

# Model Experiments on Damage Mitigation of Buried Pipelines Due to Liquefaction Using Gravel Piles

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-01-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Kitaura, Masaru, Miyajima, Masakatsu, Yoshida, Masaho メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00065288">https://doi.org/10.24517/00065288</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



# グラベルパイルを用いた地中埋設管の液状化対策に関する模型実験

北浦 勝\*, 宮島 昌克\*, 吉田 雅穂\*\*

## Model Experiments on Damage Mitigation of Buried Pipelines Due to Liquefaction Using Gravel Piles

Masaru KITAURA, Masakatsu MIYAJIMA and Masaho YOSHIDA

### Abstract

The present paper deals with model experiments on application of gravel piles to buried pipelines in order to mitigate pipelines' damage due to liquefaction. Gravel pile method is one of the effective methods of stabilizing a soil deposit susceptible to liquefaction. Construction of gravel piles has no great vibration and noise, therefore it can be applicable to sites in urban areas and near buildings. This method was applied to many sites for buildings, however, it was not used for buried pipelines because of wide construction sites. In the present study, model experiments were conducted in order to investigate effects of gravel piles to response of buried pipelines. Although we find the gravel pile method is an effective measure for damage mitigation of buried pipelines due to liquefaction, it is clarified there still exist certain problems to be solved before the gravel pile method is applied to real buried pipelines.

Keywords : countermeasure, gravel pile, liquefaction, model experiment, pipeline

### 1. 緒 言

地中埋設管を始めとするライフラインシステムの耐震性が注目され始めたのは、1971年のサンフェルナンド地震 (M6.5) 以後のことである。この地震では、砂地盤の液状化現象によってライフラインシステムに多大な被害をもたらされた。以来この10数年間、多くの研究者らによって液状化地盤における地中埋設管の挙動や地中埋設管の液状化被害対策などについての研究が盛んに行われてきた。しかしその一方で、情報化社会と言われる中、都市の発達と共に多くの通信施設は地下に張り巡らされ、さらに景観などの問題からほとんどのライフラインシステムが、例えば共同溝などを用いて地下に埋設されてきている。しかも、液状化可能性の高い地盤であるにもかかわらず、そのようなことが行われている場合も少なくない。そういった意味で、地中埋設管の液状化被害対策における有効な対策

工法の確立が急務と言える。

現在、地中埋設管に対する液状化被害対策工法としては以下の2つが挙げられる。1つに管自体に改良を施すものが挙げられるが、地中埋設管は線状に広範囲に渡って敷設されており、新設ならまだしも既設の管に改良を施すことは経済的に困難な面がある。2つに管周辺部の地盤に改良を施すものが挙げられるが、その中でも代表的な工法である振動締め固め工法は、既設構造物 (地中埋設管など) に対し振動による悪影響を及ぼし、また、都市部での対策では振動、騒音などの公害問題の弊害が生じる恐れがある。

そこで本研究では、地中埋設管の集中する都市部での対策、しかも新設、既設を問わない地中埋設管の対策工法の考案という観点から、無振動工法としてのグラベルパイル工法を取り上げた。グラベルパイル工法とは、液状化可能性の高い砂地盤の砂を透水性の高い

\* 土木建設工学科

\*\* 福井工業高等専門学校

碎石の柱(グラベルパイル)で置換し、水平方向の排水経路を短縮することにより排水効果を高め、飽和砂層内の地震時の間隙水圧上昇を軽減することを目的に考案された工法であり、今回の実験では地中埋設管の直管部に対し、グラベルパイルを管軸方向に沿って管の両側にそれぞれ1列ずつ打設する方法を試みた。グラベルパイル工法に関する研究としては、H. B. Seed<sup>1)</sup>らによる有限要素法を用いた解析的研究や、石原<sup>2)</sup>や竹原<sup>3)</sup>による現場実験による研究などが挙げられその効果が実証されつつあるが、今回のように地中埋設管そのものへの対策工法としての適用を試みた研究は過去に例がなく、大変興味深いと言える。

