

(48) 埋設管に対する液状化地盤の拘束力

九州工業大学工学部 正員 ○ 安田 進
 東京ガス(株)導管部 " 斉藤 公正
 日本鋼管(株) " 鈴木 信久

1. はじめに

地震時にゆるい砂地盤が液状化すると、液状化過程中に過大な変位振幅が生じたり、また液状化後に大きな永久変位が生じることがある。これにより地中埋設管に大きな強制力を加えることが予想される。ただし、一方で、液状化にともない地盤が軟化するため、埋設管に対する地盤の拘束力も減少してくると考えられる。液状化を考慮した埋設管の耐震設計を行うにあたっては、前者のみでなく後者の値も知っておく必要がある。

液状化にともなう拘束力の減少については、これまであまり明らかにされていない。そこで本研究では大型土槽および小型土槽中に供試管を設置して、液状化した地盤中の管軸方向および管軸直角方向の地盤拘束力の低減割合を実験により求めてみた。

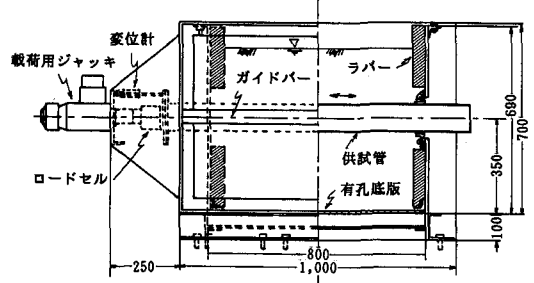
2. 実験装置

実験には大型土槽と小型土槽の2種類を用いた。前者では管の実際の埋設土かぶりを再現できる大きさを有しているが、加振することはできないため、ボイリングにより液状化を発生させる実験を行っている。これに対し、小型土槽では加振が可能であり、加振とボイリングの両方で液状化を発生させる実験を行っている。

小型土槽用の実験に用いた土槽を図-1に示す。内径は長さ80cm、深さ70cm、奥行き60cmで、正面はガラス面にしてある。側面固定の影響を軽減するため、側面内側には厚さ5cmのラバーを張ってある。また、ボイリングの実験用に、土槽の底部から加圧水を送りこめるようにし、さらに有孔底版とその上に設けた碎石層により均一に水圧が土層に加わるようにしてある。管軸方向および管軸直角方向の拘束力を実験するために、土槽内にはそれぞれ(a)、(b)の方法で供試管(100A, 50AのPLP鋼管)を設置している。供試管には電動モータによる荷重装置で、押し引き荷重、引張り荷重を加え、その荷重はロードセル、変位量は変位計にて測定した。

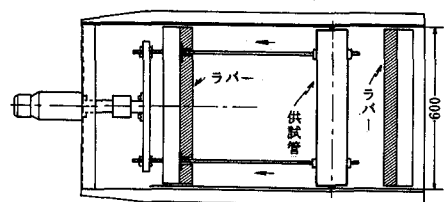
図-2に大型土槽の装置図を示す。内径は長さ5.7m、深さ3m、奥行き3mであり、正面の数ヶ所に地盤の状況を

(a) 管軸方向実験用 (正面図)



単位: mm

(b) 管軸直角方向実験用 (平面用)



(平面図)

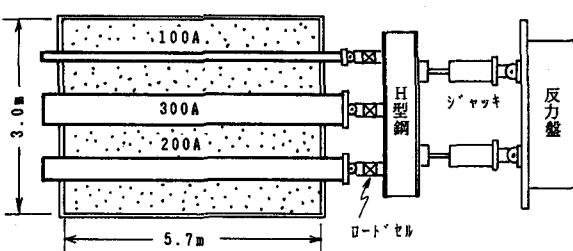


図-2 大型土槽の実験装置

図-1 小型土槽の実験装置

観測するための窓を設けてある。供試管は100A、200A、300AのPLP鋼管を用い、土槽内に一緒に埋設し（埋設深度1.8m）、ロードセルを介して1本のH型钢に接続している。そして、H型钢に油圧ジャッキで繰返し荷重を与え、軸方向載荷を行うようにしてある。その際の荷重はロードセルで、また変位は供試管にとりつけた変位計で測定した。なお、土槽の底部にはボイリングを生じさせる加圧水を送りこむための配管を行い、土槽内の圧力分布を均一にするために、配管上に碎石を30cm厚さで敷均した。

