

すべり面せん断試験機の開発と  
その適用によるすべり面せん断抵抗角の評価

2004年 9月

眞 弓 孝 之

# 目 次

	頁
1. はじめに .....	1
1. 1 本研究の目的 .....	2
1. 2 本論文の構成 .....	5
1. 3 各章の骨子 .....	6
2. 本研究の位置付け .....	8
2. 1 残留強度を計測する技術に関する研究の歩み .....	8
2. 2 すべり面に関する構造と土質特性に関する研究の動向 .....	10
2. 3 本研究の意義～まとめ～ .....	13
3. すべり面せん断試験機の開発 .....	15
3. 1 試験機の特徴 .....	16
3. 1. 1 試験機の構造 .....	16
3. 1. 2 試験方法 .....	17
(1) 含すべり面不攪乱試料の採取 .....	17
(2) せん断箱への試料装填 .....	18
(3) 試験仕様 .....	18
3. 2 結果の解釈 .....	19
3. 2. 1 せん断特性から見たタイプ分け .....	19
(1) タイプ .....	19
(2) タイプ .....	21
3. 2. 2 試験結果の事例 .....	23
(1) 事例1：高柳すべり面 .....	23
(2) 事例2：大瀬すべり面 .....	25
3. 3 すべり面せん断試験の開発に関するまとめ .....	27
4. すべり面せん断試験結果の特徴 .....	29
4. 1 地質分類とすべり面のせん断抵抗角 .....	29
4. 2 地質毎に見るリングせん断試験結果との相違点 .....	32
4. 2. 1 リングせん断試験の方法 .....	32
4. 2. 2 せん断抵抗角の比較 .....	34
4. 2. 3 現場単位に見るせん断抵抗角の均質性 .....	35
(1) 狼沢地区地すべり .....	35
(2) 風穴地区地すべり .....	38
(3) 平山地区地すべり .....	40
(4) 横川地区地すべり .....	43
4. 3 すべり面せん断試験結果の特徴に関するまとめ .....	46

5. すべり面の構造とせん断抵抗角 .....	50
5. 1 すべり面粘土の土質特性 .....	50
5. 1. 1 粒度特性とせん断抵抗角との関係 .....	50
5. 1. 2 コンシステンシー特性とせん断抵抗角との関係 .....	54
5. 2 走査型電子顕微鏡による構造観察 .....	58
5. 2. 1 すべり面の観察 .....	59
(1) 新第三系堆積岩地帯地すべりのすべり面 .....	59
(i) すべり面を被覆するスメクタイト .....	59
(ii) スメクタイトの凝集 .....	61
(2) 変成岩地帯地すべりのすべり面 .....	65
(i) 三波川泥質片岩地帯の地すべり .....	65
(ii) 三波川塩基性片岩地帯の地すべり .....	67
(iii) 御荷鉾緑色岩類帯の地すべり .....	68
(iv) 長崎変成岩の地すべり .....	68
(v) 秩父帯の地すべり .....	69
5. 2. 2 リングせん断試験後せん断面 .....	71
5. 3 擦痕構造によるせん断抵抗角への影響 .....	73
5. 3. 1 レーザー変位計を用いた表面形状の計測 .....	73
(1) 使用計測機器 .....	73
(2) 計測方法 .....	73
5. 3. 2 粗度の算出 .....	74
5. 3. 3 すべり面の粗度 .....	76
5. 3. 4 粗さとせん断抵抗角との関係 .....	78
5. 4 本章のまとめ .....	80
6. 残留状態へ向かう構造変化の様式 .....	82
6. 1 残留状態せん断面の形成とスメクタイトの凝集 .....	82
6. 2 擦痕構造と粗粒径成分 .....	86
6. 3 すべり面の自然含水比 .....	94
6. 4 まとめ～残留強度の定義について～ .....	101
7. すべり面構造把握に向けた今後の取り組みと安定解析への適用 .....	108
7. 1 さらにすべり面の構造理解へ向けて .....	108
7. 2 地すべり安定解析における土質試験結果の利用について .....	112
7. 2. 1 逆算解析の方法 .....	112
7. 2. 2 逆算解析結果と土質試験結果の関係 .....	114
(1) 逆算解析条件について .....	114
(2) 試験値と逆算解析結果の関係 .....	115
7. 2. 3 二次元安定解析による逆算解析の限界 .....	116

(1) 現場概要 .....	118
(2) すべり面粘土の土質力学的特性 .....	119
(3) くさび破壊理論による三次元安定解析 .....	120
7. 2. 4 まとめ .....	124
8. 総括 .....	127
8. 1 第一分野の拡張 (3章のまとめ) .....	127
8. 2 第二分野の拡張 (4章のまとめ) .....	128
8. 3 第三分野の拡張 (5章のまとめ) .....	130
8. 4 すべり面構造についての新たな視点 (6章のまとめ) .....	131
8. 5 すべり面の構造理解が導く新しい地すべり調査・計画 (7章のまとめ) .....	134
8. 5. 1 すべり面構造調査の展望 .....	134
8. 5. 2 土質試験結果を用いた地すべり安定解析 (求められる三次元安定解析) .....	136
謝辞 .....	137
参考文献 .....	140



## 図 目 次

図 1. 1	集水井内ですべり面を確認する作業風景	2
図 1. 2	従来のすべり面および残留強度に関する研究の構成	3
図 1. 3	すべり面せん断試験機開発の成果～土質試験結果が設計に利用できる可能性の創出	4
図 1. 4	本研究の目的～設計への土質試験結果利用の可能性拡大	5
図 3. 1	すべり面せん断試験機全景	15
図 3. 2	すべり面せん断試験機の構造	16
図 3. 3	すべり面せん断試験機の構造	17
図 3. 4	底板昇降ジャッキ	17
図 3. 5	含すべり面不攪乱試料の採取方法	17
図 3. 6	せん断箱への試料装填	18
図 3. 7	有効垂直応力 $\sigma_v$ 、せん断強度 $\tau$ とせん断変位の関係(タイプ A)	20
図 3. 8	タイプ A の応力経路	20
図 3. 9	有効垂直応力 $\sigma_v$ 、せん断強度 $\tau$ とせん断変位の関係(タイプ B)	21
図 3. 10	タイプ B の応力経路	22
図 3. 11	高柳すべり面の状態	23
図 3. 12	高柳すべり面でのすべり面せん断試験後状況	23
図 3. 13	有効垂直応力 $\sigma_v$ 、せん断強度 $\tau$ とせん断変位の関係(高柳)	24
図 3. 14	有効垂直応力 $\sigma_v$ とせん断強度 $\tau$ の関係(高柳)	25
図 3. 15	有効垂直応力 $\sigma_v$ とせん断強度 $\tau$ の関係(大瀬)	26
図 4. 1	対象試料の採取地位置図	29
図 4. 2	日本各地の地すべり地で実施したすべり面せん断試験結果	30
図 4. 3	狼沢 7 すべり面のスメクタイト被覆	31
図 4. 4	各地質を代表するすべり面粘土の粒度分布	31
図 4. 5	リングせん断試験の原理	33
図 4. 6	リングせん断試験機全景	33
図 4. 7	リングせん断試験結果とすべり面せん断試験結果の比較	34
図 4. 8	リングせん断とすべり面せん断の試験値差異と粘土含有率	35
図 4. 9	狼沢すべり面等高線図上の試料採取位置	36
図 4. 10	狼沢 10 すべり面の状況	36
図 4. 11	狼沢 10 すべり面でのすべり面せん断試験後状況	37
図 4. 12	狼沢すべり面のせん断試験結果	37
図 4. 13	狼沢すべり面粘土の代表的な粒度分布	38
図 4. 14	風穴 8 すべり面の状況	38
図 4. 15	風穴すべり面等高線図上の試料採取位置	39
図 4. 16	風穴 8 すべり面でのすべり面せん断試験後状況	39
図 4. 17	風穴すべり面のせん断試験結果	40
図 4. 18	平山すべり面等高線図上の試料採取位置	40
図 4. 19	平山 27 すべり面の状況	41

図 4. 20	平山 27 すべり面でのすべり面せん断試験後状況	41
図 4. 21	平山すべり面のせん断試験結果	41
図 4. 22	日本各地の地すべり地で実施したすべり面せん断試験結果《再掲，一部改変》	42
図 4. 23	横川すべり面等高線図上の試料採取位置	43
図 4. 24	横川 6 すべり面の状況	44
図 4. 25	横川 6 すべり面でのすべり面せん断試験後状況	44
図 4. 26	横川すべり面のせん断試験結果	44
図 4. 27	円川原すべり面状況 ( $\theta=21.15^{\circ}$ )	45
図 4. 28	蟹ヶ沢 3 すべり面状況 ( $\theta=11.79^{\circ}$ )	45
図 4. 29	崩ヶ沢 5 すべり面状況 ( $\theta=11.71^{\circ}$ )	45
図 4. 30	谷 1 すべり面状況 ( $\theta=9.12^{\circ}$ )	45
図 5. 1	各地質区分に見られるすべり面粘土の粒度特性	51
図 5. 2	粘土含有率とリングせん断試験結果の関係	53
図 5. 3	粘土含有率とすべり面せん断試験結果の関係	53
図 5. 4	塑性指数とリングせん断試験結果の関係	55
図 5. 5	含スメクタイトすべり面粘土の活性度と粗粒径含有率	56
図 5. 6	すべり面粘土の塑性指数とすべり面せん断試験結果	57
図 5. 7	山の内 15 号集水井で確認されたすべり面[状況 1]	59
図 5. 8	山の内 15 号集水井で確認されたすべり面[状況 2]	59
図 5. 9	純粹モリロイトのリングせん断試験後せん断面[形態 A]	60
図 5. 10	純粹モリロイトのリングせん断試験後せん断面[形態 B]	60
図 5. 11	大滝すべり面に見られた色調が異なる部位	61
図 5. 12	大滝すべり面において黒色に見える部位の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 50$ 倍]	62
図 5. 13	左に同じ[観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	62
図 5. 14	大滝すべり面において白色に見える部位の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 50$ 倍]	62
図 5. 15	左に同じ[観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	62
図 5. 16	大滝すべり面において青灰色に見える部位の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 50$ 倍]	63
図 5. 17	左に同じ[観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	63
図 5. 18	大滝すべり面において黄褐色に見える部位の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 50$ 倍]	63
図 5. 19	左に同じ[観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	63
図 5. 20	大滝すべり面黒色部の表面削剥後の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	64
図 5. 21	左に同じ[観察倍率 $\times 3,500$ 倍]	64
図 5. 22	大滝すべり面白色部の表面削剥後の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	64
図 5. 23	左に同じ[観察倍率 $\times 3,500$ 倍]	64
図 5. 24	大滝すべり面青灰色部の表面削剥後の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	65
図 5. 25	左に同じ[観察倍率 $\times 3,500$ 倍]	65
図 5. 26	大滝すべり面黄褐色部の表面削剥後の観察状況[下盤，観察倍率 $\times 1,500$ 倍]	65
図 5. 27	左に同じ[観察倍率 $\times 3,500$ 倍]	65
図 5. 28	長又 3 すべり面状況	66
図 5. 29	長又 3 すべり面せん断試験後状況	66

図 5. 30	長又 3 すべり面状況[下盤, × 約 350 倍]	66
図 5. 31	左に同じ[下盤, × 約 3,500 倍]	66
図 5. 32	BV14-3H すべり面に見る光沢の様子	67
図 5. 33	石畳 BV14-3H すべり面状況[下盤, × 約 50 倍]	67
図 5. 34	左に同じ[下盤, × 約 3,500 倍]	67
図 5. 35	風穴 8 すべり面の観察状況[下盤, 観察倍率 × 50 倍]	68
図 5. 36	左に同じ[観察倍率 × 1,500 倍]	68
図 5. 37	山口林道すべり面に見る定向配列の様子	69
図 5. 38	山口林道すべり面状況[下盤, × 約 350 倍]	69
図 5. 39	左に同じ[下盤, × 約 3,500 倍]	69
図 5. 40	下小越 7 すべり面せん断後状況[上盤, × 50 倍]	70
図 5. 41	同左[上盤, × 3,500 倍]	70
図 5. 42	ワイト純粋鉍物試料のリングせん断試験後せん断面状況[下盤, × 1,500 倍]	70
図 5. 43	ワイト純粋鉍物試料のリングせん断試験後せん断面状況 [下盤, × 1,500 倍]	70
図 5. 44	下小越 7 号井内すべり面の鏡肌	70
図 5. 45	峰 4 試料のリングせん断試験後せん断面[200kPa]	71
図 5. 46	図 5. 45 に示すせん断面観察状況のスケッチ	71
図 5. 47	峰 4 試料のリングせん断試験後せん断面[200kPa]	72
図 5. 48	図 5. 47 に示すせん断面観察状況のスケッチ	72
図 5. 49	三次元形状測定システム構成図	73
図 5. 50	表面形状の計測状況	74
図 5. 51	断面曲線, 粗さ曲線, 平均線, 基準長さの説明図	75
図 5. 52	断面曲線の傾斜補正と   粗さ曲線 $f(x)$   の例	75
図 5. 53	峰 4 試料のリングせん断試験後せん断面三次元形状計測結果	76
図 5. 54	すべり面とリングせん断試験後せん断面の最大高さと算術平均粗さ	77
図 5. 55	計測サイズの違いによる算術平均粗さの変化	77
図 5. 56	リングせん断試験後せん断面の $Ra^*$ と $r'$	78
図 5. 57	すべり面の $Ra^*$ と $r'$	78
図 5. 58	含スメクタイトすべり面粘土の粗粒径含有率とリングせん断試験後せん断面の 算術平均粗さ	79
図 5. 59	含スメクタイトすべり面粘土の粗粒径含有率とすべり面の算術平均粗さ	79
図 6. 1	山の内すべり面の産状(円柱状供試体の全周囲断面状況)	83
図 6. 2	山の内 17 リングせん断試験結果( - 関係)	84
図 6. 3	山の内 17 リングせん断試験結果( - 関係)	84
図 6. 4	17 すべり面[下盤, × 50]	85
図 6. 5	17 すべり面[下盤, × 1,500]	85
図 6. 6	17 リング後[下盤, 150kPa, × 350]	85
図 6. 7	17 リング後[上盤, 200kPa, × 350]	85
図 6. 8	蟹ヶ沢 11_425 のリングせん断試験後せん断面写真	88

図 6. 9	蟹ヶ沢	11_75 のリングせん断試験後せん断面写真	88
図 6. 10	蟹ヶ沢	11_2 のリングせん断試験後せん断面写真	88
図 6. 11	蟹ヶ沢	11 のすべり面せん断試験後せん断面写真	88
図 6. 12	蟹ヶ沢	11_425 のリングせん断試験後せん断面形状計測結果	89
図 6. 13	蟹ヶ沢	11_75 のリングせん断試験後せん断面形状計測結果	89
図 6. 14	蟹ヶ沢	11_2 のリングせん断試験後せん断面形状計測結果	90
図 6. 15	蟹ヶ沢	11 のすべり面形状計測結果	90
図 6. 16	蟹ヶ沢	11 各試料のリングせん断試験結果 [ - 関係図 ]	91
図 6. 17	蟹ヶ沢	11_425 のリングせん断試験後せん断面観察状況, × 50 倍	92
図 6. 18	蟹ヶ沢	11_425 のリングせん断試験後せん断面観察状況, × 350 倍	92
図 6. 19	蟹ヶ沢	11_75 のリングせん断試験後せん断面観察状況, × 50 倍	93
図 6. 20	蟹ヶ沢	11_75 のリングせん断試験後せん断面観察状況, × 350 倍	93
図 6. 21	蟹ヶ沢	11_2 のリングせん断試験後せん断面観察状況, × 50 倍	93
図 6. 22	蟹ヶ沢	11_2 のリングせん断試験後せん断面観察状況, × 350 倍	93
図 6. 23	蟹ヶ沢	11 のすべり面せん断試験後せん断面観察状況, × 50 倍	93
図 6. 24	蟹ヶ沢	11 のすべり面せん断試験後せん断面観察状況, × 350 倍	93
図 6. 25		リングせん断試験における残留状態せん断面形成に起因した含水比の変化	95
図 6. 26		地質毎に見るリングせん断試験前後のせん断面含水変化の状況	96
図 6. 27		地質毎に見るリングせん断試験後のせん断面と下部供試体内含水状況の差異	96
図 6. 28		すべり面粘土の液性指数評価	97
図 6. 29		リングせん断試験後せん断面含水比の液性指数評価	97
図 6. 30	試料	1 ~ 9 のすべり面周囲含水状況	98
図 6. 31	試料	1 ~ 9 のすべり面周囲液性指数状況	99
図 6. 32		各種地すべりのすべり面を挟んだ地質構造と含水比, 液性指数	100
図 6. 33		すべり面からの距離と粒径加積曲線 (徳島県水のなる)	
		[ 山崎 (2000 <sup>80)</sup> ) を引用 ]	102
図 6. 34		含粗粒径成分すべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図	105
図 6. 35		含粗粒径成分すべり面粘土試料の残留状態へ向かう際の間隙比変化模式図	106
図 6. 36		含スメクタイトすべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図	106
図 7. 1		60mm 仕様試験機のせん断箱状況	110
図 7. 2		60mm 仕様の底板昇降ジャッキ	110
図 7. 3		間隙水圧計測対応試験機	111
図 7. 4		間隙水圧計測対応リングせん断試験機による間隙水圧計測事例	111
図 7. 5		すべり面強度と逆算解析結果	115
図 7. 6		T 地区地すべり C ブロック平面図及び 6 号集水井位置	117
図 7. 7		6 号集水井施工位置を通る C ブロック横断面図	117
図 7. 8		T 地区すべり面の状況	120
図 7. 9		くさび破壊の形状説明図 (a ~ c) とくさびの形状係数 K の読み取り図 (d)	
		[ 小野寺, 吉中 (1979) <sup>31)</sup> より ]	122
図 7. 10		測線上の任意安定解析スライスをくさび形状に読み替える方法の説明図	123

図 8. 1	含粗粒径成分すべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図（再掲）	.....133
図 8. 2	含スメクタイトすべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図（再掲）	.....133

## 表 目 次

表 4. 1	すべり面せん断抵抗角と地質 .....	30
表 4. 2	日本各地より採取したすべり面（すべり面粘土）の土質特性 .....	48
表 5. 1	本論文に使用する地質名の略記号一覧（表 4.1 より一部を抜粋） .....	51
表 7. 1	すべり面確認深度一覧表 .....	118
表 7. 2	T地区すべり面粘土の土質試験結果一覧表 .....	119
表 7. 3	解析結果安全率一覧表（ $c'$ 単位：kPa） .....	123

## 1. はじめに

施工中の集水井切羽ですべり面を探し、層厚数 mm 程度の薄層状を呈するすべり面粘土の連続を確認する。すべり面の周囲には従属せん断面が発達し、主変位せん断面との区別は容易でない。主変位せん断面は、多くの場合、明らかに硬軟の違いがある基岩面の近傍にあり、粘土が定向配列した鏡肌様の光沢面には地すべり滑動の痕跡である擦痕構造が確認される。こうした特徴を手掛かりにすべり面を探す。

本稿で取り上げる 48 現場 124 試料のほとんどは、筆者が集水井からサンプリングしたすべり面粘土であり、多くの方々のすべり面を見つけるという熱意と協力を受けて成功することができた事例群である。採取したすべり面から引き出せる情報は極めて多く、全てを表現することができないもどかしさを常に感じながら、少しでも多くの事実を説得力ある形で表現することに努める。

本研究では、採取したすべり面にせん断変位を直接与えることができる一面せん断試験機を開発し、全国の様々な地質に属する 124 試料のすべり面に対して行った試験結果を報告する。また、様々な計測・観察手法を駆使し、すべり面のせん断試験で得た試験値の評価を試みる。すべり面に関して引き出した様々な情報が相互に関連づけられた時、すべり面のせん断強度が地質毎に高い精度で提案できるものとする。

かつてこうした取り組みを成し得た研究者はいない。理由は、実際のすべり面を観察する機会に彼らは恵まれなかったためと筆者は考える。幸いにもその機会を得た本研究が果たすべき役割は大きく、責任は重い。本研究がすべり面の構造理解と、実務における設計精度の向上に貢献できることを強く願うものである。

なお、本稿で取り上げたすべり面は、全て再滑動型地すべりのものであり、三波川泥質片岩地すべりの一部の事例を除いて擦痕・条痕構造が明瞭であり、光沢顕著な剥離性に富むものである（玉田他（1991<sup>1)</sup>）が行ったすべり面分類の摩擦型に相当）。また、文中に用いるすべり面という用語は、擦痕、および鏡肌光沢を伴うせん断面そのものを指す。これに対し、すべり面粘土の用語は、すべり面を手作業で攪乱採取するため、層厚数 mm のすべり面周囲試料を含む粘性土に対して用いている。



図1. 1 集水井内ですべり面を確認する作業風景

## 1. 1 本研究の目的

残留強度の概念，およびこれの計測技術に関する研究は，海外でも，また日本国内においても活発であり，既に多くの研究業績が蓄積されている。これまでに報告されている研究成果を分類すると，第一に残留せん断強度をより高精度に計測するための技術開発が挙げられる。具体的には，繰り返し一面せん断試験機やリングせん断試験機の開発がこれに当たる。第二には，対象とするすべり面粘土の地質学的背景の多様性に関する研究分野があり，我が国においては新第三系堆積岩地すべりに関する研究が他の地質帯に比べて多く，すべり面が実際に観察された事例報告も目にする。さらに第三の分野としては，残留強度を計測した試料の物理特性（粒度特性，コンシステンシー特性等）に関する研究分野があり，第一の分野のせん断強度特性との関係について数多くの研究業績がある。

図1. 2 は，従来のすべり面や残留強度に関する研究の動向を模式的に示しており，先述の三つの研究分野が，三次元の各軸に割り当てられ，各分野における研究の現状が原点を中心に外へ向けて広がる球体として表現されている。



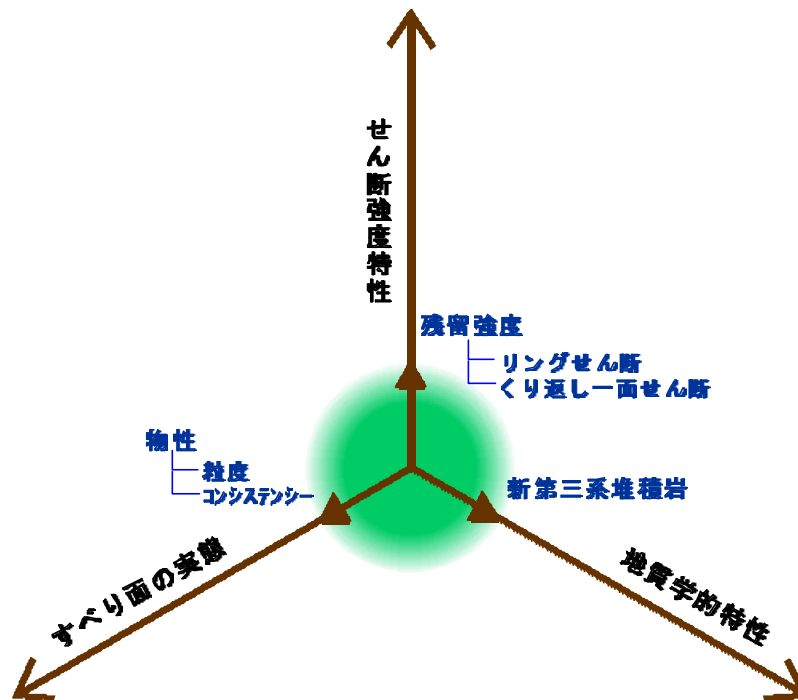


図1. 2 従来のすべり面および残留強度に関する研究の構成

図1. 2 に示す過去の業績を眺めると、従来の研究は主としてすべり面とその周囲を攪乱収集した試料を用いる試験研究であり、人工的に残留強度せん断面を再構築する試みであることに気づく。そこで本研究では、すべり面の実態を精度高く表現することに主眼を置き、不攪乱採取したすべり面を直接的にせん断面として利用できる一面せん断試験機の開発を行って、すべり面が有する原位置せん断強度を計測することとした。

図1. 3 は、従来のリングせん断試験や繰返し一面せん断試験では、試験結果を設計（安定解析）に利用できるレベルに到達し得なかったものが、すべり面せん断試験によってすべり面の原位置強度が計測されることで、これに到達する可能性が開けることを模式的に示している。

さらに本研究では、原位置せん断強度をすべり面せん断試験で求めるとともに、対象としたすべり面の鉱物組成をX線粉末回折分析や、すべり面の電子顕微鏡観察によって推定し、またすべり面が有する擦痕の起伏程度をレーザー変位計を用いた表面形状計測によ

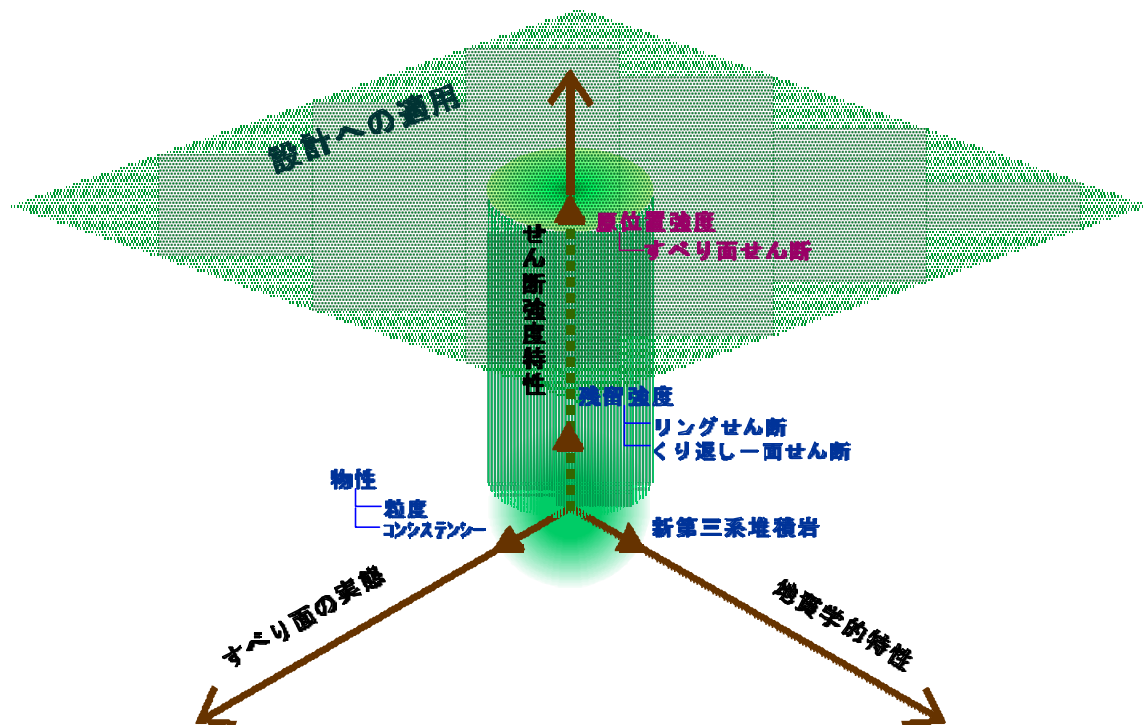


図1. 3 すべり面せん断試験機開発の成果～土質試験結果が設計に利用できる可能性の創出し粗度評価する。こうした面を造る材料と構造の正確な把握により，すべり面の実態が一層正確に把握できると筆者は考える。

また、対象とするすべり面についても、従来より研究成果が多い新第三系堆積岩地すべりのみならず、古第三紀以前の地質における地すべりや変成岩地帯地すべりに対しても精力的にデータの収集を行い、すべり面の構造、残留強度特性の地質毎の差異を明らかにすることとした。

図1. 4 は、冒頭に定義した三つの研究分野における成果が相互に関連することで、すべり面に関する理解が益々膨らむ様子を大球が表し、膨張する球体が設計への適用可能なレベルを示す平面と交わり、これで生じる接円の広がりによって、本研究の最終目的となる設計に土質試験結果を利用する基礎が確立する様子を表現している。

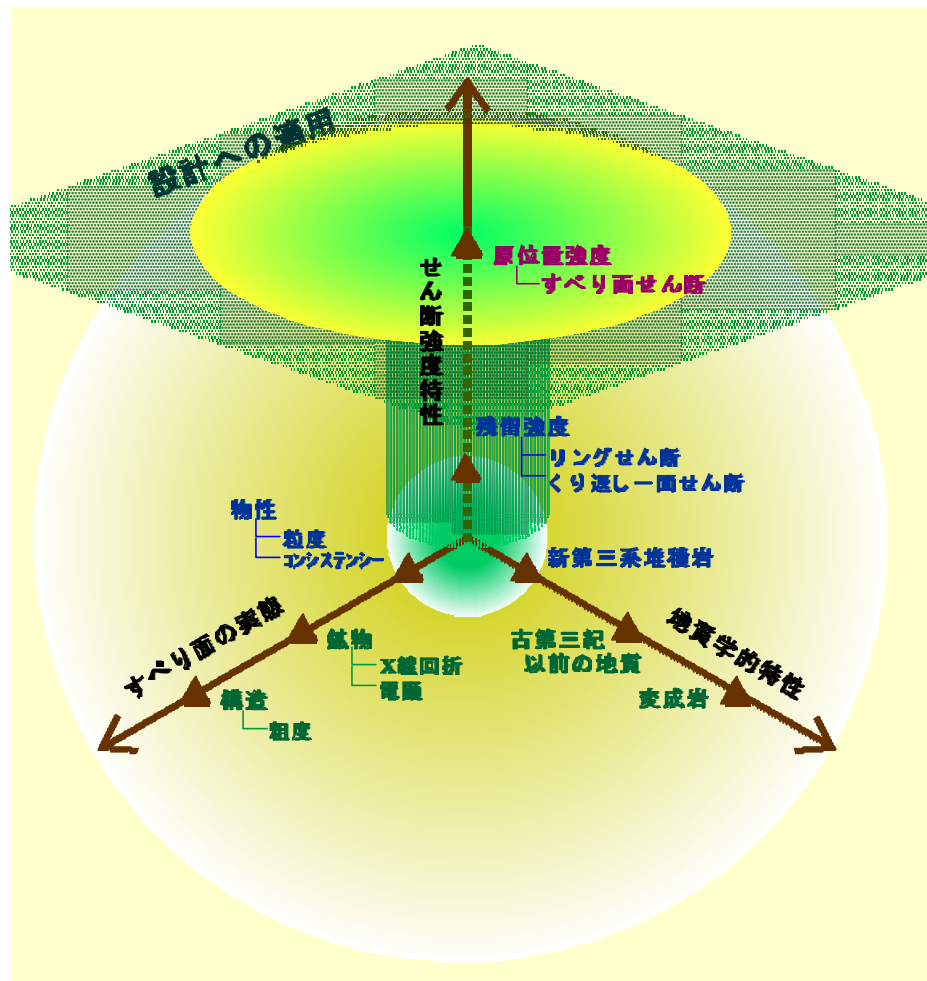


図1. 4 本研究の目的～設計への土質試験結果利用の可能性拡大

## 1. 2 本論文の構成

以下に本論文の構成を述べる。

まず第1章では、本論文の研究動機、研究目的とアプローチの方法について述べ、第2章で研究史における位置付け、本研究の意義に関する主張を行う。具体的には、第1章で研究目的を達成するために三分野のアプローチ設定を行い、各分野から得る成果の集大成として目的が成就することを示す。

研究の目的...すべり面の土質特性を把握し、地すべり安定解析で土質試験結果を用いる事の意義と可能性を検証する。

- ・ 第一分野...残留強度計測技術の向上に関する研究分野
- ・ 第二分野...すべり面の残留強度と多様な地質学的背景との関係に関する研究分野
- ・ 第三分野...残留強度と試料の物理特性（すべり面の土質力学的特性）との関係に関する研究分野

第2章では、第1章で設定した三つの分野の内、方法論的側面を構成する第一分野と第三分野について、それぞれの研究史に触れ、本論文の研究史における位置付けを行う。

第3章、第4章、第5章は、本稿の具体的な研究成果を提示する章であり、第3章では第一分野に関する方法論と成果を示す。第4章では、第3章の結果を第二分野に定義する地質学的多様性との関連で整理し、開発した試験機の評価を行う。さらに第5章は、筆者が第三分野と位置付けた、すべり面に対する様々な土質力学的検討の成果を述べ、次章に行うすべり面の構造に関する考察の根拠を示す。

考察の章となる第6章では、本研究を通じて得られた第一～第三分野の各成果の融合を試み、すべり面の構造に関する新しい解釈を示す。この成果を受けて第7章の展望では、すべり面の構造理解をさらに前進するために必要な視点、得られた成果を設計に適用する上での問題点を指摘する。

最終章となる第8章総括では、各章から得られた成果のまとめと、本研究の目的に対して成し遂げた業績の総括を行う。

### 1. 3 各章の骨子

以下に、前節に示した本論文の構成に従い、各章の骨子を記す。

第1章 本研究を始めるに当たっての動機と研究の目的を述べる。また、本論文の構成、各章の骨子を整理する。

第2章 残留強度を計測する試験、及びすべり面の構造と土質特性に関する研究史に触れ、研究史における本研究の位置付けを行う。

第3章 実際のすべり面のせん断強度を直接的に評価するために、不攪乱すべり面を用いてせん断試験を行う試験機の開発を行った。本章では、新しく開発したすべり面せん断試

験の構造，及び計測手法を紹介すると共に，計測したデータに示される残留強度すべり面の典型的なせん断経緯について解説する。

第4章 :日本各地の地すべり現場で集水井施工時に確認されたすべり面を不攪乱採取し，開発したすべり面せん断試験機を用いて，これらすべり面試料の原位置せん断強度を計測した。本章では計測したせん断強度の内，特にせん断抵抗角に着目し，別途実施したリングせん断試験の結果と併せて，地質毎のすべり面せん断強度の評価を試みる。

第5章 :従来の残留強度の研究は，調整試料を用いた大変位せん断試験の結果を，粘土含有率や塑性指数等と関連づけたものが多い。本章ではリングせん断試験とともに，含すべり面不攪乱試料によるすべり面せん断試験を行い，人工的に再現した残留強度と，実際のすべり面のせん断強度が示す諸指数との関係，走査型電子顕微鏡に見られる面の構造について比較を試みる。また，従来は試料中の細粒分に着目した検討が多い中で，すべり面に形成する擦痕の起伏が試料中に含まれる相対的に粗な粒子の存在に起因する可能性に着目し，残留強度と細砂以上粒径含有率との関係，さらに残留強度と面粗さとの関係についても検討を行う。

第6章 :総合考察の章。前章に述べた成果を受け，特にスメクタイトの被覆層を伴う新第三系堆積岩地すべりのすべり面が，残留強度せん断面の形成過程でスメクタイト被覆層を生じる可能性をリングせん断試験の試験結果から考察した。また，変成岩地帯地すべりと共に粗粒径成分に富む地すべり粘土と特徴付けられる新第三系凝灰角礫岩地すべりの場合に，含有する粗粒径成分の多寡が面の粗度に強く影響し，せん断抵抗角がスメクタイト被覆の完成度に結果が左右されることを示す。さらに，こうした残留状態のせん断面を形成する過程で，せん断面の含水比がどのように変化するかを示し，残留強度のせん断面形成のメカニズムを考察する。

第7章 :展望の章。すべり面の実態に関する本稿の成果をさらに発展させるに当たって，今後必要となる方法論を提案する。また，すべり面の実態が解明されることで，従来の二次元での地すべり安定解析が三次元解析へと技術向上し，安全率評価の精度が格段に向上することを指摘する。

第8章 :総括の章。各章に述べた本研究の成果を要約し，本論文の成果を総括する。

## 2. 本研究の位置付け

### 2. 1 残留強度を計測する技術に関する研究の歩み

Skempton<sup>2)</sup> が 1964 年に残留係数の概念を提唱して以来、残留せん断強度を計測するための取り組みが活発になされることとなった。残留せん断強度とは、せん断抵抗がピーク値を越えて漸次低下し、究極的な定常せん断状態に達したときの値をいう。この状態に至るには、一般に大きなせん断変位が必要であり、既に大変位を経験した地すべりのすべり面せん断強度は、残留強度への強度低下を完了していると考えられる。これまでに提案されている主たる試験種には、Skempton (1964<sup>2)</sup>) が提案した繰返し型一面せん断試験装置と Bishop (1971<sup>3)</sup>) の提案によるリングせん断試験装置がある。

繰返し型一面せん断試験装置とは、従来的一面せん断試験装置を用いて、所定のせん断変位を与えた後に、せん断開始位置まで強制的に可動箱を戻して再度のせん断を行うものである。国内においても、繰返し一面せん断試験機を用いたせん断層構造や残留強度に関する研究は数多く、30 往復もの自動繰返しせん断を行うことでせん断面の凹凸の影響が無くなると報告した佐野他 (1994<sup>4)</sup>, 1995<sup>5)</sup>) の研究、最大せん断変位が 600mm の中距離せん断試験機を開発するとともに、これのせん断試験後状況を徳永 (1991<sup>6)</sup>) が提案した軟 X 線造影法により観察し、せん断面形成過程におけるせん断層のダイナミックな変化を報告した岸本他 (1997a<sup>7)</sup>, 1997b<sup>8)</sup>) の業績は、国内における繰返し一面せん断試験の先駆けとなった研究報告である。

さらに、従来より一面せん断試験で課題とされてきた試料-せん断箱間の周面摩擦の問題に対し、供試体を介して載荷板の逆位置で鉛直荷重を計測するという、渋谷・三田地他 (1995<sup>9)</sup>) によって提案された手法を、繰返し一面せん断試験機にも応用した三田地他 (2000<sup>10)</sup>)、試験の汎用性を考えた装置の小型化と計測・制御の自動化、精度向上のための流出試料対策等を行った大河原他 (2000<sup>11)</sup>) の研究業績は、繰返し一面せん断試験結果の精度向上に大きく貢献した。

また、ドーナツ型の試験供試体に回転せん断変位を与えることで、理論上、無限大変位のせん断を可能にしたリングせん断試験機の原型は、1939 年に Hvorslev<sup>12)</sup> によって提

案されたものなどがこれに当たる。その後、多くの研究者によって提案された様々なせん断箱サイズや載荷板構造のリングせん断試験機を総括し、機構、試験手順等について、一定の基準化を行った報告が先述の Bishop (1971<sup>3)</sup>) の提案である。

Bishop によって提案されたリングせん断試験機を国内へ最初に取り入れ、その試験方法について試験試料の仕様、せん断速度等、様々な角度から検証を試みた業績が中村他 (1978<sup>13)</sup>) である。この業績は、後に建設省土木研究所第 42 回報告 (1988<sup>14)</sup>) にまとめられた。

また、国内においてリングせん断試験のさらなる精度向上に貢献した業績には、宜保による数多くの試験実施報告やリングせん断改良報告がある (1984<sup>15)</sup>, 1993<sup>16)</sup>, 1994<sup>17)</sup>)。特に宜保他 (1994<sup>17)</sup>) は、従来の Bishop タイプの改良型では載荷機構やせん断機構に起因する回転盤のブレがあるとして、新しくエアサーボ制御装置による定体積・定圧兼用リングせん断試験機を開発し、初期の Bishop 型リングせん断試験機に比べ、格段の精度向上を実現した。近年、宜保他 (1997<sup>18)</sup>) は、改良を重ねたリングせん断試験により、鉛直荷重条件の違いがせん断停止・再開時の強度回復の程度に差を生じることを指摘し、実際のすべり面においても土被り荷重の小さい末端部等でせん断強度が回復している可能性を言及している。また中村・宜保他 (1999<sup>19)</sup>) は、定体積リングせん断試験機の実験結果から、残留強度包絡線が低い垂直応力レベルにおいて湾曲化することを報告し、その後の関連研究 (2000a<sup>20)</sup>, 2000b<sup>21)</sup>) とともに、残留強度の垂直応力依存性について考えを示した。

この他にもリングせん断試験に関する研究業績は数を増やしつつあり、破砕帯地すべりを中心とする試料のリングせん断試験結果から、せん断抵抗角が試料の粒度構成に強く影響を受けることを報告した矢田部他 (1991<sup>22)</sup>)、残留強度の収束判定手法に対して提案を行った鈴木他 (1995<sup>23)</sup>)、川上他 (1996<sup>24)</sup>) による多段階荷重変更を行うことの残留強度解析における有効性の提案、地すべりのすべり面に働く間隙水圧変化 (有効応力の変化) に伴う残留強度の変化を、リングせん断試験の鉛直荷重を変化させることで評価し、再圧密による強度回復について検証を試みた辰谷他 (2001<sup>25)</sup>, 2002<sup>26)</sup>)、すべり面試料の採取精度の吟味に始まり、せん断速度等の試験条件について、実務に使えるリングせん断試験のあり方について多角的に検討した村尾他 (2002<sup>27)</sup>, 2003<sup>28)</sup>) など、せん断速度が残

留強度に与える影響に関した検討は特に多く、透水係数、粒子の定向配列し易さに差があるすべり面粘土試料に対して、標準的なせん断速度を規定することの難しさがよく現れている。

以上に述べた試験は、試験精度の向上を目的として、採取したすべり面粘土試料に試験室内で粒度調整や、練り返し処理を施し、こうして作製した再構成試料をもとに残留強度を人工的に再現する試験と位置付けられる。そのため、得られた解析強度が、検討を行う当該現場の実際のすべり面の状態を反映したものであるか否か、常に吟味を必要とする。

その点、実際のすべり面を不攪乱の状態で利用する原位置せん断試験では、構築した残留強度せん断面とすべり面との比較が必要ない点で有利と言うことが出来る。しかしながら、国内において地すべりを対象とした原位置せん断試験が実施された例は、その費用と費用に見合う試験精度が得られないことを理由に決して多いものではなく、福本他(1979<sup>29)</sup>)による新潟県内の新第三系堆積岩地すべり粘土の長期クリープ試験報告や、永山(1993<sup>30)</sup>)によるポータブル原位置岩盤せん断装置の開発は、貴重な取り組みと言える。

こうした原位置せん断試験を少しでも簡便に、かつ高精度で実施しようとする試みの重要性は、E.Hoek & J.Bray も彼らの著書(小野寺他訳『岩盤斜面工学』<sup>31)</sup>)において、Haverland(1972<sup>32)</sup>)が行った横坑内での原位置せん断試験装置、Ross-Brown, D.M. & Walton, G.(1975<sup>33)</sup>)が岩石片中の不連続面をせん断するために開発した携帯用せん断試験機を紹介することで主張している。

## 2.2 すべり面に関する構造と土質特性に関する研究の動向

地すべりの安定解析を行うには、すべり面に発揮されるせん断強度パラメータ  $c'$ ,  $\tau'$  を決定する必要がある。しかし、地すべりのすべり面は地下深部にあるため、すべり面の観察や、原位置せん断試験等を用いてすべり面が発揮するせん断強度を直接計測する機会決して多くない。こうした状況の中、玉田他(1991<sup>1)</sup>)は主に第三紀層地すべり地帯でテストピットによるすべり面の観察を行い、すべり面の状態を四種類に分類し、かつすべり面が滑動に伴って形態変化すると言及した。さらにスメクタイト含有率とすべり面の発達段階とを関連づけ、せん断試験結果を安定解析に算入する際の問題点を抽出した。



また、山田(1989<sup>34)</sup>)、紀平(1989<sup>35)</sup>、1990<sup>36)</sup>)、山崎他(1994<sup>37)</sup>、1996<sup>38)</sup>、2000<sup>39)</sup>)、眞弓他(1997<sup>40)</sup>、2000<sup>41)</sup>)、由田他(1998<sup>42)</sup>、1999<sup>43)</sup>、2000<sup>44)</sup>)等は、集水井工施工中に切羽のすべり面を観察し、多くのすべり面が鏡肌様の光沢面を有すること、主変位せん断面の周囲に従属せん断面が多数発達すること、主変位せん断面は地すべり移動方向を反映した擦痕等の起伏構造を伴い、こうした凹凸構造がせん断強度特性に影響する可能性を有すること、また擦痕の方向がすべり面の最大傾斜方向と斜交する場合があること等、実際のすべり面の構造に関する多くの知見を示した。

特に、山崎(1994<sup>37)</sup>)は三波川帯の地すべり、眞弓(1997<sup>40)</sup>)は御荷鉾緑色岩累帯の地すべりに着目し、これらの地質のすべり面粘土が粗粒径成分を多量に混入することを紹介した。また、粗粒径成分を多量に含有するすべり面粘土のリングせん断試験結果が実際のすべり面せん断強度よりも著しく小さな強度評価を出す可能性を指摘している。また、由田他(1998<sup>42)</sup>)は残留強度の実現変位を地質毎に分類し、さらに由田他(2000<sup>44)</sup>)、眞弓他(2000<sup>41)</sup>)は、走査型電子顕微鏡を用いたすべり面やリングせん断試験後せん断面の高倍率観察を行い、スメクタイトを含有するすべり面粘土がすべり面構成粒子による定向配列挙動とともに、スメクタイトがせん断面に凝集し、被覆層を形成する状況を報告している。

繰り返し試料を用いたせん断面の構造に関する研究報告としては、釜井(1993<sup>45)</sup>)によるソーメン電極法を用いた在来型一面せん断試験での進行性破壊の伝播過程に関する観察、岸本(1994<sup>46)</sup>、1997a<sup>7)</sup>、1997b<sup>8)</sup>)による在来型一面せん断試験、中距離せん断試験を用いたせん断層の構造解析がある。さらに岸本(1997c<sup>47)</sup>)は、カオリナイト試料を用いてせん断面の平行方向、直角方向、せん断層方向に透水試験を実施し、せん断層の透水係数が周囲に比して大きいことを示した。また、大河原他(2000a<sup>48)</sup>、2000b<sup>49)</sup>)は、繰り返し一面せん断試験によって生じる重層化したせん断層構造について報告するとともに、独自の界面理論を展開することで、せん断面に働くせん断抵抗力について考察を行っている。

また前節に述べたとおり、繰り返し一面せん断試験機やリングせん断試験機が開発され、多くの研究者によってすべり面粘土の残留強度が計測されてきた。計測された残留強度は、地質との関係や、塑性指数、粘土含有率等の諸指数との相関関係の有無が検討され、残留

強度を支配する因子の把握，さらには簡便な物理試験結果から残留強度を推定する試みがなされた。Voight (1973<sup>50)</sup>) による塑性指数と残留強度  $r'$  との関係図や，Skempton (1985<sup>51)</sup>) による粘土含有率 (2  $\mu$  m 以下粒径) と  $r'$  との関係図は，国内での試験結果の比較にしばしば利用されている。また，Lupini et al. (1981<sup>52)</sup>) による  $r'$  と粘土含有率との関係に着目した残留強度の Shear mode 分類は，粘土鉱物が定向配列する形態の具体的な概念として参照されることが多い。この他にも Kenney, T.C. (1967<sup>53)</sup>, 1977<sup>54</sup>), Mesri, G. et al. (1986<sup>55</sup>) による繰返し一面せん断試験結果の  $r'$  と粘土含有率や塑性指数との関係に関する報告，Collotta, T. et al. (1989<sup>56</sup>) によるリングせん断試験の  $r'$  と粘土含有率や塑性指数との関係に関する報告がある。

中村 (1979<sup>57</sup>)，宜保他 (1984<sup>15</sup>)，紀平 (1990<sup>36</sup>) は，こうした海外の成果との比較から，塑性指数と  $r'$  の関係について概ね同様の分布が得られるとし，粘土含有率については国内のデータが若干下方ヘシフトする傾向があることを指摘している。また，変成岩地帯地すべりについては，矢田部ら (1991<sup>22</sup>) の研究成果として，塑性指数，粘土含有率ともに  $r'$  とは無相関との報告がある。また，山崎他 (2000<sup>39</sup>) は，彼らが採取した 112 試料に及ぶすべり面粘土について，リングせん断試験の  $r'$  と粘土含有率や塑性指数との関係を地質毎に整理し，併行して実施した純粋粘土鉱物 (スメクタイト，イライト，セリサイト，緑泥石) による土質試験結果から，すべり面粘土のデータに現れた地質毎の土質特性の違いが，すべり面を構成する粘土鉱物に強く影響を受けたものであることを明らかにした。

以上に示したすべり面に関する様々な研究成果を，地すべり安定解析等の実務に展開することを目的として，中村他 (1980<sup>58</sup>) は飽和した粘性土をすべり面にもつ地すべりで，ピーク強度，および残留強度を各種のせん断試験によって求め，地質毎の結果の集計から，第三紀層地すべりの残留強度がせん断抵抗角  $r'_f = 8^\circ \sim 20^\circ$ ，中・古生層地すべりで  $r'_f = 20^\circ \sim 30^\circ$  という地質によるせん断抵抗角の区分を示した。また中村他 (1990<sup>59</sup>) は，土質試験結果から得た残留強度 (せん断抵抗角) が，事例調査 (逆算解析) から得た値よりも小さいことを指摘している。

さらに，土質試験によって得たせん断強度パラメータを，実際の地すべり安定解析に利用する手法の研究としては，残留係数法を用いる安定解析を提案した宜保他 (1984<sup>15</sup>)，

1987<sup>60)</sup>, 1990<sup>61)</sup>, 佐野他 (1996<sup>62)</sup>) がある。また, 眞弓他 (1999<sup>63)</sup>) は, 土質試験結果は三次元の安定解析とともに評価される必要があることを主張し, くさびの安定解析を地すべり現場に適用して二次元安定解析との比較を行った。同様に, 中村他 (2002<sup>64)</sup>) は Hovland 法による三次元安定解析を行う中で, 地すべり安定解析に算入される土質試験結果のあり方を示唆している。最近では, 三次元安定解析への取り組みが, 鵜飼 (1987<sup>65)</sup>, 1988<sup>66)</sup>) による三次元 Janbu 法や三次元 Bishop 法の提案を受けて飛躍的に進歩し, 榎田 (2003<sup>67)</sup>) による安全率最小の滑動方向推定といった試みも, 実際の地すべり事例と計測された土質試験結果を用いて進められつつある。

## 2. 3 本研究の意義～まとめ～

残留強度に関しては, 国の内外を問わず, 多くの研究者が繰り返し一面せん断試験装置やリングせん断試験機を用いて研究を行い, 相当量のデータが既に蓄積されている。試験機の開発, 改良の試みについても, 特に我が国における成果は目覚ましく, 極めて高性能な試験機が利用される段階に至っている。また, 残留強度に至るせん断層形成過程のダイナミックな構造変化についても, ソーメン電極を用いた観察や, 軟 X 線造影法, 走査型電子顕微鏡による観察によって多くの成果が得られ, 残留状態せん断層の物理イメージが徐々に形を成しつつある。

しかしながら, これらの業績の大半はすべり面付近の試料をボーリングコアから収集したものであったり, 深層のすべり面粘土が地表部に噴き出したものなどを掻き集めた試料を用いた試験であって, すべり面を構成する極めて薄い粘土層そのものが試験対象となる事例は希である。地すべり災害が多発する我が国において, 折角のすべり面と接する機会が十分に利用されていない状況は残念と言わざるを得ない。

実際のすべり面の真の姿を見ず, 厳密な試料取り, 適切な試験操作に対する吟味もしないままに行われた土質試験の結果が, 実務に利用出来ないのは当然である。筆者らの調査でも, 特に三波川変成岩地帯地すべりにおいて, 吟味が不十分なリングせん断試験結果を安定解析に算入した場合に, 間隙水圧を全断面にゼロとしても安全率が極端に小さな値となる事例が存在した。

第1章に示したとおり，筆者の取り組みの根幹は，実際のすべり面の構造解明にあり，最終的な目標は，地すべり安定解析の精度向上に寄与できる土質試験のあり方の提案である。別の見方をすれば，これまで多くの研究者が様々なアプローチで行ってきた業績の数々を，実務で利用できる形とするための橋渡しを担う取り組みとも言える。

### 3. すべり面せん断試験機の開発

すべり面に発揮されるせん断強度を直接的に計測することを目的とし、不攪乱含すべり面試料中のすべり面を試験時せん断面に一致させられる一面せん断試験装置を開発した（宇津木他（1994<sup>68)</sup>）、Mayumi et.al(2002<sup>69)</sup>）、眞弓（2003<sup>70)</sup>）参照）。本試験装置を用いて、新第三系堆積岩地すべり、変成岩地すべり（破碎帯地すべり）、温泉地帯地すべりに属する日本各地から採取した全 124 試料に対して試験を行い、すべり面のせん断強度特性として典型的な応力径路の線形を確認した。また試験結果を地質毎に分類し、対象試料の物理的特性や電子顕微鏡を用いた観察結果等を踏まえて考察を行い、新第三系堆積岩の多くの地すべりの場合に、すべり面上に見られるスメクタイトの存在が残留強度に強く影響を及ぼしていること、さらに変成岩地すべりではすべり面粘土中に含まれる粗粒径成分の多寡が強度に強く影響すること等を明らかにした。さらにリングせん断試験で得た残留強度との比較を行い、すべり面粘土の粒度組成がリングせん断試験用試料の採取、および粒度調整処理によって大きな変化を生じない場合に、両試験結果が一致することを明らかにした。

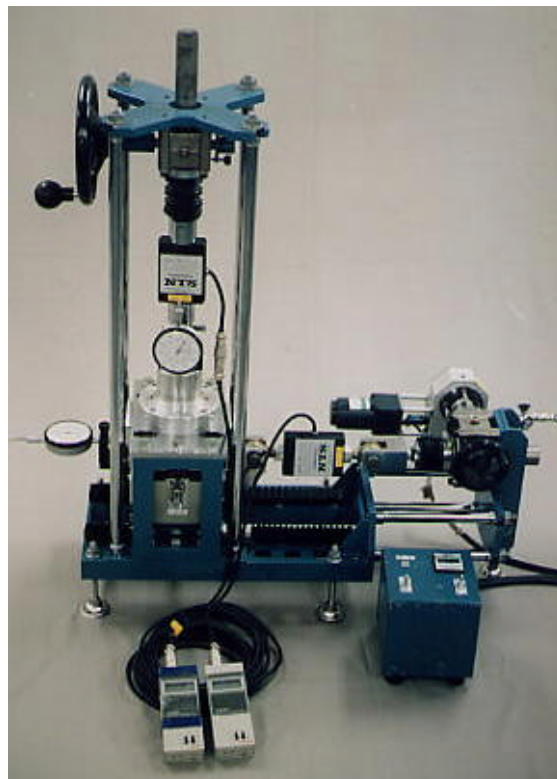


図3. 1 すべり面せん断試験機全景

### 3. 1 試験機の特徴

開発したすべり面せん断試験機の全景を図3. 1，構造の概略を図3. 2 に，試料室の詳細構造を図3. 3 に示す。本試験機は直接型一面せん断試験機の構造を基本としている。

#### 3. 1. 1 試験機の構造

載荷機構は，垂直・せん断応力ともに脈動の少ないスクリージャッキを用い，垂直応力は手動載荷方式，せん断応力は反転可能な電動モータによる載荷方式とした。許容最大荷重は，垂直応力が 1MPa，せん断応力が 500kPa である。また，試料室底板にもスクリージャッキを取り付け，底板を任意の高さに設定することを可能にした。荷重はロードセルを介してデジタル荷重表示器によって表示され，計測者がこれを読みとる。供試体

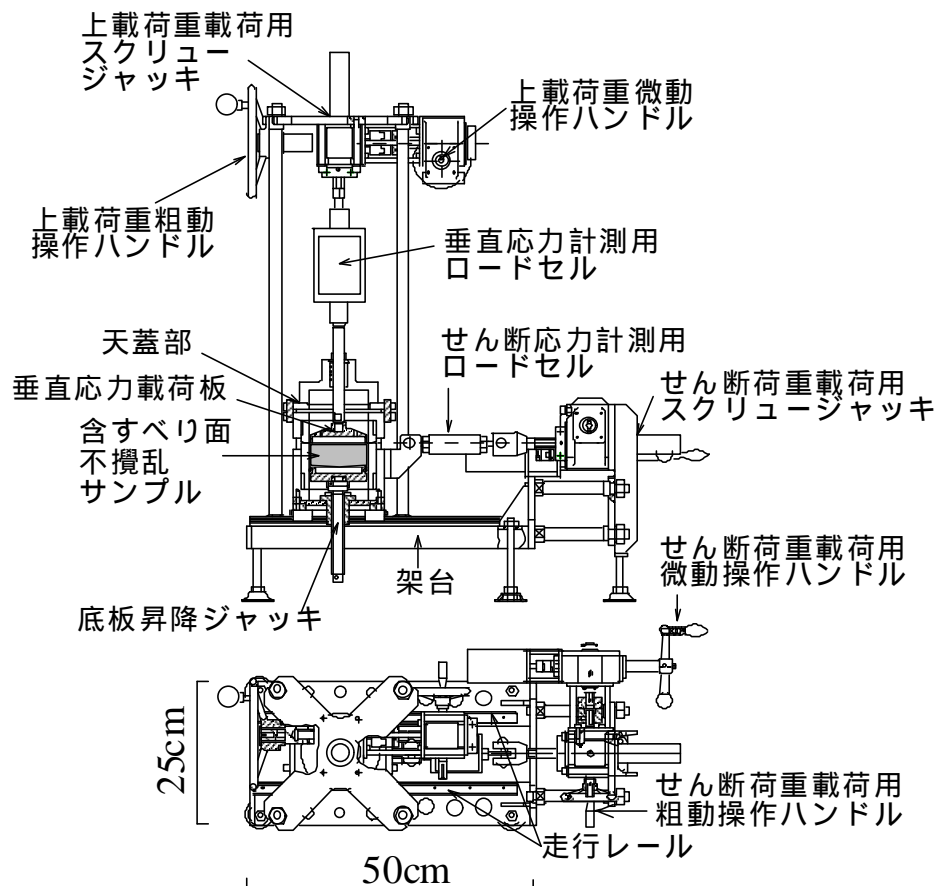


図3. 2 すべり面せん断試験機の構造

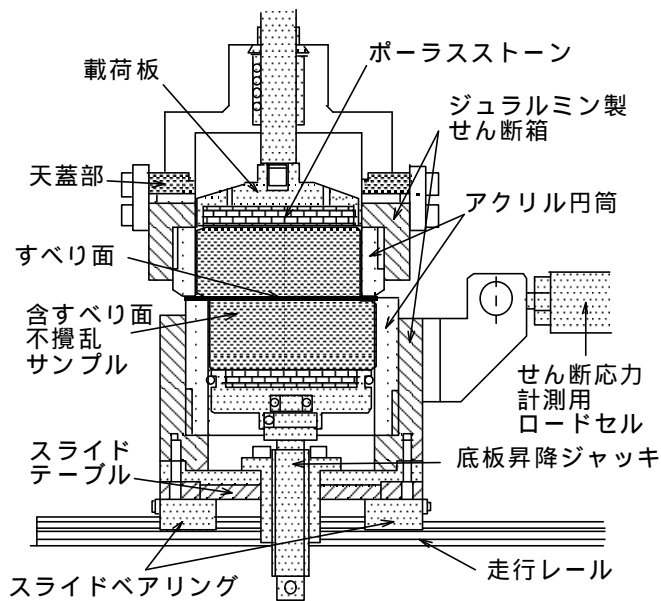


図3. 3 すべり面せん断試験機の構造

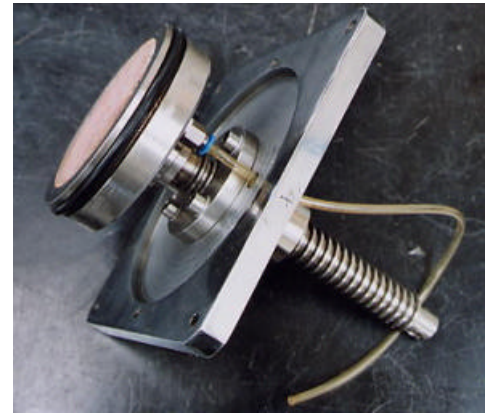


図3. 4 底板昇降ジャッキ

寸法は、すべり面周囲のれきを含んだまま採取できるように直径 100mm，最大有効高さ 80mm とした。せん断面を挟む上下 10mm 幅区間にはアクリル材を用いており，試料のせん断状況等を外部から観察できる。

