

砂のP波速度及び液状化特性に及ぼす 飽和度の影響

中澤博志¹・石原研而²・塚本良道³
鎌田邦夫⁴・大山敦郎⁵

¹正会員 工修 東京理科大学助手 理工学部 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

³正会員 Ph.D. 東京理科大学講師 理工学部 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

⁴学生会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

⁵正会員 工修 日本工営株式会社 国際事業本部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-5)

通常、室内において液状化強度を求める際、地下水位以下の地層が完全飽和状態という前提条件に先立ち試験が実施される。しかし、必ずしも地下水面位下の地層が完全飽和状態であるとは限らないことが既往の研究から明らかになっている。

本研究では不飽和砂の液状化強度を把握するため、豊浦砂を使用し飽和度を変化させながら、P波速度計測及び非排水繰返し三軸試験を実施した。その結果、液状化強度はP波速度やB値の低下に伴い増大し、完全飽和時の液状化強度に対し最大約2倍を示すという結果を得た。一連の検討から、P波速度を考慮することにより、原位置の飽和度を考慮した砂の液状化強度の把握が可能であることを示唆した。

Key Words : B-value, P-wave velocity, undrained cyclic shear behavior, liquefaction strength

1. はじめに

一般に液状化強度を求める場合、地下水面以下の飽和砂質土を対象としている。これは、地下水面以下の飽和砂質土層が一様に完全飽和しているという前提に先立つものである。しかし、狐崎¹⁾は弾性波速度の現地測定に基づき、地下水位以下の地盤に不完全飽和と見られる砂層が存在することを指摘している。また、吉見²⁾は、不飽和状態における砂の液状化強度が完全飽和飽和状態における液状化強度より大きいことを報告している。

本研究では原位置の飽和度を直接測定することが困難であることから、室内試験において、弾性波速度($V_p \cdot V_s$)計測と非排水繰返し三軸試験を実施し、P波速度 V_p 、飽和度 S_r 及び間隙水圧係数B値の各々の相関性をについて検討し、飽和度が砂の V_p と液状化特性に与える影響を把握すること及び飽和度を考慮した砂の液状化強度について評価することを目的とした。

2. 試料及び試験概要

(1) 試料及び供試体作成方法

本研究で使用した試料は豊浦砂である。その物

性値は $D_{50}=0.18\text{mm}$ 、 $G_s=2.65$ 、 $U_c=1.41$ 、 $U_c'=0.78$ 、 $e_{\max}=0.968$ 、 $e_{\min}=0.609$ であり、粒形の揃った特徴を有している。

供試体は、三軸試験機にセットされたモールド内に空中落下法により気乾状態の豊浦砂を漏斗から落下・堆積させ作成した。本研究では、試料落下高さを変えることにより $Dr=40, 60, 70\%$ の供試体を作成した。以後、試験試料は Dr と対応させ、TS40, TS60, TS70とそれぞれ呼ぶこととする。

(2) 試験方法

作成された供試体は脱気水を通水し、 $\sigma_v' = 98\text{kPa}$ を保持しながら背圧を供試体に負荷し、減圧法によりB値を測定することで飽和度の制御を行った。

$V_p \cdot V_s$ 計測は、B値が不完全飽和状態である $B=0.1, 0.2, 0.6$ 、また、完全飽和状態と見なされる $B \geq 0.96$ を示した時に実施した。 $V_p \cdot V_s$ 計測では、図-1に示すように三軸試験機のキャップ、ペダスタルにそれぞれP波発信子及び受信用の加速度計、S波発信用及び受信用のベンダーエレメントを内蔵させ使用した。キャップ内部の両発信子はファンクシオンジェネレータと電圧増幅アンプを通して起動され、ペダスタル内部の受振子からチャージアンプ、オシロスコープを通して発信波を受信する。

