

部分的に液状化した地盤中の埋設管の挙動に関する実験的研究

MODEL EXPERIMENT ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF BURIED
PIPELINE IN PARTIALLY LIQUEFIED GROUND

西尾宣明*・塚本克良**・羽村 淳*

By Nobuaki NISHIO, Katsuyoshi TSUKAMOTO and Atsushi HAMURA

A model experiment was carried out on the seismic behavior of a buried pipeline in a partially liquefied ground. A model pipeline was laid in an unliquefiable superficial soil layer, and a part of soil layer underneath the superficial layer was made liquefiable by using loose fine sand.

When liquefaction occurred, the superficial layer and the pipe showed a characteristic behavior which could be simulated with simple mathematical models with a high accuracy. Calculations of strains in buried pipelines of the actual sizes by using the above mathematical models showed that extremely great strains could be produced in the pipelines during the actual earthquakes. Thus the models of partially liquefied ground will give a most probable mechanism of pipeline failure associated with soil liquefaction.

Keywords: buried pipeline, soil liquefaction, model experiment

1. 緒 言

地盤の液状化を伴う地震では埋設管の被害率(管路の単位延長当たり破損箇所数)が著しく大きくなることが知られている。液状化の結果として、地盤のすべり、路肩の崩壊や各種構造物の沈下や傾斜等、いろいろな形で埋設管の環境が変動を受けるので、埋設管の損傷の形態も多様であるが、1964年の新潟地震直後の調査¹⁾によれば、ガス導管の破損は継手の引抜けおよび突っ込みの形をとる場合が多いとされる。すなわち、管軸方向の引張り、圧縮荷重を原因とするものである。

1983年の日本海中部地震においても、その大半が地盤の液状化に関係するとみられるガス導管の多数の被害を生じたが、被害の大半はねじ継手(鋼管)でのねじ部の破断と抜け出しおよび铸铁管継手の抜け出しもしくはゆるみによるガス漏れであり²⁾、ここでも管軸方向の引張り荷重が継手の破損の主要な原因となっていることがわかる。その中で、能代、若美、男鹿の3市町で口径40~100mmの溶接接合の鋼管に生じた12か所の亀裂

や破断は重要な情報を提供するものである。すなわち、10%以上もの一様伸びを示す配管用鋼管が破損するほどの厳しい状況がどのようにして生じたかを明らかにすることによって、地盤の液状化に伴う埋設管の被害の発生機構を解明する手がかりが得られるものと考えられる。

さて、上記12か所の鋼管の破損部を観察すれば^{2)~4)}、その過半数において圧縮、引張両方向の荷重が少なくとも1回以上交互に作用したものと判断される。延性に富む鋼管は静的な(一方向の)圧縮や曲げによって座屈や偏平化などの大きな変形を受けるが、それによって材料に亀裂や破断を生じることはない。しかし、いったん、座屈等の塑性変形を受けた管に逆向き(引張り)荷重を加えると比較的容易に破断する。一方向の引張りでは、最終的には破断するが、きわめて大きな変位を与える必要がある。上記の破損部のうち8個には、座屈や偏平化など、圧縮荷重(それに伴う曲げも含む)による管の塑性変形や、2つの破断面同志のぶつかり合い、食い込みまたは食い違いがみられ、引張り荷重の前後に少なくとも1回以上の圧縮荷重を受けた形跡がみられる。特に、Hamadaら⁴⁾の調査により、地盤に永久圧縮変形を生じたと考えられるような場所においてさえ管の完全な破断が生じている事実は注目に値する。これは、永久変位が

* 正会員 東京ガス株式会社技術研究所
(〒105 港区芝浦 1-16-25)

** 正会員 東京ガス株式会社導管計画部導管企画グループ
(〒105 港区海岸 1-5-20)

生じる前の動的な引張り圧縮の繰返し変位を考えに入れなければならないことが困難である。

以上のような理由から、埋設管に被害を及ぼす主たる原因を地盤の管軸方向への繰返し引張り、圧縮変形と考えることができる。このことは、特に液状化を伴う場合に限らず、軟弱な表層地盤の厚さが急変する場所での管へのひずみ集中現象（たとえば、1978年宮城県沖地震における埋設管被害分布に関する磯山ら⁵⁾の調査、塚本ら⁶⁾による地盤急変部での地震観測、Nishioら⁷⁾による模型実験等)においても同様に認められる事実である。しかし、液状化を伴う場合には単なる急変地盤に比べて異常に大きな荷重が加わる何らかの理由が存在するものと考えられる。

埋設管の周囲の土が液状化すれば、地盤の拘束力が低下するために管の動的ひずみは低下することが、たとえば、片田・伯野⁸⁾や北浦・宮島⁹⁾の模型実験により知られている。そこで、少なくとも管の埋設深さまでの表面層は液状化に至っていない状態を想定する必要がある（一般に、地下水面より下の、やや深い位置で液状化抵抗率が最も低くなる傾向があるから、この仮定には現実性がある）。また、管よりも深い位置の地盤が広い範囲にわたって液状化した後は、下方からのせん断波が表面層に伝わらなくなるから、大きな動的変形は生じにくくなる（滑動等の永久変位は可能であるが）。このような考察のもとに、著者らは液状化の範囲が十分広がっていない段階での部分的液状化の状態を想定して模型実験を行い、埋設管に生じるひずみを観測した。得られた結果を簡単な力学モデルで近似的に表現することを試みた。また、その力学モデルを実物大の地盤と埋設管に適用して、埋設管が破損するような大きな引張り、圧縮ひずみが生じる可能性を吟味した。

2. 模型の諸元、実験条件等

(1) 模型の諸元

模型の形状、寸法および各種計器の設置状況を図-1に示す。

模型地盤の両側は液状化しないように関東ローム（南多摩産）を十分締め固めて作成し、中央部は液状化可能なように自然乾燥状態の珪砂（M-60）を用い、水中落下により堆積させて作成した。管が埋設される表層部は、液状化しないように、同じく関東ロームを用いたが、中央の砂層に余分な荷重や衝撃を加えないように手で敷きつめるだけで転圧は一切行わなかった。したがって、この層はきわめて軟弱な状態となった。完成した地盤の物性値と管の諸元を表-1に示す。

