

## (70) 埋設管に対する地盤の拘束力と液状化程度の関係

九州工業大学 大学院 学生員 ○規矩大義  
九州工業大学 工学部 正員 安田 進  
九州工業大学 大学院 学生員 吉田 剛

### 【まえがき】

緩い砂質土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、永久変位と呼ばれる大変形が生じたりする。その結果、地中構造物や地中埋設管には、大きな強制力が加わることが予想される。しかし、その一方で、液状化にともなって地盤が軟化するために、構造物や埋設管に対する地盤拘束力も減少してくることが考えられる。液状化の可能性のある地盤内に埋設された管路の安定性を検討するには、強制力の大きさだけでなく、地盤拘束力が液状化にともなって、どの様に変化するのかも問題にされ始めている。このことに関して、筆者達は小型土槽中に供試管を設置して模型実験を行ってきた<sup>1)</sup>が、液状化発生前の中間的な状態の実験を行うのに、ボイリングによる疑似液状化状態を作り出していた。しかし、昨年度より振動台を用いた加振実験によって、液状化程度を調節することが出来るようになり、いくつかのケースについては、既に実験を行っている。<sup>2)3)</sup> 本研究では、これまでの研究成果に加えて、さらに実験条件を変えるなどして、液状化地盤の拘束力を求めてみた。

これらの結果を以下に報告したい。

### 【実験装置】

図-1(a)(b)に実験で用いた土槽を示す。内径は長さ80 cm、奥行60 cm、深さ70 cmで、正面はガラス面にしてある。側壁内側には、壁面の影響を軽減するために、厚さ5 cmのラバーを張り付けている。土槽内には図に示しているように供試管(PLP鋼管100A)を設置し、電動モーターによる載荷装置と連結させて、管軸方向、管軸直角方向に対しそれぞれ、押し引き荷重、引っ張り荷重を加えられるようにしている。土槽内には間隙水圧計、加速度計を配し、荷重はロードセル、変位は変位計にて測定を行った。

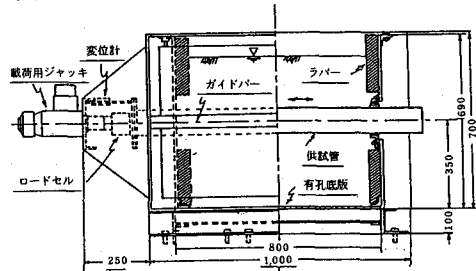
### 【実験条件及び実験方法】

模型地盤には、試料として豊浦標準砂を用いた。管軸方向、管軸直角方向ともに模型地盤の密度は、中密( $D_r = 65 \sim 75\%$ )と緩詰め( $D_r = 25 \sim 40\%$ )の2種類とし、液状化程度(過剰間隙水圧比)を6段階(0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0)に変えて、計24ケースの実験を行った。

模型地盤は、中密では水中落下法、緩詰めでは空中落下法を用いて、詰め方一定で密度管理を行いながら作成した。

模型地盤作成後、しばらく放置して、十分に飽和化を図り、水位を調節(GL -2 cm)して、水圧が安定したことを確認してから実験を開始した。各ケース共、振動台を加振して、過剰間隙水圧が所定の値に達したら、加振を急速に弱めてやり、水圧がその値で安定してから、供試管に載荷を開始した。加振には3 Hzの正弦波を用い、数波～十数波で所定の過剰間隙水圧に達するよう加速度を調節している。また、供試管への載荷は2 mm/秒の変位制御で行い、管軸方向実験では±10 mmの繰返し変位を、軸直角方向実験では40 mmまでの引っ張り変位を与えた。