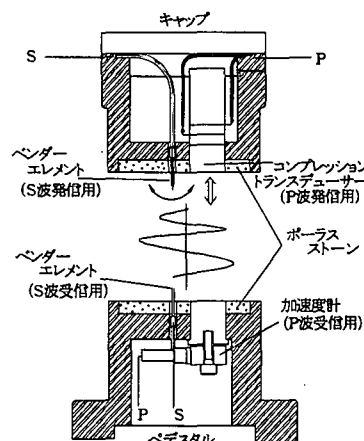


図-1 弾性波発信・受信部

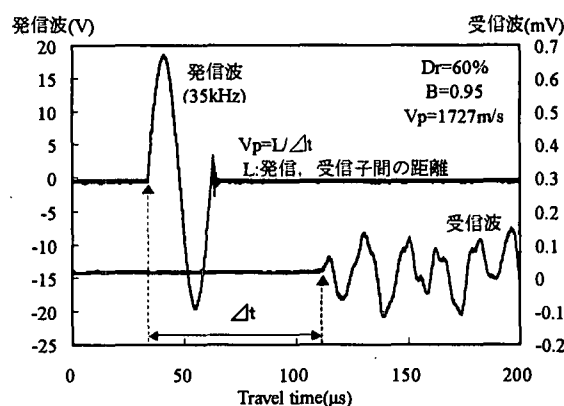
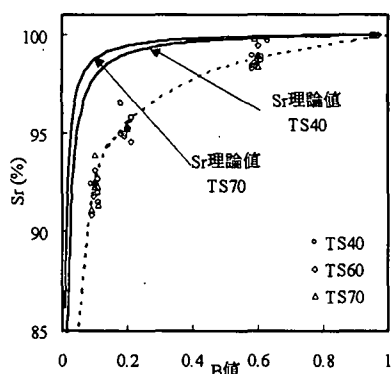
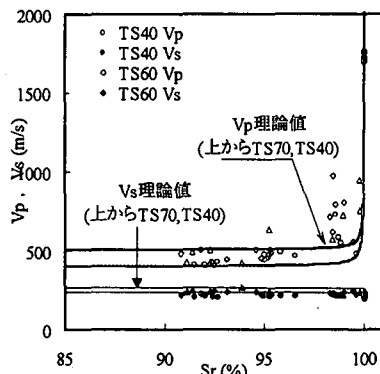


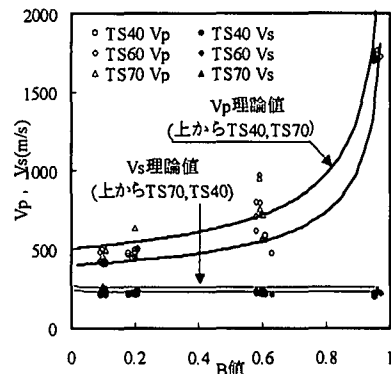
図-2 走時波形(P波)の一例(TS60)



(a) B値とSrの関係



(b) Srと弾性波速度の関係



(c) B値と弾性波速度の関係

図-3 Sr, B値, 弾性波速度の関係

図-2に、 $V_p \cdot V_s$ 計測で得られた走時波形の一例を示す。伝播速度の算定にあたり、発信・受信子間の距離 L を供試体に付加した発信波と受信波形の初動の立上がり時間差 Δt で除して求めた。

$V_p \cdot V_p$ 測定後、平均主応力一定条件の下、非排水繰返し三軸試験を載荷周波数0.1Hzのsin波で実施し、所定の Dr と B 値に対する液状化強度 R_l （軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ 、繰返し載荷回数 $N_c=20$ ）を求めた。試験終了後、含水比を測定することにより S_r を算出した。なお、平均主応力一定条件は、平均主応力を繰返し載荷中、常に一定に保つことにより、供試体に繰返しせん断応力のみを作用させることが出来る。したがって、不完全飽和状態において、飽和度を考慮した液状化強度の把握が可能になるという利点を有している。

3. 試験結果及び考察

(1) 弾性波速度計測結果

図-4に S_r , B 値及び弾性波速度の関係を示す。図中に示す理論値は、石原³⁾による多孔質弾性理論より求めた。

B 値と S_r の関係において、実験値と理論値を比較すると、 B 値に対し S_r は同様な傾向を示すものの、実験値の方が低い値を示している。これは供試体

内の気泡の不均質性や試験後の含水比測定の際に生じた人為的な誤差によるものと考えられる。また、 $B \leq 0.2$ の範囲では S_r の低下が顕著であり、 $S_r \leq 90\%$ の範囲において曲線が $B=0$ に漸近していく様子がわかる。次に S_r と V_p の関係をみると、 V_p は理論値で $S_r \leq 99\%$ 、実験値で $S_r \leq 98\%$ の範囲でほぼ一定値を示し、 S_r がこれ以上増加すると V_p が敏感に反応し急増している。一方、 B 値と V_p の関係をみると、 B 値の増加に対し V_p が緩やかに増加し、 $B=0.1$ で示す $V_p \approx 400 \sim 500 \text{ m/s}$ から完全飽和状態では $V_p \approx 1700 \text{ m/s}$ に達している。また、 S_r と V_p の関係と比較すると、 B 値と V_p の関係の方が良い相関を示している。