### 3. 1. 2 試験方法

すべり面せん断試験に用いる試料は、すべり面の上下数cm 区間を含んで不攪乱採取された含すべり面試料である。以下に、すべり面せん断試験を実施する際の作業手順を示す。

#### (1) 含すべり面不攪乱試料の採取

用いるサンプラーは、鋼製刃付きアクリル製採土円筒（直径 10cm，高さ 8cm）である。採取要領はブロックサンプリングに準拠し，特に留意することは，すべり面をサンプラー内に水平に採取する点である。

（図3. 5 参照）。

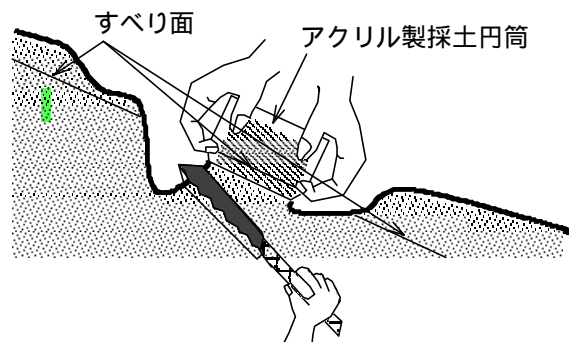


図3. 5 含すべり面不攪乱試料の採取方法

三波川泥質片岩地すべりの一部を除いて、本稿に示す全てのすべり面には、起伏程度は様々だが擦痕を確認している。よってせん断方向を擦痕方向に一致させるため、サンプラー外壁に記したマーカの方向が擦痕方向と一致するようにサンプラーをセットする。擦痕が未確認の現場では、地すべり調査から把握されている滑動方向をせん断方向と合わせた。

## ② せん断箱への試料装填

試料が入ったサンプラーは、せん断方向にマーカ方向を合わせ、下部せん断箱の底面にアタッチメントを介して装着される。この時、上下のせん断箱は拘束ピンおよびパッチン錠で一体化している。供試体は、押し抜き装置を用いて静かにせん断箱内へ装填される。装填操作は、目視によってすべり面が試験時せん断面位置と一致するまで行う。せん断面にすべり面が合致したことを確認した後、装填に用いたスクリージャッキ、サンプラー等を全て取り外し、代わりに底板昇降ジャッキを下部せん断箱の底面に取り付ける。その後、底板をジャッキ操作で静かに下降させ、位置合わせを完了した供試体に接地させる。この底板昇降ジャッキは、試験中、供試体を下支える構造部材となり、底板は排水条件を維持するためポーラスストーン、排水ホースを装備している。

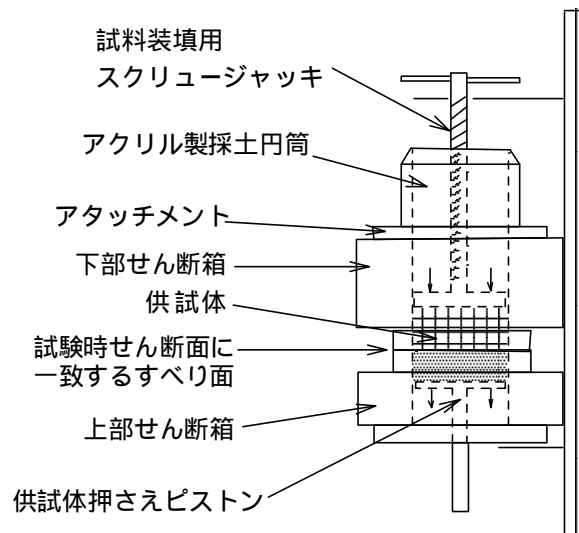


図3.6 せん断箱への試料装填

## ③ 試験仕様

供試体のセットを完了したせん断箱を、天地を戻して試験機架台のスライドテーブルに装着し、せん断箱をせん断室にスライド装填する。その後、上載荷重載荷板の装着、上部せん断箱の固定等を行い、さらにロードセル、荷重表示器、変位計測用ダイヤルゲージを取り付ける。

試験荷重は、採取した試料の土被り荷重を算定し、その荷重を挟んで3～4段階の荷重設定を行う。すべり面の応力履歴については、残留強度を実現したせん断面の  $\tan \phi_r$  が



Hvorslev (1960<sup>71)</sup>) の破壊基準における  $\tan \phi$  に相当し、せん断面上に作用する有効垂直応力のみに依存するせん断抵抗を表す材料定数であって応力履歴に依存しないとした三田地他 (2000<sup>72)</sup>) の仮定に準拠する。よって、本試験では、圧密過程はすべり面の上下の土層が体積変化することを対象とし、せん断開始直後に垂直応力が著しく減少することを抑制するための操作と位置付けられる。圧密打切り時間は計測される  $h - \log(t)$  関係を用いた 3 t 法によって圧密打切り時間を便宜的に判定する。また、明瞭な 3 t 線の作図が困難な場合は、荷重が安定化するのを四時間程度待ち、圧密を打ち切る。圧密後、固定していた上部せん断箱を解放し、上下せん断箱間に 0.5 ~ 1.0mm のギャップを確保する。所定のギャップを確保した後、上部せん断箱を再びせん断室天蓋部に固定する。

せん断の方法は、有効応力条件を満足することを期待し、かつ応力径路の線形から実現した有効応力の評価を行うために定体積せん断 (一面 CU) とした。なお、すべり面が試験時せん断面と一致するせん断試験の場合、断面積が変化する一面せん断試験の構造上、すべり面に非排水性 (気密) が維持されることは困難であり、また定向配列を実現したすべり面において過剰間隙水圧 (過剰間隙圧) の発生は抑制されるため、ピーク強度を計測する試験に比べ、有効応力条件は実現し易いと判断される。せん断速度は 0.1 mm/min で、第一往路 7mm + 復路 14mm + 第二往路 7mm のせん断変位を標準として与える。定体積制御は、垂直変位計測用ダイヤルゲージを用いて  $\pm 1/1000\text{mm}$  精度で変化を監視し、上載荷重載荷用スクリュージャッキの手動操作で調整する。

## 3. 2 結果の解釈

### 3. 2. 1 せん断特性から見たタイプ分け

不攪乱すべり面を直接利用したせん断試験を行うことで得られる、典型的なせん断強度特性および応力径路を図3. 7 ~ 図3. 10 に示す。

#### (1) タイプ

タイプ は、すべり面と試験時せん断面が一致する場合、典型的に見られるせん断強度特性である。図3. 7 , 図3. 8 に掲げるタイプ の模式図には以下の特徴が挙げられる。

3mm 程度のせん断変位で垂直応力 が安定収束

せん断応力 も 3mm 程度のせん断変位で安定収束  
 , より, 応力経路が - 関係図上で一点に収束  
 せん断方向反転後も, 垂直応力, せん断応力ともに 3mm 程度のせん断変位で収束  
 し, 応力経路は破壊線上の一点に収束

タイプ の特徴が生じる理由は次のように考察される。すなわち, 残留強度への強度低下を生じたすべり面では, 既にすべり面表面を構成する粒子の定向配列が完成し, せん断時にダイレタンシー挙動がほとんど生じないと考えられる。たとえ擦痕構造が顕著なすべ

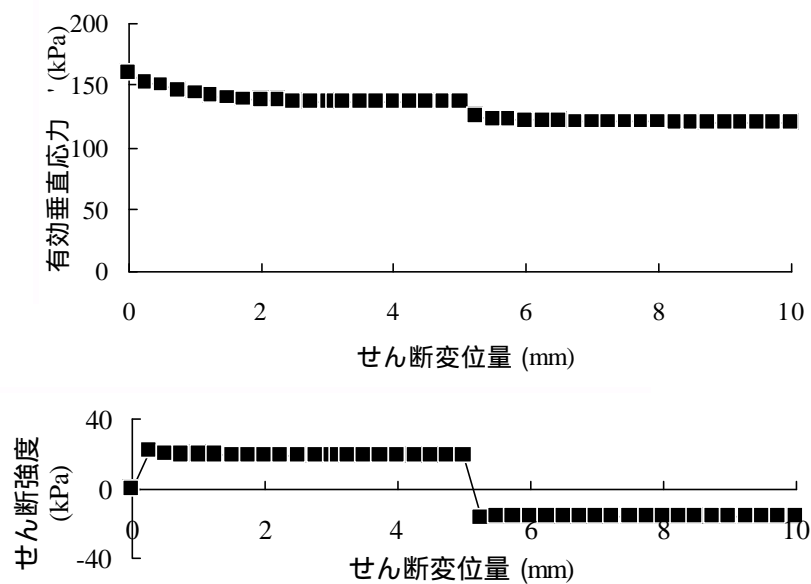


図3. 7 有効垂直応力  $\sigma'$ ,せん断強度 とせん断変位の関係(タイプ )

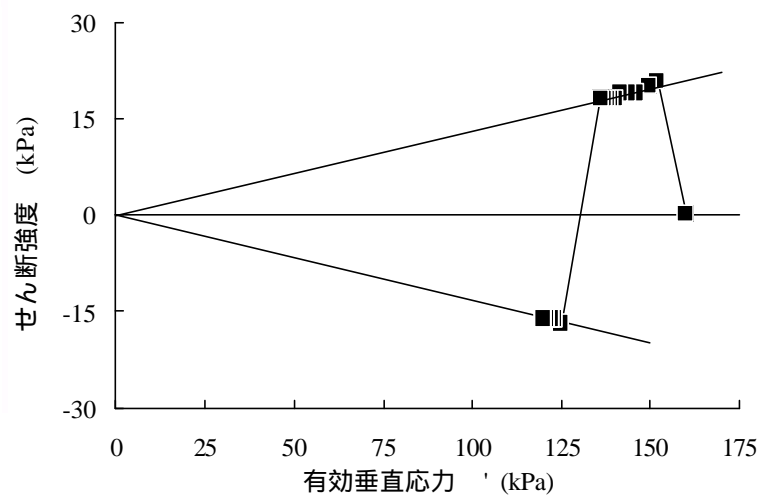


図3. 8 タイプ の応力経路

り面においても、擦痕を造る原因となる混入れきが面に露出せず、かつ擦痕方向とせん断方向が一致していれば、大きなダイレタンシーは生じない。つまり、こうしたすべり面でのせん断を定体積条件で実施すると、垂直応力 が微小変位で収束し、せん断応力 もピーク強度を発現することなく、収束した に見合う残留強度 を微小変位で発現して一定強度に収束する。

## ②)タイプ

タイプ は、すべり面が長周期の起伏を生じる等の理由からタイプ のような応力経路の一点収束が検出されないタイプである。タイプ の模式を示す図3. 9 ,図3. 10 からは次のような特徴を指摘できる。

垂直応力 の単調増加（または減少）

垂直応力の単調変化に従属して生じるせん断応力 の単調増加（または減少）

垂直応力やせん断応力に見られる単調変化は、せん断方向の反転によって、変化の傾きが正負逆転（往路で増加傾向であれば、復路は減少傾向となり、往路で減少傾向ならば、復路は増大傾向）

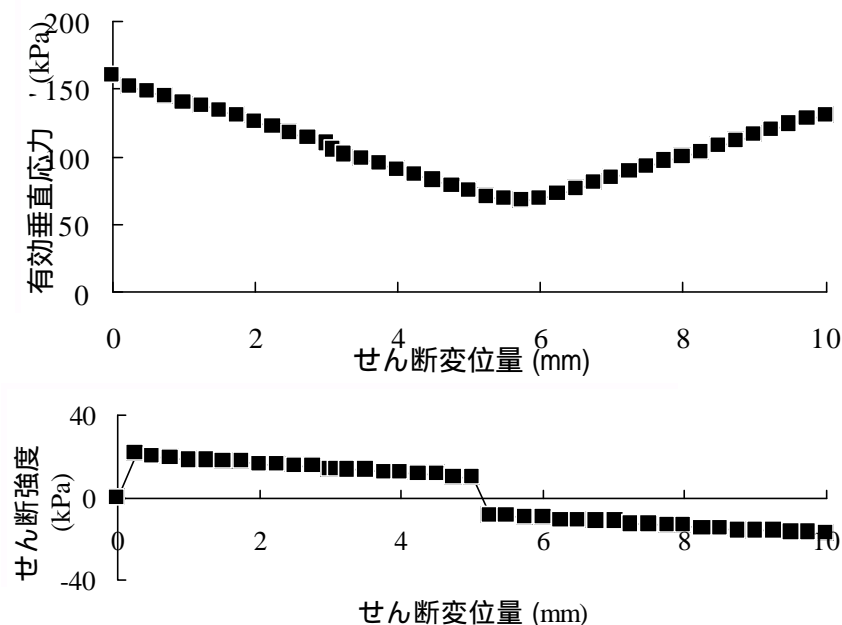


図3. 9 有効垂直応力  $\sigma'$ ,せん断強度  $\tau$  とせん断変位の関係(タイプ B)

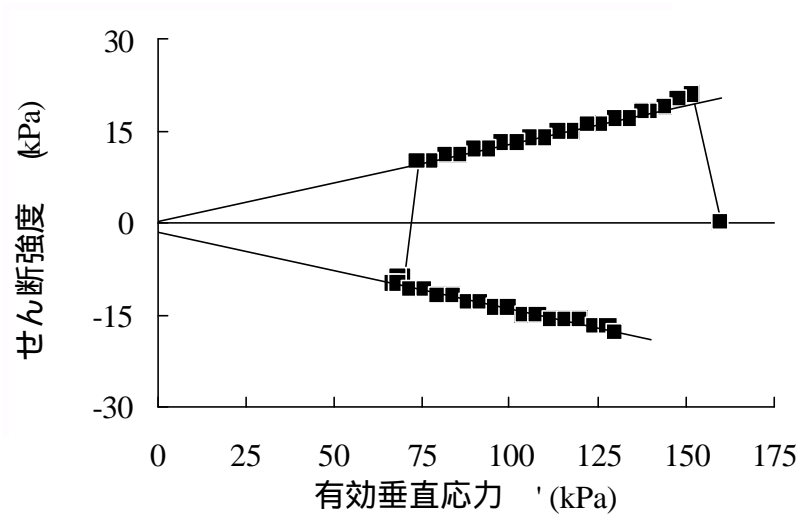


図3. 10 タイプ A の応力経路

タイプ A の場合、試験後のすべり面を観察すると、全ての供試体ですべり面はせん断方向に 1mm に満たない高低差を生じている。この場合、下部供試体が水平変位すると、傾斜面に沿って上部供試体は垂直方向の変位を生じる。例えば、せん断方向に下がる傾斜面であれば、せん断に伴い上部供試体は上昇の変位を生じ、反転後の変位は逆に下降となる。定体積せん断試験ではせん断面での間隙変化だけではなく、こうした傾斜面でのせん断に起因する垂直変位も垂直応力を変化させて抑制するが、この垂直応力の調整は、過度の垂直応力変化を生じて間隙水圧を発生する原因に成り得る。しかしながら、タイプ A の応力経路に示される直線的な経路が、同一すべり面の他供試体で計測されたタイプ A の破壊線に一致し、直線の傾きがせん断抵抗角と評価し得る事例は多い。すなわち、せん断に伴い断面積が変化する一面せん断試験の構造、および上下せん断箱のクリアランスを確保した位置にすべり面位置を合わせたことで、すべり面の気密が全周囲に破れ、すべり面の排水性が向上し、間隙水圧発生が抑制されているものと考えられる。

なお、供試体中のすべり面傾斜が上下せん断箱のクリアランス（最大 1mm）を上回る高低差で傾きをもつ場合は、変位に伴って上下何れかの供試体の縁辺部がせん断箱と干渉し、タイプ A から得られる破壊線より粘着力、せん断抵抗角がともに増大し、すべり面のせん断強度を正しく評価できない。

### 3. 2. 2 試験結果の事例

#### (1) 事例 1 : 高柳すべり面

高柳すべり面は、集水井施工中に GL-7.9m の切羽で確認されたすべり面である。産状は崩積土と基岩となる新第三系凝灰角礫岩の風化岩との層境界に、層厚数mm の赤紫色粘性土薄層を形成し、この粘性土薄層中に鏡肌を成すすべり面であった。すべり面を走査型電子顕微鏡を用いて観察すると、上盤、下盤の何れのすべり面表面も、不定形の粘土鉱物であるスメクタイトが全面被覆する構造が確認された。

図3. 13 にせん断変位増大に伴う垂直応力  $\sigma_v$ 、およびせん断応力  $\tau$  の推移を示す。図中の供試体 2、3 は、すべり面が厳密に試験時せん断面と一致する試験経緯であり、せん断変位 2 ～ 3mm の微小変位で、せん断応力  $\tau$  が既に強度収束している（せん断応力  $\tau$  が負の値として計測されている区間が復路の試験経緯）。また、垂直応力  $\sigma_v$  についてもより若干遅れるものの、せん断変位5mm 程度で強度の安定化が認められる。



図3. 11 高柳すべり面の状態

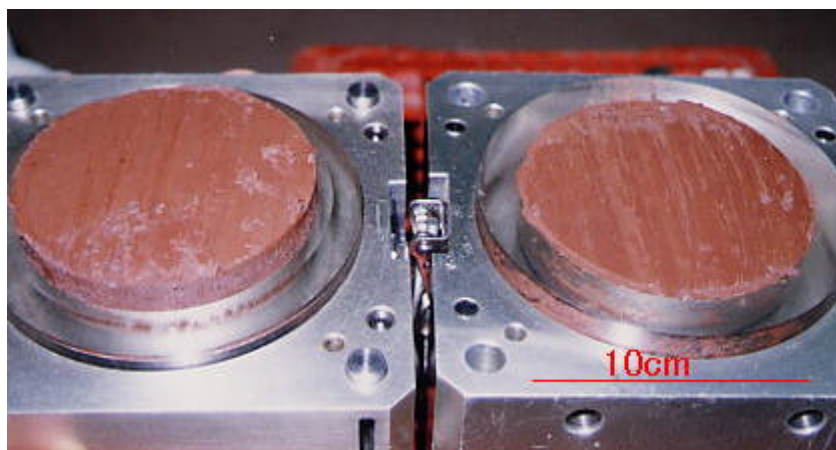
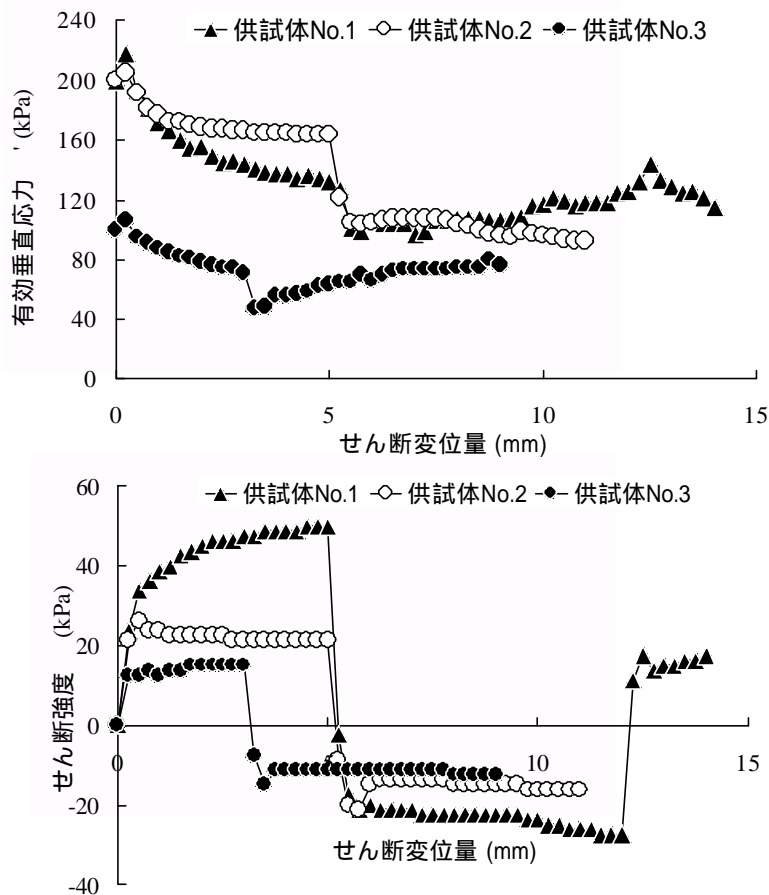


図3. 12 高柳すべり面でのすべり面せん断試験後状況

図3. 13 有効垂直応力  $\sigma'$ 、せん断強度 とせん断変位の関係(高柳)

これに対し、供試体 1 の試験経緯は、せん断開始時の試験荷重が 2 と同じ 200kPa であるにも関わらず、5 mm 変位時点でせん断応力は増加傾向を維持し、強度も 2 より著しく大きい。供試体 1 の試験後すべり面を観察すると、試験時せん断位置より 1 mm 以上ずれた合わせとなり、これが強度強化の原因と推察された。

さらにこうした、の推移を図3. 14 の - 図で見ると、2、3 供試体の応力径路は、すべり面せん断強度の破壊線上を推移する（破壊線は、各供試体径路から速やかに破壊線に一致し、かつ / の最小値を与える、の組合わせを選択して、最小二乗法により決定）。また、往路、復路のそれぞれに認められた破壊線の勾配は一致する。

供試体 2、3 に得られたせん断抵抗角 ( $\phi=6.3^\circ$ ) は、攪乱採取・粒度調整された高柳すべり面粘土のリングせん断試験結果 ( $\phi=4.9^\circ$ ) とほぼ等しく、当地区すべり面のせん断強度が残留強度相当であることが確認された。

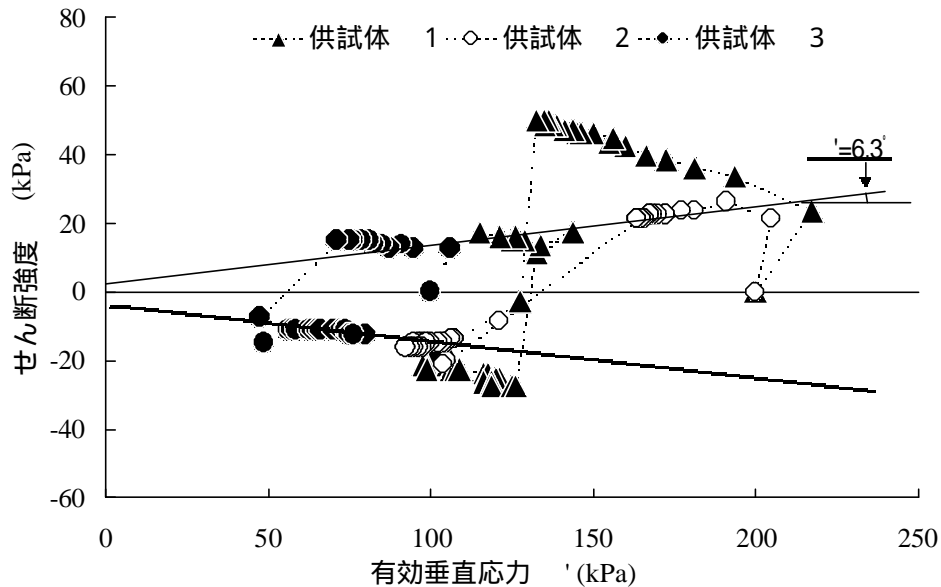


図3. 14 有効垂直応力  $\sigma'$  とせん断強度 の関係(高柳)

## 2) 事例 2: 大瀬すべり面

集水井内 GL-8.2m に確認された大瀬すべり面は、崩積土と何枚もの炭層を挟在する新第三系風化凝灰岩（基岩）との層境界に、チョコレート色のすべり面粘土薄層を生じ、この薄層中に鏡肌面を形成するものである。

図3. 15 に、大瀬すべり面の応力経路を 1 と 1' の二種類示す。1 は、上載荷重 150kPa で最初に行った試験の場合であり、1 の試験終了後、200kPa の上載荷重を載荷し、体積変化の安定を確認した後に再びせん断したものが 1' の応力経路である。

これらの応力経路に認められる特徴を以下に整理する。

応力経路のタイプはタイプ

せん断過程が異なる複数の応力経路（1：復路, 第二往路, 1'：復路, 第二往路）に破壊線を確認

1, 1' の応力経路は相似形を呈する

1, 1' の復路から得られた破壊線は、それぞれの第二往路から得た破壊線と粘着力評価は異なるが、せん断抵抗角は一致する。

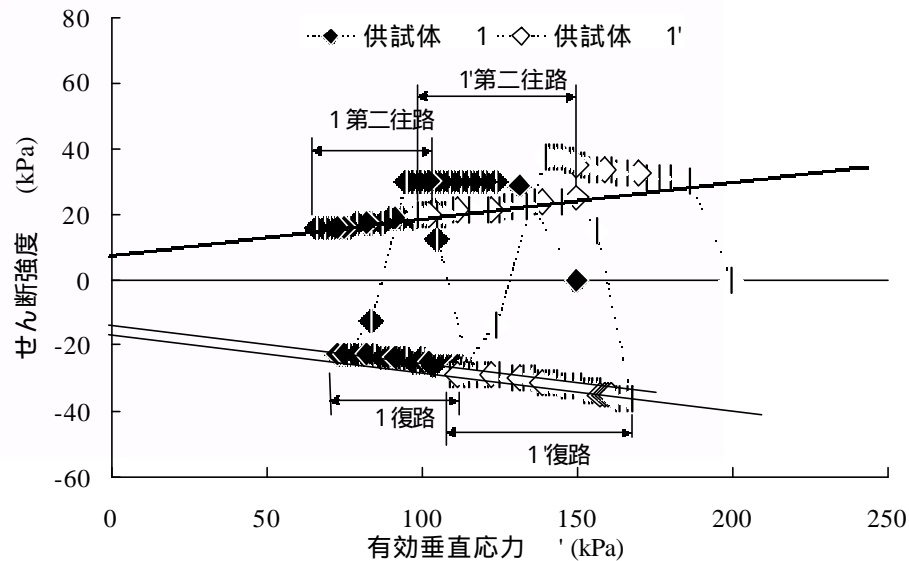


図3. 15 有効垂直応力  $\sigma'$  とせん断強度 の関係(大瀬)

大瀬すべり面に認められた応力経路は、タイプ の典型であり、すべり面が試験時せん断面に対して若干傾斜する場合の計測事例である。得られたせん断抵抗角は、粘着力評価が小さく得られた破壊線ほど、僅かながらより小さなせん断抵抗角となり、またタイプの応力経路から得られるせん断抵抗角とも一致するものとなる。

尚、複数供試体による試行、及び同一供試体で試験荷重を変更して行った試験結果では、せん断抵抗角の評価は、大瀬の事例が示す通りほぼ一致する強度評価となるものの、粘着力には差異を生じる場合がある。粘着力が大きくなる事例の特徴は次の通りである。

すべり面と試験時せん断面の位置合わせに、若干の不一致箇所があり、大変位時に鏡肌様のすべり面構造が僅かに擾乱を受けている。

すべり面近傍に介在した混入礫がせん断箱部材と接触した形跡がある。

特に の特徴は、介在した混入礫の位置により、せん断方向の片側にのみせん断箱と接触を生じる。例えば、往路においてせん断箱との接触抵抗が増大する礫は、せん断方向を反転した後の復路では接触抵抗が急速に消散し、その後の経緯への影響はほとんど無くなる。こうした場合、往路と復路のせん断強度は、歴然と異なる強度レベルを推移することとなるが、応力経路に表現される線形は、勾配がほぼ等しく、切片成分のみが異なる平行関係を満足する場合が多い。



### 3. 3 すべり面せん断試験の開発に関するまとめ

すべり面を現場から不攪乱状態で採取し、この面を試験時せん断面と一致させて行うすべり面せん断試験装置を開発した。この装置を用いて試験を実施した場合に計測される典型的なせん断経緯には、すべり面が残留強度に支配されていることに起因する幾つかの特徴が確認された。以下に、本章のまとめとして、すべり面せん断試験を実施することで得られる特徴的な残留せん断強度特性を整理する。

すべり面と試験時せん断面を一致させて行う定体積一面せん断試験では、せん断ひずみ 3%程度の微小変位で垂直応力  $\sigma$ 、せん断強度  $\tau$  が安定収束状態となる。これは、鏡肌のすべり面が定向配列構造を完成し、面構成粒子の構造変化に伴う間隙比の増減が既に収束しているために、定体積制御を頻繁に行うまでもなくせん断時のダイレタンシーがほとんど発生しなかったものと推察される。

せん断初期に安定収束状態となる  $\sigma$ 、 $\tau$  は、その時点の垂直応力に対する残留せん断強度が発現していると理解されることから、異なる荷重条件から得られた同様の安定収束状態となる複数の  $\sigma$ 、 $\tau$  のプロットは、残留せん断強度の破壊線上にあることが期待される。つまり、残留せん断強度の破壊線は、こうした安定収束状態となる  $\sigma$ 、 $\tau$  のプロットを最小二乗法により直線回帰することで得られる（実際の作業手順では、各供試体の各せん断径路から、速やかに安定収束し、かつ  $\sigma$  /  $\tau$  の最小値を与える  $\sigma$ 、 $\tau$  の組合わせが選別され、これらを全て算入する最小二乗法により  $c'$ 、 $\phi'$  は決定）。尚、往路、復路のそれぞれに認められた破壊線の勾配は、概ね一致する。

試験事例として示した新第三系凝灰角礫岩地帯におけるすべり面では、すべり面せん断試験のせん断抵抗角 ( $\phi' = 6.3^\circ$ ) が、攪乱採取・粒度調整されたリングせん断試験結果の残留せん断抵抗角 ( $\phi'_r = 4.9^\circ$ ) とほぼ等しく、当地区すべり面のせん断強度が残留強度相当であることが確認された。また、この  $5^\circ$  前後となるせん断抵抗角は、膨潤性粘土鉱物スメクタイトの残留強度に一致するものであり、対象すべり面の表面がスメクタイトによって被覆されているすべり面観察状況に符合する。

すべり面がせん断方向に 1mm に満たない高低差を生じている場合、下部供試体が水平変位すると、傾斜面に沿って上部供試体は垂直方向の変位を生じる。定体積せん断試験

ではせん断面での間隙変化だけではなく、こうした傾斜面でのせん断に起因する垂直変位も垂直応力を変化させて抑制することとなる。しかしながら、こうした事例（タイプ ）の応力径路に示される直線的な径路は、その多くが同一すべり面の他供試体で計測された安定収束点をほぼ通るものとなり、直線の傾きがせん断抵抗角と評価し得る。

せん断に伴い断面積が変化する一面せん断試験では、試験機の構造、および上下せん断箱のクリアランスを確保した位置にすべり面位置を合わせたことで、すべり面の気密が全周囲に破れ、すべり面の排水性が向上し、間隙水圧発生が抑制されていると考えられる。

供試体中のすべり面傾斜が上下せん断箱のクリアランス（最大 1mm）を上回る高低差で傾きをもつ場合は、変位に伴って上下何れかの供試体の縁辺部がせん断箱と干渉し、タイプ から得られる破壊線より粘着力、せん断抵抗角がともに増大し、すべり面のせん断強度を正しく評価できない場合がある。

すべり面と試験時せん断面が不一致となるケースや、混入礫がせん断箱に接触することで接触抵抗が発生するケースにおいても、これらによる影響が軽微な場合、応力径路に表現される線形は、勾配がほぼ等しく、切片成分のみが異なる平行関係を満足するケースが多い。よって、次章以降の各種検討では、安定した評価が得られるせん断抵抗角（破壊線の勾配）のみを対象とし、同一供試体においても、往路・復路で評価に差異を生じる粘着力（切片成分）については、別の機会（間隙水圧との関係を考察する検討）に議論するものとする。

また、 に示すすべり面のせん断強度以外に発現した除去すべき抵抗力成分を評価するために、地すべり滑動方向に合わせて変位させた第一往路の後、逆変位せん断過程（復路）、さらには再度、正のせん断方向（第二往路）へのせん断を行うことを標準とした。

## 4. すべり面せん断試験結果の特徴

### 4. 1 地質分類とすべり面のせん断抵抗角

今回検討対象とした48現場124試料のすべり面粘土は、図4. 1 に示す採取地より収集したすべり面試料である。地質毎に属する地すべり現場数、及び試料数を数えると、古第三紀以前の地質（ジュラ系頁岩、白亜系頁岩、古第三系泥岩等）が4現場4試料、新第三系凝灰岩8現場30試料、新第三系凝灰角礫岩8現場20試料、新第三系凝灰質泥岩2現場10試料、新第三系泥岩9現場12試料、熱水変質安山岩1現場10試料、三波川泥質片岩7現場15試料、三波川塩基性片岩1現場2試料（同一地内に泥質片岩も分布するが、すべり面部は塩基性片岩であり、泥質片岩の数には含めない）、長崎変成岩2現場2試料、御荷銓緑色岩類6現場19試料となる。

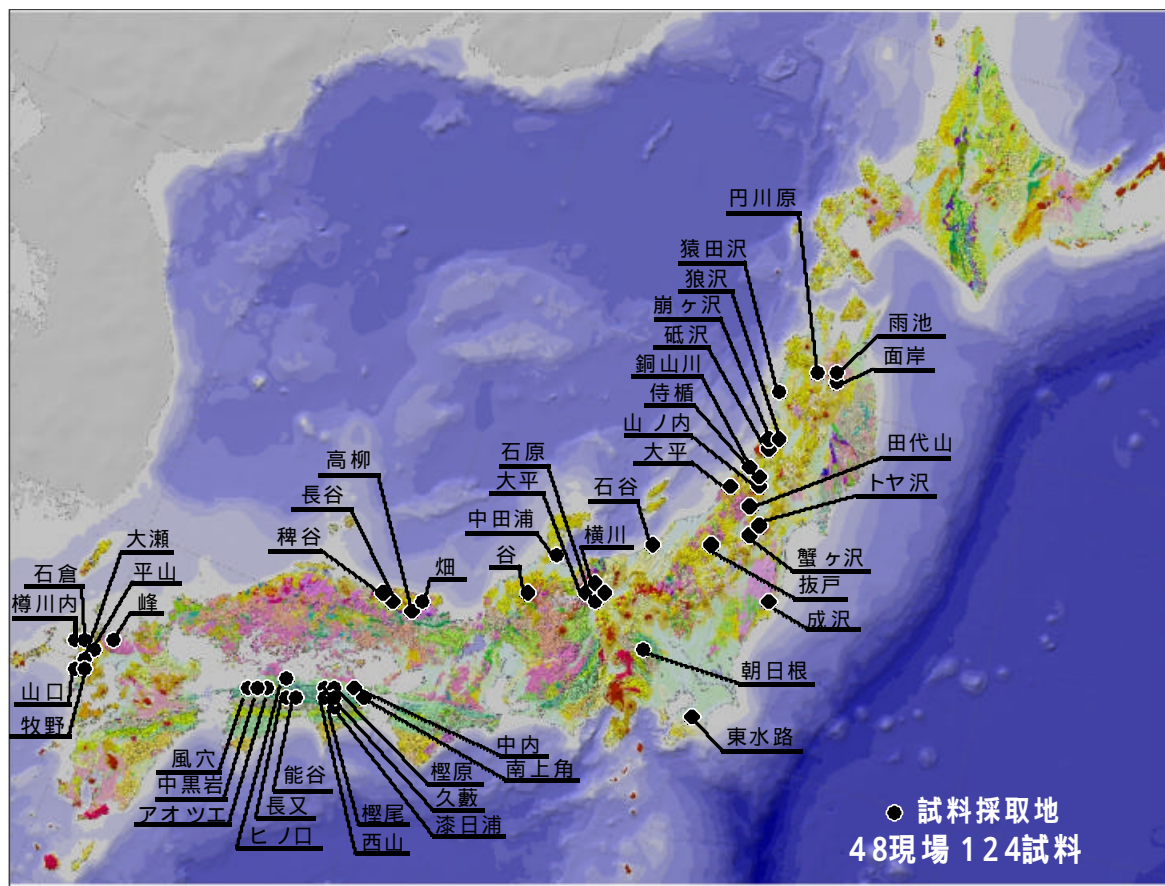


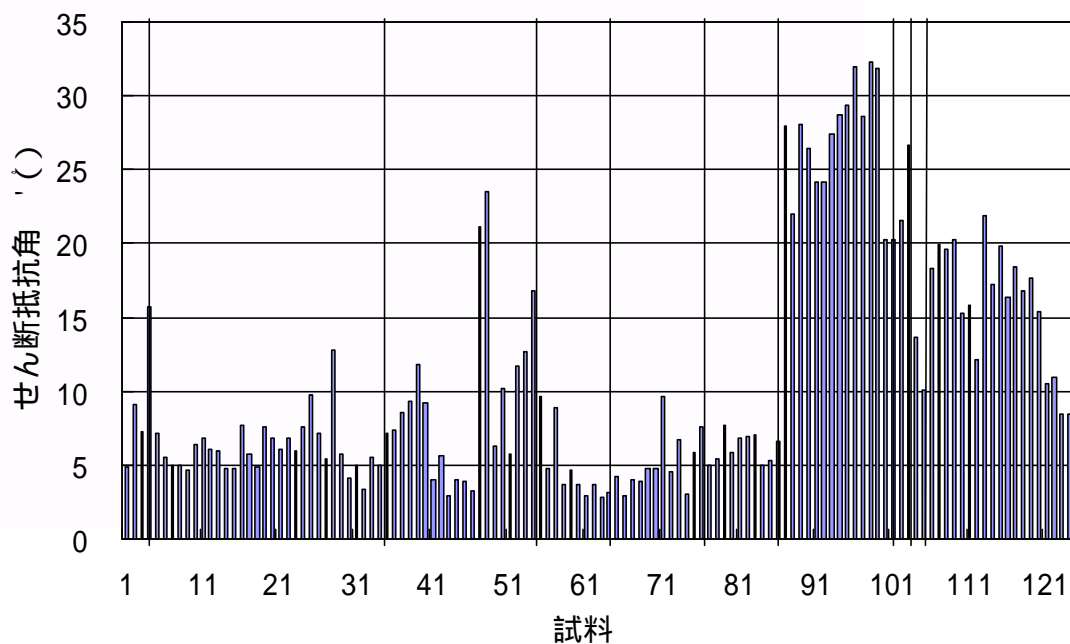
図4. 1 対象試料の採取地位置図

表4. 1 すべり面せん断抵抗角と地質

地質区分名	文中	図中	$\theta_{min}^{\circ}$	$\theta_{max}^{\circ}$	$\theta_{AVG}^{\circ}$	n
古第三紀以前の地質での地すべり	地質		4.94	15.76	9.27	4
新第三紀堆積岩地すべり(凝灰岩)	地質		3.46	12.83	6.22	30
“(凝灰角礫岩)	地質		2.93	23.54	9.29	20
“(凝灰質泥岩)	地質		2.84	9.67	4.81	10
“(泥岩)	地質		3.00	9.66	5.21	12
熱水変質安山岩地帯での地すべり	地質		5.06	7.75	6.22	10
三波川泥質片岩地すべり	地質		20.25	32.35	26.93	15
三波川塩基性片岩地すべり	地質		21.54	26.61	24.08	2
長崎変成岩類地すべり	地質		10.10	13.67	11.89	2
御荷鉾緑色岩類地すべり	地質		8.42	21.97	15.99	19

地質 , , の群と,地質 , の群は,それぞれ土質特性に差が無く,  
同一記号で表記する。

$\theta_{min}$  : 最小値,  $\theta_{max}$  : 最大値,  $\theta_{AVG}$  : 平均値, n : 試料数

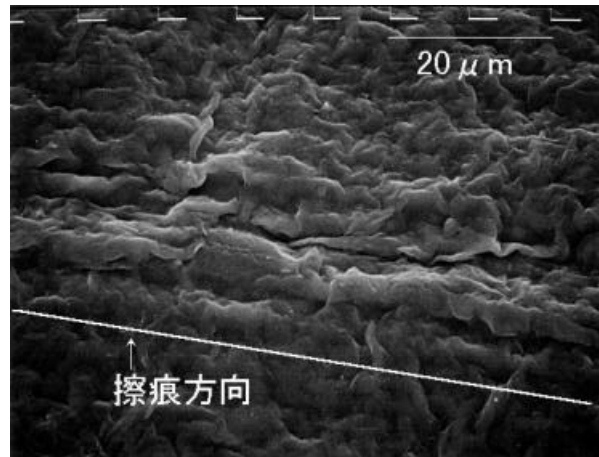


図中 ~ の番号は表4. 1 に示す文中表記の地質番号に共通  
図4. 2 日本各地の地すべり地で実施したすべり面せん断試験結果

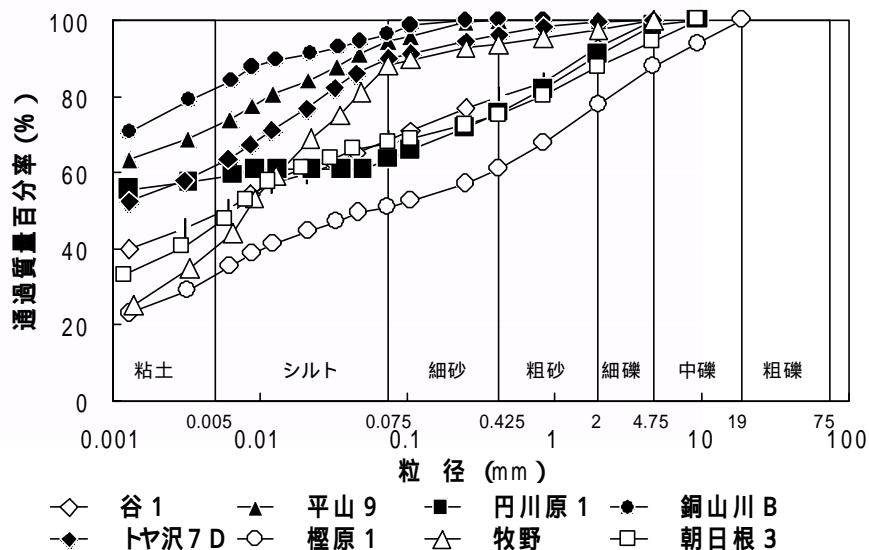
実施した全 124 試料のすべり面せん断試験の結果を, 試料の物理的特性, リングせん断試験結果, 含有鉱物の分析結果等とともに表4. 2(後掲)に示す。図4. 2 は, すべり面せん断試験で得たせん断抵抗角  $\theta$  を, 表4. 2に示す試料番号順に並べたものである。なお, 以後の本文中に用いる各地質名称, および図4. 2 以降の地質区分毎に表記する凡例は,

表4. 1 の通りとする。また、本章は眞弓 (2003<sup>70)</sup>) が日本地すべり学会に投稿した内容に加筆したものである。

表4. 1 には、地質毎のせん断抵抗角の最小値、最大値、平均値、試験対象とした試料数を併記している。表より、地質 ~ の '最小値が、 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$  と小さな値を示すことが解る。図4. 3 は、地質 に区分される狼沢すべり面を走査型電子顕微鏡により観察したものである。図には平滑なすべり面上に、擦痕が列状の起伏を生じる様子が示される。また、不定形の粘土鉱物が襞状の構造を伴い、糊の表面を見る様な印象ですべり面全面を被覆する状況が観察される。この不定形の粘土鉱物はX線粉末回折からスメクタイトと同定され、同様の構造が地質 ~ の全てのすべり面に確認された。山崎他 (2000<sup>39)</sup>) は、純粹鉱物モンモリロナイトの残留せん断抵抗角が  $4^{\circ}$  前後の強度レベルとなることをリングせん断試験結果から報告しており、 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$  の強度特性はスメクタイトの残留強度発現によると考えられる。



また、地質 ~ に属する試料群の最大値は、各地質で傾向にバラツキがある。し 図4. 3 狼沢 7すべり面のスメクタイト被覆



凡例に示す試料名の前に付した 等の番号は表4. 1 文中表記の地質番号

図4. 4 各地質を代表するすべり面粘土の粒度分布

かしながら平均値は、地質  $\text{Q}_{10}$  が  $9^\circ$  とやや高めであるが、地質  $\text{Q}_{11}$ 、 $\text{Q}_{12}$  は  $4^\circ \sim 6^\circ$  となり、スメクタイトの強度特性に影響を受けたものとなる。

地質  $\text{Q}_{10} \sim \text{Q}_{12}$  は、地質  $\text{Q}_{13} \sim \text{Q}_{15}$  に比べ明らかに強度レベルが高く、強度の幅も広い。地質  $\text{Q}_{10} \sim \text{Q}_{12}$  の多くは、新第三系堆積岩地すべりに見られる鏡肌のすべり面ではなく、せん断帯として認識されることが多い。せん断帯を成す一部の分離面を剥離すると、砂・れき等の粗粒径成分が分離面に露出し、露出した砂・れきが起点となって起伏顕著な擦痕の凸型構造を形成する状況が観察される。

また、地質  $\text{Q}_{13}$  のすべり面は、やはり粗粒径成分をすべり面粘土中に取り込むものの、粘土含有率が 50%程度と高く、多くのすべり面で鏡肌を呈し、定向配列構造を形成する。さらに、地質  $\text{Q}_{13}$  は、粘土含有率が低めながら、粗砂以上の粒径成分の混入も顕著ではなく、すべり面部には雲母が定向配列して平滑面を形成する。

図4. 4 に各地質を代表するすべり面粘土の粒径加積曲線を示す。新第三系堆積岩地すべり（地質  $\text{Q}_{10}$ 、 $\text{Q}_{11}$ 、 $\text{Q}_{12}$ ）、および地質  $\text{Q}_{13}$  は粘土含有率が 50 %を越えるものとして特徴付けられ、50 %を下回ることを特徴とする変成岩地すべり（地質  $\text{Q}_{14}$ 、 $\text{Q}_{15}$ ）とは明らかに形状が異なる。地質  $\text{Q}_{13}$  のすべり面粘土は、粒度組成が変成岩地すべりに近く、また地質  $\text{Q}_{13}$  は高い粘土含有率とともに、粗砂以上の粒径成分を 20 %以上含むことを特徴とする。

以上を総括すると、すべり面せん断試験結果に認められたせん断抵抗角  $\phi'$  の大小は、粒度組成に見られた地質毎の特徴と以下のように傾向を関連づけることが出来る。

粘土:多,粗粒径:少	$\phi'=\text{小}$ ...地質 $\text{Q}_{10}$ , $\text{Q}_{11}$ , $\text{Q}_{12}$
粘土:多,粗粒径:多	$\phi'=\text{中}$ ...地質 $\text{Q}_{13}$ , $\text{Q}_{14}$
粘土:少,粗粒径:少	$\phi'=\text{中}$ ...地質 $\text{Q}_{15}$
粘土:少,粗粒径:多	$\phi'=\text{大}$ ...地質 $\text{Q}_{16}$

## 4. 2 地質毎に見るリングせん断試験結果との相違点

### 4. 2. 1 リングせん断試験の方法

今回、すべり面せん断試験を実施したすべり面試料の内、極端にすべり面粘土層が薄く、攪乱試料の収集が不可能であった幾つかの試料を除いて、リングせん断試験を併行して行



った。試験には、Bishop (1971<sup>3)</sup>) が提案したひずみ制御型定圧リングせん断試験機を用いた。供試体寸法は外径 150mm, 内径 100mm, 厚み 20mm のドーナツ型供試体である。国内では宜保 (1994<sup>17)</sup>) が定体積・定圧兼用リングせん断試験装置を開発し、定体積せん断によって試験時間を大幅に短縮している<sup>9)</sup>。尚、今回用いた Bishop 型試験機は定圧型であり、有効応力の解析強度を得るために、せん断速度をせん断開始から残留強度実現時点、その後の上載荷重除荷を含む全過程で 0.02mm/min の緩速せん断とした。

採取したすべり面粘土は、水を加えてペースト状にし、その後 425  $\mu\text{m}$  のフルイを通して細粒分のみを収集した。全てのすべり面粘土に同様の粒度調整処理を行い、50, 100, 150, 200 kPa の異なる上載荷重で先行圧密を行ってせん断試験供試体を作製した。せん断は、少なくとも 40cm 以上のせん断変位 (約 1 回転) を与え、せん断打ち切りの判断は、せん断変位 D 対せん断応力 関係曲線上で安定収束状態を確認して行った。

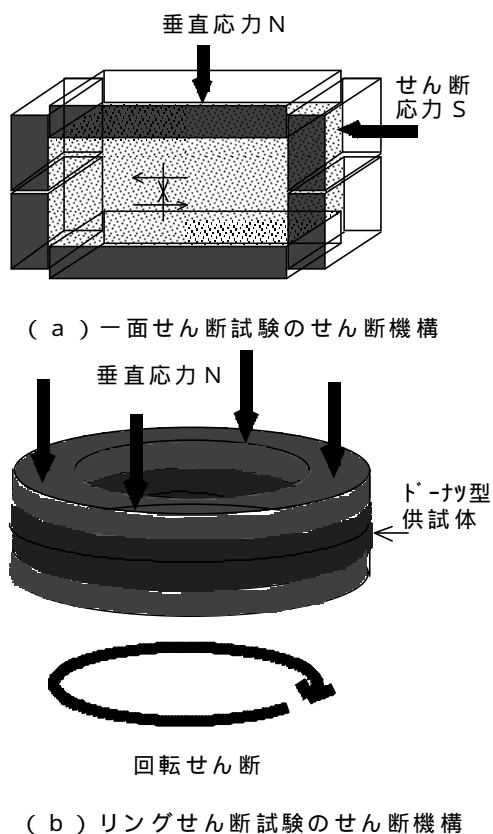


図4.5 リングせん断試験の原理



図4.6 リングせん断試験機全景

## 4. 2. 2 せん断抵抗角の比較

図4. 7 に、リングせん断試験とすべり面せん断試験から得たせん断抵抗角の比較を示す。地質  $\text{C}_1$ 、 $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$  では、約半数ですべり面せん断試験の結果がリングせん断試験の結果とほぼ一致し、残りはすべり面せん断試験結果が  $10^\circ$  前後低めの強度評価をしている。これに対し、地質  $\text{C}_4$ 、 $\text{C}_5$  では、逆にリングせん断試験結果が  $5^\circ \sim 10^\circ$  低めの強度評価となっている。

この傾向を、先に相関があることを指摘した粘土含有率とせん断抵抗角との関係について整理したものが図4. 8 である。図には、リングせん断試験結果のせん断抵抗角から、すべり面せん断試験で得たせん断抵抗角を引いた差： $\phi_r - \phi_s$  と、粒度調整前のすべり面粘土の粘土含有率との関係を示している。図より、リングせん断試験結果が大きめに評価された一部の新第三系のグループ、逆にすべり面せん断試験結果がより大きく評価された変成岩地帯地すべりグループのいずれも、粘土含有率の増大によってせん断抵抗角の差が小さくなることが解る。この傾向が示す意味は、試験後せん断面の観察から以下のように推察される。

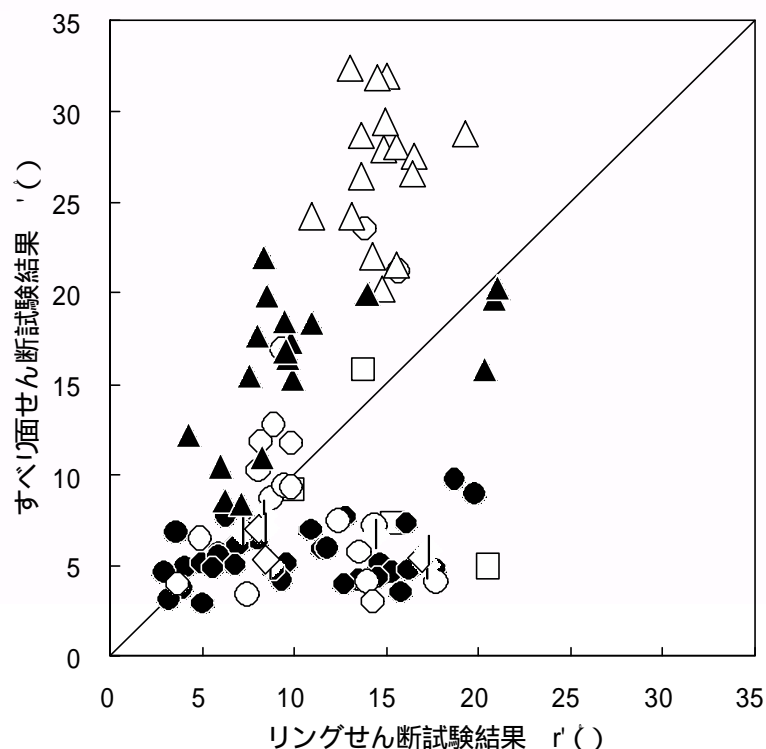


図4. 7 リングせん断試験結果とすべり面せん断試験結果の比較



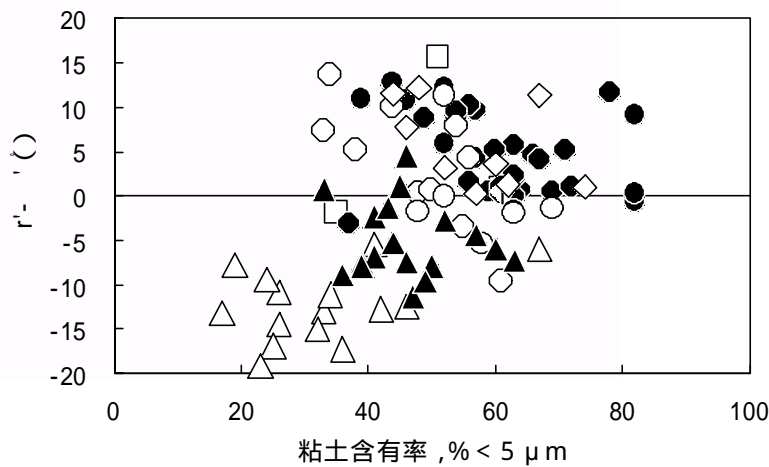


図4. 8 リングせん断とすべり面せん断の試験値差異と粘土含有率

新第三系グループ：鏡肌を形成し，スメクタイトの被覆層を生じるすべり面であるにも関わらず，粘土含有率で 50%を下回る評価を得た試料は，採取時にすべり面周囲の粗粒径成分（シルト，細砂等）を多く混入した試料であり，これがリングせん断試験のせん断抵抗角を強化している。

変成岩系グループ：山崎（2000<sup>73)</sup>）が指摘するように，粗砂～れきといった粗粒径サイズの混入を特徴とするすべり面粘土であり，こうした粗粒径成分が関与して形成する擦痕等のすべり面起伏構造が，粗粒径成分をフルイ除去した試料で行うリングせん断試験では発達せず，相対的に増大する粘土含有率によってせん断抵抗角が小さくなる。

#### 4. 2. 3 現場単位に見るせん断抵抗角の均質性

以下に，同一現場で複数の試験実施を実現した事例について，三次元的に広がるすべり面上での採取場所の違いが，すべり面せん断試験結果，およびリングせん断試験結果にどのように影響しているかを検討する。

##### (1) 狼沢地区地すべり

秋田県雄勝郡東成瀬村に位置する狼沢地すべりは，斜面長 900m，幅 550m，すべり面最大深度約 50m の大規模岩盤地すべりである。特に，融雪期や初冬に移動速度が増大する傾向を示しながら，年間 20 ～ 30cm の移動が確認されている。基岩を成す地質は，新第三系中新統小沢層の硬質泥岩・凝灰質シルト岩であり，鏡肌を成すすべり面は，焦茶

色，黄灰色，青灰色と種々の色調を呈する擦痕起伏顕著なものである。

狼沢地区でのすべり面せん断試験結果は，滑落崖近傍の E2，MS 地点試料，ブロック中腹部の 6，7，8，9，10 集水井内すべり面試料で  $\phi' = 4.65^\circ \sim 7.25^\circ$  となり， $2.5^\circ$  の幅に全ての試験値がプロットされた（図4. 9，図4. 12 参照）。

これに対してリングせん断試験結果は，最小値（ $\phi'_r = 5.95^\circ$ ）がすべり面せん断試験結果とほぼ一致するものの，最大値は  $\phi'_r = 19.31^\circ$  と大きなバラツキを生じた。この原因を考察すべく，図4. 13 にリングせん断試験に供した攪乱採取すべり面粘土試料の粒度特性を示した。図に認められる特徴を以下に整理する。

