

不完全液状化時における地中埋設管模型の動的挙動

DYNAMIC BEHAVIOR OF BURIED MODEL PIPE DURING INCOMPLETE LIQUEFACTION

* * *

北浦 勝 官島昌克 吉岡正修

by Masaru KITAURA, Masakatsu MIYAJIMA and Masanobu YOSHIOKA

This paper deals with vibrating tests using a rubber pipe model in liquefaction process. Dynamic behavior of buried pipe during incomplete liquefaction is discussed. Experiments were performed using the pipe whose two ends were free. The pipe was buried in loose, saturated sand stratum. The model sand stratum was vibrated by a transient harmonic wave with a frequency of 5 Hz because the state of incomplete liquefaction lasted for a long time by such a input wave. The experimental results showed that the dynamic strain took the maximum value as the ratio of excess pore water pressure was between 0.5 and 0.75. It is explained in terms of resonance of the system consisting of the model ground and pipe. Furthermore the effects of the buoyancy on the buried pipe and the structure during incomplete liquefaction are investigated.

1. 緒言

1983年日本海中部地震(M 7.7)においては、大規模な液状化現象が広範囲に発生し、地中埋設管に多大な被害が生じた。1964年新潟地震(M 7.5)以来、液状化現象に関する調査・研究が活発に行われ、その発生メカニズムをはじめとするかなりの部分が解明されてきたにもかかわらず¹⁾、液状化地盤における地中埋設管の被害は再び繰り返された。近年、ライフライン系の耐震性向上の重要性が叫ばれるようになり、液状化時の地中埋設管の挙動についても研究が進められるようになってきた²⁾³⁾。著者らも、丸棒ゴムを地中埋設管模型とし、砂箱を用いた液状化実験を行っている⁴⁾⁵⁾。今回の地震による被害と、著者らが既に行った実験の成果をまとめると、液状化時の地中埋設管の破壊に関与している要因として以下のことが考えられる。

- (1) 不完全液状化時に一時的に生ずる地盤の大きな挙動
- (2) 完全液状化時に地中埋設管に作用する浮力、浸透流による力
- (3) 地盤液状化に伴って生ずる地盤の大変形、あるいは、地盤特性急変部における地盤の挙動

一方、液状化による被害を軽減するための対策についても活発に研究されており、その成果が収められつつある⁶⁾。たとえば、谷口・佐々木らは、線状構造物の液状化被害の軽減を念頭におき、砕石ドレーンによる液状化対策の効果を模型実験により明らかにするとともに、数値計算も実施している⁷⁾⁸⁾。田中・国生ら

* 工博 金沢大学助教授 工学部建設工学科 (☎ 920 金沢市小立野2丁目40-20)

** 工修 金沢大学助手 工学部建設工学科 (☎ 920 金沢市小立野2丁目40-20)

*** 日本橋梁株式会社 (☎ 552 大阪市港区福崎2丁目1-30)

は液状化現象をせん断波によって過剰間隙水圧が上昇する1次液状化と、上向き浸透流によって過剰間隙水圧が上昇する2次液状化とに分類し、それぞれの場合におけるグラベルパイルの効果を数値計算と模型実験を通して明らかにし、その設計法を提案している⁹⁾¹⁰⁾。このように、グラベルパイルを用いる方法に注目が集まっているが、その設計に際しては、過剰間隙水圧の目標値をどこに設定するかということが問題となってくる。つまり、ある地震力に対して過剰間隙水圧の最大値がどれだけ以内であれば構造物が安全であるかということが問題となる。地中埋設管について考えると、上述したように、過剰間隙水圧の上昇を防ぐことによって完全液状化時に作用する浮力、浸透流による力の埋設管に与える影響を軽減することができる。しかしながら不完全液状化時には、地盤の剛性が初期の値よりも低下するので、その間に地盤が入力地震動と一時的に共振することが考えられる。この共振現象は埋設管の継手部のゆるみ、すなわち破壊に関わり合っているものと予想される。したがって、一時的な共振現象が地中埋設管に及ぼす影響を明らかにすることが重要となってくる。