(a) 管軸方向



(b) 管軸直角方向

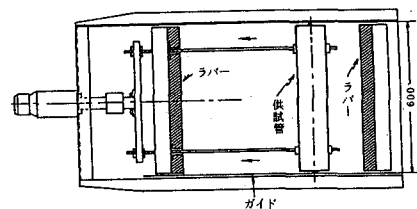


図-1 実験装置

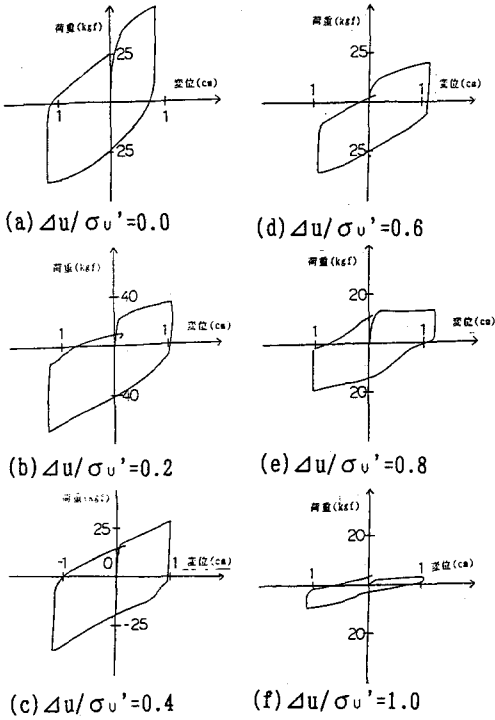


図-2 履歴曲線（中密）

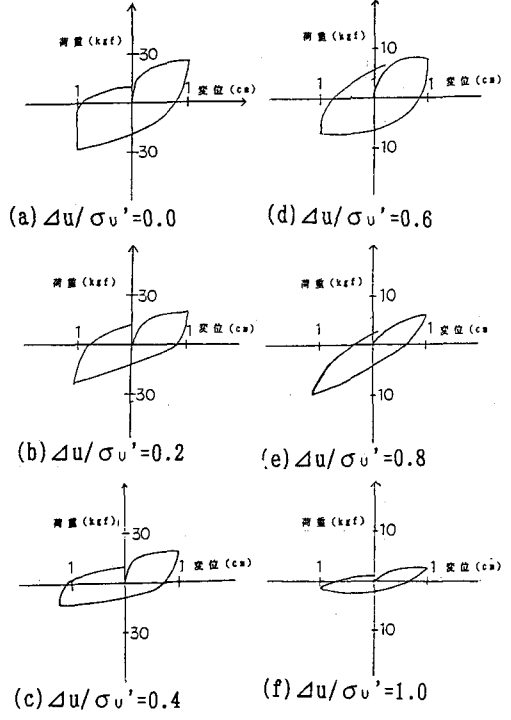


図-3 履歴曲線（緩詰め）

【管軸方向載荷実験】

図-2 (a)~(f)、図-3 (a)~(f)に中密、緩詰めにおける、6段階の過剰間隙水圧比での変位~荷重履歴曲線を示す。曲線の形状を見ると、中密(図-2)に関して、(a)水圧比が0.0の時は、載荷直後は大きな荷重が出