すべり面せん断試験と同一レベルの強度評価を得た狼沢 3，7 試料の粒度組成は，粘土含有率で 60%を上回り，細砂以上の粒径成分をほとんど含まない。

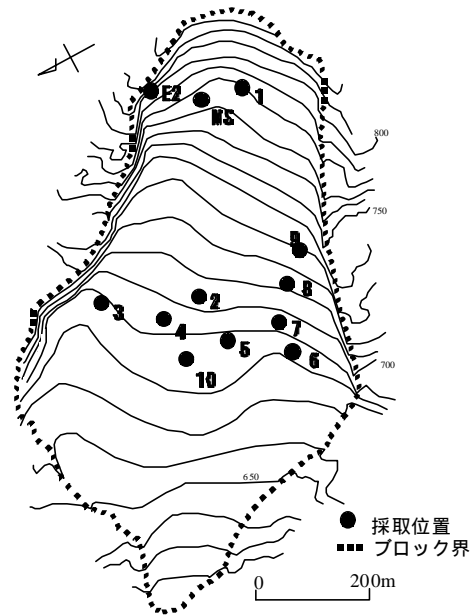


図4. 9 狼沢すべり面等高線図上の試料採取位置



図4. 10 狼沢 10すべり面の状況

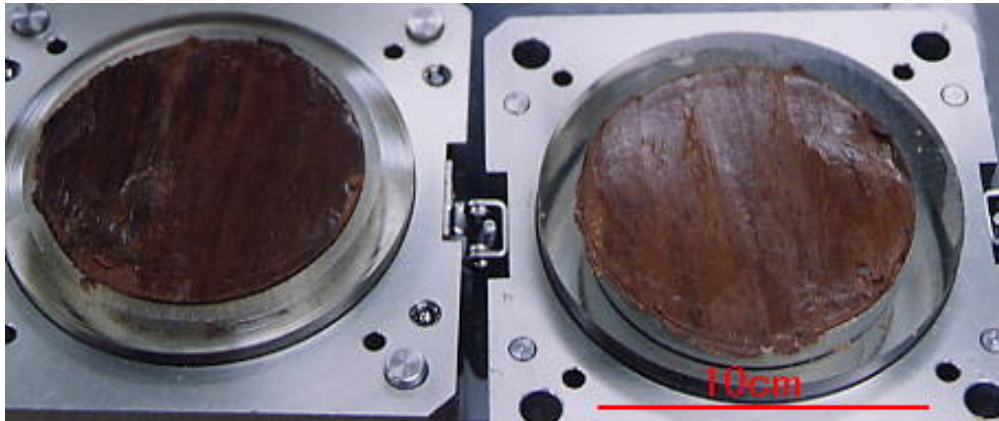


図4. 11 狼沢 10すべり面でのすべり面せん断試験後状況

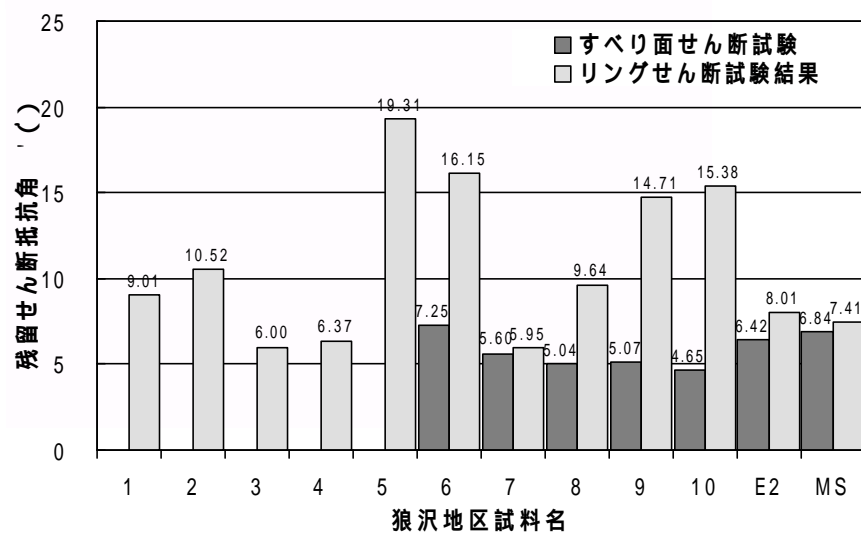


図4. 12 狼沢すべり面のせん断試験結果

リングせん断の強度レベルが突出して高い評価を得た狼沢 5, 6, 10 試料の粒度組成は、地質 に属するすべり面粘土でありながら粘土含有率が 50 %を下回るものを含み、かつ細砂以上の粒径成分が 20%前後と多めである。

図4. 13 に示される各試料の粒径加積曲線は、シルト以下の粒径範囲でほぼ平行関係を満足する線形となり、各試料の粒度組成の差異が細砂以上の粒径成分の混入多寡によるものであることが解る。

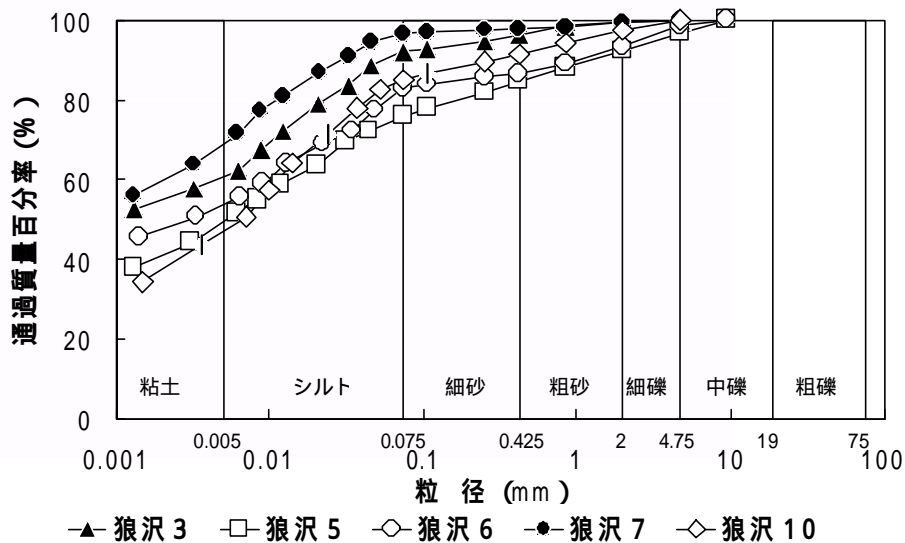


図4. 13 狼沢すべり面粘土の代表的な粒度分布

狼沢地区すべり面，および「 $\theta$ 」が  $6^\circ$  前後にまで低下したリングせん断試験後せん断面には，スメクタイトが面を完全に被覆する状況が電子顕微鏡観察によって確認され，細砂以上の粒径成分がすべり面に露出する状況はほとんど見あたらない。つまり，リングせん断試験用採取試料に検出された粗粒径成分の多寡は，すべり面粘土の採取状況に強く影響を受けると理解される。スメクタイト 100%の試料採取は不可能であっても，地質の粒度組成の特徴である粘土含有率が 50%を上回り，粗粒径成分を含まない試料では，リングせん断試験の結果は，スメクタイトの残留せん断抵抗角に一致すると考えられる。

## ② 風穴地区地すべり

風穴地すべりは，愛媛県上浮穴郡小田町に位置し，幅約 100m，斜面長約 1.1km で，なだらかに屈曲する沢型の平面形態を有する。滑動ブロックは，縦断方向に連続する A ～ F までの小ブロックに区分され，地内を御荷鉾構造線が横断するこ

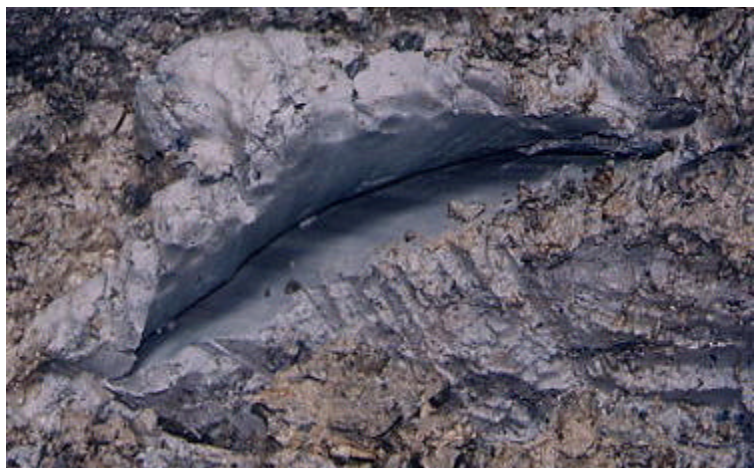


図4. 14 風穴 8すべり面の状況



とで、この構造線より斜面上方に位置するブロックは御荷鉾緑色岩類、下方は三波川結晶片岩が分布するという地質的特徴をもつ（図4. 15 参照）。

対象試料は全て御荷鉾緑色岩類内から採取したものであり、1～3がA-2aブロック、4～7がA-2bブロックと属するブロックが異なる。これらのすべり面せん断試験結果は、A-2aブロック  $\theta = 15^\circ \sim 17^\circ$ 、A-2bブロック  $\theta = 8^\circ \sim 10^\circ$  と、両ブロック間で明らかに強度特性が異なる（図4. 17 参照）。また、A-2aブロックの平均すべり面傾斜角は  $15^\circ$  であるのに対し、A-2bブロックは  $5^\circ$  と緩く、すべり面せん断試験の結果と調和的である。

リングせん断試験結果は、A-2aブロックで  $\theta_r = 7^\circ \sim 9^\circ$ 、A-2bブロックで  $\theta_r = 6^\circ \sim 8^\circ$  となり、両ブロック間での差異は顕著でなく、すべり面せん断試験で得られた最小値レベルか、やや小さめのせん断抵抗角となる。図4. 15 風穴すべり面等高線図上の試料採取位置

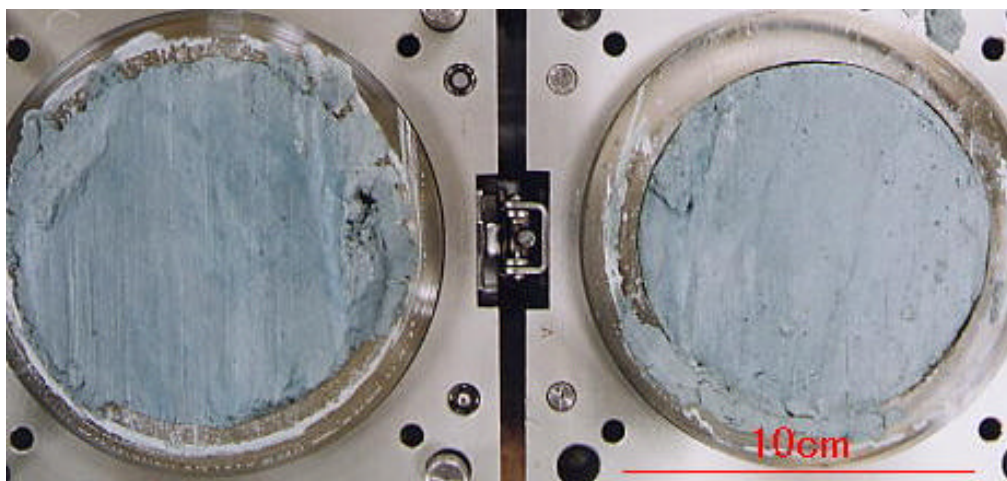
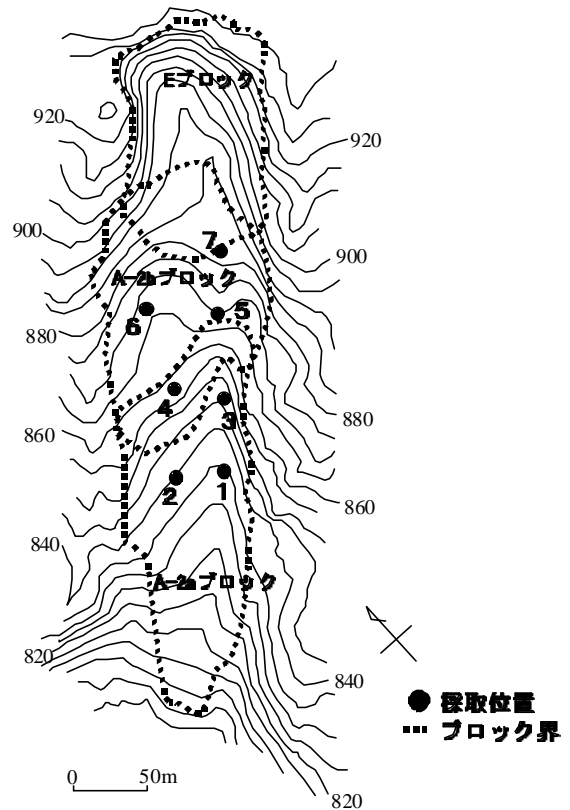


図4. 16 風穴 8すべり面でのすべり面せん断試験後状況

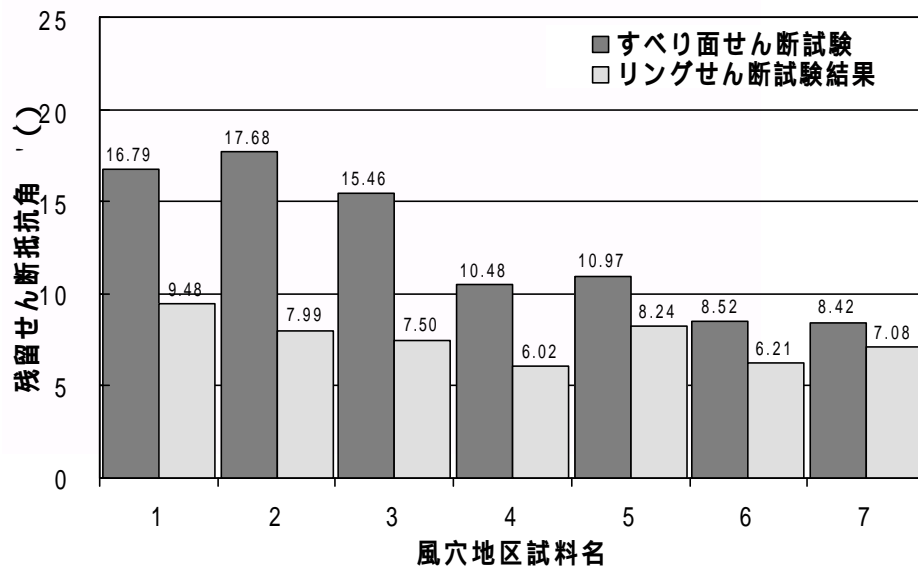


図4. 17 風穴すべり面のせん断試験結果

リングせん断試験結果が低めの強度を示し、バラツキが少なくなっている点については、先述した通り、試料調整段階における粗粒径成分の除去による相対的な粘土含有率の増大が原因と推察される。各試料の物理的特性（粒度組成、コンシステンシー）にもほとんどバラツキが無くなっており、すべり面粘土中に粗粒径を多く含むすべり面において、粗粒径成分の存在がせん断抵抗角による強度の発現に大きく寄与することが示唆される。

### ③ 平山地区地すべり

長崎県北松浦郡に位置する平山地すべりは、新第三系中新統佐世保層群世知原層と、この上を不整合に覆う八の久保層及び松浦玄武岩により構成されるキャップロック型の大規模岩盤地すべりである。斜面長約 600m、幅約 800m の滑動ブロックが、複数の小ブロックに分裂し、移動量は斜面末端部で 110m 以上に達している。鏡肌を成すチョコレート色のすべり面は、世知

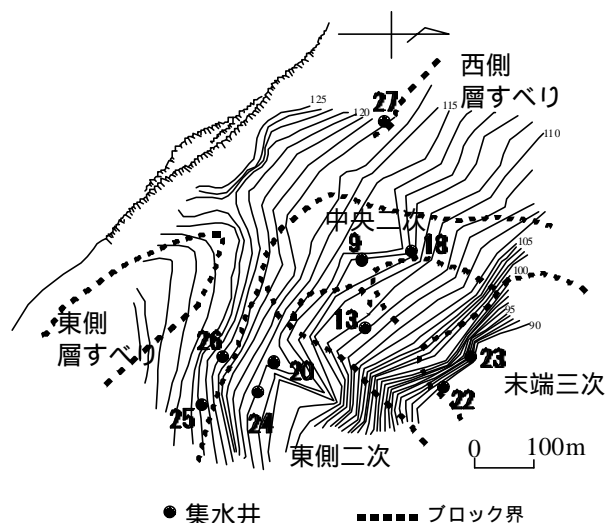


図4. 18 平山すべり面等高線図上の試料採取位置



図4. 19 平山 27すべり面の状況

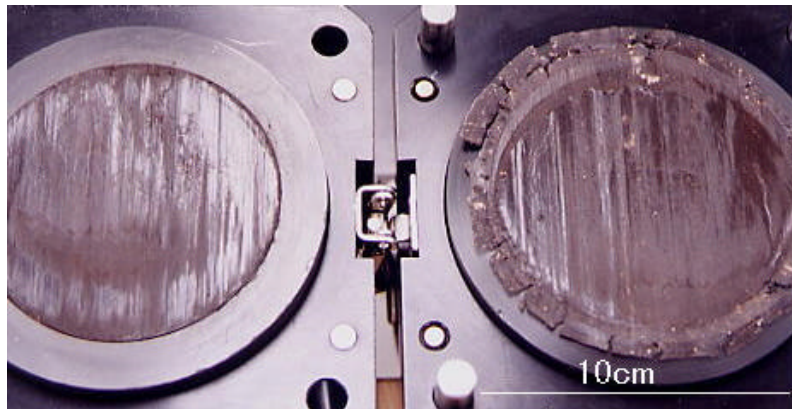


図4. 20 平山 27すべり面でのすべり面せん断試験後状況

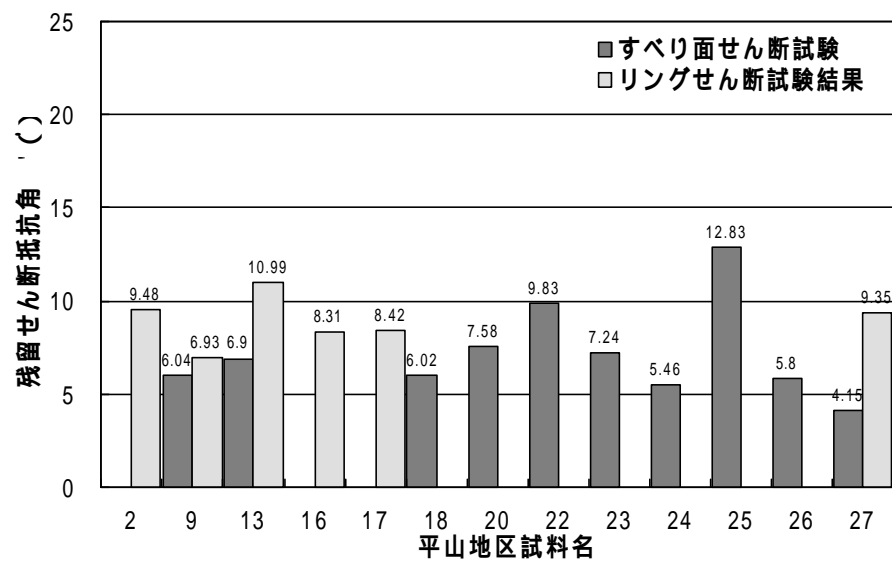


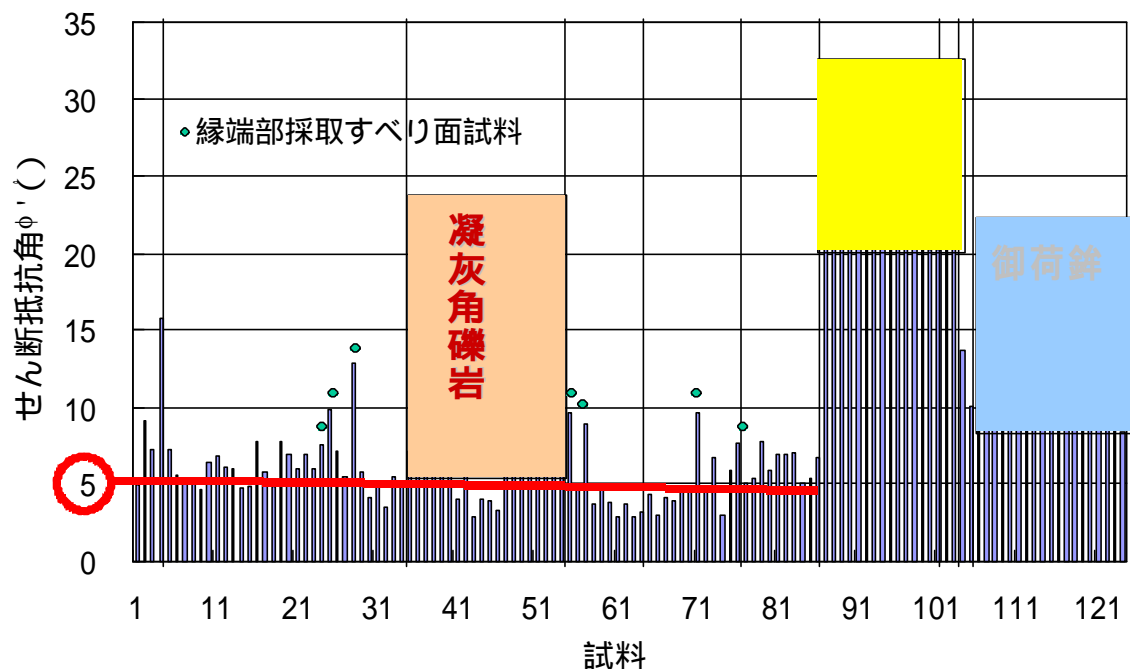
図4. 21 平山すべり面のせん断試験結果

### 三波川

原層砂岩・頁岩層に挟在する凝灰岩強風化部内に  $3^{\circ} \sim 4^{\circ}$  の傾斜をもって形成している。

すべり面の採取位置を、図4. 18 のすべり面等高線図に示す。また、図4. 21にはすべり面せん断試験、及びリングせん断試験で得たせん断抵抗角を、当地区で実施した全ての試料について整理した。図より平山地区で実施したすべり面せん断試験結果は、 $\phi=4.15^{\circ} \sim 12.83^{\circ}$  と比較的バラツキが大きい。平山地区すべり面もスメクタイトの被覆構造をもつことを考えれば、得られた  $4^{\circ}$  付近の強度特性は、先述したモンモリロナイトの残留強度レベルに等しいと理解される。

$\phi=12.83^{\circ}$  の強度評価を得た 25 試料は、平山地すべりの東側側壁に位置し、すべり面の規制条件が他の低い強度レベルを得たすべり面部とは異なる。また、これに準じてやはり若干高めの評価となっている 22, 23 は、末端三次ブロックの最末端部に位置するすべり面部位である。さらに、20 は東側二次ブロックの西側側壁上に形成するすべり面部位となり、強度が高めとなったすべり面試料は、全て縁端部採取のすべり面と推定される。



図中 ～ の番号は表4. 1 に示す文中表記の地質番号に共通

図4. 22 日本各地の地すべり地で実施したすべり面せん断試験結果 〔再掲，一部改変〕



図4. 22（再掲，一部改変）に示す通り，縁端部採取試料が高めの強度となる傾向は，平山地区以外の新第三系にも同様に指摘される。また，末端部すべり面粘土は，しばしばせん断帯が厚く，従属せん断面形成が著しい高含水状態で観察される。これらを考えると，地表に近いために土被り荷重を喪失した縁端部すべり面では，サクシオンが増大して見掛けの粘着力が増加，さらに降雨時に吸水膨張を生じて残留状態の定向配列構造を乱すなど，せん断強度を強化する可能性として複数の原因が指摘される。

#### (4) 横川地区地すべり

長野県北安曇郡小谷村に位置する横川地すべりは，新第三系鮮新統横川層の凝灰岩，凝灰角礫岩を基岩とし，上部，下部二つのブロックに分かれて滑動している。両ブロックともに融雪期を中心に年間約1 m 弱の滑動を生じていたが，集水井工，大規模暗渠工の施工により，現在，滑動は停止している。崩積土層下位の赤紫色凝灰質粘性土と，基岩直上層となる青灰色風化凝灰岩の層界に形成するすべり面は，周囲に安山岩の混入礫が多く介在し，やや起伏に富む鏡肌を呈する。

図4. 23 に示す横川地区のすべり面等高線図にも，地質学的規制条件として複数の板状すべり面区間が確認される。全ての採取位置が，ほぼこの規制条件上にのると評価され，得られたすべり面せん断試験結果も，最大で  $5.7^{\circ}$  と，X線分析，電子顕微鏡観察から確認されている通り，スメクタイトの残留強度が強く反映する結果となった（図4. 26 参照）。

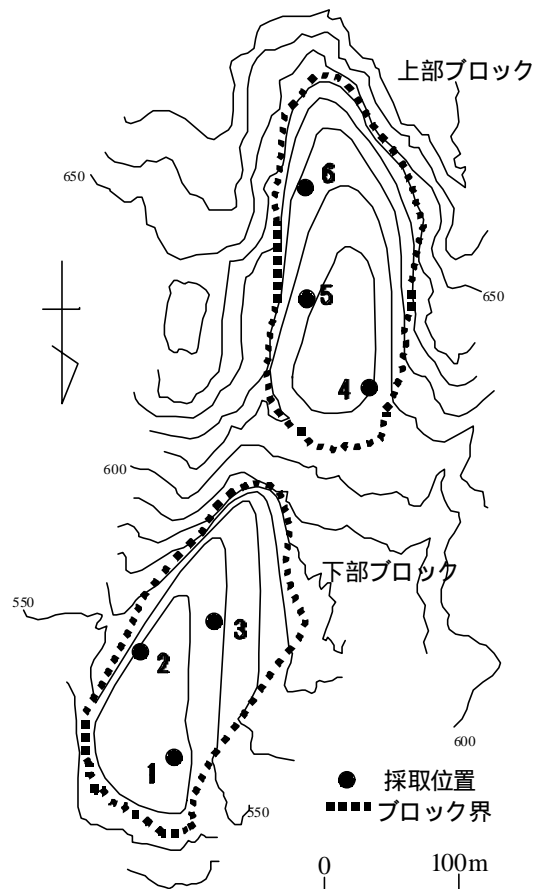


図4. 23 横川すべり面等高線図上の  
試料採取位置

尚，前掲の図4. 22 には，新第三系凝灰角礫岩地帯（地質 ）のすべり面せん断抵抗角が，他の新第三系の群に比べてバラツキが大きく， $\phi$ の取り得る幅が  $2^{\circ} \sim 23^{\circ}$  と広

いことが示される。ここで紹介した横川地区地すべりについては、スメクタイトの強度特性に強く支配された均質なせん断抵抗角が計測されたが、同地質においては特異な事例と言える。

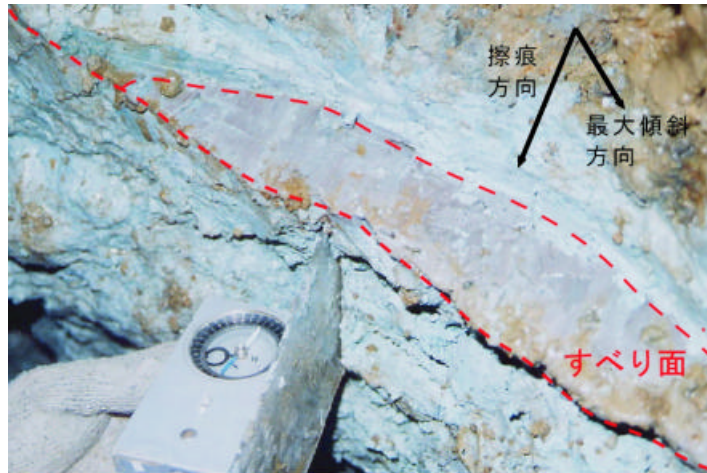


図4. 24 横川 6すべり面の状況

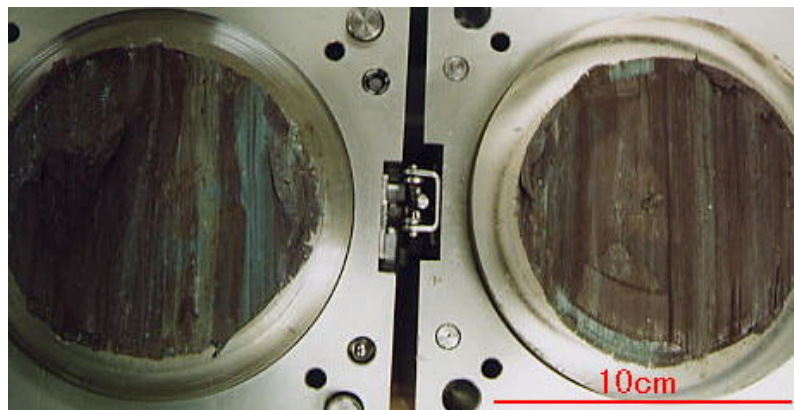


図4. 25 横川 6すべり面でのすべり面せん断試験後状況

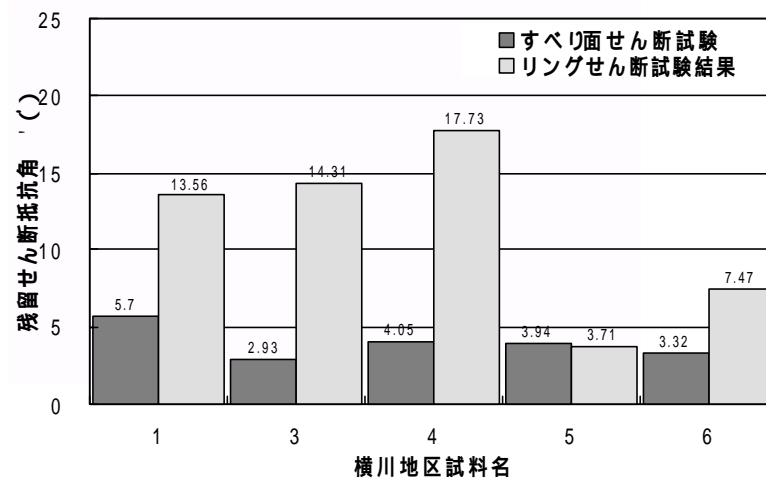


図4. 26 横川すべり面のせん断試験結果

以下に示す事例は、新第三系凝灰角礫岩地帯のすべり面で、せん断抵抗角が高めに計測された事例である。これらのすべり面に共通して言えることは、比較的長周期の起伏があり、擦痕構造が明瞭である点である。また、凝灰質シルトが卓越するすべり面粘土層は極めて薄く、面の直上、直下には、比較的締まった土層が分布することが多い。

図4. 27 に示す秋田県円川原すべり面は、直上にルーズな礫混り土、基盤が凝灰角礫岩に挟まれ、両層に含まれる大小様々な粒径の礫や、取り込まれた礫混り土が面に直接干渉し、尖塔状や脈状の隆起部を各所に形成していた。よって定向配列構造は極めて未熟な印象のものであった。図4. 29 の秋田県崩ヶ沢すべり面も同様であり、面には混入礫が多数露出する。また白亜系頁岩地帯に属する福井県谷すべり面も、構造は新第三系凝灰角礫岩に類似するものであった（図4. 30 参照）。



図4. 27 円川原すべり面状況（ $\theta=21.15^\circ$ ）



図4. 28 蟹ヶ沢 3すべり面状況（ $\theta=11.79^\circ$ ）

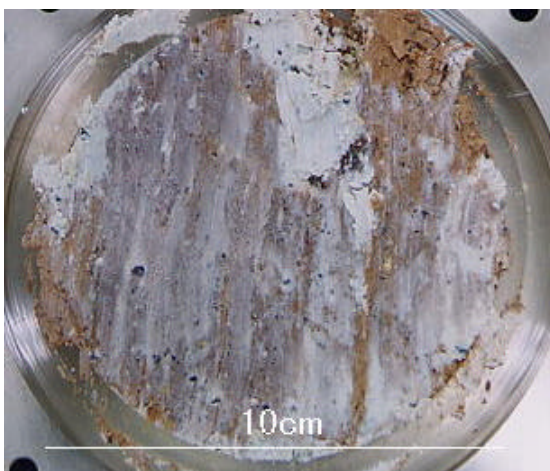


図4. 29 崩ヶ沢 5すべり面状況（ $\theta=11.71^\circ$ ）

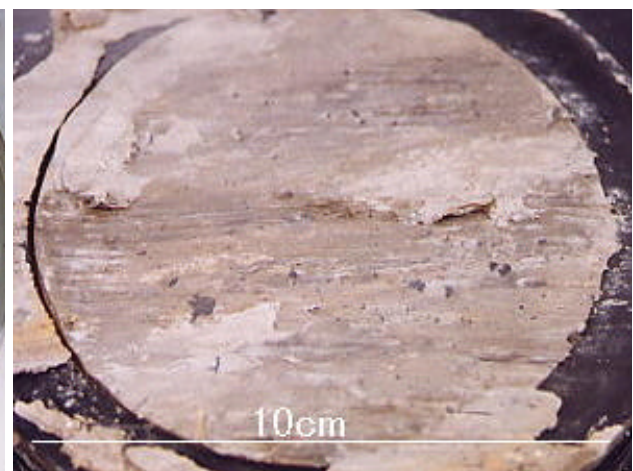


図4. 30 谷 1すべり面状況（ $\theta=9.12^\circ$ ）

### 4.3 すべり面せん断試験結果の特徴に関するまとめ

開発したすべり面せん断試験を用いて全国の様々な地質に属するすべり面で試験を行うとともに、採取したすべり面粘土を用いて従来から広く実施されているリングせん断試験を行い、得られたせん断抵抗角の比較検証を行うことで、すべり面のせん断強度の特性に関する以下の結論を得た。

新第三系堆積岩地すべり（凝灰角礫岩を除く）、および熱水変質安山岩地帯での地すべりで行ったすべり面せん断試験結果は、せん断抵抗角の平均値が  $4^{\circ} \sim 6^{\circ}$  と小さく、かつバラツキも少ない。また、別途実施したX線粉末回折分析や走査型電子顕微鏡によるすべり面表面の観察結果から、これらのすべり面表面がスメクタイトに被覆されている状況が確認された。すなわち、試験を行ったほとんど全てのすべり面がスメクタイトの残留強度特性に強く影響されたものであることが判明した。

バラツキが小さいことを特徴とする新第三系堆積岩地すべりの中で、凝灰角礫岩地帯のすべり面だけは顕著なバラツキを生じることが解った。これは、凝灰角礫岩地帯のすべり面も他の新第三系と同様にスメクタイトによる面被覆は完成するものの、面近傍に介在する角礫がすべり面に深い擦痕構造や尖塔状の隆起部を生じ、これがせん断抵抗角の大小に少なからず影響したためと考えられた。

スメクタイトの残留強度が卓越する新第三系堆積岩地すべりの中には、若干高めの強度特性が計測される事例が含まれる。これらの多くは、縁端部採取のすべり面試料であり、明瞭な規制条件を伴う船底型すべり面部位とは面の構造自体が異なる可能性が示唆された。

変成岩地帯地すべり（結晶片岩地すべり、御荷鉾緑色岩類地すべり）では、すべり面粘土中に粗砂以上の粒径成分が20%以上含まれ、こうした粗粒径成分の介在によって、擦痕の顕著な起伏構造を生じ、せん断抵抗角が増大する可能性が指摘された。

変成岩地帯地すべりの中でも御荷鉾緑色岩類地すべりは、結晶片岩地帯地すべりのすべり面よりも粘土含有率が高めとなり、せん断抵抗角が結晶片岩地帯地すべりにおけるものよりも  $10^{\circ}$  程小さい。また、現場によっては膨潤性粘土鉱物スメクタイトやイラ

イト／スメクタイト混合層鉱物が検出され，こうした粘土鉱物の影響を受けた場合，さらにせん断抵抗角が低下する傾向が見られた。

リングせん断試験との比較では，新第三系堆積岩地すべりの場合，リングせん断試験用すべり面粘土の採取が厳密であるほど，試験結果は良好に一致する。変成岩地すべりでは，リングせん断試料に施す粒度調整処理が，すべり面近傍に介在する粗粒径成分を除去し，変成岩地すべりに特有の起伏顕著なすべり面構造の出現を抑制する。この結果，リングせん断試験で得られるせん断抵抗角が極端に小さくなることが解った。



表4. 2 日本各地より採取したすべり面 (すべり面粘土) の土質特性

試料名	部位	深度	リグ	すべり面	液性	塑性	塑性	粘土	細砂	粗砂	礫	主たる含有鉱物 X線粉末回折分析より	スカタイト被覆 電子顕微鏡
			σ <sub>r</sub>	c	限界	限界	指数	土	ト	砂	砂		
古第三紀以前地質地すべり													
1	長野 大平1	板状	33.5	4.30	20.56	37.88	4.94	47.86	17.33	30.53	41.28	12.11	8
2	長野 谷1	板状	14.5	10.24	9.90	7.50	9.12	82.30	17.42	64.88	49.19	12.13	7
3	千葉 東水路	板状	5.0	6.96	15.42	5.83	7.26	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
4	福島 成沢9	板状	37.0	7.26	13.82	-1.18	15.76	73.60	25.43	48.17	38.31	17.11	3
新第三系堆積岩地すべり(凝灰岩)													
5	秋田 狼沢6	板状	28.0	16.73	16.15	9.59	7.25	77.01	18.61	58.40	54.29	4.6	7
6	秋田 狼沢7	板状	27.0	4.30	5.95	5.18	5.60	132.51	30.95	101.56	69.28	1.1	1
7	秋田 狼沢8	板状	32.0	9.72	9.64	12.38	5.04	134.31	31.10	103.21	66.28	2.3	1
8	秋田 狼沢9	板状	23.0	0.45	14.71	7.35	5.07	102.26	28.31	73.95	57.37	2.2	2
9	秋田 狼沢10	板状	25.0	10.88	15.38	20.95	4.65	94.41	23.25	71.16	46.39	6.6	3
10	秋田 狼沢E2	板状	13.0	6.59	8.01	6.89	6.42	100.40	34.94	65.46	56.42	1.1	0
11	秋田 狼沢MS	滑落深	9.0	6.33	7.41	8.64	6.84	105.14	36.75	68.39	64.34	1.0	1
12	長崎 大瀬16地入調	板状	8.2	-	-	8.22	6.09	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
13	長崎 大瀬18地入調	板状	23.2	-	-	11.73	5.97	116.64	34.11	82.53	62.32	4.2	0
14	長崎 大瀬21地入調	板状	41.6	-	-	12.21	4.81	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
15	山形 田代山2	未端深	34.5	2.46	4.11	7.75	4.84	350.13	46.31	303.82	82.16	0.1	1
16	山形 樽川内10地入調	板状	19.8	-	-	6.06	7.72	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
17	福島 坂戸14SF	板状	11.5	10.95	11.53	23.62	5.84	150.07	36.66	113.41	63.12	9.9	7
18	福島 坂戸16SF	板状	10.8	-	-	12.97	4.89	125.40	25.29	100.11	40.21	15.15	9
19	長崎 石倉14地入調	板状	18.4	2.26	6.36	44.05	7.71	90.87	35.57	55.30	未分析	未分析	未分析
20	長崎 石倉16地入調	板状	33.0	-	-	4.64	6.88	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
21	長崎 平山9地入調	板状	58.5	9.22	6.93	19.23	6.04	121.88	41.47	80.41	72.23	5.0	0
22	長崎 平山13地入調	板状	25.0	12.07	10.99	3.89	6.90	64.43	15.91	48.52	67.25	8.0	0
23	長崎 平山18地入調	板状	53.5	-	-	27.76	6.02	98.88	46.72	52.16	未分析	未分析	未分析
24	長崎 平山20地入調	板状	17.0	-	-	15.11	7.58	87.92	43.21	44.71	59.34	5.2	0
25	長崎 平山22地入調	未端深	15.8	-	-	0.98	9.83	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
26	長崎 平山23地入調	未端深	18.5	-	-	0.00	7.24	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
27	長崎 平山24地入調	板状	17.0	-	-	8.84	5.46	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
28	長崎 平山25地入調	側壁深	9.7	-	-	6.34	12.83	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
29	長崎 平山26地入調	板状	18.0	-	-	7.28	5.80	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
30	長崎 平山27地入調	板状	56.7	4.14	9.35	5.26	4.15	104.42	30.32	74.10	71.16	8.4	1
31	山形 山ノ内13	板状	11.0	0.88	4.97	10.30	5.07	84.32	29.62	54.70	63.25	7.3	2
32	山形 山ノ内15	板状	20.0	6.92	15.75	0.24	3.46	74.28	19.57	54.71	52.27	17.4	0
33	山形 山ノ内16	板状	17.7	3.13	5.92	11.80	5.52	84.18	29.42	54.76	59.37	3.1	0
34	山形 山ノ内17	板状	13.5	7.71	6.81	6.65	5.01	73.59	23.62	49.97	63.24	10.3	0
新第三系堆積岩地すべり(凝灰角礫岩)													
35	山形 大平W3	側壁深	23.6	13.93	14.35	14.78	7.10	71.79	17.45	54.34	33.31	16.15	5
36	山形 大平W4	側壁深	27.6	12.07	12.48	8.32	7.40	98.32	21.14	77.18	38.43	10.8	1
37	山形 蟹ヶ沢1	未端深	24.0	11.90	8.83	5.17	8.62	123.28	36.00	87.28	48.32	10.8	2
38	山形 蟹ヶ沢2	未端深	24.0	23.44	9.53	6.46	9.34	120.76	34.62	86.14	48.27	12.9	4
39	山形 蟹ヶ沢3	未端深	27.2	18.83	8.24	28.00	11.79	112.58	33.31	79.27	55.27	10.5	3
40	山形 蟹ヶ沢6	未端深	17.3	23.23	9.89	21.16	9.29	114.13	31.04	83.09	50.27	11.8	4
41	兵庫 畑1	板状	19.6	11.48	13.98	12.63	4.05	61.40	15.71	45.69	44.32	11.7	6
42	長野 横川1	未端深	12.5	8.01	13.56	16.66	5.70	101.84	24.30	77.54	54.22	14.6	4
43	長野 横川3	板状	13.5	2.04	14.31	7.72	2.93	93.05	21.76	71.29	52.18	15.11	4
44	長野 横川4	未端深	11.0	8.06	17.73	18.92	4.05	55.96	20.14	35.82	34.15	16.17	18
45	長野 横川5	板状	16.5	2.34	3.71	7.58	3.94	119.06	31.14	87.92	52.31	11.5	1
46	長野 横川6	板状	14.0	1.69	7.47	7.53	3.32	92.24	25.17	67.07	56.22	14.5	3
47	秋田 田川原1	板状	10.0	12.46	15.73	8.93	21.15	117.15	37.20	79.95	58.6	12.15	9
48	秋田 田川原観	滑落浅	2.7	13.44	13.84	0.00	23.54	103.04	41.48	61.56	61.26	6.5	2
49	兵庫 高柳1	板状	7.9	5.30	4.91	2.45	6.38	82.52	31.95	50.57	69.26	2.2	1
50	高柳S	側壁浅	0.5	5.79	8.13	3.43	10.17	73.91	28.48	45.43	63.29	4.3	1
51	鳥取 神谷T	未端浅	5.0	-	-	4.70	5.85	99.21	23.78	75.43	未分析	未分析	未分析
52	秋田 崩ヶ沢5	板状	6.9	4.65	9.85	8.43	11.71	107.84	34.87	72.97	48.35	6.9	2
53	秋田 崩ヶ沢2	板状	13.5	5.40	8.94	17.66	12.69	130.32	51.85	78.47	未分析	未分析	未分析
54	秋田 崩ヶ沢3	板状	17.0	4.91	9.36	7.16	16.83	110.13	39.57	70.56	未分析	未分析	未分析
新第三系堆積岩地すべり(凝灰質泥岩)													
55	岩手 面岸1	側壁深	13.2	4.12	18.74	0.00	9.67	77.84	27.31	50.53	82.10	6.2	0
56	岩手 面岸2	板状	21.0	1.17	16.30	6.66	4.73	91.66	27.62	64.04	78.15	6.1	0
57	岩手 面岸5	側壁深	10.5	4.70	19.89	8.17	8.90	62.96	20.17	42.79	39.47	9.3	2
58	岩手 面岸6	板状	26.1	-	-	10.55	3.72	100.61	32.49	68.12	51.37	8.3	1
59	岩手 面岸7	板状	21.9	4.83	8.91	17.96	4.72	82.09	22.91	59.18	57.33	7.2	1
60	岩手 面岸8	板状	23.5	-	-	12.53	3.77	91.09	21.90	69.19	62.35	3.0	0
61	岩手 面岸9	板状	15.5	-	-	12.53	2.89	105.61	34.76	70.85	65.25	7.3	0
62	佐賀 峰1	板状	16.7	4.99	3.91	7.47	3.72	124.73	39.76	84.97	61.36	2.1	0
63	佐賀 峰2	板状	20.7	5.42	5.04	12.73	2.84	169.34	58.46	110.88	63.15	13.8	1
64	佐賀 峰5	板状	24.4	-	-	6.52	3.17	131.09	56.80	74.29	未分析	未分析	未分析
新第三系堆積岩地すべり(泥岩)													
65	長野 石原1	板状	8.5	7.50	14.56	1.38	4.31	77.81	16.24	61.57	56.35	7.2	0
66	山形 侍橋E	板状	10.0	-	-	4.91	3.00	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析	未分析
67	秋田 猿田沢1	板状	13.3	5.37	13.50	0.52	4.10	110.09	28.97	81.12	54.30	5.6	5
68	秋田 猿田沢2	板状	15.0	7.66	12.73	6.33	3.94	100.02	30.77	69.25	49.29	8.8	6
69	秋田 砥沢3	板状	13.0	11.19	17.66	8.00	4.81	71.56	20.01	51.55	44.32	8.8	8
70	富山 中田浦W1	未端深	14.8	4.79	5.66	10.04	4.75	67.50	23.18	44.32	61.34	4.1	0
71	富山 長谷1	未端深	5.0	-	-	9.04	9.66	54.15	18.25	35.90	59.28	9.2	2
72	青森 雨池11	側壁深	15.5	1.77	2.97	3.43	4.61	174.28	45.95	128.33	63.31	2.2	2
73	新潟 石合3	板状	20.5	1.77	3.59	0.00	6.75	126.47	31.89	94.58	37.51	8.3	1
74	山形 銅山川B	板状	42.5	1.77	3.24	21.48	3.05	206.00	27.73	178.27	82.14	4.0	0
75	山形 銅山川D2	未端深	22.0	12.26	11.81	0.00	5.90	112.63	23.67	88.96	52.32	13.2	1
76	山形 銅山川D3	未端深	23.0	5.00	12.80	4.41	7.66	97.69	26.99	70.70	60.27	11.2	0
熱水変質安山岩地すべり													
77	山形 トヤ沢2	板状	15.3	14.86	17.18	10.77	5.06	91.67	28.86	62.81	48.44	4.2	2
78	山形 トヤ沢4	板状	27.5	9.08	16.93	6.84	5.45	103.55	25.43	78.12	44.34	14.7	1
79	山形 トヤ沢5S	板状	7.3	7.30	8.34	17.50	7.75	76.49	31.28	45.21	61.33	5.0	1
80	山形 トヤ沢5D	板状	14.5	10.00	17.23	12.40	5.88	94.17	29.33	64.84	67.25	6.2	0
81	山形 トヤ沢6	板状	11.5	3.30	7.15	8.50	6.90	86.17	26.11	60.06	57.31	4.3	5
82	山形 トヤ沢7S	板状	12.8	4.80	8.01	20.50	6.97	93.76	33.63	60.13	74.18	4.3	1
83	山形 トヤ沢7D	板状	21.0	6.40	8.36	26.40	7.04	97.40	28.63	68.77	62.28	6.4	0
84	山形 トヤ沢8	板状	9.7	6.40	8.67	10.70	5.08	83.78	26.09	57.69	60.29	6.4	1
85	山形 トヤ沢9S	板状	16.5	8.13	8.43	14.97	5.34	81.04	29.09	51.94	52.41	4.2	1
86	山形 トヤ沢9D	板状	20.5	14.93	14.44	9.25	6.71	92.65	25.22	67.43	46.21	9.15	9

#### 4. すべり面せん断試験結果の特徴

試料名			部位	深度	リソ		すべり面		液性	塑性	塑性	粘シル	細	粗	礫	主たる含有鉱物 X線粉末回折分析より			ｽｽﾀｲﾄ被覆 電子顕微鏡
					σ	μ	σ	μ	限界	限界	指数	土	ト	砂	砂				
三波川泥質片岩地すべり																			
87	徳島	櫻原1	板状	30.0	4.41	14.85	1.77	27.91	40.90	21.34	19.56	33	18	10	17	22	緑泥石, 石英, ｲﾝﾌﾞﾙｲﾄ, ｶﾐｼｮﾝ		無
88	高知	長又3	板状	8.5	4.77	14.20	14.70	22.05	34.98	22.42	12.56	19	19	14	21	27	ｲﾝﾌﾞﾙｲﾄ, 石英, ｶﾐｼｮﾝ		無
89	徳島	西山1	板状	27.0	8.41	15.54	18.77	28.12	31.91	15.08	16.83	46	18	11	14	11	緑泥石, ｲﾝﾌﾞ		無
90		西山2	板状	23.5	6.70	13.66	10.89	26.46	34.11	17.57	16.54	42	17	11	17	13	緑泥石, ｲﾝﾌﾞ		無
91	徳島	久敷茶	板状	22.5	4.07	10.91	16.03	24.21	44.36	26.19	18.17	17	14	10	19	40	緑泥石, ｲﾝﾌﾞ		無
92		久敷黒	板状	22.5	6.22	13.08	16.03	24.21	33.61	18.63	14.98	34	23	9	15	19	緑泥石, ｲﾝﾌﾞ		無
93	愛媛	ヒノ口2	板状	8.0	14.23	16.51	4.44	27.48	38.76	17.26	21.50	26	20	23	18	13	ｲﾝﾌﾞ, 石英, 緑泥石		無
94		ヒノ口3	板状	10.0	5.86	19.31	8.03	28.78	40.25	18.95	21.30	24	17	22	18	19	緑泥石, 石英		無
95	徳島	漆日浦3	板状	7.0	0.98	14.93	26.29	29.41	32.94	15.95	16.99	26	18	7	14	35	ｲﾝﾌﾞ, 緑泥石, 石英		無
96		漆日浦5	板状	8.5	4.91	14.99	5.40	31.96	33.78	15.27	18.51	25	21	7	11	36	緑泥石, 石英		無
97		漆日浦7	板状	10.5	5.69	13.64	10.01	28.65	32.66	16.49	16.17	32	26	10	13	19	緑泥石, 石英		無
98		漆日浦8	板状	10.0	0.98	13.05	24.43	32.35	42.72	18.13	24.59	23	16	7	14	40	緑泥石, 石英		無
99		漆日浦10	板状	9.0	3.14	14.53	4.71	31.85	37.88	15.64	22.24	36	24	7	13	20	緑泥石, 石英		無
100	高知	能合3	板状	24.5	2.84	14.79	18.84	20.27	58.50	23.07	35.43	41	26	8	14	11	ｲﾝﾌﾞ, 石英, ｶﾐｼｮﾝ		無
101	徳島	水ノ丸T1-3	板状	32.5	-	-	11.09	20.25	35.06	16.85	18.21	-	-	-	-	-	ｲﾝﾌﾞ, 緑泥石, 石英		無
三波川塩基性片岩地すべり																			
102	徳島	水ノ丸T1-6	板状	18.	1.47	15.59	4.81	21.54	45.71	21.19	24.52	67	23	3	3	4	緑泥石, 角閃石, ｲﾝﾌﾞ		無
103		水ノ丸4	板状	11.5	-4.32	16.40	19.72	26.61	36.75	19.53	17.22	-	-	-	-	-	緑泥石, 角閃石, ｲﾝﾌﾞ		無
長崎変成岩類地すべり(白雲母片岩)																			
104	長崎H11	牧野林道調	未端浅	1.0	-	-	12.07	13.67	-	-	未分析	39	49	6	4	2	未分析		無
105	長崎H11	山口林道調	未端浅	0.5	-	-	5.97	10.10	-	-	未分析	33	39	22	5	1	未分析		無
御荷鉾緑色岩類地すべり																			
106	愛媛	アヲタ1	板状	6.7	5.72	10.91	9.13	18.36	49.92	20.14	29.78	39	20	10	12	19	未分析		無
107		アヲタ2	板状	7.5	4.06	13.94	7.15	19.94	48.36	16.95	31.41	60	20	6	6	8	未分析		無
108	愛媛	中黒岩1	板状	25.0	12.22	20.82	7.97	19.68	54.31	17.94	36.37	45	20	12	9	14	未分析		無
109		中黒岩2	潰落深	26.5	5.57	21.04	46.40	20.33	39.50	16.41	23.09	33	19	19	14	15	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
110	徳島	南上角5	板状	13.2	0.69	9.89	21.19	15.24	42.08	16.41	25.67	44	28	15	12	1	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
111		南上角9	板状	11.5	7.23	20.32	34.71	15.81	56.51	19.82	36.69	46	21	9	15	9	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
112	徳島	中内3G	板状	22.0	3.14	4.26	-0.49	12.20	49.81	21.68	28.13	50	17	11	13	9	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		未確認
113	埼玉	朝日根1	未端深	5.0	4.12	8.30	2.45	21.97	46.58	19.49	27.09	-	-	-	-	-	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
114		朝日根3	板状	14.6	5.20	9.78	7.46	17.29	42.38	19.14	23.24	46	22	7	13	12	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
115		朝日根5	板状	20.1	6.08	8.55	14.91	19.89	41.92	19.01	22.91	47	39	6	5	3	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
116		朝日根7	板状	19.7	3.99	9.64	31.12	16.44	39.17	18.62	20.55	41	29	17	10	3	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
117	愛媛	風穴M4	板状	12.5	1.86	9.46	7.46	18.43	35.68	17.38	18.30	36	15	6	11	32	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
118		風穴1	板状	13.0	4.45	9.48	8.08	16.79	38.49	20.40	18.09	63	15	7	9	6	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
119		風穴2	板状	7.5	5.90	7.99	5.51	17.68	37.08	21.73	15.35	49	14	9	14	14	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
120		風穴3	板状	14.0	5.97	7.50	6.88	15.46	42.72	24.19	18.53	39	13	9	16	23	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
121		風穴4	板状	7.5	3.20	6.02	3.16	10.48	39.04	19.74	19.30	57	15	9	11	8	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
122		風穴5	板状	5.7	3.41	8.24	7.42	10.97	42.23	19.30	22.93	52	15	7	14	12	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
123		風穴6	板状	8.5	6.93	6.21	3.92	8.52	40.13	19.20	20.93	41	18	12	15	14	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無
124		風穴7	板状	9.0	2.11	7.08	9.04	8.42	33.99	19.10	14.89	43	25	11	12	9	緑泥石, 角閃石, ｽｽﾀｲﾄ		無

深度 :m, 液性限界 :%, 塑性限界 :%, 塑性指数 :単位無し, 粘土 :シルト・細砂・粗砂・礫 :含有率%  
 $c'$  :残留粘着力 (kPa),  $c$  :残留せん断抵抗角 (°),  $c_s$  :すべり面粘着力 (kPa),  $c_s'$  :すべり面せん断抵抗角 (°)  
 $\sigma_{max}$  :被覆電子顕微鏡の凡例 : ... 顕著, ... 有, + ... わずか, 無 ... 被覆無し  
 各部位の凡例にある板状は、本稿では埋理面や低角度の断層面といった平面的に連続する地質学的な規制条件の近傍に形成したすべり面をさしている  
 X線粉末回折分析結果は、各試料の代表1事例について分析し、結果を同一試料の先頭行に表記

## 5. すべり面の構造とせん断抵抗角

日本各地の新第三系堆積岩地すべり，変成岩地すべり(破碎帯地すべり)，温泉地帯地すべり地から採取した全 124 試料のすべり面試料について，粒度特性，コンシステンシー特性を求め，これらとせん断試験結果との関係について考察を行った。また，走査型電子顕微鏡を用いて，採取したすべり面やリングせん断試験後せん断面の構造観察を行った。さらに，面に確認された起伏構造の程度を評価すべく，レーザー変位計を用いて面の起伏量を計測し，面粗度（算術平均粗さ）を求めた。

こうしたアプローチの成果として，新第三系堆積岩地すべりや温泉地帯地すべりに属する全てのすべり面試料中にスメクタイトを検出し，スメクタイトがすべり面やリングせん断試験後のせん断面を被覆する形態を確認した。また，スメクタイトを含むすべり面粘土のせん断抵抗角と塑性指数との関係には三つのグループ分けが出来ることを見だし，さらに相対的に粗い粒径成分が混入することで生じた面の粗さがせん断抵抗角を増大することを確認した。なお，本章は筆者他（2004<sup>74）</sup>）が日本地すべり学会に投稿し，受理された内容に加筆を行ったものである。

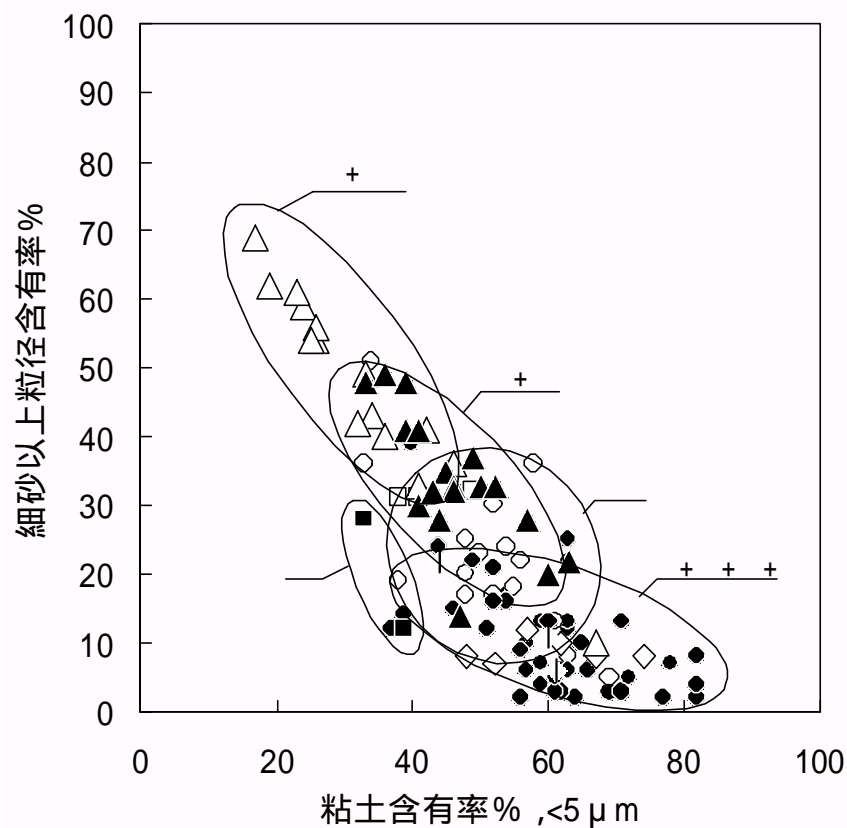
### 5. 1 すべり面粘土の土質特性

#### 5. 1. 1 粒度特性とせん断抵抗角との関係

図5. 1 にすべり面粘土の粘土含有率と細砂以上粒径含有率の関係を地質区分毎に示す。なお，以後の本文中に用いる各地質名称，および図5. 1 以降の地質区分毎に表記する凡例は，表5. 1 の通りである。

まず，しばしば明瞭な鏡肌様すべり面を伴う地質 ～ のすべり面粘土は，図5. 1 よりほとんどの事例で粘土含有率が 50 %を越えることが解る。逆に，地質 ， は，粘土含有率が 50 %を下回り，細砂以上粒径を 30 %以上含有する。また，粗粒径成分の混入が多く，事例で 10 %前後となる新第三系堆積岩地すべりの中では，地質 のすべり面粘土に細砂以上粒径を 20 ～ 30 %前後含有するものが見られる。





凡例は表5. 1 を参照

図5. 1 各地質区分に見られるすべり面粘土の粒度特性

表5. 1 本論文に使用する地質名の略記号一覧 (表4.1より一部を抜粋)

地質区分名	文中表記	図中表記
古第三紀以前の地質における地すべり	地質	
新第三系堆積岩地すべり (凝灰岩)	地質	
〃 (凝灰角礫岩)	地質	
〃 (凝灰質泥岩)	地質	
〃 (泥岩)	地質	
熱水変質安山岩地帯における地すべり	地質	
三波川泥質片岩地すべり	地質	
三波川塩基性片岩地すべり	地質	
長崎変成岩類地すべり	地質	
御荷鉾緑色岩類地すべり	地質	

