

埋設管路の液状化対策工法に関する実験的考察

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTIVENESS OF STABILIZING TECHNIQUES OF UNDERGROUND PIPELINES AGAINST LIQUEFACTION

関口宏二*・大石 博**

By Koji SEKIGUCHI and Hiroshi OISHI

If the ground along an underground pipeline route consists of cohesionless soils likely to liquefy under the influence of seismic shocks, a pipeline buried in such soils may float to the surface of the ground water. In order to investigate the effectiveness of four types of stabilizing techniques of underground pipelines against liquefaction, we performed big size shaking table test. This paper gives a detailed explanation for the observed data and describes the effectiveness of stabilizing techniques.

Keywords: pipeline, liquefaction, stabilizing, shaking table

1. ま え が き

軟らかい砂質地盤中に埋設管路を建設する場合には、地震時の地盤の液状化に対する検討が必要である。この場合、次の2つの技術的課題が挙げられる。まず第一には、液状化の予測である。埋設管路は一般に路線の延長が長いので、どの範囲がどの程度液状化するかを予測する必要がある。この問題に関しては過去数多くの研究が行われており、道路橋示方書¹⁾の方法を代表とする実務的手法^{2),3)}や有効応力解析手法に代表される研究的手法^{4),5)}が提案されている。第二には、液状化が埋設管路に被害を与えないように、あるいは被害が軽微であるように、安全かつ経済的な液状化対策を行うことである⁶⁾⁻⁸⁾。埋設管路の液状化対策工法は、①地盤の液状化強度を増加し、液状化そのものを防止する工法、②地盤の液状化は許すが、管体の浮上を防止する工法、の二手法に大別される。①の対策工法は一般の土木構造物の液状化対策工法として通常行われているものであり⁷⁾、対策効果ははっきりしている反面、埋設管路のように施工

延長が長い場合には経済性が問題となることもある。②の対策工法は、液状化が発生すると地盤は流体と同様の挙動を示し、埋設管路には浮力が働く(文献9), 10)などの被害例参照)ので、この浮力に対して措置をとろうとするものである。もちろん液状化時には埋設管路には浮力のほかにも種々の外力(不完全液状化時の地盤振動、液状化に伴う地盤沈下など)が作用するが、これらに対しては管体自身の強度で抵抗しようというのが本工法の基本的発想である。したがって、本工法が適用できるのは管体自身の強度がある程度より大きいものに限られることになる。管体の浮上を防止する手段としては、次のような工法が考えられる。

① 埋設管路をアースアンカー(あるいは液状化しない層まで根入れした杭)にて固定する(Fig.1(a)参照)。

② コンクリートコーティングなどにより、浮力とつり合うように管体を重量化する⁸⁾(Fig.1(b)参照)。

③ おもりを適切な場所に設置する(Fig.1(c)参照)。

これらの工法は、これまで使用実績が少なく、また実際に液状化に遭遇した事例も報告されていない。そこで、これらの対策工法の有効性を検討し、設計上の問題点を把握することを目的として、長さ3m、幅1m、高さ50cmの土槽に径6cmのアルミ管を埋設し、振動実験を行った。本論文は、この実験結果に基づき、埋設管路の

* 正会員 工修 日本鋼管(株)鉄鋼研究所構造研究部
(〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

** 正会員 工博 日本鋼管(株)エンジニアリング事業部
(〒230 横浜市鶴見区末広町2-1)

液状化対策工法の有効性と問題点について考察したものである。なお、埋設管路の液状化時挙動に関しては、伯野・片田^(13,14)および北浦・宮島^(8,15)により先駆的な実験的研究が実施されている。実用的な液状化対策工法の開発を目的としている本研究は、いわばその延長線上にあるものといえよう。

2. 埋設管路の液状化対策実験

(1) 実験方法

鋼製の土槽(長さ3m, 幅1m, 高さ50cm)に水で飽和した砂地盤を作成し, 模型管(アルミ製, 径60mm, 長さ2800mm, 厚さ2mm)を深さ15cm(管の中心までの深さ)に埋設する。土槽を振動台上(3m×3m)にて加振し液状化を発生させる。実験に用いた砂は, 平均粒径 D_{50} が0.6mm, 均等係数が3.0の比較的均一な砂である。模型砂地盤は, 土槽に水をはり乾燥した砂を落下させる方法で作成した。平均湿潤単位重量は1.86 gf/cm³ (18.2 kN/m³), 相対密度は73%であった。

