

(133) 液状化した地盤中の管路に作用する地震力について

八代工業高等専門学校 正員 〇 瀧田邦彦
 熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 熊本大学工学部 正員 松本英敏
 長崎市 正員 長瀬雅彦

1. まえがき 地震時の砂地盤の液状化に関する研究が活発に行われた結果、その発生メカニズムがほぼ明らかにされ、対策工法もいくつか開発されている。一方、液状化地盤中の構造物に関する研究もかなり行われているが^{1), 2)}、液状化時の構造物に作用する地震力についてはまだ不明な点も少なくない。本研究の目的は、地震による砂地盤の液状化発生から終了までの過程において、周辺地盤がどのように管路を拘束するのか、そのメカニズムを明らかにすることにある。このため、飽和砂槽中に模型管を埋設し、これの水平加振実験により、土圧・間隙水圧・せん断応力・加速度などを測定し、これらの相互関係を整理することによって液状化地盤の管拘束メカニズムについて検討を加えた。

2. 実験の概要 本研究で用いた実験装置は、図1のように、レール上に起振機(八千代製作所製)と砂槽(幅380×長さ980×高さ400mm)を固定し、これをコロの上に載せて、水平加振するもので、砂槽中には均等係数3.46の比較的均一な川砂を厚さ300mmまで入れた。塩ビパイプ(φ42×長さ880mm およびφ42×長さ400mm)の中央部に土圧計・水圧計(ST研究所製, 最大0.1kgf/cm²(9.8kPa), PM10-01), せん断歪計(ST研究所製, 最大10⁻⁴rad, SS10-00001)および加速度計(新興通信工業製, 2G, BA-2L)を取り付けたものを管模型とし、砂層中に水平に埋設した。ゆる詰め状態の飽和砂地盤を何度でも容易に作製するために、砂槽底部に砂を噴き上げるためのパイプ(φ18mm)を配置し、水を勢いよく注入できるようにした。また砂槽の両側壁には厚さ30mmのスポンジをつけて砂層のせん断変形に対する砂槽側壁の拘束が少なくなるようにした。予備実験の結果、加振振動数は砂層全体が容易に液状化する12Hzとし、間隙水圧が上昇してから十分もとに回復するまで加振した。実験は、管の長さを変えた場合、管の両端を砂槽に固定する場合と固定しない場合に、それぞれ埋設深さを変えて、数回繰り返し実施した。各ピックアップの出力は動ひずみ計(共和電業製, DPM-6E)で増幅してデータレコーダ(TEAC製, R-71)に記録した後、マイコンでA/D変換し、処理した。砂や管模型は本来相似則を考慮すべきであるが、本実験ではとくに考慮せず、砂層の液状化が生じやすい条件で実験を行った。

3. 実験結果と考察 図2は測定結果の経時変化の一例で、上から、砂槽加速度・管体加速度・砂層加速度・砂層せん断応力・管体に作用するせん断応力・全応力・過剰間隙水圧・応力差(全応力-水圧)を表わしており、また管の深さGL-24cm, 管長88cmの場合である。加振開始後、過剰間隙水圧が上昇してピークに達した後、砂層加速度はほぼ零になり、砂層に液状化が発生している。この例では、管の両端部付近が拘束されて液状化による管体加速度の低下は見られない。管体に働くせん断応力は、加振開始後、増加し始め、液状化とともに管体が片方向にすべった状態で平衡を保ちながら、こきざみに変化しているが、砂層加速度が大きくなると、せん断応力も振幅が大きくなっている。このように、管路は液状化時に短時間に大きなずれを起し、そのままの状態になることを示唆している。一方、管中央部における全応力(土圧+水圧)は、加振開始直後、増加し、ある一定値に達したままの状態となるが、過剰間隙

