

供用中の高速道路盛土の飽和・不飽和状態における強度特性に関する検討

Examination about Strength of Existing Expressway Fillings under both Saturated and Unsaturated Conditions

松方健治 Kenji MATSUKATA (NEXCO 西日本コンサルタンツ(株))
 浜崎智洋 Tomohiro HAMASAKI (西日本高速道路(株))
 土田孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)

近年の豪雨および大規模地震により、老朽化した高速道路盛土が崩壊して長期の通行止めが発生している。本研究は、西日本地区において高速道路盛土より採取した試料を用いて三軸圧縮試験を行い、高速道路盛土を構成する地盤の強度特性に関する検討を行った。三軸 CU 試験結果をまとめると、飽和時では、 $c_{cu}=28.4\sim 45.8\text{kPa}$ 、 $\phi_{cu}=20.1\sim 24.0^\circ$ の範囲であり、原位置の飽和度と同じ飽和度に調整した試料の c_{cu} と ϕ_{cu} の平均値の範囲はそれぞれ $35.1\sim 121.3\text{kPa}$ 、 $25.6\sim 38.4^\circ$ であった。検討結果に基づいて、既存の高速道路盛土の補修・耐震強化の概略設計に用いることを目的として、盛土材料ごとの強度定数の概略値を提案した。

キーワード：高速道路，盛土，不飽和，飽和，三軸圧縮試験 (IGC : D06, F06, H06)

1. はじめに

近年、高速道路本体の構造物のうち、盛土などの土構造物においては、豪雨による地下水の上昇や地震による揺れがのり面崩壊の主因となっている場合が多くみられ、長期の通行止めに至るケースが起きている。東日本・中日本・西日本高速道路株式会社では、豪雨時、地震時においても高速道路ネットワークの機能を維持することを目的として、高速道路本体の土構造物に対する補強および修繕の必要性を検討し、対策を進めている。

既存の高速道路盛土の安定性を検討し補強により安全性を向上する対策を検討する場合には、盛土を構成する地盤の強度定数に関する情報が不可欠である。この際に、長大な路線長となる高速道路ではすべての対象個所で地盤調査を行って強度定数を求めることが難しいため、安定性を検討すべき箇所を抽出し詳細検討の優先順位付けを行う段階で、既設盛土の強度定数の代表的な値(参考値)が示されていれば非常に便利である。

盛土の強度定数の参考値として、東日本、中日本、西日本高速道路株式会社による「設計要領(以下、設計要領)」では、表-1 が示されている¹⁾。ただし、表-1 に示される地盤の強度定数は、圧密非排水せん断条件における概略的な値であり、盛土に対する地下水、湧水などの影響は考慮していないとされている。表-1 に示された値はせん断抵抗角、粘着力ともに様々な状態で存在する盛土の一般値を示したものであり、高速道路盛土の調査結果に基づき、既設盛土の現状に近い参考値があれば、実務上、きわめて有用であると考えられる。本研究は、表-1 に示されている参考値を補完する目的から、既存の高速道路盛土から採取

表-1 設計要領による高速道路盛土の土質定数¹⁾

種類	状態	せん断抵抗角(deg)	粘着力(kPa)
礫および礫まじり砂	締固めたもの	40	0
砂	締固めたもの	35	0
	粒径幅の広いもの 分級されたもの	30	0
砂質土	締固めたもの	25	30以下
粘性土	締固めたもの	15	50以下
関東ローム	締固めたもの	20	10以下

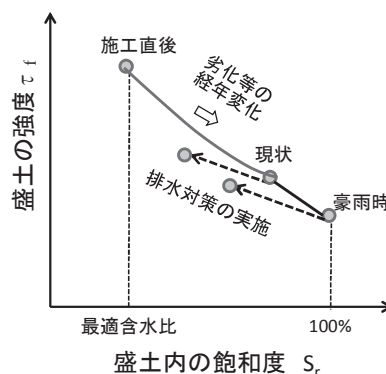


図-1 施工後の盛土の飽和度と強度の関係(模式図)

した試料を用いて、飽和および不飽和状態で三軸圧縮試験を行い、求められた強度定数について検討を行った。

高速道路盛土が建設後に経年劣化、豪雨、地震を受けたときの飽和度とせん断力の関係を図-1 に模式的に示す。道路盛土の施工においては、過去の施工実績から、転圧力

200kN級の振動ローラを用い施工層厚 30cm の施工を実施すれば、供用時に重大な問題が生じることが少ないとされている¹⁾。このことから施工直後は、盛土は最も安定した状態であったと考えられるが、供用開始後、特に法表面においては降雨と乾燥による乾湿の繰返しにより劣化するとともに盛土内部の飽和度が施工直後から徐々に増加するため、せん断強度が低下する。そして、豪雨によって盛土内の地下水位が上昇し、飽和に近い状態になって崩壊に至る場合があると考えられる。これに対して、盛土内からの排水対策を行った場合は、盛土の飽和度が下がり、盛土施工時に近い強度まで回復することが想定される。豪雨に対する高速道路盛土の補強、修繕を検討する際には、飽和度と強度に関するこのような関係を考慮する必要がある。

また、近年、地震時の盛土の安全対策として盛土についてもレベル2地震動に対して耐震性を確保する必要性が指摘されている²⁾。具体的な検討方法としては、盛土高が15mを超えるような高盛土を対象に、レベル2地震動に対して盛土条件や地形・地質等を考慮し、盛土の残留変位量を算出する手法が、設計要領に示されている¹⁾。この検討を行う場合の強度定数としては、地震発生時の飽和度における非排水条件下での粘着力とせん断抵抗角が必要である。

高速道路盛土は一般的に不飽和状態となっている。不飽和土の有効応力としては以下に示す Bishop³⁾の式がよく用いられている。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

ここに、 σ' は不飽和土の有効応力、 σ は全応力、 u_a と u_w はそれぞれ間隙空気圧と間隙水圧、 χ はサクシオンと水分量(飽和度)によって変化することが知られている^{4),5)}。

