

流れ盤地層境界面を有する切土斜面の安定性評価 Stability evaluation of cut slope with dip slope stratum boundary

湯貫敬¹，小高猛司²，久保裕一³，夏目将嗣⁴

- 1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 中部土質試験協同組合・技術部
- 4 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科

概 要

本論文では、豪雨時の地下水上昇による崩落を想定した流れ盤境界面を有する切土斜面の安定性評価を行った。想定される崩壊メカニズムは、豪雨による地下水位の上昇によって有効応力が低下し、軟質化したシルト層と砂層の境界において大規模すべりが発生するというものである。本論文では、現地で採取した試料を用いて一面せん断試験による地山材料のせん断強度の評価を行うとともに、繰返し載荷一面せん断試験の適用性についても検討した。さらに、2次元有限要素解析によって崩壊事象をシミュレートすることにより試験結果の妥当性を考察した。その結果、定体積条件での単調載荷試験においては、砂層とシルト層の境界面で大規模すべりが発生した事象を表す強度定数が得られた。また、繰返し載荷一面せん断試験では、定体積条件の場合の一つの供試体で効率よく強度定数を求められることが示され、定圧条件では、大変位すべりを説明する強度定数を得ることができた。

キーワード：地すべり，一面せん断試験，繰返し載荷試験，数値解析

1. はじめに

近年、豪雨や地震を起因とする道路法面の崩落被害が多発している。そこで本研究では、豪雨により崩落が懸念される流れ盤地層境界面を有する切土斜面を対象として安定性評価を行った。対象とする地盤は、下から砂礫層、シルト層、砂層の順に堆積しており、常時から地下水が透水性の低いシルト層上部に滞留し、シルト層上部は軟質化しているものとする。想定される崩壊メカニズムは、豪雨による地下水位の上昇によって有効応力が低下し、軟質化したシルト層と砂層の境界で大規模なすべり崩壊が発生するものとする。地すべりにおける比較的深いすべり面でのせん断強度は、大きなせん断変形を受けて残留状態に至った時点でのせん断強度である残留強度あるいはそれに近いと考えられている¹⁾。本研究事例における砂層とシルト層境界部あるいは軟質化シルト層では、残留強度での評価が適切である可能性もある。

以上より本論文では、まず、現地で採取した地山試料を用いて実施した定体積単調載荷一面せん断試験結果を示した上で、軟質化したシルト層と砂層の境界面ならびに砂層、シルト層におけるせん断強度の評価を行う。また、定体積および定圧条件下での繰返し載荷一面せん

断試験も実施し、繰返し載荷時のせん断強度ならびに繰返し載荷試験自体の有効性についても検討を行う。その後、PLAXIS2D (2次元地盤解析ソフトウェア)によって崩壊事象をシミュレートし、各種の条件下の一面せん断試験から得られた強度定数の妥当性を考察する。

2. 一面せん断試験

2.1 試験装置

図1に本研究で使用した一面せん断試験装置を示す。垂直荷重および水平荷重は1μm単位で制御可能な高容量メガトルクモーターを用いて載荷する。せん断中は上部せん断箱を固定し、下部せん断箱を水平に移動することにより直接せん断しており、さらに垂直荷重載荷用メガトルクモーターで垂直変位を固定することによって、高精度の定体積せん断が可能となっている。図2に一面せん断試験装置のせん断箱を分解した様子を示す。せん断箱下部を組み立てた際、供試体底面にポーラスメタルを取り付けているため、供試体飽和時に下方から注水することが可能である。また、砂層とシルト層の境界面でのせん断を確認するために、せん断箱前面の中央に透明なアクリル板を設けている (図3)。

