締固め盛土の強度特性及び飽和試験による部分飽和試験の強度定数の算出

山口大学大学院	学生会員	○林	優太
山口大学大学院	学生会員	高田	佳宜
山口大学大学院	正会員	中田	幸男
NEXCO 西日本コンサルタンツ(株)	正会員	松方	健治

1. 背景と目的

豪雨によって盛土中の飽和度が上昇し、水分が増 えることで、盛土が崩壊しやすくなる.これまで、豪 雨による盛土の崩壊に着目し、より正確に盛土の安 定性を評価することを検討してきた¹⁾.本報告は,一 昨年の検討¹⁾に新たに2試料の物理試験及び力学試 験(圧密非排水条件下での三軸圧縮試験)を追加し,

4 種類の道路盛土材に対する不飽和及び飽和非排水 強度特性を比較検討することを目的とする.また、飽 和試験の結果から部分飽和試験の強度定数を推定で きることを検討する.

2. 部分飽和状態

部分飽和状態とは、不飽和状態と完全飽和状態の 中間的な存在である. 部分飽和状態では, 気泡が閉じ 込められた状態となるので、土構造内に連続しない 空気相となる.よって,表面張力の影響を無視でき, サクションの影響はなく,不飽和状態より強度が小 さい.一方,気泡が存在することで,間隙の体積の圧 縮性には影響を与え、気泡がない完全飽和状態より 強度は大きい.

図-1 に,部分飽和状態の概念図²⁾を示す.図-1 で は、サクションが働く部分を不飽和、サクションが働 かないが, B値が1未満である部分を部分飽和, B値 が1 である部分を飽和状態としている.地下水位以 上の部分は不飽和、地下水位以下で深度が小さい部 分は部分飽和、深度が大きい部分は飽和状態となる ことを示している、完全飽和では、飽和度は100%に なる. 部分飽和土内部の間隙の圧縮性 C₁は, 空気の 圧縮性 Caと水の圧縮性 Cwを用いて、式(1)のように 表される³⁾.

$$C_l = C_a (1 - S_r) B_a + C_w S_r B_w$$

C

空気の圧縮性が 4.9×10⁻³(1/kPa)で,水の圧縮性が

キーワード 部分飽和状態,飽和状態,B値,飽和度,強度定数,盛土 連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

(1)

TEL0836-85-9005





4.5×10⁻⁷ (1/kPa)となる.この圧縮性の差があること によって,飽和度による間隙の圧縮性の違いが極端 に発揮されることになる.

B値とは,飽和度に関連する値であり,B値を示す 式は,式(2)のようである³⁾.

$$B = \frac{1}{1 + \frac{nC_l}{C_b}}$$
(2)

ここで、C_bは土骨格の圧縮率、nは間隙率である. 飽和度が 100%の場合、C_l/C_b が極端に小さくなり、 B=1 と仮定できる.水の圧縮率が骨格の圧縮率より もかなり大きくなる.一方、部分飽和状態では、C_l/C_b が小さいとは言えないので、B 値が 1 より小さい値 になる.気泡が残る部分飽和状態では、気泡が圧縮性 を持つことで、土が圧縮された状態になる.よって、 非圧縮性の水のみが間隙に存在する飽和状態よりも、 強度が大きくなる.

3. 締固め盛土の強度特性

杷木,松山,志和及び尾道の4箇所の盛土材に対して,圧密非排水条件による三軸圧縮試験を行い,比較した.図-2に,実験に用いた2mm以下のみの粒径加積曲線を示す.2mm以下では松山及び尾道の細粒分含有率が大きい.これは,松山及び尾道が堆積岩,杷木及び志和が花崗岩由来の砂であることの差だと考えられる.盛土材と水を所定の含水比(飽和,部分飽和条件は杷木10%,松山16%,志和12%,尾道19%,不飽和条件は杷木17.5%,松山18.5%,志和12.0%,尾道19.3%)になるよう配合し,供試体を高さ10cm,直径5cmとなるように突き固めによる締固め法により5層に分けて作製した.なお,作成時の乾燥密度は,現場の密度となるように調整した.

作製後,拘束圧 20kPa の下,飽和試験では,供試体の体積の3倍以上の通水とし,部分飽和試験では, 供試体の体積以下の通水とした.不飽和試験では,通 水せず,載荷空気圧を5kPa あるいは10kPa を与え, 初期の飽和状態を変化させた.不飽和試験では,サク ション(間隙空気圧)をかけ,気泡が土内部で連続す る状態を再現する.この後,圧密過程として,所定の 拘束圧において圧密を行った. 杷木と松山の拘束圧 について,飽和は30,50,100kPa,部分飽和・飽和は 20,50,80kPa となっている.一方,志和は飽和・部分飽 和・不飽和ともに20,50,80kPa となっている.



-215-

圧密後,軸圧縮速度 0.05mm/min において軸ひずみ 15%まで,非排水条件でせん断を行った.なお,不飽 和条件の試験では試験法を参考に排気条件で行った.

図-3 に、尾道盛土の飽和非排水三軸試験の、図-4 に、部分飽和非排水三軸試験の、図-5 に、不飽和非 排水三軸試験の応力・ひずみ関係を示す.図-3,4,5 よ り、飽和条件の方が、部分飽和、不飽和条件よりも、 主応力差 q(kPa)の値は小さく、間隙水圧 uw(kPa)の値 は大きくなっていると分かる.表-1 に、尾道盛土の せん断強度及び間隙水圧の一覧を示す.表-1 より、 部分飽和非排水三軸試験から得られた B 値は、理論 値(0.95 前後)を大きく下回る値となった.この点は、 試験時の通水時間を検討していくことが必要と考え られる.