(2) 実験条件

ゆるい砂層を作って行った予備的液状化試験の結果を

表-1 模型地盤および管の物性値・諸元

	γ_t (gf/cm^3)	γ_d (gf/cm^3)	e_c (%)	D_r (%)	埋設管諸元	E I
非液状化層 (ローム)	1.37 (kN/m^3) (13.4)	0.72 (kN/m^3) (7.1)	90.7	—	$L = 1.3$ m	$kgf \cdot cm^2$ 2.0×10^2
液状化層 (珪砂)	1.94 (kN/m^3) (19.9)	1.50 (kN/m^3) (14.7)	29.3	61.1	$\phi = 48$ mm ($\phi = 44.4$)	曲げ試験 による 実測値 ($196 N \cdot m$)
表層 非液状化層 (ローム)	1.23 (kN/m^3) (12.1)	0.59 (kN/m^3) (5.6)	108.0	—		

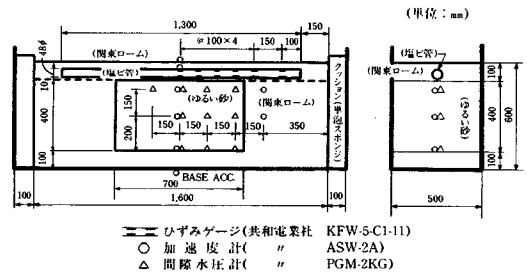


図-1 模型の形状、寸法および計器配置

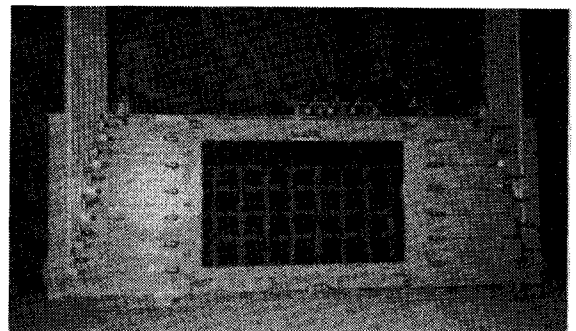


写真-1 模型外観

参照して、加振条件を 2 Hz、約 200 gal の正弦波とした。加振は水平（管軸）方向に 40 秒間とした。このうち、0 ↔ 200 gal の立上り、立下り区間をそれぞれ約 5 秒とした。

(3) 計器類および計測方法

地盤および管の応答加速度、砂地盤の間隙水圧および管のひずみを測定するため、図-1に示すように加速度計、間隙水圧計およびひずみゲージを設置した。ひずみゲージは塩化ビニル管の頂部と底部に対向させて貼付し、一組とした。これによって計測されたひずみ値から、軸ひずみを $\epsilon_x = (\epsilon_t + \epsilon_b)/2$ 、曲げひずみを $\epsilon_y = (\epsilon_t - \epsilon_b)/2$ により求めた。ここに、 ϵ_t 、 ϵ_b はそれぞれ管頂および管底のひずみ（引張りを正とする）である。記録はすべて加振前の状態からの増分についてのみ行った。

以上のほかに、地盤の変形を目視観察できるように、土槽側面のガラス窓部に接する砂地盤に白ペンキで縦、横各 10 cm 間隔の格子状の着色を施した。実験前の土

槽の外観を写真-1 に示す。

3. 実験結果

(1) 加速度応答

加速度記録波形を図-2 に示す。

[BASE] の波形が入力を示す。約 5 秒を過ぎた時刻に最大値 (約 208 gal) に達し、そのままの値で約 37 秒過ぎまで継続している。これに対して、非液状化地盤はわずかに増幅されるが ([K-1] で約 211 gal, [K-2] で約 231 gal), [BASE] と同様、最後まで一定値に保たれている。液状化 (砂) 地盤においても深部 ([K-3] および [K-4]) はわずかに増幅された状態ではほぼ一定値を保つが、浅部の [K-5] では時刻 7~8 秒に急激に加速度を増し、約 10 秒に最大値 821 gal に達したのち、約 12 秒から急速に減衰に転ずる。このことは [K-4] と [K-5] の間を境に上方の地盤が液状化し、下方は液状化しなかった (あるいは不完全な液状化) ことを示している。

一方、管が埋設されている表層地盤の加速度 ([K-7]) は約 6 秒までは下部の液状化地盤 ([K-5]) とほぼ同じ値を示すが、その後も漸増を続け、時刻 17~18 秒に最大値約 628 gal を示す。この大きな加速度はあまり減少せず、最後まで継続する。このことは、下部が液状化した後では表層地盤は下の地盤と全く独立な運動をしていることを示すものである。管の加速度応答 ([K-6]) は、値は地盤より小さいが (最大値約 464 gal) 波形はほとんど表層地盤と相似である。

(2) 間隙水圧-液状化の状況

間隙水圧の変化 (過剰間隙水圧に相当) の記録を図-

3 に示す。間隙水圧上昇の経過は砂地盤中のどの位置でも同様で、時刻約 2 秒から上昇を始め、8~10 秒に最大値を示した後ゆるやかに減少する。ただし、最上部の [P-7], [P-8], [P-10] ではその後もやや上昇を続ける。記録の波形から判断すれば、約 8 秒に [P-8], [P-9] および [P-10] の位置で地盤は液状化に至ったと考えられる。

