# 地すべり末端部の崩落範囲の予測技術の開発

共同研究報告書

# 平成24年9月

独立行政法人土木研究所応用地質株式会社
日本工営株式会社
株式会社パスコ
坂田電機株式会社

Copytight  $\odot$  (2012) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、 本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずし てこれをおこなってはならない。

# 地すべり末端部の崩落範囲の予測技術の開発 共同研究報告書 執筆者名簿

武士俊也	(独) 土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 上席研究員
藤澤和範	(独) 土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 元 上席研究員**1
石田孝司	(独)土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 元 主任研究員**2
坂野弘太郎	(独)土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 交流研究員
坂本孝之	(独)土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 元 交流研究員**3
千葉伸一	(独)土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 元 交流研究員**4
宇都忠和	(独)土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 元 交流研究員※5
本間宏樹	(独) 土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム 元 交流研究員**4
大塚康之	応用地質(株) エンジニアリング本部 技術研究所 所長
斎藤秀樹	応用地質(株) エンジニアリング本部 技師長室 副技師長
矢部 満	応用地質(株) 計測システム事業部 技術部 グループリーダー
村崎充弘	応用地質(株) データベース事業部 技術部 部長
西山昭一	応用地質(株) エンジニアリング本部 地盤解析部 専任職
北原哲郎	応用地質(株) エンジニアリング本部 コンサルティング二部 GM
稲垣 裕	日本工営(株) 国土保全事業部 防災部 次長
児玉 浩	日本工営(株) 国土保全事業部 防災部 横浜オフィス 課長
三島研二	(株)パスコ 研究開発センター 技師長
下村博之	(株)パスコ コンサルタント事業部 防災技術部 部長
小松崎弘道	(株)パスコ 東日本事業部技術センター 副センター長
野田敦夫	(株)パスコ コンサルタント事業部 防災技術部 砂防一課 主任技師
樋口佳意	坂田電機(株) 計測工事部計測技術課 技術課長
石坂周平	坂田電機(株) 計測工事部計測技術課 係長
池田親	坂田電機(株) 営業部営業2課 課長
神山翔太	坂田電機(株) 計測工事部 計測技術課

※1:(株)高速道路総合技術研究所、※2:国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所、 ※3:共立工営(株)、※4:応用地質(株)、※5:(株)エイト日本技術開発.

(平成24年7月現在)

# 地すべり末端部の崩落範囲の予測技術の開発共同研究 目次

1. はじめに	1-1
1.1 研究の背景	1-1
1.2 研究目的	1-2
1.3 達成目標	1-2
9 洋動層厥	9-1
<ol> <li>         6. 百期履座         9.1 宇运休制        </li></ol>	2-1 9-1
2.1 美胞体制	2°1 9-9
2.2 夫爬上住 2.2 其爬上住	2-2
2.3 活動履歴	2-4
<ol> <li>計測機器および計測・処理方法</li> </ol>	3-1
3.1 計測に使用する機材	3-1
3.1.1 中距離計測用 3D レーザスキャナ(トプコン社製 GLS-1000,GLS-1500)-	3-2
3.1.2 長距離計測用 3D レーザスキャナ(リーグル社製 LMS-Z420i)	3-3
3.1.3 GLS-1000 から GLS-1500 への変更	3-4
3.2 計測・処理方法	3-5
3.2.1 中距離計測用 3D レーザスキャナ	3-5
3.2.2 長距離計測用 3D レーザスキャナ	3-13
4   構内	4-1
4.1 構内実験の目的	<i>4</i> -1
4.1 (中门天歌》)口门 4.9 宇貽宇協笛可	тт 1-1
4.2 天候天旭回// 4.2 卦測可能距離範囲レ入射在度/ことる影響の確認実験	4-9
4.5 可例可能距離範囲と八利円及による影響の確認失踪	4 4
4.4 乙万円がら計測した品件の古成万伝の唯認美練	4-11
4.0 変化の使用性能の確認わよいと一ム性の影響確認	4-10
	4-19
4.7 計測対象の乾湿境境の影響確認実験	4-21
4.8 対流の影響確認実験	4-24
4.9 植生の影響排除のための確認実験 <sup>-</sup>	4-29
5. 現地計測箇所の概要	5-1
5.1 計測対象候補箇所と選定·非選定理由	5-1
5.2 A地区	5 - 2
5.2.1 A地区の地形地質	5-2
5.2.2 A地区の斜面変動履歴	5-4
5.2.3 A地区の斜面変動機構	5-8
5.3 B地区	5-9
5.3.1 B地区の地形地質	5-9
5.3.2 B地区の斜面変動履歴	5-12
5.3.3 B地区の斜面変動機構	5-17
5.4 C 地区	5-18
5.1 (地区の地形地質	5-18
5.1.1 C+002/2010/2010 5.1.9 C 地区の斜面亦動層歴	5-90
9.4.4 0-2002の1回及到限店 5.4.3 C地区の斜面亦動機構	5-99
J.4.J し地区/V/計曲次期/成倍	U 40