地質 , , の群と, 地質 , の群は , それぞれ土質特性に差が無く, 同一記号で表記する。

地質 Ⅱ のすべり面粘土は地質 Ⅰ , Ⅲ に類似し, 50 %を越える粘土含有率と 10 %前後の粗粒径成分を含む。

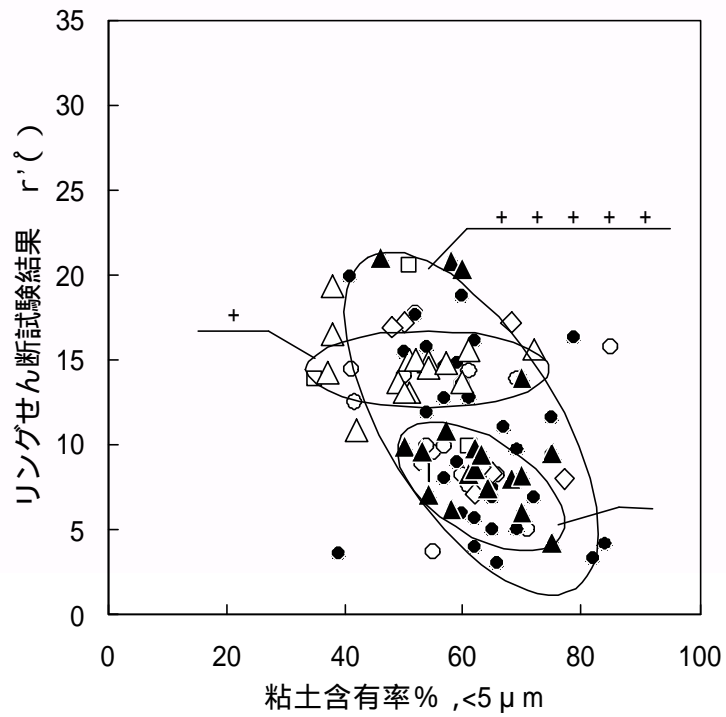
地質 Ⅱ と, 地質 Ⅲ とは, ほぼ同様の粒度組成となり, 粗粒径成分をすべり面粘土中に 20 % ~ 40 %含むが, 粘土含有率が 50%程度と高く, 新第三系堆積岩地すべりと三波川結晶片岩地すべりの中間的な性質をもつ。地質 Ⅰ , Ⅲ でのすべり面には, 新第三系堆積岩地すべり同様の鏡肌, および定向配列構造とともに, 起伏顕著な擦痕構造が認められる。

地質 Ⅰ , Ⅲ の多くは, 鏡肌のすべり面産状を呈することは希で, その多くがせん断帯として認識される。こうしたせん断帯の分離面は, 砂・れき等の粗粒径成分を取り込む起伏顕著な分離面を成す場合が多い。なお, 地質 Ⅱ のすべり面粘土については 粘土含有率が 60 %を越え, かつ細砂以上粒径含有率が 10 %程度と, 泥質片岩の粒度特性とは大きく異なる事例もある。

地質 Ⅳ は粘土含有率が 40 %前後と低めながら, 粗砂以上粒径成分も 30 %以下と変成岩の群の中では少ない。

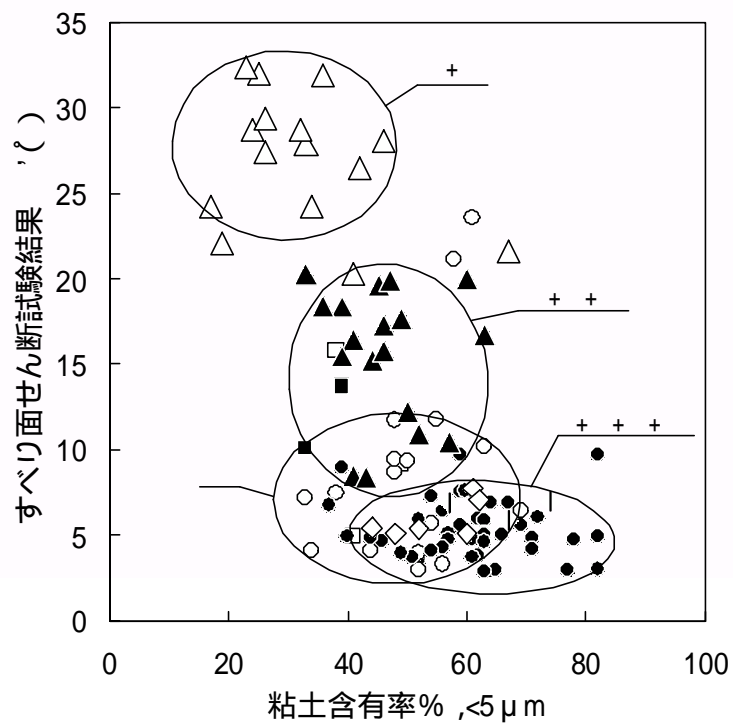
図5. 2 に, リングせん断試験で得た残留せん断抵抗角  $\phi_r$  と, リングせん断試験に用いたすべり面粘土調整試料の粘土含有率との関係を示す。各地質区分のプロットは相互に分布範囲が重なり合い, 地質間の差異を判定することが困難である。こうした分布を生じた原因としては, リングせん断試験に用いる試料から試料の調整段階で 425  $\mu\text{m}$ 以上の粒径がフルイ除去され, 粘土含有率が相対的に増大し, 地質毎の粒度組成の特徴が失われたこと, さらに第三紀層地すべり(地質 Ⅱ ~ Ⅳ), 熱水変質地帯の地すべり(地質 Ⅰ)のリングせん断試験結果が, 同一の地質区分において広い分布範囲を取っていることが考えられる。

図5. 2 の全プロットを一群と見た場合, 粘土含有率の増大に伴う  $\phi_r$  の低下傾向を認めるが, バラツキが大きく相関があるとは言えない。特に, 地質 Ⅰ, Ⅲ については, 粘土含有率の多寡に無関係に  $\phi_r$  は 15° 前後の値となる。地質 Ⅱ では, 粘土含有率は 50 % ~ 75 %の範囲に分布するが, 粘土含有率の増加とともに,  $\phi_r$  は 11° から 4° へ減少する傾向を示す。



凡例は表5. 1 を参照

図5. 2 粘土含有率とリングせん断試験結果の関係



凡例は表5. 1 を参照

図5. 3 粘土含有率とすべり面せん断試験結果の関係

図5. 3 は、粗粒径成分をフルイ除去する前のすべり面粘土の粘土含有率と、すべり面せん断試験結果との関係を示す。

リングせん断試験で  $\phi'$  が広い分布範囲を取ることを特徴とした地質 Ⅱ ~ Ⅳ の群の中で、地質 Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ については、すべり面のせん断抵抗角  $\phi'$  が粘土含有率の多寡に関わらず  $5^\circ$  前後に集中的に分布している。また、 $\phi'$  の評価では同一群に位置付けられた地質はプロットがバラついており、他の新第三紀の群とは異なる傾向を示した。

さらに  $\phi'$  が  $15^\circ$  前後に集中していた地質 Ⅰ では、 $\phi'$  の分布範囲が  $20^\circ \sim 32^\circ$  となり、すべり面はリングせん断試験後のせん断面よりも、明らかにせん断抵抗角が大きい。地質 Ⅰ においても、リングせん断試験で  $\phi'$  が  $10^\circ$  未満と計測された試料が、 $\phi'$  で  $10^\circ \sim 20^\circ$  の範囲に分布を示し、すべり面せん断試験結果がリングせん断試験結果よりもせん断抵抗角が大きい。

### 5. 1. 2 コンシステンシー特性とせん断抵抗角との関係

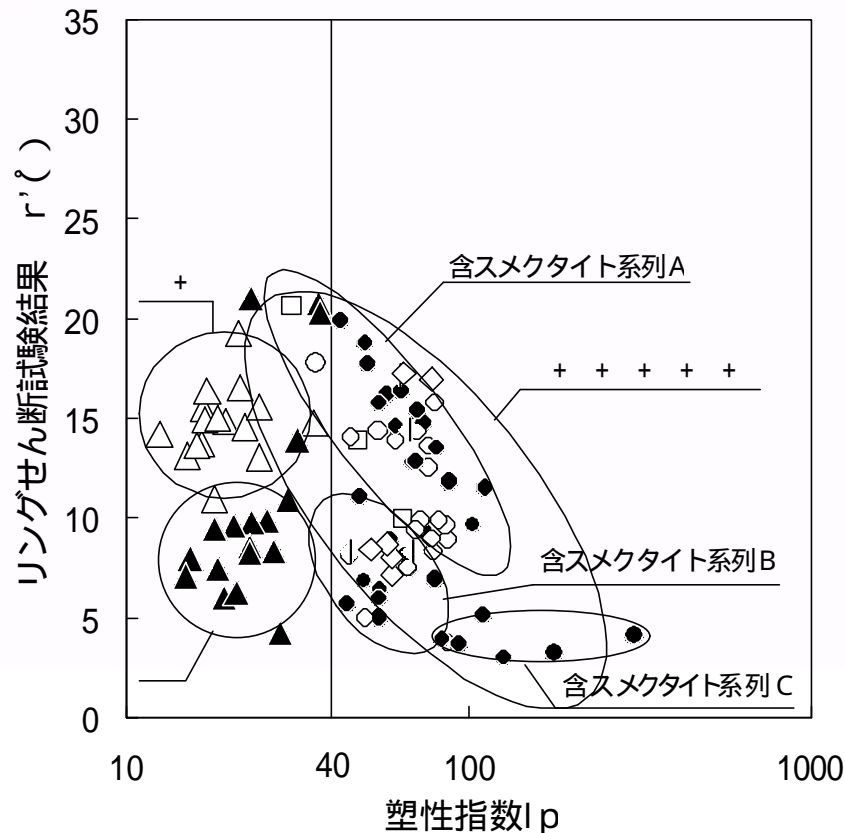
図5. 4 にすべり面粘土のスラリー試料から得た塑性指数とリングせん断試験による  $\phi'$  の関係を示す。X線粉末回折やせん断面の電子顕微鏡観察からは、地質 Ⅱ ~ Ⅳ のすべり面粘土に、スメクタイトが含まれると判定されている。これらの塑性指数は、概ね 40 以上の値となることが解る。これに対して地質 Ⅰ, Ⅲ のすべり面粘土が示す塑性指数は、40 以下となっている。スメクタイトを含有する群は、 $\phi'$  との関係において三つのグループ分けが可能であり、それぞれを区別して系列 A ~ C とした。含スメクタイト系列 A ~ C の各群について、図5. 4 中に認められる特徴を整理すると以下ようになる。

#### 1) 含スメクタイト系列 A :

塑性指数の幅は、30 ~ 100 と広く、塑性指数の増大に伴い  $\phi'$  は負の対数相関（相関係数  $r=0.700$ ）を満足して減少する。 $\phi'$  の減少の幅も大きく、 $10^\circ$  以上の低下幅となる。含スメクタイト試料の  $I_p$  対  $\phi'$  関係の全プロットにおける上境界付近に位置する。

#### 2) 含スメクタイト系列 B :

塑性指数の幅は系列 A に比べて若干小さく、40 ~ 80 となる。この群には塑性指数の変



凡例は表5. 1 を参照

図5. 4 塑性指数とリングせん断試験結果の関係

化に伴う  $r'$  の増減は認められず、 $5^{\circ} < r' < 10^{\circ}$  の範囲となる。

### 3) 含スメクタイト系列C：

塑性指数が概ね 100 以上の群であり、 $r' < 5^{\circ}$  となる。山崎他（2000<sup>39)</sup>）はモンモリロナイトの残留せん断抵抗角が  $4^{\circ}$  前後となると報告しており、本系列の特徴は、スメクタイトの残留強度特性が現れたものと推察される。

同じスメクタイト含有試料でありながら、以上の各系列が派生した原因を探るため、各試料の活性度（ $A=I_p/2 \mu m$  以下粒径含有率）と粒度未調整時点での細砂以上粒径含有率について図5. 5 に整理した。粒度未調整時点での細砂以上粒径含有率に着目した理由は、これがすべり面粘土の採取精度を示す指標になると考えたためである。なお、図5. 4 に示した各系列の特徴を明確にするため、図中のマークは地質区分ではなく系列毎とした。

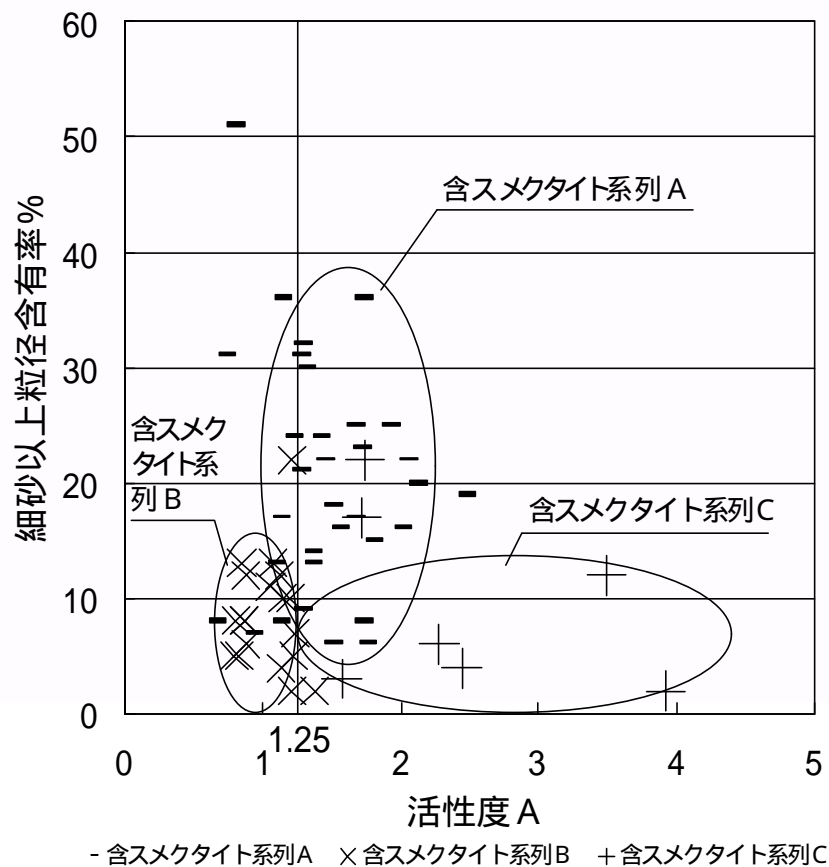
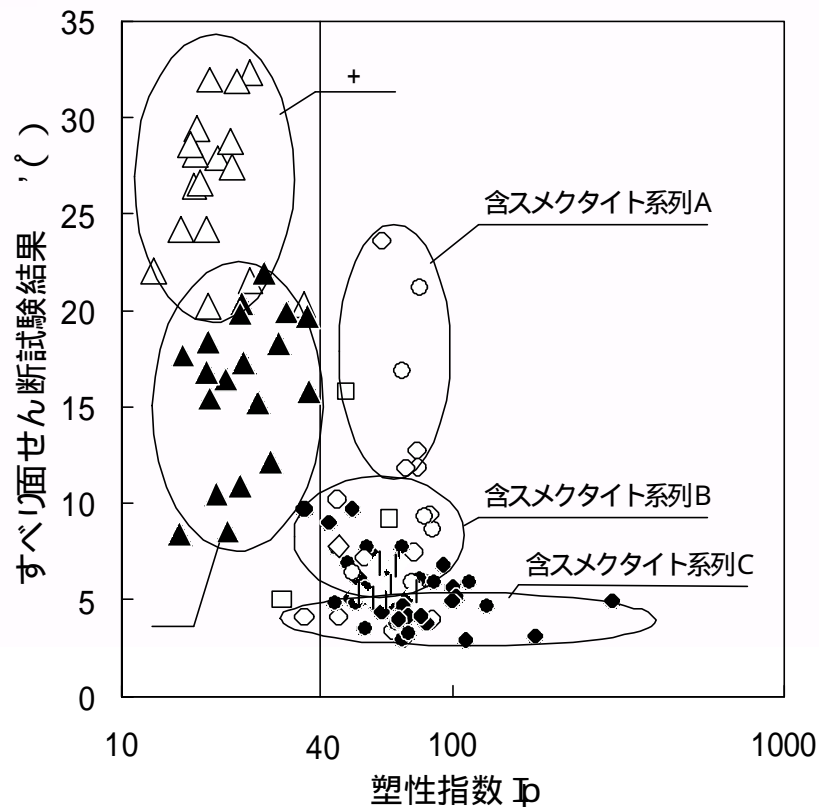


図5. 5 含スメクタイトすべり面粘土の活性度と粗粒径含有率

結果は、図5. 5 においても図5. 4 で行った系列毎に明瞭な差異が認められた。以下に各系列の特徴を示す。

- 1) 系列 A に属する試料：細砂以上粒径が概ね 15 % 以上混入するものの、活性度 A による分類区分が活性粘土 (1.25 ~ 2.0) に属する試料
- 2) 系列 B に属する試料：細砂以上粒径の混入は 15 % 以下であるが、活性度による分類区分が普通粘土 (0.75 ~ 1.25) に属する試料
- 3) 系列 C に属する試料：細砂以上粒径の混入が 15 % 以下であり、かつ活性度による分類区分が活性粘土 (1.25 ~ 2.0) となる試料



凡例は表5. 1 を参照

図5. 6 すべり面粘土の塑性指数とすべり面せん断試験結果

膨潤性粘土鉱物を含むすべり面粘土を取り扱う場合、活性度による評価は、塑性指数の増大を生じる膨潤性粘土鉱物がどの程度  $2\ \mu\text{m}$  以下の粒径成分に含まれるかを示す。粗粒径成分の混入が少ないにも関わらず普通粘土に区分された系列 B は、膨潤性粘土鉱物（例えばスメクタイト）が粘土中に少ない試料と考えられる。こうした試料では、例え粘土含有率が高くとも、膨潤性粘土鉱物が占める割合が少なく、残留強度特性が膨潤性粘土鉱物が示す強度特性にさほど影響を受けないと推察される。

また、系列 A は、試料中に粗粒径成分を多く含むが、粘土分に占めるスメクタイト含有率は高く、活性粘土の評価を得た（A 1.25）試料群と見ることができる。本系列は含スメクタイト試料において最も  $\phi$  が大きく評価された群であり、本来、系列 C に属する試料に粗粒径成分が多量に混入し、これが原因で  $\phi$  が大きくなったと考察される。

図5. 6 は、同じすべり面粘土の塑性指数を、すべり面せん断試験で得た  $\phi$  との関係で

整理を行っている。塑性指数は粒度調整により 425  $\mu\text{m}$ 以上の粒径成分を除去した試料から求められ、対象土に含まれる膨潤性粘土鉱物の量に比例する。この塑性指数とすべり面の  $\phi'$ との関係を論じることで、すべり面の  $\phi'$ がすべり面粘土中に含まれる膨潤性粘土鉱物の多寡とどのような関係にあるかが考察される。

粒度特性との考察において述べた通り、地質  $\text{CL}$ 、 $\text{CH}$  では、 $I_p$  の大小に関わらずせん断抵抗角  $\phi'$ の分布範囲がリングせん断試験の  $\phi'$ の範囲に比べて強度が大きい。

含スメクタイト系列では、図5. 4 で分類した三系列に次の様な変化が生じている。

#### 1)含スメクタイト系列 A

$\phi'$ との関係においては、主要な一群を成す系列であるが、すべり面のせん断抵抗角  $\phi'$ では系列に属する事例が少ない。地質  $\text{CL}$ 、 $\text{CH}$  に数例存在するのみである。

#### 2)含スメクタイト系列 B

系列 B に属する事例は多いが、分布の中心が  $6^\circ$  近くに移行しており、リングせん断試験の  $\phi'$ に比べて強度が小さくかつ集中的に分布する傾向が強い。

#### 3)含スメクタイト系列 C

$\phi'$ が  $5^\circ$  以下となる点を本系列の特徴と見れば、系列 C に属する試料の取り得る  $I_p$  の幅が  $30 \sim 300$  と大きな範囲に変化している。これに伴い系列 C に属する試料数も増え、試料の構成も地質  $\text{CL}$ 、 $\text{CH}$  と多様化する。

以上に示した含スメクタイト系列試料の特徴をまとめると、すべり面粘土として採取した試料が、粒度構成やコンシステンシー特性に試料間のバラツキを有するものであったとしても、実際のすべり面は、ほとんどの事例で  $\phi'$ が  $5^\circ$  前後に集中し、つまりスメクタイトの残留強度に強く影響を受けることが解った。

## 5. 2 走査型電子顕微鏡による構造観察

前節で含スメクタイトすべり面が、スメクタイトの残留強度特性に強く影響を受けていたことから、ここでは実際の含スメクタイトすべり面を走査型電子顕微鏡により観察した結果を述べる。



## 5. 2. 1 すべり面の観察

(1)新第三系堆積岩地帯地すべりのすべり面

(i)すべり面を被覆するスメクタイト

図5. 7 , 図5. 8 に , 新第三紀の凝灰岩 , 砂岩互層中にすべり面が確認された山の内地すべり[斜面長 1.1km , 幅 1.7km , 地質 ] (山形県) 15 号集水井内試料で観察を行った事例を示す。

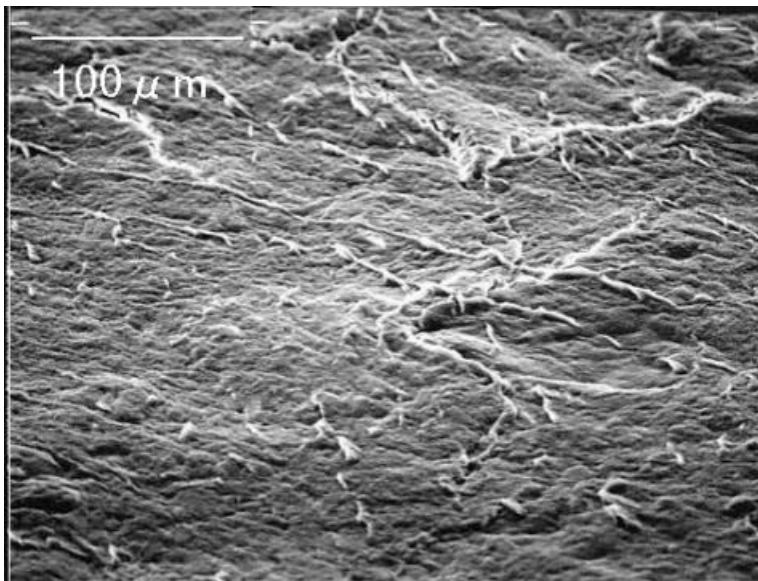


図5. 7 山の内 15号集水井で確認されたすべり面[状況1]

図5. 7 の低倍率には , 擦痕等の起伏構造すら不明瞭な程に平滑なすべり面が示されている。また , 地質 のすべり面粘土としては粗粒径成分に富む試料でありながら , すべり面には粗粒径粒子の輪郭が確認出来ない。[粘土含有率 52% , 細砂以上粒径含有率 21% ,  $w_L = 74.28\%$  ,  $I_p = 54.71$  粘土区分は  $5\mu m$ 以下粒径]。

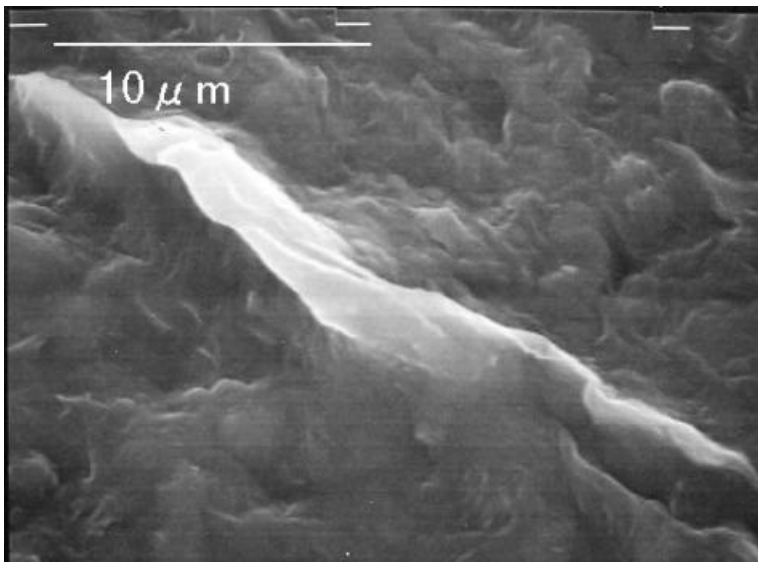


図5. 8 山の内 15号集水井で確認されたすべり面[状況2]

また平滑面には , せん断試験終了後 , すべり面を観察するためにすべり面の上盤と下盤を分離する際に生じたと考えられる襞状の構造が , 所々に白く列を成して観察される。この襞状の構造が造る方向性とせん断方向との関係は明確でなく , 分離作業の方向性に強く影響を受けたと考えられる。同じ部位についてさらに

倍率を上げた図5. 8 を見ると，厚さ  $1\mu\text{m}$  に満たない襞が，不定形の粘土鉱物によって形成されている状況が観察される。また，襞状構造の部位は，平坦部から不連続を生じることなく延びており，襞を構成する不定形粘土鉱物が平坦部表面を覆っているものと考えられる。

図5. 9 ，図5. 10 は，膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトとして代表的な，モンモリロナイト（Na 型）の純粋試料を用いたリングせん断試験の試験後せん断面状況である。

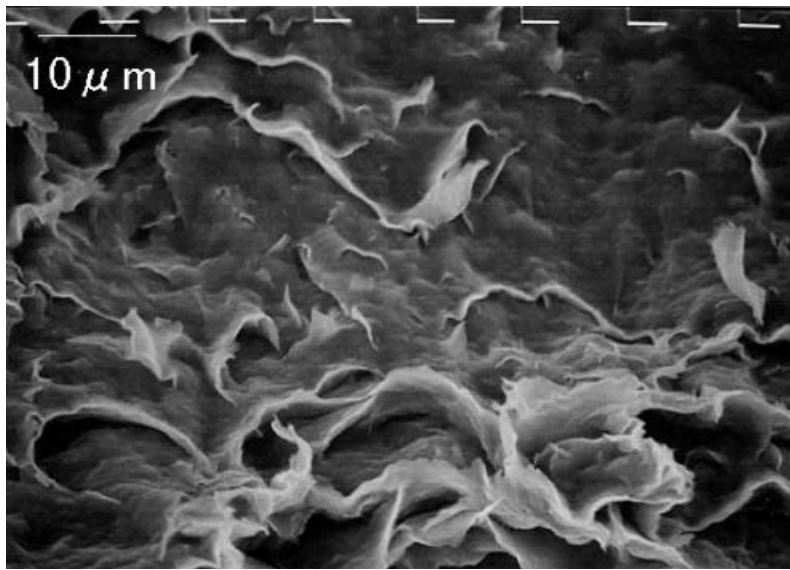


図5. 9 純粋モンモリロナイトのリングせん断試験後せん断面[形態A]

図5. 9 には，山の内すべり面に観察されたものと同様の白い襞状の構造が幾重にも重なって認められ，観察視野の全てにモンモリロナイトの不定形状が現れている。こうしたモンモリロナイト純粋試料に見られる不定形の構造，および襞状の構造は，山の内すべり面に限らず，全ての含スメクタイトすべり面に共通する特徴であり，X線粉末回折からも存在が確認されたスメクタイトが，山の内すべり面の表層を形成していると考えられる。

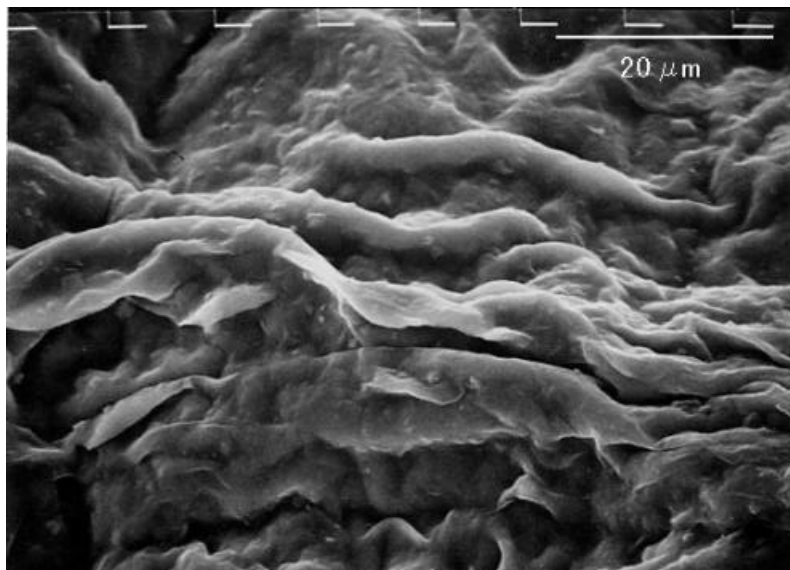


図5. 10 純粋モンモリロナイトのリングせん断試験後せん断面[形態B]

なお，モンモリロナイト純粋試料のリングせん断試験後せん断面には，極薄い襞状構造とは別に，図5. 10 に示すようなウネリを生じる構造を呈する場合も多く，

不定形の粘土鉱物によって造られる襞状の構造や，ウネリの構造が観察されることが，モンモリロナイトを含有する試料の残留状態のせん断面における特徴と認識される。

#### (ii) スメクタイトの凝集

また，やはりスメクタイトの含有が顕著な山形県の新第三系凝灰岩地帯における大滝すべり面試料のすべり面（下盤）を走査型電子顕微鏡を用いて観察した状況を以下に示す。

当地区すべり面表面には，図5. 11 に示すとおり，肉眼観察で黒色部，白色部，青灰色部，黄褐色部の色調が異なるすべり面部位を確認した。そこで，これら色調が異なる部位のすべり面構造が，色のみならず，構造にも差異を生じるものである可能性について以下の通りに検証を行った。

まず，色調の異なるすべり面部位をそのまま切り出し，それぞれの微細構造について観察を行ったものが図5. 12 ～図5. 19 である。それぞれの色の低倍率（50 倍）写真を見ると，面の平滑さが最も際だっているのがすべり面黒色部（図5. 12 ）であり，面には粗粒径成分の露出による突出部がほとんど見あたらない。また，全体が平滑であることとコントラストを成して，擦痕の構造は，最も明瞭に観察されるものであった。その他の色調部の低倍率写真（図5. 14 ，図5. 16 ，図5. 18 ）は，平滑ながらも所々に粗粒径成分の部分露出に起因した突出部を生じるものであった。

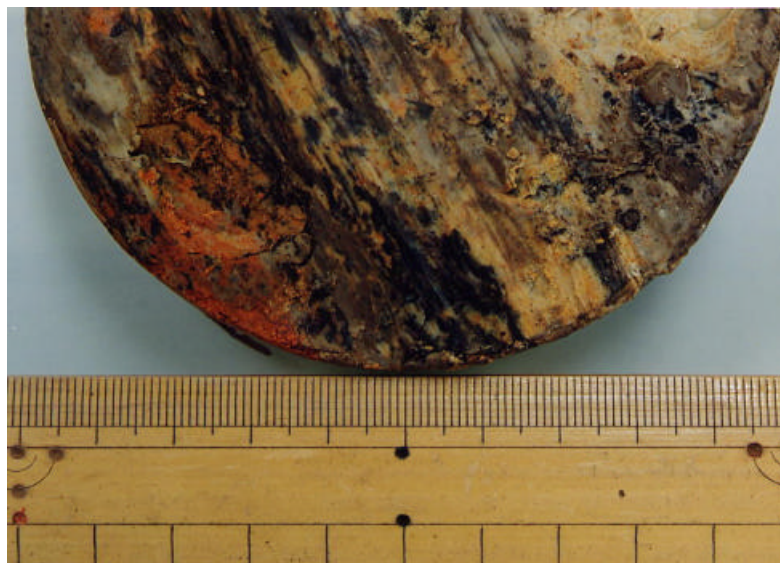


図5. 11 大滝すべり面に見られた色調が異なる部位

さらに、これらを高倍率で観察すると、いずれのすべり面部位にも軟質襞状に見えるスメクタイトが、すべり面表面を被覆する構造が確認された。尚、スメクタイトが示す襞状の構造は、襞の大きさや観察視野における量が、スメクタイトの被覆量（被覆厚）と関係があるものと推察され、この意味では白色部（図5. 15 ）、青灰色部（図5. 17 ）において最もスメクタイトの被覆が厚いものと理解される。逆に、黄褐色部（図5. 19 ）は、スメクタイトを透けて定形鉱物の輪郭が確認される程に、スメクタイト被覆が相対的に薄い印象を与えるものであった。

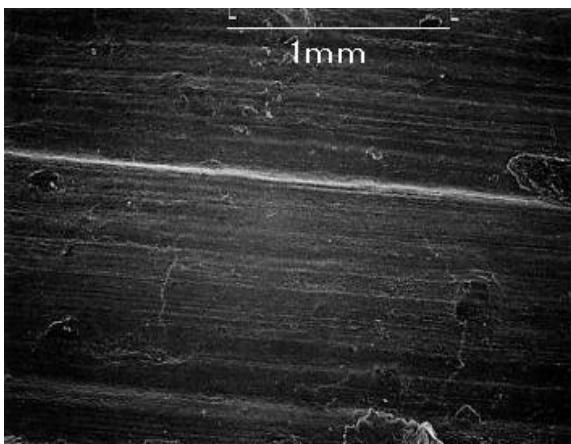


図5. 12 大滝すべり面において黒色に見える部位の観察状況[下盤 , 観察倍率×50倍]

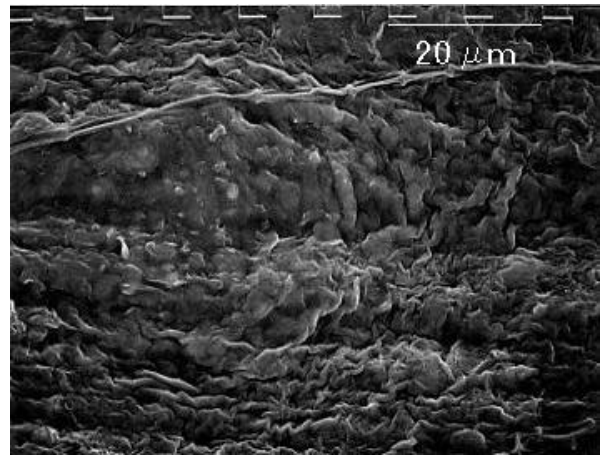


図5. 13 左に同じ[観察倍率×1,500倍]

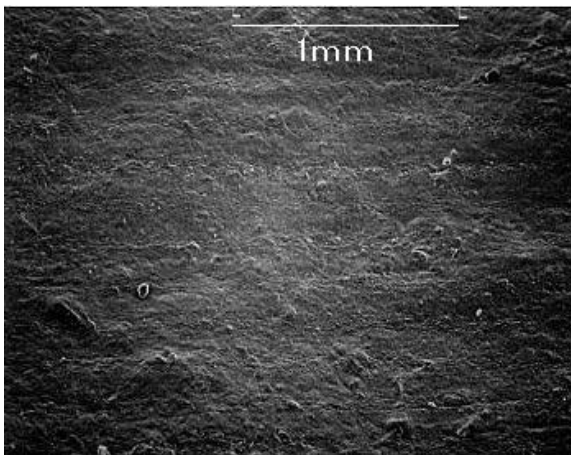


図5. 14 大滝すべり面において白色に見える部位の観察状況[下盤 , 観察倍率×50倍]

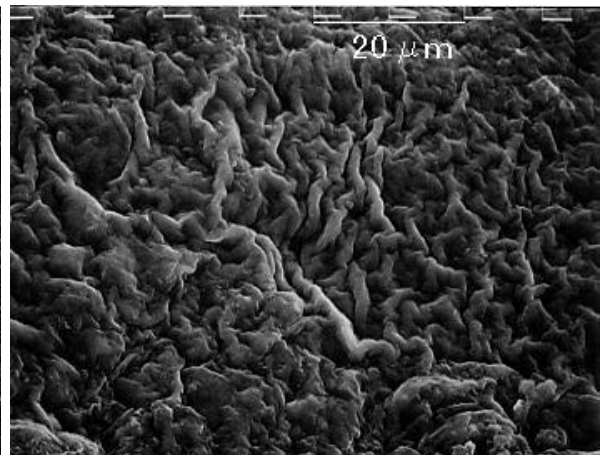


図5. 15 左に同じ[観察倍率×1,500倍]

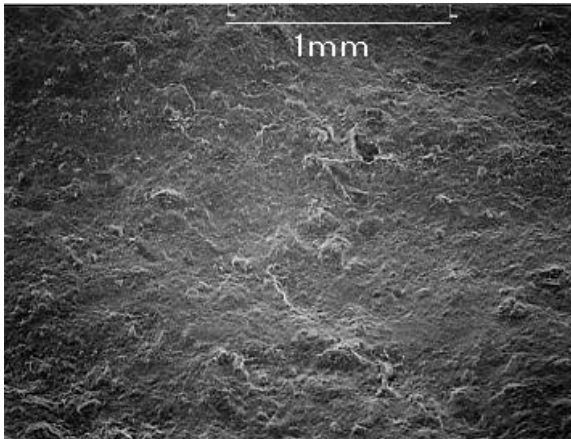


図5. 16 大滝すべり面において青灰色に見える部位の観察状況[下盤, 観察倍率×50倍]

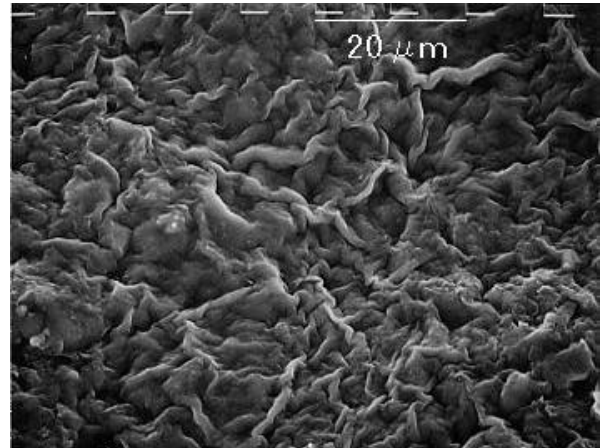


図5. 17 左に同じ[観察倍率×1,500倍]

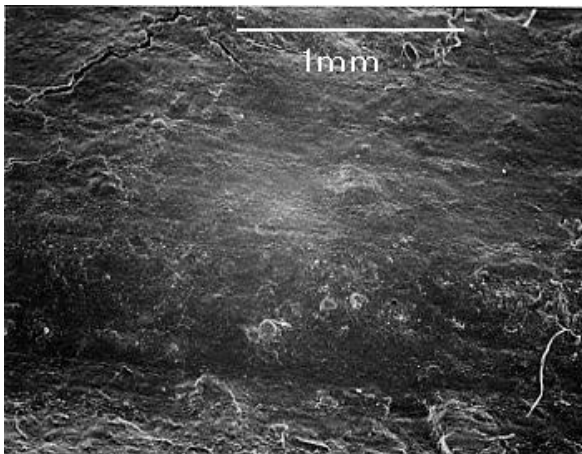


図5. 18 大滝すべり面において黄褐色に見える部位の観察状況[下盤, 観察倍率×50倍]

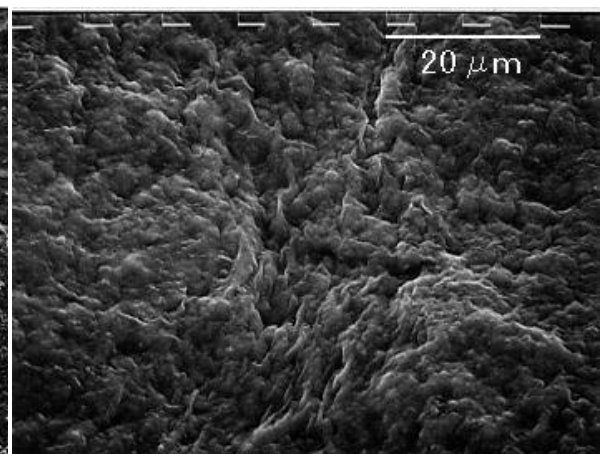


図5. 19 左に同じ[観察倍率×1,500倍]

次にナイフを用いて、色調が異なる各すべり面部位の表面を剥ぎ取り、色調は以前のままで、面表面を覆っていたスメクタイトの薄層を除去した状態で、再度同様の観察を行った結果が図5. 20 ~ 図5. 27 である。

まず、各色調のすべり面削剥前の高倍率写真（1,500 倍率）では、色調に関係に定向配列構造が完成し、スメクタイトによる被覆が観察されたが、ナイフで表面を剥ぎ取った後の各面には、種々のサイズの粒子や、団塊状粒子が無秩序に面を成す、非常に粗い構造が観察された（図5. 20 , 図5. 22 , 図5. 24 , 図5. 26 ）。

さらに倍率を上げて観察すると、黒色（図5. 21 ）、白色（図5. 23 ）、青灰色（図5. 25 ）試料の表面には、花卉が折り重なるようにして、粘着質な不定形粘土鉱物が確認される。



この不定形粘土鉱物は、図5. 9 に示した通り、やはりスメクタイトが電顕観察下で示す典型的な形態の一つであり、黒色、白色、青灰色試料に見る花弁が累重する構造は、スメクタイトが定向配列する前の状態を反映したものと考えられる。これに対し、黄褐色試料の高倍率写真（図5. 27 ）では、局所的に花弁状の不定形粘土鉱物が観察されるものの、相対的に大粒径な定形鉱物が造る起伏構造の印象が強い。

すなわち、すべり面表面を被覆するスメクタイトを削剥しても、削剥面にスメクタイトが豊富に観察された黒色、白色、青灰色粘土試料は、元来、スメクタイト含有率が高い試料と推察されるが、黄褐色試料に関してはスメクタイト含有率は比較的少なく、周囲から滲出・凝集したスメクタイトによって、すべり面の表面が被覆されたものと推察された。

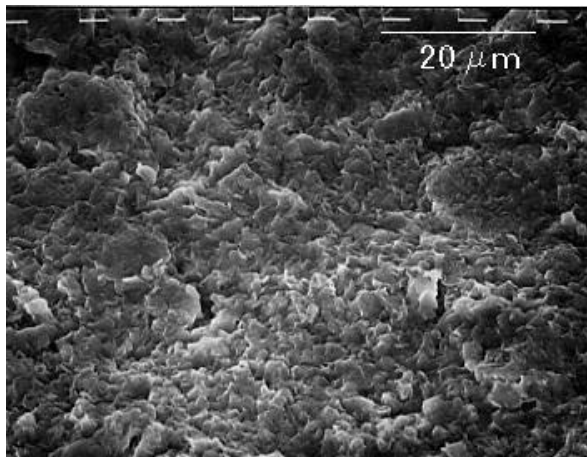


図5. 20 大滝すべり面黒色部の表面削剥後の観察状況[下盤, 観察倍率×1,500倍]

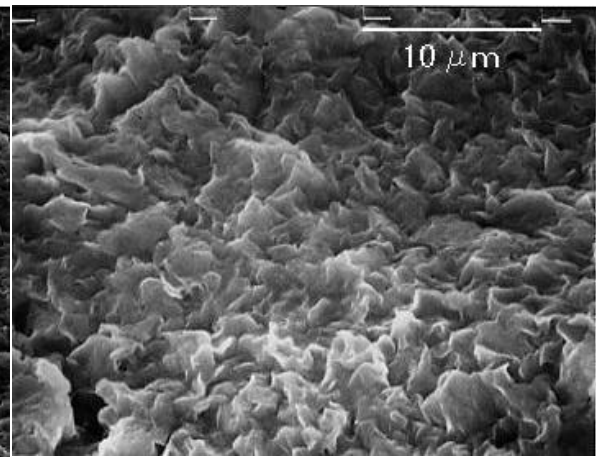


図5. 21 左に同じ[観察倍率×3,500倍]

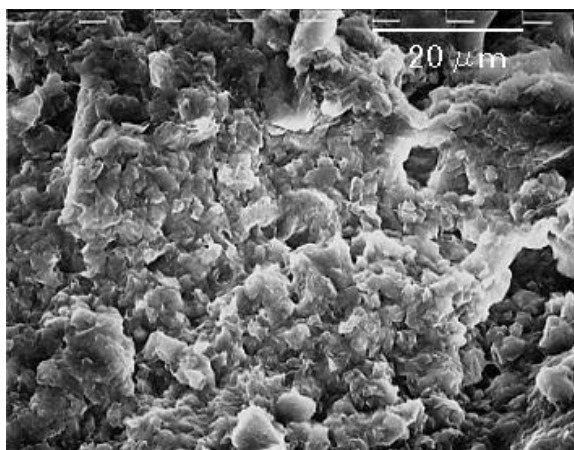


図5. 22 大滝すべり面白色部の表面削剥後の観察状況[下盤, 観察倍率×1,500倍]

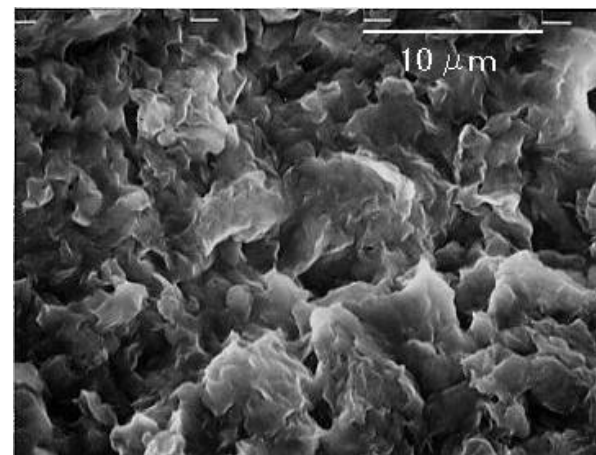


図5. 23 左に同じ[観察倍率×3,500倍]

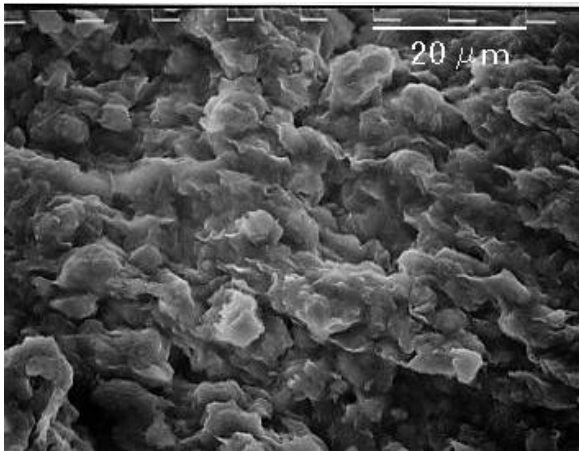


図5. 24 大滝すべり面青灰色部の表面削剥後の観察状況[下盤 ,観察倍率×1,500倍]

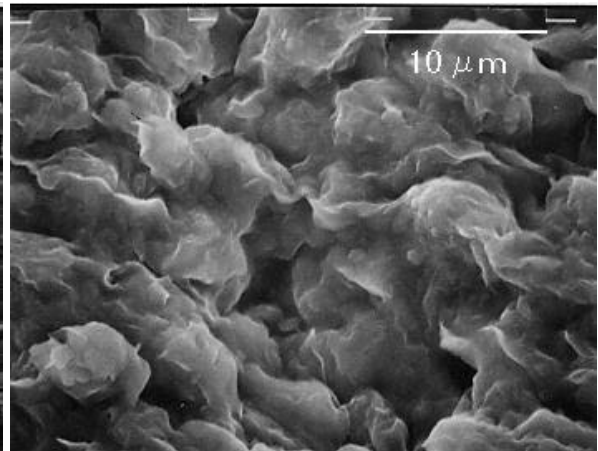


図5. 25 左に同じ[観察倍率×3,500倍]

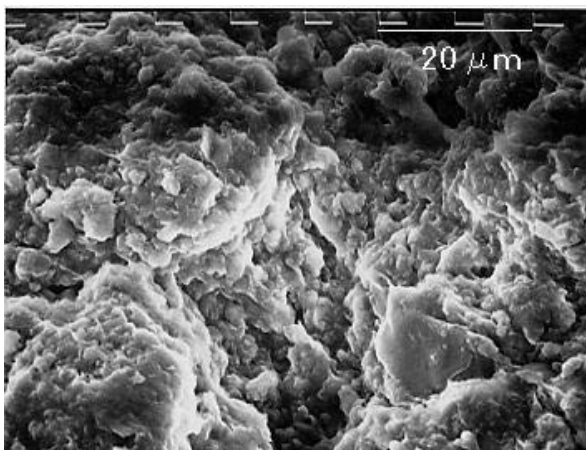


図5. 26 大滝すべり面黄褐色部の表面削剥後の観察状況[下盤 ,観察倍率×1,500倍]

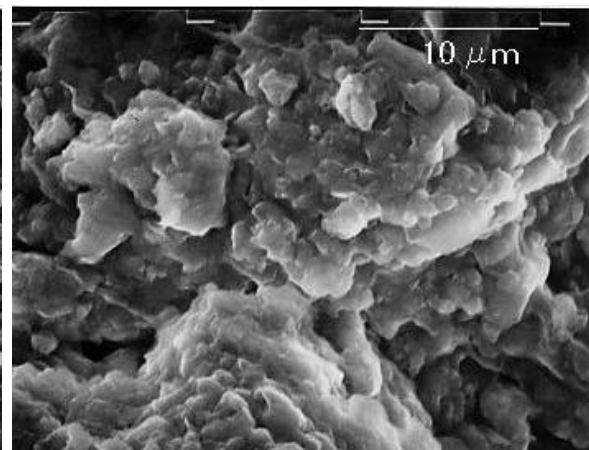


図5. 27 左に同じ[観察倍率×3,500倍]

## ② 変成岩地帯地すべりのすべり面

### (i) 三波川泥質片岩地帯の地すべり

変成岩地帯地すべりの中で、三波川泥質片岩地帯地すべりでのすべり面は、せん断帯の層厚が数mに及ぶものもあり、主変位すべり面を決定することが困難な場合が多い。以下に示す事例は、比較的明瞭な主変位すべり面の形成を確認した高知県長又地すべりのすべり面であり、図5. 28 ,図5. 29 に示すとおり、風化泥質片岩が構成する堅固な基岩面直上に、粘土鉱物による明瞭な定向配列構造が観察される。すべり面には、未風化の泥質片

岩垂角礫，円礫が多量に介在し，中には礫表面に擦痕があるものも含まれる（図5. 28 上方中央に見える直径5 cm 程度の礫表面にもあり）。こうした顕著な混入礫の影響を受けて，すべり面には比較的長周期で起伏顕著な擦痕構造が観察される。

電子顕微鏡観察からも，図5. 30 に示す通り扁平な細粒成分（シルト粒径が卓越）が明瞭な定向配列構造を成し，面全体がウネリを生じる様子が観察される。X線粉末回折分析の結果，主たる含有鉱物はイライト，石英，カオリン鉱物，（緑泥石）となり，図5. 31 に観察される定向配列面を生じた扁平な鉱物は，イライト（セリサイト）であると推察される。観察視野に見る限り，定向配列面を生じるイライト（セリサイト）の粒径は，5 ～ 20  $\mu\text{m}$  のものが卓越しており，粗粒径成分の介在が顕著な地すべり粘土全体の粒度構成の中で，すべり面に特異な細粒分の卓越する薄層を生じていることが解る。



図5. 28 長又 3すべり面状況

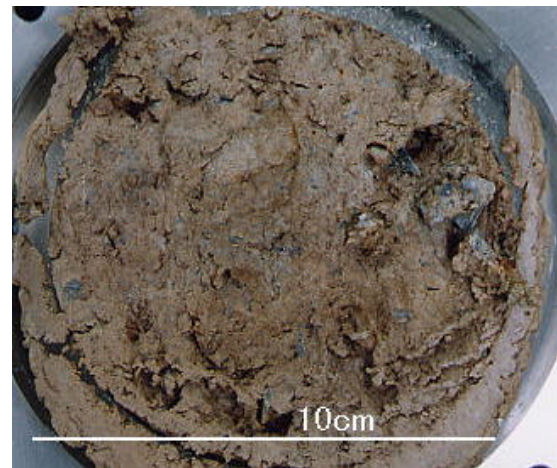


図5. 29 長又 3すべり面せん断試験後状況

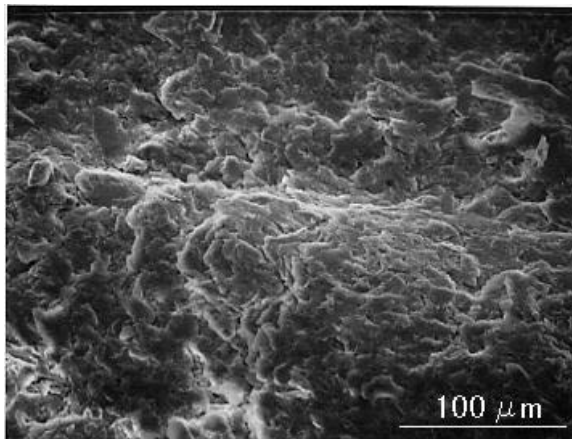


図5. 30 長又 3すべり面状況[下盤, ×約350倍]

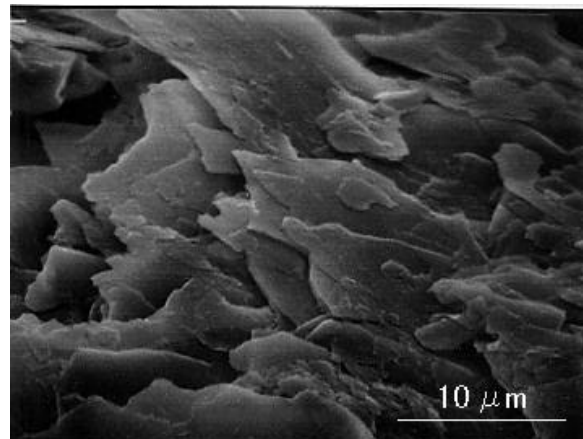


図5. 31 左に同じ[下盤, ×約3,500倍]



(ii) 三波川塩基性片岩地帯の地すべり

図5. 33 ,図5. 34 は , 愛媛県喜多郡石畳地区地すべり BV14-3H 孔内に確認したすべり面を走査型電子顕微鏡により観察した状況である。



図5. 32 BV14-3Hすべり面に見る光沢の様子

り面を走査型電子顕微鏡により観察した状況である。

約 3,500 倍率での観察では, 緑泥石と判定される扁平な多角形形状の鉱物が, 配向性をもって累重する様子が観察される。この倍率で観察視野にある緑泥石の粒径は, ほぼシルト粒径であるが, 緑泥石の表面にはコロイド粒径, または不定形の鉱物も確認される。当地区すべり面粘土のX線粉末回折分析の結果には, 緑泥石とともに緑泥石 / スメクタイトの混合層鉱物が確認されている。

当地区すべり面は肉眼観察でも良好な光沢面を確認したが (図5. 32 ), 低倍率の電子顕微鏡観察においても平滑な定向配列構造が顕著であった (図5. 33 )。泥質片岩地すべりのすべり面と同様に, すべり面には未風化残留礫が多量に介在し, 擦痕構造は顕著である。混入礫が原因となって生じる擦痕構造の方向性は, 礫同士が互いに干渉を受けて容易に回転し, 必ずしも地すべり滑動方向と調和的ではない (図5. 32 の右方)。

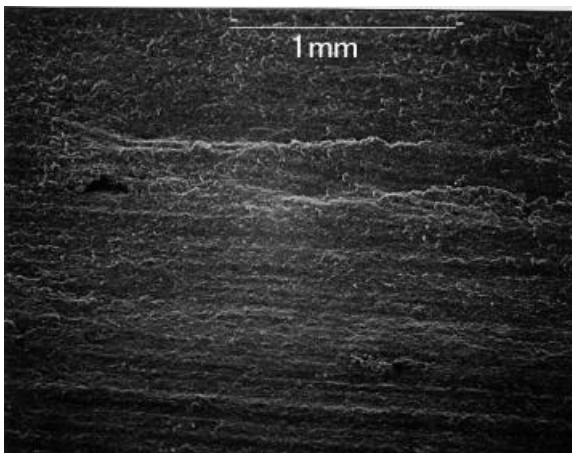


図5. 33 石畳BV14-3Hすべり面状況[下盤, ×約50倍]

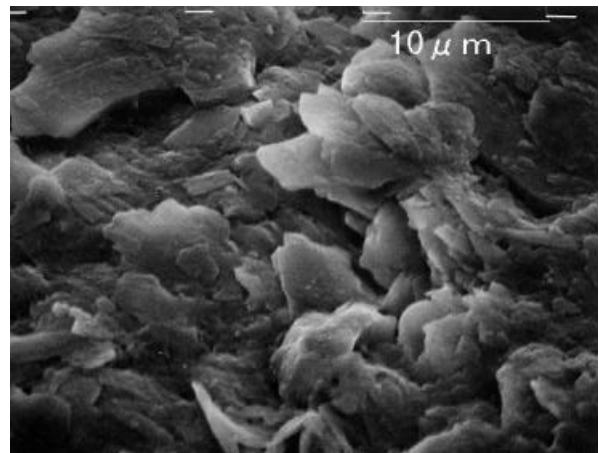


図5. 34 左に同じ[下盤, ×約3,500倍]

## ( iii ) 御荷鉾緑色岩類帯の地すべり

まず、図5. 35、図5. 36 は、愛媛県上浮穴郡風穴地区 8号井内すべり面を走査型電子顕微鏡で観察した状況である。図5. 35 には低倍率（50 倍）観察写真を示すが、視野に見る限り、極めてすべり面は平滑であって、面の直上・直下に介在する粗粒径成分が露出して生じる凹凸等の微起伏構造はほとんど観察されない。図5. 36 に示す観察倍率3,500 倍の写真でも、面の平滑さは同じく指摘されるところであるが、さらに粒径 10  $\mu$  m程度の扁平な緑泥石の周囲に、これを取り巻くようにして輪郭が不明瞭な不定形鉱物が観察される。X線粉末回折分析から、風穴地すべり粘土は膨潤性緑泥石、及び微量のスメクタイトを含有すると判定されており、高倍率観察において見える不定形鉱物はこれらの膨潤特性に富む鉱物が観察されていると推察される。

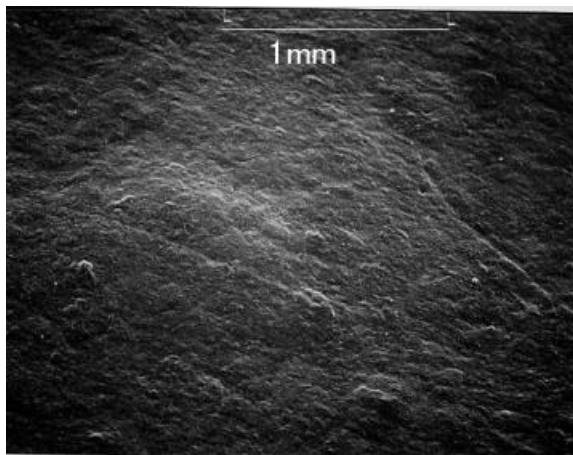


図5. 35 風穴 8すべり面の観察状況  
[下盤、観察倍率×50倍]