計器配置図を Fig. 2 に示す。加速度計 ACC1, ACC2 は土槽に, ACC3 は模型管に設置されている。間隙水圧計 PWP1, PWP2 は, 深さ30cmのところに埋設されている。ただし, 実験 No.5 では PWP1 は矢板の内側に埋設した。ひずみゲージ G1~G8 は, 管軸方向のひずみを測定している。なお, 加振前後の模型管の上下方向の位置を計測するために, 目盛つきマーカーを模型管の3か所に取り付けている。

(2) 実験条件

実験条件一覧を Fig. 3 に示す。実験 No.1 は無対策の場合であり, 対策工法を施した場合と比較することを目的としている。実験 No.2~No.4 は, 浮上を防止する工法 (Fig. 1) に対応している。実験 No.5 は, Fig. 4 に示す工法に対応するものである。この工法では, 矢板で液状化区域と非液状化区域を分離することにより, 埋設管路の液状化時の安定化をはかっており, 地盤改良す

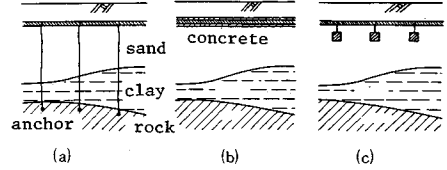


Fig.1 Stabilizing Techniques of Underground Pipelines against Liquefaction.

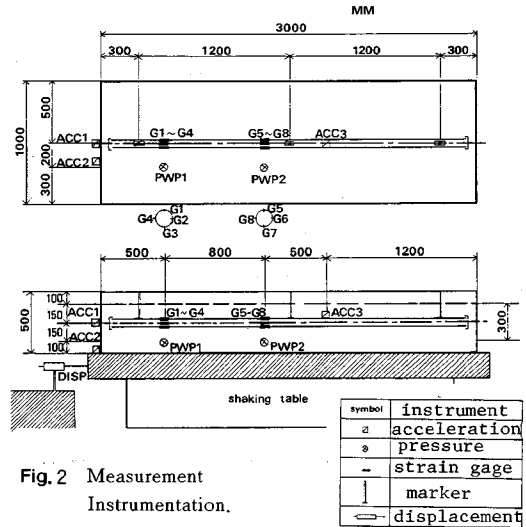


Fig. 2 Measurement Instrumentation.

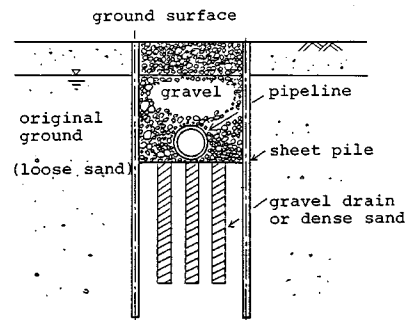


Fig. 4 An Example of Burying Method of Pipeline against Liquefaction.

No.	side view of model pipe & ground	stabilizing method	
1		without stabilizing method	—
2		unit weight of pipe is equal to 2.0 gf/cm ³	Fig.1 (b)
3		pipe & bottom of shaking box is tied with wire	Fig.1 (a)
4		unit weight of pipe & weight system is equal to 2.0 gf/cm ³	Fig.1 (c)
5		separate gravel & sand by sheet pile	Fig.4

Fig. 3 Test Conditions.

る幅が小さくてよいという利点がある。

振動台は全ケースとも 2.0 Hz で管軸方向にのみ加振し、変位振幅の大きさは、手動操作により次のように制御した。まず振幅を徐々に増加させ一定振幅でしばらく加振した。その後、現象がほぼ定常状態に入ってから振動台を停止した。

(3) 液状化過程の分類と模型管の挙動

実験の記録波形を Fig. 7~Fig. 10 に、振動停止後の地盤沈下・模型管の変位を Fig. 11 に示す。液状化の過程はいずれの実験においても強い非定常性を示し、模型地盤、模型管などは複雑な挙動を示している。しかし、一見複雑に見える挙動も地盤内の応力状態、特に応力経路により分類すると理解しやすくなる。

