

(62) 液状化時の模型地中埋設管の歪特性

金沢大学工学部 正員 北浦 勝
 金沢大学工学部 正員 〇宮島 昌
 金沢大学大学院 学生員 武蔵 正信

1 はじめに

サンフェルナンド地震(1971, M6.5)において、地中埋設管をはじめとするライフライン系に多くの被害を被って以来、ライフライン系の耐震性に注目が集まっている。先の宮城県沖地震(1978, M7.4)においても地中埋設管に多くの被害が発生し、その耐震性の向上の重要性がさらに認識された。一方、新潟地震(1964, M7.5)において砂質地盤の液状化を経験して以来、液状化に関する調査、研究が活発に行なわれてきた。その結果、液状化の発生メカニズムはかなり明らかになり、今日では砂質地盤に構造物が建設される場合には、ほとんどの場合液状化の検討がなされるようになってきている。しかし、地中埋設管については、周辺地盤が液状化する可能性があるにもかかわらず、古くから埋設されているために何らの対策もとられていない管が多い。したがって、将来発生するかもしれない液状化における、これらの地中埋設管の被害予測とその復旧対策を考えていくためには、また、その耐震性の向上をはかるためには、液状化時における地中埋設管の破壊機構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は、地中埋設管模型であるサンウレタン丸構ゴムを定常的調和波および過渡的調和波で加振し、液状化時の管の歪特性を明らかにしようとしたものである。さらに、液状化過程における動歪(管歪の振動成分)の発生メカニズムについても考察を加えた。

2 実験概要

実験概略図を Fig. 1 に示す。振動台(豊津製作所製, EHV-3)上に設置した鋼製の砂箱(幅500×長さ1500×高さ350mm)に、比較的細砂で均一な砂(有効径0.1mm, 均等係数2.6)を厚さ250mmまで入れた。砂箱の周囲には厚さ60mmの中空の発泡スチロールを、そして長さ方向の側壁にはさらに厚さ60mmのスポンジを貼りつけ、砂層のせん断変形に対する砂箱の拘束を多少なりとも軽減するようにした。

地中埋設管模型としてはサンウレタン丸構ゴム(ナリゴム製)を使用した。丸構ゴムはその寸法が20φ×1000mm、弾性係数810 kg/cm²(79.4MPa)、単位体積当たりの重さ1.43/cm³(11.2kN/m³)である。丸構ゴムの中央部の上(A)、下(C)、両横(B、D)の4ヶ所に歪ゲージ(東京測器製, PL-5-11)を接着し、加振時の管歪を測定した。また、水圧計(豊田工機製, 最大0.5kg/cm²(49kPa), PMS-5H)を地中埋設管と同じ深さに埋め、埋設管周囲水圧を測定した。本実験においては、液状化時に水圧計が浮上、あるいは沈下するのを防ぐために、砂箱の上から水圧計を針金で固定してぶら下げた。

入力波としては、Table 1 に示すように、定常的調和波および過渡的調和波を用いた。過渡的調和波は、漸増時間をそれぞれ3秒、6秒、9秒とした。加振振動数は5Hzとし、管軸方向、管軸垂直方向にそれぞれ入力させた。

3 実験結果

3.1 定常的調和波を入力した場合

Fig. 2 は、入力加振度150galの定常的調和波で管軸方向に加振した

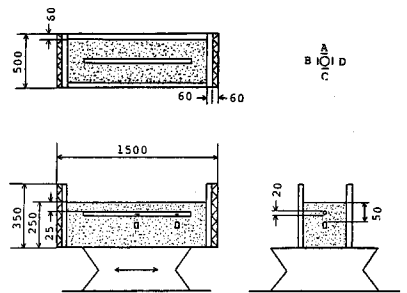


Fig. 1. General view of experiments.

Table 1 Input harmonic waves.