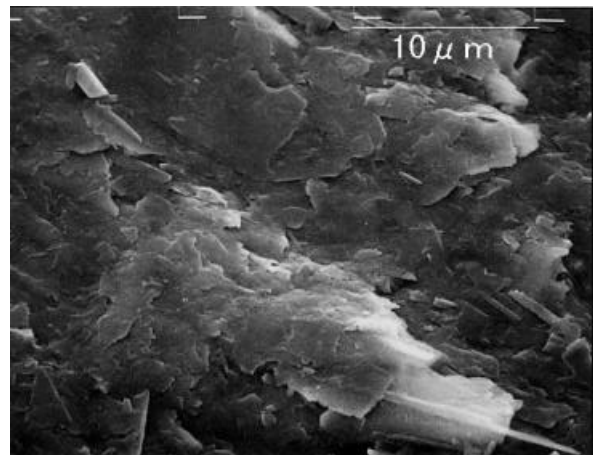


図5. 36 左に同じ[観察倍率×1,500倍]

## ( iv ) 長崎変成岩の地すべり

当地区すべり面は、含有する雲母鉱物が良好な定向配列構造を成し、肉眼観察からも各所に雲母の小片が鏡面の如き光沢を放つものであった。また、擦痕構造は極めて繊細なものであり、粗粒径成分が介在する様子はほとんど認められなかった。すべり面の平滑さは、変成岩地帯地すべりの中でも特異である。尚、この平滑面を形成する粘土層の層厚は 1mm に満たない程に薄い。

電子顕微鏡による鉱物の形態観察（図5. 39 参照）、及びX線粉末回折分析からは、こ

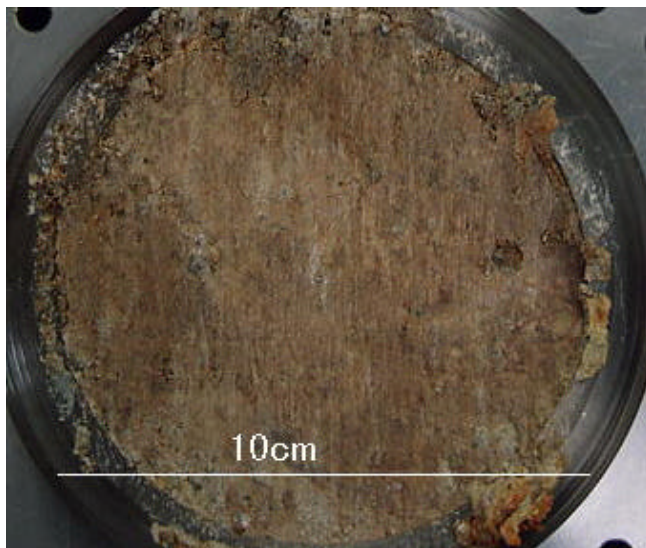


図5. 37 山口林道すべり面に見る定向配列の様子

の雲母鉱物がイライトであることが確認されており，電子顕微鏡の観察下においてもシルト粒径のイライトが魚鱗の如き累重する構造をとりながら，平滑な面を形成（図5. 38 参照）する様子が認められる。本地すべり粘土中には，イライトの他に斜長石，石英，微量の緑泥石が検出され，すべり面粘土に含まれる鉱物の構成は三波川泥質片岩地すべりのものに類似する。

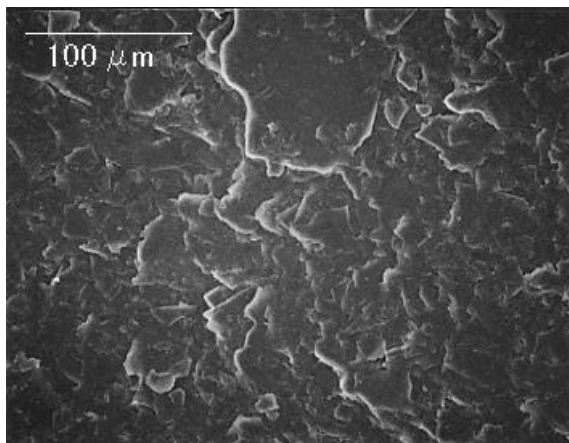


図5. 38 山口林道すべり面状況[下盤, × 約350倍]

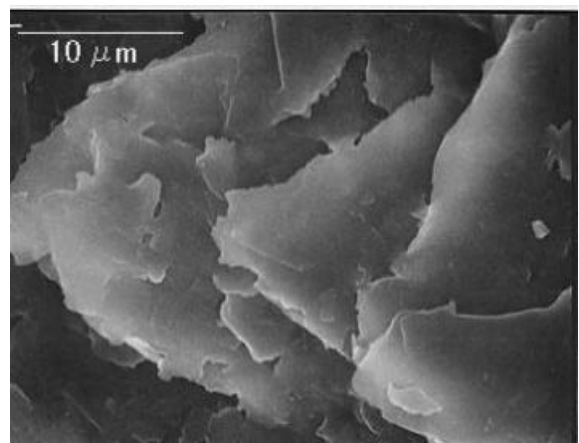


図5. 39 左に同じ[下盤, × 約3,500倍]

#### (v) 秩父帯の地すべり

図5. 40 , 図5. 41 は，下小越 7号井内から不攪乱採取したすべり面に対して，累積変位 28mm × 3 往復 = 84mm のすべり面せん断試験を行った後のすべり面を，走査型電子顕微鏡により観察したものである。50 倍率での観察状況を示す図5. 40 には，比較的に長周期な起伏を持った定向配列面の状況が観察される。また，3,500 倍率での観察状況には（図5. 41 ），花卉のような扁平形状を有する 5 μm 程度の粒径成分が，魚鱗のごとくに定向配列面を成す状況が観察される。X 線粉末回折分析の結果には，緑泥石，角閃石の含有が示されており，花卉の如き扁平形状の鉱物は，図5. 43 に示す緑泥石（クライト）の微細粒径と形状が似ている。



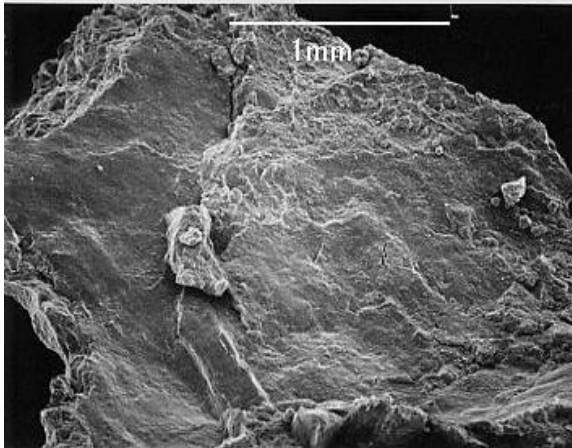


図5. 40 下小越 7すべり面せん断後状況  
[上盤, ×50倍]

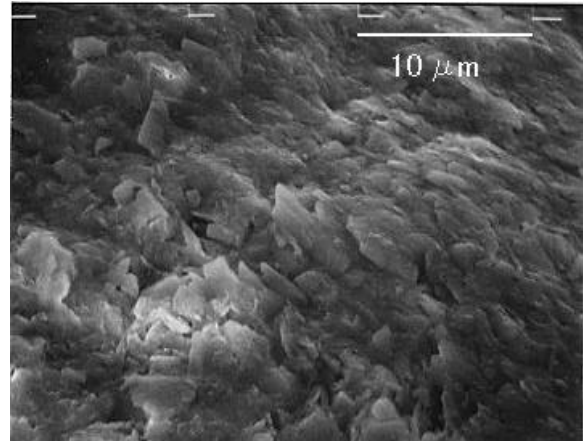


図5. 41 同左[上盤, ×3,500倍]

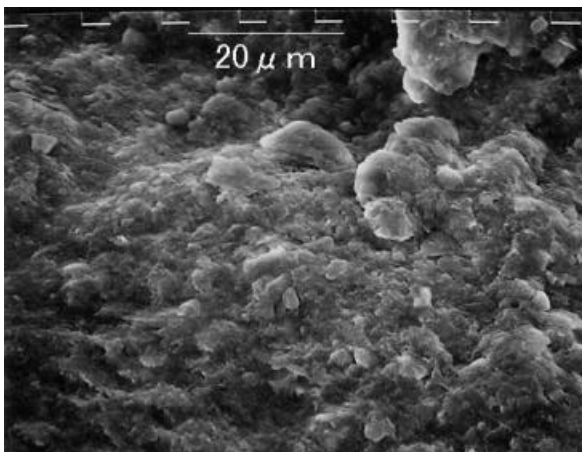


図5. 42 ライト純粋鉱物試料のリングせん断  
試験後せん断面状況 [下盤, ×1,500倍]

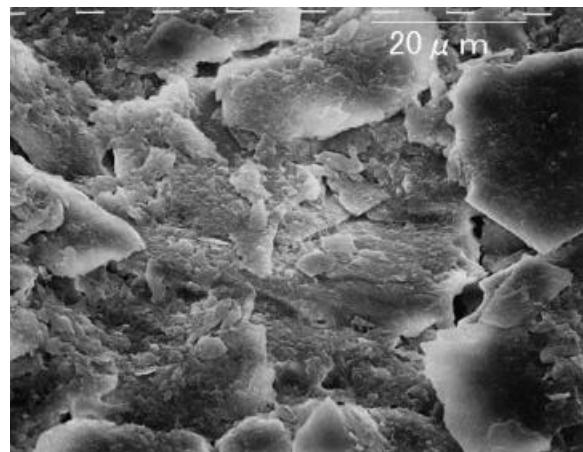


図5. 43 クライト純粋鉱物試料のリングせん断  
試験後せん断面状況 [下盤, ×1,500倍]

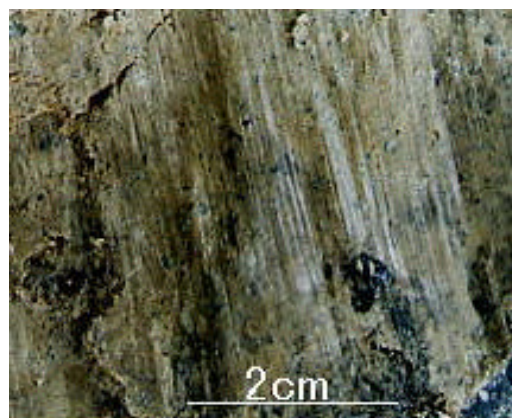


図5. 44 下小越 7号井内すべり面の鏡肌

## 5. 2. 2 リングせん断試験後せん断面

図5. 45 ,図5. 47 は、攪乱採取したすべり面粘土に粒度調整を実施し、これのリングせん断試験を行って形成した残留状態における定向配列面を観察した状況である。

対象試料は、新第三紀の凝灰質泥岩を基岩とする峰地すべりAブロック[斜面長 200m, 幅 270m, 地質 ] (佐賀県) の 4号集水井より採取したものである。

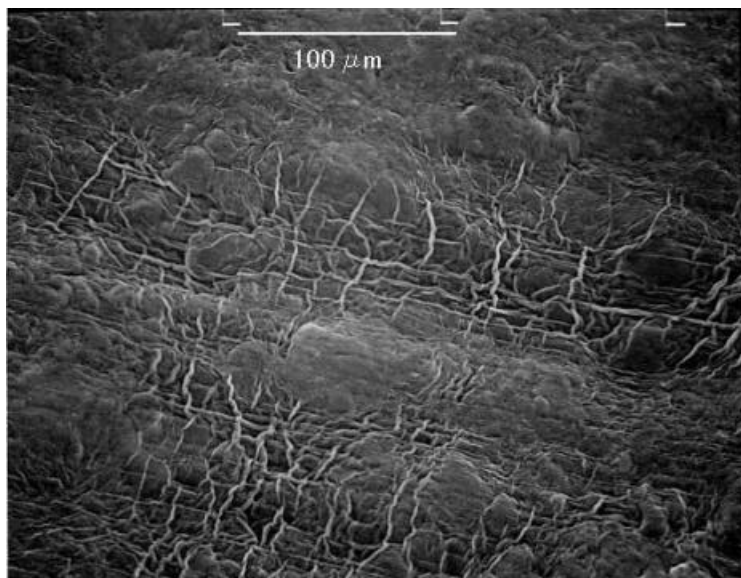


図5. 45 峰 4試料のリングせん断試験後せん断面[200kPa]

峰地すべりのすべり面にも、電子顕微鏡観察、およびX線粉末回折からスメクタイトが含まれることが確認されており、図5. 45 , 図5. 47 に示すリングせん断試験の試験後せん断面にも図5. 10 で示したスメクタイトの特徴的なウネリの構造が観察される。先述の襞状の構造と違い、このウネリ構造は、

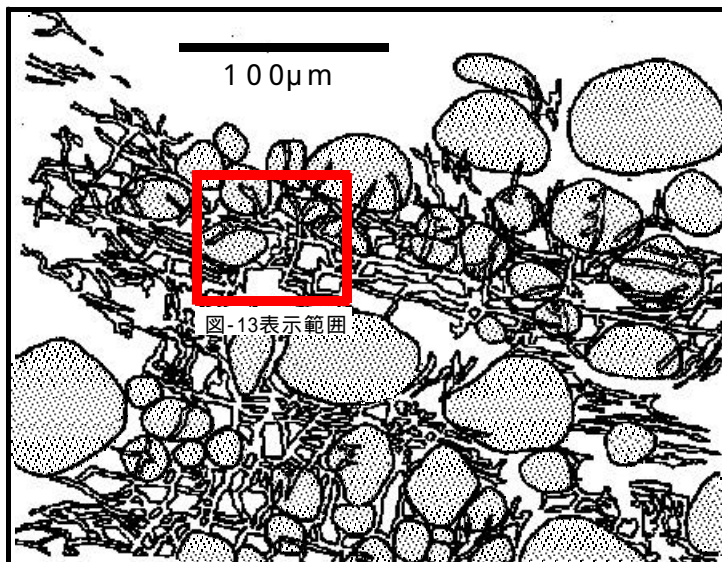


図5. 46 図5. 45 に示すせん断面観察状況のスケッチ

図5. 45 ,およびそのスケッチである図5. 46 に示す通り、せん断方向、およびこれに直交する方向性が卓越して観察されることが多い。

また峰すべり面粘土には、シルト粒径成分の混入が顕著であり、図5. 45 にはシルト大の粒子輪郭が各所に見られる。図5. 46 のスケッチには、混入するシルト～細砂粒径成分の輪郭を強調して示している[粘土含有率 43%,シルト粒径含有率

56% ,  $w_L=137.36\%$  ,  $I_p=89.32$  ,  $\phi_r=4.39^\circ$  ] 。しかしながら図5. 47 , およびそのスケッチである図5. 48 に示す高倍率観察では , シルト粒子表面にもスメクタイトが造る縄目の構造が確認され , 粘土含有率が 50 % を下回る試料であってもスメクタイトによる被覆はすべり面と同様である。

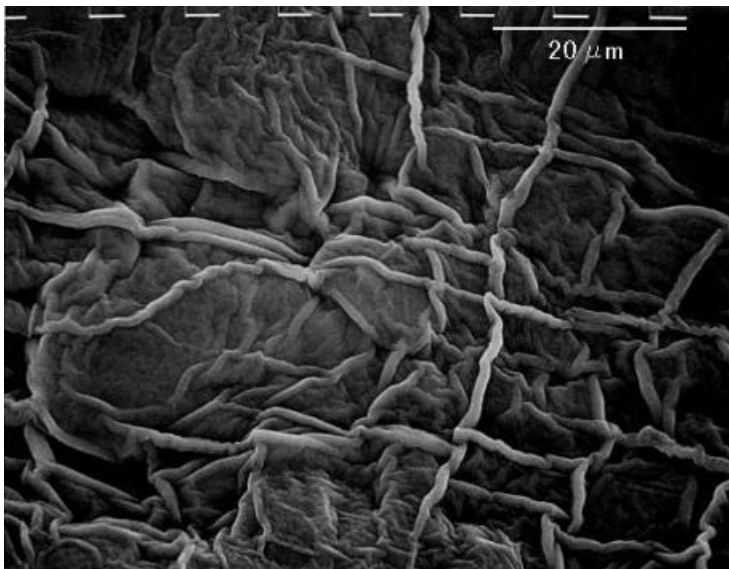
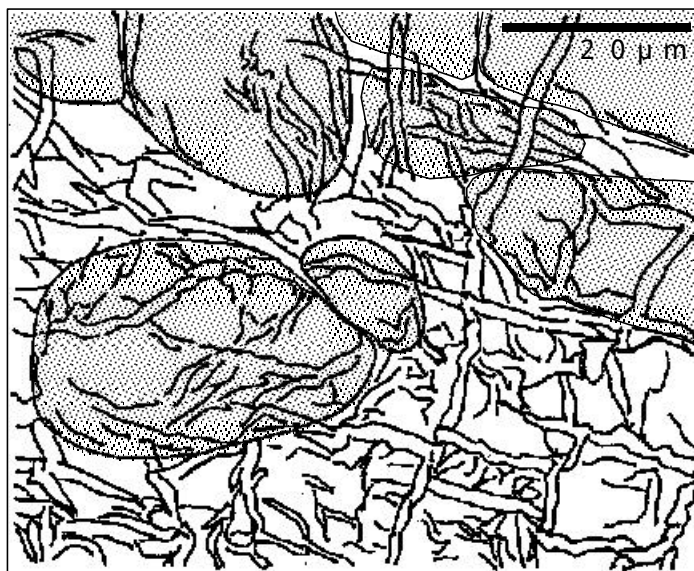


図5. 47 峰 4試料のリングせん断試験後せん断面[200kPa]



シルト～細砂粒径成分 スメクタイトのウネリの構造

図5. 48 図5. 47 に示すせん断面観察状況のスケッチ

つまり , 構成粒子が定向配列する過程で , 試料中に分散していたスメクタイトが , せん断面を構成する上盤 , 下盤の境界に凝集したものと考えられる。筆者らはスメクタイトが移動するメカニズムとして , せん断面を構成する粒子が回転や滑動といった動きを生じる際に , 正のダイレイタンスを生じて間隙比が増大し , この間隙を埋めるようにしてスメクタイトが移動するメカニズムを検証中である。

なお , せん断中に粘土がせん断面へ移動し , せん断面周囲の粘土含有率が増大する現象について , 大河原他 ( 1996<sup>75)</sup> ) はすべり面粘土の X 線回折や , EPMA , CEC の測定を行い , 異地性と考えられる粘土が地下水によってすべり面へ運搬・充填される可能性を指摘している。

### 5. 3 擦痕構造によるせん断抵抗角への影響

以下に、せん断面に見られる擦痕構造に着目し、擦痕を生じる理由と、擦痕状況の違いが強度特性とどのような関係にあるかを考察する。

本稿では、すべり面に認められる擦痕の粗密、及び基岩面形状を反映した微起伏の程度をレーザフォーカス変位計により計測し、算術平均粗さ（粗度）を算出することで、すべり面表面の粗さを定量的に評価する試みを行った（眞弓他（2000<sup>76）</sup>，2001<sup>77）</sup>）。

#### 5. 3. 1 レーザー変位計を用いた表面形状の計測

##### (1) 使用計測機器

三次元形状測定システムは、サンプルの高さを測定するレーザフォーカス変位計、サンプルをX軸、Y軸方向にマトリクス（格子状）スキャンさせる自動精密ステージ、これらを制御し、レーザフォーカス変位計からの測定データを管理するパーソナルコンピュータで構成されている（図5. 49 参照）。各機器の仕様は次の通りである。

##### レーザフォーカス変位計：

（株）キーエンス製，LT-8100型（ヘッド  
型式：LT-8010型），測定範囲 ±  
0.3mm，作動距離 5mm，分解能 0.1  
μm，直線性 ±0.5%oF.S.，RS-232C  
出・入力，AC100/120V，3.7kg

##### 変位計スタンド：

シグマ光機（株）製，BS-10 型

##### XY自動ステージ：

シグマ光機（株）製，MINI-60XY型，移動  
距離 20mm，1 計測移動量 0.5 μm

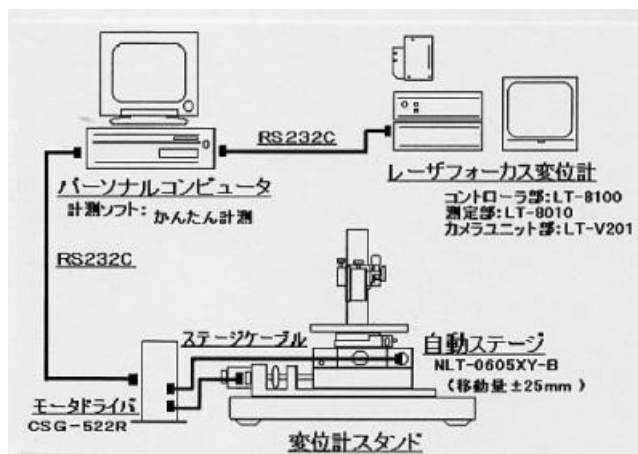


図5. 49 三次元形状測定システム構成図

##### (2) 計測方法

対象試料はすべり面が 28 試料，リングせん断試験後せん断面が 22 試料である。計測手順は 25mm × 25mm，高さ 10mm の細片を切り出し，原則として試料が乾燥する前



に計測を行った。計測間隔および計測範囲は、各試料に対して（一部試料サイズ、起伏状況等の制約により計測不能な試料あり）、計測間隔  $5\ \mu\text{m}$  :  $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ 、計測間隔  $10\ \mu\text{m}$  :  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 、計測間隔  $30\ \mu\text{m}$  :  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、計測間隔  $50\ \mu\text{m}$  :  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、計測間隔  $70\ \mu\text{m}$  :  $7\text{mm} \times 7\text{mm}$  の五通りで実施した。試料の計測範囲は、平滑な箇所を探索するよう心掛け、擦痕方向が走査方向に  $45^\circ$  斜交するように試料を設置した。

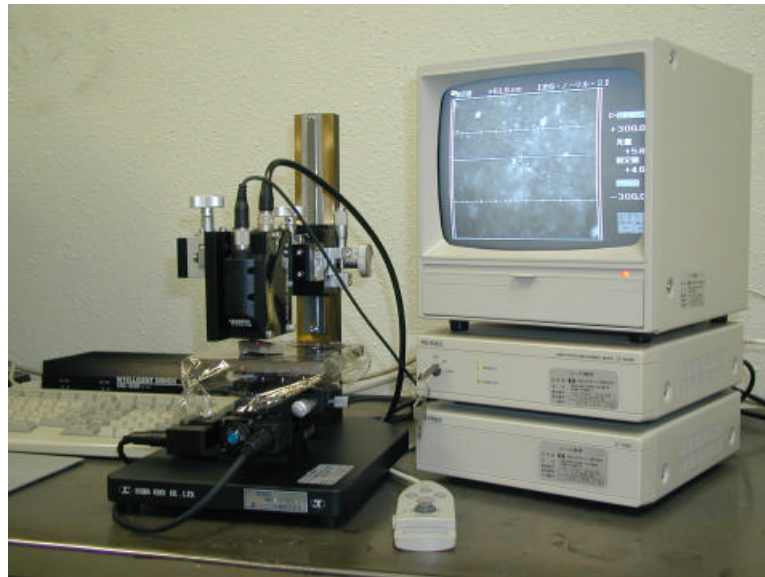


図5. 50 表面形状の計測状況

### 5. 3. 2 粗度の算出

解析には日本工業規格( JIS )機械計測関連規格「表面粗さ-定義及び表示-[JISB0601]」<sup>78)</sup>に規定される算術平均粗さ  $R_a$ 、及び最大高さ  $R_y$  の考え方をを用いた。尚、JIS に規定される  $R_a$ 、 $R_y$  は、計測した断面曲線から所定の波長より長い表面うねり成分を位相補償形高域フィルタで除去した曲線（粗さ曲線）より諸粗さパラメータを算出するものであるが（図5. 51 参照）、本稿では擦痕構造を反映するこうしたうねり成分をパラメータに反映すべく、断面曲線（表面形状曲線）そのものを対象として  $R_a$ 、 $R_y$  を算出している。（粗さパラメータを本来の定義と区別するために  $R_a^*$ 、 $R_y^*$  と表記）

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、断面曲線： $f(x)$ 、 $l$ : 基準長さ



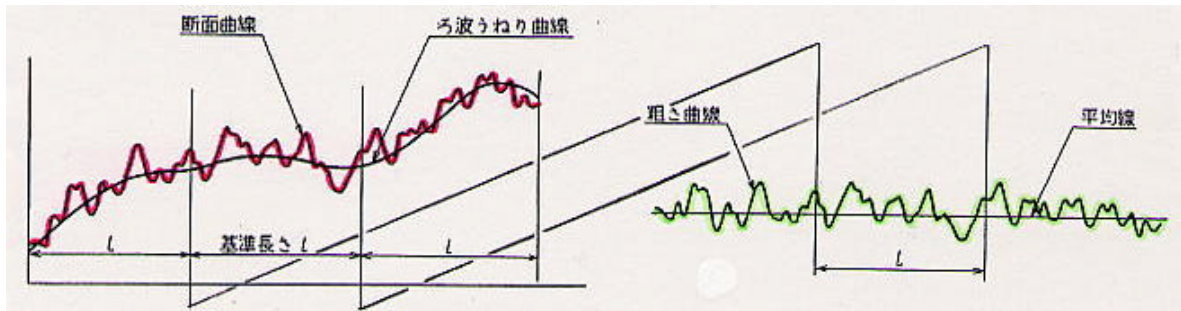


図5. 51 断面曲線 ,粗さ曲線 ,平均線 ,基準長さの説明図

また  $R_a^*$  ,  $R_y^*$  の算出には ,  $X Y$  双方向の各格子断面について細片自体の面傾斜を補正すべく , 各断面の両端点の高低差で角度補正を行った( 図5. 52 曲線 曲線への補正 ) , こうして得られた各断面の粗さパラメータ  $R_{ax}^*$  ,  $R_{ay}^*$  を全断面で平均し  $R_a^*$  を算出している。

最大高さ  $R_y^*$  については , 面傾斜を補正した断面曲線から得られる山頂線と谷底線との間隔をもって算出している。

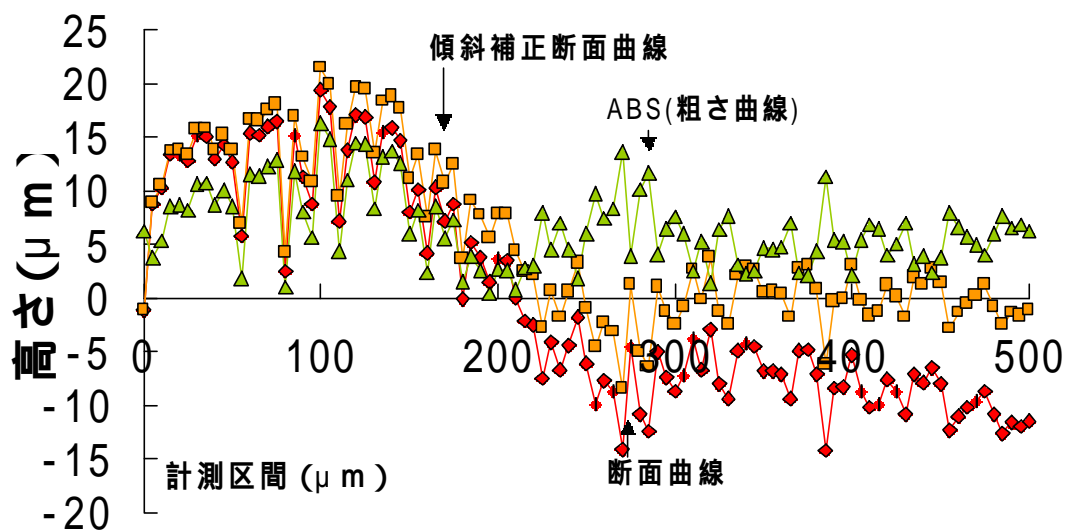
図5. 52 断面曲線の傾斜補正と | 粗さ曲線  $f(x)$  | の例

図5. 53 は , 電子顕微鏡観察を行った峰 4 試料のリングせん断試験後せん断面を , 三次元形状計測したものである。計測範囲の中から  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  範囲を切り出して図化したものであるが , 擦痕が造る大小のウネリの構造が認められる。また ,  $50\mu\text{m}$  の計測間隔ではスメクタイトが造る襞や縄目の構造は表現されていない。

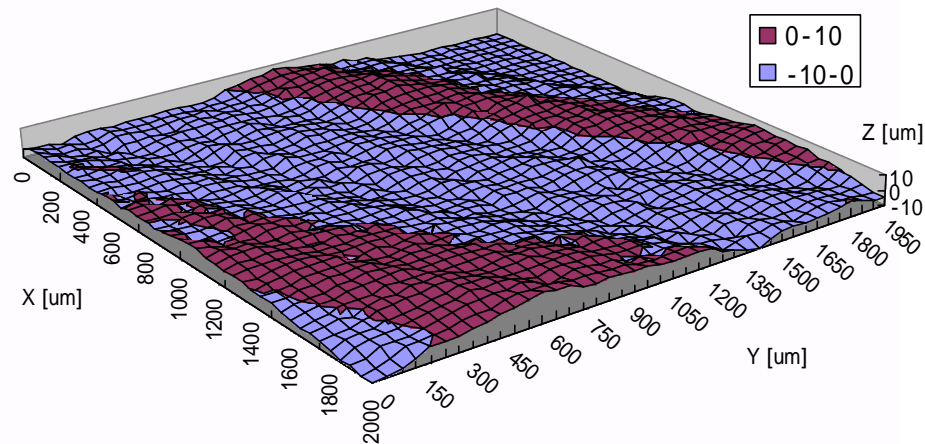


図5. 53 峰 4試料のリングせん断試験後せん断面三次元形状計測結果

### 5. 3. 3 すべり面の粗度

図5. 54 にすべり面，及びリングせん断試験によって得られた残留状態せん断面の最大高さ  $R_y^*$  と算術平均粗さ  $R_a^*$  の関係を整理する。未だ十分なデータ数とは呼べないものの，最大高さの増大に伴い，算術平均粗さも増大する様子が分かる。また，最大高さと算術平均粗さの関係には，異なる線形関係が混在するものと考えられ，分布の上限ラインと下限ラインとでは，同じ最大高さの評価に対して，上限値が下限値の3倍に近い算術平均粗さを与える事例が存在する。このことから，面の粗度評価には，単に起伏の大小が考慮されるだけでは十分ではなく，どの程度の起伏をもつ構造が，どの程度の頻度で発生しているかが評価できる指標でなければならないことが示唆される。また，すべり面の粗度に見る最大高さと算術平均粗さの関係は，リングせん断試験によって人工的に構築された残留状態せん断面の状況とほとんど区別がない。

尚，図5. 54 に用いたデータは，全て  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  の計測サイズに対して， $50\mu\text{m}$  の計測間隔で形状計測を行ったものである。

また図5. 55 に，計測範囲辺長の違いが  $R_a^*$  に与える変化を代表現場について検討した結果を示す。図には，計測サイズがほとんど  $R_a^*$  に違いを生じない事例（面岸：新第三系凝灰質泥岩，石原：新第三系泥岩，畑：新第三系凝灰角礫岩）とともに， $3,000\mu\text{m}$  辺長より大きなサイズで  $R_a^*$  の増大傾向が収束するもの（長谷：新第三系泥岩，崩ヶ沢：新第

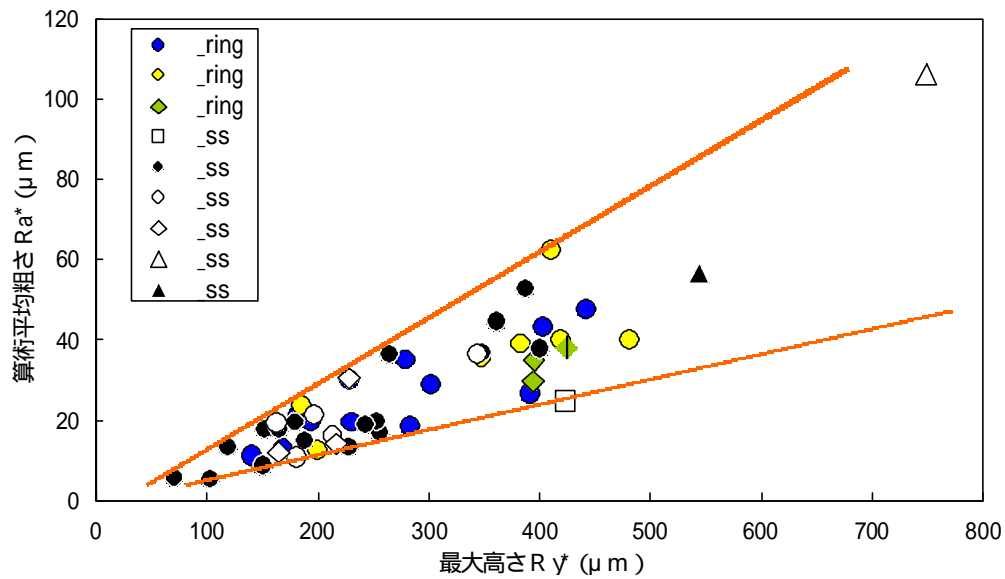


図5. 54 すべり面とリングせん断試験後せん断面の最大高さと算術平均粗さ

三系凝灰角礫岩), または増大傾向を維持するもの (アオツエ: 御荷銕緑色岩, 侍楯拡大: 新第三系泥岩, トヤ沢: 変朽安山岩) という種々の典型が示される。これらの解釈としては,  $R_a^*$ 一定型が擦痕等の起伏がほとんどないすべり面であり,  $R_a^*$ に上昇傾向が見られるものは, 起伏が顕著でこれの計測には試料毎に適切な計測サイズが考慮される必要がある型と考えられる。つまり, 収束挙動の見えない単調増加型の事例は,  $5,000 \mu m$  の計測辺長でも起伏の正確な定量評価が困難であり, さらに計測範囲を大きくとる必要がある群と理解される。

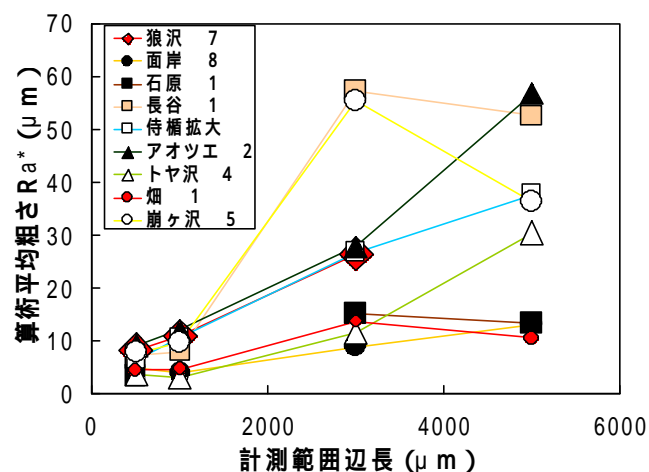
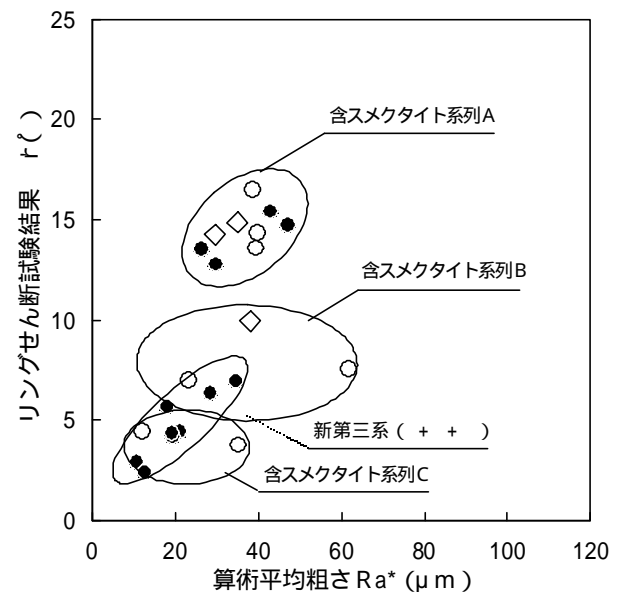


図5. 55 計測サイズの違いによる算術平均粗さの変化

## 5.3.4 粗さとせん断抵抗角との関係

図5.56 に地質 , , , で計測したリングせん断試験後せん断面の表面粗さ ( $R_a^*$ ) と  $\phi'$  との関係を示す。これらは全て含スメクタイト試料であり、図5.4 に示した系列 A ~ C の各区分を同様に図示する。

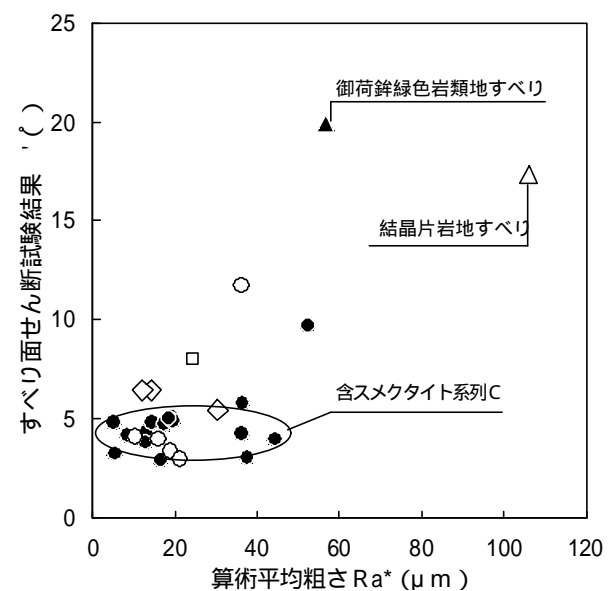
算術平均粗さ  $R_a^*$  の分布に着目すると、系列 A が 30 ~ 50  $\mu\text{m}$  付近に分布し、系列 B の 20 ~ 60  $\mu\text{m}$ 、系列 C の 10 ~ 35  $\mu\text{m}$  と、粗さの分布が取り得る範囲は、各区分が重なり合って差異が認められない。系列 A では僅かに正の相関関係が指摘できるものの、系列 B と C にはせん断面の粗さの増大に伴う  $\phi'$  の増加傾向は確認できない。地質 , , の  $\phi'$  が  $10^\circ$  以下の群については、せん断面の粗さの増大に伴う  $\phi'$  の増加傾向が認められる。



凡例は表-1を参照

図5.56 リングせん断試験後せん断面の  $R_a^*$  と  $\phi'$

図5.57 に示すすべり面の算術平均粗さとすべり面せん断試験で得られた  $\phi'$  との関係では、 $\phi'$  が  $5^\circ$  以下となる含スメクタイト系列 C に属する試料のすべり面粗さ  $R_a^*$  ( $R_a^* < 45 \mu\text{m}$ ) が、特に 20  $\mu\text{m}$  以下の範囲に集中的に分布する傾向 (76%) が見られる。また、各一点ではあるが結晶片岩と、御荷鉾緑色岩類の事例では、すべり面の粗さが突出して大きい。これら地質区分のすべり面試料は、測定レンジを越えて面起伏が顕著な事例が多く、計測不能と評価されたものが多い。



凡例は表-1を参照

図5.57 すべり面の  $R_a^*$  と  $\phi'$

図5. 58 は、面の粗さを生じる原因を探るため、リングせん断試験後せん断面の  $R_a^*$  と、粒度調整後の細砂以上粒径含有率との関係を示したものである。楕円で囲んだ範囲にリングせん断試験後せん断面データの約半数が分布し、粗粒径含有率の増加に伴いせん断面の粗さが増大する傾向が認められる（相関係数  $r=0.988$ ）。また、得られた線形関係には粗粒径成分を全く含まない場合でも  $20\mu\text{m}$  程度の粗さが残ることが示される。

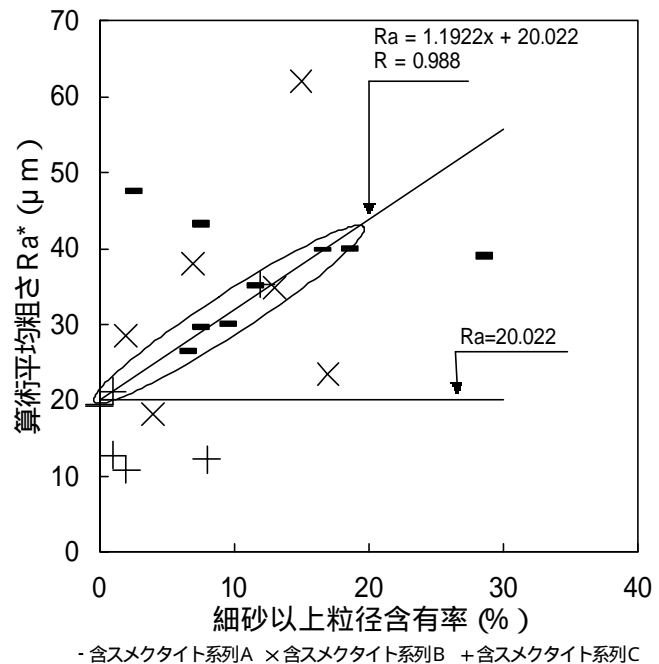


図5. 58 含スメクタイトすべり面粘土の粗粒径含有率とリングせん断試験後せん断面の算術平均粗さ

図5. 59 は、すべり面の  $R_a^*$  と粒度調整前の細砂以上粒径含有率の関係を示している。プロットの系列は各試料のリングせん断試験結果が区分された系列を継承している。ほとんど全点が、図5. 58 に示す直線関係の  $R_a^*$  切片 ( $20\mu\text{m}$ ) 以下の面粗さとなり、実際のすべり面がすべり面粘土の系列や粗粒径含有率に無関係に極めて平滑な面産状となることが示されている。

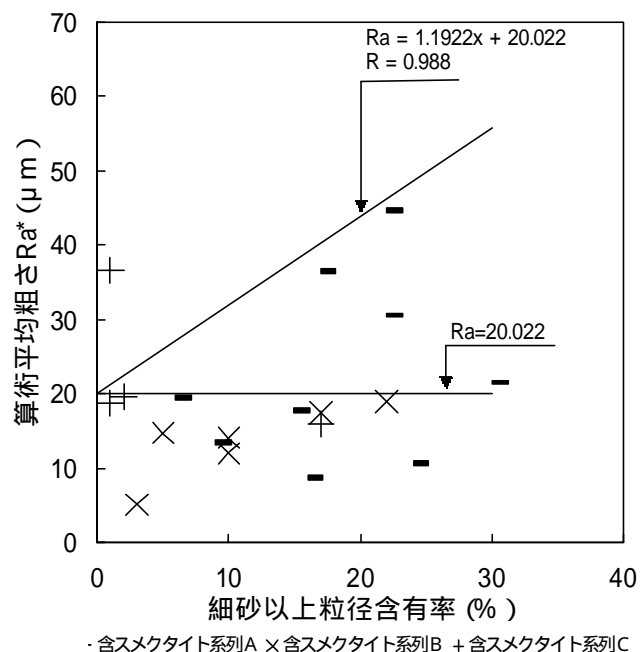


図5. 59 含スメクタイトすべり面粘土の粗粒径含有率とすべり面の算術平均粗さ

## 5. 4 本章のまとめ

国内各地からすべり面試料を収集し、これの構造解明を目的として、各種の試験、観察を行った。以下にすべり面におけるせん断抵抗角とすべり面粘土の物理的性質との関係において得られた成果をまとめる。

(1) スメクタイトを含有する試料群に対して、塑性指数とリングせん断試験結果  $\phi'$  との関係から、次の三系列の分類が可能となった。

含スメクタイト系列 A：細砂以上粒径を 15 % 以上混入する活性粘土、塑性指数の増大に伴い  $\phi'$  が減少

含スメクタイト系列 B：細砂以上粒径の混入が 15 % 以下の普通粘土、 $5^\circ < \phi' \leq 10^\circ$

含スメクタイト系列 C：細砂以上粒径の含有が 15 % 以下の活性粘土、スメクタイトの残留強度を反映して、 $\phi' \leq 5^\circ$

これに対し、地質 以外のスメクタイトを含むすべり面の  $\phi'$  と塑性指数との関係は、全て系列 B と C に属するものであり、すべり面を内包するすべり面粘土薄層に細砂以上の粒径成分が含まれていても、すべり面には細砂以上の粒径成分がほとんど干渉しないことが解った。

(2) また、走査型電子顕微鏡を用いた含スメクタイトすべり面の観察から、スメクタイトがすべり面を完全に被覆する状況が観察された。同様の状況がリングせん断試験の試験後せん断面にも確認され、せん断面近傍に分散するスメクタイトがせん断面に凝集した可能性が示された。

(3) 細砂以上の粒径成分を 15%以上混入することを特徴とした含スメクタイト系列 A の試料群では、塑性指数と  $\phi'$  との間に負の相関が認められる。また、細砂以上の粒径成分を 20%以上含む地質 Ⅱ、Ⅲ のすべり面粘土では、すべり面の  $\phi'$  が 425  $\mu\text{m}$  以上粒径をフルイ除去した試料の  $\phi'$  より顕著に大きい。

(4) リングせん断試験後のせん断面粗さは、計測値の約半数の事例から、細砂以上の粒径成分の増加に伴うせん断面粗さの増大傾向を示す。さらに、変成岩地帯でのすべり面の粗さは含スメクタイト系列のすべり面より突出して大きく、粗い粒子の混入による面粗さ

の増大が、せん断抵抗角の増大を生じた可能性が指摘された。また、粗粒径成分を全く含まないリングせん断試料の場合でも、残留状態で  $20\text{ }\mu\text{m}$  程度の粗さが残り、地質 を除く含スメクタイトすべり面での面粗さの計測結果が、ほとんど  $20\text{ }\mu\text{m}$  以下となることに一致する。

## 6. 残留状態へ向かう構造変化の様式

本章では，3 章，4 章，5 章で述べた方法論，及びその成果を受けて，すべり面せん断試験で得られた地質毎に同一性を有するせん断抵抗角が，各すべり面におけるどのような特徴に影響を受け発現したかを考察する。考察に当たっては，リングせん断試験のピーク強度から残留強度へ向かう強度劣化過程で，せん断面にどのような構造変化が生じるか，またこの構造変化が含水比特性にどのような変化をもたらすか，さらに擦痕構造が何に起因して生じ，せん断抵抗角とどのように関わるかという視点で考察する。また，構造変化の様式を規定することにより，従来，大変位を経験することで生じるせん断強度の収束強度と定義されていた残留強度について，構造変化の視点を加えた定義を試みる。本章は日本応用地質学会九州支部会報 GET 九州への受理原稿に加筆修正したものである<sup>79)</sup>。

### 6. 1 残留状態せん断面の形成とスメクタイトの凝集

電子顕微鏡による観察結果を述べた 5 章に示した通り，新第三系堆積岩地すべりを主とする含スメクタイトすべり面，及びこれの調整試料を用いたリングせん断試験後せん断面には，スメクタイトが顕著な被覆層を形成していた。そこで，こうしたスメクタイト被覆層がもともと存在していたものか，せん断面形成過程で生じたものであるかを考察する。

以下に示すリングせん断試験結果は，含スメクタイトすべり面粘土でありながら，スメクタイトの含有量がさほど顕著でなく，コンシステンシー特性にもスメクタイトの特徴が強くは現れていない試料の事例である。本試料を用いたリングせん断試験結果には，50，100，150kPa の荷重試験と 200kPa 荷重試験とでせん断面の形成状況が明らかに異なり，200kPa 荷重試験にのみ，当初存在しないスメクタイトの被覆層が発生し，せん断抵抗角もスメクタイトの残留強度特性に強く影響を受けるものとなった。

対象としたすべり面粘土試料は，山形県山ノ内地すべりの滑落崖近傍に施工（施工区間約 400 m）された 17 号集水井内すべり面粘土である。地質は，新第三系鮮新統新庄層群大林累層であり，均質に褐鉄鉱の付着を生じた固結度の低い細粒砂岩層と，基岩となる青灰色の凝灰質シルト岩との層界に，厚さ僅かに 1 ～ 10mm 程度の暗灰色粘土薄層を





図6. 1 山の内すべり面の産状 (円柱状供試体の全周囲断面状況)

伴い，すべり面は形成されていた（図6. 1 参照）。

本試料の粘土含有率は 60%を上回り，粗砂以上の粒径成分含有率が 5%以下となる典型的な新第三系堆積岩地すべりの粒度構成を示す。また，液性限界が 70%を越えるものの，活性度は 0.85 であり，普通粘土に区分されるコンシステンシー特性が示された。

しかしながら当地区すべり面粘土からは，X線粉末回折分析によってスメクタイトが検出されている。また，4基の集水井内すべり面試料を用いてすべり面せん断試験を実施した結果，すべり面のせん断抵抗角は，その何れもが山形県月布産 Na-モンモリロナイト純粋鉱物によるリングせん断試験結果の  $\phi' = 4^\circ$  にほぼ等しくなった。つまり，山ノ内すべり面のせん断抵抗角は，スメクタイトの残留せん断強度特性に強く支配されていると考えられた。

図6. 2 に，リングせん断試験を実施した圧密荷重 50,100,150,200kPa 供試体の変位量 増大にともなうせん断抵抗力 の推移を示す。図には，50,100,150kPa 試験の経緯が，ピーク強度を発現して後にほとんど強度低下を示すことなく収束状態となるのに対し，200kPa 試験では明瞭な尖塔状のピーク挙動を生じて急激にせん断抵抗力が低下している。また，図 6. 3 の  $\sigma' - \tau'$  関係図に示す通り，200kPa 試験（残留強度の確認を行って後，上載荷重を 50kPa ずつ減圧し，改めて の強度収束を計測。こうして得られた荷重変更後の各 収束挙動も残留強度の破壊基準算出に算入）から得られた強度レベル<残留強度 A>は，50,100,150kPa 試験より得られた破壊基準<残留強度 B>より明らかに小さい強度

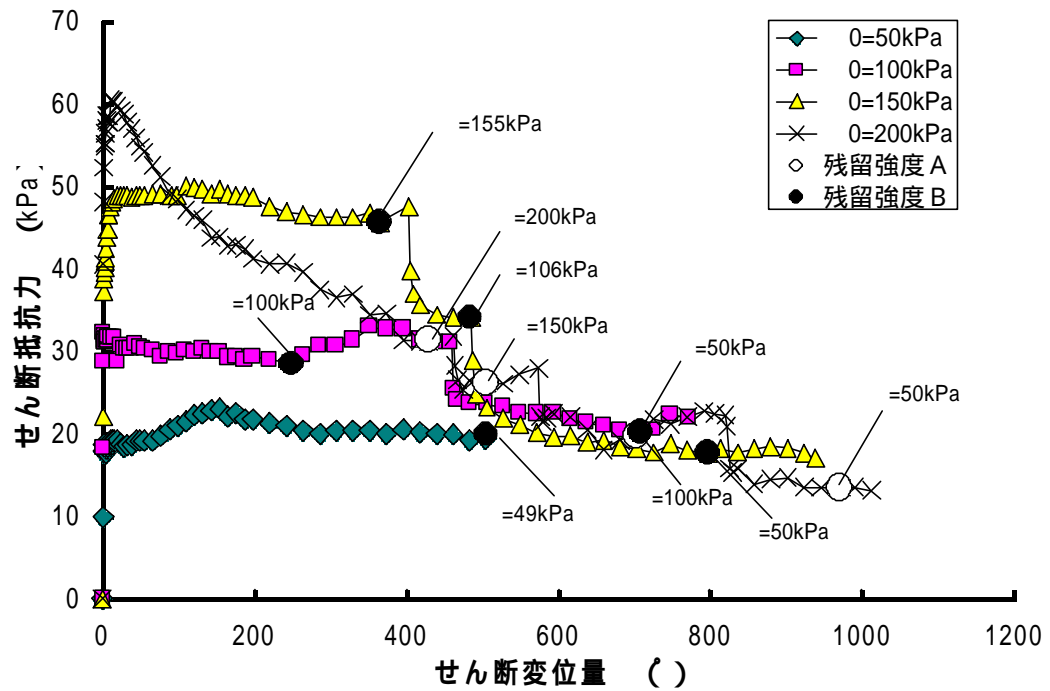


図6. 2 山の内 17リングせん断試験結果( - 関係)

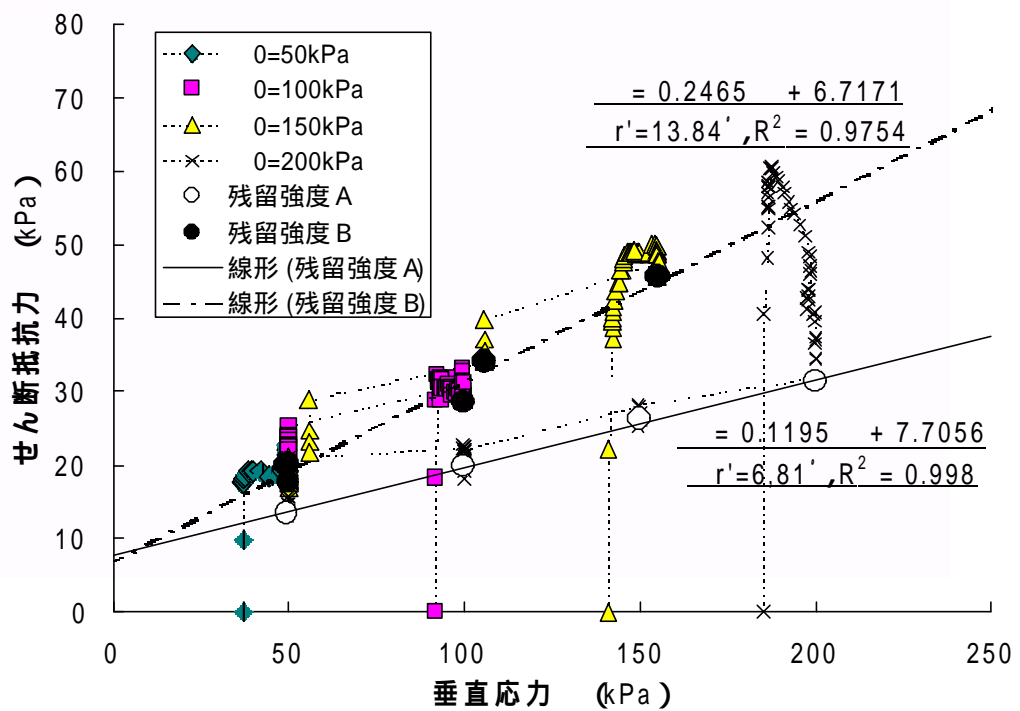


図6. 3 山の内 17リングせん断試験結果( - 関係)

であった。

図6. 4 , 図6. 5 は , 17 号集水井内すべり面の電子顕微鏡観察写真である。図6. 4 には , 平滑で , ほとんど起伏らしきものがない良好な粒子配向状況が観察されると共に , 白い微細なひも状の構造が見える。1,500 倍に拡大した図6. 5 では , このひも状構造が粒子配向面を被覆する不定形鉱物薄層の一部が剥離し , 縁辺部が白く見える箇所であることが解る。また , この不定形の鉱物群は , 純粋鉱物 Na 型モンモリロナイトのリングせん断試験後せん断面に見える構造に酷似するものであり , X線粉末回折分析結果と併せてスメクタイトと判定される。図6. 6 , 図6. 7 にはリングせん断試験後せん断面の状況を示すが , 鉱物輪郭が明瞭なシルト粒径分の占有率が高く , 面の起伏が顕著な 150kPa 試験後せん断面に対して , 200kPa 試験後せん断面は , 不定形粘土鉱物のスメクタイトがほぼ面を被覆し滑らかである。

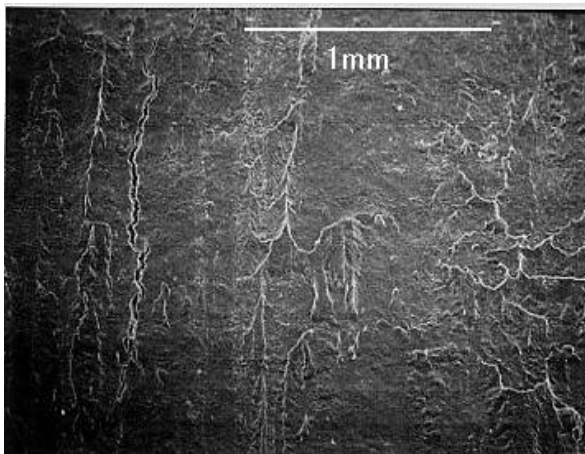


図6. 4 17すべり面[下盤 , × 50]

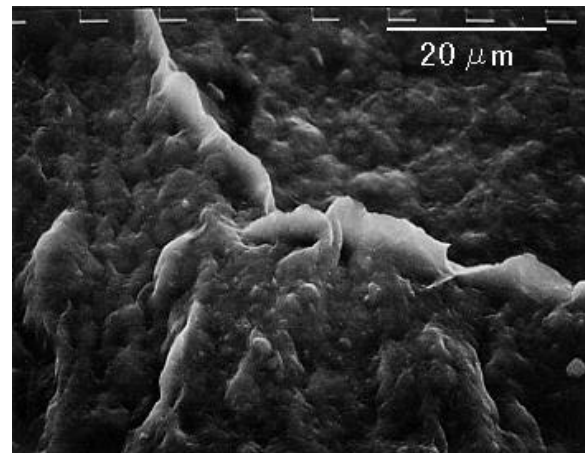


図6. 5 17すべり面[下盤 , × 1,500]

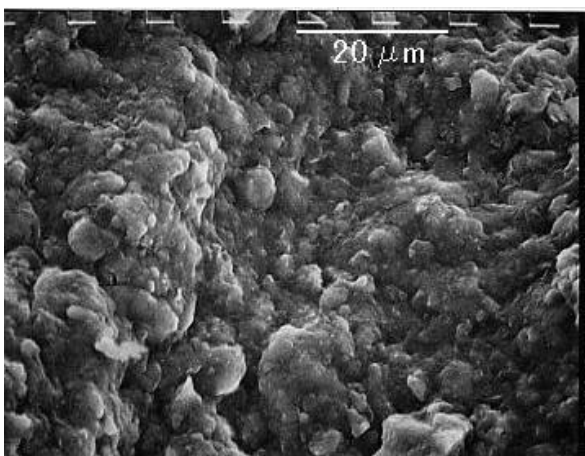


図6. 6 17リング後[下盤 , 150kPa , × 350]

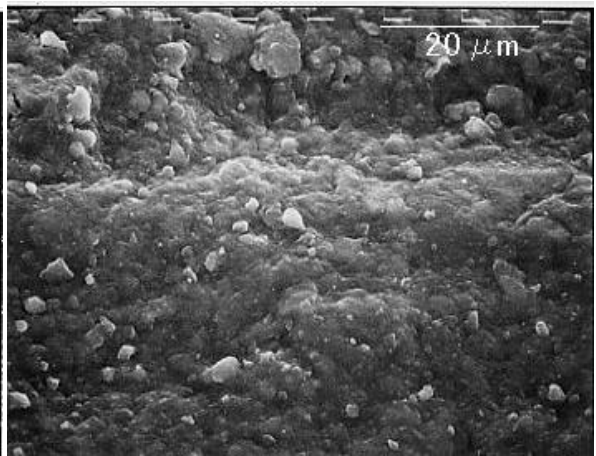


図6. 7 17リング後[上盤 , 200kPa , × 350]