本文では、このグラベルパイル工法による地中埋設管の液状化被害対策の有効性に関して模型実験を行い、その結果について考察を加えた。

## 2. 実験概要

液状化現象によって生じる地中埋設管の破壊の要因としてはいくつか考えられるが、本研究ではそれらの中でも特に、不完全液状化時に生じる地盤の大きな動的挙動、完全液状化時に地中埋設管に作用する浮力や浸透流による力、液状化終了過程で生じる地盤沈下の

3つの要因に注目して模型実験を行った。また、それらの要因によって生じる管模型や模型地盤の動的、および静的挙動を対策地盤と無対策地盤において比較検討することにより、グラベルパイル工法の有効性について検討すると共に、グラベルパイルの打設間隔( $I$ )や打設幅( $W$ )による影響についても検討し、考察した。なお、本実験では基礎的で定性的な特性を把握することに重点をおいているので、相似率については特に考慮していないが、本対策工法を実用化に結びつけるためには定量的な検討がさらに必要であることは言うまでもない。

Fig. 1 に実験装置の概要を示す。振動台(島津製作所製、EHV-3)上に設置した鋼製の砂箱(幅500mm、長さ1500mm、高さ350mm)に、比較的均一でその粒径が液状化しやすい範囲にある手取川の川砂を水中落させ、厚さ200mmの均一で緩詰めの砂層を作成した。地中埋設管模型としては直径20mm、長さ1000mmのウレタンゴムの丸棒(十川ゴム製)を使用し、この丸棒に125mmの等間隔で4箇所鉛製の板おもりを巻きつけ、模型地盤との単位体積重量の比が実際の管と地盤との単位体積重量の比(実際の管:実地盤=1.7:1.9)に等しくなるよう調整した。目の荒さ2mmの比

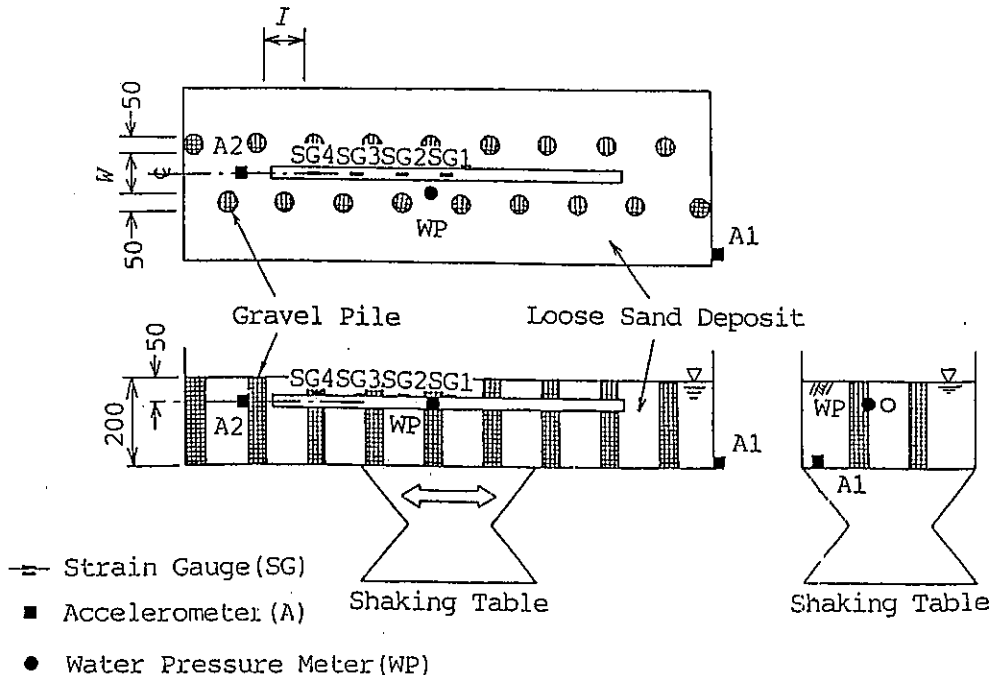


Fig. 1 General view of test apparatus (mm).