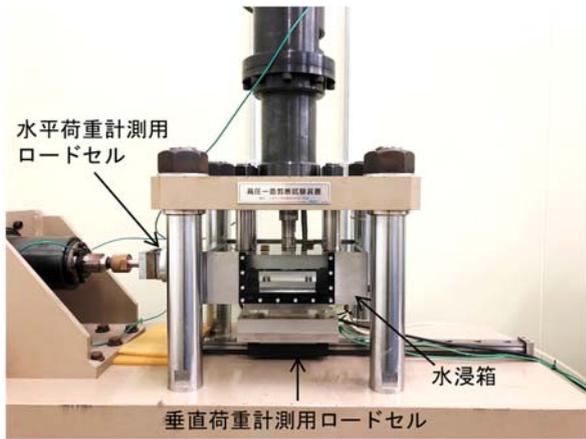


図1 一面せん断試験機

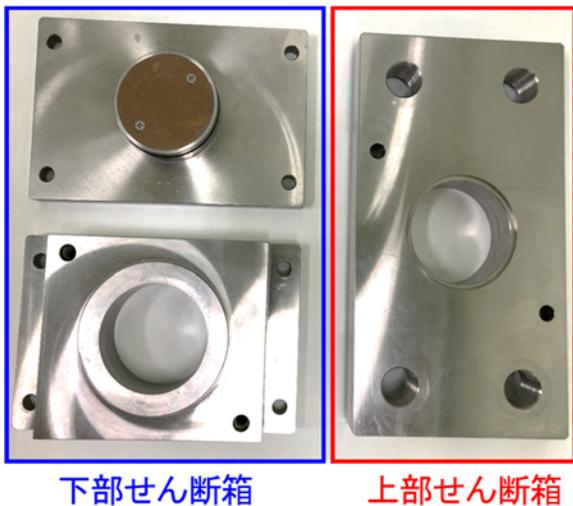


図2 せん断箱

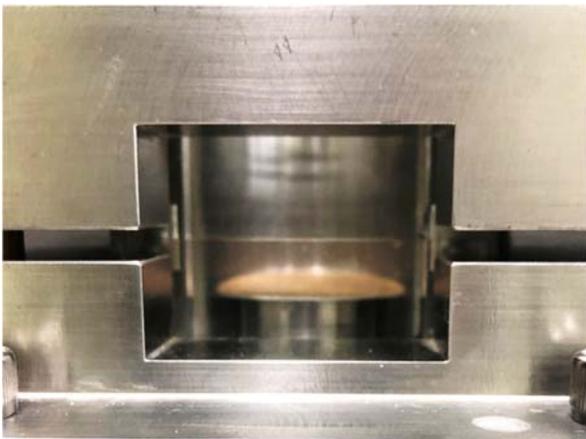


図3 せん断箱前面の亚克力板

表1 供試体ならびに試験条件

供試体	砂	シルト	砂・シルト	
			砂	シルト
直径(mm)	60			
高さ(mm)	20		10	20
湿潤密度(g/cm ³)	1.73	1.81	1.73	1.81
初期含水比(%)	12.5	42	12.5	42
圧密時間	10分		24時間	
圧密応力(kPa)	50, 100, 150, 200			

2.2 試験方法

想定すべり面は砂層とシルト層の境界面と考えられるが、本研究では、砂層内部、シルト層内部、砂層とシルト層の境界面の3パターンのすべり面を再現した試験を実施した。表1に試験条件を示す。砂の供試体は、現地の乾燥密度となるよう3層に分けてせん断箱内に突き固めて作製した。シルト供試体は、軟質化したシルト層を模擬するために現地で採取した不攪乱試料を乱し、現地の含水比に調節して繰り返した試料をカッターリングに隙間なく充填し、成型したものをせん断箱内に設置した。砂とシルトの境界を有する供試体（以下、砂・シルト供試体と呼ぶ）は、シルトの圧密により、境界面でせん断されなくなることを避けるため、現地の地層順とは逆にシルト供試体を硬質な砂供試体の上に設置した。供試体作製後、供試体を水浸条件下で所定の垂直応力で圧密し、圧密終了後に単調載荷試験は定体積条件でせん断速度 0.2mm/min, せん断変位 6mm に到達まで、繰返し載荷試験の場合は、定体積、定圧ともにせん断速度 0.5mm/min, 片振幅 3mm, 繰返し回数 5 回に達するまでせん断を行った。

3. 試験結果

3.1 単調載荷試験結果

図4, 5および6にそれぞれ、砂、シルトおよび砂・シルト供試体の定体積単調載荷一面せん断試験による応力経路、せん断応力～せん断変位関係を示す。砂供試体では、すべての圧密応力において、せん断変位 1mm 以下で変相することが確認され、変相後には塑性膨張を伴う硬化挙動を示した。シルトならびに砂・シルト供試体は、せん断初期にはせん断応力が鉛直に立ち上がる弾性的な挙動が確認でき、せん断応力がピーク値に到達した後は塑性圧縮を伴う軟化挙動を示した。砂・シルト供試体の圧密応力 50kPa のみ過圧密な挙動を示した。

表2に各試験から得られた強度定数を示す。有効応力で整理したせん断抵抗角 ϕ は、砂、砂・シルト、シルトの順に小さく、逆に粘着力 c は砂の場合 0kPa, 砂・シルト、シルトの順で大きい。図7に単調載荷試験から得られた破壊規準線を纏めて示す。せん断抵抗角 ϕ が最も大きい砂でも、垂直応力 0～20kPa 付近の低垂直応力領域、すなわち有効土被り圧 0～20kN/m² に相当する範囲では、せん断強度が最も小さくなることを示しており、これは大規模崩壊前に砂法面表層に小規模崩壊が発生する可能性を示唆している。切土の法勾配が 1 割 5 分程度（傾斜 34°）であることから、法面に顕著な降雨浸透があったり、地下水位が上昇したりすると、砂層表層や法先でまず変状する可能性がある。一方、崩壊法面の砂層とシルト層の境界までの最も深い位置で 12m 程度であったことから、垂直応力 25～150kPa で砂・シルト供試体のせん断強度が最も小さくなる本試験結果から、砂・シルト境界層で大規模すべりが発生することも示唆される。