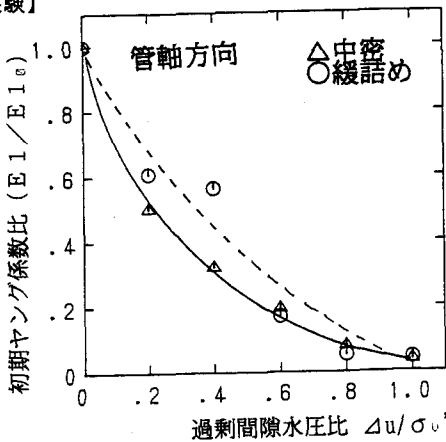


図-4 初期ヤング係数の低下

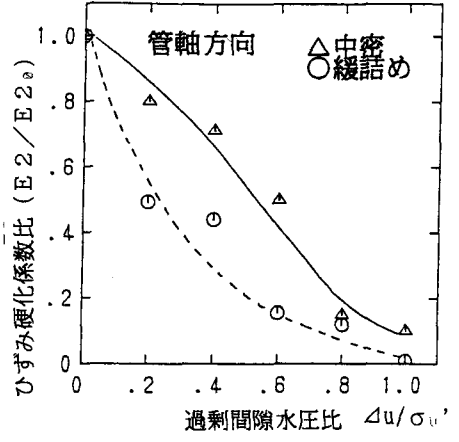


図-5 ひずみ硬化係数の変化

るが、変位が大きくなるにつれて勾配は小さくなっていく。(b)~(e)では、載荷直後の傾向は同じだが、変位がある点を過ぎると勾配が急変し、最大荷重に至っている。(f)完全に液状化した状態では、載荷直後に少し荷重は出るが、それ以降は荷重の増加はみられず、剛塑性的な挙動を示している。一方、緩詰め(図-3)の方を見ると、(a)~(d)水圧比0.0~0.6では、絶対的な拘束力の差はあるものの、中密の場合とほぼ同様の傾向をしている。(e)(f)水圧比0.8になると、前半の半サイクルは、中密の完全液状化時とほとんど同じ形状となっている。そこで、これらの変位~荷重履歴曲線に対して、バイリニア近似を行って、各ケースの第1分岐の傾き(初期ヤング係数)  $E_1$ 、第2分岐の傾き(ひずみ硬化係数)  $E_2$ 、及び限界せん断力  $\tau_{cr}$ と過

剩間隙水圧比の関係を求めてみた。この結果を図-4、5、6に示す。ここで、勾配 $E_1$ 、 $E_2$ については過剩間隙水圧比が0の状態で作られた値で割って正規化している。また、限界せん断力に関しては、変位10mmまでの最大荷重を供試管の表面積で除して求めている。

図-4より、初期ヤング係数 $E_1$ は、水圧比0.2の時には、水圧比0の状態の半分程度まで低下しており、液状化初期の段階から剛性はかなり低下しているといえる。そして、完全に液状化した状態では1/25~1/30程度まで低下がみられた。中密と緩詰めでは、中密の地盤の方が液状化初期の段階で若干低下の割合が大きいといえそうである。図-5より、ひずみ硬化係数 $E_2$ も、液状化程度が激しくなるにつれて小さくなり、完全液状化時には水圧比0の状態の1/10程度以下になっている。特に緩詰めの方は、水圧比0.6あたりで勾配がほとんどなくなり、完全液状化時には全く傾きがない。

図-6を見ると、限界せん断力 $\tau_{cr}$ は、過剰間隙水圧比に対してほぼ直線的に低下しているが、これはせん断強度が拘束圧に比例する事実とも一致している。

図中には、 $D_r$ の平均値から有効拘束圧を算出して求めたせん断強度の理論値 $\tau_l = \sigma' \tan \phi'$ も示している。これによると、中密で $\phi' = 25 \sim 30^\circ$ 、緩詰めでは $\phi' = 15 \sim 20^\circ$ あたりを仮定すると実験値と傾向があってくるようである。

#### 【管軸直角方向荷重実験】

図-7、8に管軸直角方向の実験での中密、緩詰めの変位~荷重の関係を示す。また、図-9、10には管軸方向と同様に、これらの関係に対して、バイリニヤ近似を施して得られた、地盤反力係数 $k_1$ 、地盤反力係数(第2) $k_2$ と過剰間隙水圧比の関係を示す。

まず、飽和させただけで、加振を行わないで荷重したケースを見ると、中密、緩詰め共に、変位が大きくなるにつれて荷重も増大していく。40mmの時点での、両者の荷重を比較すると、中密で500kgf、緩詰めでは350kgf程度となっている。加振によって過剰間隙水圧を発生させると、液状化程度に応じて段階的に拘束力が減少してきているが、中密では、液状化程度の低いうちは、地盤反力係数 $k_1$ もあまり低下していない。そして、変位の増加にともない、かなり大きな拘束力を発揮した後に、20mm程度の変位で降伏した。完全液状化の場合は、5mm程度の変位で一度降伏して、荷重が一定値を示したが、さらに変位が大きくなって、間隙水圧の値が負になりつつ、再び荷重が増加してい