動的剛性のある金網に砂の混入を防ぐためのナイロンメッシュを被せ、その中にコンクリート骨材用の碎石を詰め込んでグラベルパイル（直径50mm、高さ200mm）を作成し、それらを千鳥状に配置した。なお、これらの実験に用いた砂、碎石、管模型、および模型地盤の諸定数を Table 1 および Table 2 に示す。この実験装置を、5秒間で最大加速度200gal ( $2.0\text{m/s}^2$ ) に達するような5 Hzの調和波で、砂箱の長手方向（管軸方向）に30秒間加振した。

Table 1 Physical properties of sand, gravel and pipe model ( $1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$ ,  $1\text{gf/cm}^3=9.8\text{kN/m}^3$ ).

SAND	
Specific Gravity	2.67
Uniformity Coefficient	2.96
Maximum Void Ratio	1.030
Minimum Void Ratio	0.721
50 Percent Diameter	0.2 (mm)
Coefficient of Permeability	$1.92 \times 10^{-2}$ (cm/sec)
GRAVEL	
Specific Gravity	2.69
Maximum Grain Size	25 (mm)
Coefficient of Permeability	8.24 (cm/sec)
PIPE MODEL	
Young's Modulus	810 ( $\text{kgf/cm}^2$ )
Unit Weight	1.70 ( $\text{gf/cm}^3$ )
Length	1000 (mm)
Diameter	20 (mm)

Table 2 Physical properties of model ground ( $1\text{gf/cm}^3=9.8\text{kN/m}^3$ ).

SAND LAYER	
Wet Unit Weight	1.90 ( $\text{gf/cm}^3$ )
Void Ratio	0.95
Water Content	34.5 (%)
Relative Density	26.5 (%)
GRAVEL PILE	
Wet Unit Weight	2.81 ( $\text{gf/cm}^3$ )

加振中は、砂箱に直接貼付した小型加速度計（東京測器研究所製、最大2g ( $19.6\text{m/s}^2$ ), AM-2) で入力加速度を計測するとともに、模型地盤の単位体積重量と同じになるよう調整した同型の小型加速度計を管模型端部の位置に埋設して、管模型埋設深さでの地盤応答加速度 (A2) を計測した。また、半導体小型圧力変換器（豊田工機製、最大 $0.5\text{kg/cm}^2$  ( $49\text{kPa}$ ), PMS-5M) を管模型中央部付近に埋設して、管模型埋設深さでの地盤内に発生する過剰間隙水圧 (WP) を計測した。管模型の加振時の挙動を知るために、管模型の中央部 (SG1) と、その位置から一端方向へ125mm (SG2), 250mm

(SG3), 375mm (SG4) 離れた4箇所の管模型上面に歪ゲージ（東京測器研究所製、PL-5-11）を接着し、管歪を計測した。

実験ケースとしては Table 3 に示すように、無対策の場合 (NC) と、打設幅が10cm一定で打設間隔を5cm, 10cm, 15cm (I5, I10, I15) と変化させる場合（間隔変化 (Variation-I)）と、打設間隔が10cm一定で打設幅を5cm, 15cm, 15cm (W5, W10, W15) と変化させる場合（幅変化 (Variation-W)）の計7ケースを行った。

Table 3 Conditions in vibration tests.

