

様々な締固め盛土材の不飽和および飽和非排水強度特性

(Unsaturated and saturated undrained strength characteristics of various compacted embankment materials)

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 知花 大夢
山口大学大学院 正会員 中田 幸男

1. 背景と目的

近年、集中豪雨が増加し、盛土の崩壊事例が増加している。盛土は人工の土構造物であり、崩壊発生の際には管理責任が問われることになる。このため、盛土の崩壊を防止するための様々な検討が必要である。本報告は、昨年の検討¹⁾に新たに1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、3種類の道路盛土材に対する不飽和およ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。なお、三軸圧縮試験の結果については、間隙水圧係数を用いて、ダイレタンシー特性を示すA値の検討を行い、締固め土の不飽和非排水せん断特性を理解する。

2. 道路盛土材の採取場所と密度及び試験概要

本実験では、杷木、松山、志和の3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-1に、実験に用いた2mm以下のみの粒径加積曲線を示す。2mm以下では松山の細粒分含有率が高い。盛土材と水を所定の含水比(飽和、部分飽和は杷木10%、松山16%、志和12%、不飽和は杷木17.5%、松山18.5%、志和12.0%)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、载荷空気圧を5kPaあるいは10kPaを与え、初期の飽和状態を変化させた。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

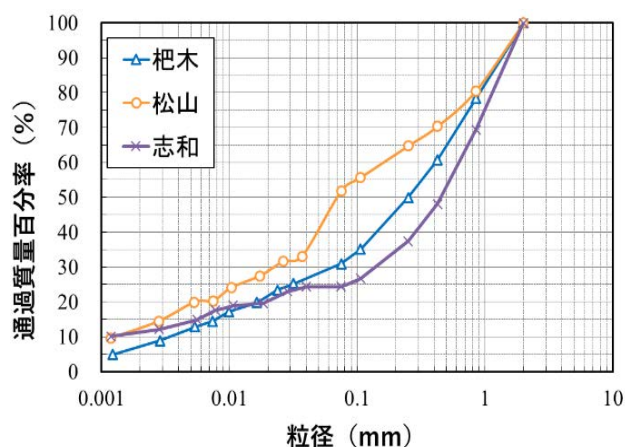


図-1 2mm以下のみの粒径加積曲線

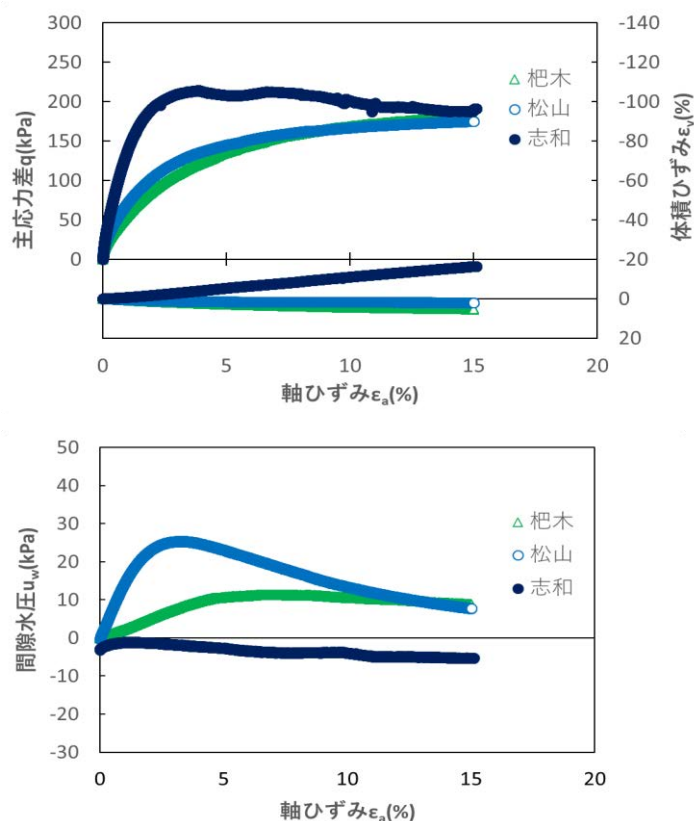


図-2 不飽和試験 50kPa(载荷空気圧 5kPa)における
応力ひずみ曲線とせん断中の間隙水圧の変化

キーワード 飽和度、拘束圧、最大主応力差、間隙水圧、推定B値、推定A値

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1

TEL 0836-85-9005

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。圧密後, 軸圧縮速度 0.05mm/min において軸ひずみ 15%まで, 非排水条件で実験を行った。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。