このような観点から本研究では、丸棒ゴムを用いた模型振動実験を実施し、不完全液状化時における地中埋設管の挙動を過剰間隙水圧との関係において明らかにしようとした。

2. 実験概要

本研究においては基礎的で定性的な実験に重点をおき、不完全液状化時の地中埋設管のひずみ特性、特に過剰間隙水圧の蓄積による影響に注目し、しかも現象をなるべく簡明確に把握するために、以下のように供試模型を定めた。実験装置の概略をFig. 1に示す。地中埋設管模型としてサンウレタン丸棒ゴム（十川ゴム製）を用いた。丸棒ゴムはその寸法が $20\phi \times 1000\text{mm}$ 、弾性係数 810 kgf/cm^2 (79MPa)、単位体積重量 1.14gf/cm^3 (11.2 kN/m^3) である。丸棒ゴムの上部にひずみゲージ（東京測器製、PL-5-11）を管軸方向に接着して防水加工を施し、管のひずみを計測した（Fig. 2）。また、水圧計（豊田工機製、最大 0.5kgf/cm^2 (49kPa)、PMS-5M）を埋設管模型と同じ深さに埋め、過剰間隙水圧を測定した。模型砂層は、振動台（島津製作所製、EHV-3）上に設置された鋼製の砂箱（幅 $500 \times$ 長さ $1500 \times$ 高さ 350mm ）に、比較的細砂で均一な手取川の川砂を厚さ 250mm まで入れて作成されている。実験にはゆる詰の飽和砂地盤を用いたが、その作成方法については文献5）にゆずる。Table 1 に砂の土質定数を示す。

このような模型実験では相似律が重要であるが、本研究では特定の原型を想定せず、あくまで基礎的で定性的な実験に重点を置いたので、相似律については特に考慮していない。なお、いくつかのパラメータについては文献4）で検討を加えている。

本実験では、不完全液状化時における地中埋設管の挙動に特に注目しているので、不完全液状化状態を長く継

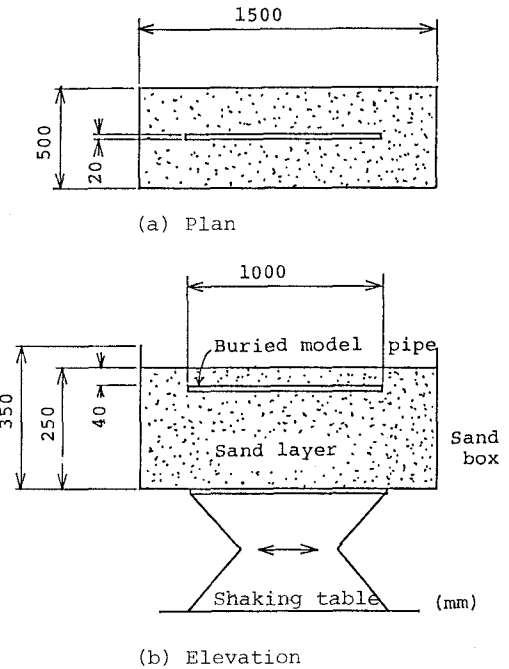


Fig. 1 General view of experimental apparatus.

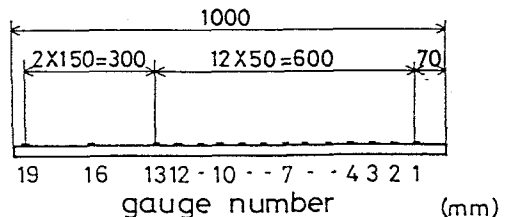


Fig. 2 Model of pipe.

