

# 液状化過程における地中構造物の動的挙動 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL ANALYSIS ON DYNAMIC BEHAVIOR OF UNDERGROUND  
STRUCTURES IN THE LIQUEFACTION PROCESS

片田 敏行\*・伯野 元彦\*\*

By Toshiyuki KATADA and Motohiko HAKUNO

## 1. ま え が き

新潟地震 (1964.6.14,  $M=7.5$ ) では、地震動により飽和砂層地盤が液状化して多くの構造物が沈下や傾斜などの被害を受けた。そのため、新潟地震以来、飽和砂層地盤の液状化に関して数多くの研究が行われている。その結果、液状化現象の発生メカニズムはかなり明らかになってきたといえよう。

また、地中埋設管も地盤の液状化によって浮き上がり、沈下、屈曲、折損などの被害が生じている。たとえば、水道管被害に関する久保・片山<sup>1)</sup>の調査によれば、新潟市内における液状化などの地盤変状の激しい地域では、管体破損の被害率は全市平均値 (0.46 か所/km) の数十倍にもなっている。

以上のように、液状化により被害が生じているにもかかわらず、砂層地盤が液状化する過程で地盤が地中構造物にどのような作用を及ぼすか、その結果、地中構造物

がどのような挙動をするかはそれほど明らかではない。また、地震動がそれほど強くない場合や地盤の含水比が低く液状化しにくい場合には、地盤が液状化するまでには至らず、軟化するだけで終わると思われる。このように地盤が軟化したただけの場合についても、地中構造物がどのような挙動を示すかは明らかではない。

図-1 は、東京都防災会議によって作成された東京 23 区における液状化現象発生の可能性の分布図である。いわゆる下町といわれる地域では、液状化発生の可能性が高い。しかも、この地域には地下鉄、地下街、上下水道、ガス管などの地中構造物や地中埋設管などが数多く存在する。したがって、液状化や軟化などの地盤破壊によって、地中構造物がどのような影響を

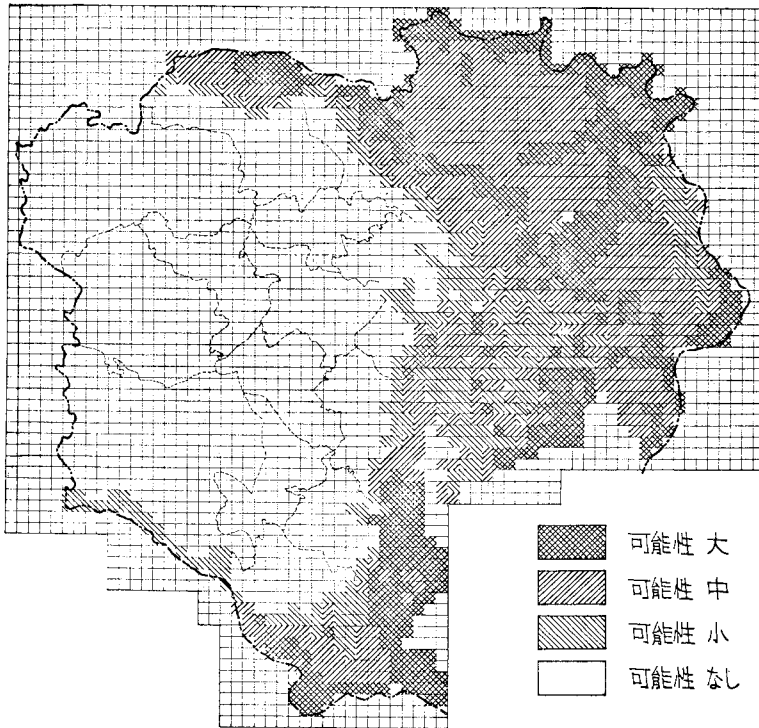


図-1 東京 23 区における液状化の可能性<sup>2)</sup>

\* 学生会員 工修 東京大学大学院博士課程

\*\* 正会員 工博 東京大学地震研究所教授

受けるかを明らかにすることが重要になっている。

地下鉄などの地盤中に存在する重要構造物でも地震時

液状化といった地盤破壊を経験していないものもある。このような地中構造物に対しても地震観測が行われている。これまでの観測結果では、地震動は微小で地盤-構造物系は線形範囲で振動していると思われる。したがって、これまでの地震観測結果から地盤が破壊した場合の構造物の挙動を類推するのは難しいであろう。

さて、液状化による地盤破壊が地中構造物にどのような影響を与えるかを解析した研究は数少ない。杭基礎に関して、その模型を砂箱の飽和砂層地盤に設置して液状化時の挙動を調べている例がある。たとえば、鹿籠・伯野<sup>3)</sup>、岩崎・龍岡・坂場<sup>4)</sup>、吉田・植松<sup>5)</sup>らの実験的研究である。その実験結果から、飽和砂層模型地盤の液状化過程において、杭基礎模型が一時的に大きく応答することが明らかになっている。また、伯野・鹿籠<sup>6)</sup>は地盤の液状化過程において、埋設物模型に作用する力が一時的に大きくなることを砂箱実験で確かめている。

以上のように砂箱を用いた模型振動実験の結果を見る限り、構造物模型は飽和砂層地盤の液状化過程は不完全液状化時に大きな応答を示すようである。著者も地盤の液状化過程において、地中構造物がどのような応答特性を示すかを明らかにするために砂箱を用いた液状化実験を行った<sup>7), 8)</sup>。この実験では、小型加速度計を埋設した模型砂層地盤を用いて液状化実験を行いその加速度応答特性を明らかにしている。その結果、正弦波入力に対して液状化過程において埋設された小型加速度計は、

- ① ほぼ等加速度の運動と大きな加速度を示す運動を繰り返すような非線形振動をすること(図-2)。
  - ② 飽和地盤よりも不飽和地盤においてより大きな加速度応答が、しかもより長く見られること、
- などが明らかになっている。