以上より、 V_p を測定することにより、地盤の飽和度の推定が可能であることがわかる。また、測定上、比較的誤差が生じにくい B 値が精度が良いと考えられる。しかし、 $S_r \leq 95\%$ の範囲では、 B 値にほとんど変化が無いため、 V_p から B 値を判断する際には極めて S_r が高い場合に限られる。

(2) 非排水繰返し三軸試験結果

図-4にTS40とTS70の代表的な軸ひずみ両振幅 DA 及び過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ の時系列を示す。両試料共に B 値が低下することにより、変形が生じるまでに多くの繰返し載荷回数 N_c を要しているこ

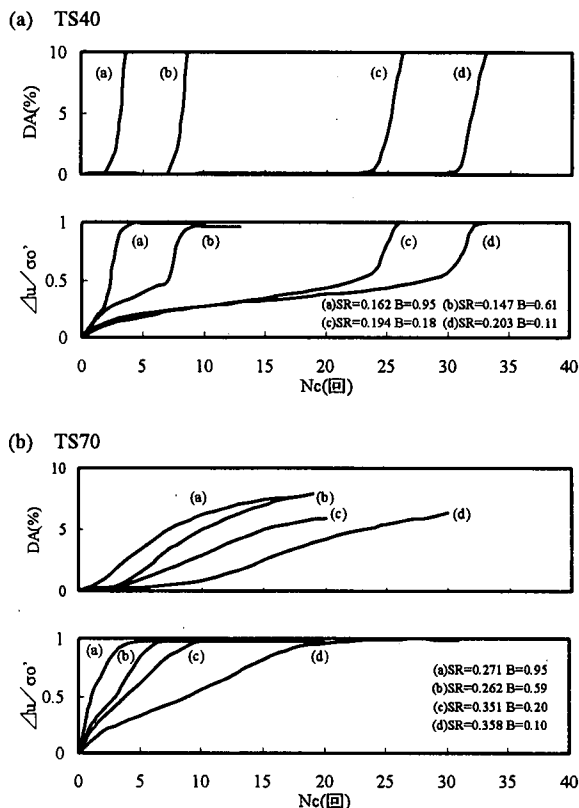


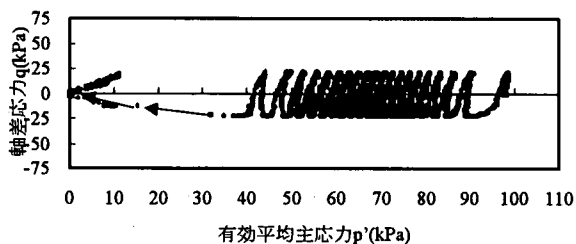
図-4 DA, $\Delta u/\sigma'$ の時系列変化

とがわかる。しかし、DA について比較すると、その発達の様子が異なっている。TS40 では B 値に関わらず、変形が生じ始めてから一気に変形を生じ破局的な挙動を示すが、TS70 では軸ひずみの発達が緩やかである。また、 $\Delta u/\sigma'$ を比較すると、TS40 において、B 値が高い場合、繰返し載荷回数後、急激に Δu が上昇し一気に初期有効拘束圧に至っているが、B 値の低下に伴い徐々に $\Delta u/\sigma'$ が蓄積される様な挙動に変化する。一方、TS70 では DA と同様に、 $\Delta u/\sigma'$ は緩やかな挙動を示している。

図-5 に TS40 における代表的な有効応力経路を示す。B=0.95 における有効応力経路を見ると、繰返しせん断中に伸張側のある点において、一気に有効応力経路が原点に向かって消失（図中←）し、飽和した緩い砂の典型的な経路を示している。一方、B=0.18 では完全飽和状態に比べ、 Δu の蓄積が緩やかなため、B=0.95 の時のように一気に有効応力を消失するような現象は見られない。また、B が低下することにより、いわゆるサイクリックモビリティの様相を呈する。

次に、B 値が繰返し載荷回数に及ぼす影響を見るため、DA=1%、5%に達した時の繰返し載荷回数をそれぞれ N_1 、 N_5 として、図-6 に B 値と N_5/N_1 の関係を示す。仮に $N_5/N_1=1$ の場合、繰返しせん断により DA=1%に達すると同時に一気に DA=5%に至る