		Time (sec)				
		0	3	6	9	30
Slowly varying amplitude	Stationary	[Constant amplitude sine wave]				
	TYPE 1	[Increasing amplitude sine wave]				
	TYPE 2	[Increasing amplitude sine wave]				
	TYPE 3	[Increasing amplitude sine wave]				

時の過剰間隙水圧および地中埋設管中央部の管径の変動である。過剰間隙水圧が上昇しつつある不完全液状化時においては、地盤が軟化し、地盤-管なり成る振動系はたわみやすくなるので、大きな歪が見られる。また、過剰間隙水圧の上昇にともなう地盤の液状化によって埋設管は浮上し、それが上(A)下(C)の歪記録における中立軸の移動という形で現われている。つまり、液状化過程において管中央部上側の歪ゲージは引張り力を受け、下側の歪ゲージは圧縮力を受けている。

これは、砂のせん断変形に対する砂層の拘束の比較的少ない地盤中央部から液状化が発生することにより、管中央部近傍が浮力を受け、先に浮上しはじめると考えられる。そして、液状化が収束すると、その時の変形が残留するということが図より明らかである。

このように、液状化過程における地中埋設管の歪においては、歪振幅だけでは十分とは言えず、管全体の曲げの程度を表わす指標として歪記録における中立軸の移動量というものが重要となってくる。そこで、この初期状態からの中立軸の移動量を静歪と定義し、一方、振動する歪と中立軸との差、すなわち歪振幅を動歪と定義し、それぞれについて整理をおしたものが、Fig. 3(a)である。同図において、E.P.W.P.は過剰間隙水圧(Excess Pore Water Pressure)を、STRAIN 1は静歪を、STRAIN 2は静歪の時間的変化の割合を、STRAIN 3は動歪をそれぞれ表わしている。ここで、静歪の変化の割合というのは、過去1秒間に静歪が変化した量を表わすものと定義し、地中埋設管の浮上による管の変形速度を示すひとつの指標としてとらえた。

図より、静歪の変化の割合は上下方向が非常に卓越しており、ピークとなる時刻は過剰間隙水圧が上昇する不完全液状化時と一致していることがわかる。そして、完全液状化時にはむしろ小さい値となっている。これは、不完全液状化時には地盤の状態の変化の速度が大きいこと、また、前述したように管中央部近傍の液状化度が高いことにより、管中央部の変形速度が大きくなるため、と考えられる。一方、完全液状化時には地盤の状態はほぼ一定に保たれ、砂層全体が液状化することにより管全体に均等な浮力が作用し、管の変形速度が小さくなるためと考えられる。また、過剰間隙水圧が下降する砂の再堆積時においても不完全液状化時と同様のことが言えるが、この時にも小さなピークが現われている。動歪を同じように、不完全液状化時と砂の再堆積時にピークを示している。不完全液状化時および砂の再堆積時には地盤は軟化しており、かつ、入力せん断波はある程度管に伝播されるので動歪は大きくなる。一方、完全液状化時には地盤はさらに軟化するが、入力せん断波がほとんど伝播されなくなり、そのために動歪は小さくなると考えられる。

Fig. 3(b)は、管軸垂直方向に加振した時の結果を上述の方法で整理したものである。この時、管軸方向加振実験で用いた装置を、振動台の上で90°回転させて設置した。同図より、静歪は上下方向が、動歪は横方向がそれ

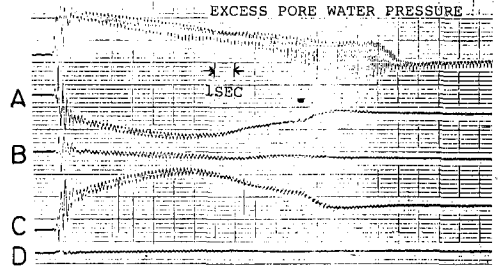


Fig. 2 Records of pore water pressure and strains.