Case Name	Code Number	Interval of Piles I (cm)	Width of Piles W (cm)	Number of Piles
Non-Countermeasure	NC	/	/	0
Interval-I	I 5	5	10	30
	I10	10	10	20
	I15	15	10	15
Interval-W	W 5	10	5	20
	W10	10	10	20
	W15	10	15	20

### 3. 実験結果および考察

#### 1) 過剰間隙水圧について

Fig. 2 に各ケースの過剰間隙水圧比の時刻歴変化を示す。対策を施した場合、無対策の場合と比べて液状化の継続時間が短縮している様子が良くわかる。間隔変化の場合では、間隔を小さくすることにより過剰間隙水圧比の最大値を低減し、しかも過剰間隙水圧の蓄積速度を遅くし消散速度を速くするという効果が認められる。幅変化の場合も、幅を小さくすることにより同様の効果が得られた。

#### 2) 地盤の応答加速度について

吉田・植松は液状化砂中の杭構造物の動的挙動について実験を行っており、それによると過剰間隙水圧の上昇により地盤の剛性が低下し、すなわち不完全液状化状態となり一時的に地盤が外力と共振状態に入ると、杭模型が地盤振動に強制加振されるという結果が得られている<sup>5)</sup>。本実験においてもグラベルパイルが加振方向にロッキング運動しているのが目視できた。そこで Fig. 3 に地盤応答加速度の最大値の、入力加速度の最大値に対する比（加速度応答倍率）を各ケースとの関係として示す。間隔変化の場合では、間隔を小さくするほど加速度応答倍率が大きくなる傾向を示して

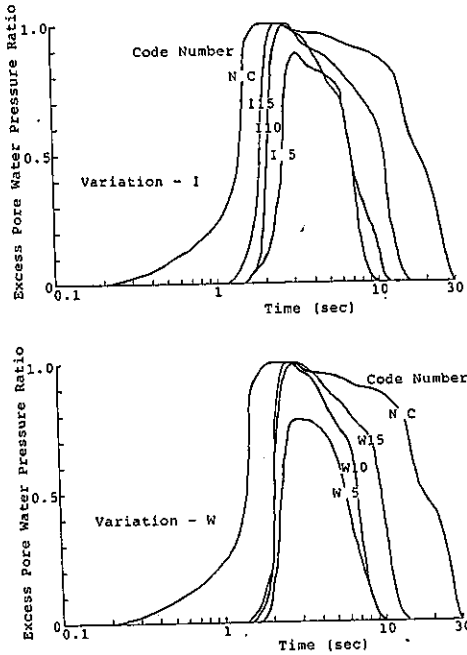


Fig. 2 Time histories of excess pore water pressure ratio in relation to interval and width of gravel piles.

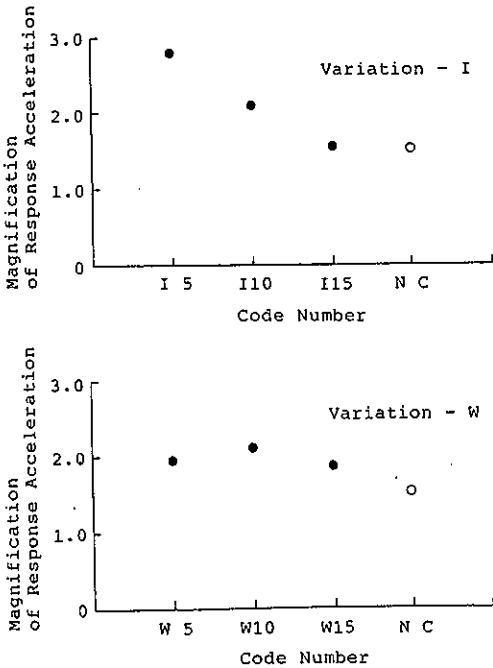


Fig. 3 Magnification of response acceleration in relation to interval and width of gravel piles.