なお、飽和模型地盤に埋設された小型加速度計が不完

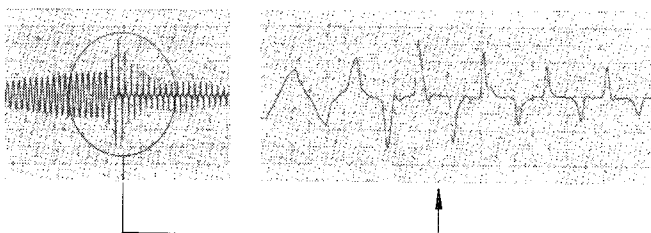
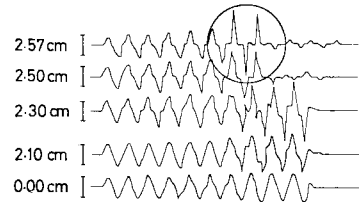
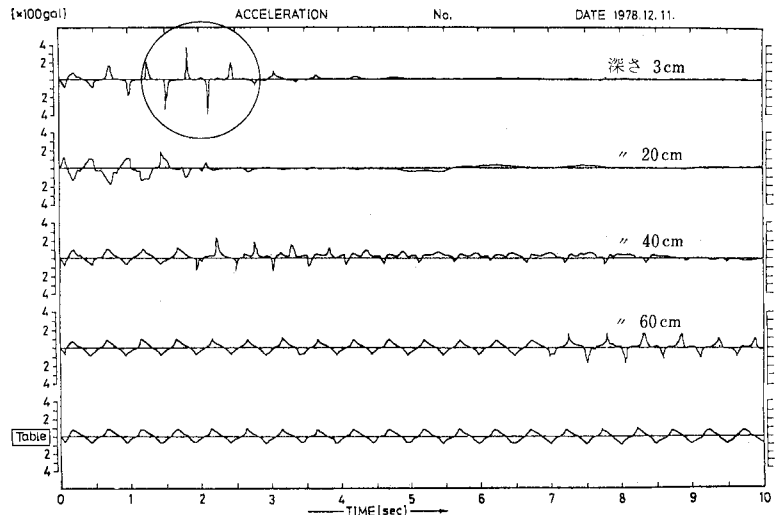


図-2 応答波形の拡大図



(a) 記録波形の例<sup>9)</sup>



(b) 記録波形の例<sup>9)</sup>

図-3 埋設された小型加速度計の加速度応答波形

全液状化時に大きな応答加速度を示すという実験結果は他にも報告されている(図-3)。しかし、その応答メカニズムははまだ明らかにはされていない。

そこで、本研究では模型地盤の含水比の違いによって埋設された小型加速度計の応答特性がどのように変化するかについて述べる。以上の実験では正弦波(6 Hz)を用いているが、実地震波に近い0~20 Hzの成分波をもつランダム波を用いた場合の応答特性についても述べることにする。さらに、液状化過程における地盤-埋設物系の応答メカニズムについても考察を行うことにする。

また、地下鉄や地中埋設物などのように水平方向に細長い地中構造物に関しても、液状化過程における応答特性が明らかではない。そこで、模型地盤に塩ビパイプを埋設して、液状化過程における曲げひずみの応答特性を実験的に明らかにする。

## 2. 埋設された小型加速度計の加速度応答特性

### (1) 実験装置および実験方法

実験装置は、振動台、発振器、砂箱と模型

地盤、測定装置（小型加速度計と間隙水圧計）、記録装置から成り立っている。実験には2種類の砂箱を用いた。A-タイプの砂箱の寸法は、幅、長さ、高さがそれぞれ360×500×250 mmである。材質は、サンロイドであり透明であるため、実験中砂層の変化を観察することができる。B-タイプの砂箱は境界の影響を除くために、より長さの長いものを用いた。その寸法は、幅、長さ、高さが360×1000×250 mmであり、材質は木である。

模型地盤の材料には、比較的細砂で均一な豊浦標準砂を用いた。粒径は、ほぼ0.1~0.4 mmの間に分布している。

模型地盤は所定量の水と砂を用いて作製した。すなわちA-タイプの砂箱では水13 kg、砂50 kgを、B-タイプの砂箱では水26 kg、砂100 kgを標準とした。飽和模型地盤は先に水を入れ、次に砂を入れる。これを繰り返して地盤を作成する。模型地盤の層厚は約20 cmとなる。不飽和模型地盤は先に砂を入れ、次に水をじょうろで散布する。これを繰り返して地盤を作製する。模型地盤の含水比と相対密度の関係を図-4に示す。測定装置（小型加速度計と間隙水圧計）は、地盤中央の地盤高10 cmのところに設置した。用いた小型加速度計は重錐式カンチレバー形ストレインゲージ変換式の加速度計である。その応答特性を図-5に示す。この小型加速度計を地中構造物と見なし、その応答加速度を測定するとともに間隙水圧計によって、地盤の液状化を判断するわけである。振動台は発振器で発生された正弦波（6 Hz）あるいはランダム波で加振される。また、振動台には、模型地盤中に埋設されたものと同じ形式の小型加速度計

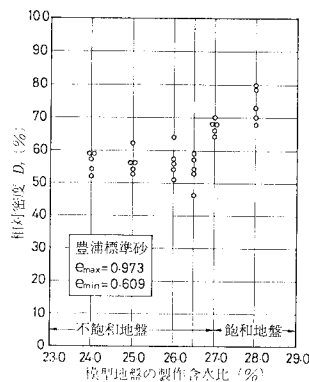


図-4 模型地盤の相対密度

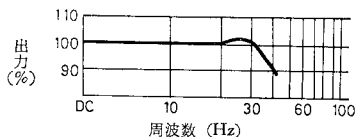


図-5 小型加速度計の応答特性

(2) 正弦波を入力とした場合

埋設された小型加速度計は模型地盤の含水比の違いによって、液状化過程に示す加速度応答特性が異なる<sup>7),8)</sup>。すなわち、飽和地盤の場合には不完全液状化時に大きな加速度応答を一時的に示すだけであり、完全に液状化すると応答が見られなくなる。また、不飽和地盤の場合には大きな加速度応答が入力終わるまで見られる。