3. 実験内容および実験方法

実験は表-1に示すいくつかの条件を変えて行った。まず実験の種類としては、管軸方向載荷実験と管軸直角方向載荷実験を行った。ただし、後者は小型土槽の実験のみ行った。液状化の発生は、土槽下部から加圧水を送りこむ方法（ボイリング実験と以後呼ぶ）と、振動台にのせて加振し液状化させる方法の2種類とした。ただし、加振実験は小型土槽のみ行った。試料は千葉県産の山砂を用いたが、その他、山口県豊浦郡の浜から採取しフルイでふるった砂も用いた。両者の粒径分布を図-3に示すが、前者は細粒分を少し含む砂、後者は含まないきれいな砂である。また、小型土槽の実験では山砂の密度を変えた実験も行った。

実験にあたっては、小型土槽では試料に合わせた土の詰め方をした。山砂緩詰めではフルイを通して水中落打法で、山砂超緩詰めでは気乾試料をそのままフルイを通して落下させる方法で、また、豊浦砂では乾燥試料をフルイを通して落下させる方法で模型地盤を作成した。そして、まず一度飽和させた後、各種の状態に移行して実験を行った。管軸直角方向載荷実験では載荷の履歴の影響が残らないと考えられたため、飽和→不飽和→ボイリング（過剰間隙水圧比3～4段階）または加振、と同一の試料で状態を変え、各段階で引張り載荷（1～2mm/秒の速度で20mmまで単調載荷）を行った。管軸方向では載荷の履歴の影響が予想されたため、飽和または不飽和の状態とその後液状化状態の2段階しか同一の試料に対して載荷しなかった。この場合の載荷は1～2mm/秒の速度で±16mmまで3回（開始は圧縮側）繰返した。なお、加振は3Hzの正弦波とし、数波で液状化するように、試料の密度に応じて入力加速度を設定した。そして、液状化発生後ただちに載荷を開始した。

これに対し、大型土槽では気乾試料を30cm厚ごとに入れ、ランマーで転圧（2往復）した。この気乾状態で振幅±50mmの繰返し載荷を3回、さらに24時間たって±30mmの繰

表-1 実験条件

項目	実験内容	土槽	
		小型	大型
載荷	管軸方向	○	○
	管軸直角方向	○	
液状化	加振	○	
	ボイリング	○	○
試料	山砂緩詰め	○ ¹⁾	○ ⁴⁾
	〃 超緩詰め	○ ²⁾	
	豊浦砂緩詰め	○ ³⁾	
管径	PLP, 50A	○	
	〃, 100A	○	○
	〃, 200A		○
	〃, 300A		○

1), 2), 3), 4)の相対密度はそれぞれ約70, 0, 50, 10%

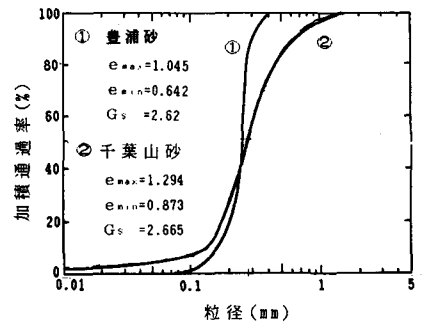


図-3 用いた試料の粒径分布

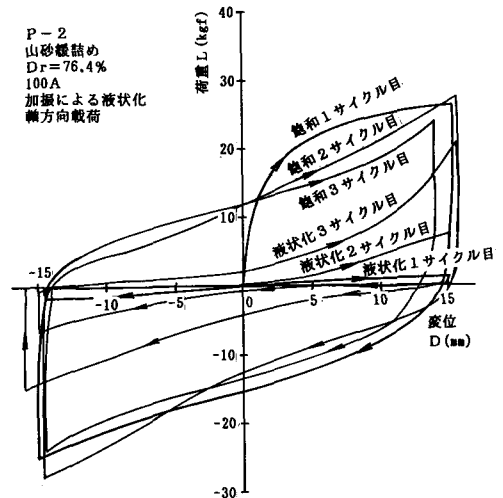


図-4 管軸方向変位～荷重関係例 (小型土槽)

返し載荷を5回与えた。その後、加圧配管から注水し、飽和状態にさせてから、 $\pm 30\text{mm}$ の繰返し載荷を行った。そして、さらに加圧し、供試管の深さに設置した間隙水圧計で、過剰間隙水圧比が0.5程度（不完全液状化状態）、1.0程度（完全液状化状態）で $\pm 30\text{mm}$ の繰返し載荷を行った。各載荷は24時間おいて行った。なお繰返し載荷は圧縮側で $13.8\text{mm}/\text{秒}$ 、引張り側で $28.6\text{mm}/\text{秒}$ の変位制御で行い、開始は圧縮側から行った。