より厳密な液状化の過程は過剰間隙水圧 Δu と有効応力 σ'_0 の比 $\Delta u/\sigma'_0$ の変化によって知ることができる。図-4 に間隙水圧計の位置での値をもとに補間して描いた過剰間隙水圧比の分布状況を示す。ここで、有効応力の値は表-1 に示す各層の湿潤密度 (γ_s) の値を用いて、次式により定めた。

$$\sigma'_0 = 2.3 + 0.94 z \quad (\text{gf/cm}^2, \times 9.8 \text{ Pa})$$

ただし、 z は砂層上面を基準にとった深さ (cm) である。 $\Delta u/\sigma'_0 \geq 1$ を液状化の条件とすれば、時刻 8 秒には [P-8], [P-9] および [P-10] の位置がその条件に入り、液状化したと判断される。このことは、前記の記録波形からの判断と一致する。この液状化の範囲は 18~20 秒に最も広がる。一方、液状化に準ずる状態の範囲を、たとえば $\Delta u/\sigma'_0 > 0.8$ と取れば、その範囲は 10 秒に最も広く、その後減少を続けている。このことは、砂層上部での $\Delta u/\sigma'_0 \geq 1$ の範囲の 10 秒以降の増加が、より下方の層の過剰間隙水圧水の上方向への流動に起因して生じていることを示唆する。

(3) 管のひずみ

図-5 に管のひずみの経時変化を示す。

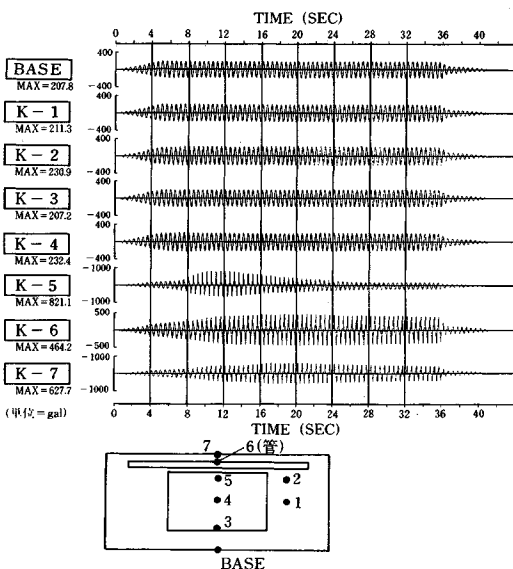


図-2 加速度記録 (入力約 200 gal, 水平方向)

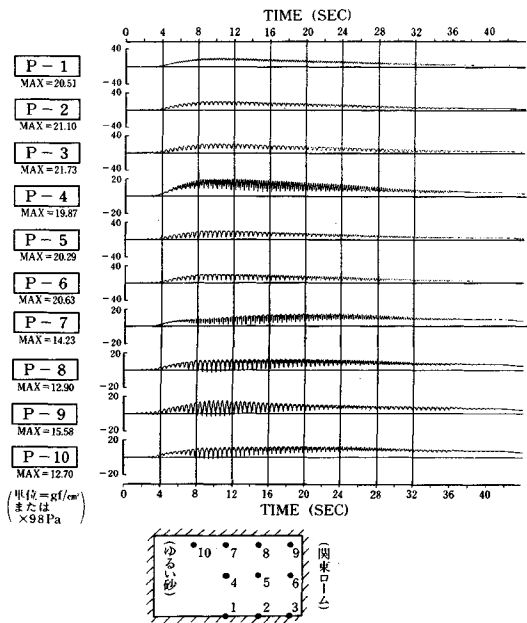
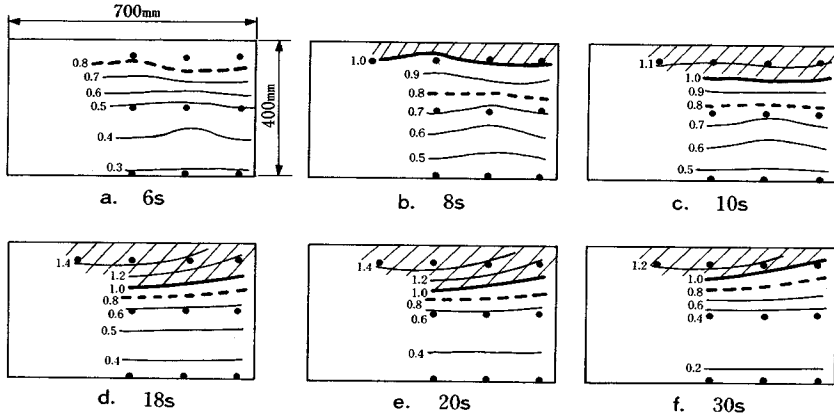


図-3 間隙水圧変化記録



図—4 過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_v$) の分布の経時変化

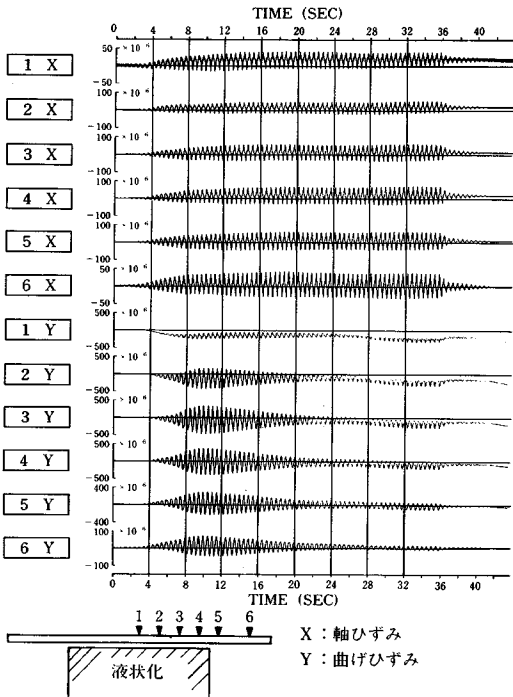
まず、曲げひずみについてみれば、液状化地盤の上に位置する [1Y]~[3Y] では、加振開始と同時に下に凸の曲げ変形を示すひずみ（平均ひずみ）が生じ始め、それに重畳する曲げ振動が振幅を増大する。これに対して、非液状化地盤の上に位置する [5Y] と [6Y] では、平均ひずみは上に凸の曲げを示す。ひずみの振動成分はすべての位置で時刻約 10 秒に最大値に達し、その後急速に減少に転ずる。