不飽和土の強度を厳密に議論するには、いくつかのサクシオンで基底応力の異なる複数個の三軸圧縮試験を行う必要があり、実際の盛土構造物がさまざまな種類の現地発生土で構築されていることを考えると試験には多大な労力を要する。さらに、盛土内の原位置でのサクシオンと水分量を正確に予測することも難しいので、式(1)による有効応力を用いた安定解析は実用的とはいえず、実務設計では全応力解析を用いるのが一般的である。

高速道路盛土の材料としては、通常細粒分を含む砂質土が用いられることが多い。これらの土質は地震時等のせん断時には非排水条件と考えられるため、強度定数としては原位置拘束圧による圧密後の非排水強度を表す c_{cu} と ϕ_{cu} が用いられている。以上の観点から本研究では c_{cu} と ϕ_{cu} に関して整理を行い、さらにせん断中に測定したサクシオンにより、有効応力に関する強度定数 c' 、 ϕ' について整理を行った。

盛土の安定を検討する際には、地盤強度の不均質性は重要な条件の一つであるが、既設の高速道路盛土の地盤強度の不均質性について報告した例は少ない。秦らは、空港盛土の土質試験データを収集し、地盤強度特性やその不均質特性に関する検討を行った⁶⁾。さらにその結果を用いて、

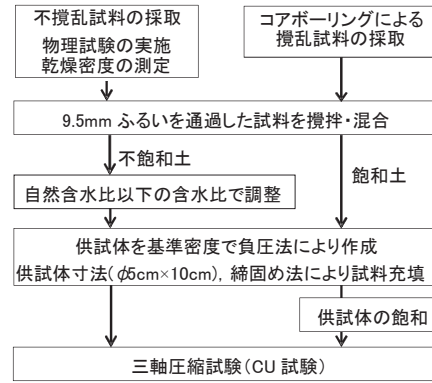


図-2 試料の採取と三軸試験供試体作成の方法

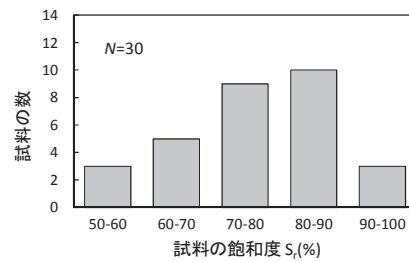


図-3 盛土から採取した試料の飽和度の分布

盛土内の強度定数のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行って高速道路盛土の地震時の安定性を評価している⁷⁾。本研究では、高速道路盛土の土質試験データを用いて、強度特性とともに不均質性について検討を行った。

2. 三軸圧縮試験の方法

2.1 試料の採取と供試体作成方法

図-2 に試料の採取から三軸試験供試体の作成までのフローを示した。三軸圧縮試験用の試料は、φ115mmのコアチューブを利用した無水掘り(攪乱試料)により採取し、盛土内で同一な土性のものを攪拌混合して供試体の作成を行った。三軸圧縮試験のための供試体は、供用中の盛土の現状を再現するため、不攪乱試料を用いて、現地の乾燥密度を求め、これを基準に締め固めて作成した。

締め固め法は、モールド内に3層に分けて試料を入れ、各層ごとに突き棒で締め固める静的な方法を用いた。不飽和の試料は、図-1 に示す排水対策実施後の状態を再現するため、自然含水比以下で含水比の調整を行い、供試体作成後に含水比を測定して飽和度を算出した。図-3 に現地で採取したときの試料の飽和度のヒストグラムを示す。図のように、飽和度は55~95%の範囲に分布しており、採取した試料30個の平均値は78%であった。

2.2 試験項目と三軸圧縮試験の試験条件

表-2 に三軸圧縮試験の試験条件をまとめる。飽和土の三軸圧縮試験のせん断過程の排水条件は、非排水強度と有効応力に関する強度定数を求めるためCUバー条件とした。

また、不飽和土の三軸圧縮試験のせん断過程は排気・非排水条件(サクシオン測定)で試験を実施した。なお、沖縄地区の粘性土は、せん断過程で排気がほとんど生じないと考え、通常のCUバー試験(圧密非排水試験)を行った。また、九州地区の火山灰質砂の不飽和土では試験が実施されていない。

試験で用いた試料は、いずれも粒径幅の広いものであり、9.5mmふるいを通過した試料を用いて実施し、供試体寸法は最大粒径の5倍程度のφ5cm×高さ10cmである。

圧密時間は、飽和土、不飽和土ともに24時間とし24時間で一次圧密が終了しない場合は一次圧密終了まで継続することとしたが、ほとんどのケースで24時間以内に一次圧密が終了した。圧縮時の軸ひずみ速度は0.1%/minである。

2.3 強度定数の算出方法

高速道路盛土の設計に用いる強度定数としては、一般にCU三軸試験結果から求めた全応力に関する見かけの粘着力 c_{cu} と見かけの摩擦角 ϕ_{cu} が用いられている。CU三軸試験結果から物理的に意味のある ϕ_{cu} の求め方について、地盤工学会の地盤材料試験の方法と解説では、図-4を用い以下の三つの考え方を示している⁸⁾。

- ① モール円上のすべり面を表す点Aを、圧密応力 σ_r の真上にもってきて、これを連ねた線を引く。
- ② モール円の直径 $(\sigma_a - \sigma_r)_{max}$ を3等分し、原点に近い3等分点の真上の点Bを σ_r の真上に持ってきてこれを連ねて線を引く。
- ③ モール円の頂点の縦距離、すなわち $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ を σ_r の上にとり、これを連ねて線を引く。

これら三つの方法の意味と問題点を以下に説明する。(中略)②は平均主応力面上の応力を表しており、その角度は約55°であるから実際の破壊面に近く、誤差は小さい。(後略)

そこで、本研究では、飽和土、不飽和土ともに、②の方法によって図-4における点Bをプロットし、 c_{cu} と ϕ_{cu} を求めた。以上のように求めた c_{cu} と ϕ_{cu} は、等方圧密圧力と圧密後に圧縮せん断したときのせん断面に発揮されている非排水せん断強度との関係を表しており、 c_{cu} は圧密圧力が0の時の非排水強度、 $\tan \phi_{cu}$ は圧密による強度増加率を意味している。