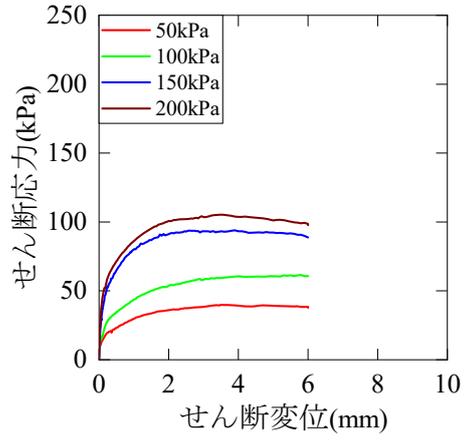
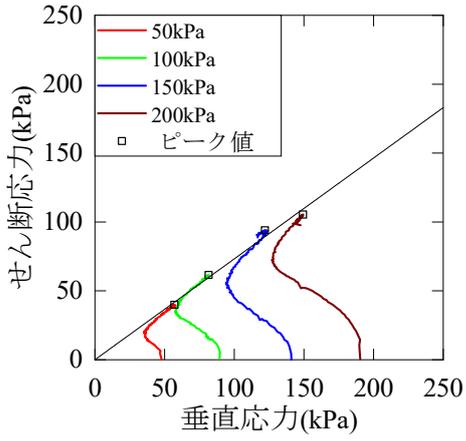


図4 砂の定体積単調一面せん断試験結果

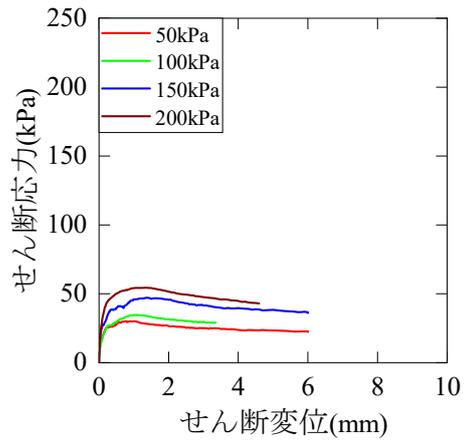
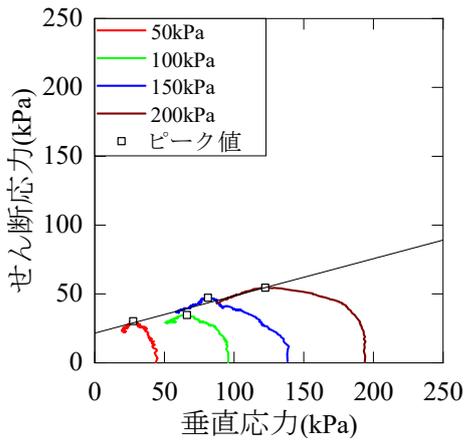


図5 シルトの定体積単調一面せん断試験結果

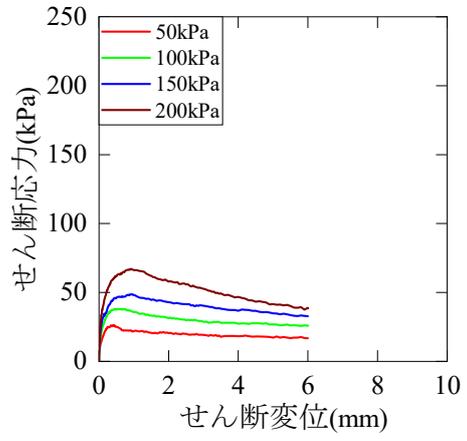
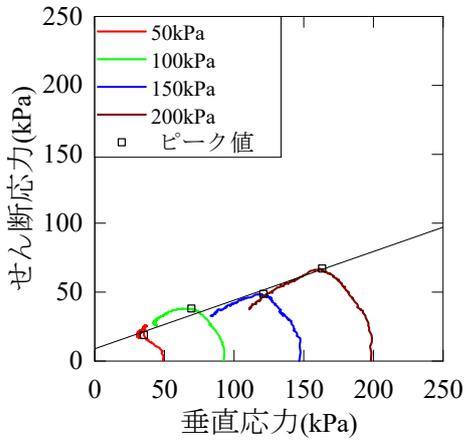


図6 砂・シルトの定体積単調一面せん断試験結果

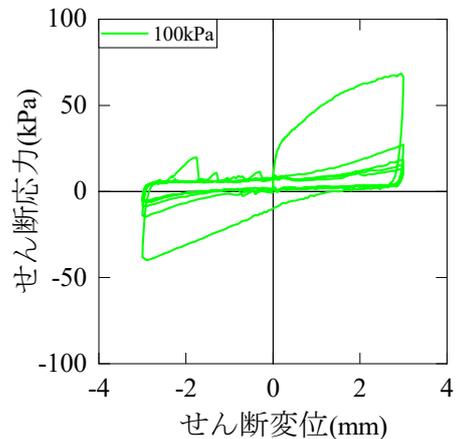
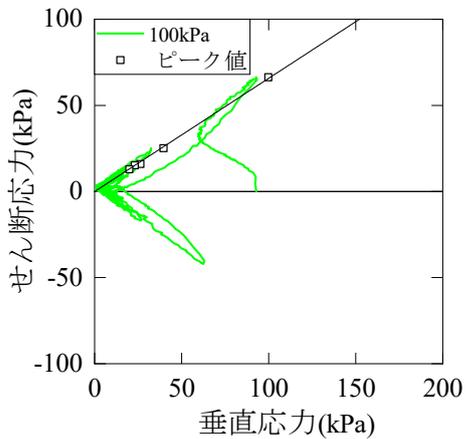