したがって、飽和地盤よりも不飽和地盤の方が液状化しにくい、地震動によって不飽和地盤がひとたび液状化、もしくは軟化した場合には飽和地盤の場合よりも地中構造物に悪影響を与えることが予想されよう。

表-1は模型地盤に埋設された小型加速度計の特徴的な加速度応答波形を含水比別に示したものである。含水比0.230以下の不飽和地盤では応答波形は入力波形とまったく同じ形をしている。ただし、最大応答値は入力の最大値の1.0~1.5倍となる。したがって、小型加速度計は線形応答を行っていると考えられる。

含水比0.230~0.240の不飽和地盤では、波形が乱れて大きな応答値を示す不完全液状化時特有の応答が入力の継続中にわたって見られる。しかし、応答が見られなくなるという完全液状化の状態にはならない。したがって、この場合には、単に、地盤が軟化しただけであるといえよう。

含水比0.270以上の飽和地盤では、不完全液状化の状態は短時間しか続かず、すぐに完全液状化の状態となって応答は見られなくなる。

次に、含水比によって小型加速度計の応答特性がどのように変化するかを定量的に示したのが図-6, 7である。図-6を見てもわかるように、加速度応答倍率は約3.0倍を最大として、含水比が高くなるにつれて応答倍

表-1 含水比による応答波形の相違

含水比	応答波形の特徴	地盤の状態
不飽和地盤	23.0%	軟化・液状化せず。
	24.0%	軟化（不完全液状化）するだけで、完全に液状化しない。
飽和地盤	27.0%	液状化するが、短時間である。
		完全に液状化する。

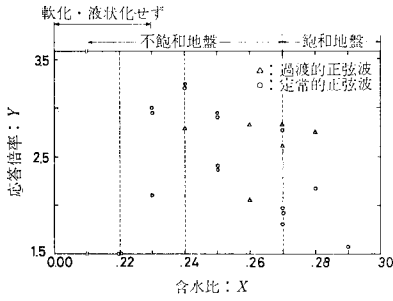


図-6 応答倍率と含水比の関係

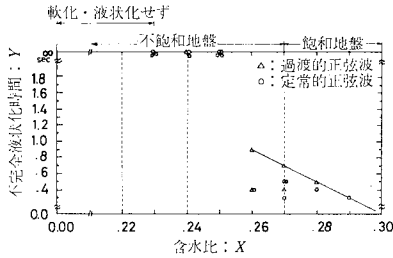


図-7 不完全液状化時間と含水比の関係

率は低下する傾向にある。

以上のように、不完全液状化時に大きな応答の起こることが明らかになった。したがって、次に問題となるのはこのような不完全液状化時の大きな応答がどのくらい続くのかということである。図-7 は、模型地盤の含水比と小型加速度計が不完全液状化時の応答特性を示す時間との関係を示したものである。ここで、問題となるのは不完全液状化の応答時間をどのように定義するかということである。不完全液状化時の応答の始めは、間隙水圧が上昇して応答波形が乱れ始めるときと考えても差し支えないであろう。本研究では不完全液状化時の応答

の終わりを次のように定義した。完全に液状化すると応答が小さくなる。そこで、地盤の液状化が進行して不完全液状化時の大きな応答が小さくなり、入力に対する応答倍率が 1.0 となるときのときとした。不完全液状化時の応答時間の定義には他にも方法があるかもしれない。しかし、同一の定義に従って応答時間を求めておけば、地盤の含水比と応答時間の関係を論ずるのに差し支えないであろう。

図-7 の中に示す直線は各含水比における不完全液状化時間の最大値を結んだ直線である。この直線の傾きを見てもわかるように、含水比が高くなると不完全液状化時間は短くなっていく。図-7 の中で不完全液状化時間が無限大と表示されているものは、入力加速度の継続時間中にわたって、不完全液状化時特有の応答特性を示したことを意味している。このような応答特性は含水比 0.230~0.240 の地盤に見られる。

以上のように、飽和度の低い砂層地盤が液状化あるいは軟化すると完全飽和地盤と比較して応答倍率は大きく、不完全液状化時間も長くなるという実験結果が得られた。なお、含水比が 0.230 より低い地盤では、加振しても地盤は軟化あるいは液状化しなかった。このとき、入力加速度に対する応答加速度の倍率は 1.0~1.5 程度の値を示す。また、応答波形は入力波形とまったく同じで、波形の乱れも位相遅れも見られなかった。

(3) ランダム波を入力とした場合

以上の液状化実験では、単一成分波である正弦波 (6 Hz) で砂箱を加振させている。これは応答波形の乱れの具合から液状化過程における地盤-構造物系の応答メカニズムを考察するのに都合がよいからである。しかし実際の地震加速度波は種々の周波数の波を成分とする複

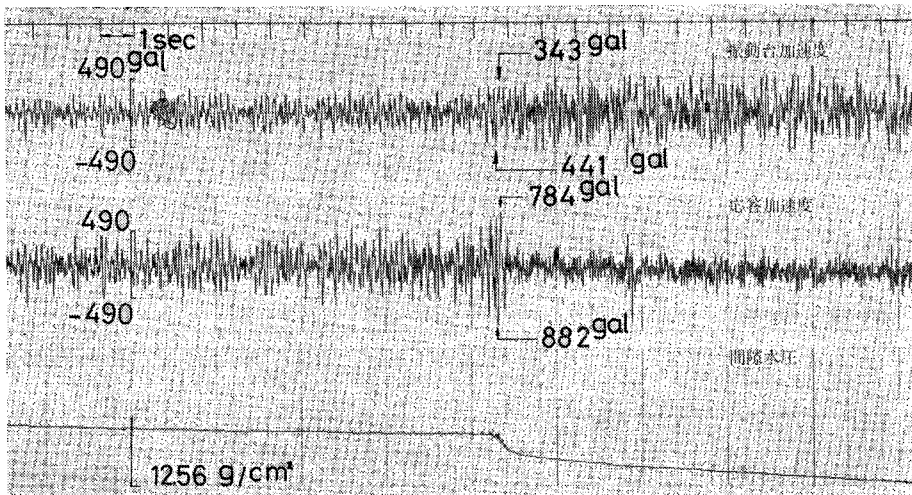


図-8(a) ランダム波入力に対する加速度応答波形 (飽和地盤-含水比 0.280)