上述のひずみのうち、平均ひずみは、明らかに液状化した地盤に生じた沈下によって表層地盤も沈下し、全体として管は下に凸となる曲げ変形を受けたことを示して

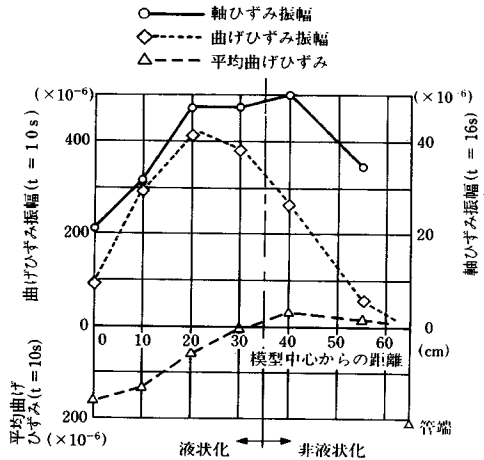
いる。一方、ひずみの振動成分は表層地盤に曲げ振動のような振動が生じたことによって管にも同位相の曲げ変形を生じたことを意味する。この曲げ振動成分の消長は、前項で記述した砂地盤の液状化の消長と明瞭な対応をみせている。

曲げひずみが最大値をとる時刻 10 秒における曲げひずみの分布を図—6 に示す。平均ひずみは模型中央部で最大値をとるとともに、非液状化部で符号が反転し、地盤沈下部を横断する管の曲げ変形の典型的な特徴を示している。一方、振動成分は中央部で最小値をとり、液状化部と非液状化部の境界にやや近い液状化部の範囲内で最大値をとる。この分布形状は、中央部が節となり、左右反転する曲げモーメントの分布を示唆している。

軸ひずみは加振開始後約 8 秒まで急速に増加するが、その後もゆるやかに増加を続け、約 16~20 秒の間でひずみ振幅は最大となる。その後はひずみ振幅がほとんど減衰せず、定常的な状態を加振終了まで保つ。曲げひずみが地盤の液状化範囲（深さ）の増大と減少の経過と軌



図—5 管のひずみの記録



図—6 管のひずみ分布

を一にして変化したのとは対照的に、軸ひずみはそれとはほとんど無相関である。なお、平均ひずみが正の値にずれているが(中央部が大きく、端部に近いほど小さい)、これは、地盤の沈下による管の曲げに伴って管の中心線の長さが伸びた結果と考えられる。

軸ひずみ振幅の管軸に沿う分布は図-6の実線で示すようになる。振幅は液状化部と非液状化部の境界の付近で最も大きく、模型中央部で最小となる。この場合も、瞬間的には曲げひずみと同様、管の中央部付近が節となり、左右がほぼ反転するひずみ分布となることが推測される。

4. 管のひずみ発生機構に関する考察

(1) 軸ひずみに関与する地盤-管系の挙動のモデル

前章で観察したように、管の軸ひずみの増大の経過は管が埋設されている非液状化表層の応答加速度の増大の経過ときわめてよく一致している。この事実、管のひずみが表層地盤の水平振動によって生じていることを示す。また、表層とその直下の液状化層の加速度の変化が全く異なる経過をたどる事実から、液状化発生後は表層は液状化層の上に浮かんだ状態で独自の振動をしているものと判断される。この事実と図-6の軸ひずみ分布(中央部で最小値を、液状化/非液状化境界部で最大値をとる)から、軸ひずみの発生機構を説明するものとして図-7のような近似モデルを考えることができる。すなわち、液状化層の上にある非液状化表層地盤を、両端から同位相の軸方向加振を受ける板と考える(図-7, a)。この板は下部の液状化層とは全く相互作用をもたないものとする。このとき、この板は定性的には図-7, cのような変位応答をするものと予想される。そして、地盤のひずみは同図 d の破線のようになると考えられる。

一方、管については表層地盤によって管軸方向に支持される弾性床の上のはりとして近似することができる(図-7, b)。これに図-7, cの地盤変位を入力することによって同図 d の実線のようなひずみ分布が得られることになる。これらのモデルは実験で観察された管の軸ひずみ分布の形を説明できるとともに、軸ひずみ振幅が下の地盤の液状化の状態の変化と無関係に一定の状態を保つ事実をよく反映するものとなっている。

(2) 曲げひずみに関与する地盤-管系の挙動のモデル

図-6に示すような管の曲げひずみ(振動成分)の分布を生じさせることのできる地盤の挙動については、やわらかい(曲げ剛性に関して)表層地盤の板(不透水性)で表面を覆われた液体(液状化した砂層)の容器に生じる液面動揺現象を考えることができる。図-8, aに模式的に描いたように、表面が板(やわらかい)で覆われているために、液面は、開放容器の場合と異なり、両端で

変位零の正弦波一波长分に類似の変位を示すものと考えられる(したがって表層の板も)。表層内の管は同図 b のような弾性床の上のはりで近似できるものと考えられる。そのとき、定性的には図-8, cの破線のような表層地盤の変形によって、管には同図の実線で示すような曲げひずみ分布が生じることが予想される。この形は観察されたひずみ分布の形と一致する。また、液面動揺の振幅は液の深さによって変化するから、液状化の範囲(深さ)の拡大と縮小に伴う管の曲げひずみ振幅の増加と減少の経過(図-5)も、この液面動揺の考え方によって

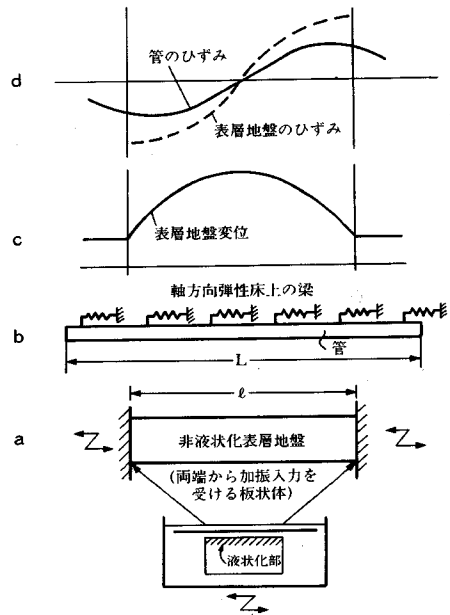


図-7 非液状化表層と管の挙動に関する近似モデル(管軸方向)