4. 管軸方向載荷実験の結果

管軸方向の載荷実験のうち、まず小型土槽による結果例を図-4に示す。ただ単に飽和した状態では最大 $\pm 25\text{kgf}$ 位まで拘束がある大きなループを描いている。これが加振により液状化した後では最大 $1\sim 2\text{kgf}$ 位の非常に小さな拘束力しか発揮しなくなっている。なお、この実験では2サイクル目あたりから過剰間隙水圧が減少し（消散）して有効拘束圧が増え、拘束力も回復してきている。小型土槽の実験における変位～荷重関係の形状はすべてこのような傾向を示していたが、大型土槽の実験でも同様であった。

図-4のような変位～荷重関係をもとに、液状化にともなう限界せん断力の低減状況をまとめると図-5、6となる。ただし限界せん断力とは、大型土槽の場合は明瞭な降伏点が生じたため1サイクル目の押し側で生じた降伏荷重をとり、小型土槽では不明瞭なため最大荷重をとって、それぞれ管の周面積で除して算出している。図からわかるように、小型土槽、大型土槽の実験とも、不飽和や飽和状態に比べて、過剰間隙水圧比が大きくなるにつれて、限界せん断力比は大幅に減少している。ただし、小型土槽の実験によると、加振により液状化させた場合は、 $1/10$ 以下の限界せん断力に減少するのに対し、ボイリング

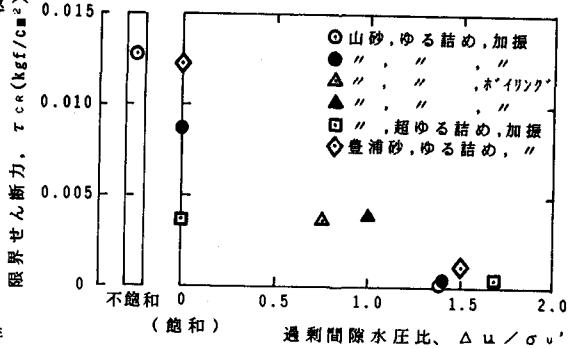


図-5 管軸方向限界せん断力と過剰間隙水圧比 (小型土槽)

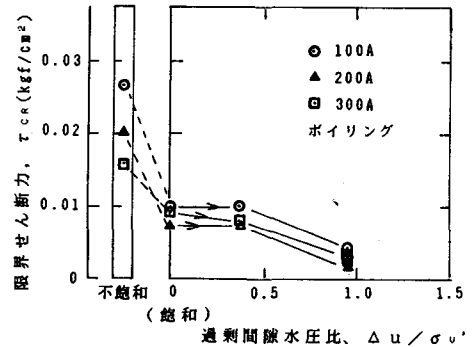


図-6 管軸方向限界せん断力と過剰間隙水圧比 (大型土槽)

の実験では減少割合が少し少ない。この原因の1つとしては、ボイリング実験における水圧の不均一分布が挙げられよう。つまり、模型地盤内の水平面内で均一に水圧が加わるように装置を工夫してはあがるが、実際には噴水は一様に生じておらず、拘束力が残

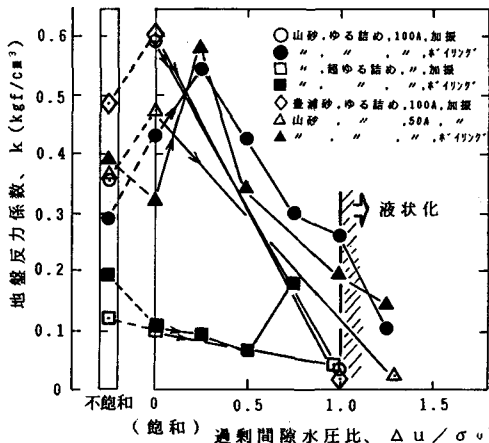


図-8 管軸直角方向地盤反力係数～過剰間隙水圧比 (小型土槽)

