

液状化試験時の拘束圧に関する一考察

飛島建設(株) 正会員 大野 孝二
東京電力(株) 正会員 佐藤 博

飛島建設(株) 正会員 沼田 淳紀
東京電力(株) 正会員 田中 典明

1. はじめに

原地盤の液状化強度を評価する場合、一般に、試料採取位置の有効上載圧 σ_v' を三軸試験の拘束圧 σ_c' として¹⁾繰返し非排水三軸試験（以下、液状化試験と呼ぶ）を実施し液状化強度比 $(\sigma_d/(2\sigma_c'))$ を求め、原地盤での応力状態に補正して²⁾³⁾検討を行う。このとき、液状化強度 (τ_d) は拘束圧に正比例すると仮定している。しかしながら、拘束圧と液状化強度比の関係は、拘束圧が低下するほど液状化強度比が大きくなる拘束圧依存性¹⁾⁴⁾⁵⁾、過圧密履歴の影響⁶⁾⁷⁾、微小せん断ひずみの影響⁸⁾により、拘束圧が小さくなるほど液状化強度比が大きくなることが知られている。これらを考慮すると、 $\sigma_c' = \sigma_v'$ として液状化試験を実施するのは、設計時の液状化強度を過小評価しているとも考えられ σ_c' を σ_v' より小さく設定し、液状化強度を大きく評価できる可能性を考えた。地盤内は異方応力状態であるので液状化試験を行うには等方応力の拘束圧に置き換える必要があるが、この拘束圧として地盤内の有効水平応力 σ_h' 、有効平均主応力 σ_m' 、有効上載圧 σ_v' 等が考えられる¹⁾。そこで、この範囲でどの程度拘束圧を低下できる可能性があるのかを考えるため、異方圧密状態での地盤について等方圧密状態で圧縮試験を行うと、地盤内のどの応力状態に近いのか、原位置不攪乱試料と再構成試料を用いて検討した。

2. 原位置での不攪乱試料を用いた検討

不攪乱試料の採取地盤は、海岸沿いの埋立地盤で GL-16m 付近までは N 値が 4~8 の埋土層、それ以深はシルト質砂と砂の互層である。埋土層は、サンドコンパクションパイル工法（以下、SCP）により地盤改良が行われ、地盤改良後の N 値は最大で 25 程度である。また、ダイラトメータによる K_0 の測定結果によると、地盤改良前の K_0 は 0.5 で、地盤改良後は 0.75 程度であった。採取した試料の土質は、平均で 50% 粒径が 0.38mm、細粒分含有率が 2.3%、均等係数が 2.3 の均等粒径の砂である。不攪乱試料は、地盤改良前後でトリプルチューブサンプリングにより行われ、ここでの検討では GL-9.5~12.5m で採取された試料を用いた。地盤改良後の SCP 打設杭に対する試料採取位置は、2.75m ピッチの四角形配置の対角中央および辺中央である。

このような不攪乱試料について、圧密降伏応力を求めることを主な目的として繰返し圧縮三軸試験を実施した。用いた試験装置の模式図を図-1 に示す。キャップとロッドが外れるタイプの三軸試験装置を用いた。供試体寸法は、直径 75mm×高さ 150mm または直径 80mm×高さ 160mm であり、圧密による排水量は電子計りで計測した。圧密時間は、載荷時および除荷時ともに各ステップ 20 分である。

図-2、3、4 に、地盤改良前、地盤改良後（対角中央および辺中央）の圧縮曲線を示す。図中には、有効上載圧 σ_v' と有効平均主応力 σ_m' も併せて示した。いずれの図においても、載荷除荷を繰り返すことで、明瞭に正規圧密領域と過圧密領域が現れることがわかる。図-2 より、 σ_v' は明らかに正規圧密領域にあり圧密降伏応力 p_c は 90kN/m² 付近で σ_m' に近いことがわかる。図-3 の地盤改良後の対角中央の p_c は、やや不明瞭であるが 100~120kN/m² 付近であり、改良前より大きく σ_m' と σ_v' のどちらにも近い。図-4 の地盤改良後の辺中央の p_c は、対角中央と同程度の 100kN/m² 付近であり、改良前より大きく、明らかに σ_m' に近い。改良後に p_c が増加したのは、SCP による K_0 の増加によるものと考えられ、 σ_m' を用いてこのような K_0 による地盤改良効果を確認できる可能性があることがわかる。