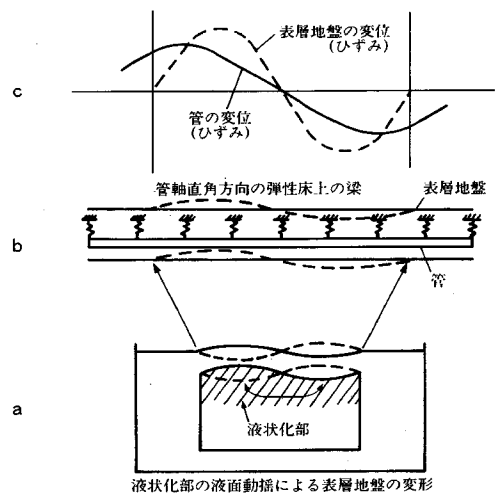


図-8 非液状化表層と管の挙動に関する近似モデル(管軸直角方向)

よく説明できることになる。

5. 力学的相似を考慮した実験結果の考察

実験では曲げひずみ振幅は軸ひずみ振幅に比して約9倍の大きさであった。しかし、このことからただちに、実際の地震においても（液状化を伴う）曲げひずみが卓越すると考えることはできない。その理由は1. この実験では通常の口径の埋設管に対する相似が成り立っていない、2. 液面動揺の面で、この模型と実際の地盤の間には相似が成り立っていない、等である。これらの相似条件が満足される場合には、実際の埋設管にとって重要なのは軸ひずみの方である。以下、力学的相似の観点から簡単な考察を加え、このことを明らかにする。

(1) 模型に対応する実際の埋設管の寸法

ここでは、模型の部分的液状化の範囲が実際の1/100のオーダーで縮尺されているものと考え、これを前提として、模型の塩化ビニル管がどのような寸法の鋼管に相当するかを考えることとする。

この実験において（実際の埋設管においても）、管の変形に対してその慣性の影響は無視できると考えられる。そのとき、地盤の変形と管の変形の関係は次の弾性床上的のりの方方程式で表わすことができる。

a. 管軸直角方向曲げ変形

$$EI \frac{d^4 u_t}{dx^4} + k_t(u_t - u_{st}) = 0$$

b. 管軸方向変形

$$EA \frac{d^2 u_a}{dx^2} - k_a(u_a - u_{sa}) = 0$$

ここに、 u_t および u_a は管の変位、 u_{st} および u_{sa} は地盤の変位、 E は管の弾性係数、 I は断面2次モーメント、 A は断面積、 k_t および k_a は地盤反力係数（地盤の弾性係数 E_s に比例）である。

これら2つの方程式で表わされる模型と実物の系が力学的に相似となるためには、それぞれの式の第1項と第2項の比が模型と実物で等しければよい。このことから、相似の条件として、各要素の間の次の関係式が得られる。

$$I^* = \frac{E_s^*}{E^*} (L^*)^4, \quad A^* = \frac{E_s^*}{E^*} (L^*)^2$$

ここに、 $*$ は（実物）／（模型）の比を意味する。

さて、仮定により、 $L^* \approx 100$ （液状化範囲 ≈ 70 m）である。また、硬質塩化ビニルと鋼の間で $E^* \approx 70$ である。地盤については $E_s^* \approx 3000$ である（実物のせん断波速度 $V_s \approx 100$ m/s を仮定すれば、これに対応するせん断弾性係数 $G_s \approx 150$ kgf/cm²（15 MPa）。一方、模型の表層地盤では、次章の考察から $G_s \approx 0.05$ kgf/cm²（0.005 MPa）。これから

$$I^* \approx 4 \times 10^9, \quad A^* \approx 4 \times 10^5$$

が得られる。これより、模型の塩化ビニル管 ($I = 7.0$ cm⁴, $A = 2.6$ cm²) に相似な鋼管では $I = 2.8 \times 10^{10}$ cm⁴, $A = 1.0 \times 10^6$ cm² となる。このような I と A の値をもつ鋼管の寸法は、たとえば、外径 10 m 以上、管厚 50 cm 以上といった値となる。これは巨大なトンネルの規模であり、都市ガスや上水道の供給配管網に平均的な直径 10 cm のオーダーの管とは全くかけ離れている。

(2) 一般的な埋設管における曲げひずみと軸ひずみの大きさ

弾性床上的のりとしての管に、単位振幅、波長 L の正弦波状変位入力（前記2式の u_s として）を加えたとき、管に生じるひずみは、入力波長 L と、Nishio and Satake¹⁰⁾ が管の特性波長と名付けた長さ L_0 との比が 1.0 のとき最大となり、それからずれると急速に小さくなることが知られる（図—9）。 L_0 は軸ひずみと曲げひずみに関してそれぞれ次のように与えられる。

$$L_{0a} = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{k_a}{EA}}, \quad L_{0t} = \frac{\sqrt{2}\pi}{\beta}; \quad \beta = \sqrt{\frac{k_t}{4EI}}$$

ただし、添字 a, t はそれぞれ管軸方向および管軸直角方向を意味する。

口径数十mm から数百mm のガス用鋼管と平均的な地盤の剛性の組合せに対して、特性波長はおおよそ次のような値をとる（口径が大きいほど長い）。

$$L_{0a} = \text{十数 m} \sim \text{数十 m}, \quad L_{0t} = \text{数 m} \sim \text{十数 m}$$

この実験に対応する実際の液状化範囲を 70 m と仮定すれば、入射波長 L は管軸方向変形について約 140 m、曲げ変形については約 70 m の程度と考えることができる。したがって、上の特性波長に対して

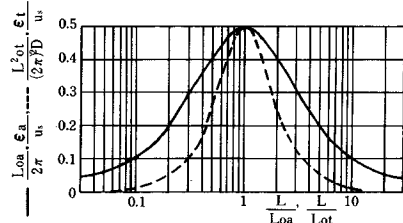
$$L_{0a} \approx L, \quad L_{0t} \ll L$$