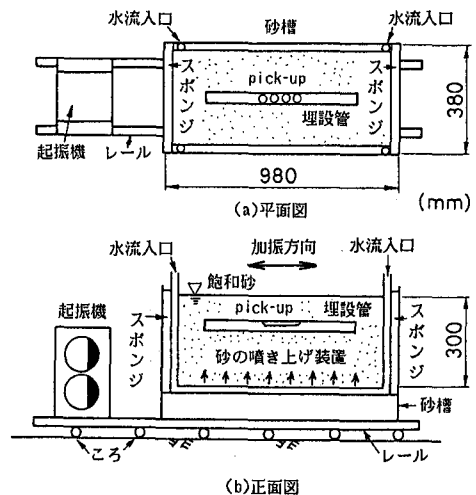


図1 実験装置の概略図

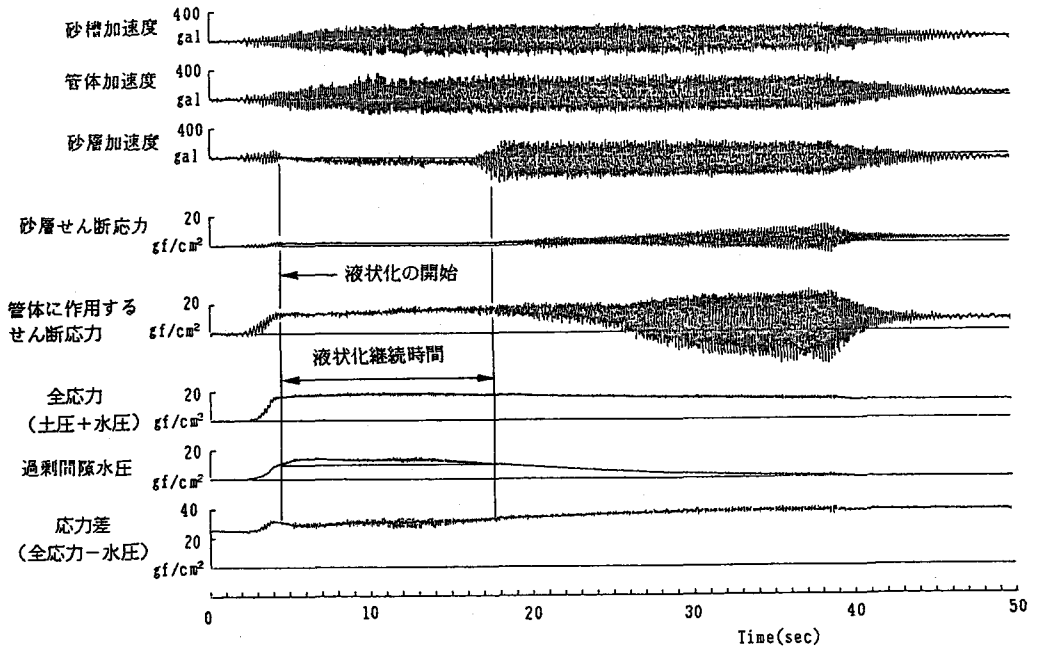


図2 測定記録の一例(G.L.-24cm, 管長88cm, 管端部フリー)

水圧は全応力よりも2秒ほど遅れてピークに達した後、10秒程で消散し始め、やがて液状化が終了する。図2の全応力と過剰間隙水圧は、ゆる詰め状態の砂層中に管を埋設した静止状態を基準に表わしているが、あらかじめ静止状態の全応力と間隙水圧を測定し、その差をとれば、深さに対して図3のような関係が得られた。そこで図2最下図

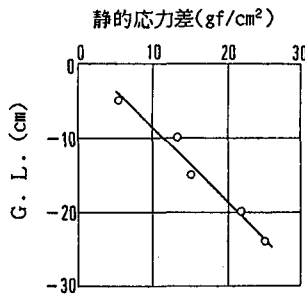


図3 静的応力差と深さとの関係

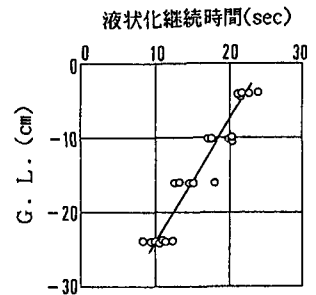


図4 液状化継続時間と深さとの関係

の応力差は、全応力と過剰間隙水圧との差に、図3の静的応力差を加えて、図示している。この応力差はいわゆる有効応力に近いものと考えられ、液状化開始時の低下と液状化終了時の高まりが砂層の液状化挙動とある程度対応しているようである。このように管体に作用するせん断応力・全応力・過剰間隙水圧・応力差は液状化の発生と終了に深く関係している。そこで本研究では、液状化の開始を全応力がピークに達するときとし、過剰間隙水圧が全応力ピーク時の過剰間隙水圧の値に復するときをもって液状化の終了と見なすこととし、各実験ケースごとに液状化継続時間を求めて深さに対して表わせば、図4のようになる。模型実験では砂層の深い所ほど上向き浸透流の供給が少ないので液状化時間が短くなり³⁾、液状化継続時間は深さにほぼ反比例している。この図より、液状化の開始と終了は本研究の定義により、ある程度説明できそうである。

次に、液状化時の管体加速度と管体に作用するせん断応力とをそれぞれ縦、横両軸にとり、ある時間区間ごとに軌跡を描いた一例が図5である。加振開始後、加速度振幅がそれほど大きくない(2)の区間で液状