図-6に,各試料の強度定数を示す. 飽和度が 100% に近い場所(70~95%程)のデータが,部分飽和状態 である.部分飽和の強度定数は,飽和と不飽和の中間 的な値を取ることが分かる. 杷木と松山と尾道は,飽 和度が上昇すると強度定数が低下する. 一方,志和 は,飽和度が上昇しても強度定数がほとんど低下し ない. 不飽和,部分飽和,飽和状態での強度特性の変 化は盛土材によって異なる.

4. 飽和試験から推定した部分飽和試験の強度定数

図-7 に,尾道盛土の飽和度とB値の関係を示す. 図-7 のグラフより,部分飽和状態におけるB値を推 定し,強度を推定する計算を行う.飽和度Sr値は, 以下の式(3)で示される³⁾.

$$S_r = \frac{C_a - \frac{C_b(1-B)}{nB^2}}{C_a - C_w} = \frac{C_a - \frac{3}{2G_0n} \frac{1-2\nu_b}{1+\nu_b} \frac{1-B}{B^2}}{C_a - C_w}$$
(3)

ここで, C_aは空気の圧縮性, C_bは土骨格の圧縮率, n は間隙率, C_wは水の圧縮性, G₀は初期の骨格のせ ん断剛性, v_bは骨格のポアソン比である. 推定に必要 な E, G, v は, 以下の式(4)-(6)で示される.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$
(4)

$$E = \frac{q}{\varepsilon_a}$$
(5)

$$\nu = \frac{1}{3}$$
(6)

ここで,Gはせん断剛性,Eはヤング係数,qは軸 ひずみ0.05%の時の主応力差(kPa),vはポアソン比で



表-1 尾道盛土のせん断強度及び間隙水圧の一覧

(サクション 5kPa) の応力・ひずみ関係



ある. 表-2 に, 飽和非排水三軸試験から求めた A 値 を示す. A 値, B 値を用いて, 部分飽和状態の強度を 推定する. この時, 推定する強度の値は, 式(7)で示 される.

$$q_{max} = \frac{2(c'\cos\phi' + \sigma_c\sin\phi')}{1 + (2\mathbf{A}\cdot\mathbf{B} - 1)\sin\phi'} \quad (7)$$

表-3に、尾道盛土の部分飽和状態の非排水強度評価を示す.部分飽和状態における推定 B 値は、図-4 のグラフから、飽和度 S_r=95(%)の時の B 値を読み取 って算出した.図-8に、推定した部分飽和状態のモ ール円を示す.また、表-4に、部分飽和状態の強度 定数の飽和非排水三軸試験から求めた推定値と、実 験値との比較を示す.推定される強度は、若干低め の値ではあるものの、実務的には十分な精度で評価 できている.飽和試験の結果から部分飽和試験の強 度定数を推定できることから、部分飽和状態の強度 も加味した安定性評価の実務への適用も可能性も高 まったといえる.これにより、より正確な盛土の安 定性評価に繋がれば、過度の対策を回避でき、コス ト低減を図ることができる.

4. 結論

4 種類の道路盛土材に対する不飽和及び飽和非排 水強度特性を比較検討するとともに,飽和試験の結 果から部分飽和試験の強度定数を推定できることを 検討した.部分飽和状態での強度定数は,飽和と不飽 和の中間的な値を取ることが分かった.土の飽和度 が上昇した時,強度定数が低下するかほとんど変わ らないかの違いがあり,盛土材によって異なった.さ らに,飽和試験の結果から部分飽和試験の強度定数 を推定できることが分かった.

5. 参考文献

- 知花ら:非排水せん断条件における道路盛土材の 強度特性,地盤工学研究発表会概要集,pp.591-592, 2019
- Tsukamoto, Y., Kawabe, S., Matsumoto, J., Hagiwara, S., Cyclic resistance of two unsaturated silty sands against soil liquefaction, Soils and Foundations, 54, 6, 1094-1103, 2014.
- Kamata, T., Tsukamoto, Y., and Ishihara, K., Undrained shear strength of partially saturated sand in triaxial tests, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 42(1), 57–62, 2009.





表-2 飽和非排水三軸試験から求めた A 値

拘束圧(kPa)	A値
20	0.543
50	0.373
80	0.507

表-3 尾道盛土の部分飽和状態の非排水強度評価

拘束 圧 (kPa)	最大 せん断 強度 (kPa)	間隙 水圧 (kPa)	В	c'	φ'	推定 A値 (Cubar のA値)	推定 B値
20	57.2	3.5	0.21	12	20.9	0.11	0.58
50	97.7	0.8	0.07	12	20.9	0.02	0.50
80	192.6	15.3	0.11	12	20.9	0.16	0.49





表-4 飽和非排水三軸試験から求めた 部分飽和状態の強度定数

	粘着力c,c'(kPa)	内部摩擦角 ϕ, ϕ' (°)
全応力(推定値)	8	19.3
全応力(実験値)	10	14.3
有効応力(推定値)	8	21.8
有効応力(実験値)	12	20.9