の関係にある。このとき、図—9を参照して、曲げひずみは軸ひずみに比べて小さくなる傾向があることがわかる。

一方、模型の塩化ビニル管に対応する鋼管 (6. (1) で求めた I と A の値をもつ) に対して特性波長を求めれば、それぞれ

$$L_{0a} \approx 5000 \text{ m} \gg L \text{ (約 140 m)}$$

$$L_{0t} \approx 200 \text{ m} \approx L \text{ (約 70 m)}$$



図—9 単位変位振幅の正弦波状地盤変位に対する埋設管のひずみ応答スペクトル (D = 管外径, ϵ = ひずみ, 添字 a : 軸方向, t : 軸直角方向もしくは曲げを意味する)

のようになる。このように、模型実験は極度に大口徑の管に対応するため、曲げひずみが大きくなりやすくなっていたことが理解される。

(3) 液面動揺に関する条件

幅 $2l$ の矩形断面の容器に入った、深さ h の、自由表面をもつ液体の液面動揺の固有周期は

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{g(2i+1)\pi \cdot \tanh \frac{(2i+1)\pi h}{2l}}{2l}} \quad (i=0, 1, 2, \dots)$$

で表わされる。本実験の液化化層の場合、表層地盤により液面が覆われ、図-8, a のような振動モードとなるので、上式による2次 ($i=1$) の固有周期に近い周期をとるものと考えられる。

液化化範囲を $\Delta u/\sigma'_v > 0.8$ の範囲とし、時刻10秒についてとると(図-4, c) $2l=70$ cm, $h \approx 18$ cm となるが、これに対する固有周期は、 $i=1$ に対して $T=0.55$ s となる。これは加振周期0.5sにきわめて近く、実験は液面動揺の振幅が大きくなりやすい(したがって曲げひずみも大きくなりやすい)条件下で行われていたと考えられる。

一方、 $L^*=100$ として実物大の地盤について同一の h/l 比での2次固有周期を求めれば、 $T=5.5$ s となり、通常地震動の卓越周期と比べて、共振とはかなり離れた領域にあることになる。このように、液面動揺の点からみても、この模型実験では極端に曲げひずみが生じやすい条件にあったものと考えられる。

6. 管軸方向の地盤の挙動と管のひずみの近似モデルに基づく解析

前章での考察のように、実規模の地盤-埋設管系では曲げひずみよりも軸ひずみの方が管にとって重要な意味をもつものと考えられる。それゆえ、ここでは図-7の地盤-管系近似モデルを用いて地盤の挙動とそれに伴う管の軸ひずみを解析し、その結果を実験結果と比較する。また、そのモデルを実物大の地盤と管に適用した場合どのようなひずみが計算されるかを例示する。

(1) 地盤の挙動

図-7, aの板状地盤はそのまま、縦(水平)振動をする弾性体モデルとなっている。すなわち、地盤の運動について、次の波動方程式が成り立つ。

$$\frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 $u_s (=u_s(x, t))$ は地盤の変位、 $c = \sqrt{E_s/\rho}$ 。また、 E_s は地盤のヤング係数、 ρ は密度である。

原点 ($x=0$) を板状地盤の中央に取り、式(1)を

$$u_s(l/2, t) = u_s(-l/2, t) = u_{s0} \cos \frac{2\pi t}{T}$$

なる境界条件のもとに解いて、

$$u_s = \frac{u_{s0}}{\cos \frac{\pi l}{cT}} \cdot \cos \frac{2\pi x}{cT} \cdot \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (2)$$

が得られる。すなわち、地盤の変位は、振幅が

$$\hat{u}_s = \frac{\cos \frac{2\pi x}{cT}}{\cos \frac{\pi l}{cT}} u_{s0} \quad (3)$$

で、入力と同じ周期の振動となる。

\hat{u}_s の分布は概念的に図-10, a のように表わされる。それは cT/l の値により異なるモードを示す。また、 \hat{u}_{smax}/u_{s0} 、すなわち応答倍率は同図 b に示すような曲線を描く。

(2) 管に生じる軸ひずみ

式(3)の地盤変位を入力とするときの管のひずみを管軸方向の弾性床の上のはりのモデル(図-7, b)を解くことにより求める。

力のつり合い方程式は次のようになる。

1) $0 \leq x < l/2$ に対して

$$EA \frac{d^2 u_1}{dx^2} - k u_1 = -k u_{s0} \frac{\cos \frac{2\pi x}{cT}}{\cos \frac{\pi l}{cT}} \quad (4)$$

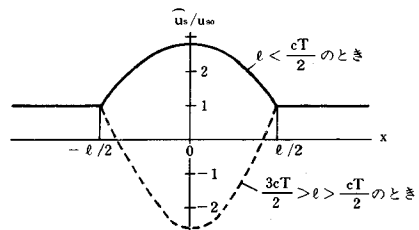
2) $l/2 \leq x \leq L/2$ に対して

$$EA \frac{d^2 u_2}{dx^2} - k u_2 = -k u_{s0} \quad (5)$$

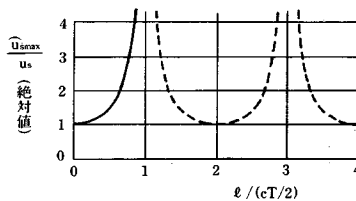
ここに、 u_1, u_2 = 管の変位、 E = 管のヤング係数、 A = 管の断面積、 k = 地盤のばね定数である。

式(4)および(5)を次の4つの境界条件：

$$x=0 \text{ で } \frac{du_1}{dx} = 0 \quad (x=0 \text{ に関する対称の条件})$$



a 応答変位分布の形状(例)



b 最大変位応答倍率

図-10 近似モデル地盤の応答特性(管軸方向)

$x=l/2$ で $u_1=u_2$

および $\frac{du_1}{dx} = \frac{du_2}{dx}$ (連続の条件)