200kPa 試験より得られた  $\phi'$  が、Na-モンモリロナイトの残留せん断抵抗角に影響を受けたと考えられるのに対し、50,100,150kPa 試験で得られた  $\phi'$  は、明らかに異なる破壊基準を示すものであった。一般に残留状態に達するためには大きなひずみ量を必要とすることから、せん断変位量の多寡こそが残留強度達成程度を知る目安と考えられている。しかしながら、ここに紹介した事例は、荷重条件等の試験条件の変化によって、せん断面構成粒子の粒径や鉱物組成が変化し、全く異なる残留状態への移行が起こり得る可能性を示している。山崎ほかは、スメクタイトの含有率が 20%を越えることで  $\phi'$  が急激に低下すると報告しており<sup>39)</sup>、本事例の場合は、200kPa 試験において減圧等によりせん断面にスメクタイトが集積し、20%を越えていた可能性がある。

対象試料にとって真の残留状態がどこにあるかを評価することは慎重に行う必要があるが、試験結果を実務（地すべり安定解析）に利用することを前提とすれば、より実際の現場に近い試験条件において、実際のすべり面の状態がより誠実に再現されたせん断面に発揮される強度を目標の残留状態とすることが肝要と考えられる。勿論、対象現場が初動の地すべりであり、目標とすべきすべり面が残留状態と呼べない場合もあるが、各地質における十分な試験実績が積み上げられ、またリングせん断試験等を用いた室内実験から種々の試験条件と残留強度との関係が明かとなることで、対象地域の真の残留状態を予測することも可能と考える。

## 6. 2 擦痕構造と粗粒径成分

4 章において、変成岩地帯地すべりや、新第三系堆積岩地すべりの中で凝灰角礫岩地域のすべり面粘土が、粗粒径成分を多く含み、これがせん断抵抗角にも影響を与えた可能性を指摘した。ここでは、そうした粗粒径成分の介在が、すべり面やせん断面の起伏構造とどのように関わり、せん断抵抗角の発現に影響を与えるかを詳しく吟味する。

通常のリングせん断試験では、先述したように採取試料から 425  $\mu\text{m}$  以上の粒径成分はフルイ除去される。しかしながら、5 章において新第三系堆積岩地すべりのリングせん断試験結果が、半数近くの事例ですべり面せん断試験結果よりもせん断抵抗角が高めに評価され、この原因としてフルイ通過試料に含まれる細砂粒径成分（75 ～ 425  $\mu\text{m}$ ）の混入が考えられることを（含スメクタイト系列 A の存在）指摘した。さらに、塑性指数とせ

ん断抵抗角の係に負の直線性が指摘された含スメクタイト系列 A 試料では、細砂含有率と残留強度発現時のせん断面粗さに正の線形関係が得られた。

そこで本節では、粘土含有率が比較的少ない新第三系堆積岩地すべり（凝灰角礫岩）のすべり面粘土の中から蟹ヶ沢 11 試料を選び、このリングせん断試験後せん断面の粗さが粒度構成の変化によってどの様になるかを検討する。具体的には、次の通りに最大粒径の異なる試料を作成し、それぞれについてリングせん断試験を実施した。

- ・ 425  $\mu\text{m}$  以上粒径除去試料（フルイ）...蟹ヶ沢 11\_425
- ・ 75  $\mu\text{m}$  以上粒径除去試料（フルイ）...蟹ヶ沢 11\_75
- ・ 2  $\mu\text{m}$  以上粒径除去試料（水簸処理）...蟹ヶ沢 11\_2

図6. 8 ~ 図6. 10 は各試料のリングせん断試験後せん断面の観察状況である。最大粒径が 425  $\mu\text{m}$  となる蟹ヶ沢 11\_425 試料は、せん断面に細砂粒径成分が肉眼でも多数確認され、各細砂粒子が起点となる擦痕構造が顕著である。これに対して、最大粒径 75  $\mu\text{m}$  となる蟹ヶ沢 11\_75 試料では、同心円状の擦痕構造は、11\_425 試料に比べて繊細なものとなり、肉眼で識別できる程の尖塔状に面に露出する粒径成分はほとんど見あたらない。起伏については、確かに粗さが減少した印象はあるが、鏡肌様の光沢を呈するものではなく、ボソとした風合いの面産状となる。

11\_2 試料は、11 すべり面粘土に多量の水を加えて懸濁液とし、ストークス則による粒子が沈降を始めて後の所定時間と、2  $\mu\text{m}$  以下粒径が存在する沈降深さの関係に基づき懸濁液を採水する作業を繰り返して、2  $\mu\text{m}$  以下粒径成分を濃縮した試料である。本試料のリングせん断試験後せん断面を見ると図6. 10 に示すとおり、鏡肌様の光沢が著しい、極めて平滑なせん断面となる。微かに同心円状の擦痕が見えるものの、他の二試料の面粗さとは比べられない定向配列状況である。

図6. 11 は、11 号集水井内不攪乱すべり面のすべり面せん断試験後状況である。試験時のせん断変位は数 cm と微小であるため、せん断面に観察される擦痕起伏は原位置性と判断され、先に示したリングせん断試験の擦痕状況とは明らかに異なる特徴が幾つか指摘できる。まず、11\_425 試料のリングせん断試験後せん断面と比べ、すべり面近傍には径が 1cm 前後に及ぶさらに大粒径の混入礫が介在する。これに起因して生じた擦痕構造は明瞭であり、リングせん断試験後せん断面に見たような繊細さはなく、比較的長周



期，大振幅な起伏構造が卓越する。また，面には刷毛で塗った程度の極薄い光沢層が形成しており，焼き付きを生じたかの如き定向配列構造が見える。

図6. 12 ～図6. 15 は，これらの面に対して行ったレーザー変位計による三次元表面形状計測結果である。肉眼観察から最も面が粗いと思われた 11\_425 試料の計測結果（図6. 12 ）を見ると，計測対象とした方形試料の対角方向（図幅のほぼ水平方向）に，

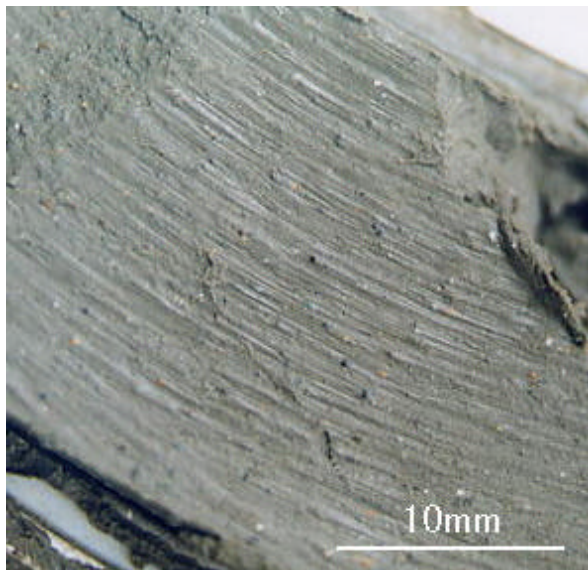


図6. 8 蟹ヶ沢 11\_425のリングせん断  
試験後せん断面写真

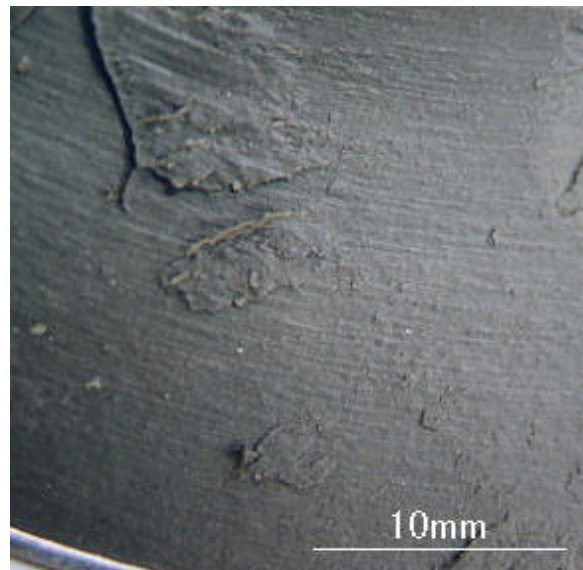


図6. 9 蟹ヶ沢 11\_75のリングせん断  
試験後せん断面写真

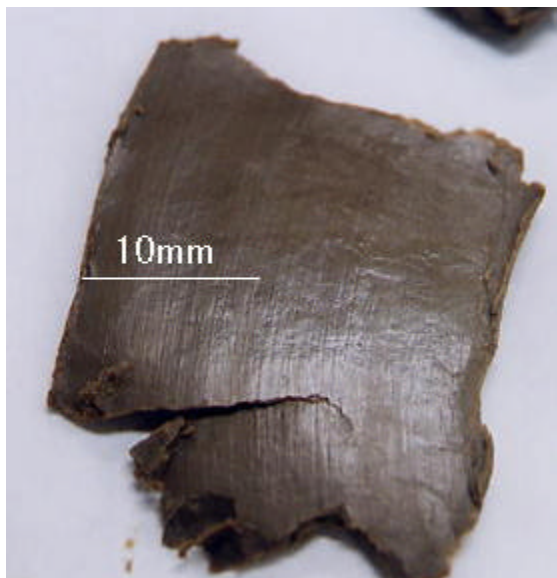


図6. 10 蟹ヶ沢 11\_2のリングせん断  
試験後せん断面写真

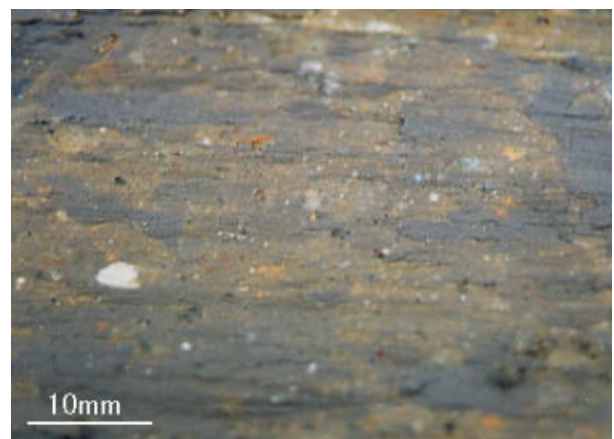


図6. 11 蟹ヶ沢 11のすべり面せん断  
試験後せん断面写真

同一の高さ区分色が列状に配置する構造として擦痕構造が認識出来る。これに対し、平滑さを特徴とした 11\_2 試料の計測結果（図6. 14 参照）は、出現する高さ区分の種類が少なくなり、擦痕構造についても、実施した計測精度では評価出来ない程に繊細な構造となる。これらの面の粗さを、JISに規格化された粗度評価指標の一つである算術平均粗さ Ra を用いて評価すると、11\_425 試料の Ra は  $22.5\text{ }\mu\text{m}$ 、11\_75 試料が  $9.7\text{ }\mu\text{m}$ 、11\_2 試料が  $7.3\text{ }\mu\text{m}$  となった。つまり、定向配列面を成す構成材料中に含まれる最大粒径成分の大小が、直接的にリングせん断試験のせん断面の起伏に影響し、最大粒径が大きい程、面の粗度は増大する傾向にあった。

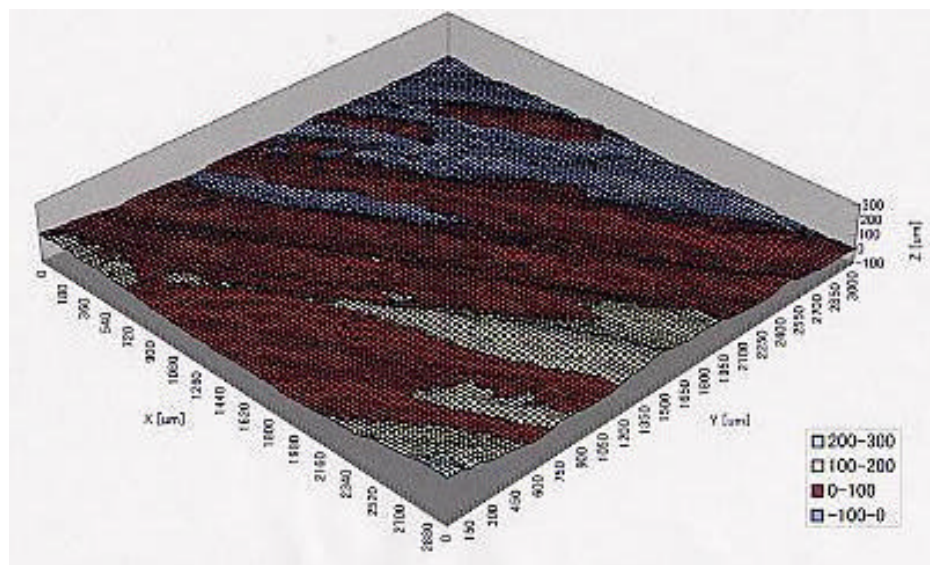


図6. 12 蟹ヶ沢 11\_425のリングせん断試験後せん断面形状計測結果

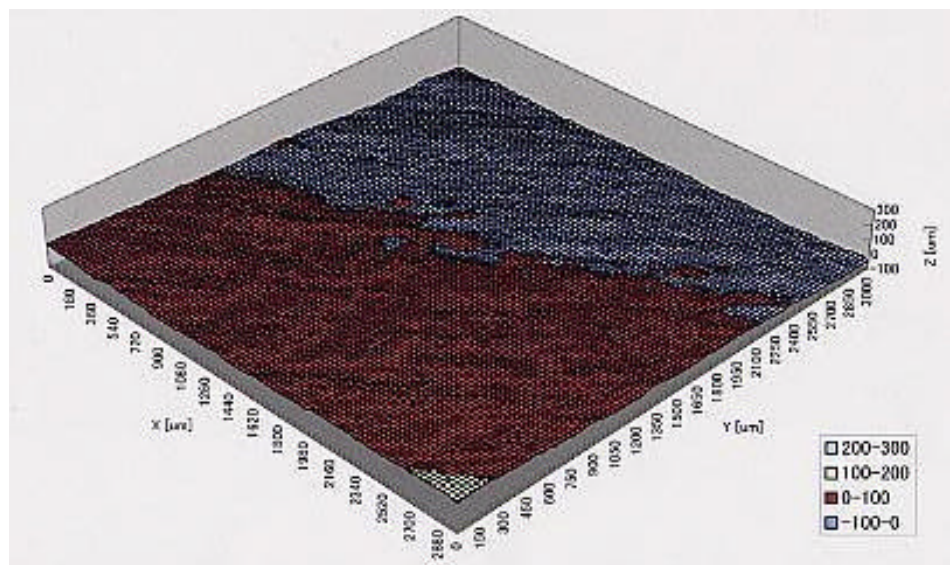


図6. 13 蟹ヶ沢 11\_75のリングせん断試験後せん断面形状計測結果



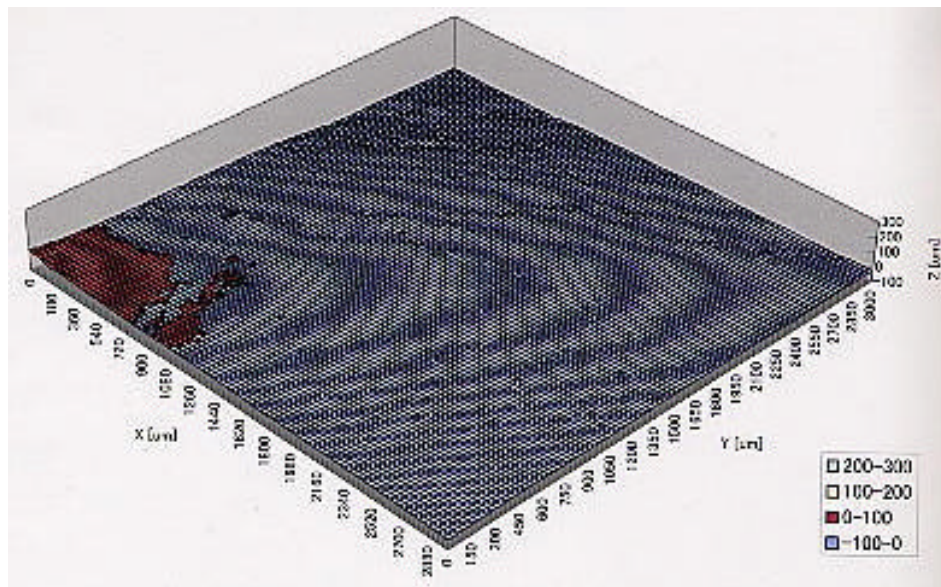


図6. 14 蟹ヶ沢 11\_2のリングせん断試験後せん断面形状計測結果

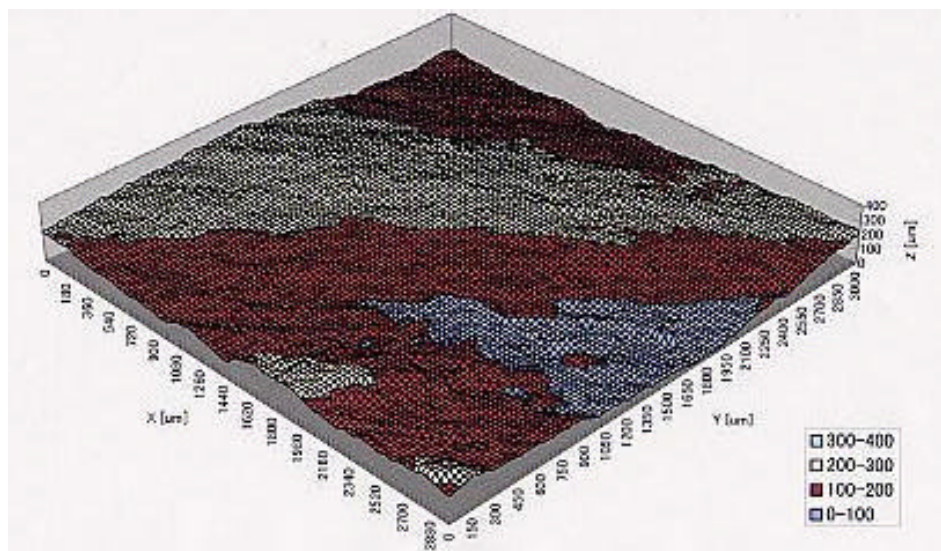


図6. 15 蟹ヶ沢 11のすべり面形状計測結果

図6. 16 に蟹ヶ沢 11\_425 試料， 11\_75 試料， 11\_2 試料のリングせん断試験結果を示す。これらせん断面の粗度に関しては，含有する最大粒径が大きいほど増大する傾向が指摘されたが，せん断抵抗角については 11\_425 試料と 11\_75 試料にほとんど差が無く，含スメクタイト試料でありながらせん断抵抗角は  $10^{\circ}$  を越えている。

これに対し，面粗度では 11\_75 試料と若干の違いしか示さなかった 11\_2 試料が，



せん断抵抗角については劇的な差異を生じ、唯一、スメクタイトの残留強度レベルと考えられるせん断抵抗角  $4^{\circ}$  を計測した。また、11\_2 試料のピーク段階における強度レベルは、他の二試料のものとほぼ等しい強度レベルにあったが、変位増大に伴い緩慢な強度低下を生じ、最終的にスメクタイトの残留強度を実現した。つまり、せん断初期に存在しないスメクタイトの薄層が、せん断に伴い徐々に形成されたものと推察される。

尚、すべり面せん断試験の結果得られた実際のすべり面が有するせん断抵抗角は  $6^{\circ}$  であり、大周期、大振幅を特徴とする擦痕構造が顕著な面（算術平均粗さ  $44.8\mu\text{m}$ ）でありながら、やはりスメクタイトの残留せん断抵抗角に近い強度特性を示している。

こうしたせん断面における変化を、走査型電子顕微鏡を用いて観察したものが図6. 17～図6. 24 である。観察倍率 50 倍でみたせん断面の状況には、面粗度にも表れていたとおり、11\_425（図6. 17）では混入する細砂の影響を受けて尖塔状に面が隆起するが、11\_75（図6. 19）では若干こうした面への粗粒径成分の露出、または押し出しは少なくなり、11\_2（図6. 21）ではほとんどそうした類の面起伏が無くなっている。すべり面（図6. 23）にも尖塔状の隆起部は顕著ではなく、大周期、かつ大振幅を特徴とするウ

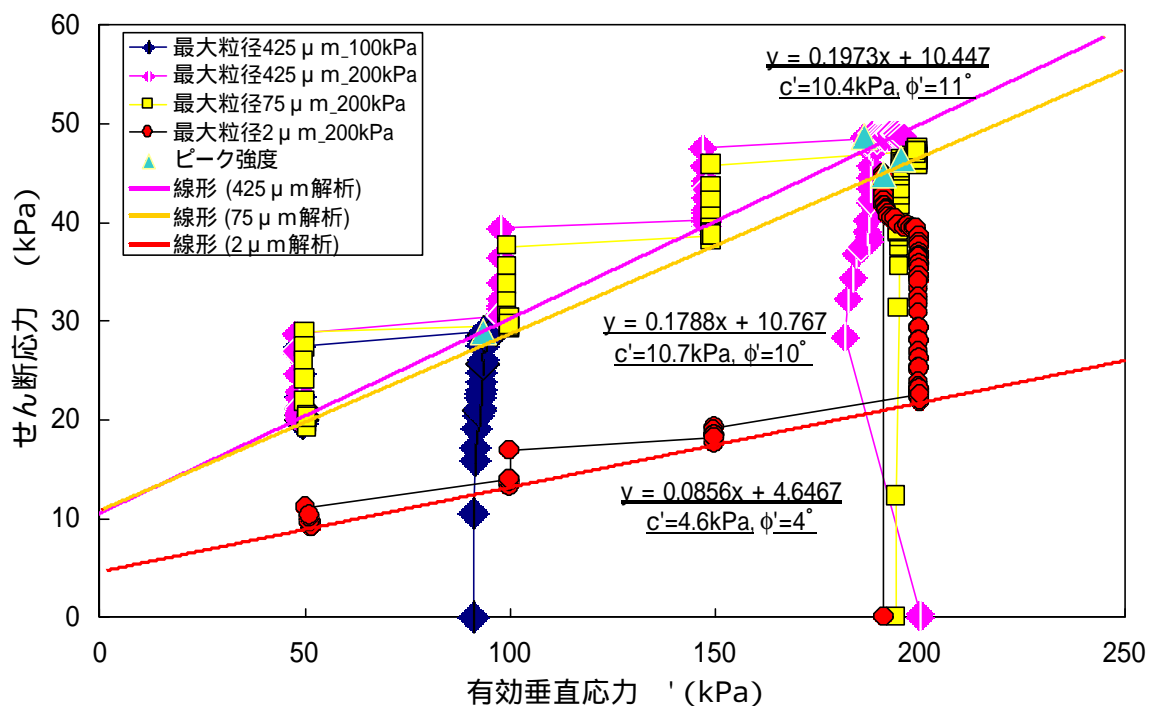


図6. 16 蟹ヶ沢 11各試料のリングせん断試験結果 [ - 関係図 ]

ネリの如き起伏構造が観察される。

次に観察倍率を 350 倍に上げた状況では， 11\_425( 図6. 18 )， 11\_75( 図6. 20 ) のせん断面には細砂粒子やシルト粒子が面上にそのまま残留する印象が強く，粘土鉱物による定向配列構造は未熟である。これに対し， 11\_2( 図6. 22 ) では面が平滑であるとともに，面上にスメクタイトの被覆構造がほぼ全面に確認され，先の二試料とは全く異なる面産状を呈する。スメクタイトの被覆構造の完成は，すべり面( 図6. 24 )においても同様に認められ，ほぼ全面にスメクタイトが造る襞状の構造が顕著である。また，すべり面ではスメクタイトの被覆とともに  $100\mu\text{m}$  程度の細砂粒子が，面に露出する産状で介在する状況も観察された。

つまり，蟹ヶ沢 11 試料に関しては，せん断面の粗さの順位は粗いものから，  
すべり面 > 最大粒径  $425\mu\text{m}$  > 最大粒径  $75\mu\text{m}$  > 最大粒径  $2\mu\text{m}$   
という関係を生じていたが，面のせん断抵抗角は，  
最大粒径  $425\mu\text{m}$  最大粒径  $75\mu\text{m}$  >> すべり面 > 最大粒径  $2\mu\text{m}$   
という序列になっていた。このせん断抵抗角に示された傾向は，せん断面を形作る粘土鉱物スメクタイトの被覆の傾向と一致するものであり，本試料のせん断強度がスメクタイトの被覆層を完成したか否かという点に強く影響を受けることが解った。また，こうしたスメクタイトの被覆層はせん断過程で徐々に形成するものであることも明かとなった。

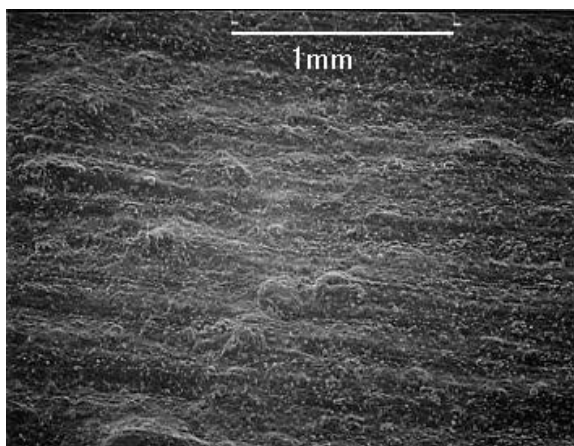


図6. 17 蟹ヶ沢 11\_425のリングせん断  
試験後せん断面観察状況， $\times 50$ 倍

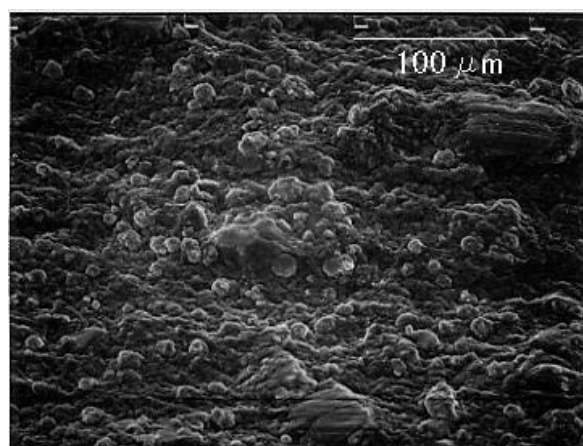


図6. 18 蟹ヶ沢 11\_425のリングせん断  
試験後せん断面観察状況， $\times 350$ 倍

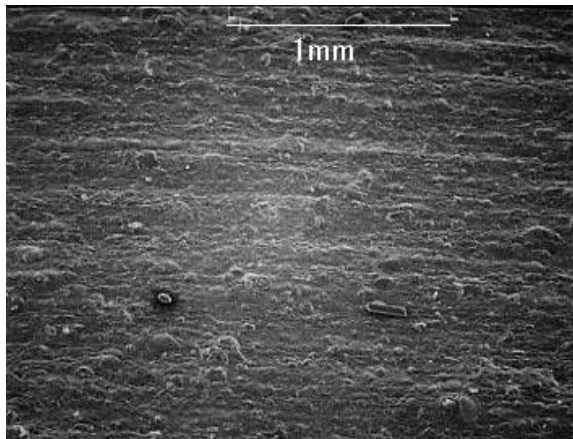


図6. 19 蟹ヶ沢 11\_75のリングせん断  
試験後せん断面観察状況, × 50倍

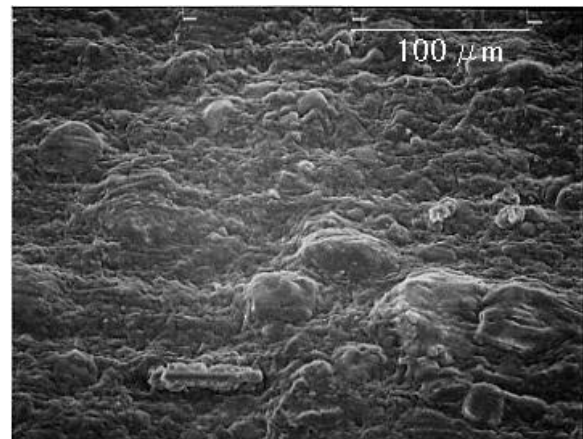


図6. 20 蟹ヶ沢 11\_75のリングせん断  
試験後せん断面観察状況, × 350倍

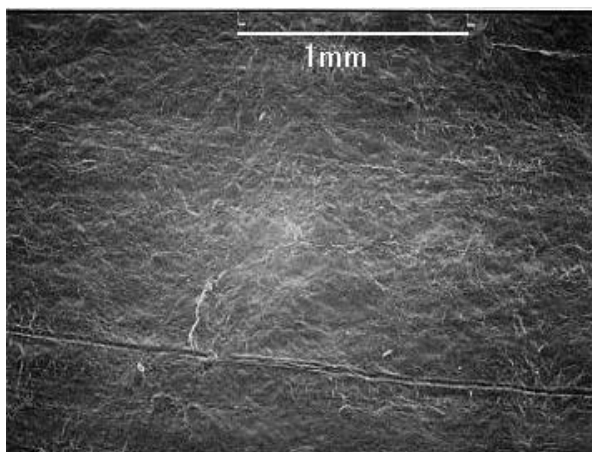


図6. 21 蟹ヶ沢 11\_2のリングせん断  
試験後せん断面観察状況, × 50倍

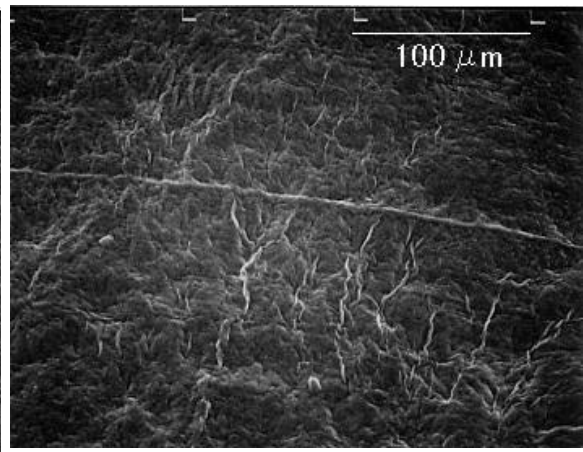


図6. 22 蟹ヶ沢 11\_2のリングせん断  
試験後せん断面観察状況, × 350倍

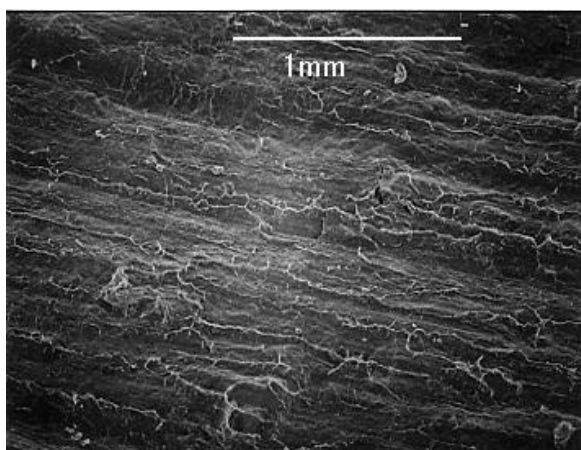


図6. 23 蟹ヶ沢 11のすべり面せん断  
試験後せん断面観察状況, × 50倍

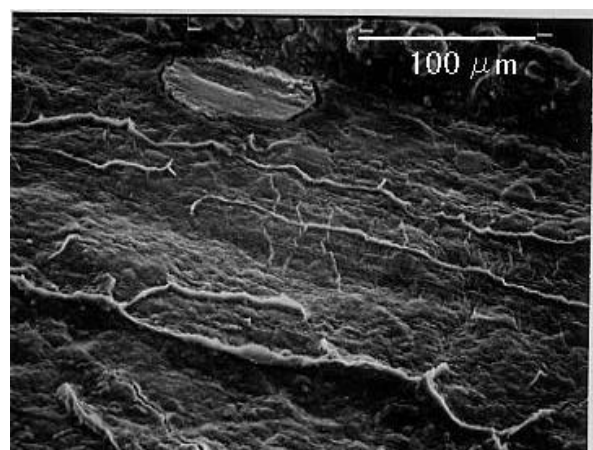


図6. 24 蟹ヶ沢 11のすべり面せん断  
試験後せん断面観察状況, × 350倍

### 6. 3 すべり面の自然含水比

すべり面や残留強度を実現したせん断面を構成する土粒子の配列状態が如何なる状態かを知るには、配列構造を成した薄層の間隙状態を考える必要がある。しかしながら、大河原他（2000<sup>48）</sup>）が繰り返し一面せん断試験装置を使ってカオリン粘土に長大せん断変位を与え、これによって生じたせん断面構造から確認しているように、定向配列挙動が認められる範囲、つまり主変位せん断面の幅は 10～50  $\mu\text{m}$  と薄い。また、前節に述べたとおり、残留強度へ定向配列が進行する過程では、含スメクタイト試料においてスメクタイトが面に凝集する挙動を生じるなど、面を形作る材料の粒度構成、鉱物組成は試料の初期状態から大きく変化することが指摘された。つまり、定向配列構造を成す薄層の間隙比は、これを直接的に計測することも、間接的に推定することも容易ではない。

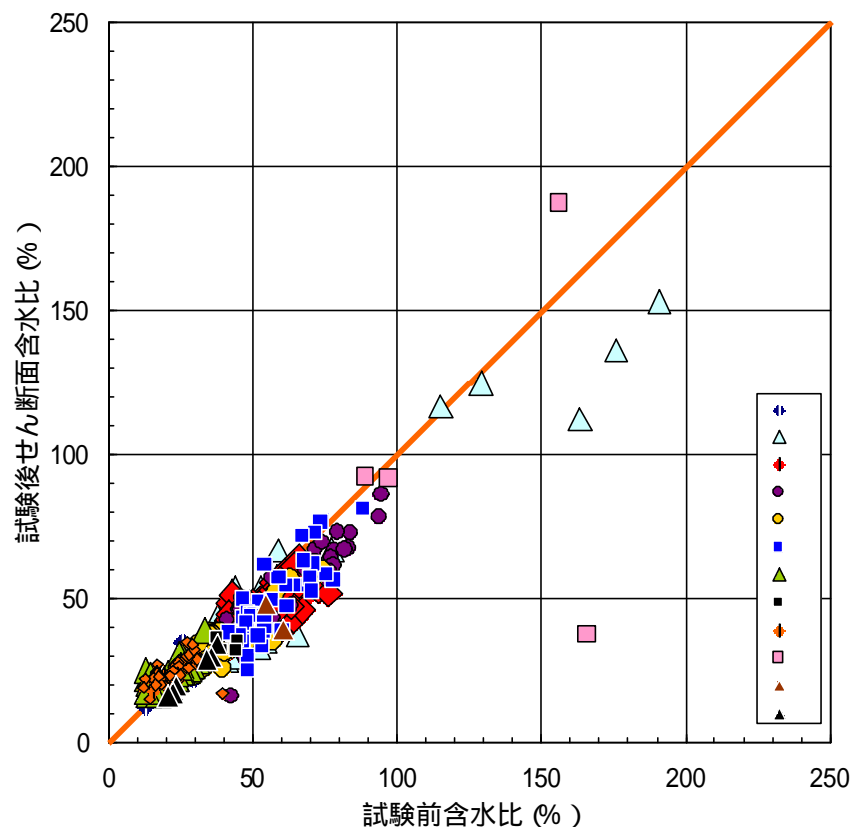
そこで本節では、すべり面を構成する薄層が完全に飽和しているものと仮定した上で、可能な限り薄く掻き集めた残留状態せん断面やすべり面の含水比と、その周囲の土層の含水比とを比較し、含水比の変化の傾向を把握することで、この定向配列層の間隙状態について推論を行う。

また、従来の評価では、地すべりのすべり面に関する含水特性は、しばしば高含水状態にあると考えられることが多かった。そこで、すべり面粘土の自然含水比の計測を行うとともに、採取したすべり面粘土のコンシステンシー特性を調べ、すべり面が高含水状態にあると考えられた意味についても考察を行うこととした。検討に際しては、すべり面（上盤、下盤）とともに、すべり面の上下を構成する土層の含水比に対して液性指数の評価を行い、すべり面部試料の試験結果と比較することで、すべり面粘土の特異性が抽出できるよう配慮した。

図6. 25 は、リングせん断試験実施前の圧密完了直後の供試体含水比と、当該試料でリングせん断試験を行い、形成した残留状態対応せん断面構成粘土の含水比を比較したものである。試験前含水比、試験後せん断面含水比ともに、概ね 40%以上となることを特徴とする新第三系堆積岩地すべり（地質 ～ ）、熱水変質安山岩起源地すべり（地質 ）、さらにモンモリロナイト混合試料（ ）やカオリナイト混合試料（ ）では、ほとんどの事例で試験後せん断面含水比が、試験前含水比に比べ若干低下する傾向が見られる。

また，試験前，試験後ともに 40%以下の低含水傾向を示す変成岩地帯地すべり（地質 ~ ）やマサ土（ ）では，試験前後でほとんど含水傾向が変化しないか，やや試験後せん断面含水比が増加する傾向にある。

図6. 26 には，対象とした試料を地質区分毎に整理して試料番号順に並べ，これらのリングせん断試験前含水比と試験後せん断面含水比の差を示した。図より，新第三系堆積岩地すべり（地質 ~ ），及び熱水変質安山岩地すべり（地質 ）では，試料毎のバラツキはあるものの，最大 20%程度まで試験前含水比が高めとなることが理解される。これに対して変成岩地帯地すべり（地質 ~ ）は，逆に試験後せん断面の含水比が試験前含水比よりも最大で 10%程度高めとなっている。



～ 表3.1中表記の地質区分， ：モンモリロナイト混合試料，  
：カオリナイト混合試料， ：広島産マサ土

図6. 25 リングせん断試験における残留状態せん断面形成に起因した含水比の変化

さらに図6. 27 には、せん断面の下位 5mm の位置を狙いとした試験後下部供試体内含水比と、せん断面含水比の差を整理した。新第三系堆積岩地帯地すべり（地質 ～ ）、及び熱水変質安山岩地すべり（地質 ）では、概ね両試料間の含水比は一致するものの、若干、せん断面含水比が下部供試体内含水比よりも低めの傾向を示す。逆に、変成岩地帯地すべり（地質 ～ ）は、せん断面含水比が下部供試体内含水比よりも高めの傾向となる。古第三系堆積岩地すべり（地質 ）については、やや変成岩地帯地すべりに近い傾向を示すものの、少ない試料数ゆえに傾向が判然としない。

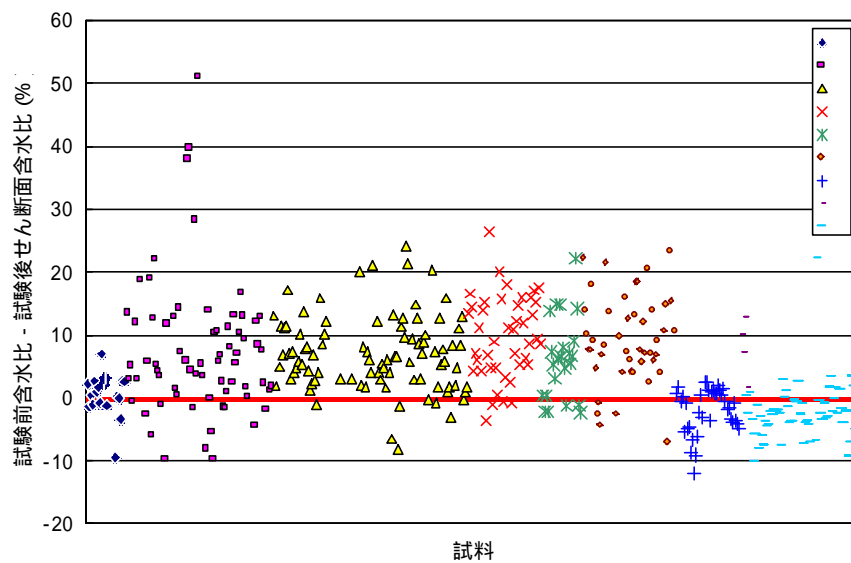


図6. 26 地質毎に見るリングせん断試験前後のせん断面含水変化の状況

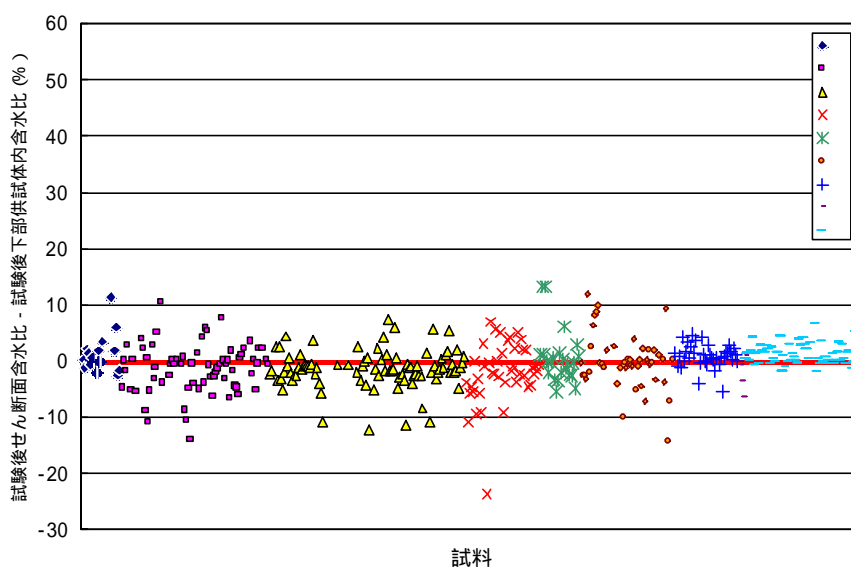


図6. 27 地質毎に見るリングせん断試験後のせん断面と下部供試体内含水状況の差異

図6. 28 に、地すべりのすべり面含水比の液性指数評価 II を地質毎に分けて示す。横軸は各試料を地質毎に区分し、試料番号順に整理したものである。図より、新第三系堆積岩地すべり(図中 ~ )のすべり面含水比は、おおむね  $II = 0.2$  を満足しているが、変成岩地帯地すべりのもの(図中 , )は、かなり値がばらついており、また塑性限界を大きく下回る試料も多数あることが解る。この変成岩地帯地すべりにおけるばらつきの原因には、変成岩試料が第三系堆積岩試料と比べると塑性指数が小さく(第三系  $IP=50$  以上、変成岩  $IP=15 \sim 30$ )、塑性限界からの含水比のズレが、相対的に新第三系のものに比べて大きく評価されたものと理解される。

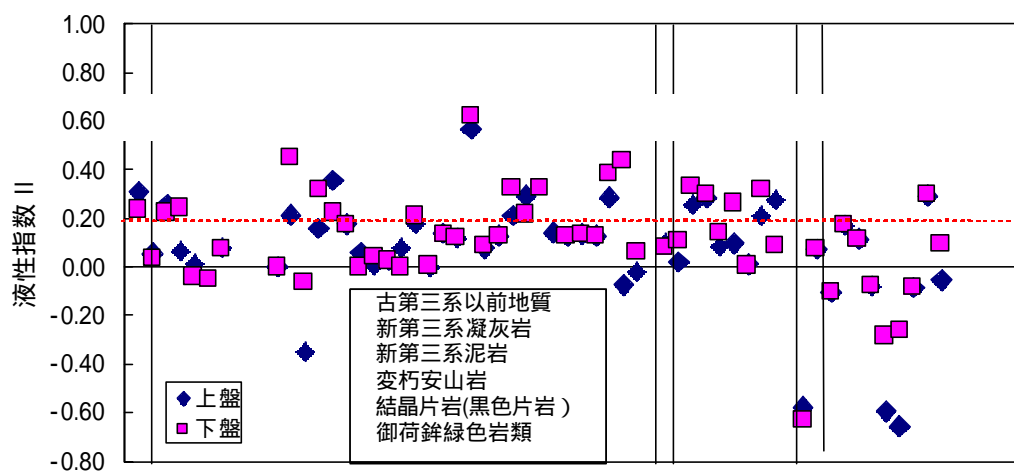


図6. 28 すべり面粘土の液性指数評価

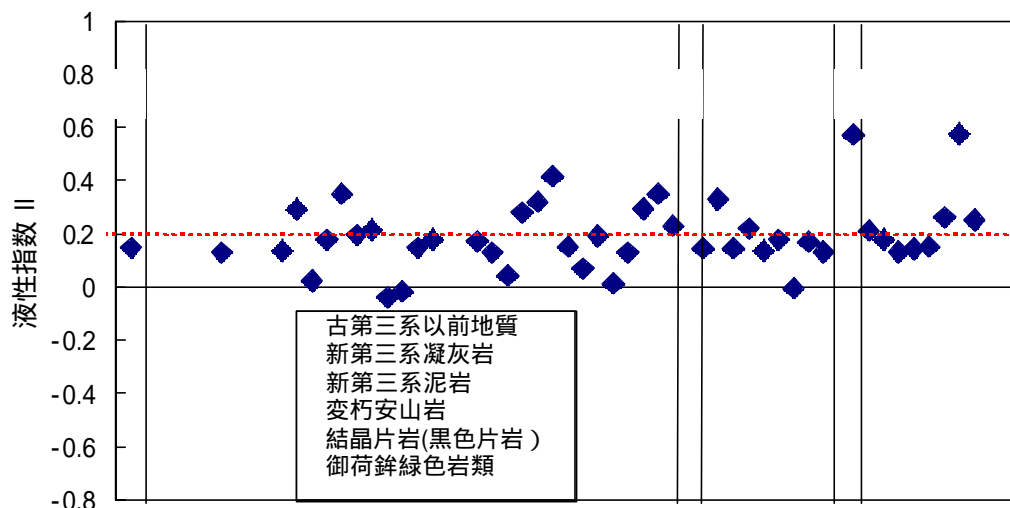


図6. 29 リングせん断試験後せん断面含水比の液性指数評価



図6. 29 には，リングせん断試験によって人工的に再構成された残留状態のせん断面を用いて液性指数の評価を行ったものを示す。図より，殆どの試料がすべり面の自然含水比と同様に液性指数  $II = 0.2$  を満足することが解る。また，この  $II = 0.2$  を満たした試料のせん断面は，実際のすべり面と同様の，構成粒子による定向配列構造を完成するものであった。

図6. 30 ，図6. 31 ，図6. 32 には，すべり面を挟む上下の土層についても含水比試験を実施し，同様に液性指数の評価を行った結果を取りまとめた。図6. 30 より，試料 1,8,9 のすべり面部含水比は，上位層や直下基岩層内強風化部よりも含水比が高く評価されたが，2,3,6,7 では逆に周囲より低い含水傾向を示した。また，試料 1,8,9 のすべり面自然含水比が，20%前後の値となるのに対し，その他の試料は 30%以上の含水比となり，両グループ間の含水特性の差異は極めて明瞭である。因みに，1,8,9 の液性限界が 30 ~ 40%と低いのにに対して，3,4,5,6,7 は全て 100%を上回る。これはすべり面の走査型電子顕微鏡観察にも明らかとなっており，3,4,5,6,7 試料すべり面は，全面がモンモリロナイトに被覆されるほどに膨潤性粘土鉱物を多量に含み，これが液性限界の値を引き上げ，自然含水比を高めの値としたものと考えられる。

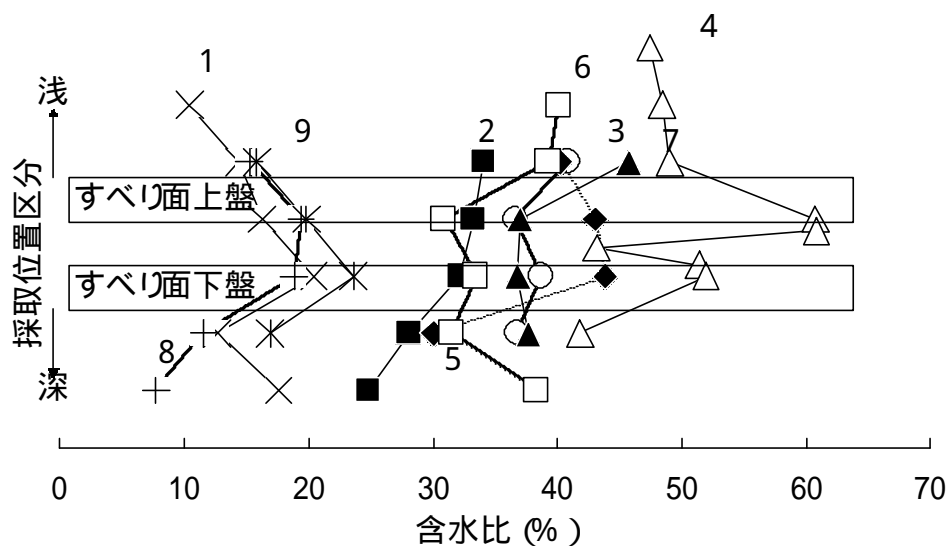


図6. 30 試料 1～ 9のすべり面周囲含水状況

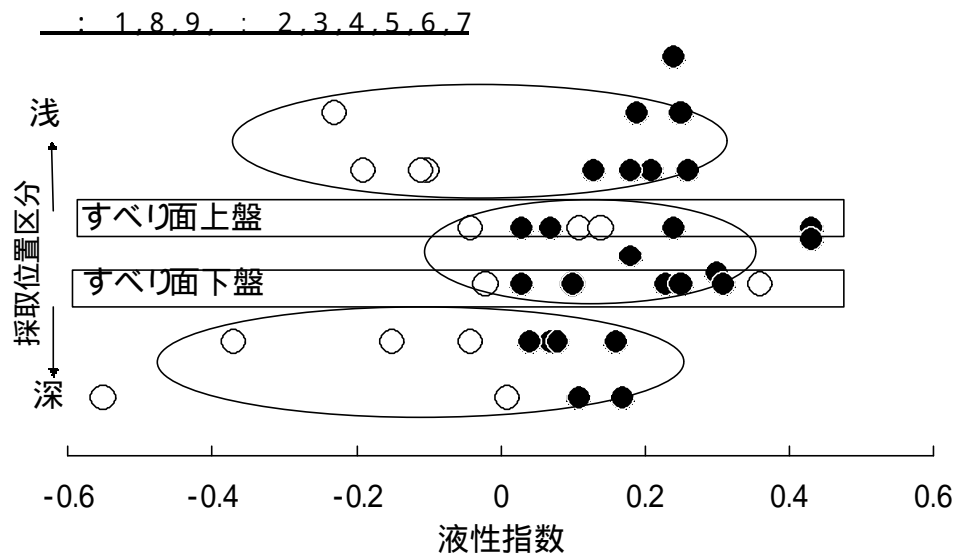


図6. 31 試料 1～ 9のすべり面周囲液性指数状況

さらに、図6. 31 は表中の各含水比から液性指数を算出し、含水特性の違いから 1,8,9 とそれ以外の各試験値を区別してプロットしたものである。図には、 $1, 8, 9$  の違いによらず、すべり面周囲においてばらついていた含水特性値が、すべり面部で  $0 < I_L < 0.2$  に収斂する傾向が示される。

以上より、すべり面の含水比、および残留強度を実現したせん断面の含水比は、地質の区別を問わず、液性指数評価で  $0 < I_L < 0.2$  の低含水状態へ収斂することが明らかとなった。

また、たとえすべり面の含水比が周囲の粘性土より高いとしても、それは膨潤性粘土鉱物等の含有による塑性限界含水比の上昇ゆえに他ならず、当該粘土の塑性限界近傍の含水比としての評価に代わりはない。言い換えれば、従来、すべり面部で含水比が高いと評価を得てきた事実こそが、すべり面にモンモリロナイト等の特殊な粘土鉱物が濃集している可能性を強く示唆するものと考えられる。

## 1 ジュラ系末層群, 砂岩頁岩層長野県

区分	WL=47.86%, Ip=30.53	含水比 (%)	液性指数
移動	黒色炭質粘土	10.42	-0.23
	黒色炭質粘土2	14.35	-0.10
すべり面(上)		16.24	-0.04
すべり面(下)		20.39	0.10
基岩	黒色炭質強化頁岩1	12.64	-0.15
	黒色炭質強化頁岩2	17.56	0.01

## 2 白亜系末層群, 砂岩頁岩層新潟県

区分	WL=82.3%, Ip=64.88	含水比 (%)	液性指数
移動	白色粘土	34.07	0.26
すべり面(上)		33.27	0.24
すべり面(下)		32.16	0.23
基岩	暗灰色粘土	28.10	0.16
	黄緑色粘土	24.80	0.11

## 3 新第三系中新統上世層群, 砂岩頁岩層新潟県

区分	WL=104.42%, Ip=74.1	含水比 (%)	液性指数
移動	地すべり粘土	40.83	0.14
すべり面(上)		36.60	0.08
すべり面(下)		38.71	0.11
基岩	粘土層	36.76	0.09

## 4 新第三系中新統下世層群, 泥岩, 凝灰岩(秋田県)

区分	WL=100.02%, Ip=69.25	含水比 (%)	液性指数
移動	黒色泥岩	47.43	0.24
	白色凝灰岩泥岩	48.40	0.25
	暗灰色粘土	49.01	0.26
上位すべり面(上)		60.74	0.43
上位すべり面(下)		60.83	0.43
間	暗灰色粘土	43.17	0.18
下位すべり面(上)		51.36	0.30
下位すべり面(下)		51.94	0.31
基岩	暗灰色粘土	41.81	0.16

## 5 新第三系中新統, 凝灰岩(長野県)

区分	WL=101.84%, Ip=77.54	含水比 (%)	液性指数
移動	凝灰岩粘土	40.23	0.21
すべり面(上)		43.04	0.24
すべり面(下)		43.82	0.25
基岩	青灰色凝灰岩	30.00	0.07

## 6 第四系火山噴出物, 変形安山岩, 泥岩(山形県)

区分	WL=103.56%, Ip=78.12	含水比 (%)	液性指数
移動	変形安山岩青灰色粘土	40.13	0.19
	変形安山岩青灰色粘土	39.29	0.18
すべり面(上)		30.93	0.07
すべり面(下)		33.47	0.10
基岩	すべり面構成黒色粘土	31.48	0.08
	黄緑色変形安山岩泥岩	38.37	0.17

## 7 第四系火山噴出物, 凝灰岩(山形県)

区分	WL=120.76%, Ip=86.14	含水比 (%)	液性指数
移動	赤紫凝灰岩粘土	45.73	0.13
すべり面(上)		36.95	0.03
すべり面(下)		36.81	0.03
基岩	青灰色強化凝灰岩	37.67	0.04

## 8 御蔵系凝灰岩類(愛媛県)

区分	WL=40.13%, Ip=20.93	含水比 (%)	液性指数
移動	凝灰岩	15.22	-0.19
すべり面(上)		19.40	0.01
すべり面(下)		18.84	-0.02
基岩	淡黄色強化部	11.53	-0.37
	暗黄色強化部	7.74	-0.55

## 9 秋田系凝灰岩, 黒色片岩(徳島県)

区分	WL=34.11%, Ip=16.54	含水比 (%)	液性指数
移動	黒片起層粘土	15.82	-0.11
すべり面(上)		19.81	0.14
すべり面(下)		23.59	0.36
基岩	強化黒色片岩	16.89	-0.04

図6. 32 各種地すべりのすべり面を挟んだ地質構造と含水比, 液性指数

## 6. 4 まとめ～残留強度の定義について～

本研究で開発したすべり面せん断試験を行うことで、従来実施されることが希であった不攪乱すべり面を用いての直接せん断試験が、以前に比べ、格段の精度と簡便さで実施することが可能となった。また、この試験に供するすべり面試料を採取するために、全国の集水井施工現場に赴き、実際のすべり面に数多く接することで、多くのすべり面に関する知見を得、また研究の方向性や手法に関して多くの着想を得ることができた。

本研究で実施したすべり面せん断試験以外の研究手法は、その一つ一つがすべり面の構造に関するアプローチであり、相互に深く連関する。また、有機的に繋がる各研究手法を様々な地質に属する現場群が下支えし、単一現場を眺めるだけでは辿り着くことが出来ない多くの成果に筆者を導いた。

得られた成果は、第8章総括において整理することとし、考察の章のまとめとしては、本研究を通じて知り得た様々なすべり面の情報に基づき、すべり面が如何なる面であるかについて検討を行う。

まず、本章第1節、及び第4章、第5章に述べた通り、筆者が含スメクタイトすべり面と呼ぶ新第三系堆積岩地すべり、及び熱水変質安山岩地帯地すべりにおいては、すべり面周辺に分布するスメクタイトの存在が、すべり面の構造、発達過程、さらにはせん断強度特性に強く影響を与えることが解った。こうしたすべり面は、ほぼ全面に及んでスメクタイトが被覆層を生じており、電子顕微鏡による観察ではスメクタイトが示す独特な縄目模様や襞状の構造が観察されている。また、リングせん断試験の試験経緯からは、ピーク強度の発現時点でスメクタイト薄層形成の兆候は見られず、残留強度への強度低下過程でスメクタイト薄層が形成していくことがせん断抵抗力 の変化として計測された。

また、本章第2節では、同様にスメクタイトを含有する新第三系すべり面粘土試料から、敢えて粘土含有率が低めの試料を選び、フルイ通しや水簸処理によって段階的に試料の最大粒径を変化させて、リングせん断試験を行った。その結果、試料に含まれる最大粒径の変化がせん断面の粗度に大きく影響することが解った。しかしながら、面粗度の違いによるせん断抵抗角の変化よりも、せん断面にスメクタイト薄層を生じるか否かが、せん断強度により強く影響することも示された。

続く第3節では、すべり面におけるスメクタイトの薄層形成や、定形鉱物の粒子配向挙動、さらに以下に示す多くの研究者による指摘事項が、せん断面の間隙比変化とどのように関連づけられるかを示すため、間接的な手法ではあるが試料の含水比に着目してデータの整理を行った。

すべり面の構造（粒度構成）に関する他の研究者による指摘の一例

- ・山崎（2000<sup>80</sup>）: 変成岩地帯地すべりの地すべり粘土について詳細な粒度分析を実施して、すべり面部に粘土含有率が高まる傾向があることを指摘（図6. 33 に引用図）。
- ・大河原他（1996<sup>75</sup>）: 風化に強く、粘土鉱物への変化が起こりにくいと考えられる石英の含有率が、すべり層（地すべり粘土で）において減少する傾向にある。
- ・守随（1999<sup>81</sup>）: 新第三系凝灰岩地帯の地すべり事例には、地すべり移動量の増大に伴い、すべり面粘土から粗粒径成分が徐々に減少する傾向がある（擦痕状 粘土混じり礫状 礫混じり粘土状 粘土状）。
- ・佐々（1993a<sup>82</sup>）、1993b<sup>83</sup>、1996<sup>84</sup>）、岡田（1999<sup>85</sup>）、2002<sup>86</sup>）: 粗粒径成分が卓越する試料を用いての室内高速リングせん断試験のせん断状況から、粒子破碎によりせん断面の微細粒径成分が増大する挙動を確認。
- ・低含泥率土石流で生じた粒子流堆積物構造中に一般に知られる逆級化現象<sup>87</sup>）。