続させることが望ましい。そのためには、完全液状化に至る実験よりも地盤の液状化抵抗を大きくするか、入力地震動を小さくするかが考えられるが、ここでは後者の方法を採用した。すなわち、本実験では本模型砂層での液状化が最も発生しやすい5 Hzの正弦波を用いたが、その振幅を時間とともに直線的に増加させ、ある一定時間後に定常となるような過渡的調和波を考え、この振幅の漸増時間を入力のパラメータとして実験を行った。

3. 実験結果および考察

実験結果の一例をFig. 3に示す。それぞれ、加速度の漸増時間を50秒とした時の管の埋設深さにおける過剰間隙水圧、入力加速度、地表面での応答加速度、ひずみゲージ1, 4, 7, 10における管ひずみの記録である。まず過剰間隙水圧の変化に注目すると、加振開始後約25秒から過剰間隙水圧が上昇し始め、その後約10秒間一定値を保った後減少している。過剰間隙水圧の最大値は約 $2\text{gf}/\text{cm}^2$ (196Pa) である。過剰間隙水圧をその深さにおける初期有効応力で除して得られる過剰間隙水圧比で表すと約0.6となるので、図は不完全液状化状態が約10秒間継続したことを示している。地表面での応答加速度は、過剰間隙水圧が上昇し始めると一時的に大きな値を示すが、その後小さくなっている。また、過剰間隙水圧が減少し始める時に再び一時的に大きな値を示し、その後は定常な値となっている。これは、過剰間隙水圧が上昇、あるいは下降する過程においては地盤は軟化しており、そのために一時的に地盤と入力地震動とが共振するためと考えられる。この時の管のひずみに注目すると、過剰間隙水圧が上昇しはじめるころからひずみの動振幅(動ひずみと呼ぶ)が大きくなり始め、不完全液状化時には大きな動ひずみが継続している。動ひずみの発生要因については、文献4)で既に検討しているように、つぎの3つが考えられる。

- (1) 地盤中を入力せん断波が伝播する割合
- (2) 地盤のひずみが管に伝わる割合
- (3) 地盤-管よりなる振動系のたわみやすき

この中で(3)は、地盤の軟化に伴う地盤-管よりなる振動系のたわみやすきの変化、および外力との共振について考慮するものである。文献4)において、液状化過程における模型地盤の固有振動数の変化を示したうえで、液状化の進行に伴い地盤の固有振動数が低下し、地盤が入力地震動と一時的に共振する時、その影響が管に不利に働くと我々は述べた。しかし、Fig. 3に示すように、不完全液状化時に注目して実験を行うと動ひずみが大きな値を示している時に地表面の応答加速度は既に小さくなっている。したがって、地盤と入力地震動との共振現象によって埋設管に大きな動ひずみが生じていると一概には考えにくい。これは、地盤と入力地震動とが共振する時には過剰間隙水圧が既に蓄積されつつあり、地盤のひずみが管に伝わる割合が低下していること、本実験においては管軸方向に加振しているので流動する砂の管への見付面積が小さく、したがって地盤と入力地震動とが共振した時の動土圧が管に与える影響が小さいこと、などによるものと考えられる。以上のことより、Fig. 3によれば、地盤と入力地震動とが共振現象を起こしたときよりもさらにもう少し過剰間隙水圧が上昇したときに、地盤-管よりなる振動系が入力地震動と共振し、大きな動ひずみを生じているように見える。Fig. 3を動ひずみの振幅と過剰間隙水圧比との関係としてまとめ直したものがFig. 4である。同図は、Fig. 3におけるひずみゲージ10の値と過剰間隙水圧値を0.5秒おきに読み取り整理されたものであり、漸増時間3秒、20秒、50秒、70秒の実験結果がまとめられている。ひずみゲージ10はFig. 2より明らかなように、埋設管模型のほぼ中央に貼られている。また、図中の矢印は時間の経過を表す。同図によれば、漸増時間3秒の実験では過剰間隙水圧比が1.0に達していることより、地盤が完全液状化に

Table 1 Physical properties of sands.