地盤内の過剰間隙水圧の挙動に着目して、液状化の過程を次のように分類する。なお、“不完全液状化”、“完全液状化”、“Cyclic Mobility¹¹⁾”などはすでに広く用いられているものであるが、その他の用語は便宜的につけたものである。なお、以下の説明では、Fig. 5 を参考にされたい。

A：安定期…振動開始より過剰間隙水圧が上昇を始めるまでの期間。地盤には顕著な変化はみられず、模型管と地盤は一体となって運動している。模型管に発生するひずみはきわめて小さい。

B：不完全液状化期…過剰間隙水圧が上昇を始めてから、最大間隙水圧（初期の有効上載圧に等しい）に至るまでの期間。地盤の地表では大きな変位応答が認められ、地表面への水の浸出が始まる。過剰間隙水圧の上昇に伴い、模型管の加速度は土槽の加速度よりも大きくなる。模型管に発生する動的ひずみは、全液状化過程の中で最大となる。

C：完全液状化期または Cyclic Mobility 期^{11),12)}…“不完全液状化期”から“間隙水圧消散期”までの期間。ただし、両者と明確に区別できない場合も多い。地盤の有効応力経路の違いによりさらに細かい分類が必要と思われる。実験データの中の代表的な例を模式的に示したのが Fig. 6 である。同図中の過剰間隙水圧、土槽加速度、管体加速度は、実測結果に基づき、有効応力経路、応力～ひずみ関係は、本実験の過剰間隙水圧の挙動および要素試験のデータ¹²⁾を参考に推定して描いたものである。

C-a：完全液状化…いわゆる“液状化”とよばれている状態。地盤の有効応力はゼロとなり、流体と同様の挙動を示す。せん断応力が模型管に伝わらないため管体加速度は非常に小さくなり¹³⁾、管体ひずみも小さい。ただし、管体には浮力が作用する。

C-b：弱い Cyclic Mobility…“Cyclic Mobility”の状態において土に加わるせん断応力が比較的小さい場合をこうよぶ。模型管は土槽よりも 90° 位相が遅れ、パルス的な大加速度をもつような動きをする。これは、地盤が流体のような状態と、若干有効応力を回復したような状態を繰り返すため、後者の状態のときのみ地盤が模型管に力を及ぼすためと考えられる。模型管のひずみは、“不完全液状化時”より小さい。

C-c：強い Cyclic Mobility…“Cyclic Mobility”の状態において土に加わるせん断応力が大きい場合をこうよぶ。

C-d：不完全な Cyclic Mobility…地盤内の有効応力経路が有効応力ゼロと初期有効上載圧の内側で、変相線に沿うような状態をこうよぶ。模型管と、土槽の加速度は同位相であり、模型管は、周囲の砂と一体となって運

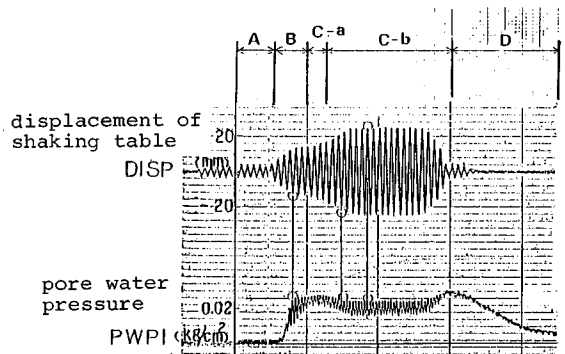


Fig. 5 Non-stationary Process of Liquefaction (Data from Case-2).

	complete liquefaction	Cyclic Mobility		
		weak C. M.	strong C. M.	incomplete C. M.
pore water pressure				
acceleration of shaking box				
acceleration of model pipe				
effective stress path τ: shear stress σ _m : mean stress i: initial stress				
stress & strain relation γ: shear strain	(fluid)			

Fig. 6 Classification of Complete Liquefaction and Cyclic Mobility.