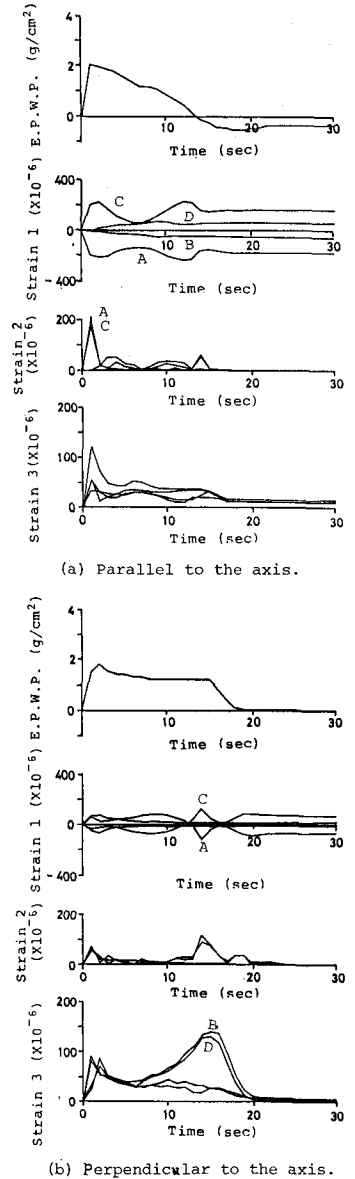


Fig. 3 Time histories of excess pore water pressure and strains of the pipe.

を乗り越えていることがわかる。また、管軸方向加振実験結果と同様に、それよりピークとなる時刻は不完全液状化時と砂の再堆積時にほぼ一致している。

3.2 過渡的調和波を入力した場合

Table 1 に示した各種の過渡的調和波を管軸方向に入力した時の結果を整理したものが Fig. 3 (a)~(d) である。まず、過剰間隙水圧の記録を見ると TYPE 1, TYPE 2 については完全液状化に至っているが、TYPE 3 では液状化していない。液状化が発生しないと、管歪は非常に小さな値となっている。また、過剰間隙水圧が蓄積される量は入力加振度の増加とともに増しており、TYPE 1 と TYPE 2 では、過剰間隙水圧の蓄積の過程が異なっている。しかし、管歪の変化の割合および断歪はやはり不完全液状化時にピークを示しており、また、砂の再堆積時にピークがある。管軸直角方向に過渡的調和波を入力させた場合にも同様のことが言えた。以上のことより、液状化過程における地中埋設管の歪は、過剰間隙水圧に強く依存していると言える。

4 液状化過程における動歪発生メカニズム

以上の模擬振動実験より、不完全液状化時および砂の再堆積時に大きな管歪が発生することが明らかとなった。ここでは、動歪に注目してその発生メカニズムの解析を試みた。

動歪の発生要因として次の3つを考える。

- (i) 地盤の歪が管に伝わる割合。
- (ii) 地盤中を流入せん断波が伝播する割合。
- (iii) 地盤-管より成る振動系のたわみやすさ。

すなわち、(i) は液状化の進行とともに有効応力が減少することになり、摩擦力が減少し、管と周辺地盤の間ですべりが生じやすくなることを考慮するものである。埋設管と周辺地盤との間の摩擦力は、摩擦係数を一定とすると有効応力 σ' にほぼ比例すると考えられる。

$$\sigma' = \sigma - U_w = \sigma(1 - U_w/\sigma) = \sigma(1 - l)$$

ここに、 U_w を過剰間隙水圧、 σ を全応力とし、 $l = (U_w/\sigma)$ を液状化度と略示ことにする。すなわち、上式より地盤の歪が管に伝わる割合は $1-l$ にほぼ比例すると考えることができる。そこで、加振前に地盤の歪が管に伝わる割合を 1.0 と仮定して、Fig. 5 (a) に示すモデルを設定した。(ii) は、完全液状化時には地盤はあたかも液体のようにふるまうので、せん断波はほとんど伝播しなくなる。したがって、このことを考慮するものであるが、この場合も有効応力に比例するものと仮定し、Fig. 5 (b) に示すモデルを設定した。(iii) については、外力との共振を後に考慮するものとして、Fig. 5 (c) に示すモデルを設定した。すなわち、完全液状化時を 10、加振前および液状化