Coefficient of uniformity	2.96
Specific gravity	2.665
Maximum void ratio	0.982
Minimum void ratio	0.717
Coefficient of permeability	
	0.0176 (cm/sec) for e_{\max}
	0.0157 (cm/sec) for e_{\min}

至っていることがわかる。これに対し、
 漸増時間20秒、50秒、70秒の実験では過
 剰間隙水圧比が最大でもそれぞれ0.71、
 0.59、0.43となっており、完全液状化に
 までは至らなかったことが読み取れる。
 一方、このとき過剰間隙水圧比が0.5～
 0.75の間で動ひずみは最大値をとってい
 る。ただし漸増時間70秒の実験では前述
 したように過剰間隙水圧比が最大でも
 0.5に達しておらず、また動ひずみに顕
 著な最大値が現れていない。ここで、過
 剰間隙水圧比が0.5～0.75で、動ひずみ
 が 50×10^{-6} 以上の領域に注目する。た
 だし、 50×10^{-6} という値はの場合におけ
 る比較的大きな動ひずみ値ということ以
 外、特別な意味を持っていない。Fig. 4
 においてドットとドットの間隔が0.5秒
 を表しているので、漸増時間3秒の実験
 で動ひずみが 50×10^{-6} を越えている時間
 は1秒足らずであり、またこれは過剰間
 隙水圧比が0.5～0.90、すなわち地盤が

不完全液状化状態となっている時間とも対応していることがわかる。漸増時間20秒、50秒の実験においては過剰間隙水圧比0.5～0.75の状態が一定時間継続しているため、この間大きな動ひずみが継続して現れている。以上のことより、次のことが明らかとなった。地盤が完全液状化にまで至る場合は、不完全液状化状態の継続時間が一般に短いので、不完全液状化時に生ずる比較的大きな値である動ひずみはあまり注目されないが、完全液状化時に発生する管の浮上などによる破壊を防ぐために地盤に対策を施した場合、不完全液状化状態が長く継続することが予想され、そのような場合には比較的大きな動ひずみが長く継続して現れるので、継手が破壊に至る危険性が高くなり注意が必要である。また、片田・伯野が指摘しているように²⁾、不飽和砂地盤に大きな地震動が作用する場合についても同様のことが言えるので、そのような場合についても注目する必要がある。Fig. 4においては、同じ過剰間隙水圧比でも次第に動ひずみの値が減少している。これは、(1)不完全液状化時に埋設管模型が浮上したために埋設管模型の周りの有効応力が減少し、(2)このために地

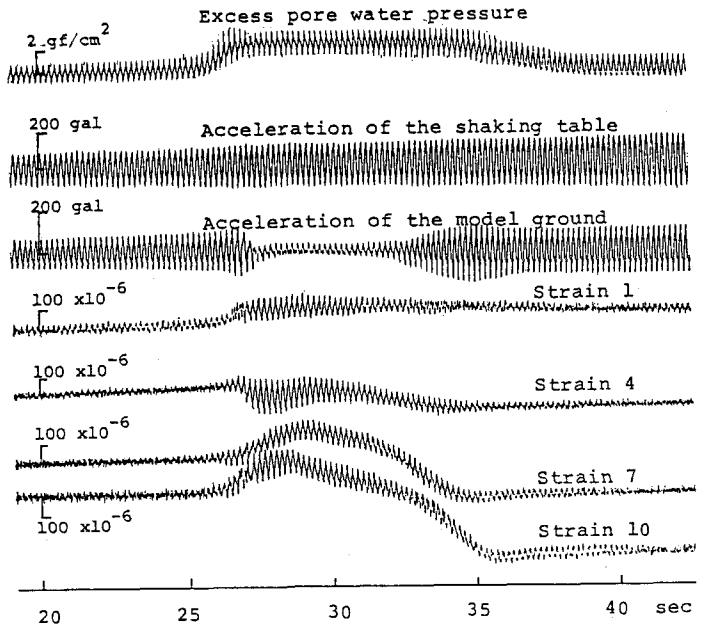


Fig. 3 Records of excess pore water pressure, acceleration of the shaking table, acceleration of the model ground and pipe strains.