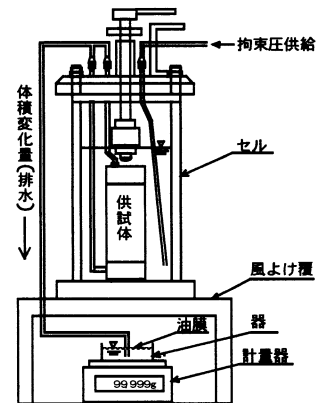


図-1 試験装置

3. 豊浦標準砂を用いた検討

不攪乱試料を用いて得られた結果を確認するために、豊浦砂を用いた繰返し圧縮三

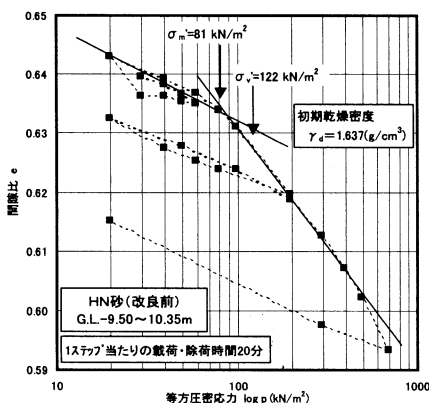


図-2 圧縮曲線（地盤改良前）

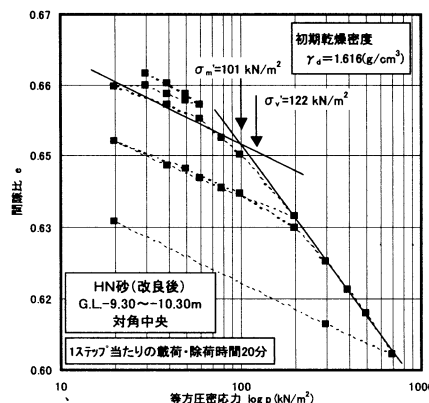


図-3 圧縮曲線（地盤改良後、対角中央）

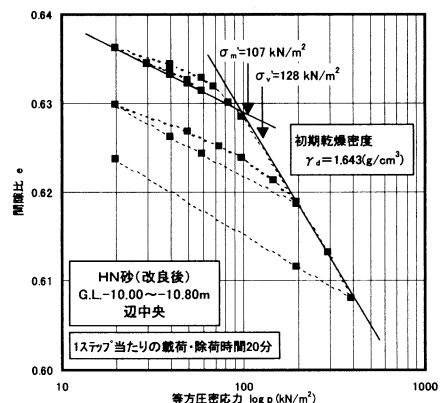


図-4 圧縮曲線（地盤改良後、辺中央）

液状化、拘束圧、圧密降伏応力、過圧密、異方圧密

〒270-0222 千葉県葛飾区関宿町木間ヶ瀬 5472 飛島建設(株)技術研究所, TEL 0471-98-7553 FAX 0471-98-7586

〒230-8510 神奈川県横浜市長谷区江ヶ崎町 4 番 1 号 東京電力(株)電力技術研究所, TEL 045-613-3365 FAX 045-613-3399

軸試験を行った。用いた試験装置は、通常液状化試験で使用する三軸試験装置で、図-1 と異なりキャップとロードが固定されている。供試体は、相対密度が 55%程度と 85%程度になるように、空中落下法を用いて作成した。供試体寸法は直径 100mm×200mm である。圧密排水量はビューレットで計測した。圧密時間は、各ステップ 10 分である。図-5 に、試験における载荷順序を示す。地盤の異方応力状態を再現するために、最初に、a 点から b 点まで $K_0=0.5$ となるように段階的に軸荷重とセル圧をそれぞれ 196kN/m² および 98kN/m² まで増加させ 1 日放置した後、a 点まで段階的に除荷し、等方状態に戻した。その後繰返し圧縮三軸試験を行うために、1 から 3 サイクルの载荷除荷を等方応力で行った。この一連の応力経路の順序は a→b→a→c→a→d→a→e→a となる。

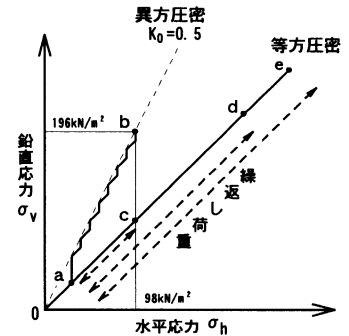


図-5 豊浦砂の応力経路

図-6, 7 に、相対密度 55%と 84%の圧縮曲線を示す。それぞれ(a)は全行程を示す。原地盤の不攪乱試料同様に、過圧密領域と正規圧密領域が現れている。また、1 サイクル目は完全に過圧密領域であることがわかる。しかしながら、圧密降伏応力は σ_{hc}' 以上であることは明らかであるが不攪乱試料のように明瞭に現れず、正規圧密領域と考えられる領域も上に凸な曲線になっている。そこで、見やすくするために、(b)および(c)に 2 サイクル目と 3 サイクル目の载荷過程を抜き出して示した。2 サイクル目は事前に異方圧密した供試体の圧縮曲線を意味し、3 サイクル目は事前に等方圧密した供試体の圧縮曲線を示していることとなる。試験条件より正規圧密となる領域がわかっているので、その部分を図中に示した。それほど明瞭ではないが、相対密度が 55%の場合も 84%の場合も p_c が(b)の 2 サイクル目では σ_{vc}' より小さく σ_{mc}' に近く、(c)の 3 サイクル目では p_c が事前に载荷した等方の圧密応力 ($=\sigma_{vc}' = \sigma_{hc}'$) に近いことがわかる。