化が発生し、せん断応力は正の側に
ずれ、液状化中はせん断応力一定で
加速度振幅も小さな状態が続く(区間
(3))。液状化が終了に近付くと、ま
ず砂槽側壁に近い部分から液状化を
終えて管の両端部が拘束されるため
加速度が先に大きくなり(区間(4))、
その後、管中央部の砂も管体を拘束
し始め、せん断応力の振幅が大き
くなる(区間(5))。液状化の終了後は加
速度とせん断応力は履歴型の特性を
示している(区間(6))。図6は、応力
差(全応力-水圧)を縦軸にとり、管
体に作用するせん断応力(横軸)との
関係を図5と同様に軌跡として表わ
した一例である。加振開始後、応力
差は徐々に高まるが、過剰間隙水圧
の上昇により一旦低下し、砂層に液
状化が生じる(区間(2))。砂層が液状
化している間は応力差、せん断応力
ともほぼ一定の状態を保つが(区間
(3),(4))、過剰間隙水圧の消散により
液状化が終了し始めると、応力差が
次第に増加するとともに、せん断応
力の振幅も徐々に大きくなり(区間
(5),(6),(7))、液状化終了後は応力差
がある値に達したところでせん断振
動するようになる(区間(9))。

以上より、液状化時の管体に働く
慣性力は小さいことと、液状化終了
時に管周囲の砂が徐々に締まって、
慣性力と振動によるせん断力で管体
を拘束していく過程とが示されたが、
とくに砂層が液状化を開始するとき
に注目すれば、このとき管体は片方
向に水平にずれるような大きな力
を受け、液状化終了後の管の振動状態
はほぼ液状化開始時に決定されるこ
とがわかる。このようなずれが実際
の埋設管でも生じるとすれば、これ
が液状化による管継手の引き抜け等
の被害の原因となる可能性もあると
いえよう。

次に、図7は、本実験で定義した
液状化開始時(全応力がピークに達す
る時)の、管体に作用するせん断応力

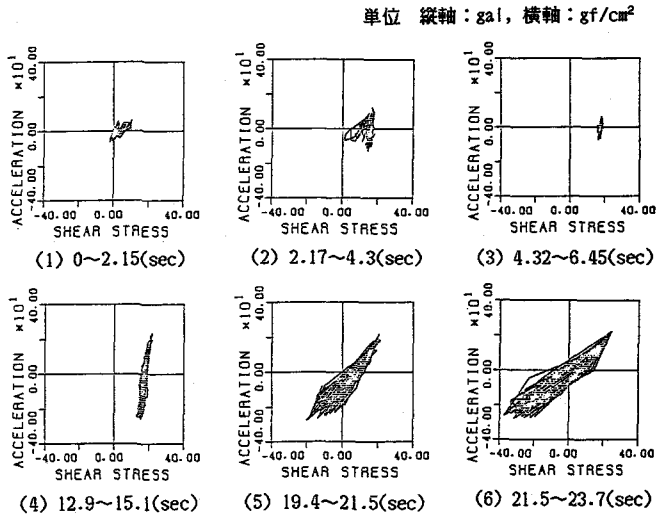


図5 管体加速度(縦軸)と管体に作用するせん断応力(横軸)との関係
(G.L.-16cm, 管長40cm, 管端部フリー)

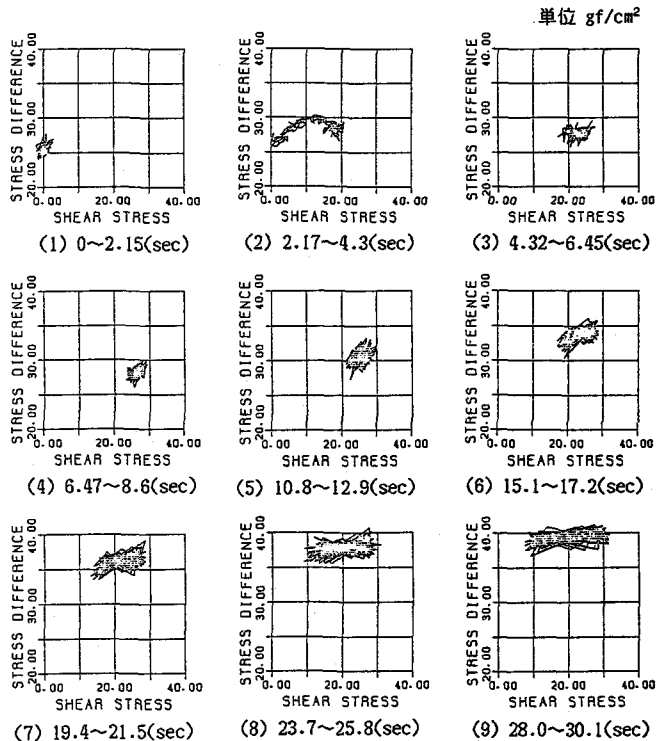


図6 応力差(縦軸)と管体に作用するせん断応力(横軸)との関係
(G.L.-24cm, 管長88cm, 管端部は砂槽に固定)