図8 砂の定体積繰返し一面せん断試験結果

表2 各試験から得られた強度定数

供試体	定体積					定圧			
	単調載荷		繰返し載荷			繰返し1回目		繰返し5回目	
	有効応力に基づく強度定数		圧密応力 (kPa)	せん断抵抗角 ϕ (°)	粘着力 c(kPa)	せん断抵抗角 ϕ (°)	粘着力 c(kPa)	せん断抵抗角 ϕ (°)	粘着力 c(kPa)
	せん断抵抗角 ϕ (°)	粘着力 c(kPa)							
砂	36.2	0	100	34.9	0	38.1	0	43.1	0
砂・シルト	19.4	8.9		21.4	10.9	8.4	27.1	6.7	17.5
シルト	14.7	20.9		22.9	13.0	8.0	22.7	3.9	15.8

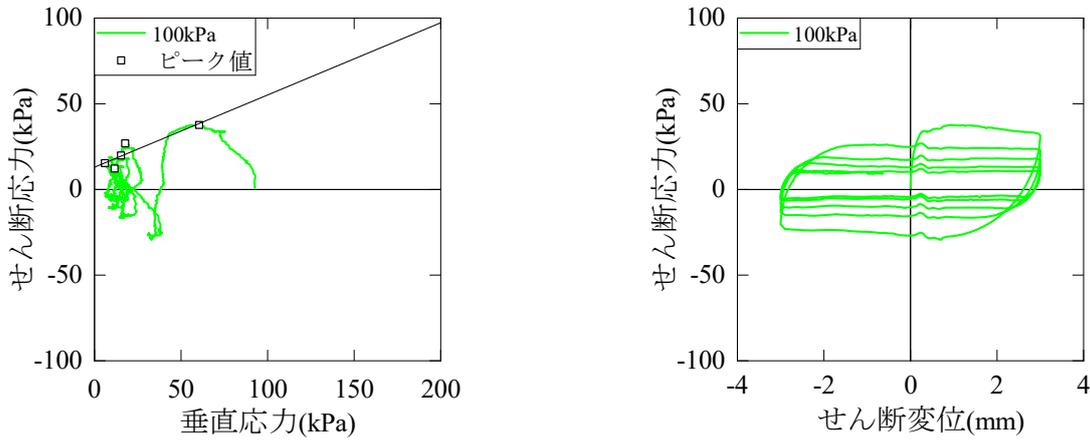


図9 シルトの定体積繰返し一面せん断試験結果

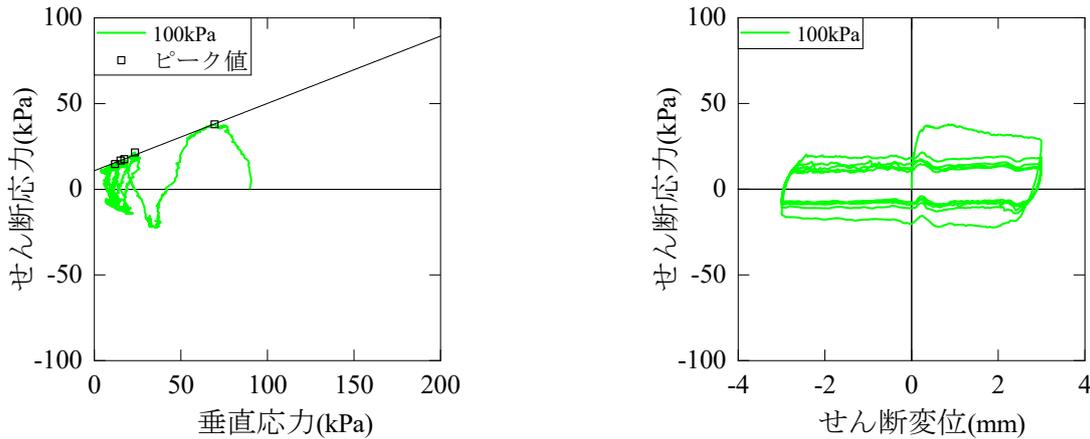


図10 砂・シルトの定体積繰返し一面せん断試験結果

ただし、シルト供試体と砂・シルト供試体のせん断強度は近い値であること、またシルト層上部の厚さ数 cm の軟質化領域ですべりが発生する可能性もあるが、いずれにしても境界層付近である。

3.2 繰返し載荷試験結果

図8, 9, 10にそれぞれの定体積繰返し一面せん断試験結果を示す。なお、全て圧密応力 100kPaの結果であり、応力経路にはせん断応力が正となる押し側のピーク値5点をプロットし、破壊規準線も引いている。砂の応力経路に示すピーク値5点は、一直線に並び、せん断抵抗角 ϕ は 34.9° と単調載荷試験の結果とほぼ同じ値となった。また、砂・シルト供試体でもピーク値は一直線に並び、繰返し載荷試験から得られた強度定数は単調載荷試験の結果と近い値を示した。これは繰返し載荷一面