3. 調査結果の概要

3.1 調査結果の例

図-5は沖縄沖積粘土の試料を採取したとき土層構成、標準貫入試験結果を示している。図のように、盛土は砂混じり粘性土、礫質砂、砂質粘性土で構成されており、三軸圧縮試験は盛土のうち、層厚の厚い主体な材料である砂まじり粘性土の混合土を用いて実施した。いずれの層もN値は10前後である。

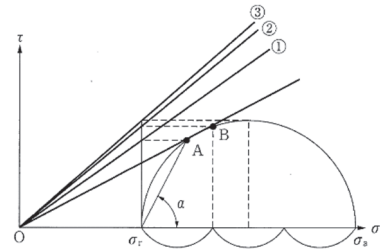


図-4 地盤材料試験の方法と解説による ϕ_{cu} の求め方

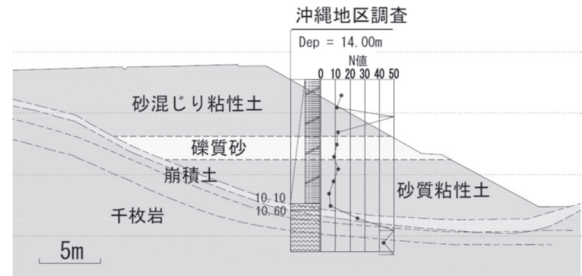


図-5 試料採取箇所の標準貫入試験結果(沖縄地区、粘性土)

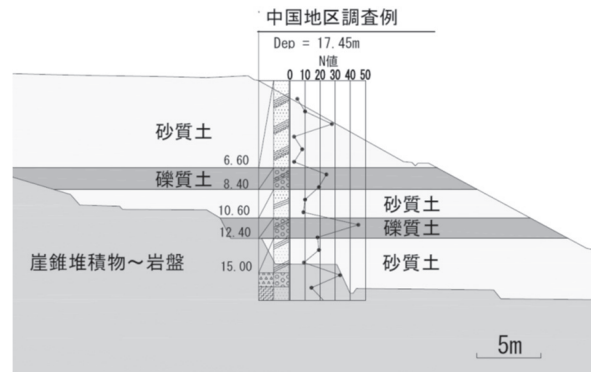


図-6 試料採取箇所の標準貫入試験結果(中国地区、まさ土)

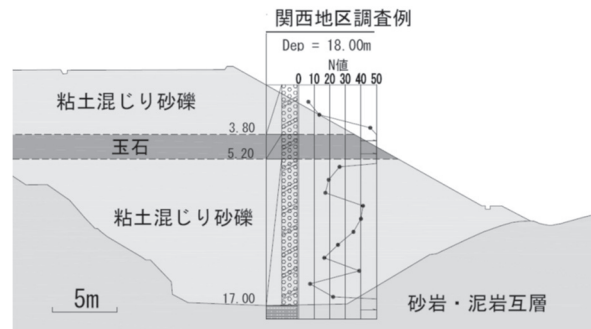


図-7 試料採取箇所の標準貫入試験結果(関西地区、礫質土)

表-2 三軸圧縮試験条件

地区	土質	飽和土	不飽和土
沖縄	粘性土	CUバー	CUバー
九州	火山灰質砂		—
中国	まさ土		排気・非排水
関西	礫質土		排気・非排水

図-6は中国地区のまさ土に分類した試料採取地点の一例である。図の砂質土がまさ土層であり、この層の混合土を用いて三軸圧縮試験を実施した。図に示す深さで試料を採取した。採取地点のN値はいずれも10以下である。

図-7は関西地区の礫質土の採取地点の一例である。試料は粘土混じり砂礫に分類されており、この層の混合土を

表-3 収集した高速道路盛土の地盤強度データの一覧

飽和条件			飽 和					不 飽 和				
強 度 数	パラメータ		沖 縄 地 区 (1988 年供用) 粘性土	九 州 地 区 (1981 年供用) 火山灰 質砂	中 国 地 区 (1979~ 2001年 供用) まさ土	関 西 地 区 (1974~ 2003年 供用) 礫質土	平均値	沖 縄 地 区 (1988 年供用) 粘性土	九 州 地 区 (1981 年供用) 火山灰 質砂	中 国 地 区 (1979~ 2001年 供用) まさ土	関 西 地 区 (1974~ 2003年 供用) 礫質土	平均値
全応力に関する強度定数	粘着力 c_{cu}	サンプリング数	3	8	6	7	6	3	-	6	7	5.3
		平均値 (kPa)	28.4	34.3	42.8	45.8	37.8	35.1	-	75.7	121.3	77.4
		変動係数	0.123	0.359	0.442	0.589	0.378	0.202	-	0.281	0.350	0.278
	せん断抵抗角 ϕ_{cu}	サンプリング数	3	8	6	7	6	3	-	6	7	5.3
		平均値 (deg.)	24.0	22.7	21.9	20.1	22.2	25.6	-	28.5	38.4	30.8
		変動係数	0.016	0.239	0.215	0.192	0.166	0.087	-	0.131	0.144	0.121
c_{cu} と ϕ_{cu} の相関係数			-0.99	-0.37	-0.11	0.23	-0.31	0.75	-	-0.50	-0.14	0.04
有効応力に関する強度定数	粘着力 c'	サンプリング数	3	8	6	7	6	3	-	6	7	5.3
		平均値 (kPa)	6.3	8.4	3.2	9.1	6.8	16.0	-	35.6	36.8	29.4
		変動係数	0.452	0.82	0.599	0.435	0.577	0.263	-	0.472	0.696	0.477
	せん断抵抗角 ϕ'	サンプリング数	3	8	6	7	6	3	-	6	7	5.3
		平均値 (deg.)	31.6	34.8	33.2	31.8	32.8	28.0	-	31.5	31.8	30.4
		変動係数	0.004	0.064	0.045	0.057	0.043	0.026	-	0.031	0.0654	0.040
c' と ϕ' の相関係数			-	-	-0.88	0.68	-0.10	-	-	0.08	-0.50	-0.21