いるが、幅変化の場合ではそのような傾向は見られずほぼ一定となっている。打設間隔が小さければ打設方向のグラベルパイル周辺地盤の拘束が強くなり、グラベルパイルとグラベルパイル間の地盤とが一体となって強制加振され、管模型埋設位置の地盤が大きく挙動したと思われる。

このような加速度応答倍率に見られる傾向が、グラベルパイルのロッキング運動のみに起因しているとは一概には言えないが、グラベルパイルの動的挙動が地中埋設管に与える影響を考慮する上で、検討の余地があるであろう。また、本工法では管軸方向に沿って管の両側にそれぞれ1列ずつグラベルパイルを打設することを考えているので、ロッキング運動時のグラベルパイルの動的強度についてもさらに検討を要する。

3) 管歪について

Fig. 4 に管模型に生じた歪 (SG2) の時刻歴変化を示す。管に生じる歪には管歪の中立軸の移動から成る静

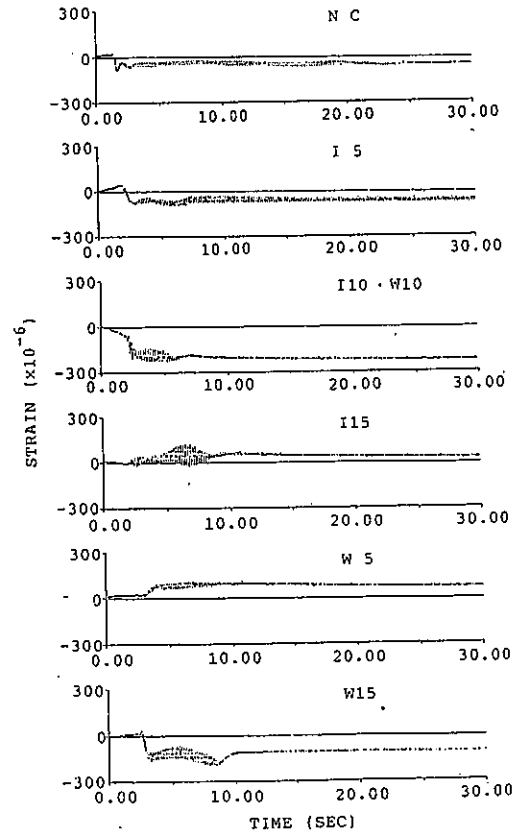


Fig. 4 Time histories of pipe strain.

歪と、動的振幅から成る動歪の2つが考えられるが、静歪についてはいずれの場合も加振後約2秒の時に、過剰間隙水圧上昇と同時に卓越し始めている。これは液状化により地盤が軟化して管模型周りの地盤の拘束が解けたことにより管模型の初期歪が解放されて生じたものと思われ、単に管模型の浮上だけによって生じたものとは考えにくい。対策を施した場合はグラベルパイルの排水効果により砂の再堆積が速くなり地盤がすぐに硬化するため、加振開始後約10秒以降は静歪を生じていない。しかし無対策の場合は、管模型埋設深さ付近の地盤は下方からの上向き浸透流のため液状化が長く継続し、加振開始後約20秒まで静歪が生じている。つぎに動歪については、静歪と同様にどのケースにおいても過剰間隙水圧の上昇と共に動歪が発生し始めている。無対策の場合ではその後ほとんど一定の値の動歪が継続しているが、対策を施した場合には静歪と同様に加振開始後約10秒以降は動歪を生じていない。したがって、対策を施した場合は静歪、動歪ともに歪の継続時間に関しては短縮効果があったと言え

