるためであろう。歪の値は  $4 \times 10^{-6}$  程度、地表面の加速度は 5 gal~10 gal であった。

### あとがき

埋設深さ約 40 cm、管長 60.5 m と現実の埋設管とは違った条件の下での実験であったが、測定歪量と加速度から推定した波動の伝播速度が地盤のそれと近い値を示していることなどから、管端部の挙動を除いて、現実の埋設管においてもこの実験と同様の現象が起ると考えてもよいと思う。しかし、この実験で得られたデータで解明できないものも多く、今後、さらに詳細な理論的検討が必要である。

なお、今回の実験では応用地質調査事務所浦和研究所の協力を得た。特に同所計測係長の内山氏にお世話になった。また地震観測は当センター大型実験研究部耐震実験室研究員の木下繁夫氏によるものである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会 (1927年) 関東大地震震害調査報告
- 2) 土木学会新潟震災調査委員会 (1966年) 昭和39年新潟地震震害調査報告
- 3) 浜田政則 (1970年) 沈埋トンネル耐震設計算法に対する一試案, III-NSEE
- 4) 北条貞宗他 (昭和49年) 地震と管路について, 鑄鉄管 No. 16 28—37
- 5) 金井 清 (昭和44年) 地震工学 (共立出版)
- 6) 久保慶三郎 (昭和46年) サンフェルナンド地震における管路系の被害, カラム No. 40, 38~41
- 7) 武藤清他 (1970年) 沈埋管の地震応答解析, III-NSEE
- 8) 日本建築学会 (昭和49年) 建築基礎構造設計基準・同解説
- 9) 小川信行, 水道管路の被害と地震時動水圧, 国立防災科学技術センター 研究報告第15号 (昭和51年)
- 10) 岡本舜三 (昭和46年) 耐震工学 (オーム社)
- 11) 桜井彰雄 (昭和47年) 多入力系としての長大構造物の地震応答解析, 電力中央研究所第二技術研究報告
- 12) 田治見宏 (昭和40年) 建築振動学 (コロナ社)
- 13) Zeevaert, L. (1973年) Foundation Engineerig for dlifficult Subsoil Conbiton 565~568
- 14) 1968年十勝沖地震調査委員会 (1968年) 1968年十勝沖地震調査報告

(1976年7月12日原稿受理)