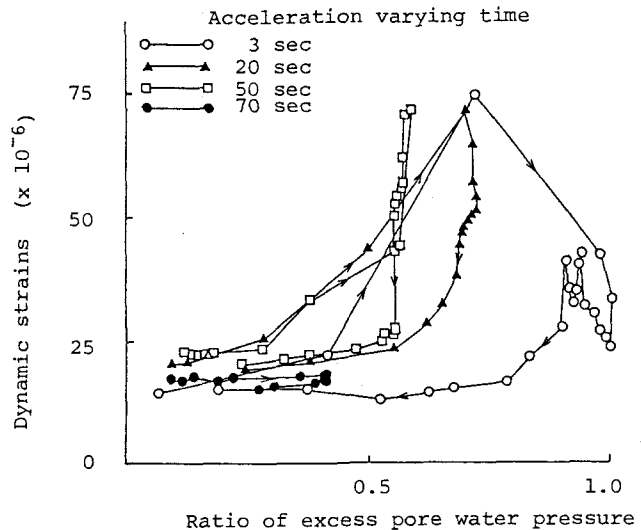


Fig. 4 Relationship between ratio of excess pore water pressure and dynamic strains.

盤一管よりなる振動系が入力地震動と共振する状態ではなくなること、(3)したがって動ひずみは減少すること、(4)他方、水圧計は初期の埋設深さに固定されており、その深さにおいては不完全液状化時状態が継続しているので過剰間隙水圧比の値が一定であるためであると考えられる。

つぎに、静ひずみについて検討する。静ひずみとは、Fig.3 のひずみゲージ7,10 において顕著であるが、ひずみ記録における中立軸の移動量のことであり、地盤液状化に伴って生ずる地盤の大変形や管の浮上によりもたらされる管の変形と対応している量であると言える。本実験においては、管の浮上による影響が大きいため、地盤の永久変位については別途検討することとして、ここでは不完全液状化時に埋設管に作用する浮力について考察を進めることにする。Fig. 5は、液状化過程において地中埋設管に作用する力を模式的に表したものである。簡単のために埋設管を厚さ D 、上下面の面積 A の板として考え、以下考察する。板の下面に上向きに作用する力を F とすると、 F は以下の式で与えられる。

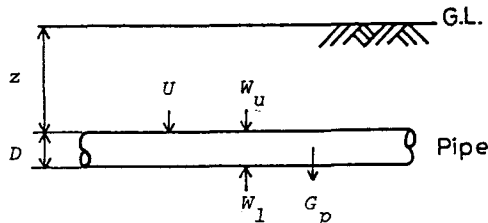


Fig. 5 Schematic diagram of force acting on buried pipe during liquefaction.

$$F = W_l - (U + W_u + G_p) \quad \dots (1)$$

ここに、 F : 管に作用する上向きの力、 W_l : 深さ $z+D$ 、つまり板の下面に作用する水圧、 W_u : 深さ z 、つまり板の上面に作用する水圧、 U : 板上面に作用する地盤の有効応力による力、 G_p : 自重、である。 W_l 、 W_u は間隙水圧によるものであるから、過剰間隙水圧の上昇に伴い大きくなる。また、 U は過剰間隙水圧の増加に伴い減少する。式(1)を整理すると次式が得られる。