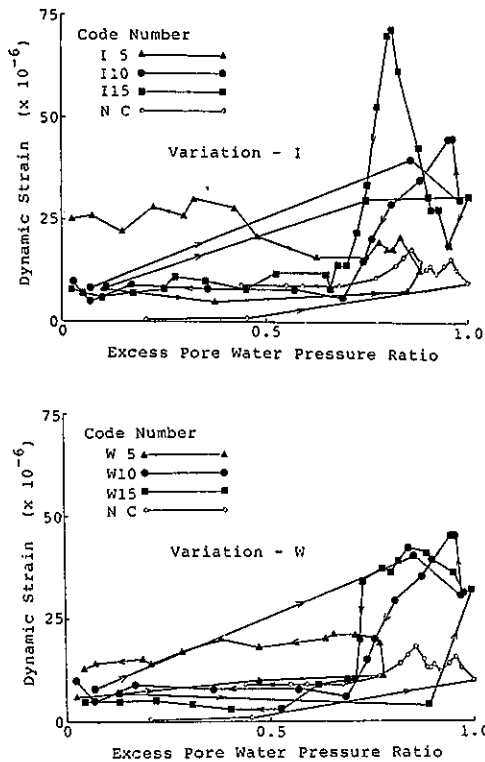


Fig. 5 Relationship between dynamic strain and excess pore water pressure ratio.

る。しかし同図を見ると、グラベルパイルの間隔15cm (I15) や幅15cm (W15) において特に顕著なように、動歪が大きく卓越する現象が見られる。そこで Fig. 5 に示すように、0.5秒(ただし無対策の場合は1秒)おきの過剰間隙水圧比とSG2における動歪の値をプロットし、各ケースの過剰間隙水圧比と動歪との関係を調べた。同図より過剰間隙水圧比が0.7~0.95のあたり、つまり不完全液状化時および過剰間隙水圧消散時に動歪が大きくなる傾向が見られる。したがって、大きな動歪の発生を防ぐためには、グラベルパイルを打設して完全液状化の発生を防止するだけでは十分といえず、本実験の範囲では過剰間隙水圧比を0.7以下に抑えることが重要であるといえる。ところで、同図を見てわかるように同じ過剰間隙水圧比でも各ケースによって動歪の値に大きな違いが見られる。特に対策を施した場合において、グラベルパイルの間隔や幅が大きいほど動歪も大きくなる傾向を示している。本章2)の地盤応答加速度についてのところで、液状化過程において地盤が一時的に外力と共振して地中構造物を強制加振することを述べた。しかし本実験における打設間隔が15cm (I15) の場合、打設幅が15cm (W15) の場合には、地盤応答加速度が小さくなった時でも大きな動歪が生じており、単なる地盤と外力との共振だけによって管模型に大きな動歪が生じているとは一概には言えない。そこで考えられるのが、管模型埋設位置でのグラベルパイルの排水効果の違いによる影響である。すなわち、グラベルパイルの間隔や幅を大きくすることにより管軸方向に排水効果の大きい所と小さい所が存在し、それによって地盤の有効応力に差が生じ、その差の大きさが地盤の挙動に影響を及ぼし動歪を大きくしたものと思われる。

#### 4) 地盤の沈下量について

Fig. 6 に示すように模型地盤を3つの部分に分け、それぞれの部分における加振終了後の平均地盤沈下量を示したものが Table 4 である。同表より、対策を施

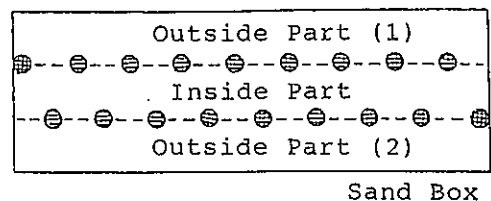


Fig. 6 Measurement points of settlement of model ground.

Table 4 Settlement of model ground (cm).

Code Number	Outside Part (1)	Inside Part	Outside Part (2)	Average	Difference
N C	1.95	1.88	1.80	1.88	0.01
I 5	1.73	1.00	1.78	1.50	0.76
I 10	1.45	1.25	1.73	1.48	0.10
I 15	1.80	1.40	1.81	1.67	0.41
W 5	1.55	0.98	1.88	1.46	0.74
W 10	1.45	1.25	1.73	1.48	0.10
W 15	1.93	1.60	1.75	1.75	0.24