$x=L/2$ で $\frac{du_2}{dx} = 0$ (管の末端の条件)

のもとに解き、次の解が得られる。

$$u_1 = \frac{u_{s0}}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda c T}\right)^2} \left[\frac{\cos \frac{2\pi x}{c T}}{\cos \frac{\pi l}{c T}} - \left(\frac{2\pi}{\lambda c T}\right)^2 \times \left\{ \frac{e^{-\lambda(l-\frac{l}{2})} + e^{-\frac{\lambda l}{2}}}{1 - e^{-\lambda l}} \left(\tanh \frac{\lambda l}{2} - \frac{\lambda c T}{2\pi} \tan \frac{\pi l}{c T} \right) - \frac{1}{\cosh \frac{\lambda l}{2}} \right\} \cosh \lambda x \right] \dots\dots\dots (6)$$

$$u_2 = u_{s0} \left[1 - \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda c T}\right)^2 \cosh \frac{\lambda l}{2}}{\left\{ 1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda c T}\right)^2 \right\} (1 - e^{-\lambda l})} \times \left(\tanh \frac{\lambda l}{2} - \frac{\lambda c T}{2\pi} \tan \frac{\pi l}{c T} \right) (e^{\lambda(x-l)} + e^{-\lambda x}) \right] \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\lambda = \sqrt{k/EA}$ である。

管のひずみは、それぞれの領域に対して次のようになる。

$$\epsilon_1 = -\frac{2\pi}{c T} \frac{u_{s0}}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda c T}\right)^2} \left[\frac{\sin \frac{2\pi x}{c T}}{\cos \frac{\pi l}{c T}} + \frac{2\pi}{\lambda c T} \times \left\{ \frac{e^{-\lambda(l-\frac{l}{2})} + e^{-\frac{\lambda l}{2}}}{1 - e^{-\lambda l}} \left(\tanh \frac{\lambda l}{2} - \frac{\lambda c T}{2\pi} \tan \frac{\pi l}{c T} \right) - \frac{1}{\cosh \frac{\lambda l}{2}} \right\} \sinh \lambda x \right] \dots\dots\dots (8)$$

$$\epsilon_2 = -\frac{2\pi}{c T} \frac{u_{s0}}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda c T}\right)^2} \cdot \frac{2\pi}{\lambda c T} \cdot \frac{\cosh \frac{\lambda l}{2}}{1 - e^{-\lambda l}} \times \left(\tanh \frac{\lambda l}{2} - \frac{\lambda c T}{2\pi} \tan \frac{\pi l}{c T} \right) (e^{\lambda(x-l)} - e^{-\lambda x}) \dots\dots\dots (9)$$

(3) 管のひずみの計算値と実験値の比較

式(8)および(9)に模型実験と同じ加振条件および地盤と管の諸元の数値を与えて最大軸ひずみ分布を計算し、実験での測定値と比較する。

加振条件は

加速度： $\alpha = 230$ gal (図-2, [K-2] での値)

周期： $T = 0.5$ s

であり、この数値を用いて、変位振幅は

$$u_{s0} = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \alpha = 1.46 \text{ cm}$$

と求められる。また、模型の諸数値は次のようになる。

$L = 130$ cm

$l = 70$ cm

$E = 28600$ kgf/cm² (表-1のEIから逆算)

$A = 2.6$ cm²

表層地盤の弾性波速度については、表層地盤の応答加速度(図-2, [K-7]で約630 gal)から応答変位 $u_s = (T/2\pi)^2 \alpha = 4.0$ cmを求め、式(3)の \hat{u}_s が $x=0$ でこれに等しくなるような c の値を逆算して

$$c \approx 370 \text{ cm/s}$$

を得る。これから、 $c = \sqrt{2(1+\nu)} \cdot V_s$ (ν = ポアソン比)の関係により、せん断波速度

$$V_s \approx 210 \text{ cm/s}$$

が得られる ($\nu = 0.5$ と仮定)。

同じく表層地盤の管軸方向ばね定数 k は、半無限弾性体内に埋設された管に平面波が入射するときの鞍飼、山口¹¹⁾の理論解析の結果を用いて、

$$\frac{k}{2\pi G} = f\left(\frac{L'}{a}\right) = 0.3 \sim 0.4 \quad (L'/a \approx 100 \text{ のとき})$$

なる関係から算定する。ここに L' は入射波の波長で、ここでは近似的に液状化区間 l の2倍とみなすことができる。 a は管の半径である。したがって、 $L'/a \approx 60$ である。せん断弾性係数 G は $V_s = \sqrt{G/\rho} = 210$ cm/s から、 $G = 0.05$ kgf/cm² (5 kPa) と定まる。これを用いて、 $k = 0.1 \sim 0.15$ kgf/cm² (10~15 kPa) となるが、ここでは $k = 0.12$ kgf/cm² (12 kPa) を用いる。

計算結果を図-11に示す。結果は全体として実験値とよく一致している。実験では管の端面に加わる地盤反力のために、管端の近くでもやや大きなひずみが生じているが、計算ではこれは無視されている。また、実験では $x=0$ でもやや大きなひずみが生じているが、これは表層地盤の非線形的挙動など(地盤と管の間のすべり等)による応答の非対称性が生じたためと思われる(たとえば図-5, 1Xのひずみ波形の約6秒から20秒の間における上下非対称性)。このような若干の不一致はあるが、ここで用いた、図-7に基づく弾性的近似モデルは十分よく実際に模擬するものであるといえる。

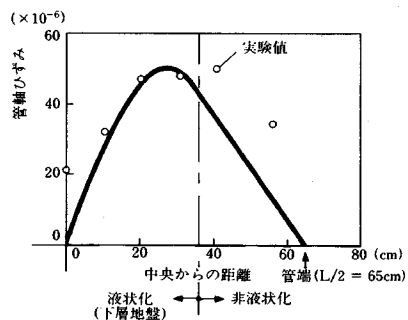
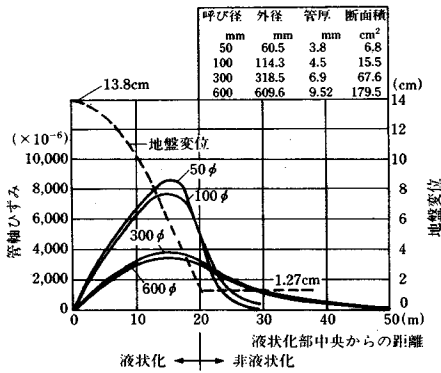