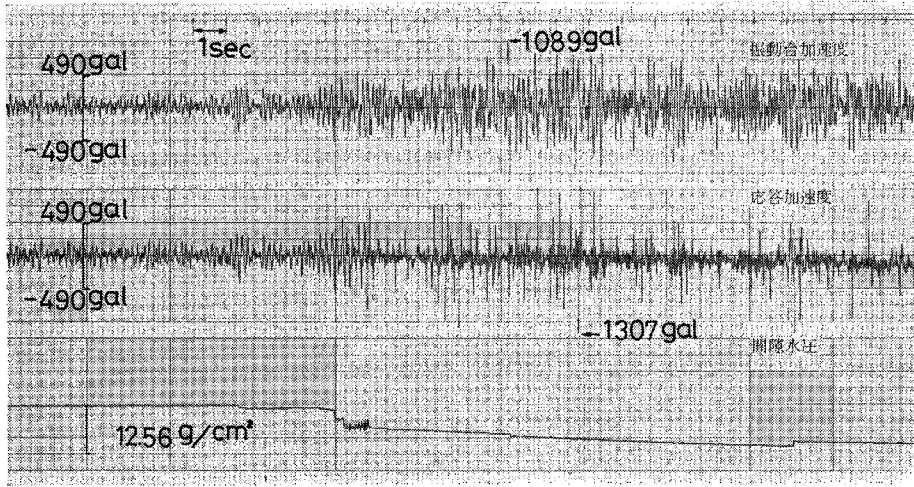


図-8(b) ランダム波入力に対する加速度応答波形（不飽和地盤-含水比 0.260）

雑な波である。

そこで、入力として実際の地震波に近いランダム波を用いて液状化実験を行い、埋設された小型加速度計がどのような応答特性を示すかを明らかにする。

ランダム波の発生には、ランダム波発生器を用いた。この装置はマイクロコンピュータを内蔵しており、擬似ランダム波を A/D 変換して、デジタルで重みを掛けてから D/A 変換してアナログで出力する。実験にはこのランダム波の高周波成分（20 Hz 以上）をローパスフィルターでカットさせたものを用いた。

図-8(a) は、含水比 0.280 の完全飽和砂層地盤に埋設された小型加速度計の加速度応答波形、入力であるランダム波形および間隙水圧波形である。間隙水圧が上昇し始め、地盤が不完全液状化の状態になると入力に比較して大きな応答加速度が見られる。その最大応答倍率は約 2.3 倍である。しかし、地盤が完全に液状化すると応答加速度は入力に比較して小さくなっている。

このような加速度応答特性は正弦波を用いた場合の実験結果とまったく同様である。したがって、入力として正弦波を用いても、あるいはランダム波を用いても、液状化過程において大きな加速度応答が見られるという特性は同じといえよう。

次に、図-8(b) は含水比 0.260 の不飽和砂層地盤における実験結果である。間隙水圧が上昇して、地盤が液状化した後でも、大きな加速度応答が見られる。この傾向は入力として正弦波を用いた場合と同じである。

### 3. 液状化過程における地盤-埋設物系の応答メカニズム

前節に述べたように、砂箱を用いた液状化実験によっ

て、液状化過程において埋設された小型加速度計が大きな応答加速度を示すことが明らかにされた。砂層地盤が液状化する過渡的な状態において、埋設された構造物模型が大きな応答を示す原因についてはいろいろな考察が行われている。

たとえば、加振力によって砂層模型地盤が軟化、液状化すると地盤剛性が低下する。この過程で模型地盤の固有振動数と入力波の振動数が一致して、共振現象を呈するからであると指摘されている。

杭基礎模型に関して、吉田・植松は液状化によって砂層地盤の剛性が低下し、外力と共振状態に入ったためであると推定している<sup>9)</sup>。さらに、実験で得られた地盤剛性を直線的に低下させることによって、液状化の進行をシミュレートして応答計算を行い、大きな応答が生じることを示している<sup>11)</sup>。また、岩崎・龍岡らは、模型杭に作用する土圧の測定結果から地盤が杭を動かし、しかも地盤が大きく振動しているときに、それに応じて杭が大きく応答すると指摘している<sup>12)</sup>。さらに、液状化の進行過程で、砂層地盤の固有周期が入力の周期と一致すると地盤が大きく振動して杭も大きく振動すると述べている<sup>9), 13)</sup>。

しかし、完全に埋設された模型に関して重要なのは、液状化過程において地盤と埋設物模型は常に一体となって動くかどうかであろう。あるいは一体となって動くことみなしてもよいかどうかであろう。さらに、図-2 に示されるような地盤-埋設物系の非線形振動の原因が何んであるかという点も不明である。

飽和地盤では、埋設された小型加速度計の近くでは離れたところよりも若干早く間隙水圧が上昇するという実験結果が報告されている<sup>8)</sup>。このことによって、液状化過程において、小型加速度計周辺で早く液状化して加速

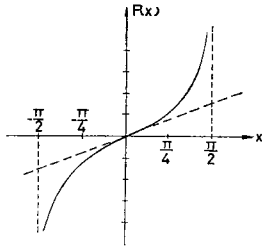


図-9(a) ひずみ硬化ばね系の復元力モデル<sup>13)</sup>

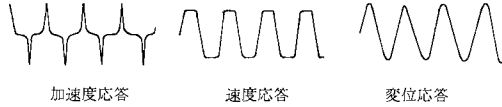


図-9(b) ひずみ硬化ばね系の非線形応答<sup>13)</sup>

度計が動きやすくなり、また液状化していない地盤と衝突することが考えられる。このような非線形振動系は、ひずみ硬化ばねを有する1質点系で表現できよう。

Broch<sup>14)</sup> は Tangent で表わされる復元力関数(図-9(a))を有する系の正弦加振力に対する応答(図-9(b))を求めている。その応答加速度波形を見ると、鋭いピークの加速度とほぼ零に近い等加速度を繰り返すような加速度運動を行っている。このような加速度応答波形の特徴は実験結果(図-2)と非常によく似ている。