(a) $Dr=40.3\%$ $Sr=100\%$ $B=0.95$ $SR=0.111$ $N_c=20.2$



(b) $Dr=39.5\%$ $Sr=95.0\%$ $B=0.18$ $SR=0.194$ $N_c=25.7$

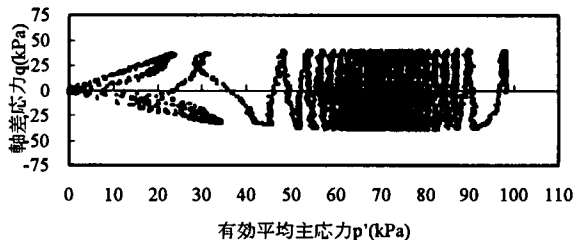


図-5 有効応力経路(TS40, TS70)

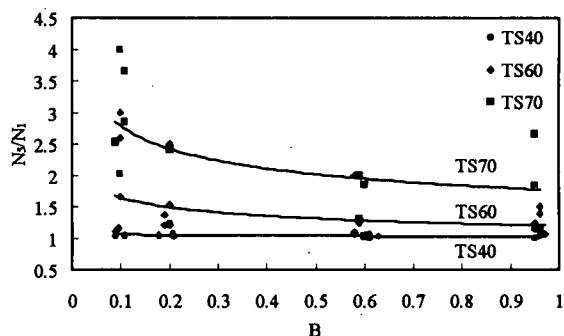


図-6 B 値と N_5/N_1 の関係

ことを意味し、変形が生じてから DA の発達が緩やかな程、 N_5/N_1 は 1 よりも大きな値を示す。図-6 より、TS40 においては B 値に関わらず $N_5/N_1 \approx 1$ を示しているが、 Dr の増加及び B 値の低下に伴い、 N_5/N_1 が増大し、変形が生じ始めてからも粘り強い挙動を示す。

(3) 飽和度を考慮した液状化強度の評価

図-7 に Sr 、B 値及び V_p の諸量と液状化強度 R_L ($DA=5\%$, $N_c=20$) の関係をそれぞれ示す。B 値に関しては、 Dr に関わらず同様な曲線形状を示し、B 値の低下に伴い R_L は緩やかな増加傾向を示す。一方、 V_p と R_L の関係における曲線形状の傾向は、緩やかな変化を示す B 値や Sr と様相が異なっている。TS40 では $V_p=500 \sim 1700$ の範囲では R_L にあまり変化は見られないものの、 $V_p=500$ m/s において R_L が急増する傾向を示す。また、 Dr が増大すると、TS40 で示す様な傾向はやや緩和され、 $V_p=700$ m/s を下回る範囲で R_L が徐々に増加する傾向を示す。

ここで、完全飽和時の液状化強度 ($B \geq 0.95$) を R_s 、不飽和状態 ($B < 0.95$) にある液状化強度を R_u として、図-8 に Sr 、B 値及び V_p の諸量と液状化強度増加率 R_u/R_s の関係をそれぞれ示す。 R_u/R_s は飽和度の低下、或いは V_p の減少に伴う完全飽和状態に対する R_L の増加比率を示すものである。なお、比較として既