3. 飽和度による非排水せん断挙動と強度定数 および間隙水圧への影響

図-2 に, 不飽和試験 50kPa(載荷空気圧 5kPa)における応力ひずみ曲線とせん断中の間隙水圧の変化を示す。杷木・松山では, せん断中に発生する体積ひずみが正となり, 体積収縮, つまり負のダイラテンシーが発生する。これに対応するように, せん断中に発生する間隙水圧は正となり, 間隙空気圧から間隙水圧を差し引くことで得られるサクションが減少し, 強度低下をもたらしたといえる。一方, 志和では, せん断中の体積ひずみが負の値となり, 間隙水圧が負の値となり, 杷木・松山とは異なる挙動となった。

強度定数について, 表-1 に粘着力と内部摩擦角を示す。志和の全応力に対する粘着力と内部摩擦角は, 不飽和, 部分飽和, 飽和条件で大きく低下しない。これに対し, 杷木の値は不飽和から飽和状態に変化する中で強度が粘着力と内部摩擦角のいずれも低下する。ただし, 有効応力での内部摩擦角については明確な低下はない。

各盛土材料について, 拘束圧毎に最大主応力差と最大主応力差時の間隙水圧を求めた。一例として, 表-2 に, 杷木の実験結果を示す。拘束圧が大きくなると強度は大きくなる。間隙水圧は, 飽和状態の時に最も大きく, 部分飽和, 不飽和状態では, 飽和状態よりもかなり小さいことがわかる。

図-3 に, 拘束圧と最大主応力差の関係を示す。不飽和状態の最大主応力差について, 杷木と松山は, 志和より 50kPa 程度小さくなっている。飽和状態の杷木と松山の最大主応力差は, 志和のそれと比べて 100kPa 程度小さいことがわかる。また, 志和について, 飽和 50kPa と 80kPa に対する最大主応力差があまり変化しない。拘束圧は, 深度を再現するものであるが, 飽和状態の場合, 締固めの影響が強く表れ, 拘束圧の影響が現れにくいことが考えられる。

非排水せん断中の間隙水圧は, Skempton の間隙水圧係数²⁾によって評価される。本実験の場合, 以下

表-1 粘着力と内部摩擦角

(a)杷木 IC 道路盛土材

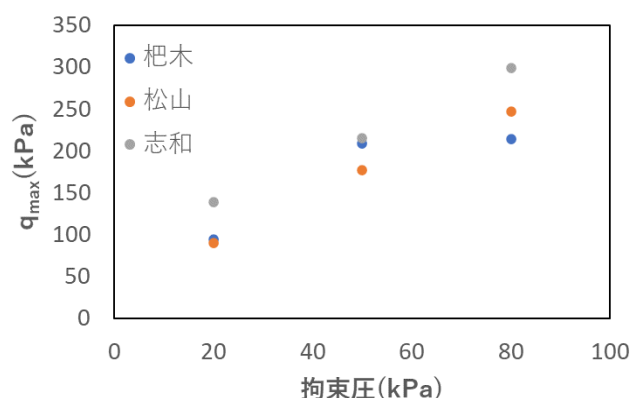
杷木	粘着力 c_{cu}, c'_{cu} (kPa)	内部摩擦角 ϕ_{cu}, ϕ'_{cu} (°)
飽和(全応力)	2	14.2
飽和(有効応力)	0	34.4
部分飽和(有効応力)	8	31.7
部分飽和(全応力)	3	19.5
不飽和(5kPa)	15	30.8
不飽和(10kPa)	16	30.8

(b) 志和 IC 道路盛土材

志和	粘着力 c_{cu}, c'_{cu} (kPa)	内部摩擦角 ϕ_{cu}, ϕ'_{cu} (°)
飽和(全応力)	24	32.6
飽和(有効応力)	0	35.0
部分飽和(有効応力)	22	34.8
不飽和(5kPa)	24	34.6
不飽和(10kPa)	18	37.4