$$F = (z + D) P_w A - (\gamma_s z + \rho_p D) A \quad \dots (2)$$

ここに、 $P_w(z+D)$ は深さ $z+D$ における間隙水圧値を示しており、 P_w は間隙水圧値を深さで除したものであり、過剰間隙水圧の変化を考慮した見かけの水の単位体積重量といえる。 γ_s は湿潤地盤の単位体積重量、 ρ_p は板の単位体積重量である。式(2)によれば、過剰間隙水圧が上昇始めると同時に上向きの力が埋設管に作用し始めるのではなく、ある程度液状化が進行した状態ではじめて上向きの力が作用しはじめることになる。たとえば、呼び径 500mmのダクタイル鋳鉄管を例にあげると、過剰間隙水圧比が0.82以上となった時にはじめて上向きの力が作用し始め、完全液状化に至ると1本当たり約608kgf (6.0kN) もの力が作用するようになる¹¹⁾。したがって、不完全液状化時には必ずしも大きな上向きの力が作用しているわけではなく、この例の場合では、過剰間隙水圧比が0.82以下になるように地盤を改良すれば、浮力による静的な破壊については全く検討する必要がなくなる。しかし、マンホールなどの中空の地下構造物の場合は、過剰間隙水圧比が0.5以下で上向きの力が作用し始めることが確かめられている¹¹⁾。この場合には、埋設管にはまだ上向きの力は作用していないがマンホールは浮き上がろうとするので、両者の境界部分で相対変位が大きくなり、その部分で破壊する危険性が大きくなるのが容易に想像できる。以上をまとめるとつぎのようである。液状化過程において、浮力をも含めた力が全体として上向きになる時刻は、過剰間隙水圧が上昇始めたときではなく、過剰間隙水圧がある値以上になるときである。ある値とは、式(2)より明らかなように、地中構造物の大きさ、みかけの単位体積重量、埋設深さおよび飽和砂の単位体積重量などにより定まる値である。したがって不完全液状化時には、マンホールなど埋設管に付属した構造物は上向きの力を受けているが、埋設管には上向きの力が作用していない状態などが考えられるので、異種の構造物の接合部においては完全液状化時のみではなく、不完全液状化時における浮力による上向きの力を十分に考慮する必要があると言えよう。

4. 結 論

本研究は、不完全液状化時における地中埋設管の挙動を過剰間隙水圧との関係において明らかにしようとしたものである。丸棒ゴムを用いた模型振動実験を通して以下のことが明らかとなった。

- (1) 液状化過程においては、過剰間隙水圧比が0.5～0.75の範囲で動ひずみが最大値を示す。これは、地盤-管よりなる振動系が外力と共振するためであると考えられる。
- (2) 不完全液状化状態が長く継続すると、それに対応して比較的大きな動ひずみが長く継続して現れるので、継手が破壊に至る危険性が高くなり注意を要する。
- (3) 構造物に上向きの力が作用し始めるときの過剰間隙水圧値は、構造物の大きさや、見かけの単位体積重量などによって異なるので、異種の構造物の接合部においては完全液状化時のみではなく不完全液状化時においても破壊に至る危険性が大きい場合があるので、検討が必要である。

以上の結果よりいえることは、不完全液状化時においても埋設管の動的および静的応答特性を十分に検討する必要があるということである。さらに、これらを定量的に捉えることにより、埋設管の破壊との関連を明らかにし、液状化による被害を軽減するための対策に反映させる必要がある。

最後に、本研究を遂行するにあたり、地中埋設管の動的挙動に関する議論を通して種々のご教示を賜った小堀為雄教授に深謝の意を表します。また、本研究が文部省科学研究費（奨励研究A）、石原藤次郎研究奨学基金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) 例えば、吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂出版，1980。
- 2) 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，1981。
- 3) 宮兼一郎・清宮 理・土田 肇：液状化が海底パイプラインの応力度に及ぼす影響，港湾技研資料，No. 441，1983。
- 4) 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. 44～53，1982。
- 5) 北浦 勝・宮島昌克：一端を固定された地中埋設管模型の液状化時の挙動，土木学会論文報告集，第336号，pp. 31～38，1983。
- 6) 吉松直幹・吉見吉昭・佐々木 康：講座 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。
- 7) 佐々木 康・谷口栄一・小笠原久：液状化対策としての砕石ドレーンの効果に関する振動実験，第17回土質工学研究発表会講演集，pp. 1685～1688，1982。
- 8) 佐々木 康・谷口栄一・藤原嗣哲：砕石ドレーンによる液状化時の間隙水圧の消散に関する有限要素解析，第19回土質工学研究発表会講演集，pp. 667～670，1984。
- 9) 田中幸久・国生剛治・江刺靖行・松井家孝：パーチカルドレーンによる飽和砂地盤の排水性の向上について，第17回土質工学研究発表会講演集，pp. 1693～1696，1982。
- 10) 田中幸久・国生剛治・江刺靖行・松井家孝：グラベルパイルによる液状化防止について，第18回土質工学研究発表会講演集，pp. 569～572，1983。
- 11) 柿谷敏久：液状化を考慮した地中埋設管の地震応答解析，金沢大学修士論文，1984。