用いて三軸試験を実施した。試料採取地点の N 値が 20~40 と高くなっている。

3.2 三軸試験から求められた強度定数のまとめ

表-3 に今回整理した高速道路盛土の地盤強度データの一覧を示した。供用から約 15~40 年が経過している。収集したデータについて、地盤の強度定数(粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ)に着目して整理を行った。

飽和土の三軸圧縮試験の条件は、間隙水圧測定を含む圧密非排水(CU パー)試験である。試料を採取した盛土の箇所のうち、同一と見なせる盛土材料に分類し強度定数を整理した。結果的に火山灰質砂やまさ土といったいわゆる特殊土に分類される盛土材料を多く含むことになった。また、火山灰質砂については、不飽和土の三軸試験は実施されていない。

図-8 に関西地区の礫質土の不飽和試料を用いて圧密排気・非排水試験(サクシオン測定試験)を実施したときの応力、サクシオン、体積ひずみ~軸ひずみ曲線とモールの応力円を代表例として示した。図-8 の下図に示すように、 c_{cu} と ϕ_{cu} は、全応力に関するモールの応力円に図-4 のように作図を行いプロットした点に最小二乗法で近似直線を決定して求めた。また、 c' と ϕ' は、サクシオンを全応力から差し引き、強度を整理した。

図-9 に分類された各盛土材ごとに全応力に関する強度定数 c_{cu} と ϕ_{cu} の平均値と標準偏差を示した。飽和時における c_{cu} と ϕ_{cu} の平均値の範囲は、 c_{cu} が 28.4~45.8kPa、 ϕ_{cu} が 20.1~24.0° となっている。一方、原位置の飽和度

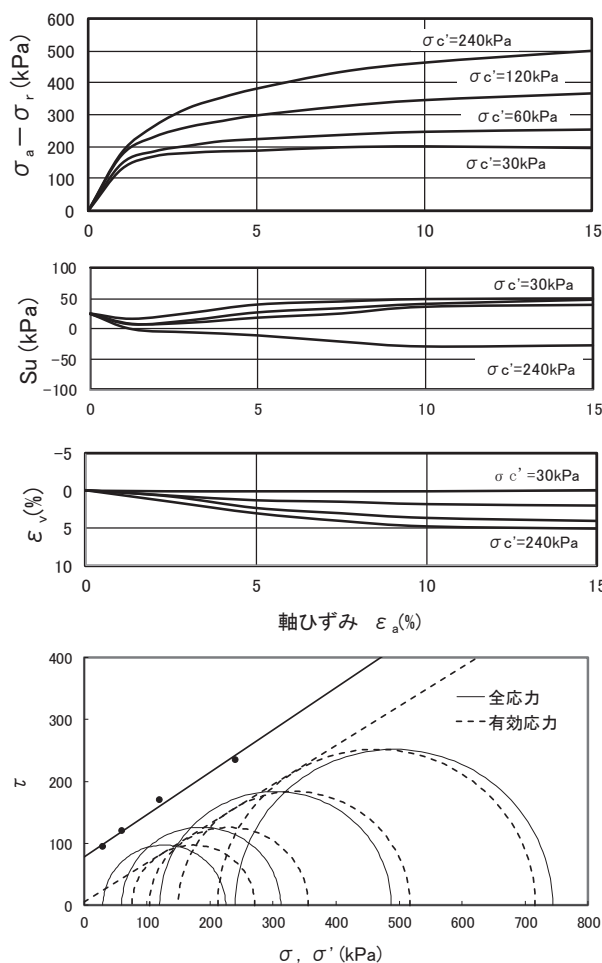
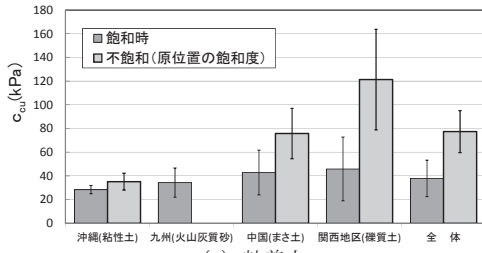
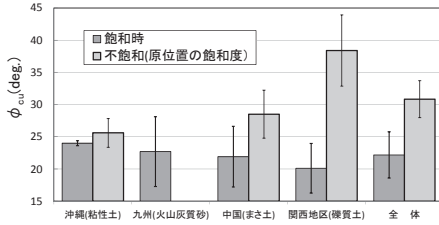


図-8 関西地区礫質土の三軸圧縮試験結果の例

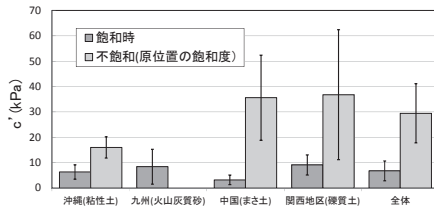


(a) 粘着力 c_{cu}

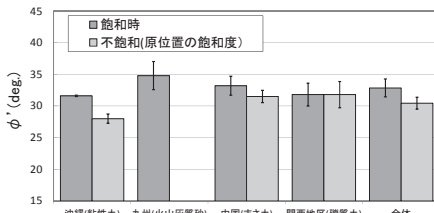


(b) せん断抵抗角 ϕ_{cu}

図-9 強度定数の平均値とばらつき(全応力)



(a) 粘着力 c'



(b) せん断抵抗角 ϕ'

図-10 強度定数の平均値とばらつき(有効応力)

と同じ飽和度に調整した試料の c_{cu} と ϕ_{cu} の平均値の範囲はそれぞれ 35.1~121.3kPa, 25.6~38.4° であった。このように、原位置での不飽和状態から飽和状態に変化することにより、 c_{cu} は 33~76kpa, ϕ_{cu} は 2~18° 低下しており、豪雨による盛土内の飽和度の上昇が盛土の安定に大きな影響を与えることがわかる。

図-10 では、各盛土材ごとに有効応力に関する強度定数 c' と ϕ' の平均値とばらつきを示している。飽和時の c' の平均値は 3.2~9.1kPa, ϕ' は 31.6~34.8° であり、原位置の飽和度と同じ飽和度に調整した試料では、 c' の平均値は 16.0~36.8kPa, ϕ' は 28.0~31.8° であった。このように有効応力に関する強度定数では、飽和時に c' が 10kPa 以下まで減少すること、 ϕ' において飽和度による差が小さいことが特徴である。