しかし、不飽和地盤では小型加速度計近くで特に早く間隙水圧が上昇するという傾向は見られない<sup>15)</sup>。にもかかわらず、加速度応答波形は一定の加速度とパルス状の大加速度を繰り返し示すような波形である。

したがって、埋設された小型加速度計が不完全液状化時に大きな応答を示す原因として、液状化過程における地盤と小型加速度計の衝突現象は考えにくい。

そこで、液状化過程における地盤-埋設物系の応答メカニズムを解析するために、次のような実験を行った。

(1) 模型地盤表面の加速度応答特性

図-10は、不飽和地盤(含水比0.250)の表面に設置された小型加速度計と地盤中に埋設された小型加速度計の加速度応答記録である。

地盤表面に置かれた小型加速度計には加振中に転倒しないようにアルミ板(8×12cm)が取り付けられている。さらに表面を滑動しないようにアルミ板には根入れ用の棒(直径0.3cm、長さ2cm)を取りつけて、地盤に固定させてある(図-11)。

図-10に示す実験に用いた模型地盤の含水比は0.250であり、かなり不飽和である。また、小型加速度計は比重が約1.3であり、かなり軽いといえる。

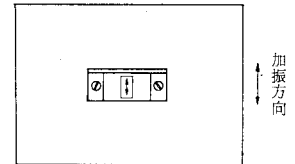
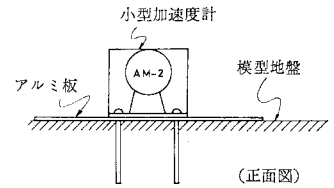


図-11 地表面における小型加速度計の設置状況

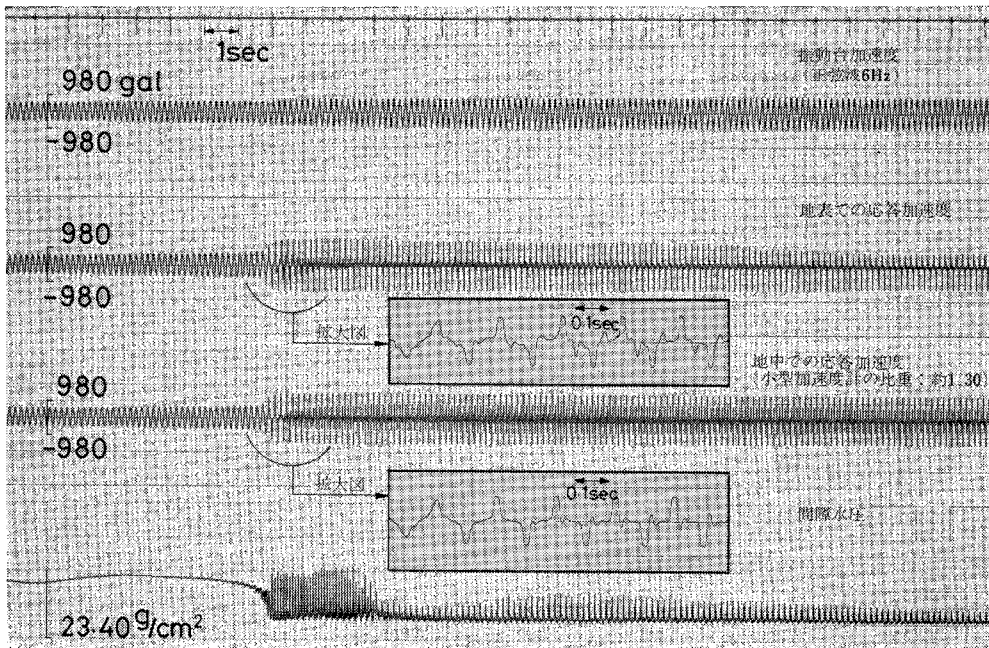


図-10 地表応答と地中応答の比較(不飽和, 含水比0.250)

したがって、液状化過程において小型加速度計と地盤は一体となって動いていると思われる。図-10に示されている拡大図を見てもわかるように、不完全液状化時の地表面における応答波形と地盤中における応答波形は非常によく似ている。このことは、地表面に置かれた小型加速度計と地盤中に埋設された小型加速度計とは同じ応答メカニズムで振動していることを示しているといえる。

液状化過程において、地表面に置かれた小型加速度計と地盤との間には衝突現象は生じていない。それゆえ、地表面や地盤中に設置された小型加速度計が不完全液状化時に大きな加速度応答を示す原因は液状化過程における地盤の振動特性にあるといえよう。

### (2) 模型地盤の固有振動数

液状化過程において、埋設された小型加速度計が示す応答特性が地盤の振動特性によるものであるとすれば、大きな加速度応答を示す原因として、地盤剛性の低下による入力との非線形共振が考えられる。それゆえ、模型地盤の固有振動数を明らかにしておく必要がある。本研究では模型地盤のスイープ試験によって、固有振動数の測定を試みた。

模型地盤には加振中に地盤剛性が変化しにくいように、不飽和地盤(含水比 26.0%)を用いた。入力正弦波の振動数は 2~50 Hz の間をスイープさせた。模型地盤表面に設置した小型速度計には地表面で滑動や転倒しないように板と根入れ用の棒を取りつけた。