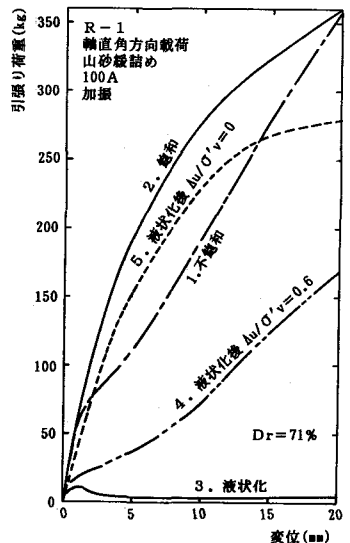


図-7 管軸直角方向変位～荷重関係例 (小型土槽)

っている部分があったことが考えられる。

5. 管軸直角方向載荷実験

小型土槽を用いた管軸直角方向載荷実験の結果例を図-7に示す。不飽和や飽和状態では変位とともに荷重が増大し、20mmでは約350kgfにも達しているのに対し、液状化した場合には約10kgfの拘束力しか生じていない。また試料を見てみると、不飽和や飽和状態では載荷につれて供試管より前面の上は少し盛り上りを生じているのに対し、液状化地盤では特に盛り上りは生ぜず、抵抗なく管が動いていた。なお、不飽和や飽和状態で変位とともに荷重が増加しピークが生じなかった原因としては、変位の増加とともに正のダイランシーが生じ、負の間隙水圧が発生して、みかけ上地盤が強くなったためと考えられる。また、ガイドをつけて供試管の動きを水平方向に限定していることや、土槽が小さいため、前面の壁に動きを止められた恰好になっていることも考えられる。

このように、飽和や不飽和状態では変位～荷重関係にピークが生じなかったが、液状化したものは2～3mmの変位でピークが生じているため、とりあえず、5mmの変位を基準にとり、その時点までの最大荷重をとって、投影面積と基準変位で除して地盤反力係数 k を算出してみた。これが図-8である。なお、50Aの管径の実験結果は、 k が管径の $-(3/4)$

に比例するとして、100Aの管径用に換算してある。図-8をみると、図-5と同様に液状化にともない k が大幅に減少しており、また、加振実験よりボイリング実験の方が減少の仕方が少ないことがわかる。

6. 液状化にともなう拘束力の減少割合

図-5, 6, 8をもとに、飽和状態での限界せん断力 τ_{cr} と地盤反力係数 k を基準にとり、 τ_{cr}/τ_{cr0} 、 k/k_0 と過剰間隙水圧比の関係プロットしてみると図-9, 10となる。図-9によると、大型土槽実験での関係と小型土槽実験でのそれとが、だいたい一致していると言えよう。また、図-9, 10ともボイリング実験の方が加振実験より減少割合が小さくなっている。ただし、これは、前述したように、ボイリング実験における水圧分布の不均一性に問題があることが考えられるため、少し差し引いて考えなければならぬかもしれない。加振実験によると、液状化地盤では飽和状態の時に比べて、1/10程度以下の限界せん断力や地盤反力係数に低下している。

7. あとがき

埋設管に対する液状化地盤の拘束力に関し、いくつかの条件を行ってその減少割合を調べてみた。なお、本研究は前埼玉大学教授久保慶三郎先生や東海大学の浜田政則教授他の方々の御指導のもとに行い、実験にあたっては九州工業大学の中島、山本、多田の各氏に御協力いただいた。末筆ながら感謝する次第である。

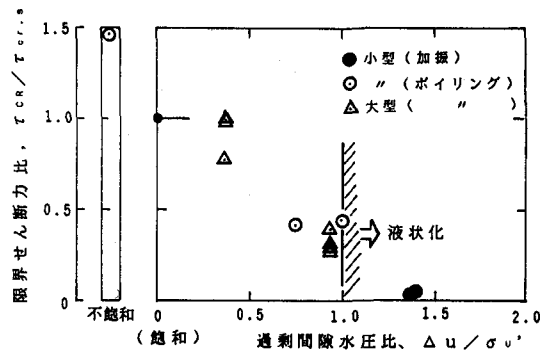


図-9 管軸方向限界せん断力比と過剰間隙水圧比

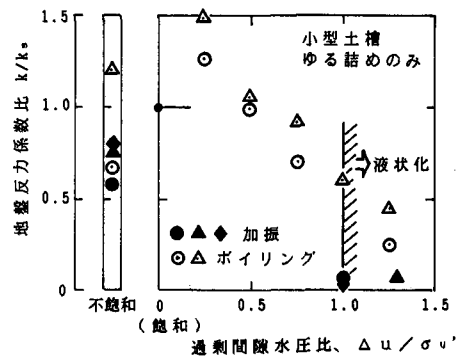


図-10 管軸直角方向地盤反力係数比と過剰間隙水圧比