表-2 に示す地盤強度の不均質度合を表現する指標の 1 つである変動係数(=標準偏差/平均値)に着目すると、粘着力 c のほうがせん断抵抗角 ϕ に比べ、変動係数の平均値が大きい傾向にある。また飽和状態の方が不飽和状態に比べ変動係数の平均値が大きい。既往の研究^{9),10)}では、粘着

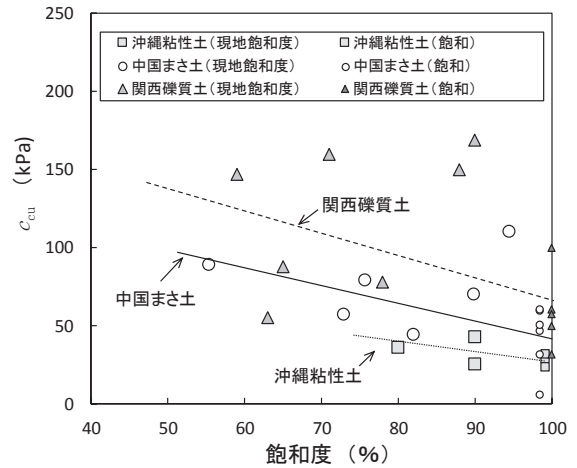


図-11 飽和度と粘着力の増分の関係

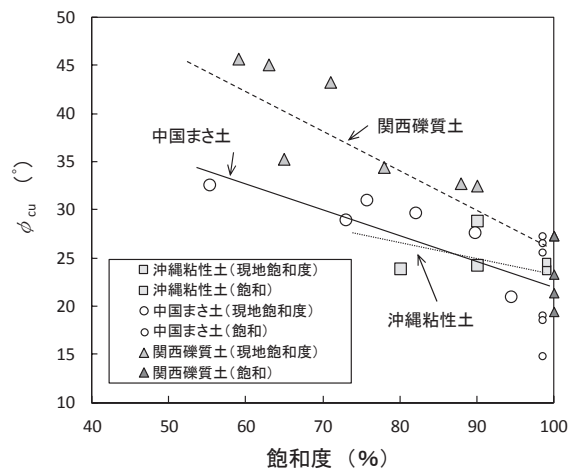


図-12 飽和度と ϕ_{cu} の関係

力 c の変動係数として 0.3 程度およびせん断抵抗角 ϕ の変動係数として 0.1 程度の値が採用されるケースが多いが、これらの採用値は CU 試験による粘着力 c_{cu} の変動係数の平均値(不飽和時 0.378, 飽和時 0.278), せん断抵抗角 ϕ_{cu} の変動係数の平均値(不飽和時 0.166, 飽和時 0.121)と概ね一致している。

図-11 と 図-12 はそれぞれ飽和度と粘着力 c_{cu} , 飽和度とせん断抵抗角 ϕ_{cu} の関係である。図中に示す実線および破線は、飽和度 100%の結果も含めて、相関係数の最も高いところで線を描いている。図のようにばらつきはあるが、礫質土の粘着力を除き、いずれの試料においても飽和度が高く飽和に近くなるとともに粘着力もせん断抵抗角も低下する傾向を示している。図-1 に既存の高速道路盛土の飽和度と強度の関係を示したが、経年変化により建設時よりも飽和度が高まれば強度は低下するが、排水対策によって常時および豪雨時の飽和度を低下させることにより強度の低下を防止できることが図-11 および図-12 から裏付けられる。

表-1 に示した地盤の強度定数は概略的な値であって地下水などの影響が考慮されていないことを述べたが、今回の調査結果に基づいて、飽和度を考慮した土質定数の概略値を設定することを試みた。

実務で安定計算により盛土の排水工を設計する場合、通常、常時および豪雨時の設計水位を設定する。設計水位より上の盛土に不飽和時の強度定数、設計水位より下の盛土に飽和時の強度定数を用いる。粘着力 c_{cu} の変動係数の平均値が 0.328 (0.278~0.378) であり、せん断抵抗角 ϕ_{cu} の変動係数の平均値が 0.144 (0.121~0.16) である。

地盤の力学定数がばらつきを有する場合には、ばらつきを考慮して設計定数を決定する考え方が、港湾の施設の技術上の基準・同解説^{11),12)}に示されている。同基準では、地盤の力学定数の代表値を推定値、設計定数を特性値と呼び、特性値は次式で与えられる。

$$\text{特性値} = \text{推定値} \times b_1 \quad (2)$$

b_1 は土質定数のばらつきに関する補正係数で、変動係数の大きさに応じて表-4 で与えられている。この考えを用いると、変動係数による補正係数はせん断抵抗角で 0.95、粘着力で 0.85 である。この考え方を参考にして、せん断抵抗角 ϕ については原位置の飽和度に対応する実測値の平均値をそのまま概略値とし、粘着力 c の設定においては、原位置の飽和度に対応する粘着力の実測値の平均値から標準偏差を引いた値を概略値とした。

以上の考え方を表-5 にまとめ、表-6、表-7 にそれぞれ地下水位上、地下水位下の強度定数の概略値を示す。試みに一般的に高速道路盛土で採用される断面(盛土高=14m, 2段盛土, のり勾配=1:1.8)において、今回設定した概略値のうち最も厳しい条件となる粘性土の土質定数を仮定した場合の常時の安定計算結果を図-13 に示す。なお、設計地下水位は、排水対策工を実施し、のり尻からの高さの1/3まで低下させた場合を想定する。試算の結果、円弧すべり計算の安全率 $F_s = 1.50 > 1.25$ となり十分安全な結果となった。このことは、建設当時から経年劣化していると考えられる盛土において、適切な排水対策工を実施し、今以上の劣化を起こさないようにすれば、十分安全であることを示唆していると考えられる。表-6~7 は表-1 に比べ、飽和度および排水改善の効果を考慮した強度定数の設定ができる点で有効であると考えられるが、限られたデータに基づいており、今後既存の盛土の強度定数をさらに収集することにより見直していく必要がある。