動しているものと考えられる。模型管に発生するひずみは比較的小さい。

D：間隙水圧消散期…地盤内に蓄積された過剰間隙水圧が消散を始めてから、ゼロに安定するまでの期間。地盤の沈下とそれに伴う模型管の静的なひずみが認められる。

(4) 各実験に対する観察

a) 実験 No.1 (Fig.7) 0~16秒は“安定期”であり何ら変化はみられない。16~20秒は“不完全液状化期”であり、地表では大きな動の変位が発生する。20~60秒にかけて、“弱い Cyclic Mobility” から“不完全な Cyclic Mobility”へと遷移している。この間、地表面では液状化した砂が波打つような運動をしている。模型管は23秒に浮上を開始し、37秒に60°回転して完全に地表面上に浮上した。このとき、地表付近は“完全液状化”の状態と考えられ、地盤よりせん断応力が伝達されないために、模型管の加速度は非常に小さくなっている。その後、徐々に加速度が大きくなっているのは、砂の再堆積により有効応力が徐々に増大し、地盤にせん断応力が伝達されるようになったためと考えられる。60秒以後は“間隙水圧消散期”である。

b) 実験 No.2 (Fig.8) 0~7秒は“安定期”である。7~10秒は“不完全液状化期”であり、地表では大きな動の変位が発生する。この間、模型管にはきわめて大きな動的ひずみが発生しているのが特徴的である。10秒前後に、ごく短時間“完全液状化期”となり、模型管の加速度、ひずみは比較的小さくなる。11~20秒は、“弱い Cyclic Mobility”の状態である。この間、模型管は浮上せず、土中にとどまっている (Fig.11 参照)。模型管の加速度は土槽の加速度よりも90°位相が遅れ、パルス状の大加速度を繰り返している。また上下・左右方向の曲げひずみが継続している。20秒以後は、“間隙水圧消散期”である。間隙水圧の消散に伴い、模型管には比較的大きな残留ひずみ (上下方向曲げ, G5, G7 参照) が発生しているのが注目される。

c) 実験 No.3 (Fig.9) 実験 No.2 とほぼ同様の挙動を示している。模型管は、浮上も沈下もせず元の位置にとどまった。この実験では、模型管と土槽の底を針金で結んでいるが、そのことにより特に模型管に大きなひずみが発生するという事はなかった。

d) 実験 No.4 実験 No.2 とほぼ同様の挙動を示している。模型管は、元の位置から1mm 浮上しただけであり、ほぼ元の位置にとどまっている。

e) 実験 No.5 (Fig.10) この実験では、矢板の外側は飽和砂地盤であり、矢板の内側は碎石 (碎石6号, 粒径5~13mm) による地盤である。矢板の外側と内側では全く異なる現象を示した。矢板外側では液状化が発

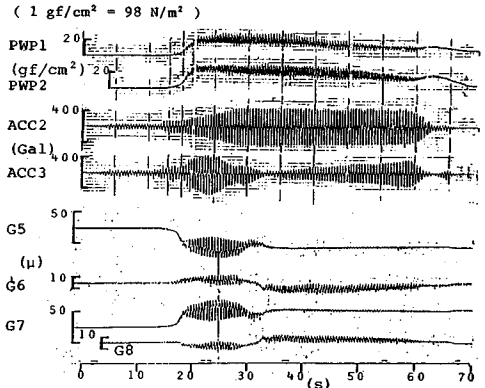


Fig. 7 Measured Data (Case-1).

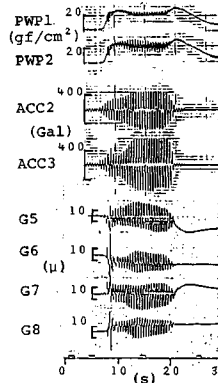


Fig. 8 Measured Data (Case-2).

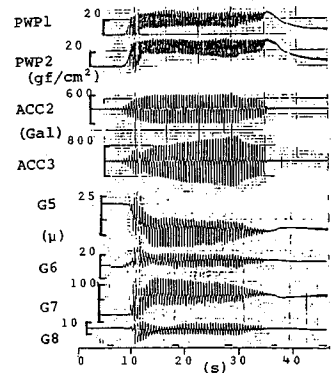


Fig. 9 Measured Data (Case-3).