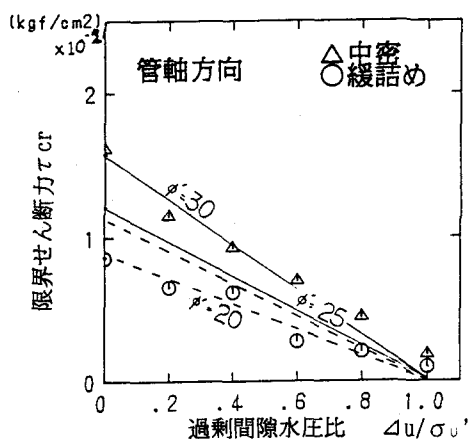


図-6 液状化程度と限界せん断力

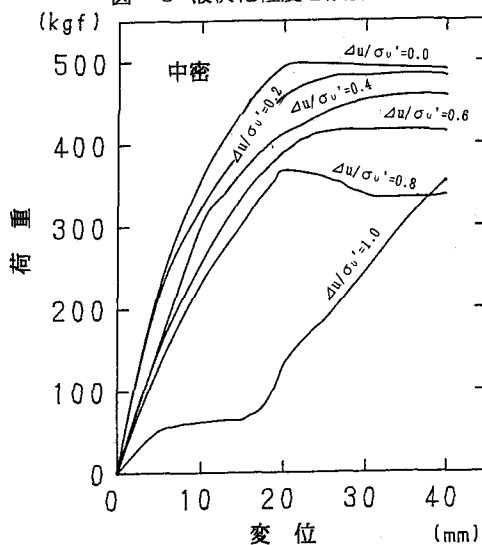


図-7 変位~荷重関係 (中密)

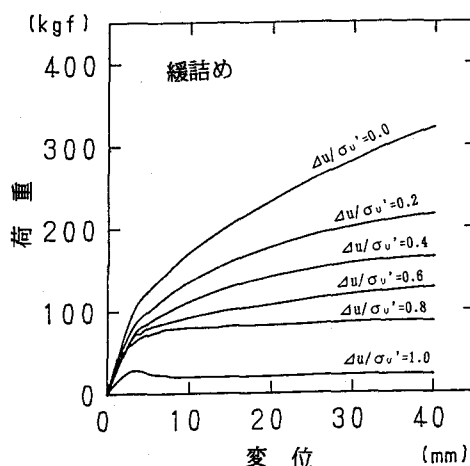


図-8 変位~荷重関係 (緩詰め)

く結果となった。これは、密な地盤では、変位の増加とともに正のダイラテンシーが生じ、負の間隙水圧が発生して、見かけ上の地盤強度が増したためであると考えられる。さらに、ガイドレールによって管が地表に飛び出すことを防いでいることや、土槽の大きさが小さいこともあって前面の壁に動きを止められた格好になっていることの影響も含まれているかも知れない。

一方、緩詰めの場合は正のダイラテンシーが生じにくいこともあって、この様な傾向は見られず、液状化程度が激しくなるにつれて、地盤反力係数  $k_1$ 、地盤反力係数 (第2)  $k_2$  共に低下してくる。完全液状化の状態では、3 mm 程度の変位で、荷重のピークを示したが、加振していない状態や、中間液状化の状態では、変位量 5 mm の付近で変位～荷重曲線が変曲するものの、明瞭なピークは見られなかった。これは、供試管が移動することによって、管の前面の土が締っていき、荷重が増加したのではないかと考えられる。