した場合グラベルパイルによって囲まれた内側の部分 (Inside Part) の地盤沈下量が、外側の部分 (Outside Part) に比べ小さいことがわかる。無対策の場合ではそのような傾向を示していないことから、明らかにグラベルパイルを施したことによるものと考えられる。対策を施した場合、内側の地盤はグラベルパイルに囲まれているため、外側の地盤よりも過剰間隙水圧の大きさ、継続時間ともに低減していると予想される。したがって、液状化の程度を低減したことにより、液状

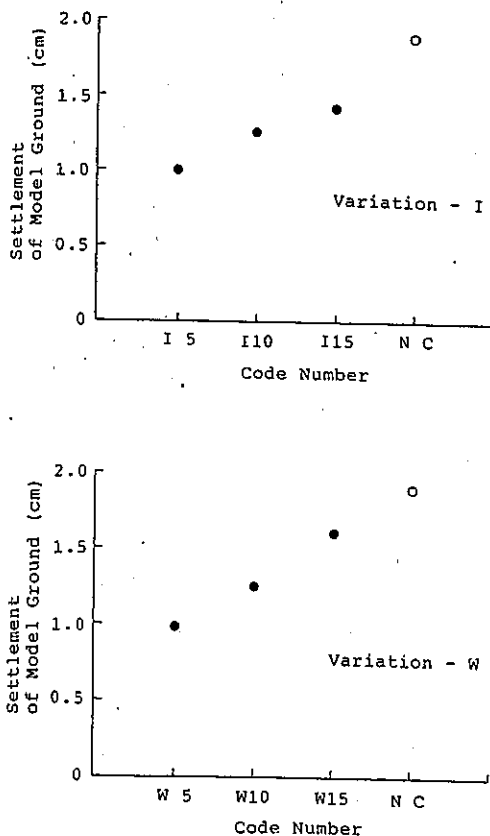


Fig. 7 Settlement of model ground at inside part in relation to interval and width of gravel piles.

化時の典型的な現象である地盤沈下の程度も低減されたものと思われる。また、グラベルパイルによる内側の地盤の拘束による影響も考えられる。Fig. 7にグラベルパイルによって囲まれた内側の部分での地盤沈下量をケースごとに示す。間隔変化および幅変化の場合ともに、間隔および幅を小さくすることによって地盤沈下量が低減している。

ところで、実際の地中埋設管は1本の管から何本もの管が枝分かれしている。Table 4におけるグラベルパイルによって囲まれた内側の地盤と外側の地盤の沈下量の差の絶対値 (地盤高低差 (Difference)) を見ると、間隔 5 cm (I5) や幅 5 cm (W5) の場合グラベルパイルの内側の地盤、すなわち、管模型埋設位置での地盤沈下量は低減されているが、その反面外側の地盤との間に大きな地盤高低差が生じている。もし主要な管だけに対策を施した場合、主管と枝管との継手部分に地盤の不等沈下による破壊が生じる恐れがあるので、このような場合についての対策を別途検討する必要がある。

#### 5) 管模型の移動量について

Fig. 8に加振終了後における地盤内の管模型鉛直方向移動量をケースごとに示す。なお、これらはすべて上昇量を示している。上昇量とは、加振終了後にお

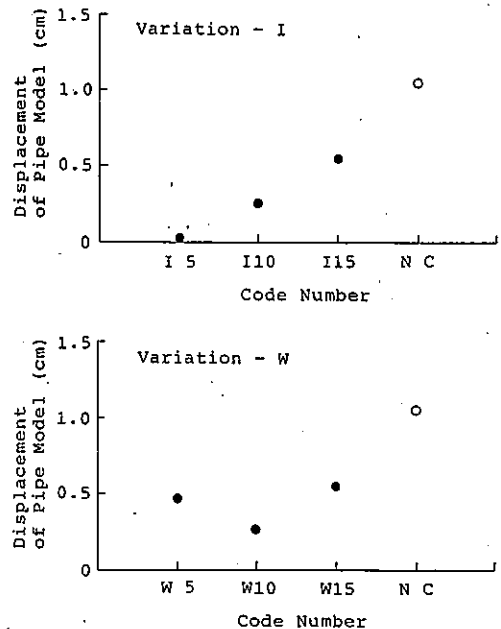


Fig. 8 Displacement of pipe model in relation to interval and width of gravel piles.