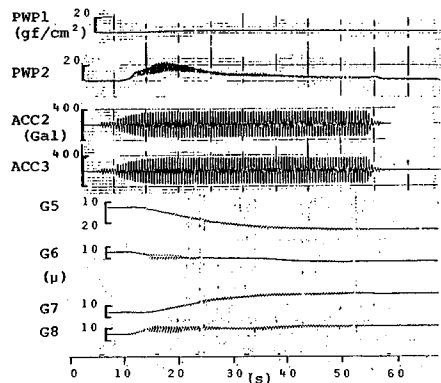


Fig. 10 Measured Data (Case-5).

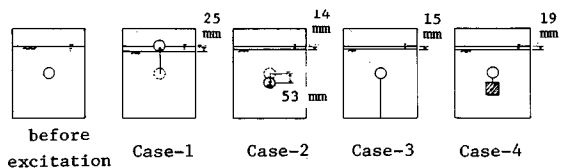


Fig. 11 Ground Settlement and Displacement of Model Pipe after Excitation.

生し (PWP 2 参照), 地表に置いたモニター構造物の沈下や深さ 15 cm に埋設したモニター管の浮上が起こった。間隙水圧 (PWP 2) は, 加振中に消散が完了しているが, これは, 矢板内側 (碎石側) の方へ透水が起こったためであろう。一方, 矢板内側では, 間隙水圧はわずかに上昇しただけで, モニター構造物の沈下・転倒などは起こらなかった。模型管, 碎石地盤および土槽は一体となって運動していると考えられる。模型管の動的ひずみに比べて, 碎石地盤の沈下による静的ひずみ (上下方向曲げ, G5, G7 参照) は大きい。

(5) 液状化対策工法の有効性に関する考察

ここでは, 以上の実験結果に基づいて, 埋設管路の液状化対策工法の有効性に関して検討を行う。

a) No.2~No.4 の液状化対策工法 (Fig.1) 地盤の液状化は許すが, 管体の浮上を防止する工法に関する考察を以下にまとめる。

① 加振終了後の地盤沈下, 模型管の変位を一括して, Fig.11 に示す。同図より無対策の場合に比べれば, いずれの対策工法も浮上防止効果は良好といえよう。特に, 実験 No.3 の方法では, 模型管は全く元の位置にとどまっていた。なお, 各実験ケースで加振時間が異なるが, 模型管の沈下・浮上を含めて現象がほぼ定常状態になってから振動台を止めており, この実験では加振時間が模型管の液状化後の変位に及ぼす影響は, ほとんどなかったと推測される。

② 対策工法では, 模型管を重量化したり, 模型管と土槽を針金で結んだり, またおもりを設置したりしたが, これらが模型管に及ぼす影響は特に認められなかった。

③ 不完全液状化時には, 模型管に全液状化過程の中で最大の動的ひずみが発生した。この現象は文献 (14), (15) などでも報告されており, 液状化時の地中埋設管路の耐震性を検討するうえで, 欠くことのできない一項目であると考えられる。この問題に関しては, 3. で取り上げることとする。

④ 液状化に伴い地盤沈下が発生しており, 模型管には静的な上下方向の曲げひずみが発生した。液状化に伴い地盤沈下が発生するのは, 一般的に認識されていることであり, この問題も液状化時の地中埋設管路の耐震性を検討するうえで考慮する必要があると考えられるので, 3. で取り上げることとする。

⑤ “弱い Cyclic Mobility” において模型管にはパルス的な大加速度が発生する。しかし, 通常のゆるい砂地盤の実際の地震時における液状化過程では, “安定期” → “不完全液状化期” → “完全液状化期” → “間隙水圧消散期” と推移すると考えられるので, “弱い Cyclic Mobility” が問題になることはないと考えられる。本実験で “弱い Cyclic Mobility” の発生した理由は, 実験

の相似率¹⁵⁾から考えると過大な透水係数を用いていることに相当するからであろう。すなわち, 砂の透水性がよすぎるために, 加振中においても水が地表へと浸出し, 結果として砂の構造が密になったために Cyclic Mobility が発生したと推定される。仮に “弱い Cyclic Mobility” が実際の地震時に発生したとしても, 埋設管路に発生するひずみは, “不完全液状化時” の方が大きいと考えられるので, “不完全液状化時” に対して検討しておけば十分であろう。

b) No.5 の液状化対策工法 (Fig.4) この対策工法は, 実験結果よりきわめて効果的な液状化対策工法といえよう。ただし実際への適用にあたっては, 矢板の外側が液状化した場合でも, 矢板や内側の碎石地盤が安定を保つように配慮することが必要であろう。また, 碎石で埋設管路を埋め戻すときに, 埋設管表面を損傷しないように注意することも必要である。