4. パラメータ間の相互関係

4.1 ϕ_{cu} , c_{cu} と ϕ' , c' の関係

図-14 には各盛土材ごとに c' と c_{cu} と関係を示している。図中には現地の飽和度に合わせた不飽和状態での値と飽和させたときの値を示しているが、いずれの盛土材においても不飽和、飽和によらず c' と c_{cu} は、ほぼ以下のように直線関係となっている。

$$c_{cu} = 20 + c' \quad (\text{沖縄地区粘性土}) \quad (3)$$

$$c_{cu} = 20 + c' \quad (\text{九州地区火山灰質土}) \quad (4)$$

表-4 土質定数の変動係数と特性値のための補正係数 b_1 ^{11),12)}

土質パラメータの変動係数	補正係数 b_1	
	耐力側パラメータ (地盤強度など)	作用側パラメータ
0.1 未満	1.00	1.00
0.1 以上 0.15 未満	0.95	1.05
0.15 以上 0.25 未満	0.90	1.10
0.25 以上 0.40 未満	0.85	1.15
0.40 以上 0.60 未満	0.75	1.25
0.60 以上	結果の解釈やモデルの再検討	

表-5 高速道路盛土の設計定数の考え方

	せん断抵抗角 ϕ_{cu} (°)	粘着力 c_{cu} (kPa)
地下水位上	図-9 現地飽和度の平均	図-9 現地飽和度の (平均値 - 標準偏差)
地下水位下	図-9 飽和時の平均	図-9 飽和時の (平均値 - 標準偏差)

表-6 土質定数の概略値 1 (地下水位上)

盛土材	せん断抵抗角 ϕ_{cu} (°)	粘着力 c_{cu} (kPa)
礫質土	35	70
まさ土	25	50
粘性土	25	20

表-7 土質定数の概略値 2 (地下水位下)

盛土材	せん断抵抗角 ϕ_{cu} (°)	粘着力 c_{cu} (kPa)
礫質土	20	15
まさ土	20	20
粘性土	20	20

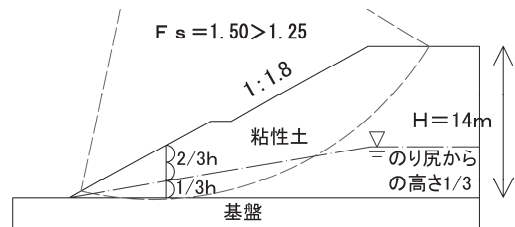
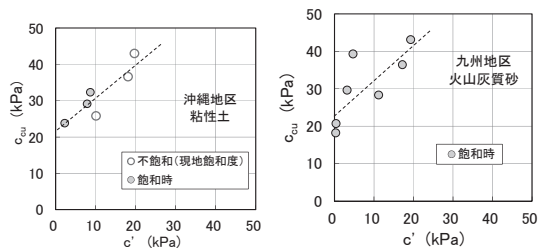
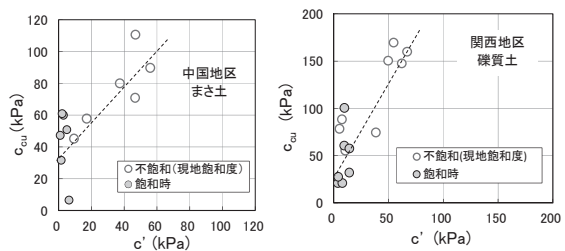


図-13 粘性土の安定計算(試算)結果



(a) 沖縄地区：粘性土

(b) 九州地区：火山灰質砂



(c) 中国地区：まさ土

(d) 関西地区：礫質土

図-14 c' と c_{cu} の比較

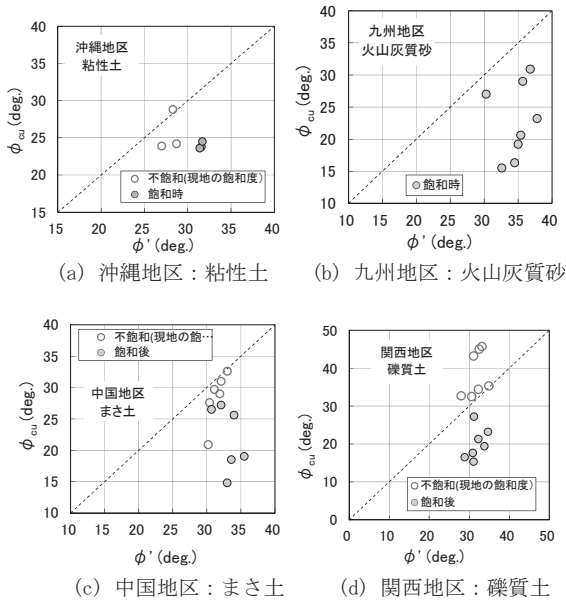


図-15 ϕ_{cu} と ϕ' の比較

$$c_{cu} = 30 + 1.25 c' \quad (\text{中国地区まさ土}) \quad (5)$$

$$c_{cu} = 25 + 2.00 c' \quad (\text{関西地区礫質土}) \quad (6)$$

いずれの式も c' が 0 の場合でも 20~30kPa の c_{cu} が発揮されることを示している。また、試料を飽和することによって、 c' と c_{cu} はともに大きく低下しているが、まさ土および礫質土では c' は飽和によってほぼゼロとなっている。

図-15 は ϕ_{cu} と ϕ' の関係である。図をみると、いずれの地区の盛土材も ϕ' の値は概ね 30~35° に分布しておりばらつきも少なく、前述したように盛土材料による違いも小さい。これに対して ϕ_{cu} はばらつきが大きく盛土材料による違いも明瞭である。沖縄地区粘性土と中国地区まさ土では、不飽和のときの ϕ_{cu} は ϕ' よりやや小さい値となっているが、礫質土の場合、不飽和では ϕ_{cu} の方が ϕ' よりも大きくなっている。しかし、いずれの盛土材料も飽和時の ϕ_{cu} は ϕ' よりも小さく、15° ~30° の範囲でばらついている。