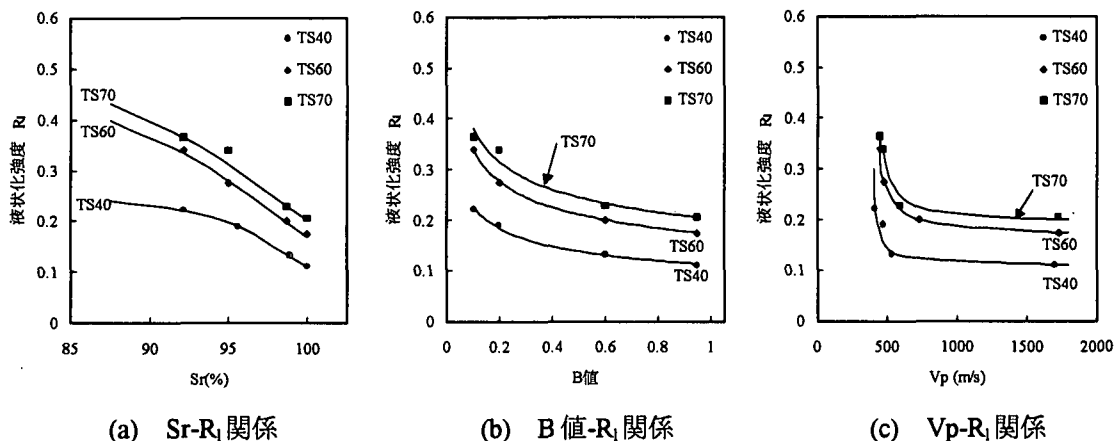


図-7 Sr , B 値及び V_p と液状化強度の関係

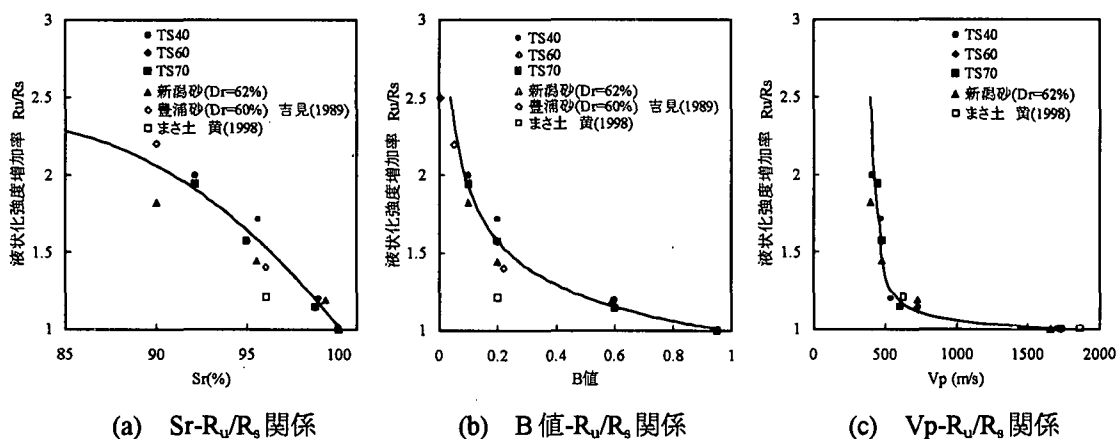


図-8 Sr , B 値及び V_p と液状化強度増加率 R_u/R_s の関係

往の研究²⁾⁴⁾における試験結果も併記した。 Sr や B 値に対する R_u/R_s には若干ばらつきが認められるが、試料や Dr に関わらず、 Sr , B 値及び V_p に対し、 R_u/R_s は概ね単一の相関関係が認められる。また、完全飽和状態から $B=0.1$ まで飽和度が低下することで、 V_p は $V_p=1700\text{m/s}$ から $V_p=500\text{m/s}$ まで低下し、これに伴い、 R_u/R_s が最大で $R_u/R_s \approx 2$ に達することがわかった。

4. まとめ

今回、 Dr の異なる豊浦砂(TS40, TS60, TS70)において、弾性波速度計測と非排水繰返し三軸試験を実施した。飽和度低下がP波速度及び液状化特性に及ぼす影響について検討した結果を以下にまとめる。

1) 飽和度低下は、軸ひずみ、過剰間隙水圧の発達を抑制する効果がある。特に緩い砂では、飽和度を低下させることにより有効応力経路が密な砂に類似する。ただし、飽和度低下による影響は、繰返し載荷回数増加にのみ寄与し、変形そのものは B 値に関わらず、一気に破壊に至る傾向を示す。

2) 豊浦砂の飽和度を低下させることにより、P波速度は完全飽和状態で計測される $V_p=1700\text{m/s}$ から $V_p=400 \sim 500\text{m/s}$ まで低下する。また、これに伴い、試料や相対密度に関わらず最大で約2倍の液状化強度を発揮する。

本研究の結果から、原位置のP波速度が既知であれば、原位置の飽和度や液状化強度増加率が求められるため、飽和度を考慮した原位置液状化強度を推定できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 狐崎長琅：気泡を含む不完全な水飽和砂層の弾性波の速度・減衰とその応用上の意義，物理探査，Vol.39/No5, pp.42-57, 1986.
- 2) Yoshimi, Y., Tanaka, K. and Tokimatsu, K., Liquefaction resistance of a partially saturated sand, Soil and Foundations, vol.29/No.3, pp.157-162, 1989.
- 3) Ishihara, K.: Propagation of Compressional Waves in a Saturated soil, Proceeding of the International Symposium of Wave Propagation and dynamic Properties of Earth Material, University of New Mexico Press, pp.195-206, 1968.
- 4) 石原研而，土屋尚，黄永男：不攪乱礫質土の液状化抵抗とP波速度の関係，第34回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.979-980, 1999.