試験結果を図-12に示す。小型加速度計の応答特性

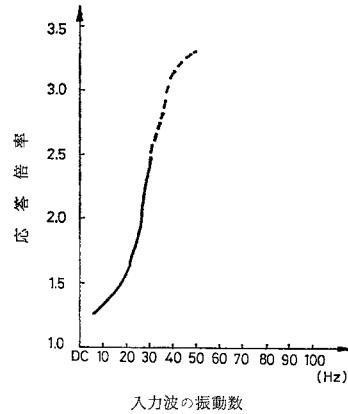


図-12 模型地盤の共振曲線

(図-5)より考えて、模型地盤の固有振動数は約 30 Hz 以上と推定された。なお、深さ 10 cm に設置された間隙水圧計によれば、加振中に間隙水圧計の上昇は記録されなかった。

以上の試験結果から考えて、加振により模型地盤が軟化あるいは液状化し地盤剛性が低下すれば、地盤の固有振動数は 30 Hz よりも小さくなり、入力正弦波 (6 Hz) と共振すると思われる。

### (3) 埋設物の比重を変えた場合

小型加速度計は比重が約 1.3 で、かなり軽いといえよう。そこで、重い埋設物の場合にはどのような応答特性を示すかを解析するために次のような実験を行った。

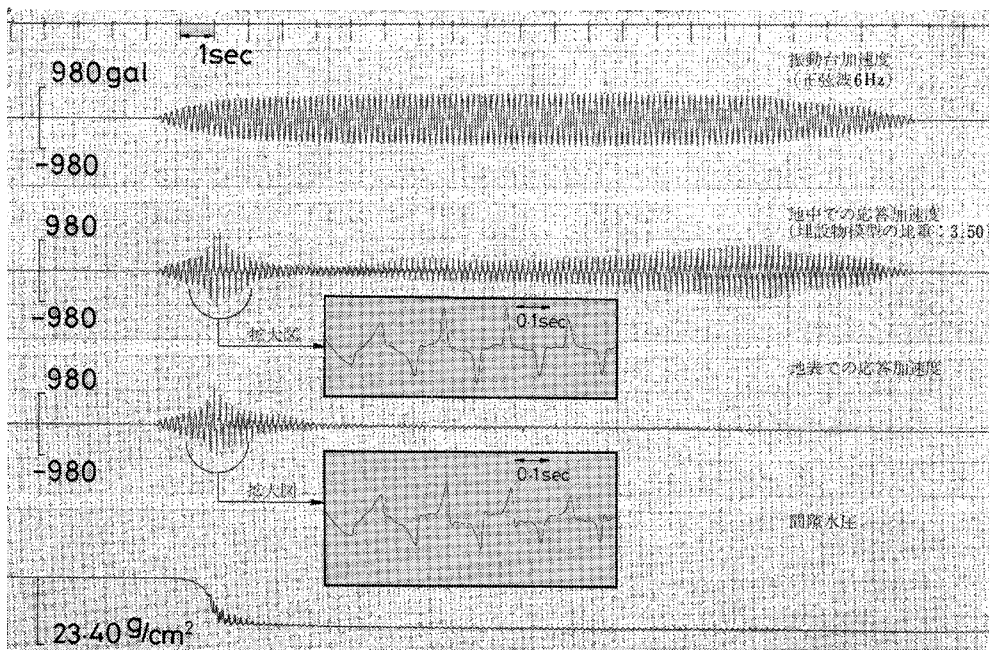


図-13 埋設物の比重を変えた場合の応答特性 (不飽和, 含水比 0.270)



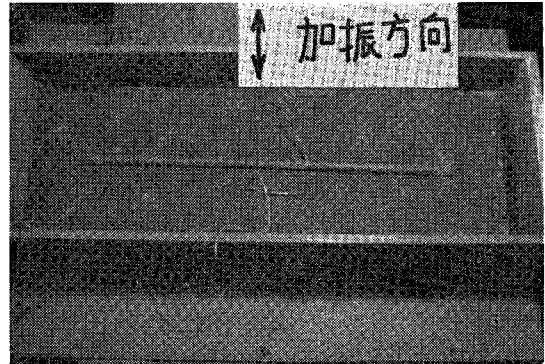
埋設した小型加速度計に重りを取りつけて比重が 3.5 となるようにした。この小型加速度計を不飽和模型地盤（含水比 0.270）に埋設して記録された加速度応答を図一13 に示す。不完全液状化に示す小型加速度計の応答特性は、通常の小型加速度計が示す応答特性とまったく同じである。すなわち、一定の加速度とピーク状の大きな加速度を繰り返して示している。したがって、埋設物を重くして地盤と埋設物が一体となって動きずらくしても、液状化過程に示す加速度応答特性に差異はないといえよう。

換言すると、液状化過程において地盤と埋設物が「衝突現象」を起こしたとしても、加速度応答特性に与える影響は見られないといえる。それゆえ、液状化過程における埋設物の応答特性は地盤の振動特性によって定まるといえよう。

#### 4. 液状化過程における塩ビパイプの曲げひずみ応答

次に、模型地盤に塩ビパイプを埋設して液状化過程におけるひずみ応答特性を解析する。塩ビパイプは実際に地中埋設管として使われている。さらに、液状化過程における塩ビパイプの応答特性を明らかにすることによって、水平方向に細長い地中構造物（たとえば、地下鉄などのシールドトンネル、ガス管や水道管などの埋設鋼管）の応答特性も類推できよう。

実験に用いた塩ビパイプは長さ 76 cm、内径 10 mm である。長さ 38cm のところにはひずみゲージを貼付し、2 ゲージ法で曲げひずみ応答を測定する。塩ビパイプは地盤高 10 cm のところに埋設する。塩ビパイプの横には間隙水圧計が設置されている。この間隙水圧計によ