3. 不完全液状化時の地盤振動および液状化に伴う地盤沈下が埋設管路に及ぼす影響の評価手法

(1) 不完全液状化時の地盤振動の影響の評価手法

不完全液状化時に, 模型管に大きなひずみが発生する原因としては, 地盤内で不均一に過剰間隙水圧が上昇するために, 地盤の動的性質 (せん断剛性など) も不均一となり地盤が不規則な振動をするためではないかと考えられる。応答変位法的な考え方をういて埋設管路に発生するひずみを推定しようとする場合には, 不完全液状化時の地盤変位の空間的分布が必要となる。この問題は今後の研究を必要とする問題であるが, 文献 (16) で採用されているような単純なモデル (地盤の亀裂を表わすモデル) を用いるのも現実的な 1 つの方法であると思われる。ただし, 設計に用いるべき亀裂の幅に関しては, 慎重な検討が必要であろう。

(2) 液状化に伴う地盤沈下の影響の評価手法

液状化時に生ずる地盤沈下量の定量的評価手法については現在各方面で研究が進められつつある^{17), 18)}。一方, 埋設管路に影響を与える地盤沈下形態としては, Fig.12

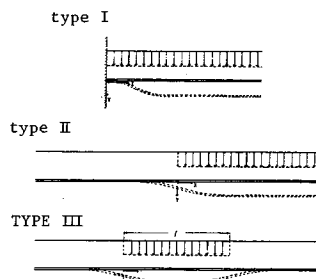


Fig.12 Model of Ground Settlement¹⁹⁾.

のようなものが考えられ、このような地盤沈下が起こった場合に埋設管路に発生する静的な最大ひずみの解析解も誘導されている^{16), 19)}。これらの研究を組み合わせることにより、地盤沈下が埋設管路に及ぼす影響を定量評価することが可能であると考える。

なお、上記(1)では、埋設管路の単位表面積当たりの地盤拘束力が、また上記(2)では管軸直角方向の地盤反力係数が必要となるが、これらの値をいかに設定するかは、今後の研究を必要とする課題であろう。

4. 結 論

埋設管路の液状化対策工法は、①地盤の液状化強度を増加し、液状化そのものを防止する工法、②地盤の液状化は許すが、管体の浮上は防止する工法、の二手法に大別される。②の考え方に基づく対策工法としては、①埋設管路をアースアンカー（または液状化しない層まで根入れした杭）にて固定する工法、②コンクリートコーティングなどにより、浮力とつり合うように管体を重量化する工法、③おもりを適切な場所に設置する方法、などが考えられる。これらの対策工法の有効性を検討し、設計上の問題点を把握することを主目的として、大型模型振動実験を実施した。その結果、次のような結論が得られた。

(1) 液状化はきわめて非定常な現象である。地盤内の過剰間隙水圧の挙動により、液状化の過程は、①安定期、②不完全液状化期、③完全液状化期（砂の構造がゆるい場合）または Cyclic Mobility（砂の構造が密な場合）、④間隙水圧消散期、というように分類できる。これらの液状化の過程における模型管の挙動は周辺地盤の応力状態を反映したものとなる。不完全液状化時には模型管には全液状化過程の中で最大の動的ひずみが発生する。完全液状化時には地盤にはせん断応力が伝達されないため、模型管に発生する加速度は非常に小さくなるが、浮力は作用する。また、間隙水圧消散時には、地盤沈下に伴って模型管には上下方向の静的な曲げひずみが発生する。弱い Cyclic Mobility においては、模型管にはパルス的な大加速度が発生するが、動的ひずみの大きさは、不完全液状化時より小さい。

(2) 実験により検討を行った三種の対策工法は、いずれの場合も浮上防止効果は良好といえる。特に、アースアンカーによる工法では、模型管は全く元の位置にとどまっていた。