表-2 杷木の最大主応力差と
最大主応力差時の間隙水圧

	載荷空気 圧(kPa)	拘束圧 (kPa)	最大せん断 強度(kPa)	間隙水圧 (kPa)
飽和	0	30	23.7	19.3
		50	44.2	33.3
		100	68.5	73.1
部分 飽和	0	20	72.7	2.98
		50	128.7	12.9
		80	213.0	13.0
不 飽和	5	20	93.9	1.24
		50	208.8	8.82
		80	214.1	1.22
	10	20	93.4	4.37
		50	165.3	6.86
		80	219.8	15.3



(a)不飽和試験(5kPa)

に示す間隙水圧係数 AB 値が求められる．ここで A 値はダイレタンシー特性，B 値は飽和度を示す指標である．

$$AB \text{ 値} = \frac{\text{最大主応力差時の間隙水圧}}{\text{最大主応力差}} \quad (1)$$

以降では，実験中の B 値を推定し，AB 値を除すことで，不飽和非排水せん断中の A 値を推定する．

図-4 に，拘束圧と最大主応力差時の間隙水圧の関係を示す．杷木と松山のこの間隙水圧は拘束圧の大きさによらず正を示し，志和のその値は負となる傾向がある．この傾向は，不飽和状態よりも飽和状態でより顕著になることもわかる．

部分飽和および，不飽和状態での推定 A 値を求めるために，まず B 値を推定する．その後，部分飽和，不飽和の A 値を推定する．B 値の推定は，以下に示す飽和度と B 値の関係式³⁾から行う．

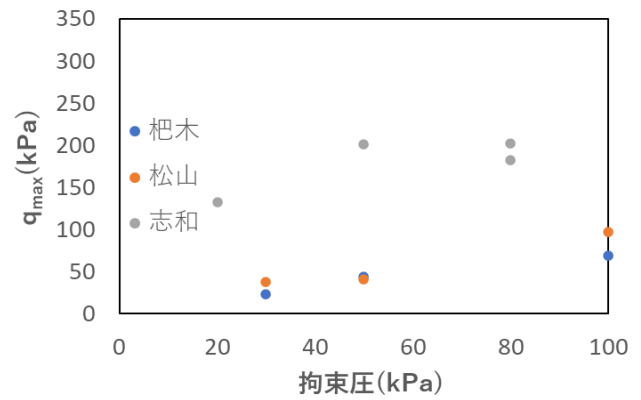
$$S_r = \frac{C_a - \frac{C_b(1-B)}{nB^2}}{C_a - C_w} = \frac{C_a - \frac{3}{2G_0n} \frac{1-2\nu_b}{1+\nu_b} \frac{1-B}{B^2}}{C_a - C_w} \quad (2)$$

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， G_0 は初期の骨格のせん断剛性， ν_b は骨格のポアソン比である．初期の骨格のせん断剛性 G_0 は，拘束圧によって変化する．ゆえに，飽和度と B 値の曲線は，拘束圧ごとに描く必要がある．このとき，圧密終了時の飽和度から B 値を求めた．曲線の一例として，図-5 に，杷木における飽和度と B 値の関係について示す．前述の式を用いて，拘束圧ごとに曲線を描いた．拘束圧が高くなると， G_0 が増加し，同じ飽和度でも B 値が小さくなるのがわかる．松山，志和においても同じような傾向のグラフとなった．

図-6 に，50kPa の飽和度と最大主応力比の関係を示す．最大主応力比は，以下の式で示される．

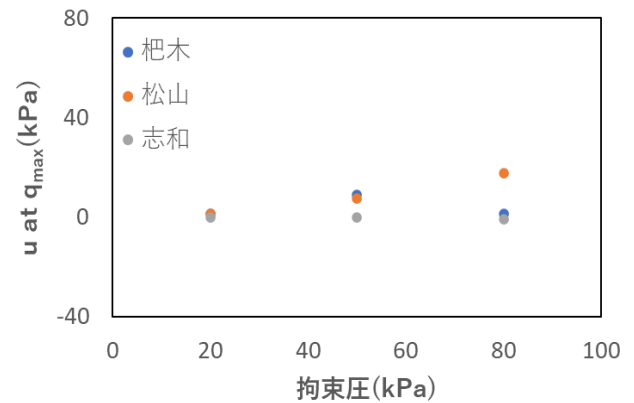
$$\text{最大主応力比} = \frac{\text{最大主応力差}}{\text{拘束圧}} \quad (3)$$