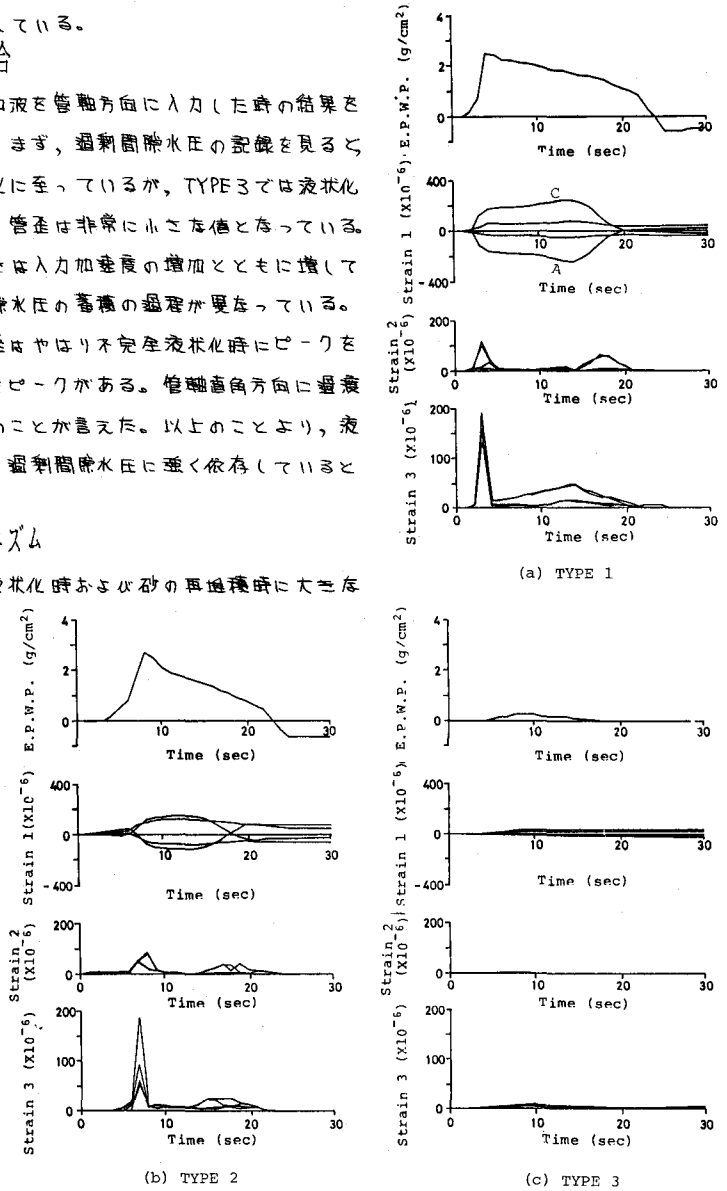


Fig. 4 Time histories of excess pore water pressure and strains of the pipe.

収束後を0とし、液状化度に比例するものとした。

いま、液状化過程における動歪が、これら3つの要因の積として表わされると考えると、液状化度と動歪発現度は、図5(d)に示すような関係として表わされる。すなわち、液状化度が増加していく不完全液状化時と、液状化度が減少していく砂の再堆積時において大きな動歪が発生するという現象がうまく説明できる。

つぎに、外力との共振の問題を考えるために、液状化過程における模型地盤の固有振動数の変化を調べる。そのために、過剰間隙水圧の動振幅(図6)に注目する。過剰間隙水圧の記録(図2)を見ると、砂の再堆積時には砂層は締まってくるので、せん断変形にともなう正のダイラタンシーにより負の間隙水圧が生じている。この時、砂層のせん断変形が大きいと正のダイラタンシーも大きくなり、したがって大きな負の間隙水圧が生じる。このことからわかるように、砂の再堆積時には過剰間隙水圧の動振幅の大きさは、砂層のせん断変形の大きさを表わすと考えられる。