(3) 以上の結論より、不完全液状化時の地盤の振動および間隙水圧消散時の地盤沈下に対して埋設管路が耐震性を有することが保証されれば、ここで取り上げた三種の液状化対策工法は実際への適用が可能である。不完全液状化時の地盤振動に関しては、応答変位法的な考え

方を援用すればよいと考える。また、地盤沈下に関しては、液状化時の地盤沈下量を定量評価しようという趨勢にあり、既存の基準等の式と組み合わせる埋設管路のひずみを評価することが可能であろう。

(4) 液状化そのものを防止する工法の一例として、矢板と砕石による埋め戻しを併用する工法の有効性も実験的に検討した。この工法は液状化に伴う地盤沈下に対して埋設管路が耐震性を有することが保証されれば、きわめて効果的な対策工法であることがわかった。

なお、本論文では液状化対策工法の定性的な有効性を検討することに主眼を置いたが、実際の設計にあたってはより定量的な検討が必要である。これに関しては、文献20)を参考にされたい。最後に実験計画の作成と実験結果の解釈にあたり有益なご助言をいただいた京都大学防災研究所 亀田弘行教授ならびに岐阜大学工学部 岡二三生助教授に記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1980.5.
- 2) 安田 進・土田 肇・谷口栄一：地盤の液状化 5. 液状化の予測（その1），土と基礎，Vol.29, No.17, pp.69~76, 1981.12.
- 3) 安田 進・土田 肇・谷口栄一：地盤の液状化 5. 液状化の予測（その2），土と基礎，Vol.30, No.2, pp.73~81, 1982.2.
- 4) 石原研而：地盤の液状化 4. 液状化を考慮した地盤の応答解析法，土と基礎，Vol.29, No.11, pp.45~91, 1981.11.
- 5) Oka, F., Sekiguchi, K. and Goto, H. : A Method of Analysis of Earthquake-induced Liquefaction of Horizontally Layered Sand Deposits, Soils and Foundations, Vol.21, No.3, pp.1~17, 1981.
- 6) 藤波富次・小山俊博：地中送電設備の液状化対策について，電力土木，No.164, pp.69~81, 1980.1.
- 7) 末松直幹・吉見吉昭・佐々木康：地盤の液状化 7. 液状化被害を軽減するための対策，土と基礎，Vol.30, No.4, pp.71~79, 1982.4.
- 8) 北浦 勝・宮島昌克：構造物近傍における地中埋設管の液状化被害軽減に関する実験，第6回日本地震工学シンポジウム，pp.1937~1944, 1982.12.
- 9) 土木学会：王子製紙（株）専用工業用水道の被害，1968年十勝沖地震調査報告，pp.565~569, 1969.3.
- 10) 佐々木康・吉見吉昭・土田 肇：地盤の液状化，土と基礎，Vol.29, No.9, pp.60~61, 1981.8.
- 11) 龍岡文夫：サイクリック・モビリティ（Cyclic Mobility），土と基礎，Vol.28, No.6, pp.105~106, 1980.6.
- 12) 国生剛治・岩橋敏広・当麻純一：密な飽和砂層の強震時応答特性についての振動台実験，第6回日本地震工学シンポジウム，pp.449~456, 1982.12.
- 13) 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，p.651, 1978.
- 14) 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. 2.
- 15) 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.
- 16) 日本ガス協会: 一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針, pp. 863~879, 1982. 3.
- 17) 永瀬英生・石原研而・田部元太: 多方向の不規則荷重を受ける砂の沈下特性, 第 21 回土質工学研究発表会, pp. 615~618, 1986. 6.
- 18) 西 好一・金谷 守・久保田博: 砂地盤の地震時沈下量の簡易推定法, 第 21 回土質工学研究発表会, pp. 623~624, 1986. 6.
- 19) 大石 博: 地盤沈下を受ける埋設管路の挙動に関する二, 三の考察, 土木学会論文集, 第 356 号/I-3, pp. 379~386, 1985. 4.
- 20) 関口宏二・大石 博: 海底パイプラインの液状化対策工法に関する一考察, 土木学会論文集, 第 380 号/I-7, pp. 378~384, 1987. 4.

(1986.10.8・受付)