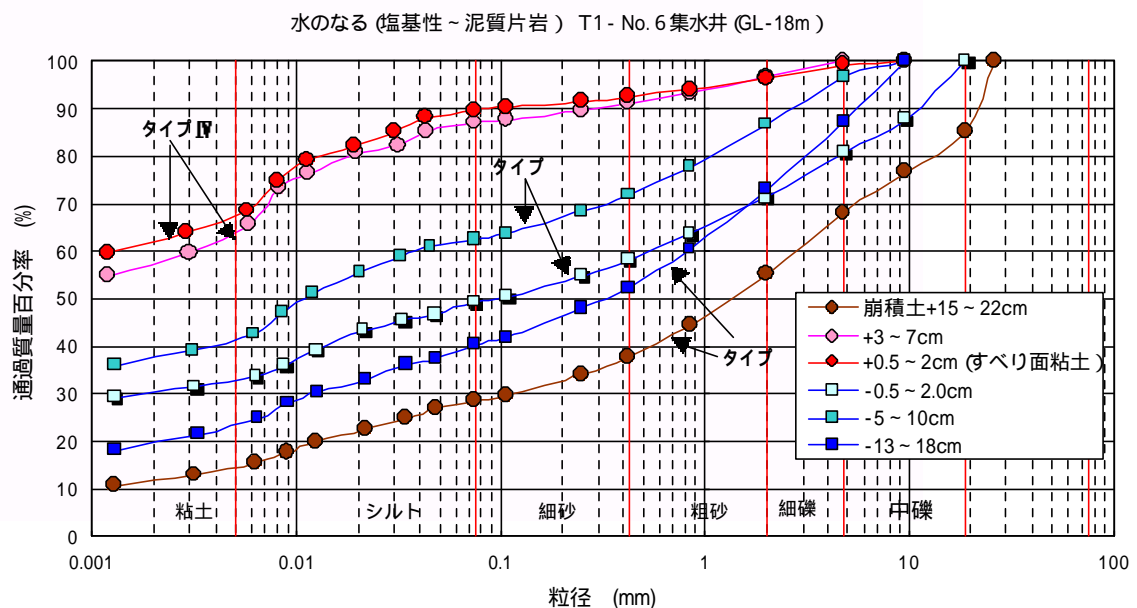


図6. 33 すべり面からの距離と粒径加積曲線（徳島県水のなる）[山崎（2000<sup>80</sup>）を引用]

結果は、すべり面の含水比、および残留強度を実現したせん断面の含水比は、地質の区別を問わず、液性指数評価で  $0 < I_L < 0.2$  の低含水状態へ収斂することが解った。また、すべり面の周囲の自然含水比との比較では、変成岩地帯地すべりや古第三紀以前の地質における地すべり粘土で、すべり面部の自然含水比が、周囲の自然含水比よりも高めとなるのに対し、スメクタイトを含有することを確認した主に新第三系堆積岩地すべりの自然含水比は、すべり面部が周囲に比べて含水比が低下する傾向が示された。

さらに、リングせん断試験に用いた試料の試験前含水比、試験後せん断面含水比が、ともに概ね 40%以上となることを特徴とする新第三系堆積岩地すべり（地質 Ⅰ～Ⅲ）、熱水変質安山岩起源地すべり（地質 Ⅳ）、さらにモンモリロナイト混合試料（Ⅴ）やカオリナイト混合試料（Ⅵ）では、ほとんどの事例で試験後せん断面含水比が、試験前含水比に比べ若干低下する傾向が見られる。また、試験前、試験後ともに 40%以下の低含水傾向を示す変成岩地帯地すべり（地質 Ⅰ～Ⅲ）やマサ土（Ⅶ）では、試験前後でほとんど含水傾向が変化しないか、やや試験後せん断面含水比が増加する傾向が確認された。

さらにまた、せん断面の下位 5mm の位置を狙いとした試験後下部供試体内含水比と、せん断面含水比の比較では、新第三系堆積岩地帯地すべり（地質 Ⅰ～Ⅲ）、及び熱水変質安山岩地すべり（地質 Ⅳ）で、概ね両試料間の含水比は一致するものの、若干、せん断面含水比が下部供試体内含水比よりも低めの傾向を示した。逆に、変成岩地帯地すべり（地質 Ⅰ～Ⅲ）は、せん断面含水比が下部供試体内含水比よりも高めの傾向となっていた。

以上より、すべり面粘土にスメクタイトを含有する新第三系堆積岩地すべり、及び熱水変質安山岩地すべりと、スメクタイトを含まず、地すべり粘土中に粗粒径成分が顕著に混在する変成岩地帯地すべりについて、それぞれの特徴は次の様に要約できる。

#### 含スメクタイトすべり面

- ・粘土含有率が高く、粒度分布の幅は比較的狭い（4.1 ,5.1.1）。
- ・粘土中にスメクタイトを含有し、残留状態せん断面を形成した後は、せん断面にスメクタイトの被覆層を生じる（5.2）。
- ・スメクタイトの被覆層を完成したすべり面や残留状態せん断面のせん断抵抗角は、スメクタイトの残留せん断抵抗角である  $\phi = 5^\circ$  前後となる（4.1 ,4.2 ,5.1.2 ,5.2 ,6.1 ,6.2）。
- ・粘土含有率が低く、スメクタイトの被覆が不完全なせん断面に発揮されるせん断抵抗角

は、せん断変位の増大に対して強度収束した状態でも  $10^{\circ}$  前後と大きい(4.2.3 ,6.1 ,6.2 )。

- ・ すべり面は、大周期、大振幅の起伏構造が影響して大きな粗度と評価されるものの、スメクタイトの被覆が完成している場合があり、こうしたすべり面のせん断抵抗角は起伏の影響を受けずに  $5^{\circ}$  前後となる (5.2.1 ,5.2.2 ,5.3.4 ,6.1 ,6.2 )。

- ・ すべり面の自然含水比、及び残留状態せん断面の含水比は、面周囲の含水比より低めである (6.3)。

- ・ すべり面、及び残留状態せん断面の含水比は、液性指数の評価で 0.2 以下となる場合が多い (6.3)。

#### 含粗粒径成分すべり面

- ・ 粘土含有率は低く、最大粒径が礫に至る程に粒度分布の幅が広い (4.1 ,5.1.1)。

- ・ 多くのすべり面観察事例、リングせん断試験の試験後せん断面観察より、すべり面部には細粒分が卓越する傾向がある (5.2.1)。

- ・ 面の粗度がせん断抵抗角の大小に強く関係している (5.3.3 ,5.3.4)。

- ・ すべり面の自然含水比、及び残留状態せん断面の含水比は、面周囲の含水比より高めである (6.3)。

従来、残留強度へ向かうせん断面形成の過程では、粒子の再配列(定向配列)に起因する間隙比の減少が生じ、残留状態を実現する段階に至れば最小間隙状態に至るとの理解がなされてきた。しかしながら本研究において、残留状態のせん断面形成過程では、構成粒子の定向配列に加え、粒度構成が大きく変化し、すべり面やリングせん断試験等による残留状態せん断面は、初期状態に比べ細粒分含有率が增大することが観察された。こうした細粒分含有率の増大は、一般には間隙比の増加と関連付けられるものであり、定向配列するプロセスで間隙比が最小間隙比に向かう方向性とは相容れない。

そこで、本研究で得たすべり面の特徴を元に、リングせん断試験で残留状態せん断面を形成する際の構造イメージを図6. 34 ~ 図6. 36 に示す。まず、含粗粒径成分すべり面の形成を模式的に示す図6. 34 の初期状態には、粒径の違いが顕著な定形粒子が規制条件上(基岩上)に均質に分散する様子を示した。モデルでは試料中は完全に飽和していると仮定している。この状態からせん断変位を受けると、粒径幅が広い試料であることに起因して、大粒径成分ほど上位に移動、細粒分がせん断面近傍に凝集するといった逆級化の粒子再配列が生じると予想される(図6. 34)。含粗粒径成分すべり面を代表する変成岩地帯



地すべりでは雲母鉱物が卓越するため、この再配列は各粒径成分の配置換えとともに、粒子自体の定向配列も合わせて進行することが考えられる。すべり面やリングせん断試験後せん断面の含水比が周囲の含水比よりもせん断面で若干高まる傾向にあることを考えると、逆級化を生じてせん断面部に細粒分含有率が高まり、間隙比が増大したものと推察される。

これに対し、図6. 36 に示す含スメクタイトすべり面の模式図では、同様のせん断面への細粒分凝集とともに、特にスメクタイトがせん断面に濃集して被覆層を形成することを表現した。そのため、スメクタイト被覆層が完成した段階では、逆にせん断面周囲にスメクタイト含有率が低下する層を生じ、面周囲の間隙水含水比が相対的に高まった可能性が指摘される。勿論、従来通り定向配列構造の形成によって間隙比が減少したと理解することも可能であり、すべり面の自然含水比や、残留状態せん断面含水比が塑性限界付近の含水比に収斂する事実は、上述の二つの挙動が同時に発生していると考えることが望ましい。尚、粒径幅が変成岩地帯地すべり粘土に比べ狭く、またせん断抵抗力が小さいスメクタイトの影響により、含粗粒径成分すべり面ほどの顕著な逆級化を生じていない可能性もある。

因みに、含粗粒径成分すべり面粘土、及び含スメクタイトすべり面試料ともに、リングせん断試験時に著しい正のダイレタンシー挙動を生じるものはほとんど無く、体積変化はせん断初期に負のダイレタンシー（インターロッキング）を発生し、そのまま徐々に収束する。この試料全体の体積変化を見る限りでは、含スメクタイト、含粗粒径成分すべり面の別に無関係に残留状態へ向かって間隙比が低下する様に理解されるが（図6. 35 参照）、こうした場合、先述した通り、含粗粒径成分試料やすべり面の場合に、せん断面で含水比

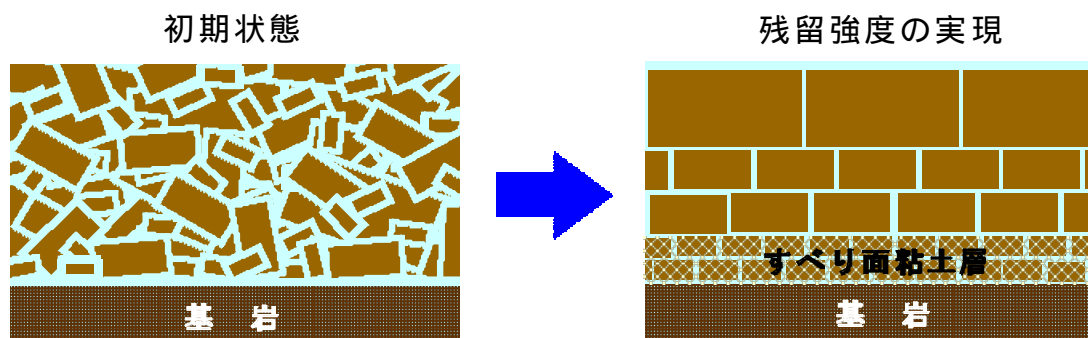


図6. 34 含粗粒径成分すべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図

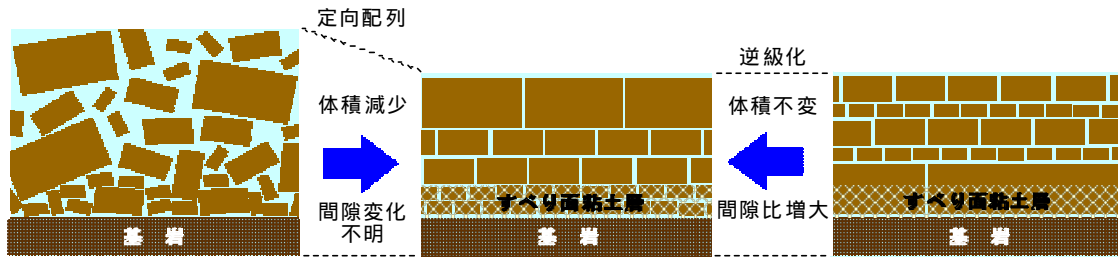


図6. 35 含粗粒径成分すべり面粘土試料の残留状態へ向かう際の間隙比変化模式図

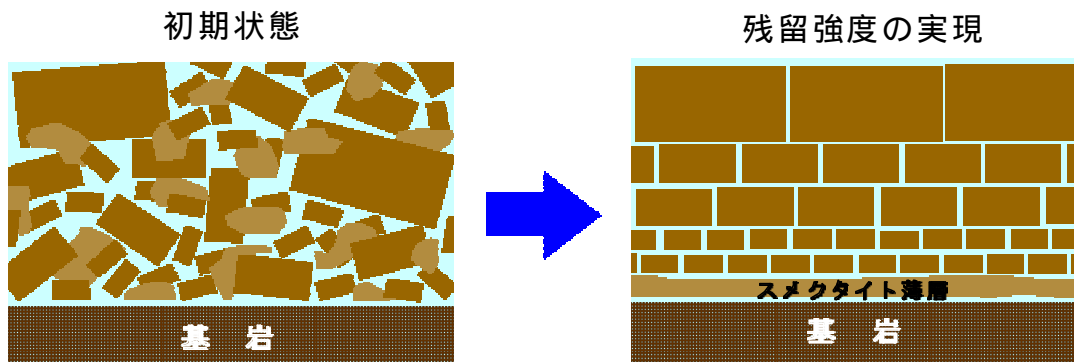


図6. 36 含スメクタイトすべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図

が増加する傾向を説明できない。よって、試料全体（リングせん断試験の場合、初期条件層厚 2cm）の体積変化に生じるせん断初期の沈下傾向は、せん断面での粒子再配列のみならず、試料全体の回転せん断に伴うねじれ変形にも影響を受けているものとする。

以上に示したすべり面や残留状態せん断面のイメージからは、従来、せん断強度の収束状態と一義的に関連づけられた残留強度の定義が、定義としては未だ十分でないことが指摘される。すなわち、対象試料が含スメクタイト試料であるならば、定形粒子群の挙動としての定向配列と、スメクタイトが面に凝集する挙動の双方の完成度を正しく評価したものでなければならず、これらは必ずしもせん断変位の多寡によってのみ完成をみる現象ではないことに留意しなければならない。本章第1節に示したとおり、荷重条件の違いによって、同一試料でありながらスメクタイト被覆を完成するもの、完成出来ないものが生じたり、試料に含まれるスメクタイト量が、被覆完成の可否を決めたり（本章第2節）する点を考慮した残留強度の定義が本来望まれる。

さらに、変成岩地帯地すべりに代表される含粗粒径成分すべり面においては、せん断変位の大小とともに、拘束条件（土被り荷重や試験時垂直応力等）によって、せん断面部を

構成する卓越粒子のサイズや粒度分布が変化することが予想される。先の含スメクタイトすべり面についても考え得ることであるが、間隙水圧挙動、これに伴う有効応力の変化も、すべり面部やせん断面の定向配列構造に影響を与えと考えられる。

つまり、従来、残留せん断強度と認識されてきた大变位による収束強度とは、単に与えられた諸条件の中で得られた一つのせん断応力収束強度であって、条件が変わり、粒度構成、スメクタイト被覆の程度に変化を生じれば、さらなる強度低下、逆に強度強化の可能性を秘めていることを認識せねばならない。勿論、こうした条件変化を生じて、さらなる強度低下が起こり得ない真の最小強度としての残留強度は存在する訳であり、この強度に到達しない全てのせん断強度は中間強度と理解される。

但し、実務においては、現状評価が重要なテーマであり、現状のせん断強度の理解のためには、設計対象となる原位置すべり面に加わる諸条件を把握し、これを試験条件に反映した上で得られるせん断応力の収束強度が意味をもつ。こうした強度を単に中間強度と表現すべきか、他の用語を充てるべきかは別としても、原位置強度を室内試験で再現することに多くの努力が払われるべきと考える。

本稿では、採取した含すべり面不攪乱試料中のすべり面と試験時せん断面を一致させ、直接的に原位置すべり面強度を計測することを行った。これにより、新第三系堆積岩地すべりの多くがスメクタイトの残留せん断抵抗角にほぼ一致するものとなり、かつすべり面にはスメクタイトの被覆がほぼ完成する状況が明かとなった。この結果は、計測されたせん断抵抗角が当該すべり面の真の残留せん断抵抗角であることを意味している。ただし、地すべり発生の素因として、元々スメクタイト薄層が存在していたのか、地震力や浸食地形の発達に伴い初生すべりが生じ、この滑動中にスメクタイト薄層を形成したかについては、本稿で行った検討結果から考察を行うことは出来ない。

また、変成岩地帯地すべり、新第三系凝灰角礫岩地帯の地すべり、及び縁辺部採取の含スメクタイトすべり面等では、せん断面に未だ粗粒径成分が多く介在するもの、スメクタイトの被覆が不完全なもの等を多く含み、試験結果を真の残留強度と呼べない状況にあった。こうした産状を呈する面に対して、リングせん断試験で現場の諸条件を再現することには多くの困難を伴うが、今回開発したすべり面せん断試験は、直接的に原位置せん断強度を計測できる点が極めて有効であることが解った。

## 7. すべり面構造把握に向けた今後の取り組みと安定解析への適用

この章では、すべり面に関する構造理解をさらに深めるに当たって、今後、検討していくテーマを明らかにするとともに、考察の章で述べた残留状態とは如何なる状態かという成果を受けて、実際の地すべり対策事業を進める上で、土質試験結果として得られたせん断強度パラメータをどのように活用出来るかについて検討を行う。

すべり面に関する様々な調査・試験研究の成果は、リングせん断試験による人工的に再現された残留状態せん断面に関する研究成果とともに、実務における地すべり安定解析や対策工設計等に反映されることが強く求められる。中でも、地すべりの安定解析を行う際に、設計せん断強度パラメータとして残留強度の試験結果を利用する試みについては、宜保他(1983<sup>88)</sup>, 1984<sup>15)</sup>, 1987<sup>60)</sup>, 中村他(2004<sup>89)</sup>, 佐野他(1996<sup>62)</sup>, 大河原他(2000<sup>11)</sup>, 申(1989<sup>90)</sup>, 1995<sup>91)</sup>, が熱心に推奨するところである。

### 7. 1 さらにすべり面の構造理解へ向けて

本研究では、開発したすべり面せん断試験機を用いて、すべり面のせん断強度を直接的に計測し、さらに得られたすべり面せん断抵抗角と残留せん断抵抗角との関係を検討するためにリングせん断試験による残留強度の計測を行った。また、すべり面やリングせん断試験から得た残留状態せん断面について、走査型電子顕微鏡による観察、レーザー変位計を用いた表面形状の計測を行った。

こうした試みを日本全国の様々な地質において実施する内に、力学的特性やすべり面の形状に地質学的な同一性が確認された。そこで、すべり面を内包するすべり面粘土に対して、粒度分析、コンシステンシー特性試験、含水比試験、X線粉末回折分析を実施し、これらのデータを地質毎に分類整理する中で、すべり面の力学的特性、すべり面の形状が物理特性や鉱物組成と密接に関わることが解った。

しかしながら、日本国内、またこの地球上には、様々な気象条件、地形・地質条件が存在しており、本稿の考察に述べたすべり面の構造は、日本国内における一部の事例に過ぎない。今後も更なる事例の収集に精力的に励まなければならない。特に、国内でも災害多

発地域に数えられる変成岩地帯での地すべりや崩壊に関しては、本稿における成果は導入に過ぎず、すべり面の確認作業の精度向上を含む、多角的な研究が今後益々実施されなければならない。同様に、スメクタイトを含むものの粘土含有率が少なく、新第三系堆積岩地すべりとはすべり面構造に差異を生じる古第三系堆積岩地すべりにおいても、まだまだ検討できた事例は少なく、データ収集に力を注ぎたい。

また、すべり面の土質力学的特性に関する研究手法としては、従来、多くの研究者によってアプローチされてきた塑性指数と残留せん断抵抗角との関係について、本稿では含スメクタイトすべり面粘土について3つの群を見だし、各群の特徴を規定する項目として、粘土中に含まれるスメクタイト量と細砂以上粒径成分の含有率があることを指摘した。すべり面粘土中のスメクタイト含有率や種類（Na-モンモリロナイト、Ca-モンモリロナイト等の判別）を精度高く計測・分析することは極めて重要であり、蛍光X線分析装置による構成元素の種類・含有量の検証、試薬によるスメクタイト量・種類の把握、CEC試験を用いたスメクタイトの定量といった試みを進めていきたい。すべり面粘土中に含まれるスメクタイト含有量が正確に計測されれば、粒度構成、せん断抵抗角との関係がより明確になるとともに、実務において用いるせん断抵抗角の評価が一層、精度の高いものとなる。

変成岩地帯地すべりにおいては、イライトや緑泥石、石英、長石、角閃石といった定形鉱物の粒度構成がせん断抵抗角に強く影響を与える。先述のスメクタイトと同様、各種鉱物の鉱物組成に関する検証を深めるとともに、こうした定形鉱物については、各鉱物の粒径とせん断面の粗度との関係に着目する必要がある。本稿では、すべり面やリングせん断試験後せん断面の小範囲（最大7mm四方）に対して、レーザー変位計を用いた表面形状計測システムを構築し、粗度（算術平均粗さ）の計測を行った。変成岩地帯地すべりのすべり面が有する面粗さは、数cmから、時に数mに及ぶ大きなウネリの構造を有する。こうした長大周期、大振幅の表面形状計測を成し得るシステムの構築も、今後、重要なテーマである。

リングせん断試験による残留せん断強度発現のメカニズムを探る取り組みは、多くの研究者が今も熱心に行うところである。残留強度の定義について考察の章にも述べたとおり、試験条件の様々な違いがせん断面の構成粒子や構成鉱物に影響を与える。初期状態試料の物理特性、初期含水比、圧密荷重（過圧密比）、せん断時荷重、せん断速度、動的荷重等

の試験条件が、達成される残留強度とどのような関係にあるか、個々に抽出を試みるきめ細かい検証が必要である。対象試料にとって、真に最小のせん断抵抗角を残留強度とした場合、最小の残留強度を規定する因子が何であるか、またどのような試験条件を与えることで、真の残留強度を達成できるかといったテーマを掲げ、リングせん断試験を行ってきたい。これに加え、実際の現場で想定し得る諸条件についても実際のすべり面粘土に関するデータ収集を行い、真の残留せん断強度に対する現状のすべり面せん断強度の評価と、将来予想される真の残留強度へ向けた更なる強度低下の可能性についても併せて検証を行いたい。

現状のすべり面強度の計測に当たっては、開発したすべり面せん断試験が非常に有効であると考えられる。しかしながら、開発機の仕様は通常の地すべり調査で採用されるボーリングコア径よりも大きく、本試験を実施するに当たっては、集水井や切り土法面からのすべり面粘土採取が不可欠であった。そこで、調査ボーリングコア径を試料径（例えば 60mm や 40mm）とする試験機の開発・改良にも着手したいと考えており、図7. 1、図7. 2 はその試作機のパーツである。

地すべりの滑動を考えた場合、すべり面の構造とともにすべり面に働く間隙水圧の発生・消散のメカニズムについても重要なテーマである。地すべり現場においては、一般に地下水位観測が実施され、観測孔内に形成する水頭高をもってすべり面に働く間隙水圧と認識されている。こうした水位観測の技術についても日進月歩の向上が見られ、申(1989<sup>90</sup>)が提案したすべり面部にのみ地下水流入孔（ストレーナー）を確保し、その上下を遮水する仕上げ（水位観測専用孔）[ 従来、水位観測は変位観測（ヒズミ観測）との併用仕上



図7. 1 60mm仕様試験機のせん断箱状況

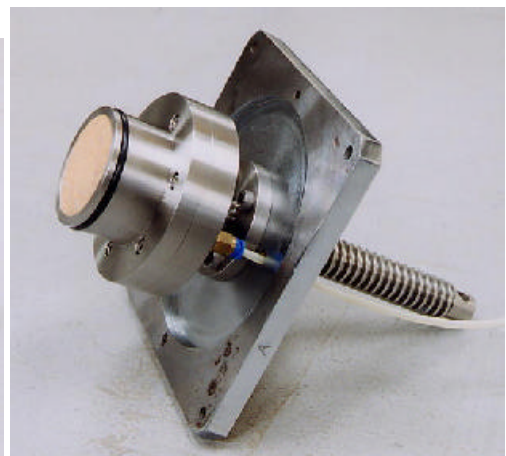


図7. 2 60mm仕様の底板昇降ジャッキ



げが主流であった ] ) での観測体制が充実しつつある。また、地すべり滑動時の水位変動が短時間に大きな変動を生じること留意し、週数回程度の手計り観測から自動・自記式観測器の導入による連続データの収集も近年充実しつつある。

現場からの貴重なデータが多く収集され始めた趨勢を受け、室内実験レベルでもせん断時の間隙水圧挙動を捉える試みが着手され始めた。通常の一面せん断試験や、三軸圧縮試験では、せん断変位の増大に伴いせん断面の断面積が減少する。唯一リングせん断試験は、せん断中に断面積変化が無い試験であり、せん断面の間隙水圧変動を計測し易い構造を有する。図7. 3 は柴崎他 ( 2002a<sup>92)</sup>, 2002b<sup>93)</sup>, 2003<sup>94)</sup> ) が、間隙水圧計測を可能にするため、幾つかの改良を行ったリングせん断試験機のせん断箱周辺部の構造である。図の仕様では、せん断面の極近傍に間隙水圧計のニードル先端が設置されている。図7. 4 は、計測されたせん断時の間隙水圧変動の一例である。

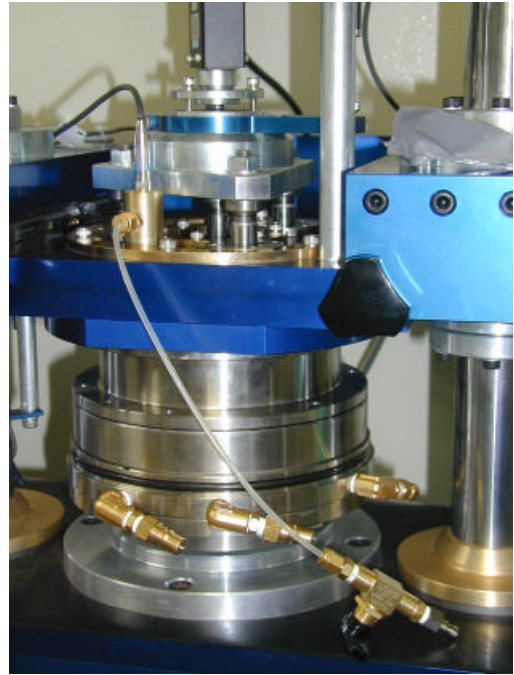


図7. 3 間隙水圧計測対応試験機

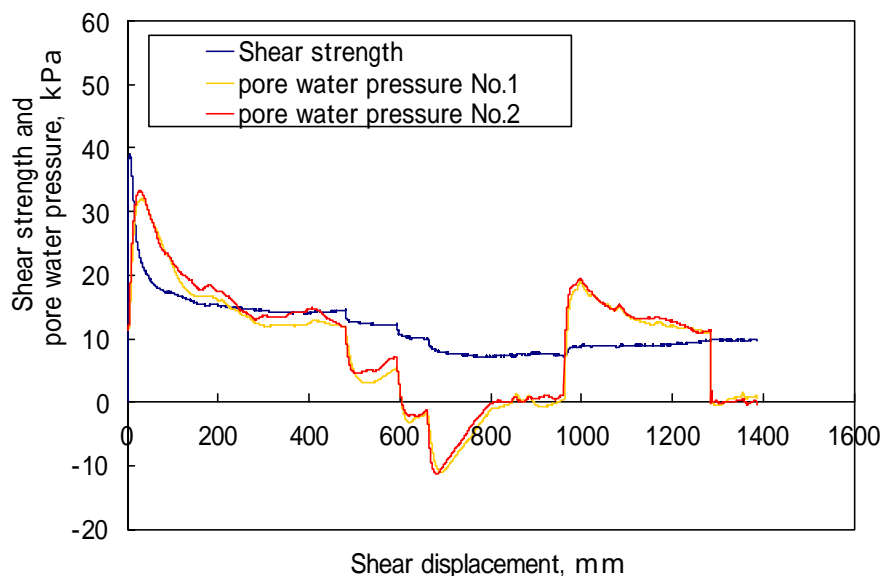


図7. 4 間隙水圧計測対応リングせん断試験機による間隙水圧計測事例

## 7. 2 地すべり安定解析における土質試験結果の利用について

第6章の考察に述べたとおり，残留状態せん断面を形成する過程では，ダイナミックな構造変化が生じると考えられる。地すべりのすべり面においても，地すべり滑動に伴う同様の構造変化が生じることは容易に想像されるが，地すべり移動土塊の底面を構成するすべり面は，すべり面深度，すべり面傾斜，地質学的条件等，すべり面の部位によって，すべり面形成環境が大きく異なっている。

より具体的には，すべり面粘土に含まれる細砂以上粒径含有率の多寡，さらには新第三系堆積岩地すべり等におけるスメクタイト含有状況は，地表に近い（地質学的規制条件から離れた位置となる）すべり面縁端部（滑落部，末端部や側壁部）において，舟底型底面部（縦・横断上ですべり面が直線的に表現できる区間であり，地質学的規制条件を伴うすべり面部位）の状況とは，明らかに異質なものとなる可能性がある（exa.第3章の平山の事例）。

移動土塊縁端部のすべり面部位におけるせん断強度パラメータが，明瞭な地質学的規制条件上に位置する板状すべり面部位と異なる可能性を孕む地すべり安定解析において，設計せん断強度パラメータとして土質試験結果を利用する際には，当然，多くの制約や適用条件が付記されなければならない。本節では，試験結果を設計に適用した場合の問題点を示し，期待される将来の安定解析手法に向けた展望を述べる。

### 7. 2. 1 逆算解析の方法

まず，現行の地すべり安定解析において採用されている土質強度パラメータ，特にせん断強度パラメータ  $c'$  の決定法には，次のような方法がある。

$$c' = 1/10 \cdot h \text{ 法}$$

建設省河川砂防技術基準（案）同解説（計画編）<sup>95)</sup> に採用され，最も一般的に利用されてきた土質強度の決定手法である。式中の  $h$  はすべり面深度（m）によって与えられ，また  $c'$  は従来単位法に準拠した  $\text{tf/m}^3$  によるものである。この式は，渡らが収集した土質試験値（一軸圧縮試験結果）によって導かれた経験則であり（山田他（1971）<sup>96)</sup>），単に平均的なすべり面深度を与えることで，個人差無く粘着力が決まるという決定手法であ

る。極めて簡便な手法であり、実務においてしばしば利用されているが、決定された  $c'$ 、及びこれから逆算される  $\phi'$  に科学的な根拠を与えられない。

#### 交点法

地すべりの活動時および停止時の安全率を与えて  $c' - \tan \phi'$  図を描き、その交点をすべり面の土質強度パラメータ  $c' \cdot \phi'$  とする方法である。この方法も、過去には利用された事例を見るが、この問題点は、

- ・活動時安全率および停止時安全率をどのように与えるかで個人差を生じる。正しくその状態を規定し得るのは臨界状態のみであり、活動中および停止中の斜面安全率は本来決定できるものではない。
- ・二つの  $c' - \tan \phi'$  図の交点座標が、すべり面のどのような状態を反映したのか説明できない。すなわち、すべり面を残留状態と捉えるならば  $c' = 0$  となり、この状態が同一すべり面において二種類存在することを説明できない。

以上より、交点法も単なる簡便さを優先させた便法と位置づけられる。

$c' = 0$  ,  $\phi' =$  土質試験値とする手法 ( 申 ( 1995 )<sup>91)</sup> )

中・古生層～結晶片岩地帯での地すべりや、第三紀層地帯地すべりであっても冠頭部亀裂が観察され、かつ末端部押出し現象が見られる段階では、すべり面せん断強度は残留強度に低下しているとしてよいとの解釈から、上述のような地すべりのすべり面せん断強度を  $c' = 0$  として  $\phi'$  を逆算する手法である。但し、逆算的に求められた  $\phi'$  を、並行して行うすべり面粘土の土質試験結果と比較し、両者に差異を生じた場合は安定解析条件を徹底的に検討し直すことが要求される。

残留係数法 ( Skempton ( 1964 )<sup>2)</sup> , 宜保他 ( 1984 )<sup>15)</sup> , 佐野他 ( 1996 )<sup>62)</sup> )

すべり面に期待される実際の平均せん断強度を、ピークせん断強度値および残留せん断強度値と比較することで、問題としている粘土の強度がピーク値対応なのか、残留値対応なのか、あるいはその中間領域の値なのかを、0 ～ 1 の間に値をとる残留係数  $R$  をもって定義し、すべり面の平均強度として  $c' - \tan \phi'$  図と、ピーク強度-残留強度線分との交点を提案する方法である。

すべり面の強度劣化の問題を考慮した論理的、かつ現実的な手法であるが、

- ・ピーク強度の計測方法（採取試料と試験条件）
- ・粘着力および内部摩擦角が，ピーク強度から残留強度へ直線的に（一定の割合で）強度低下すると仮定しているが，土質力学的に意味のある仮定といえるか定かではない。
- ・すべり面の平均的な強度が設計せん断強度と決定されるものであり，決定された強度パラメータは， $R = 1$  の設計条件を除いて，常にすべり面から計測された残留強度よりも高めの強度設定がなされる。地すべり安定解析は，地すべり対策工事の設計に利用されるものであり，地下水排除工の設計等において危険側の強度パラメータを決定することとなる。

## 7. 2. 2 逆算解析結果と土質試験結果の関係

本研究では，地すべりのすべり面を一面せん断試験の試験時せん断面に一致させ，これの定体積せん断試験（一面CU）を実施することが可能な一面せん断試験機の開発を行った。そして，集水井等から採取した不攪乱すべり面試料を用いた結果が，地質学的規制条件を有する板状のすべり面区間において，せん断抵抗角が高い等質性を示すことを見いだした。ここでは，高い等質性を示す同一すべり面の試験結果群が，安定解析で要求される平均的な設計せん断強度パラメータとして適用が可能かを検討する。

### (1) 逆算解析条件について

ここに対象とした 50 現場の逆算解析結果は，全ての事例において，試験値が何らかの形で考慮される以前の試算結果を用いており， $c'$ ， $\phi'$  の強度決定には，50 現場中 19 現場の解析事例で粘着力が考慮され，他事例は残留強度ということで  $c' = 0$  として  $\phi'$  が逆算されている。また，安定解析の条件についても現場ごとに種々異なっており，以下に，逆算解析の信憑性に影響を及ぼすと予想される解析条件に関して現場情報を列記する。

安定解析式：一搬 Janbu 式(43 事例)，Shin-Janbu[一体スベリ]式(4 事例)，不明 3 例  
断面数：1 断面解析(19 事例)，Lambe-Whitman 法による近似三次元解析(26 事例)，不明 5 例

水位観測：自動観測(35 事例)，手計り観測(9 事例)，不明 6 事例

水位観測精度：水位観測専用孔(27 事例)，非専用孔(17 事例)，不明 6 事例

すべり面形信憑性：確定すべり面(34 事例)，推定すべり面(12 事例)，不明 4 事例

## 2) 試験値と逆算解析結果の関係

図7.5は、すべり面せん断試験の結果得られたせん断抵抗角 $\delta$ と、当該現場において試験値を考慮することなく実施した逆算解析から得られたせん断抵抗角 $\delta$ の関係を示した図である。図に示されたプロット全般から受ける傾向は、両せん断抵抗角はほぼ一致するか、逆算解析結果が当該現場のすべり面が有するせん断抵抗角よりも大きめに評価される事例が多い。この関係は、逆算時に $c$ 成分を何らかの方法により有効とした逆算結果（図中、赤、黄で色づけしたプロット群）においても、同様に指摘される傾向である。

すべり面せん断試験から得られるせん断抵抗角が $10^\circ$ 以下の新第三系堆積岩地すべりでは、すべり面が示すせん断抵抗角よりも逆算解析から推定されるせん断抵抗角が $15^\circ$ 近く高い事例も希ではなく、変成岩地帯地すべりにおける差異が $10^\circ$ 程度であるのに比べ、分布に差異を生じている。

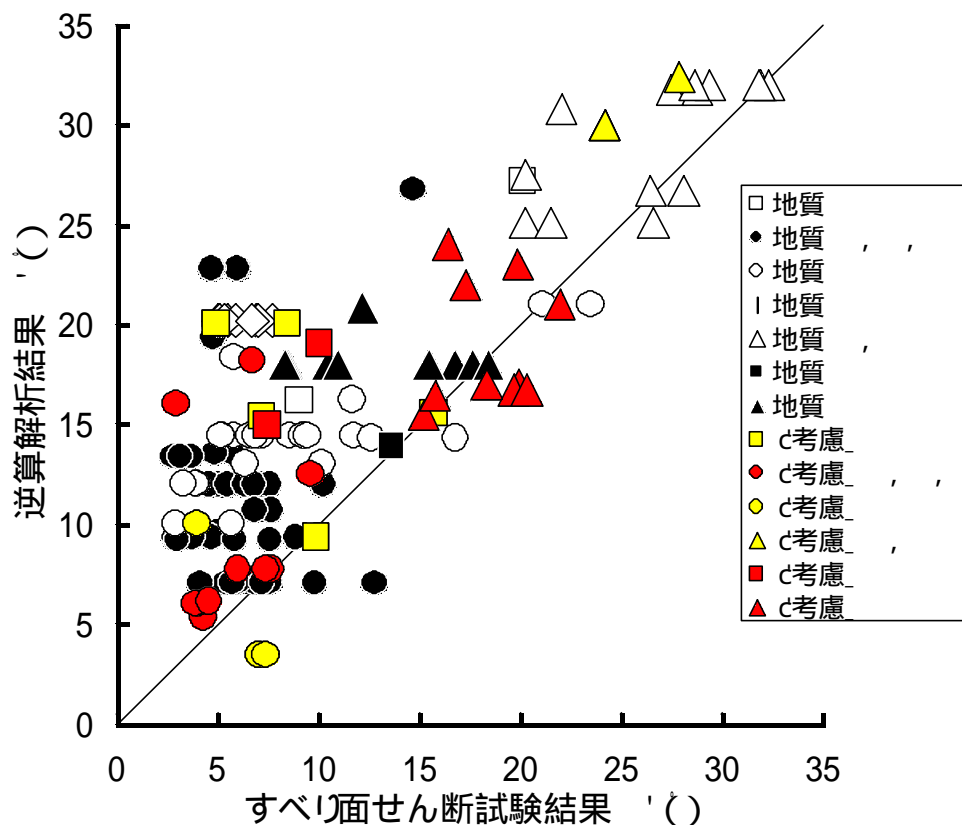


図7.5 すべり面強度と逆算解析結果

このように試験から計測された実際のすべり面のせん断抵抗角よりも、逆算によって推定されるせん断抵抗角が著しく大きくなる可能性としては、

逆算解析条件に含まれる事実と異なる計算条件の影響

- ・ 想定されているすべり面形が、実際のすべり面形よりも危険側に過ぎる形状の場合。
- ・ 算入されている間隙水圧データ（水位データ）が実際よりも高い水頭として算入されている場合。
- ・ 安定解析式を Janbu 式ではなく、Fellenius 式を用いた場合。
- ・ 逆算時安全率が実際よりも高めの安全率評価となっている場合。

縁端部すべり面部のせん断抵抗角が、板状すべり面区間のせん断抵抗角よりも著しく大きい場合。

すべり面のせん断抵抗以外で二次元安定解析に反映されていない強度成分が存在する。

が考えられる。尚、逆算解析結果の  $\phi$  が、計測されたすべり面のせん断抵抗角よりも小さく評価される事例は極端に少なく、試験値として得られるせん断抵抗角が、当該現場における可能性強度の最小値レベルを成している。このこと自体が、地すべりの安定解析が内包する問題の所在を明らかにするものと考えられる。

### 7. 2. 3 二次元安定解析による逆算解析の限界

前項により、逆算解析の結果算出される  $\phi$  は、すべり面のせん断抵抗角に一致するか、もしくは大きめに評価されることが明らかとなった。本項では、図7. 5 において逆算解析結果が試験値  $\phi$  より  $15^\circ$  も大きく算出されている一事例に着目し、双方の  $\phi$  が大きな差異を生じた原因について検討を行う（眞弓（1999）<sup>63）</sup> 参照）。

対象としたT地区地すべりCブロックは、埋没谷（V字谷）がすべり面の規制条件として関与する地すべりであり、左右の側壁がすべり面を構成する（円筒状すべり面区間が確認されていない）極めて特異なすべり面形を呈する。こうした場合、ほぼ埋没谷の最深部に設定された測線での二次元安定解析は、安全率を極端に過小に評価する危険を孕むことになる（図7. 6 参照）。

当地区Cブロックでは、すべり面が 4 基の集水井内で確認されており、その全てから



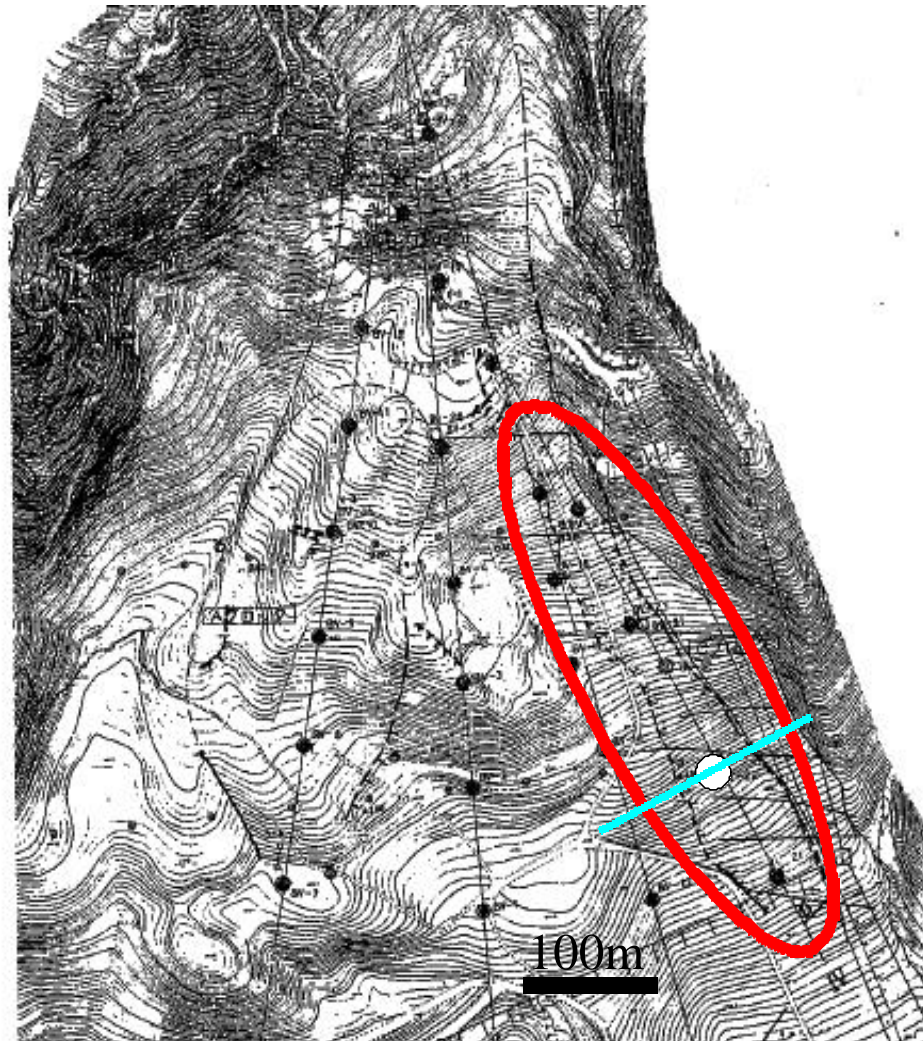


図7. 6 T地区地すべりCブロック平面図及び 6号集水井位置

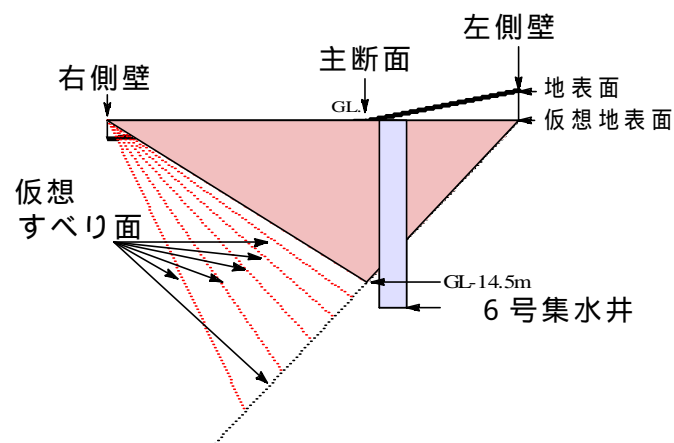


図7. 7 6号集水井施工位置を通るCブロック横断面図

すべり面のせん断強度計測が実施された。また、間隙水圧が水位観測専用孔での観測体制によって精度高く計測されており、先述の特異なすべり面形による強度強化成分が、より純粋に評価し易い条件を備えている。安定解析の手法としては、従来の二次元安定解析を簡便法（Fellenius 法）、Janbu 法によって行うとともに、移動土塊の形状がくさびの連続体として認識し得るものであることから、岩盤斜面の安定を考える際に、しばしば検討されるくさび破壊理論を援用し、くさび形状すべり面に期待される地すべりの構造的強度強化を三次元的に評価する試みを行った。

#### (1) 現場概要

解析対象とした地すべりは、山形県蔵王火山群の北西端に位置する T 地区地すべりの C ブロックである。地すべり層区分は、概ね地表より礫混り土、強風化熱水変質安山岩、風化熱水変質安山岩の層構造を成し、すべり面は 2 ～ 3 m の層厚を有する強風化熱水変質安山岩と風化熱水変質安山岩の層界に確認されている。

また当ブロックには、末端部から地すべり頭部までの縦断方向に、ほぼ等間隔に集水井 4 基が施工され、表 7. 1 に示す深度に、明瞭な鏡肌構造と擦痕をともしうすべり面が観察された。

表 7. 1 すべり面確認深度一覧表

すべり面確認深度	走向 , 傾斜	擦痕方向と傾斜
5: 5号井内GL-14.5m,	N79°W,15°S,	N17°W,15°S
6: 6号井内GL-11.5m,	N52°W,54°S,	N 7°W,32°S
7: 7号井内GL-21.0m,	N55°W,33°S,	N21°W,14°S
8: 8号井内GL- 9.7m,	N56°W,17°S,	N17°W,10°S

これらのすべり面は、附近にある調査孔のヒズミ累積深度、滑動時期の同調性ともに同一のすべり面であることを支持するものであり、各集水井内で計測されたすべり面の走向、及び傾斜は、いずれも明瞭な南西方向落ちの傾斜となる。擦痕方向は、すべり面の最大傾斜方向と大きく斜交し、すべり面走向が左側壁規制面としての方向性を有するのに対し、擦痕は測線方向（移動杭、GPS 観測データから決定）にほぼ一致する。

さらに、明瞭な横ズレ側壁亀裂や、隆起・沈下といった顕著な地形変状からブロック界

が明確に把握されているCブロックは、すべり面深度に対して地すべり幅が極端に狭いことを特徴とし、ブロック中央においてすべり面が側壁部の影響下にあるということは、急傾斜で右側壁へ駆け上がるV字谷的なすべり面の特異形態をとることを示す。

因みに、図7. 6 の調査平面図にはCブロック上部斜面に明瞭な谷地形が認められ、これが左岸側の尾根地形と平行してCブロック位置付近に埋没している可能性を示唆する。

## (2)すべり面粘土の土質力学的特性

すべり面は、粘土化が著しい強風化熱水変質安山岩と基岩である風化熱水変質安山岩の層界に確認され、集水井によって若干色調は異なるものの、主として黄色～黄褐色に近い粘性土が5 mm 未満程度の薄層状を形成する。また、基岩表面は凹凸が顕著であるにも関わらず、すべり面には新第三系のすべり面に見られる鏡肌状の光沢が観察された。

すべり面の自然含水比( $W_n$ )は、31%～43%と、当該すべり面粘土の塑性限界(26%～29%)に近い含水状態を示し、全国の様々な地質帯でのすべり面自然含水比特性と同様の傾向を示すものであった。また、液性限界( $W_L$ )、塑性限界( $W_p$ )ともに各試料についてのバラツキが小さく、コンシステンシー特性はほぼ同質であると評価される。さらに、粒度構成についても全てが類似しており、粘土含有率が57%～67%と新第三系堆積岩地すべりと同程度に高いことが解った。

すべり面せん断試験によって計測されたすべり面のせん断抵抗角についても、 $\phi=5.1^\circ \sim 7.0^\circ$ と、やはりバラツキの少ない解析結果を得た。

以上を総合すると、5mm 未満程の薄層状を成す当地区すべり面は、物理特性、力学的特性ともに、非常に均質でほぼ同一試料と評価し得るものであり、地すべり末端部から頭部に至るまで、極めて均一なすべり面粘土が分布していると考えられる。

表7. 2 T地区すべり面粘土の土質試験結果一覧表

試料名	$W_n$	$W_L$	$W_p$	$I_p$	粘土	シルト	細砂	粗砂	礫	$\phi$	色調
5	---	94.17	29.33	64.84	67	25	6	2	0	5.9	黄
6	31.89	86.17	26.11	60.06	57	31	4	3	5	6.9	灰
7	43.07	97.40	28.63	68.77	62	28	6	4	0	7.0	黄褐
8	31.12	83.78	26.09	57.69	60	29	6	4	1	5.1	黄青灰

( $\phi$  : すべり面せん断試験結果)



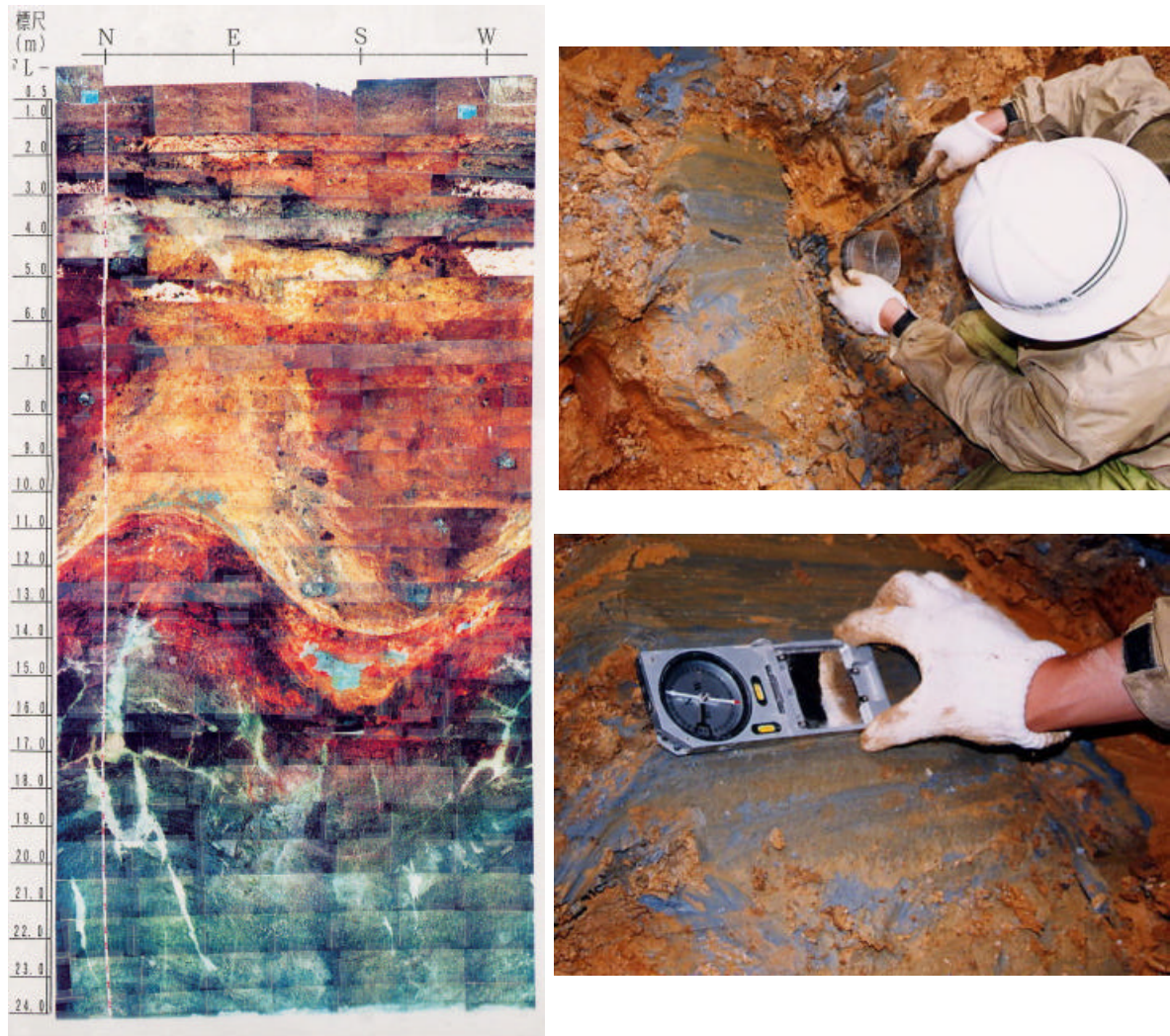


図7. 8 T地区すべり面の状況

### ③ くさび破壊理論による三次元安定解析

以上に述べた通り，本対象ブロックのすべり面形は，左右の側壁がV字谷状を呈する極めて特異なものである。いわば，地すべり土塊全体が一つの巨大なくさび形状となるわけで，少なからず期待される側壁部縁端効果を解析に動員すべく，岩盤斜面工学において利用されるくさび破壊理論を，地すべりブロックに当てはめる試みを以下に行った。

### ④ くさび破壊の解析

くさび解析の理論，およびその解法については，E.Hoek & J.Bray 著，小野寺，吉中 訳(1979)<sup>31)</sup>による‘Rock Slope Engineering (岩盤斜面工学)’に詳解されているので

参照頂くものとし，ここではその原理を最も単純なくさび形状で，かつ粘着力，水圧を考慮しない場合の解析法について記す。

まず，図7. 9 に定義されるくさびの安全率は，すべり面の抵抗が摩擦のみで受け持たれ，摩擦角は両方のすべり面について同じと仮定すれば次式となる：

$$F = \frac{\{R_A + R_B\} \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha}$$

ここに  $R_A$ ， $R_B$  は面 A，B 上の垂直反力である。

次に  $R_A$ ， $R_B$  を求めるため，交線に直交する面内の水平方向と垂直方向のつり合いを解くと，

$$\begin{aligned} R_A \sin \left( \alpha - \frac{\phi}{2} \right) &= R_B \sin \left( \alpha + \frac{\phi}{2} \right) \\ R_A \cos \left( \alpha - \frac{\phi}{2} \right) &- R_B \cos \left( \alpha + \frac{\phi}{2} \right) = W \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

上式から  $R_A$ ， $R_B$  を求め，これを加え合わせると

$$R_A + R_B = \frac{W \cdot \cos \alpha \cdot \sin \phi}{\sin \frac{\phi}{2}}$$

従って

$$F = \frac{\sin \phi \cdot \tan \phi}{\sin \frac{\phi}{2} \cdot \tan \alpha}$$

書き換えると

$$F_w = K \cdot F_p$$

ここに， $F_w$  は摩擦のみによって支持されるくさびの安全率となる。 $F_p$  は斜面が  $\alpha$  で傾き，破壊面が  $\phi$  で傾く平面すべりの安全率である。

$K$  は，くさびの開き角  $\phi$  とくさびの傾き角  $\alpha$  によるくさび係数 (Wedge factor) であり， $\phi$  と  $\alpha$  の一連の値に対する  $K$  は図7. 9 (d) となる。

#### (ii) くさび解析の地すべり地への応用

次に，今回実際に検討を行った解析方法について，解析条件，およびくさび形状の読み取り方法を以下に整理する。尚，文中に呼称されるスライスとは，二次元断面のスライスを指す。

用いた解析式：粘着力，内部摩擦角，上部斜面の引張亀裂，および引張亀裂内，すべり面に働く水圧の影響を考慮した式

二次元解析に用いたスライス諸元を利用することとし，地すべり土塊を各くさびブロックの連続体（くさびの厚みは，スライス幅に共通）と捉える。すなわち，想定されたくさびは，測線方向に直交の互いに平行な分離面で独立する。

具体的には，くさびブロックの引張亀裂（TWV）を鉛直面で，かつ測線方向に直交する面とみなして，これを上流側スライス面に想定。

最末端部を除く各スライスの下流側スライス面は，くさびブロックの下部斜面（AOB）を鉛直面に想定することで代用。

各くさびの地表面傾斜は，スライスの地表面傾斜角による等斉斜面を想定（すなわち点AとB，点TとVはそれぞれ同標高）。…図7. 10 (b)参照

水圧は測線位置において観測された孔内水位とし，地表部の側壁亀裂位置で水圧0とするものとする。…図7. 10 (c)参照

各くさびの S と T を合算して安全率算出。

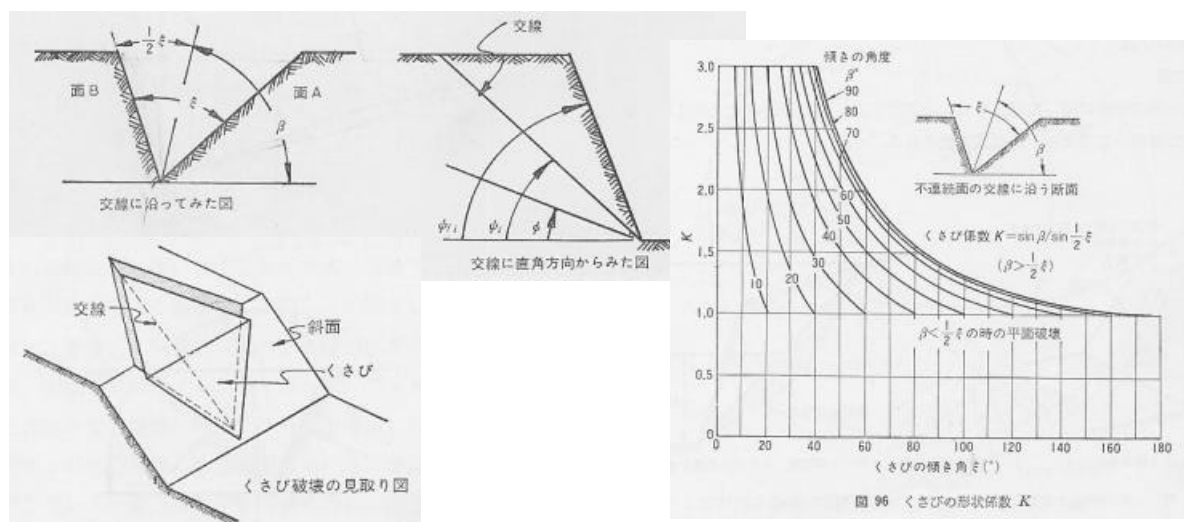


図7. 9 くさび破壊の形状説明図 (a ~ c) とくさびの形状係数 K の読み取り図 (d) [小野寺, 吉中 (1979)<sup>31)</sup> より]