杷木と松山は不飽和状態から飽和状態に近づくと最大主応力比が減少する．しかし，志和の最大主応力比は不飽和状態から飽和状態に変化しても著しく低下しない．図-7 に，50kPa の最大主応力比と AB 値の関係を示す．実験で求めた AB 値は，最大主応力比が 1~4 となる杷木と松山では 0.00~1.00 と正の値を示した．これに対し，最大主応力比が 4~5 となる志

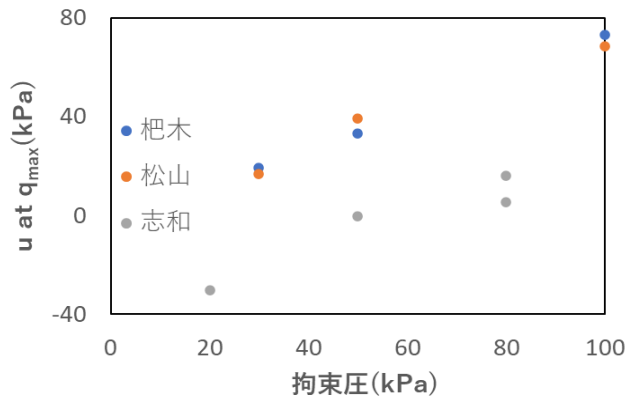


(b)飽和試験

図-3 拘束圧と最大主応力差の関係



(a)不飽和試験(5kPa)



(b)飽和試験

図-4 拘束圧と最大主応力差時の間隙水圧の関係

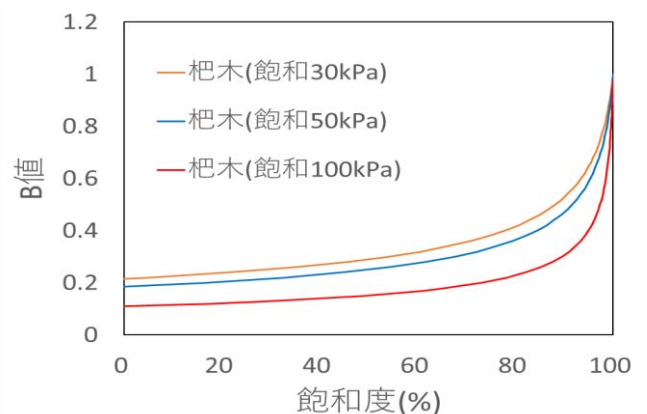


図-5 杷木における飽和度と B 値の関係

和では-0.20~0.00 と負の値を取る。

図-8 に、拘束圧と上述したように求めた推定 A 値の関係を示す。不飽和状態において、杷木・松山の A 値は 0.00~0.10、志和の A 値は-0.05~0.00 であった。これに対し、飽和状態において、杷木・松山の A 値は 0.00~1.20、志和の A 値は-0.40~0.00 の範囲を取る。不飽和状態から飽和状態になると、杷木と松山は A 値が正に増加する。これは負のダイレタンス特性、体積収縮傾向がより顕著であることになる。一方、志和の A 値は負値になる。これは、不飽和状態から飽和状態に変化する中で正のダイレタンス特性、つまり、体積膨張傾向を示す材料であることになる。

用いた土の現場乾燥密度について、杷木は 1.588g/cm^3 、松山は 1.672g/cm^3 、志和は 1.682g/cm^3 である。土の密度から見て、杷木に比べて、松山と志和はやや密な土である。一方、土の挙動から見て、杷木と松山は緩い土の挙動であり、志和は密な土の挙動である。よって、実務では、土の密度だけで土のダイレタンス特性を判別できないとわかる。

4. 結論

本研究では、九州、四国、中国地方の盛土材(順に杷木・松山・志和)を使用し、物理試験や、力学試験を実施した。不飽和および飽和非排水強度の結果より、志和は不飽和から飽和状態に変化する中で強度が大きく低下せず、最大主応力比が 4 程度であった。一方、杷木・松山の強度は、不飽和から飽和状態に変化する中で大きな低下が認められた。得られた結果から、ダイレタンス特性を示す A 値を推定すると、志和では負値になり、杷木・松山では正值となるという違いが認められた。

5. 参考文献

- 1) 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
- 2) Skempton, A.W. : The Pore Pressure Coefficient A and B, Geotechnique, Vol.4, pp.143-147, 1954
- 3) 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.