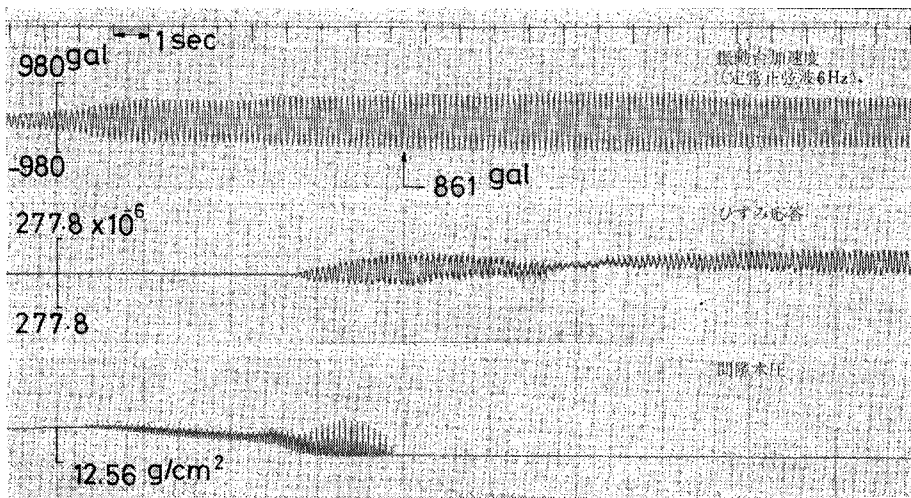
写真一1 塩ビパイプの埋設状況

て記録される間隙水圧の変化から液状化の進行状況を判断する。

塩ビパイプを埋設した模型地盤は、塩ビパイプとは直角の方向に、地面とは平行な水平方向に加振させて液状化させる。塩ビパイプの埋設状況を写真一1 に示す。比較のために、乾燥地盤でも同様の実験を行い、模型地盤の軟化・液状化が応答特性にどのような影響を与えるかについて考察する。

##### (1) 正弦波を入力とした場合

図一14(a) は不飽和地盤（含水比 0.240）における塩ビパイプの曲げひずみ応答である。間隙水圧が上昇して、地盤が軟化し地盤が動きやすくなる不完全液状化時に大きなひずみ応答が見られる。その後、地盤が液状化してせん断波が伝わりにくくなると塩ビパイプのひずみ応答は小さくなっている。しかし、すぐにひずみ応答は再び大きくなっている。これは地盤の含水比が低く、すぐに砂粒子が再堆積するので外力が塩ビパイプに作用し始めるからであると思われる。



図一14(a) 不飽和地盤（含水比 0.240）におけるひずみ応答



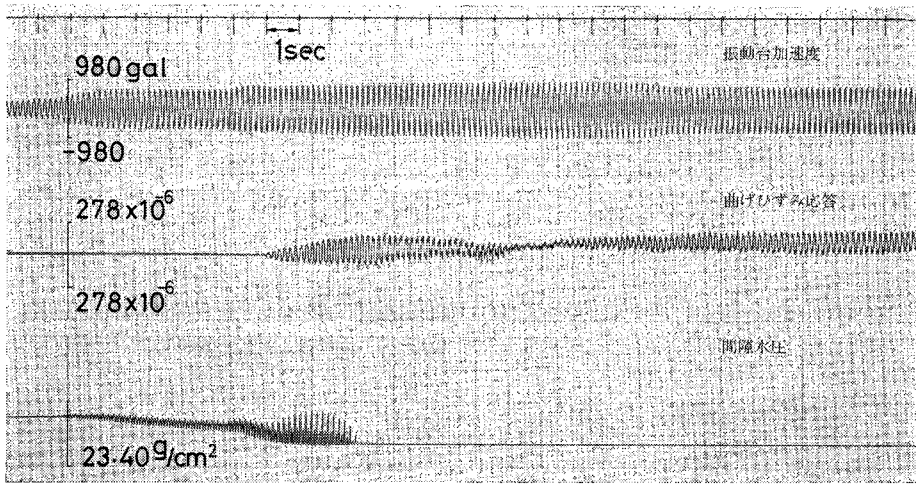


図-14(b) 不飽和地盤における曲げひずみ応答 (含水比 24.0%)

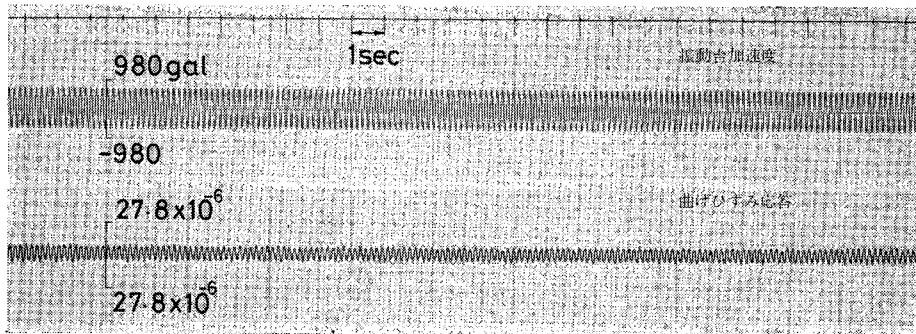


図-14(c) 乾燥地盤における曲げひずみ応答

同様の実験を飽和地盤 (含水比 0.270 (図-14(b)) および乾燥地盤 (図-14(c)) でも行った. この3種の地盤における実験結果から, 最大曲げひずみを比較すると, 飽和・不飽和地盤における最大曲げひずみは乾燥地盤の

その約 15 倍となった. しかも, 含水比の低い地盤では, この大きなひずみ応答が入力の継続している間ずっと見られる.