### (iii) 結果

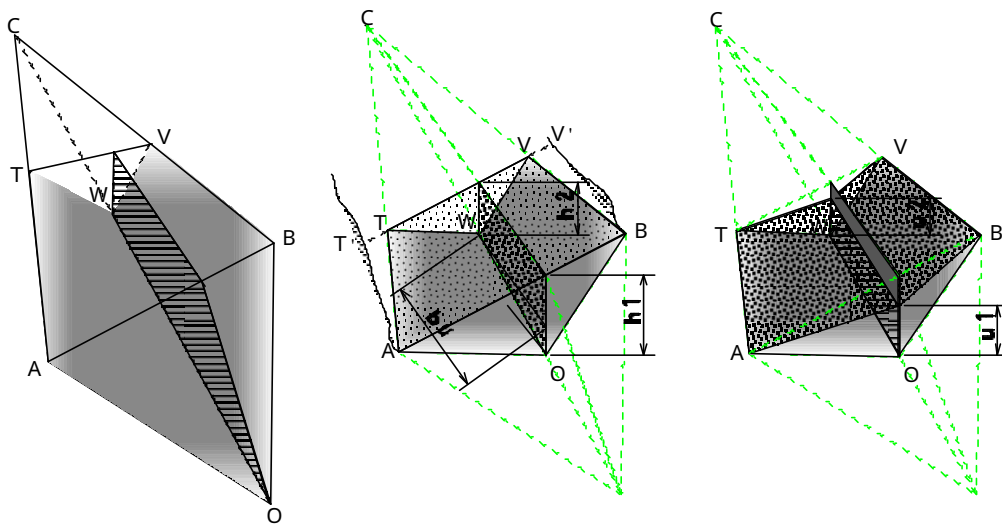
結果は、簡易 Janbu による二次元解析で、土質試験値 ( $c'=0$ ,  $\phi'=7^\circ$ )、および準臨界条件 ( $F=0.98$  程度) を入れると安全率が 0.326 にまで低下し、仮に水位無しとしても  $F=0.502$  に上昇するのみという現状と矛盾した解析結果に対して、くさび解析では 0.412

表7.3 解析結果安全率一覧表 ( $c'$ 単位 kPa)

	$\phi'=7^\circ$ 共通				$c'=14.7\text{kPa}$ 共通	
	$c'=0$	14.7	19.6	41.5	$\phi'=5^\circ$	$\phi'=9^\circ$
簡易Janbu	0.326	0.559	0.636	0.980	0.465	0.653
Fellenius	0.295	0.507	0.578	0.894	0.423	0.593
くさび破壊	0.412	0.980	1.169	2.011	0.861	1.099

まで安全率が上昇した。

さらに、粘着力を 14.7kPa 程度考慮することにより、本事例のケースでは算入した  $F=0.98$  相当 (本来  $F=1.0$  とすべきだが現時点で臨界条件が得られていない) の水圧諸元と整合の取れた安全率の算出を得た。



(a) くさび解析の想定形状 (b) すべり面諸元のくさび展開 (c) 水圧諸元のくさび展開  
図7.10 測線上の任意安定解析スライスをくさび形状に読み替える方法の説明図

#### 7. 2. 4 まとめ

今回は、すべり面強度と逆算解析結果との差異の意味を考える試みとして、くさび破壊理論による縁端効果の検討を、特殊なすべり面形を有するT現場において行った。通常の主断面位置での二次元安定解析にすべり面のせん断強度を算入した安定解析では、0.98程度の安全率が期待される水圧条件において0.3前後という極端に小さな安全率評価を得ていた。そこで粘着力成分を若干有効化し、かつくさび破壊の安定解析を用いた三次元の安定解析を行うと、現状を満足する安全率評価を成し得た。

当地区の場合、横断面形状がV字谷の形態となるため、両側壁部に期待できるせん断強度が相当に大きく、解析精度については十分とは呼べない解析手法ではあっても、側壁部の強度特性を評価に加えることで、より現実に近い安定解析を成し得た。ここに、設計せん断強度パラメータとしては、すべり面せん断試験結果を算入しており、この上で現状安全率を満足するということは、逆算解析結果のせん断抵抗角と試験値がほぼ一致したことを意味している。

T地区のような横断面形がV字谷形状となる事例は希であるとしても、筆者が観察を行ったすべり面では、すべり面の最大傾斜方向が滑動方向を示す擦痕方向と一致しない事例は極めて多い。程度の差はあるものの、すべり面の最大傾斜方向に滑動することが出来ない地すべりとは、言い換えれば最危険断面方向に動こうとした場合に無視できない抵抗力が存在することを意味している。こうした事例では側壁部の規制条件が強く関与しているのが一般的であり、複数の地層を切って形成する側壁ゆえに、せん断強度も別扱いが望まれるなど、二次元の安定解析では評価を行うことが極めて困難な状況にある。

二次元安定解析に限界があるとする理解が浸透するとともに、新技術・新工法を求める時代の趨勢を受け、近年、Hovland 法を用いた三次元安定解析が、数多く研究報告されている(太田他(1998)<sup>97)</sup>、下井田他(1999)<sup>98)</sup>、木村他(1999)<sup>99)</sup>、郎他(1999)<sup>100)</sup>、中村他(2004)<sup>89)</sup>)。Hovland 法は Fellenius 法(簡便法)の三次元版であり、簡便法を用いた解析実績が多い土木事業の分野における三次元安定解析への導入として、極めて自然な移行過程と考える。しかしながら、申(1989<sup>90)</sup>)、榎田(2003<sup>67)</sup>)も指摘するように、安全率評価に問題が指摘される Fellenius 法の三次元拡張手法は、Fellenius 法が抱える問題点をそのまま内包するものである。二次元安定解析においては、手計算が可能

であるという操作性の良さから、問題点が指摘されつつも Fellenius 法の利用が許容されてきたが、三次元化を試みるとなれば、作業量は Hovland 法においてさえ多大なものとなる。ならばこの際に、より精度が高い、鵜飼による三次元 Janbu 法 (1987<sup>65</sup>) や、三次元 Bishop 法 (1988<sup>66</sup>) を核に据え、これを実現する地すべり調査の在り方の検討、さらには有限要素法を用いた斜面安定性の評価方法の模索 (1993<sup>101</sup>), 2003<sup>102</sup>) にまでも研究開発の駒を進めることは、決して現実から遊離する取り組みではない。

安定解析の三次元化を目指す道程において、まず最初の障害となるのがすべり面、及び間隙水圧分布の三次元形状調査手法の確立がある。申 (1995<sup>91</sup>) や Gunatilake et al. (2002<sup>103</sup>) が指摘するように、地すべりのすべり面の形成位置は、地質学的規制条件となる層理面、断層系や節理系に強く影響を受ける。すべり面の三次元形状把握のために、対象地域の地質学的考察を十分に行うことは必須の調査要件といえる。また、地すべりの地形は非地すべり斜面と明らかに異なる斜面要素によって構成されており、Iwao et al. (2002<sup>104</sup>) が提案する統計学的手法を用いることは、地すべりブロックの抽出作業に極めて有効である。さらに、Yamazaki et al. (2002<sup>105</sup>) が提案するボアホールテレビュアー装置は、採取した試錐コアを観察するのではなく、孔壁面の物理的性質を孔壁画像として可視化することで、原位置すべり面の構造をそのままに把握することが可能な新技術である。地中レーダーや EM 探査等も礫混り土層内に形成する浅層部のすべり面の構造把握に利用できる可能性がある。三次元安定解析を実施するに当たっては、上に一例を示す既存の技術と新技術を、ともに駆使したすべり面の三次元形状の詳細な調査が必要となる。

また、本稿で取りあげたすべり面に発揮されるせん断強度パラメータの取扱いに関しても、三次元に拡張されたすべり面の各部位の強度をどのように評価するかが重要な課題となる。土質試験に依らないせん断強度パラメータの決定手法としては、土被りの程度から  $c$  を決め、ある安全率条件 (理想的には臨界条件) のもとで  $\phi$  を算出する逆算解析手法、山上 (1984a<sup>106</sup>), 1984b<sup>107</sup>), 1985<sup>108</sup>), 1988<sup>109</sup>) が提案する試行すべり面を与えて安全率を最小とするせん断強度パラメータの組合せを決定する逆解析法がある。これらの手法で得られる  $c$ ,  $\phi$  は、すべり面に発揮されるせん断強度パラメータの平均値としての意味を持ち、解析的に設計強度を決定する上では実務に適する。これに対して、三次元に展開するすべり面から直接せん断強度を計測する試みは、すべり面の規制条件の特徴に応じて試験計画を立てねばならず、様々な現場の諸データとの連携がより強く必要となる。個々

の特徴を平滑化することで実務に適した技術の向上を進めるアプローチと、地すべりの機構解明に向けた種々のテーマ毎に知見を積み上げ、相互の連関について考察するアプローチは、地すべり調査・対策事業を推進する上でともに不可欠な取り組みである。

## 8. 総括

最終章となる本章では，1章に規定した各分野の検討結果のまとめと，本研究の目的に対して達成した成果の総括を行う。

### 8. 1 第一分野の拡張（3章のまとめ）

すべり面を現場から不攪乱状態で採取し，この面を試験時せん断面と一致させて行うすべり面せん断試験装置を開発した。この装置を用いて試験を実施した場合に計測される典型的なせん断経緯には，すべり面が残留強度に支配されていることに起因する幾つかの特徴が確認された。以下に，すべり面せん断試験を実施することで得られる特徴的な残留せん断強度特性を整理する。

- (1) すべり面と試験時せん断面を一致させて行う定体積一面せん断試験では，せん断ひずみ 3%程度の微小変位で垂直応力  $\sigma$ ，せん断強度  $\tau$  が安定収束状態となる。これは，鏡肌のすべり面が定向配列構造を完成し，面構成粒子の構造変化に伴う間隙比の増減が既に収束しているために，定体積制御を頻繁に行うまでもなくせん断時のダイレタンシーがほとんど発生しなかったものと推察される。
- (2) せん断初期に安定収束状態となる  $\sigma$ ， $\tau$  は，その時点の垂直応力に対する残留せん断強度が発現していると理解されることから，異なる荷重条件から得られた同様の安定収束状態となる複数の  $\sigma$ ， $\tau$  のプロットは，残留せん断強度の破壊線上にあることが期待される。つまり，残留せん断強度の破壊線は，こうした安定収束状態となる  $\sigma$ ， $\tau$  のプロットを最小二乗法により直線回帰することで得られる（実際の作業手順では，各供試体の各せん断径路から，速やかに安定収束し，かつ  $\sigma$  /  $\tau$  の最小値を与える  $\sigma$ ， $\tau$  の組み合わせが選別され，これらを全て算入する最小二乗法により  $c'$ ， $\phi'$  は決定）。尚，往路，復路のそれぞれに認められた破壊線の勾配は，概ね一致する。
- (3) 試験事例として示した新第三系凝灰角礫岩地帯におけるすべり面では，すべり面せん断試験のせん断抵抗角 ( $\phi' = 6.3^\circ$ ) が，攪乱採取・粒度調整されたリングせん断試験結果の残留せん断抵抗角 ( $\phi'_r = 4.9^\circ$ ) とほぼ等しく，当地区すべり面のせん断強度が残留

強度相当であることが確認された。また、この $5^{\circ}$ 前後となるせん断抵抗角は、膨潤性粘土鉱物スメクタイトの残留せん断抵抗角に一致するものであり、対象すべり面の表面がスメクタイトによって被覆されているすべり面観察状況に符合する。

- (4)すべり面がせん断方向に 1mm に満たない高低差を生じている場合、下部供試体が水平変位すると、傾斜面に沿って上部供試体は垂直方向の変位を生じる。定体積せん断試験ではせん断面での間隙変化だけではなく、こうした傾斜面でのせん断に起因する垂直変位も垂直応力を変化させて抑制することとなる。しかしながら、こうした事例（タイプ ）の応力経路に示される直線的な経路は、その多くが同一すべり面の他供試体で計測された安定収束点をほぼ通るものとなり、直線の傾きがせん断抵抗角と評価し得る。
- (5)せん断に伴い断面積が変化する一面せん断試験では、試験機の構造、および上下せん断箱のクリアランスを確保した位置にすべり面位置を合わせたことで、すべり面の気密が全周囲に破れ、すべり面の排水性が向上し、間隙水圧発生が抑制されていると考えられる。
- (6)供試体中のすべり面傾斜が上下せん断箱のクリアランス（最大 1mm）を上回る高低差で傾きをもつ場合は、変位に伴って上下何れかの供試体の縁辺部がせん断箱と干渉し、タイプ から得られる破壊線より粘着力、せん断抵抗角がともに増大し、すべり面のせん断強度を正しく評価できない場合がある。

## 8. 2 第二分野の拡張（4章のまとめ）

開発したすべり面せん断試験を用いて全国の様々な地質に属するすべり面で試験を行うとともに、採取したすべり面粘土を用いて従来から広く実施されているリングせん断試験を行い、得られたせん断抵抗角の比較検証を行うことで、すべり面のせん断強度の特性に関する以下の結論を得た。

- (1)新第三系堆積岩地すべり（凝灰角礫岩を除く）、および熱水変質安山岩地帯での地すべりで行ったすべり面せん断試験結果は、せん断抵抗角の平均値が $4^{\circ} \sim 6^{\circ}$ と小さく、かつバラツキも少ない。また、別途実施したX線粉末回折分析や走査型電子顕微鏡によるすべり面表面の観察結果から、これらのすべり面表面がスメクタイトに被覆されてい



る状況が確認された。すなわち、試験を行ったほとんど全てのすべり面がスメクタイトの残留強度特性に強く影響されたものであることが判明した。

②) バラツキが小さいことを特徴とする新第三系堆積岩地すべりの中で、凝灰角礫岩地帯のすべり面だけは顕著なバラツキを生じることが解った。これは、凝灰角礫岩地帯のすべり面も他の新第三系と同様にスメクタイトによる面被覆は完成するものの、面近傍に介在する角礫がすべり面に深い擦痕構造や尖塔状の隆起部を生じ、これがせん断抵抗角の大小に少なからず影響したためと考えられた。

③) スメクタイトの残留せん断抵抗角が卓越する新第三系堆積岩地すべりの中には、若干高めの強度特性が計測される事例が含まれる。これらの多くは、縁端部採取のすべり面試料であり、明瞭な規制条件を伴う船底型すべり面部位とは面の構造自体が異なる可能性が示唆された。

④) 変成岩地帯地すべり（結晶片岩地すべり、御荷鉾緑色岩類地すべり）では、すべり面粘土中に粗砂以上の粒径成分が20%以上含まれ、こうした粗粒径成分の介在によって、擦痕の顕著な起伏構造を生じ、せん断抵抗角を増大する可能性が指摘された。

⑤) 変成岩地帯地すべりの中でも御荷鉾緑色岩類地すべりは、結晶片岩地帯地すべりのすべり面よりも粘土含有率が高めとなり、せん断抵抗角が結晶片岩地帯地すべりにおけるものよりも10°程小さい。また、現場によっては膨潤性粘土鉱物スメクタイトや伊利ト/スメクタイト混合層鉱物が検出され、こうした粘土鉱物の影響を受けた場合、さらにせん断抵抗角が低下する傾向が見られた。

⑥) リングせん断試験との比較では、新第三系堆積岩地すべりの場合、リングせん断試験用すべり面粘土の採取が厳密であるほど、試験結果は良好に一致する。変成岩地すべりでは、リングせん断試料に施す粒度調整処理が、すべり面近傍に介在する粗粒径成分を除去し、変成岩地すべりに特有の起伏顕著なすべり面構造の出現を抑制する。この結果、リングせん断試験で得られるせん断抵抗角が極端に小さくなることが解った。

### 8.3 第三分野の拡張 (5章のまとめ)

国内各地からすべり面試料を収集し、これの構造解明を目的として、各種の試験、観察を行った。以下にすべり面におけるせん断抵抗角とすべり面粘土の物理的性質との関係において得られた成果をまとめる。

(1)スメクタイトを含有する試料群に対して、塑性指数とリングせん断試験結果  $\phi'$  との関係から、次の三系列の分類が可能となった。

含スメクタイト系列 A：細砂以上粒径を 15 % 以上混入する活性粘土，塑性指数の増大に伴い  $\phi'$  が減少

含スメクタイト系列 B：細砂以上粒径の混入が 15 % 以下の普通粘土，  
 $5^\circ < \phi' \leq 10^\circ$

含スメクタイト系列 C：細砂以上粒径の含有が 15 % 以下の活性粘土，スメクタイトの残留せん断抵抗角を反映して， $\phi' \leq 5^\circ$

(2)これに対し、地質 以外のスメクタイトを含むすべり面の  $\phi'$  と塑性指数との関係は、全て系列 B と C に属するものであり、すべり面を内包するすべり面粘土薄層に細砂以上の粒径成分が含まれていても、すべり面には細砂以上の粒径成分がほとんど干渉しないことが解った。

(3)また、走査型電子顕微鏡を用いた含スメクタイトすべり面の観察から、スメクタイトがすべり面を完全に被覆する状況が観察された。同様の状況がリングせん断試験の試験後せん断面にも確認され、せん断面近傍に分散するスメクタイトがせん断面に凝集した可能性が示された。

(4)細砂以上の粒径成分を 15%以上混入することを特徴とした含スメクタイト系列 A の試料群では、塑性指数と  $\phi'$  との間に負の相関が認められる。また、細砂以上の粒径成分を 20%以上含む地質 Ⅱ，Ⅲ のすべり面粘土では、すべり面の  $\phi'$  が 425  $\mu\text{m}$  以上粒径をフルイ除去した試料の  $\phi'$  より顕著に大きい。

(5)リングせん断試験後のせん断面粗さは、計測値の約半数の事例から、細砂以上の粒径成分の増加に伴うせん断面粗さの増大傾向を示す。さらに、変成岩地帯でのすべり面の

粗さは含スメクタイト系列のすべり面より突出して大きく、粗い粒子の混入による面粗さの増大が、せん断抵抗角の増大を生じた可能性が指摘された。また、粗粒径成分を全く含まないリングせん断試料の場合でも、残留状態で  $20\text{ }\mu\text{m}$  程度の粗さが残り、地質を除く含スメクタイトすべり面での面粗さの計測結果が、ほとんど  $20\text{ }\mu\text{m}$  以下となることに一致する。

#### 8. 4 すべり面構造についての新たな視点 (6章のまとめ)

第一、第二、第三分野についてそれぞれの成果を拡張することで、すべり面の構造に関する理解に新たな視点が生まれた。以下にすべり面の構造について得た新しい考え方を整理する。

- (1) 新第三系堆積岩地すべり、及び熱水変質安山岩地帯地すべりの内、すべり面にスメクタイトを含有する地すべりでは、すべり面周辺に分布するスメクタイトの存在が、すべり面の構造、発達過程、さらにはせん断強度特性に強く影響を与えることが解った。こうしたすべり面は、ほぼ全面に及んでスメクタイトが被覆層を生じており、電子顕微鏡による観察ではスメクタイトが示す独特な縄目模様や襞状の構造が観察されている。また、リングせん断試験の試験経緯からは、ピーク強度の発現時点でスメクタイト薄層形成の兆候は見られず、残留強度への強度低下過程でスメクタイト薄層が形成していくことがせん断抵抗力 の変化として計測された。
- (2) スメクタイトを含有する新第三系すべり面粘土試料から、敢えて粘土含有率が低めの試料を選び、フルイ通しや水簸処理によって段階的に試料の最大粒径を変化させて、リングせん断試験を行った結果、試料に含まれる最大粒径の変化がせん断面の粗度に大きく影響することが解った。しかしながら、面粗度の違いによるせん断抵抗角の変化よりも、せん断面にスメクタイト薄層を生じるか否かが、せん断強度に強く影響することも示された。
- (3) すべり面におけるスメクタイトの薄層形成や、定形鉱物の粒子配向挙動が、せん断面の間隙比変化とどのように関連づけられるかを示すため、飽和度を 100%と仮定した上で試料の含水比に着目してデータを整理した。結果は次の通りに要約される。

#### 含スメクタイトすべり面

- ・粘土含有率が高く，粒度分布の幅は比較的狭い。
- ・粘土中にスメクタイトを含有し，残留状態せん断面を形成した後は，せん断面にスメクタイトの被覆層を生じる。
- ・スメクタイトの被覆層を完成したすべり面や残留状態せん断面のせん断抵抗角は，スメクタイトの残留せん断抵抗角である  $\phi=5^{\circ}$  前後となる。
- ・粘土含有率が低く，スメクタイトの被覆が不完全なせん断面に発揮されるせん断抵抗角は，せん断変位の増大に対して強度収束した状態でも  $10^{\circ}$  前後と大きい。
- ・すべり面は，大周期，大振幅の起伏構造が影響して大きな粗度と評価されるものの，スメクタイトの被覆が完成している場合があり，こうしたすべり面のせん断抵抗角は起伏の影響を受けずに  $5^{\circ}$  前後となる。
- ・すべり面の自然含水比，及び残留状態せん断面の含水比は，面周囲の含水比より低めである。
- ・すべり面，及び残留状態せん断面の含水比は，液性指数の評価で 0.2 以下とな場合が多い。

#### 含粗粒径成分すべり面

- ・粘土含有率は低く，最大粒径が礫に至る程に粒度分布の幅が広い。
- ・多くのすべり面観察事例，リングせん断試験の試験後せん断面観察より，すべり面部には細粒分が卓越する傾向がある。
- ・面の粗度がせん断抵抗角の大小に強く関係している。
- ・すべり面の自然含水比，及び残留状態せん断面の含水比は，面周囲の含水比より高めである。

(4) 含粗粒径成分すべり面の形成を模式的に示す図8. 1 (a)初期条件には，粒径の違いが顕著な定形粒子が規制条件上（基岩上）に均質に分散する様子が示される。モデルでは試料中は完全に飽和していると仮定している。この状態からせん断変位を受けると，粒径幅が広い試料であることに起因して，大粒径成分ほど上位に移動，細粒分がせん断面近傍に凝集するといった逆級化の粒子再配列が生じると予想される（図8. 1 (b)）。含粗粒径成分すべり面を代表する変成岩地帯地すべりでは雲母鉱物が卓越するため，この再配列は各粒径成分の配置換えとともに，粒子自体の定向配列も合わせて進行することが考

えられる。すべり面やリングせん断試験後せん断面の含水比が周囲の含水比よりもせん断面で若干高まる傾向にあることを考えると、逆級化を生じてせん断面部に細粒分含有率が高まり、間隙比が増大したものと推察される。

- ⑤ 図8. 2 に示す含スメクタイトすべり面の模式図では、せん断面への細粒分凝集とともに、特にスメクタイトがせん断面に濃集して被覆層を形成することを表現した。そのため、スメクタイト被覆層が完成した段階では、逆にせん断面周囲にスメクタイト含有率が低下する層を生じ、面周囲の間隙水含水比が相対的に高まった可能性が指摘される。勿論、従来通り定向配列構造の形成によって間隙比が減少したと理解することも可能であり、すべり面の自然含水比や、残留状態せん断面含水比が塑性限界付近の含水比に収斂する事実は、上述の二つの挙動が同時に発生していると考えることが望ましい。尚、粒径幅が變成岩地帯地すべり粘土に比べ狭く、またせん断抵抗力が小さいスメクタイトの影響により、含粗粒径成分すべり面ほどの顕著な逆級化を生じていない可能性もある。

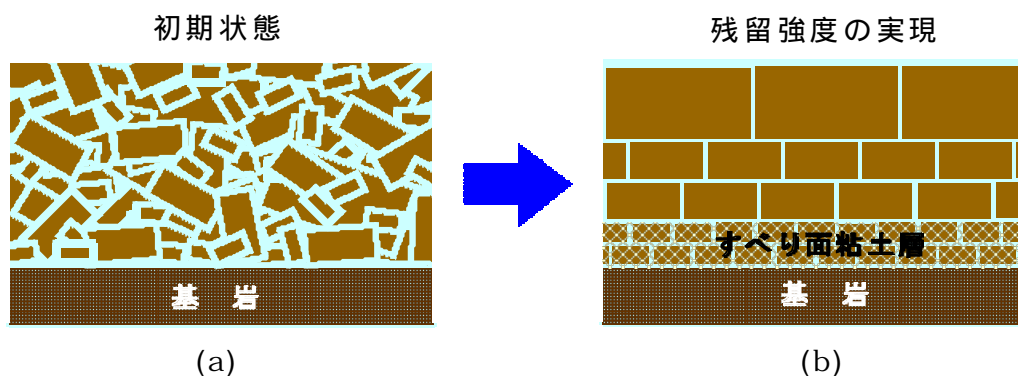


図8. 1 含粗粒径成分すべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図 (再掲)

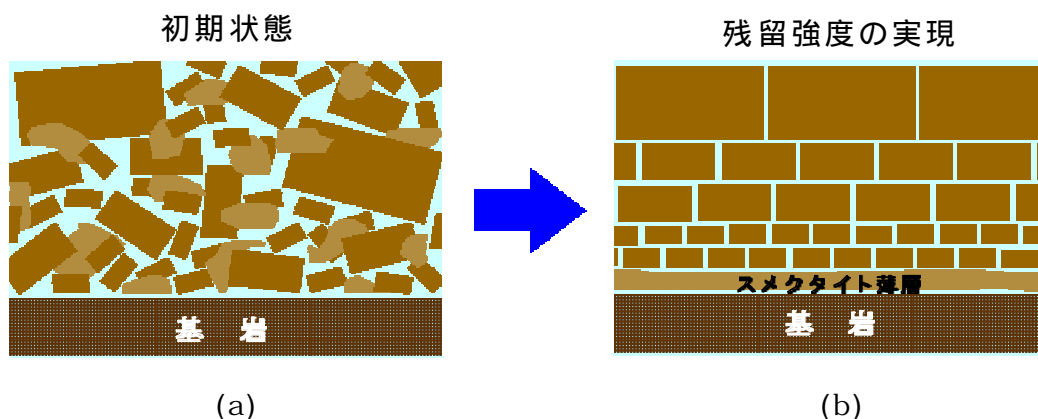


図8. 2 含スメクタイトすべり面粘土試料の残留状態へ向かう構造変化模式図 (再掲)

⑥) 残留状態の評価を行う場合，対象試料が含スメクタイト試料であるならば，定形粒子群の挙動としての定向配列と，スメクタイトが面に凝集する挙動の双方の完成度を正しく評価したものでなければならない。また，これらは必ずしもせん断変位の多寡によってのみ完成をみる現象ではないことにも留意しなければならない。さらに，変成岩地帯地すべりに代表される含粗粒径成分すべり面においては，せん断変位の大小とともに，拘束条件（土被り荷重や試験時垂直応力等）によって，せん断面を構成する卓越粒子のサイズや粒度分布が変化することが予想される。また，間隙水圧挙動，これに伴う有効応力の変化も，すべり面やせん断面の定向配列構造に影響を与えられと考える。

⑦) 様々な条件を考慮する必要があるすべり面や，残留状態と認識されているせん断面とは，単に与えられた諸条件の中で得られた一つのせん断応力収束強度であり，条件が変わり，粒度構成，スメクタイト被覆の程度に変化を生じれば，さらなる強度低下，強度強化の可能性を秘めていることを認識せねばならない。勿論，こうした条件変化を生じて，さらなる強度低下が起こり得ない真の最小強度としての残留強度は存在する訳であり，この強度に到達しない全てのせん断強度は中間強度として理解される。

## 8. 5 すべり面の構造理解が導く新しい地すべり調査 計画（7章のまとめ）

### 8. 5. 1 すべり面構造調査の展望

①) 日本国内，またこの地球上には，様々な気象条件，地形・地質条件が存在しており，本稿に述べたすべり面の構造は，日本国内における一部の事例に過ぎない。今後も更なる事例の収集に精力的に励まなければならない。特に，変成岩地帯での地すべりや崩壊に関しては，本稿における成果は導入に過ぎず，すべり面の確認作業の精度向上を含む，多角的な研究が今後益々実施されなければならない。また，スメクタイトを含むものの粘土含有率が少なく，新第三系堆積岩地すべりとは，すべり面構造にも差異を生じる古第三系堆積岩地すべりにおいても試験事例は少なく，データ収集に力を注ぎたい。

②) すべり面粘土中のスメクタイト含有率をより精度高く計測するために，X線粉末回折分析によるスメクタイト量推定手法の可能性に関する検証，試薬を用いたすべり面被覆層のスメクタイト量把握，CEC 試験を用いたスメクタイトの定量といった試みを進め



ていきたい。すべり面粘土中に含まれるスメクタイト含有量が正確に計測されれば、粒度構成、せん断抵抗角との関係がより明確になるとともに、実務において用いるせん断抵抗角の評価が一層、精度の高いものとなる。

- ③) 変成岩地帯地すべりにおいては、イライトや緑泥石、石英、長石、角閃石といった定形鉱物の粒度構成がせん断抵抗角に強く影響を与える。先述のスメクタイトと同様、各種鉱物の鉱物組成に関する検証を深めるとともに、こうした定形鉱物については、角鉱物の粒径とせん断面の粗度との関係に着目する必要がある。
- ④) 本稿では、すべり面やリングせん断試験後せん断面の小範囲（最大 7mm 四方）に対して、レーザー変位計を用いた表面形状計測システムを構築し、粗度（算術平均粗さ）の計測を行った。変成岩地帯地すべりのすべり面が有する面粗さは、数 cm から、時に数 m に及ぶ大きなウネリの構造を有する。こうした長大周期、大振幅の表面形状計測を成し得るシステムの構築も、今後、重要なテーマとして取り組む。
- ⑤) リングせん断試験による残留強度の計測において、試験条件の様々な違いがせん断面の構成粒子や構成鉱物に影響を与えることが解った。初期状態試料の物理特性、初期含水比、圧密荷重（過圧密比）、せん断時荷重、せん断速度、動的荷重条件等の試験条件が、達成される残留強度とどのような関係にあるか、個々に抽出するきめ細かい検証が必要である。対象試料にとって、真に最小のせん断抵抗角を残留強度とした場合、最小の残留強度を規定する因子が何であるか、またどのような試験条件を与えることで、真の残留強度を達成できるかといったテーマを掲げ、リングせん断試験を行っていきたい。
- ⑥) 実際の現場で想定し得る諸条件についても、実際のすべり面粘土に関するデータ収集を行い、真の残留せん断強度に対する現状のすべり面せん断強度の評価と、将来予想される真の残留強度へ向けた更なる強度低下の可能性についても併せて検証を行いたい。
- ⑦) 本稿で述べたすべり面せん断試験が調査ボーリングコアによっても試験を実施出来るように、コアを対象とした試料径（例えば 60mm や 40mm）を仕様とする試験機の開発・改良にも着手したい。
- ⑧) 地すべりの滑動を考えた場合、すべり面の構造とともにすべり面に働く間隙水圧の発生・消散のメカニズムについても重要なテーマである。通常的一面せん断試験や、三軸

圧縮試験では、せん断変位の増大に伴いせん断面の断面積が減少する。唯一リングせん断試験は、せん断中に断面積変化が無い試験であり、せん断面の間隙水圧変動を計測し易い試験機構造をしている。柴崎他（2002<sup>93)</sup>、2003<sup>94)</sup>）は既に、間隙水圧計測を可能にした改良型リングせん断試験機を提案している。今後の成果に期待したい。

## 8. 5. 2 土質試験結果を用いた地すべり安定解析 (求められる三次元安定解析)

- (1) すべり面強度と逆算解析結果との差異の意味を考える試みとして、くさび破壊理論による縁端効果の検討を、特殊なすべり面形を有する T 現場において行った。通常の主断面位置での二次元安定解析にすべり面のせん断強度を算入した安定解析では、0.98 程度の安全率が期待される水圧条件において 0.3 前後という極端に小さな安全率評価を得ていた。そこで粘着力成分を若干有効化し、かつくさび破壊の安定解析を用いた三次元の安定解析を行うと、現状を満足する安全率評価を成し得た。
- (2) 当地区の場合、横断面形状が V 字谷の形態となるため、両側壁部に期待できるせん断強度が相当に大きく、側壁部の強度特性を評価に加えることで、より現実に近い安定解析を成し得た。ここに、設計せん断強度パラメータとしては、すべり面せん断試験結果を算入しており、この上で現状安全率を満足するということは、逆算解析結果のせん断抵抗角と試験値がほぼ一致したことを意味している。
- (3) すべり面の観察結果から、すべり面の最大傾斜方向が滑動方向を示す擦痕方向と一致しない事例が極めて多いことが判明した。程度の差は種々あるものの、すべり面の最大傾斜方向に滑動することが出来ない地すべりとは、言い換えれば最危険断面方向に動こうとした場合に無視できない抵抗力が存在することを意味する。こうした事例では側壁部の規制条件が強く関与していることが多く、すべり面のせん断強度を正しく評価する試みとともに、三次元安定解析への取り組みが強く期待される。

## 謝辞

本研究を進めるにおいては数多くの方々からご指導，ご鞭撻を頂戴するとともに，実作業においても多くの方々の協力と支援を頂きました。皆様方のお陰を持ちまして，本稿を取りまとめることが出来たことを，ここに謹んで感謝の意を表するものであります。

13年に及ぶ期間中，常に温かく本研究を見守り続けて下さった皆様，本当に有り難うございました。これからも新たな視点から地すべり研究に従事する所存に御座います。今後ともこれまでと同様にご指導賜りますよう，心より深くお願い申し上げます。

まず，御公務でご多用な中，本研究に対して統括的なご指導を下さり，また論文博士申請の様々な手続きにおいても主査としてご尽力下さいました佐賀大学大学院工学系研究科システム生産科学専攻 岩尾雄四郎教授に心より深くお礼を申し上げます。先生は，プラハでの国際学会発表をはじめ，日本地すべり学会，応用地質学会への論文投稿の際にも，皆様にご指導頂くとともに筆者の心の支えとなって下さいました。本当に有り難うございました。

また，佐賀大学大学院工学系研究科エネルギー物質科学専攻 宮島徹教授，システム生産科学専攻 井嶋克志教授，坂井晃助教授には本論文の副査として，論文内容の向上，論文体裁の改善に適切なるご指導を頂戴致しました。深くお礼を申し上げます。

また，元 群馬工業高等専門学校 of 宇津木愛正助教授には，すべり面せん断試験機の開発に関して具体的な仕様決定のご指導，及び品質確認試験を実施頂きました。また，土質力学について経験の浅い筆者に，土質力学の基本からご教授下さいました。深くお礼を申し上げます。

さらに，琉球大学農学部 宜保清一教授，北海道大学大学院工学研究科 三田地利之教授，岩手大学工学部 大河原正文助教授，広島大学 栃木省二名誉教授，総合科学部 海堀正博助教授，及び(独)森林総合研究所水土保持研究領域山地災害研究室 松浦純生チーム長，(有)防災技研工業 山内勝義氏には，研究発表会等の場において，本試験機の改良に関する有益なご助言を頂戴致しました。深くお礼を申し上げます。

さらに、すべり面せん断試験機（試作機）の開発に当たっては、㈱フリーズアmacroス試験機事業部 昆幸弘副部長が、本試験機製作の意義に強く賛同下さり、精力的に要求品質の実現に向けて尽力下さいました。深くお礼を申し上げます。

また、㈱ジャコム 増井技術部次長には、すべり面せん断試験機の自動制御方法、及び有効応力計測方法に関して、質の高い試験機改良を頂きました。深くお礼を申し上げます。

本試験機の中国での製作については、筆者の渡航手続きを始め、清華大学への製品開発協力の依頼交渉、開発における工程・品質管理を実施頂いた海外事業部 田中清司取締役、北京ワールド防災技術有限公司 舒 安平氏に、様々なお力添えを頂戴致しました。さらに中国製すべり面せん断試験機の製作指揮下さった清華大学の任 裕民先生には、言葉の壁を越えて本試験機の意義をご理解頂き、質の高い試験機製作を実施頂きました。深くお礼を申し上げます。

すべり面せん断試験の比較試験として実施したリングせん断試験に関しては、㈱誠研舎の伊藤政雄会長、小林宏氏、㈱マルイ 中其毅技術顧問に大変お世話になりました。深くお礼を申し上げます。

さらに、すべり面せん断試験の趣旨に御賛同頂き、現場を御提供下さった以下に記す関係官庁の方々に深く感謝申し上げます。[ 青森県三戸地方農林水産事務所、岩手県二戸振興局、秋田県雄勝総合農林事務所・鹿角総合農林事務所・由利総合農林事務所・秋田総合農林事務所、東北森林管理局、山形県農林水産部、福島県いわき農林事務所・会津農林事務所、埼玉県寄居林業事務所、新潟県上越林業事務所、長野県北安曇地方事務所・姫川砂防事務所、富山県高岡農地林務事務所、福井県勝山土木事務所、兵庫県但馬高原林道建設事務所・養父郡八鹿町役場、鳥取県鳥取地方農林振興局・八頭地方農林振興局、徳島県徳島農林事務所・脇町農林事務所・池田農林事務所、愛媛県松山地方局・西条地方局、高知県森林整備課、四国森林管理局、佐賀県伊万里農林事務所、長崎県県北振興局・長崎林業事務所（順不同）]

また、本研究の根幹となるすべり面せん断試験機開発の動機付けを賜り、ご存命中は時に厳しく、時に温かく、筆者の成長については常に寛容にご指導を頂き、またご他界されて後も、筆者の心の支えとして13年間研究を続ける原動力を与えて下さった、当時の技

術本部長 故 申潤植先生に深くお礼を申し上げます。

また、現在の国土防災技術㈱社長であり、申潤植先生の後任として技術本部長となられた加藤邦雄 社長には、中国での試験機製作、及び本試験機を日本全国の地すべり現場で実施する上での大きな支援とご指導を頂きました。深くお礼を申し上げます。

さらに、管理本部 山崎孝成 技術部長は、本研究の出発点となる宇津木先生との出会いから、学位論文とりまとめに至る全てのプロセスにご指導、ご鞭撻を下さいました。また、申 潤植先生ご他界の後、技術と心の支えとして筆者を常に温かく見守り続けて下さいました。さらに、論文博士取得の挑戦に関しても、ご多用な中、投稿論文校正作業や社内外における調整に奔走賜りました。深く御礼を申し上げます。

また、試験研究業務を進める中で、壁に突き当たり苦悩する筆者に、様々な視点からご助言、ご指導を下さった山田正雄事業推進部長、伴 要品質管理部長、内田勉取締役事業本部長、田口宏営業事務担当部長、榎田充哉システム開発グループ長、小川内良人事業開発グループ長、山田清調査設計グループ長、今野幸喜システム開発グループ課長、山崎勉地質グループ課長、藤川秀人品質管理課長、李鷗環境保全グループ課長、土佐信一システム開発グループ課長、他歴代の技術本部メンバーの方々に深く御礼を申し上げます。

また、筆者と共に日本全国のすべり面粘土の研究に邁進し、最高の仲間として、また人生最良の友として筆者を実質的に支え続けてくれた国土防災技術㈱試験研究所の由田恵美係長、柴崎達也係長、故 江原竹男氏、小野田昭吉氏、海藤晃氏、金井澄雄氏、谷平由美氏と出会えた縁に心から感謝するとともに、深く御礼を申し上げます。

さらに、現在、筆者の所属する長崎支店において、休日や業務の合間を使って学位論文準備を行う筆者を、いつも温かく見守り、励まし続けて下さった早稲田正支店長、中谷紀行総括課長、西尾克人業務課長、古林正人係長、平元万晶主任、須田木諭社員、江口順子氏、貞富佐月氏に深く御礼を申し上げます。

ここにお名前を挙げて御礼申し上げた方々の他にも、筆者と集水井内等で伴にすべり面粘土の探索・採取を実施下さった数多くの国土防災技術㈱社員の皆様、施工業者の皆様にも心より深く御礼を申し上げます。皆様、本当に有り難う御座いました。

## 参考文献

- 1) 玉田文吾・福田順二：地すべり面の形成過程と粘土鉱物との関係，地すべり，Vol.28，3，pp.25-32，1991
- 2) Skempton, A.W. : Long-Term Stability of Clay Slopes, Geotechnique, Vol.14, No.2, pp.77 ~ 101, 1964
- 3) Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andresen, A. and Brown, J.D. : A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, Geotechnique, Vol.21, pp.273-328, 1971
- 4) 佐野 彰・三田地利之・澁谷 啓：地すべり面強度定数決定のための軟岩用自動繰返し一面せん断試験機の開発，地すべり，Vol.31，No.2，pp.41 ~ 45，1994
- 5) 佐野 彰・三田地利之・澁谷 啓・大河原正文：繰返し一面せん断試験による軟岩の残留強度測定と地すべり安定問題への適用，直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集，(社)土質工学会発行( (社)地盤工学会に改名)，pp.239 ~ 244, 1995
- 6) 徳永光一・古賀 潔：X線造影法による突固め土の透水間隙について，土と基礎，Vol.39，No.4，pp.15 ~ 20，1991
- 7) 岸本良次郎・吉田 純：土の中距離剪断試験試作機の構造と性能の概要，地すべり，Vol.34，No.2，pp.57 ~ 61，1997
- 8) 岸本良次郎・向井田善朗・佐藤健司：土の剪断の進行にともなう剪断層構造の変化，地すべり，Vol.34，No.1，pp.8 ~ 14，1997
- 9) 澁谷 啓・三田地利之・高田増男：粘性土の一面せん断試験に関するいくつかの提案，直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集，(社)土質工学会発行( (社)地盤工学会に改名)，pp.127 ~ 134，1995
- 10) 三田地利之・九田敬行・大河原正文：全自動繰返し一面せん断試験装置の開発と安定解析用強度パラメータの決定，第 39 回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.265 ~ 268，2000
- 11) 大河原正文・三田地利之・小野寺賢一：地すべり解析用小型自動繰返し一面せん断試験装置の開発と試験方法の最適化，地すべり，Vol.37，No.1，pp.35 ~ 43，2000
- 12) Hvorslev, M.J. : Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils, Proc. Am. Soc. Test. Mater. 39, pp.999-1022,

1939

- 13) 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，地すべり，Vol.15，No.2，pp.25～32，1978
- 14) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課・建設省土木研究所：地すべり面の土質定数の決定手法に関する研究，第42回建設省技術研究会報告，pp.150～185，1988
- 15) 宜保清一・武居有恒・小波蔵政良：平均すべり面強度定数の算定方法について，地すべり，Vol.20，No.4，pp.1～6，1984
- 16) 宜保清一・江頭和彦・仲村 哲：崩積土すべり土の土質と残留強さ，地すべり，Vol.30，No.2，pp.25～29，1993
- 17) 宜保清一：残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度，地すべり，Vol.31，No.3，pp.24～30，1994
- 18) 宜保清一・陳 信雄・江頭和彦・林 義隆・周 亜明：台湾，中部横貫公路地すべり土の残留および回復強度特性，地すべり，Vol.34，No.2，pp.50～56，1997
- 19) 中村真也・宜保清一・周 亜明・江頭和彦：地すべり土の残留強度包絡線の湾曲化と強度定数決定手法，地すべり，Vol.36，No.1，pp.28～34，1999
- 20) 中村真也・宜保清一・江頭和彦・吉永安俊：地すべり土の回復強度と鉱物組成との関係，地すべり，Vol.37，No.3，pp.10～17，2000
- 21) 中村真也・宜保清一：地すべり土の回復強度と垂直応力の影響，地すべり，Vol.37，No.3，pp.18～24，2000
- 22) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔・中森克己：地すべり粘性土の強度特性，地すべり，Vol.28，No.1，pp.9～16，1991.
- 23) 鈴木素之・梅崎健夫・川上 浩：リングせん断試験による粘土の残留強度特性，直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集，(社)土質工学会発行(社)地盤工学会に改名)，pp.269～274，1995
- 24) 川上 浩・梅崎健夫・鈴木素之：垂直応力の変化による粘土の残留強度特性，第35回地すべり学会研究発表講演集，pp.361～362，1996
- 25) 辰谷明記・梅崎健夫・河村 隆：地下水排除工における地すべり粘土の残留強度特性(その1)，第36回地盤工学会研究発表講演集，pp.307～308，2001
- 26) 辰谷明記・梅崎健夫・河村 隆：地下水排除工における地すべり粘土の残留強度特性(その2)，第37回地盤工学会研究発表講演集，pp.225～226，2002



- 27) 村尾英彦・飯久保巍・北野幹夫：リングせん断試験機を用いた地すべり面強度定数決定のための基礎的検討（その１），第 41 回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.101 ~ 104，2002
- 28) 村尾英彦・澁谷達也・前原祐志・國香正念・飯田 肇・酒井英男：リングせん断試験機を用いた地すべり面強度定数決定のための基礎的検討（その２），第 42 回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.83 ~ 86，2003
- 29) 福本安正・寺川俊浩・小宮利彦：地すべり斜面の安定解析と原位置大型供試体の長期クリープ試験，地すべり，Vol.15，No.4，pp.1 ~ 11，1979
- 30) 永山 功・大槻英治・斎藤 正明：簡易岩盤せん断試験機による軟質岩盤の調査，第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.561 ~ 565，1993
- 31) フック，ブレイ著，小野寺 透，吉中龍之進訳：『岩盤斜面工学』，朝倉書店，1979.
- 32) Haverland,M.L., Slebir,E.J. : Methods of performing and interpreting in-situ shear tests, Proc. 13th symposium on Rock Mechanics. ASCE , pp.107 ~ 137 , 1972
- 33) Ross-Brown,D.M., Walton,G. : A Portable Shear Box for Testing Rock Joints, Rock Mechanics 7 , pp.129 ~ 153 , 1975.
- 34) 山田正雄：地すべり地における土質・岩石試験結果について，地すべり，Vol.26，No.2，pp.17 ~ 23，1989
- 35) 紀平潔秀：すべり面の構造についての事例研究，地すべり，Vol.26，No.2，pp.9 ~ 16，1989
- 36) 紀平潔秀：すべり面粘土の物理的・力学的特性，地すべり，Vol.27，No.2，pp.1 ~ 8，1990
- 37) 山崎孝成・眞弓孝之：すべり面の特性の把握と計測，地すべり学会シンポジウム「地すべりの計測に関する諸問題」論文集，pp.38 ~ 53，1994
- 38) 山崎孝成・眞弓孝之・讃岐利夫：変成岩分布地帯の地すべり粘土の構造と粒度特性，第 35 回地すべり学会研究発表講演集，pp.129 ~ 132，1996
- 39) 山崎孝成・眞弓孝之・由田恵美：高純度粘土鉱物のリングせん断特性～すべり面粘土との対比～，地すべり，Vol.37，No.2，pp.30-39，2000
- 40) 眞弓孝之：御荷鉾緑色岩類地すべり地におけるせん断強度定数の評価方法，第 36 回地すべり学会研究発表講演集，pp.253 ~ 256，1997

- 41) 眞弓孝之・由田恵美：土質試験によるすべり面の特性把握（２）～リングせん断試験による残留強度計測～，第 35 回地盤工学会研究発表講演集，pp.587 ～ 588，2000
- 42) 由田恵美・山崎孝成：リングせん断試験の残留強度実現における一考察～地質による実現変位の違い～，第 37 回地すべり学会研究発表講演集，pp.381 ～ 384，1998
- 43) 由田恵美・山崎孝成：粗粒径成分を多く含む地すべり粘土のリングせん断試験，第 38 回地すべり学会研究発表講演集，pp.111 ～ 114，1999
- 44) 由田恵美・眞弓孝之：土質試験によるすべり面の特性把握（１）～すべり面の特徴と土質試験～，第 35 回地盤工学会研究発表講演集，pp.585 ～ 586，2000
- 45) 釜井俊孝・宮田雄一郎：地すべり粘性土の一面せん断試験における破壊の伝播過程，地すべり，Vol.29，No.4，pp.9 ～ 17，1993
- 46) 岸本良次郎：土の一面剪断試験により作られた剪断層の構造，地すべり，Vol.31，No.1，pp.10 ～ 20,1994.
- 47) 岸本良次郎：含水比による剪断層構造の変化および剪断層の透水性，地すべり，Vol.34，No.2，pp.1 ～ 8,1997.
- 48) 大河原正文・三田地利之・棚田 真・藤村正二・米田哲朗：繰り返し一面せん断試験によるカオリン粘土のせん断面の構造と形成過程，地すべり，Vol.37，No.2，pp.1 ～ 9，2000
- 49) 大河原正文：繰り返し一面せん断試験による粘土の残留強度測定方法に関する基礎的研究，学位論文，pp.162，2000
- 50) Voight,B. : Correlation between atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils , Geotechnique , Vol.23 , No.2 , pp.265-267 , 1973
- 51) Skempton,A.W. : Residual strength of clays in landslides,folded strata and the laboratory , Geotechnique Vol.35 , No.1 , pp.3-18 , 1985
- 52) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. , The drained residual strength of cohesive soils" , Geotechnique , Vol.31 , No.2 , pp.181-213 , 1981
- 53) Kenny,T.C. : The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils , Proc.Geotechnical Conf. , Oslo 1 , pp.123-129 , 1967
- 54) Kenny,T.C. : Residual Strength of Mineral Mixtures , Proc.9th I.C.S.M.F.E. , pp.155-160 , 1977
- 55) Mesri, G.・Cepeda-Diaz, A.F. : Residual shear strength of clays and shales ,

Geotechnique, Vol.36, No.2, pp.269-274, 1986

56) Collotta, T.・Cantoni, R.・Pavesi, U.・Ruberl, E.・Moretti, P.C. : A correlation between residual friction angle and the index properties of cohesive soils, Geotechnique, Vol.39, No.2, pp.343-346, 1989

57) 中村浩之：地すべりとすべり面の残留強度，土木技術資料，Vol.21, No.8, pp.14 ~ 19, 1979

58) 中村浩之・白石吉信・清水清文：地すべり粘土のせん断強度試験結果を用いた斜面安定度の評価，土木技術資料，Vol.22, 8, pp.31 ~ 35, 1980

59) 中村浩之・綱木亮介・吉田克美：地質帯ごとにみた地すべり面のせん断強度定数の評価，土木技術資料，Vol.32, 11, pp.48 ~ 54, 1990

60) 宜保清一：地すべり斜面の安定性評価に用いる強度定数の考え方，土と基礎，Vol.35, No.11, pp.27 ~ 32, 1987

61) 宜保清一・江頭和彦・佐々木慶三・吉沢光三：地すべり土塊のせん断強度と斜面安定度評価 - 新潟県安塚町牧野地すべりを例として - ,土と基礎, Vol.38, No.12, pp.35 ~ 40, 1990

62) 佐野 彰・三田地利之・大河原正文：地すべり安定解析用強度パラメータの決定法，地すべり，Vol.33, No.3, pp.1 ~ 7, 1996

63) 眞弓孝之・熊井直也：土質試験結果を利用した地すべり安定解析（事例1），第38回地すべり学会研究発表講演集，pp.291 ~ 294, 1999

64) 中村真也・宜保清一・太田英将・林 義隆：すべり面で発揮される強度について - 沖縄，仲順地すべりの三次元安定解析 - ,第41回日本地すべり学会研究発表講演集, pp.155 ~ 158, 2002

65) 鵜飼恵三：簡易 Janbu 法による斜面の三次元安定解析，地すべり，Vol.24, No.3, pp.8 ~ 14, 1987

66) 鵜飼恵三・細堀建司：簡易 Bishop 法，簡易 Janbu 法および Spencer 法の三次元への拡張，土木学会論文集，394 ( -9), pp.21 ~ 26, 1988

67) 榎田充哉：三次元簡易 Janbu 法を用いた側壁効果と移動方向の検討，第42回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.177 ~ 180, 2003

68) 宇津木愛正・加藤邦雄・眞弓孝之・昆 幸弘：くり返し一面せん断試験機の開発と適用，第三十四回治山研究発表会論文集，pp.144 ~ 151, 1994

69) Mayumi, T., Yamasaki, T., Abeyasinghe, A.M.K.B. and Kato, K.: Measurement of

- the strength parameter on undisturbed slip surface by new Slip Surface Direct Shear box apparatus, Proc. 1st European conference on Landslides. IAEG, pp.641-647, 2002
- 70) 眞弓孝之・柴崎達也・山崎孝成：すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価，地すべり，Vol.40，No.4，pp.15～24，2003
- 71) Hvorslev, M.J.: Physical components of the shear strength of saturated clays, Proc. ASCE Research Conf. On Shear Strength of Cohesive Soils, pp.169-273, 1960
- 72) 三田地利之・九田敬行・大河原正文：全自動繰り返し一面せん断試験装置の開発と安定解析用強度パラメータの決定，第39回日本地すべり学会発表講演集，pp.265～268，2000
- 73) 山崎孝成：変成岩起源のすべり面粘土リングせん断試験結果の解釈，「再滑動型地すべりにおけるせん断帯の構造と土質特性に関する研究 - 高純度粘土鉱物リングせん断試験との対比 -」，学位論文，5章2節3項，pp.158～171，2000
- 74) 眞弓孝之・山崎孝成・岩尾雄四郎：すべり面におけるせん断強度と物理的性質との関係，地すべり，Vol.41，No.2，2004（掲載予定）
- 75) 大河原正文・米田哲朗・三田地利之・多田元彦：古期地すべり面判定のためのすべり層粘土の鉱物学的・化学的評価～岩手県明倉沢古期地すべり地を例として～，応用地質，Vol.37，No.6，pp.2～13，1996
- 76) 眞弓孝之・由田恵美・山崎孝成：すべり面の表面粗さと残留内部摩擦角との関係，第39回日本地すべり学会発表講演集，pp.269～272，2000
- 77) 眞弓孝之・由田恵美・山崎孝成：レーザフォーカス変位計を用いたすべり面の表面粗さ計測，第36回地盤工学会研究発表講演集，pp.339～340，2001
- 78) 日本規格協会：「JISハンドブック機械計測」，(株)日本規格協会，pp.739
- 79) 眞弓孝之・川崎幸一郎・柴崎達也・山崎孝成・岩尾雄四郎：含スメクタイトすべり面粘土の残留せん断強度特性，GET九州，日本応用地質学会九州支部会報，No.25，2004
- 80) 山崎孝成：変成岩起源のすべり面粘土リングせん断試験結果の解釈，「再滑動型地すべりにおけるせん断帯の構造と土質特性に関する研究 - 高純度粘土鉱物リングせん断試験との対比 -」，学位論文，3章2節3項，pp.64～73，2000
- 81) 守随治雄：第三紀層地すべり地におけるすべり面の発達過程とすべり面粘土の形成

について，地すべり，Vol.36，No.2，pp.13～23，1999

82) 佐々恭二・福岡 浩：高速リングせん断試験機による土砂の運動時の内部摩擦角の測定，地すべり，Vol.29，No.4，pp.1～8，1993

83) 佐々恭二・李 宗学：高速リングせん断試験機による地すべり運動時の見かけの摩擦角の測定，地すべり，Vol.30，No.1，pp.1～10，1993

84) Sassa, K.: Prediction of earthquake induced landslides，地すべりの地盤工学的諸問題に関するシンポジウム論文集，(社)地盤工学会四国支部発行，pp.1～18，1996

85) 岡田康彦・佐々恭二・福岡 浩：大阪層群砂質土の液状化挙動，地すべり，Vol.36，No.3，pp.91～107，1999

86) 岡田康彦・佐々恭二・福岡 浩：リングせん断試験機を用いたせん断ゾーンにおける過剰間隙水圧発生ポテンシャルについて，地すべり，Vol.39，No.3，pp.10～20，2002

87) 地学団体研究会・新版地学事典編集委員会編：『新版 地学事典』，(株)平凡社発行，1996

88) 宜保清一：島尻層泥岩の残留強度測定と結果の解釈-地すべり・崩壊土の残留強度特性( )-，農業土木学会論文集，No.104，pp.61～68，1983

89) 中村真也・宜保清一・林 義隆：残留係数を導入した地すべりの三次元安定解析-沖縄，仲順地すべりについて-，農業土木学会論文集，No.229，pp.47～53，2004

90) 申 潤植：『地すべり工学-理論と実践-』，山海堂，1989

91) 申 潤植：『地すべり工学-最新のトピックス-』，山海堂，1995

92) 眞弓孝之・柴崎達也・山崎孝成：リングせん断試験機による間隙水圧計測の試み(1)，第41回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.55～58，2002

93) 柴崎達也・眞弓孝之・山崎孝成：リングせん断試験機による間隙水圧計測の試み(2)，第41回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.59～62，2002

94) 柴崎達也・眞弓孝之・山崎孝成：リングせん断試験機による間隙水圧計測の試み(3)，第42回日本地すべり学会研究発表講演集，pp.429～430，2003

95) 建設省河川局監修：『改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・計画編』，山海堂，1997

96) 山田剛二・渡 正亮・小橋澄治：『地すべり・斜面崩壊の実態と対策』，山海堂，1971

97) 太田英将・林 義隆：地すべり三次元安定解析の利用方法(その1)，第37回地すべり学会研究発表講演集，pp.441～444，1998

- 98) 下井田 実・有澤俊治・村松道康・村中亮太・小川紀一郎・小野田 敏：地下水を考慮した地すべり三次元安定解析結果，第 38 回地すべり学会研究発表講演集，pp.271 ~ 274，1999
- 99) 木村隆俊・小堀勝弘・川場浩二：大規模地すべり地における三次元解析の適用と建設コスト縮減について，第 38 回地すべり学会研究発表講演集，pp.275 ~ 278，1999
- 100) 郎 煜華・佐伯 孝：三次元地すべり安定解析およびその影響要素の評価，第 38 回地すべり学会研究発表講演集，pp.279 ~ 282，1999
- 101) 鵜飼恵三・萩原敏行・井田寿朗：モデル化された切土斜面の 3 次元安定解析と留意点，地すべり，Vol.29，No.4，pp.18 ~ 24，1993
- 102) 蔡 飛・鵜飼恵三・黄 文峰：斜面安定性の評価-極限平衡法と弾塑性 FEM の比較，地すべり，Vol.39，No.4，pp.9 ~ 15，2003
- 103) J.Gunatilake, Iwao,Y. and Yamasaki,T.:Analysis of the landslide mechanism of Iwakura creep in Saga, Japan, Proc. 1st European conference on Landslides. IAEG, pp.559-564，2002
- 104) Iwao,Y., J.Gunatilake, B. Abeysinghe and Mochida, S.:Statistical analysis as a successful tool to be used in discrimination landslide area in topographical maps, Proc. 1st European conference on Landslides. IAEG, pp.227-232，2002
- 105) Yamazaki,T., Yamasaki,T. and Iwao,Y., :Practical use of borehole televiewer at re-sliding type landslides, Proc. 1st European conference on Landslides. IAEG, pp.715-720，2002
- 106) 山上拓男・植田康宏：地すべり地強度定数の新しい逆算法 ( ) -基本概念-，地すべり，Vol.21，No.2，pp.16 ~ 21，1984
- 107) 山上拓男・植田康宏：地すべり地強度定数  $c$ ， の新しい逆算法 ( ) -簡便 (分割) 法に基づく逆算法-，地すべり，Vol.21，No.3，pp.24 ~ 31，1984
- 108) 山上拓男・植田康宏：地すべり地強度定数  $c$ ， の新しい逆算法 ( ) -Bishop 法に基づく逆算法-，地すべり，Vol.21，No.4，pp.10 ~ 17，1985
- 109) 山上拓男・植田康宏：複合すべり面法に基づく破壊斜面の強度定数逆解析，土と基礎，Vol.36，No.12，pp.37 ~ 42，1988