る管模型上載地盤厚さの減少量を5つの地点で測定したものの平均値であり、これには管模型の浮上と地盤沈下が含まれており、移動量すべてが管模型の浮上量ではない。

まず、同図の間隔変化の場合に注目すると、対策を施すことにより無対策の場合に比べ上昇量が低減し、間隔が小さいほど上昇量が小さくなる傾向を示している。液状化過程において地中埋設管に作用する浮力と重量との差は完全液状化に近づいたときに初めて向上に生じ始める<sup>7)</sup>が、Fig. 2の過剰間隙水圧比の時刻歴変化の図より、間隔5cm (I5)の場合には完全液状化には至っていないため、浮力による影響がほとんど生じなかったものと考えられる。

つぎに、同図の幅変化の場合に注目すると、間隔変化の場合のように明確な相関は見い出せないが、間隔変化の場合と同様に対策を施すことにより無対策に比べ上昇量が低減している。

#### 4. 結 論

地中埋設管の液状化被害対策としてグラベルパイル工法を取り上げ、模型振動実験によってその効果およびグラベルパイルの打設間隔や打設幅による影響を検討し考察した。以下に、本研究によって得られた知見について簡単にまとめる。

- 1) 本工法を施すことにより地盤の排水効果が高まり、地中埋設管近傍の液状化継続時間を短縮し、過剰間隙水圧比の最大値を低減できる。
- 2) 1)の理由より、破壊の要因となる地盤沈下や管に生じる浮力を低減し、歪の継続時間を短縮することができる。
- 3) 本工法の効果とグラベルパイルの打設間隔および打設幅にはかなりの相関関係があり、概して地中埋設管近傍の排水効果を高めることが本工法の効果の向上につながる。しかしグラベルパイルの打設条件によっては、グラベルパイルの強制加振や排水の不均一さによる地盤の大きな動的挙動や不等沈下などの要因によって、地中埋設管の破壊の危険性は高まる場合もあるので注意を要する。

以上これらの知見より、グラベルパイル工法が地中埋設管の液状化被害対策として基本的には有効であることを明らかにするとともに、検討すべき問題点のいくつかを指摘することができた。今後は定量的な研究を実施するとともに、本研究で明らかになった問題点

についてさらに検討していく予定である。

#### 謝 辞

本研究を実施するに当たり、実験の遂行に協力していただいた池本敏和技官、ならびに当時の防災工学研究室の学生諸氏に厚く御礼申し上げます。なお、本研究の一部が日本鋼管(株)の補助によって行われたことを記して感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) Seed, H. B. and Booker, J. R.: Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposit Using Gravel Drain Systems, Report No. EERC 76-10, EERC, 1976.
- 2) 石原研而・斉藤 彰・有馬 宏：護岸液状化対策としての砕石パイルの適用例、土と基礎, Vol. 28, No. 4, pp. 9~15, 1980.
- 3) 竹原有二・田中靖雄・大平正勝：砕石ドレーンパイル打設地盤の原位置液状化試験、第35回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 263~264, 1980.
- 4) 伯野元彦・片田敏行：液状化時における地中構造物の応答特性、第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 649~655, 1978.
- 5) 吉田常松・植松幹夫：液状化砂中の杭の動的挙動、第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 657~663, 1978.
- 6) 北浦 勝・宮島昌克：液状化過程における地中埋設管のひずみ特性に関する実験的研究、土木学会論文報告集, 第323号, pp. 43~53, 1982.
- 7) 北浦 勝・宮島昌克・吉岡正修：不完全液状化時における地中埋設管模型の動的挙動、構造工学論文集, Vol. 31A, pp. 421~426, 1985.

(昭和63年5月31日受理)