図-11 近似モデルにより計算された管軸ひずみの分布



図一12 近似モデルによる実物大地盤中の管のひずみ計算例 (入力 200 gal, $T=0.5$ s)

(4) 実物大の地盤と管への適用例

ここで用いた近似モデルは、相似則とは無関係に、直接実物大の地盤と管の問題に適用することができる。そこで、実際の地盤と管の諸元を想定してこのモデルを適用し、部分的液状化の条件下で埋設管に生じ得るひずみの大きさを求めてみる。

ここでは、地盤の条件を次のように仮定する。

$l=40$ m (液状化範囲)

$V_s=100$ m/s (表層地盤内)

$\rho=1.5 \times 10^{-3}$ kg/cm³ (同上)

$\nu=0.4$ (同上)

これから、 $G \approx 150$ kgf/cm² (15 MPa), $c \approx 170$ m/s が得られる。また、管軸方向地盤ばね定数は

$$\frac{k}{2\pi G} = 0.13$$

として、 $k=280$ kgf/cm² (27.4 MPa) と定める。

入力地震波は正弦波状とし、 $a=200$ gal, $T=0.5$ s とする。

以上の条件の下での表層地盤の応答変位と4種類の口径のガス配管用鋼管に生じる管軸方向ひずみ分布を式(3)、(8)および(9)により計算し図一12に示す。この例では表層地盤の変位は入力約11倍と、大きく増幅されており、ほとんど共振に近い状態と考えられる。管の最大ひずみ振幅はすべての口径について降伏ひずみ(約 1500×10^{-6})を上回っており、50 mmの管ではほとんど1%に近い値となる。この程度のひずみでもなお数十回の繰返しまで鋼管は疲労破断せずに済むと考えられるが、管路の曲がり部が存在する場合には局部的にさらにひずみが集中するので、破断の確率は十分高いものになると考えられる。また、口径が大きくなると、その危険性は著しく低下すると考えられる。実際にも小口径管の22½度程度の曲がり部に被害が生じやすい傾向があり(日本海中部地震の例²⁾)、このような被害の

可能性を、上に示した計算結果は十分裏付けるものとなっている。

7. 結 言

模型実験によって、地盤が部分的に液状化する際の液状化の経過と地盤および管の挙動との関係を明瞭に把握することができた。

液状化した部分の上に乗る形となった非液状化表層を両端からの入力により水平に加振される板状弾性体とみなす、単純化した力学モデルと、表層中に埋設された管に適用した弾性床の上のりのモデルとによって、実験で観測した管のひずみの分布をきわめて正確に再現することができた。これらのモデルを実物大の地盤と管に適用して、小口径の管が十分破断に至るほどの大きなひずみが生じ得ることを示した。このことは、液状化を生じた地域における実際の埋設管の被害が「部分的な液状化」の条件によってきわめてよく説明できることを意味する。ここで、「部分的」とは、液状化の範囲が広がって、最終的には非常に広い範囲が液状化に至る場合の、経時的な状態をも包含する。したがって、液状化する地盤であれば至るところでこのような状態が出現する可能性がある。

以上のように、この実験は地盤の液状化に伴う埋設管のひずみの発生機構の1つ(しかし、最も重要なものと考えられる)を表現したものであり、考察に用いた力学モデルは、その定量的評価のために、十分効果的に用いることができると考えられる。

なお、今回の実験は定性的なひずみ発生機構の把握に主眼を置いたため実物との対応は考慮せず、その結果巨大なトンネルに相当するような管の模型を用いることとなったが、この点に配慮して適切な模型を作ることにより、提案した近似力学モデルの適合性をより高い精度で実証できるものと思われる。

謝 辞: 実験のための模型の製作とデータの計測、整理、解析作業の大部分について、基礎地盤コンサルタンツ(株)技術部 梅内勝彦氏ほかの皆様のご協力をいただいた。実験の成功は氏らの技術に負うところ大であり、ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本瓦斯協会: 新潟地震と都市ガス, 1975.
- 2) 日本ガス協会: 日本海中部地震と都市ガス, 1984.
- 3) 土木学会: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, pp. 684~685, 1986.
- 4) Hamada, M., Kubo, K. and Saito, K.: Large Ground Displacement and Buried Pipe Failure by Soil Liquefaction During 1983 Nihonkai-chubu Earthquake, Proc.

- ASME PVP Conference, PVP-Vol. 98-4, pp. 11~18, 1985.
- 5) 磯山龍二・増井由春・片山恒雄：宮城県沖地震による埋設管の被害，第15回地震工学研究発表会講演概要，pp. 101~104, 1979.
 - 6) 塚本克良・西尾宣明・羽村 淳：埋設管の地震時応力に関する研究(第5報)，東京ガス技術研究所報告，第29号，pp. 69~91, 1984.
 - 7) Nishio, N., Ukaji, T., Tsukamoto, K. and Ishita, O. : Model Experiments on the Behavior of Buried Pipeline During Earthquakes, Proc. ASME National Congress on PVPT, PVP-Vol. 77, pp. 263~272, 1983.
 - 8) 片田敏行・伯野元彦：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，土木学会論文報告集，第306号，pp. 1~10, 1981.
 - 9) 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.
 - 10) Nishio, N. and Satake, M. : Characteristics of Deformation in a Buried Pipeline Under Sinusoidal Ground Motion, Natural Disaster Science, Vol. 5, No. 1, pp. 53~68, 1983.
 - 11) 鶴銅恵三・山口柏樹：埋設管の動的地盤ばね定数に関する理論的考察，土質工学論文報告集，Vol. 19, No. 4, pp. 93~102, 1979.

(1986. 7. 21・受付)