そこで、加振振動数を変化させて液状化過程における過剰間隙水圧を測定し、その動振幅に注目した。すなわち、実験ごとに間隙水圧の動振幅が最大となる時刻の液状化度を求めた(図7)。ここでは、 $\sigma_v = (U_w)_{max}$ とした。図7は、加振振動数が低いほど、液状化度の大きい時に間隙水圧の動振幅が大きいこと、すなわち地盤のせん断変形が大きいことを示している。つまり、液状化の進行にともなう模型地盤の固有振動数は低下し、完全液状化に近い状態では5Hz前後となっているのであろうと推測される。なお、完全液状化に至るまでの過程においては、間隙水圧の動振幅と地盤のせん断変形との間には必ずしも明らかな対応を見出すことはできない。しかし、上述したような液状化度が大きいほど地盤の固有振動数が低下するという現象は、液状化過程すべてについて言えると考えられる。

このような外力との共振の影響は、動歪発現度と以下のように関係していると考えられる。すなわち、動歪発現度が最大となる時の液状化度を求め、この液状化度における地盤の固有振動数が加振振動数と一致すると、管にとって最も不利な状態となる。たとえば、図5(d)においては、液状化度0.33の時に動歪発現度は1.0で最大となっている。したがって、図7より、液状化度0.33の時の地盤の固有振動数を求めると約10Hzとなるので、この場合、約10Hzで加振した時に管にとって最も不利であると考えられる。

ここでは、各要因の重みづけは考えておらず、また、液状化過程の初期の地盤の硬さと液状化収束後のそれを等しいと仮定しているのが、実験結果とは必ずしも対応していない。これらの各要因が動歪に与える割合や、各要因と液状化度との関係については今後さらに明らかにしていく必要がある。また、本研究では、埋設管の両端が固定されていないという実験条件から、静歪よりも動歪に注目して考察を加えた。これは、埋設管を柔構造にしようとする時重要な役割を果たす、継手部の耐震性を検討していくうえで必要なことである。しかし、実際の地震被害では、静歪と関係している管の浮上による破壊も多く見られる。したがって、構造物との相互作用をモデル化した模型実験などを通じて、今後、静歪に対する検討も加える予定である。

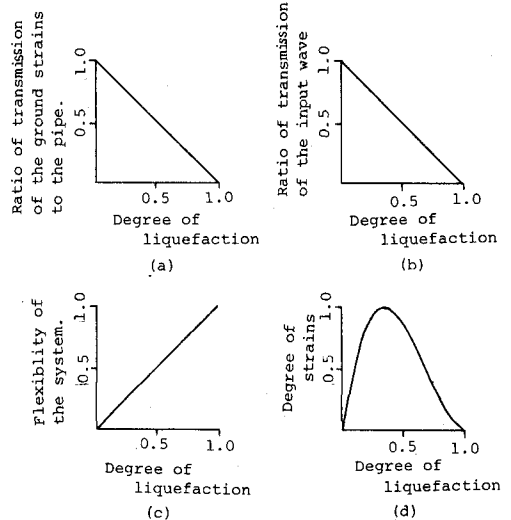


Fig. 5 Relationships between degree of strains and degree of liquefaction.

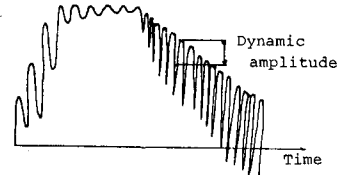


Fig. 6 Schematic diagram of record of excess pore water pressure.

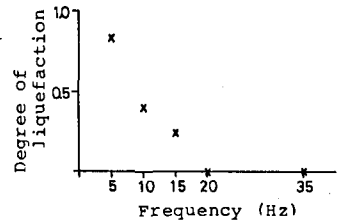


Fig. 7 Relationship between predominant frequency of saturated sand layers and degree of liquefaction.