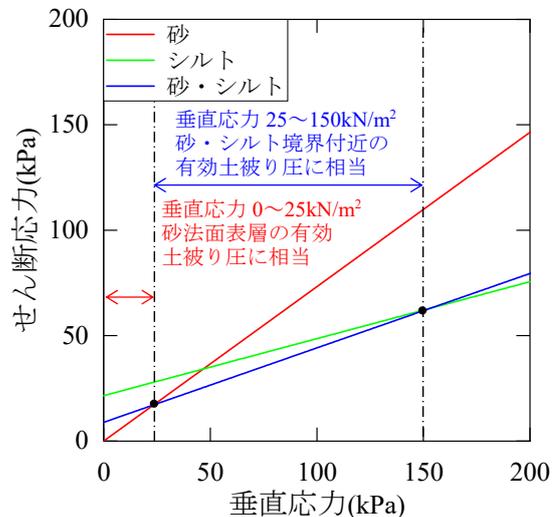


図7 単調載荷試験から得られた破壊基準線

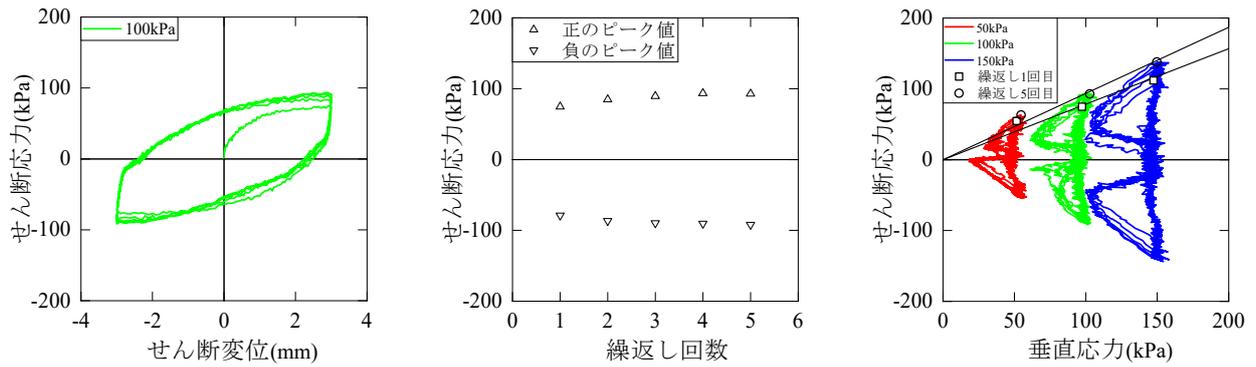


図 11 砂の定圧繰返し一面せん断試験結果

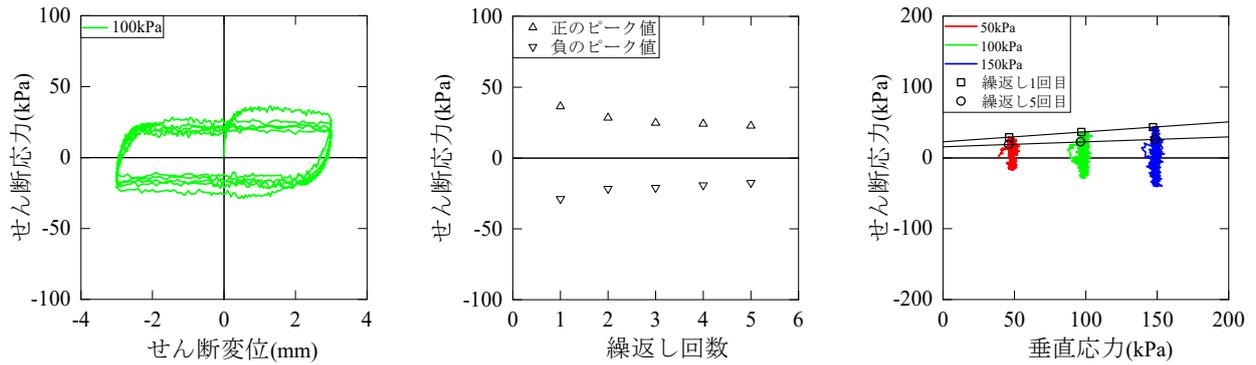


図 12 シルトの定圧繰返し一面せん断試験結果

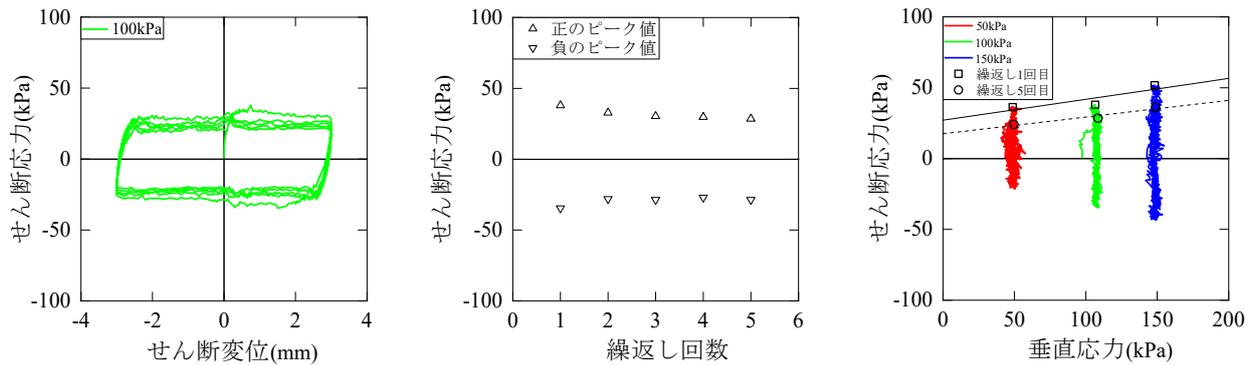


図 13 砂・シルトの定圧繰返し一面せん断試験結果

せん断試験によって、同様の強度定数が得られることを示している。すなわち、少ない試料の量で効率よく強度定数が求められることを示唆している。シルト供試体の強度定数は、単調載荷一面せん断試験と比べて、せん断抵抗角 ϕ は増加し、粘着力 c は低下している。これは繰返しせん断を受けることにより乱されたシルトが正規圧密化し、過圧密性が失われたと考えられる。