4.2 粘着力とせん断抵抗角の関係

図-16 に、各地区における粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ の関係を示した。まさ土、礫質土については、排水条件の強度定数が使われる場合も想定し、有効応力に関する強度定数 c' と ϕ' の関係も示した。Hata¹³⁾は、国内の空港盛土において三軸 CD 試験、UU 試験、CU 試験から求められる粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ の関係を調べ、いずれの試験による値でも c と ϕ に負の相関があることを指摘している。図をみると、両者に負の相関が明瞭に見られるのは九州地区火山灰質砂であり、他の盛土材料では両者に相関はみられなかった。

4.3 細粒分含有率と粘着力、せん断抵抗角の関係

空港盛土の強度定数を調べた秦ら⁶⁾は、細粒分の増加に伴って粘着力も増加する傾向があり、せん断抵抗角は一定

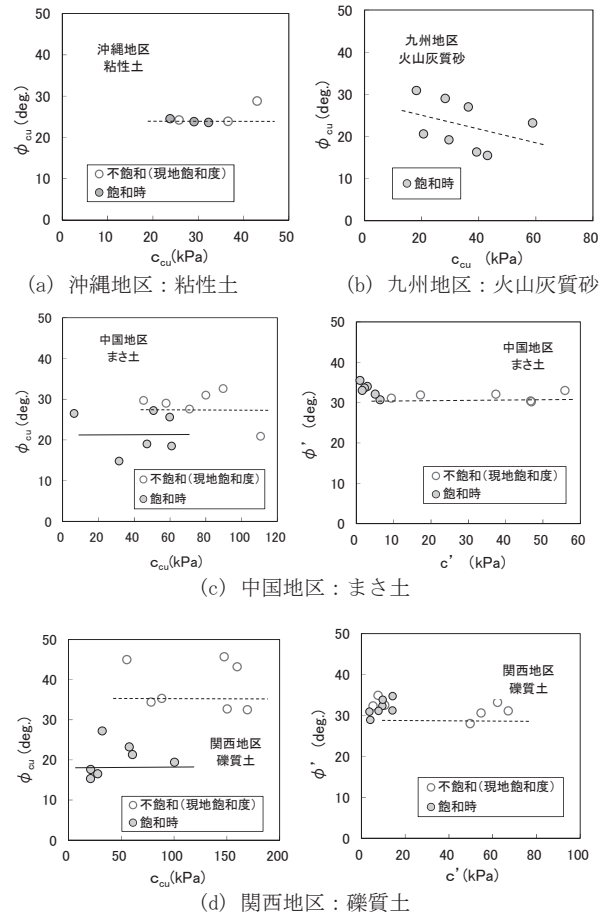


図-16 粘着力とせん断抵抗角の関係

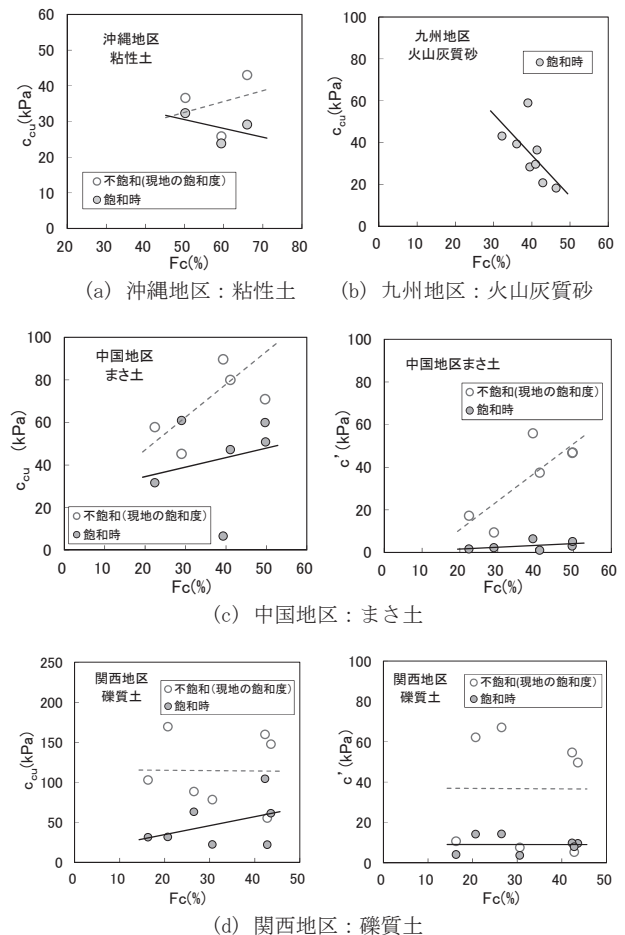


図-17 細粒分含有率と粘着力の関係

もしくは緩やかに低下する傾向があるとしている。図-17は、各盛土材料における細粒分含有率 F_c と粘着力 c_{cu} 、 c' の関係であり、図-18は各盛土材料における細粒分含有率 F_c とせん断抵抗角 ϕ_{cu} 、 ϕ' の関係を示している。粘着力はいずれの盛土材料においても不飽和のときの値が飽和時の値よりも大きくなっている。この傾向は、空港盛土の強度の関係をまとめた秦らの論文でも示されている⁶⁾。また、まさ土および礫質土の不飽和時の粘着力 c_{cu} は、他の盛土材料に比べてばらつきが大きいという特徴があり、盛土補強の設計で使用する粘着力の設定にはこの点を十分に留意する必要がある。九州地区の火山灰質砂では、細粒分 F_c の増加に伴い粘着力が小さくなっているが、図-18の ϕ_{cu} をみると ϕ_{cu} は細粒分とともに増加している。したがって火山灰質砂は、細粒分の増加とともに粘着力が小さく ϕ が大きくなり、より砂質土的な強度特性を示している。

図-18をみると、細粒分 F_c とせん断抵抗角 ϕ の関係では、いずれの盛土材料においても有意な関係は見いだせなかった。図-9および図-10で示したように、せん断抵抗角 ϕ は各盛土材料によってあまり変化していない。盛土のり面の崩壊は、3m以下の比較的浅い深度で生じることが多く、すべり面深さが浅いすべりを想定する場合、土被り圧は小さいのでせん断強さにおける ϕ の影響は相対的に小さいと考えられるが、これらの実測値を参考にして過大な値とならないよう設定すべきである。