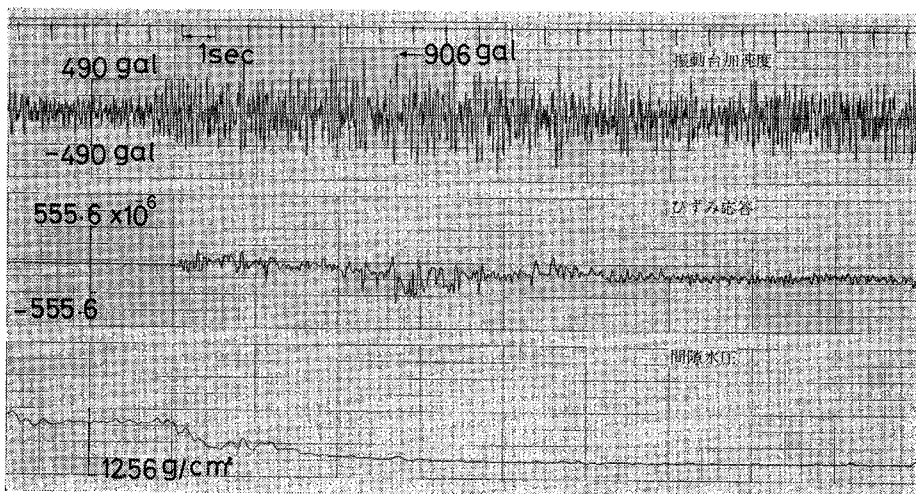
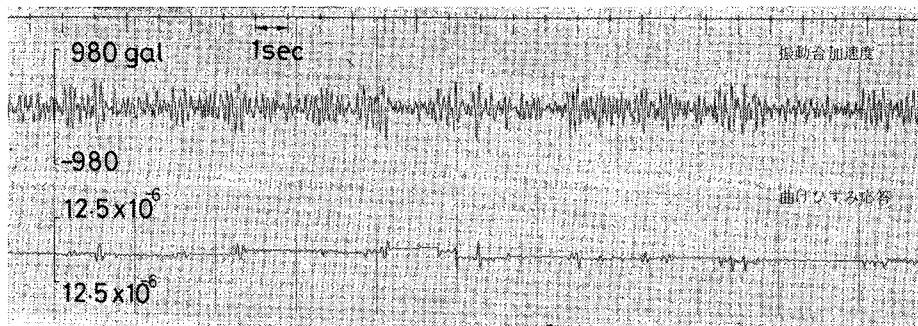


図-15(a) ランダム波入力に対するひずみ応答波形 (飽和地盤-含水比 0.280)



図一15(b) ランダム波入力に対する曲げひずみ応答（乾燥地盤）

## (2) ランダム波を入力させた場合

図一15(a) は飽和地盤（含水比 0.280）における塩ビパイプの曲げひずみ応答である。間隙水圧が上昇して、地盤が液状化し始めると曲げひずみ応答が見られる。しかし、地盤が完全に液状化すると曲げひずみ応答は小さくなっている。このような応答特性は正弦波（6 Hz）を入力とした場合とよく似ている。比較のために乾燥地盤における実験結果を図一15(b) に示す。

以上のような砂箱実験の結果を見る限り、入力がランダム波でも砂層地盤が液状化すると、埋設パイプは大きな曲げひずみ応答を示すようである。

## 5. あとがき

本研究は、地盤の液状化過程における地中構造物の挙動を実験的に明らかにしようとしたものである。砂箱を用いた液状化実験から、次のようなことが明らかになった。

(1) 含水比の低い砂層地盤が軟化、あるいは液状化すると、完全飽和地盤の場合に比較して埋設物の加速度あるいは曲げひずみの応答倍率は大きくなる。

(2) しかも、地盤が軟化・液状化する限りこの大きな応答は地盤の含水比が低いほど長く続く。

(3) この原因として、液状化の進行によって地盤剛性が低下して、地盤と入力が非線形共振したためと思われる。

(4) 不飽和地盤でこの大きな応答が続くのは共振時間が長くなるからと思われる。

以上のような結果からいえることは、これまで液状化といえば飽和砂層地盤だけについて考えられてきたが、不飽和砂層地盤の液状化性状についても考慮すべきであろう。したがって地中構造物の応答特性を論ずる際には、地震動によって地盤が軟化あるいは液状化するかどうか大きな問題となってくるといえよう。

謝 辞：本研究にあたり、龍岡文夫助教授（東大

生研）と藤野陽三講師（筑波大）には種々の有益なご助言を賜りました。深甚なる謝意を表します。

実験の遂行にあたっては武蔵工大卒論生のご協力をいただいた。また、月館隆吉（現・古久根建設）、布藤 誠の両君には実験結果の整理や図表作成等に多大の助力をいただいた。深甚なる謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 久保慶三郎・片山恒雄：地震時の地下埋設管被害に関する調査，東京都防災会議。
- 東京都防災会議：地震に関する地域危険度測定調査報告（付図一5）。
- 鹿籠雅純・佐藤安一郎・伯野元彦：不完全液状化砂の地中構造物に及ぼす影響，第28回土木学会全国大会（第3部門），1973。
- 岩崎敏男・龍岡文夫・坂場義雄：砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験，第14回日本地震工学研究発表会，1976。
- 吉田常松・植松幹夫：液状化した砂中における杭の挙動に関する模型実験，第30回土木学会全国大会（第3部門），1975.10。
- 伯野元彦・鹿籠雅純：不完全液状化砂が地中構造物に及ぼす地震力に関する実験的研究（英文），東京大学地震研究所報，第53号，第1冊，昭和53年。
- 片田敏行・伯野元彦：液状化時における地中構造物の応答特性，第33回土木学会全国大会（第1部門），1978.9。
- 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，1978。
- 荒井秀夫・岩淵守義・中沢定男・北島誠治：砂層の振動性状，港湾技術研究所報告，第18巻2号，pp. 70，図一2，1974.6。
- 東畑郁生：有効応力解析に基づく地盤の動的応答解析，東京大学修士論文，1979.3。
- 吉田常松・植松幹夫：液状化砂中の杭の動的挙動の研究，第5回日本地震工学シンポジウム，1978。
- 龍岡文夫・坂場義雄・野間博伸：流動化する砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験，第12回土質工学研究発表会，1977.5。
- 岩崎敏男・龍岡文夫・吉田精一：砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験，土研資料第1152号，建設省土木研究所振動研究室，昭和51年6月。
- Broch, J.T.: Random Vibration of Non-Linear Systems, Safety of Structures under Dynamic Loading, Vol. 1, edited by Ivar Holland et al., 1978, Norwegian Institute of Technology Press.
- 片田敏行：液状化地盤中の構造物の挙動，第15回地震工学研究発表会，1979.7。

(1979.10.31・受付)