図 11, 12, 13 にそれぞれの定圧繰返し一面せん断試験結果を示す。なお、せん断応力～せん断変位関係とせん断応力～繰返し回数の図は、圧密応力 100kPa の結果であり、応力経路には、圧密応力 50, 100, 150kPa の結果と繰返し回数 1 回目と 5 回目のせん断応力が正となる押し側のピーク値 3 点と破壊規準線を示している。砂の応力経路に着目すると、せん断方向が逆転した直後に垂直応力の低下が見られたが、最終的には所定の圧力に戻っていることから問題ないと判断した。砂のせん断強度は、繰返しせん断を重ねるごとに徐々に増加することが

確認でき、本論文には載せていないが、圧密応力 50, 150kPa も同様の傾向を示しており、繰返し回数 1 回目と 5 回目のせん断抵抗角 ϕ は 38.1° , 43.1° となった。一方、シルト、砂・シルト供試体では、繰返しせん断を受け続けることによりせん断強度の低下が確認され、繰返し回数 1 回目と 5 回目の強度定数に着目しても強度低下は明らかである。これは、定圧繰返し一面せん断試験によって、大変位すべり時の残留強度を評価できていると考えている。

定圧と定体積繰返し一面せん断試験から得られた強度定数を比較すると、粘着力 c は定圧条件が大きくなり、せん断抵抗角 ϕ は定体積条件が大きい。定体積条件では、繰返しせん断を受けることにより有効応力が低下し、せん断強度も低下した。一方、定圧条件は繰返しせん断を受けても、有効応力はほぼ一定でありながらせん断強度の低下が確認できることから、大変位すべりを模擬するには定圧条件が望ましい。

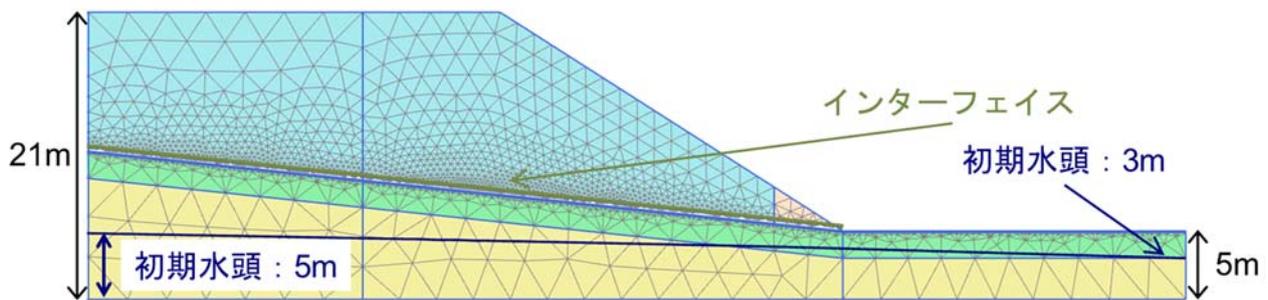


図 14 解析モデル

表 3 各土層の解析パラメータ

名称			砂層	シルト層	砂礫層	インターフェイス				補強材
						case1	case2	case3	case4	
材料モデル			モール・クーロン		線形弾性	モール・クーロン				
排水条件			排水	非排水	排水	排水				
不飽和単位体積重量	γ_{unsat}	kN/m ³	18	15	20	15				18
飽和単位体積重量	γ_{sat}	kN/m ³	18	15	20	15				18
弾性係数	E'	kN/m ²	20000	30000	477100	30000				36700
ポアソン比	ν'		0.3							
インターフェイスの剛性	k_n	kN/m ³					30000			
	k_s	kN/m ³					500			
粘着力	c	kN/m ²	2			1	15	21	9	30
内部摩擦角	ϕ	°	34.3			10	5	15	19	30
ダイレタンシー角	ψ	°	4.3			0	0	0	0	0
非排水せん断強度	s_u	kN/m ²		60						

4. 数値解析

4.1 解析概要

各種の一面せん断試験において、軟質化したシルト層と砂層の境界での各種条件下の強度定数が得られた。本章では、2次元有限要素解析で対象とする地盤の破壊形態をシミュレートした。なお、解析には2次元FEM地盤解析ソフトのPLAXIS 2Dを用いた。