(○印)、過剰間隙水圧(△印)、応力差(●印)の値を管の埋設深さに対して示したものである。図よりこれら3種類の力はおおむね深さに比例していることがわかる。さらにこれらの力の相互関係として、液状化開始時の過剰間隙水圧および応力差と、管体に作用するせん断

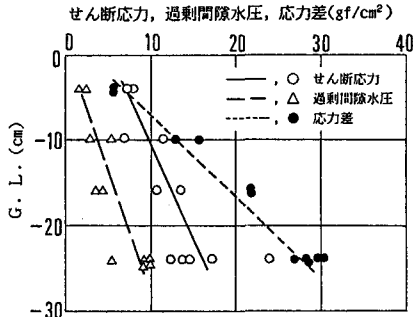


図7 液状化開始時の管体に作用するせん断応力、過剰間隙水圧、応力差と深さとの関係

応力との関係をそれぞれ図8, 9に表わした。液状化開始時の管体に作用するせん断応力は、過剰間隙水圧および応力差と、おおまかには比例関係にあり、液状化時の管体にかかる拘束力を知るための一つの目安となる可能性のあることを示唆している。

以上の考察より、液状化開始時のせん断応力が管路の液状化時挙動を支配する重要な要因であることがわかったが、最後に管体に作用する軸力について考察する。図10は管端部に土圧計を取付けて実験した一例である。管端部の全応力(管端部断面の平均応力)は、液状化していないときはほとんど小さな値であるが、液状化している間はその振幅がかなり大きくなっている。つまり、砂層が液状化していないときは、管は両端で軸方向に拘束されて砂と同じ振動をするため、端部の面には圧力がほとんどかからず、側方からのせん断振動が支配的となるが、管周囲の砂が液状化すると、せん断振動は伝わりにくくなるものの、管端部に砂粒子がぶつかって振動土圧として管体に力が加わることを示している。しかし、管全体に作用する力を概算すれば(加速度最大値288gal)、管端部における軸力は最大0.13kgf(12.7kPa)程度であるが、管全体に作用するせん断力は6秒付近で約4.3kgf(422kPa)となり、液状化の初期に加わるせん断力は振動による軸力に比べて圧倒的に大きいことがわかる。これより、液状化時には管体に軸力が作用するものの、その影響は小さく、液状化の初期に加わるせん断力が管継手に負担を与える主要因と考えることができよう。

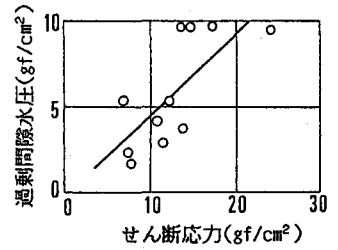


図8 管体に作用するせん断応力と過剰間隙水圧との関係

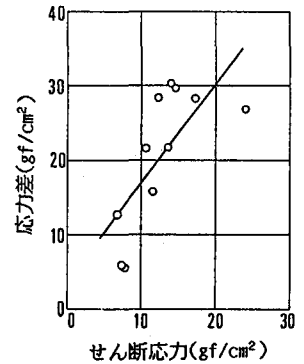


図9 管体に作用するせん断応力と応力差との関係

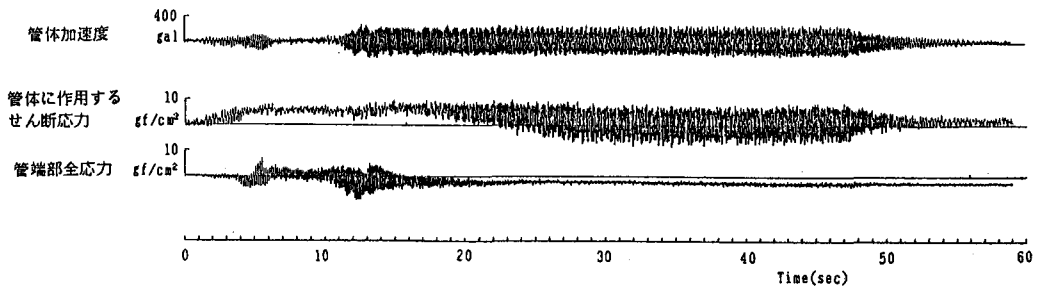


図10 管端部全応力の測定結果の一例(G.L.-16cm, 管長40cm, 管端部フリー)

4. まとめ 本研究では砂層の液状化実験により模型管に作用する力を測定して管路の液状化時挙動を検討した。その結果、液状化の初期に、管体の水平ずれを生ぜしめるようなせん断力が作用し、これが管継手破損の原因の一つとなる可能性があることを示した。

参考文献 1)片田・伯野:土木学会論文報告集,306号,pp.1-10,1981. 2)北浦・宮島:土木学会論文報告集,323号,pp.43-53,1982, 336号,pp.31-38,1983. 3)土質工学会:土と構造物の動的相互作用,pp.452-455,1973