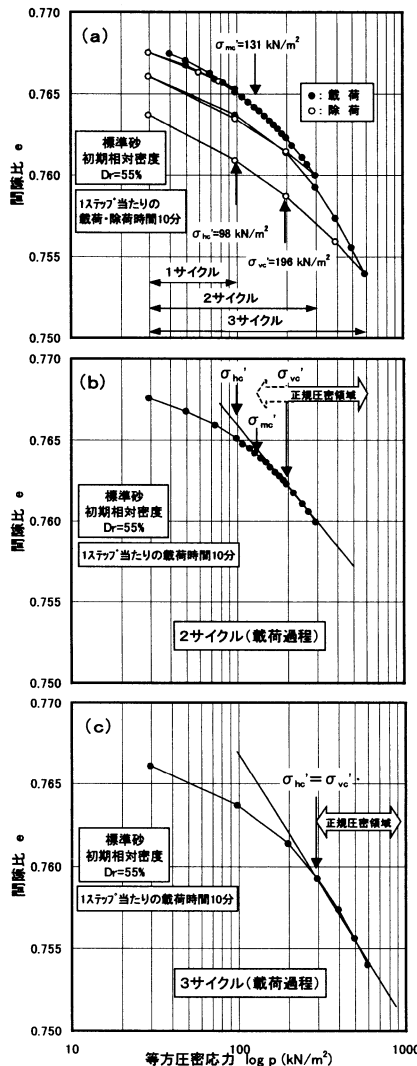


図-6 豊浦砂の圧縮曲線 (Dr=55%)

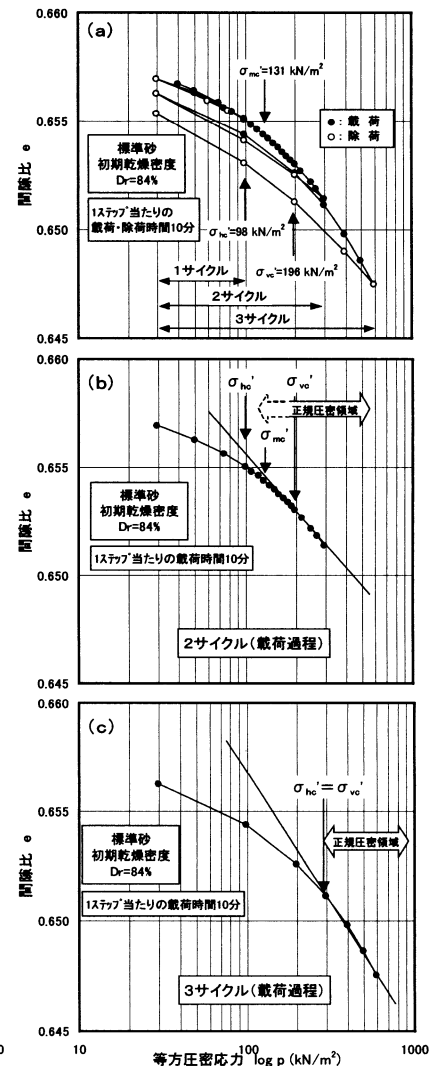


図-7 豊浦砂の圧縮曲線 (Dr=84%)

4. まとめ

(1) K_0 状態にあった地盤について等方の

圧縮試験を行うと、これによって求められる圧密降伏応力は事前に载荷された有効水平応力より明らかに大きく、有効上載圧より小さく、有効平均主応力に近いことがわかった。

(2) サンドコンパクションパイル工法による K_0 の増加傾向を繰返し圧縮三軸試験により評価することができた。

参考文献

- 1) Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tokida, K. and Kon-no, M.: Cyclic undrained triaxial strength of sampled sand affected by confining pressure, Soils and foundations, Vol.21, No.2, pp.115-120, 1981.1.
- 2) 日本道路協会: 7.5 砂質地盤の液状化の判定, 道路橋示方書・解説 V 耐震設計, pp.91-95, 1996.12.
- 3) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-Value and Fines content, Soils and foundations, Vol.23, No.4, pp.57-74, 1983.12.
- 4) 柚木 裕二, 石原 研而, 関 元治, 米田 吉博: 密な砂の繰返し三軸せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響, 第 17 回土質工学研究発表会, pp.1649-1652, 1982.
- 5) 望月 美登志, 福島 伸二: 低拘束圧領域における砂の液状化特性, 第 28 回土質工学研究発表会, pp.917-918, 1993.6.
- 6) Ishihara, K. and Takatsu, H.: Effects of overconsolidation and K_0 condition on the liquefaction characteristics of sands, Soils and foundations, Vol.19, No.4, pp.59-68, 1979.12.
- 7) 森 信夫, 玉置 克之, 社本 康広, 桂 豊, 宇野 寿郎, 吉見 吉昭: 洪積砂地盤の液状化抵抗に及ぼす拘束圧の影響, 第 28 回土質工学研究発表会, pp.919-920, 1993.6.
- 8) 西 好一, 小峯 秀雄, 飯島 健: 拘束圧と中ひずみせん断履歴が液状化強度と初期せん断剛性率との関係に及ぼす影響, 第 23 回土質工学研究発表会, pp.687-688, 1988.6.