解析モデルを図14に示す。地層順は現地と同様から下から砂礫層、シルト層、砂層となっており、流れ盤境界(6°)を有するよう設定し、砂層とシルト層の境界にインターフェイス要素を設置した。本解析では、砂礫層は強固な地盤であると仮定し、弾性体とした。砂層、インターフェイス、シルト層はモール・クーロンモデルを使用した。各土層の解析パラメータを表3に示す。なお、法先に砂層とは別の材料(補強材)を設置しているが、これは地下水位を上昇させた際に、土被り圧の低い法先付近のみが崩壊して計算不能になることを防ぐためである。解析開始時の初期水頭は、左端に5m、右端に3mを与え、この局面を初期フェーズとし、初期状態の重力解析と定常浸透流解析を行った。その後、右端の水頭は3mで保ちながら左端の水頭を1mずつ上昇するように設定し、地下水位が上昇した際のせん断ひずみ、および破壊点を把握するために塑性解析と定常浸透流解析を並行して行った。水理境界条件は、解析断面底面を閉境界、砂法面と地表面を浸出面に設定した。

4.2 解析結果

図15, 16, 17, 18に各caseの土構造が崩壊する直前のせん断ひずみ分布ならびに破壊点分布を示す。インターフェイスの粘着力 c は1kPa、内部摩擦角 ϕ は10°と設定したcase1では、砂層とシルト層の境界から砂層内部にかけて大きなせん断ひずみが生じており、破壊点は椅子型に近い形状が得られ、砂層とシルト層の境界ですべりが発生した。左端の水頭14mで崩壊し、砂層とシルト層の左端の境界は解析モデル底面から12m程度あり、境界層から数m程度地下水位が上昇し、流れ盤地層境界を有する場合、大規模すべりにつながる危険性が高いことを示唆している。

インターフェイスの粘着力 c と内部摩擦角 ϕ をシルトの定圧繰返し載荷一面せん断試験の繰返し5回目の値にほぼ等しい15kPa、5°と設定したcase2では、左端16mまで水頭を上昇させた際に崩壊に至った。case1とほぼ同じ箇所でせん断ひずみと破壊点が確認され、地下水位が上昇した際には、大規模すべりに進展する危険性が高いと考えられる。これはcase2で用いたインターフェイスの強度定数の場合、境界面ですべりやすい状況であったことを示している。

一方、インターフェイスの強度定数をシルトの定体積単調載荷一面せん断試験から得られた値を用いたcase3では左端の水頭を上昇させても崩壊せず、補強材付近にせん断ひずみが集中している様子が確認できた。境界層より上まで地下水位が十分に上昇しても大規模すべり