5. まとめ

西日本地区の高速道路盛土より採取した試料を用いて実施した三軸圧縮試験結果の整理を行い、高速道路盛土を構成する地盤の強度特性に関する検討を行った。三軸試験は、飽和土については圧密非排水試験(CUバー試験)を、不飽和土は圧密後、排気・非排水条件(サクシオン測定)で圧縮している。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 今回整理した飽和時のCU試験結果では、飽和時には、 $c_{cu}=28.4\sim45.8\text{kPa}$ 、 $\phi_{cu}=20.1\sim24.0^\circ$ の範囲となっていた。一方、原位置の含水比以下の含水比で調整した試料の c_{cu} と ϕ_{cu} の平均値の範囲はそれぞれ $35.1\sim121.3\text{kPa}$ 、 $25.6\sim38.4^\circ$ であった。原位置での不飽和状態から飽和状態に変化することにより、 c_{cu} は $33\sim76\text{kPa}$ 、 ϕ_{cu} は $2\sim18^\circ$ 低下しており、豪雨による盛土内の飽和度の上昇が盛土の安定に大きな影響を与えることがわかる。
- (2) 今回の試験による有効応力に関する強度定数では、飽和時に c' が 10kPa 以下まで減少すること、 ϕ' は、概ね $30\sim35^\circ$ 程度であったことが特徴である。また、いずれの盛土材においても不飽和、飽和によらず c' と c_{cu} は、ほぼ直線関係となっている。
- (3) 各盛土材料において、飽和度と粘着力、せん断抵抗角の関係には、例外はあるが、平均的に見て負の相関関係が見出された。

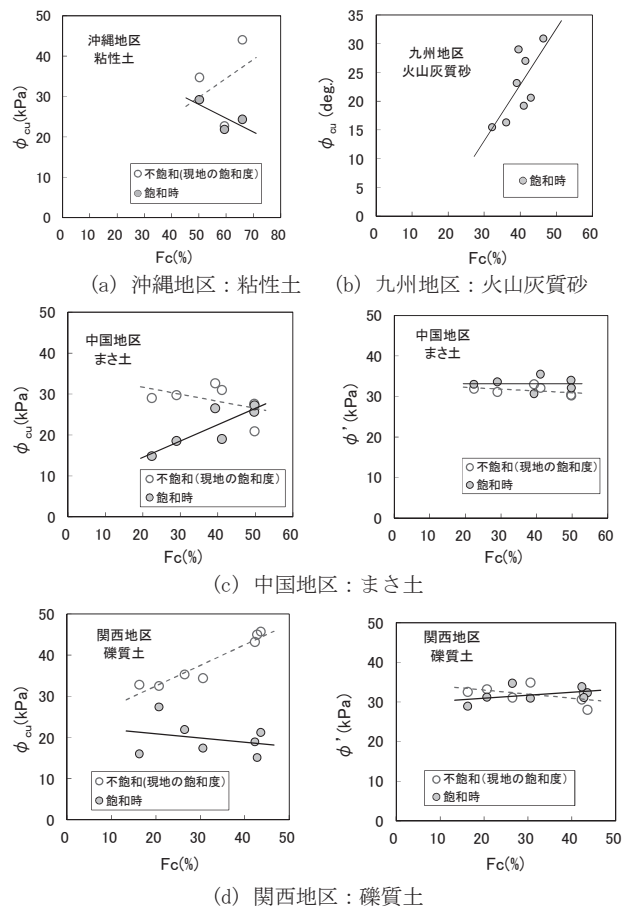


図-18 細粒分含有率とせん断抵抗角の関係

- (4) 試験データのばらつきに着目すると、粘着力 c_{cu} の方がせん断抵抗角 ϕ_{cu} よりものばらつきが大きく、変動係数は粘着力が $0.278\sim0.378$ 、せん断抵抗角が $0.121\sim0.166$ であった。これらの値の範囲は既往の研究とほぼ同様だった。
- (5) 粘着力とせん断抵抗角の関係をみると、火山灰質砂において明瞭な負の相関関係がみられたが、その外の盛土材料では相関関係はみられなかった。

謝辞

本稿では、西日本道路(株)で実施した高速道路盛土の土試料を用いた三軸圧縮試験結果のデータを提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本、中日本、西日本高速道路(株)：設計要領第一集 土工編, p.1-48, 2016.
- 2) (社)土木学会：土木構造物に関する第3次提言と解説, 第8章, 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会, pp.29-34, 2000.
- 3) Bishop, A.W.: The principle of effective stress, *Teknisk Ukeblad*, Vol. 39, pp. 859-863, 1959.
- 4) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識：不飽和土

- の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について、土木学会論文集, No. 535, pp.83-92, 1996.
- 5) Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A.: The shear strength of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp.313-321, 1978.
- 6) 秦 吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田 孝: 現場データに基づく空港盛土の地盤強度の不均質性に関する一考察, *地盤と建設*, Vol26, No. 1, pp. 15-22, 2008.
- 7) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田 孝, 今村孝志, 花川泰治, 小村尚史: 高速道路盛土における簡易耐震診断手法の適用, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.962, pp.1923-1924, 2008.
- 8) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, p.596, 2009.
- 9) 田中博文, 山下典彦: 地盤強度の不均質性が盛土の耐震安定指標に与える影響, *土木学会地震工学論文集*, Vol.28, No.50, P.5, 2005.
- 10) 秦吉弥, 山下典彦: 地震動特性が地盤強度のバラツキに起因する盛土のすべり変位量の変動に及ぼす影響に関する一考察, *地盤工学シンポジウム論文集*, Vol.50, No.60, pp.421-428, 2005.
- 11) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, P.297, 2007.
- 12) 渡部要一, 植田智幸, 三枝弘幸, 田中政典, 菊池喜昭: 性能設計概念に基づいた実用的土質定数設定法, *土木学会論文集 C*, Vol.63, No.2, pp.553-565, 2007.
- 13) Hata, Y.: Effect of Heterogeneous Soil Strength on the Seismic Residual Displacement of Embankments, *Proc. of 4th decennial Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference*, ASCE, Sacramento, U.S.A, 2008.

(2017年6月14日 受付)