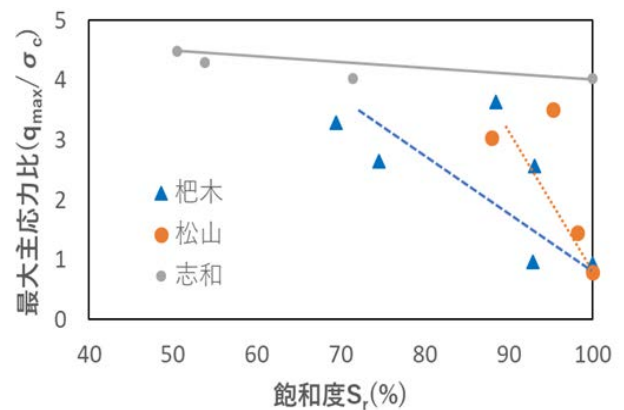


図-6 50kPa の飽和度と最大主応力比の関係

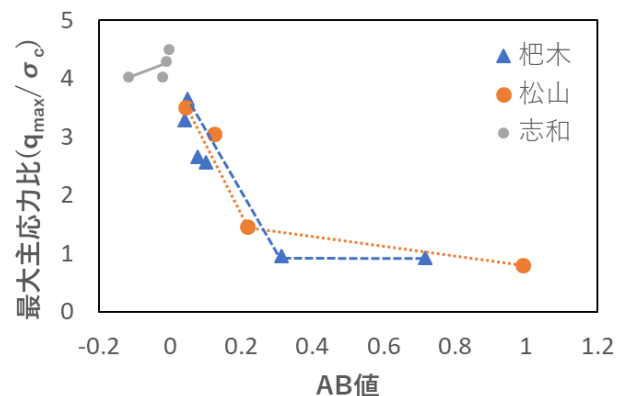
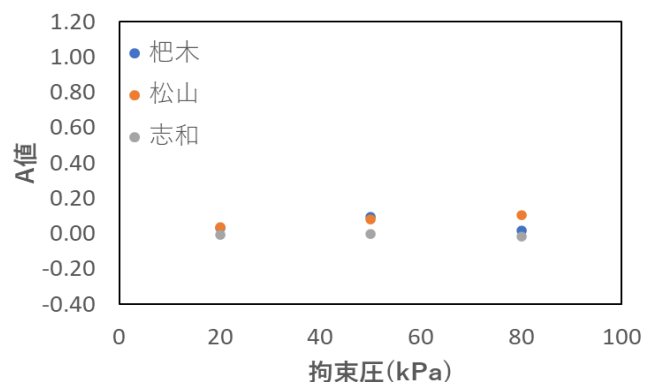
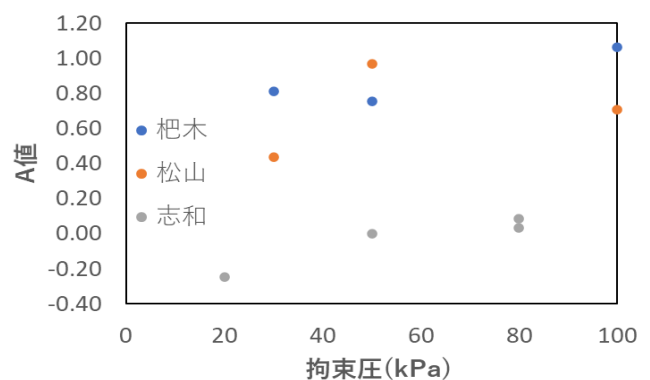


図-7 50kPa の最大主応力比と AB 値の関係



(a)不飽和試験(5kPa)



(b)飽和試験

図-8 拘束圧と A 値の関係