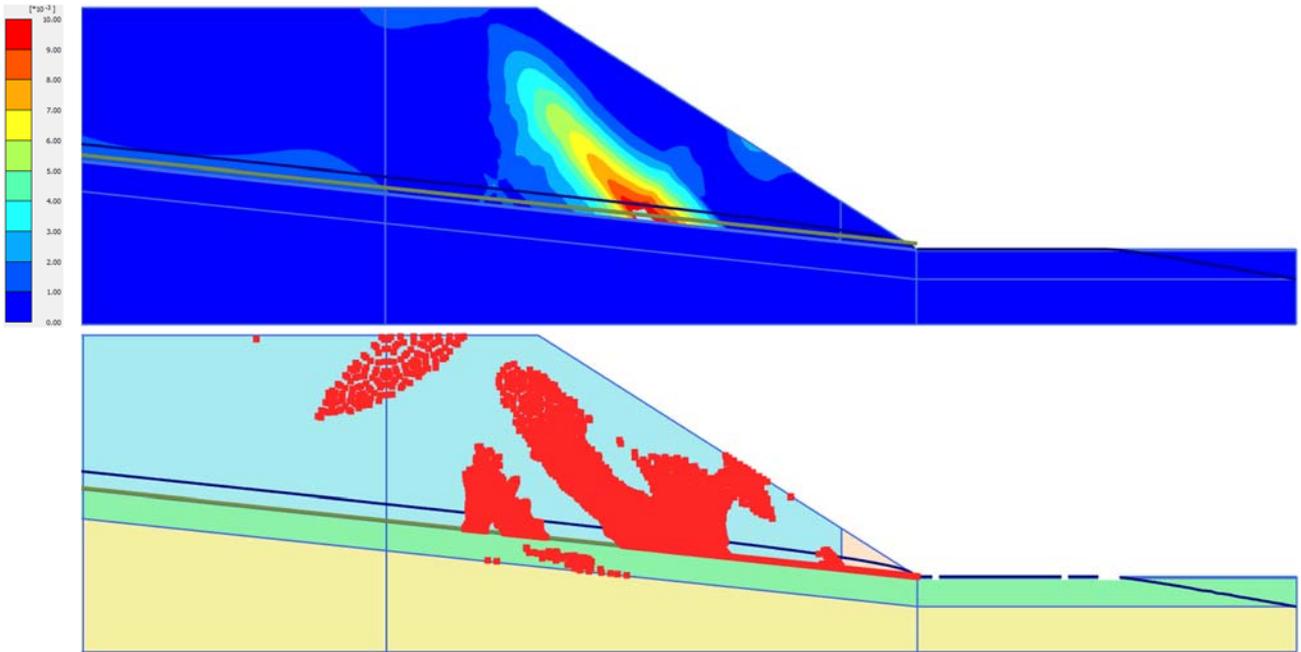


図15 case1のせん断ひずみと破壊点分布（境界層に十分に小さいせん断強度を適用）

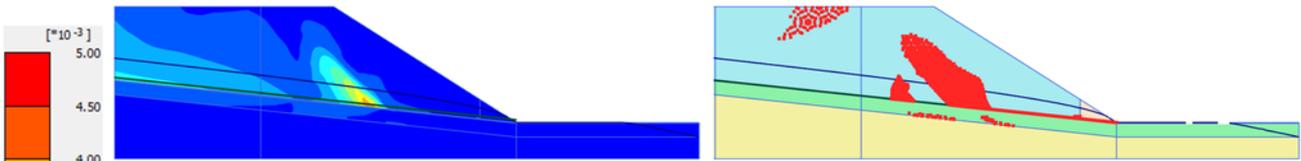


図16 case2のせん断ひずみと破壊点分布（境界層にシルトの定圧繰返しせん断強度を適用）

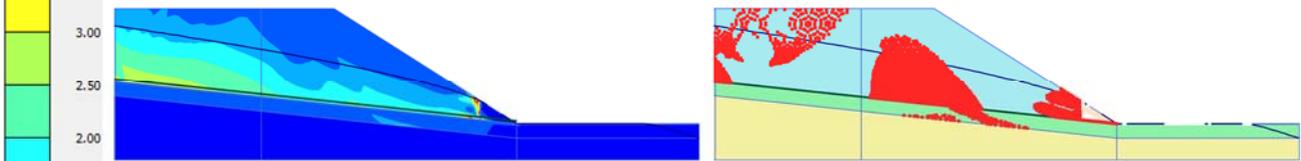


図17 case3のせん断ひずみと破壊点分布（境界層にシルトの定体積せん断強度を適用）

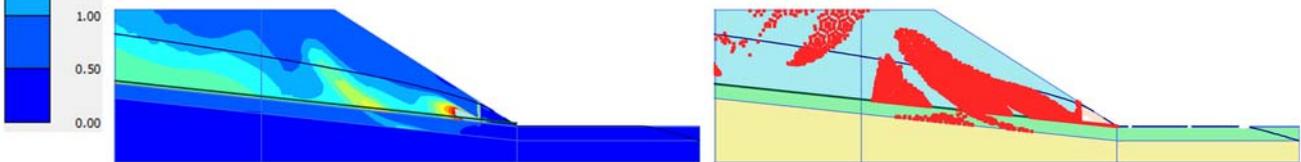


図18 case4のせん断ひずみと破壊点分布（境界層に砂・シルトの定体積せん断強度を適用）

に進展しなかったため、シルトの定体積単調載荷一面せん断試験から得られた強度定数は、インターフェースに適用すると過大評価になることが示された。法先に集中しているせん断ひずみは補強材が他の土層より粘着力 c が大きく、砂層を堰き止めているために発生したと考えている。

最後に砂・シルトの定体積単調載荷一面せん断試験から得られた強度定数をインターフェースに適用した case4 では、左端の水頭 20m まで上昇させたときに崩壊に至った。case1 のせん断ひずみと破壊点が生じた場所が類似しており、砂・シルトの強度定数をインターフェースに用いると地下水位が十分に上昇した際には大規模すべりに進展する危険性が高いことを示唆している。

法先にせん断ひずみが集中している要因は、case3 と同じであると考えており、今後も検討する予定である。

5. まとめ

本論文では、被災箇所で採取した試料を用いて一面せん断試験を実施し、地山材料のせん断強度を明らかにした上で、2次元有限要素解析により試験結果の妥当性を検討したものである。本研究から得られた結論は以下の通りである。

定体積単調載荷一面せん断試験では、軟質化したシルト層と砂層の境界面で大規模すべり崩壊が発生する事象を示す強度定数が得られた。また、有効土被り圧 25～

150kN/m² に相当する領域における境界面のせん断強度が最も小さくなり、崩壊事象と類似することが示された。なお、地下水位が上昇し飽和した際には1割5分程度の切土でも砂層が変状する可能性がある。定体積繰返し載荷一面せん断試験では、砂ならびに砂・シルト供試体では単調載荷試験の強度定数と近い値を示し、一つの供試体で効率よく強度定数を求められることが示された。定圧繰返し載荷一面せん断試験からは、シルトならびに砂・シルト供試体は繰返しせん断を受け続けたことによりせん断強度の低下が確認され、大変位すべりを模擬できたことが示された。

2次元有限要素解析より case1, 2 より砂層とシルト層の境界面から地下水位が数 m 上昇し、流れ盤地層境界を有する際、大規模すべりに進展する危険性が高いことが示唆された。case3 は地下水位を十分に上昇させてもインターフェースの強度定数が大きいため崩壊に至らなかったことが示された。

一方、case4 は地下水位が十分に上昇し、流れ盤地層境界を有すると大規模崩壊に進展することが示された。今後は、インターフェースのパラメータと法先に生じるせん断ひずみ、境界条件についてさらに検討する予定である。

謝辞

2次元有限要素解析を行うにあたって、矢作建設工業株式会社の武藤裕久博士にご指導いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村浩之, 清水清文: すべり面におけるせん断強度決定のための土質試験法, 日本地すべり学会誌, 第15巻, 第7号, pp.25-32, 1978.