次に、各ケースの最大荷重と、過剰間隙水圧比がゼロの時の最大荷重との比を求めた結果を図-11に示す。ここで、緩詰めに関しては 20 mm、40 mm までの最大荷重で整理している。また、中密の完全液状化時は、最初の降伏荷重の値を用いている。これを見ると、中密では液状化初期で荷重はあまり低下しておらず、液状化程度が激しくなってから大きく荷重が低下している。これに対し、緩詰めでは、水圧比 0.4 のときに、既に半分以下に低下してしまっていることが読み取れる。完全液状化状態では、水圧比が 0 の状態に比べて、中密、緩詰め共に 1/10 程度以下の拘束力しか発揮していない。

【あとがき】

埋設管に対する液状化地盤の拘束力に関し、振動台での加振により実験を行ってみた。その結果地盤の拘束力は、液状化の程度に応じて大きく低下することが分かった。さらに、載荷方向、地盤の条件により低下の割合だけでなく、低下のしかたにも違いがあることがわかり、新たな知見も得られた。今後もさらに研究を進めていきたい。なお、本研究は文部省科学研究費

(一般B)の補助を受けている。また、実験、計測に関しては基礎地盤コンサルタンツ(株)の梅内勝彦氏に数々の御助言を頂いた、感謝する次第である。

【参考文献】

- 1) 安田、斉藤、鈴木: 埋設管に対する液状化地盤の拘束力、第19回地震工学研究発表会講演概要、1987
- 2) 安田、規矩、吉田: 埋設管に対する地盤の拘束力と液状化の関係、第24回土質工学研究発表会、1989
- 3) 安田、規矩、吉田: 液状化による埋設管の直角方向地盤反力の減少、第44回土木学会年次学術講演会(投稿中)、1989

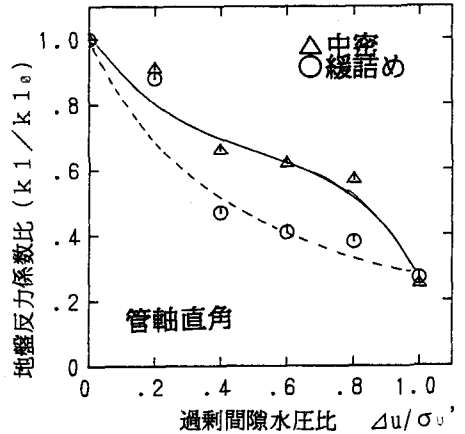


図-9 地盤反力係数の低下

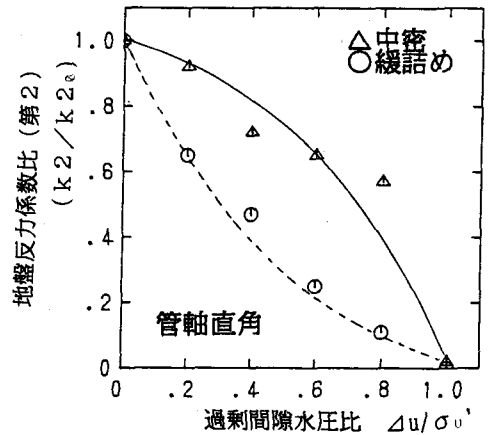


図-10 地盤反力係数(第2)の変化

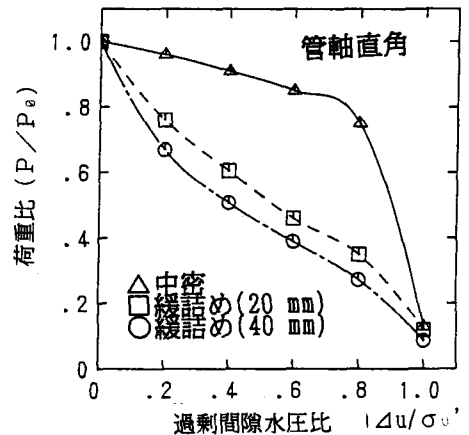


図-11 液状化程度と拘束力の低下