5.5 D地区	5-24
5.5.1 D地区の地形地質	5-24
5.5.2 プラムラインデータの状況	5-26
6 弐山测注田	C-1
0. 訂例和未 (1. 4. 地区)	0°1 C-1
6.1 A地区 6.1 1 赴御士注	0 <sup>-</sup> 1
0.1.1 計例力伝	6-1
6.1.2 計例結果	6-8
	6-16
6.2 D地区(中起應計例)	6-24 C.04
6.2.1 計測力法	6-24
6.2.2 計例結果 	6-30
	6-38
6.3.1 計測目的と計測万針	6-38
6.3.2 計測方法	6-41
6.3.3 計測結果	6-48
6.3.4 座標マッチングの結果	6-55
6.3.5 差分評価(変位量の算定)	6-62
6.4 C地区	<b>6-6</b> 4
6.4.1 計測方法	<b>6-6</b> 4
6.4.2 計測結果	6-74
6.4.3 差分解析	6-83
6.5 D地区	6-92
6.5.1 計測方法	6-92
6.5.2 計測結果	3-100
6.5.3 差分解析	6-107
6.5.4 連続計測結果	6-115
7. 計測結果と現象解析	7-1
7.1 A地区	7-1
7.1.1 既往資料による変動機構	7-1
7.1.2 計測結果の整理と考察	7-20
7.1.3 計測期間における既設計器の観測状況	7-23
7.1.4 考察	7-31
7.1.5 本事例での評価及びまとめ	7-31
7.2 B地区の計測結果と現象解析	7-32
7.2.1 既往資料による変動機構	7-32
7.2.2 計測結果の整理と考察	7-37
7.3 C地区の計測結果と現象解析	7-45
7.3.1 既往資料による変動機構	7-45
7.3.2 計測結果の整理と考察	- 7-47
7.4 D地区の計測結果と現象解析	7-54
7.4.1 計測条件等	7-54
7.4.2 計測結果の整理と計測対象の変形機構	7-58
7.4.3 考察	7-61
7.4.4 D地区でのまとめ	7-65

8. おわりに	8-1
8.1 成果のまとめ	8-1
8.2 今後の課題	8-2

謝辞

引用・参考文献

## 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

地すべり頭部など移動土塊の周辺において亀裂などの前兆現象が発生した場合には、速やかに移動 土塊の範囲と規模、またその挙動を的確に把握し、その後の挙動を予測することが求められている。 図 1.1 に示した事例のように、地すべり土塊末端部付近の小規模な崩落(以下、「末端崩落」という。) が背後の移動土塊全体の崩落の誘因となる場合がある中、特に地すべり末端部付近の地形的変化を的 確に捉えることにより、末端崩落の範囲や規模、さらには不動土層と移動土層の境界となるすべり面 (層)の位置を想定できる可能性があると考えている。

一般的には、地すべりの前兆現象と考えられる亀裂や段差は地すべり頭部付近に現れることが多く、 これら前兆現象が発生した場合には地すべり頭部の亀裂をまたいで地盤伸縮計を設置し、その変位を 計測する。一方、地すべり末端部に表れる変状は、地すべり土塊がある程度動いた後に表れる場合が 多く、地すべりの初期段階においてその位置を正確に特定することは難しく、また末端部付近の変位 を計測する手法も一般化はされておらず、計測を実施するケースは極めて少ないと言える。従って、 地すべり末端部において地形的にどのような変化が生じているかを明らかにすることは、地すべりの 運動機構や、その後に生ずる可能性のある末端崩落の範囲と規模、さらには背後の地すべり移動土塊 の規模を把握する上でひとつの重要な課題である。



現模崩壊後) (5月1)

(中部地方整備局 HP より)



←5月20日20:00の状況 (中部地方整備局越美山系砂防事務所HPより)

図1.1 大規模崩落の前に末端部付近の小規模な崩落が発生した事例

#### 1.2 研究目的

本共同研究では、地すべりが大きく滑動する前の段階における地すべり末端部付近の地形変化を面 的に把握することを目的として、3Dレーザスキャナを用いた計測手法の検討、並びに計測を実施す る。また、3Dレーザスキャナによる計測結果を評価することを目的として、現地調査や孔内傾斜計 計測値などによる地すべり現象面との比較解析を実施する。

図 1.2 には、本研究で実施する技術開発のイメージを示す。



図1.2 本研究で実施する技術開発のイメージ

#### 1.3 達成目標

本共同研究の達成目標は以下の2点である。

①地すべり初期段階における末端部の変状を面的に計測・把握する手法の開発

②地すべり末端部の変状計測結果を基にした末端崩落の可能性とその範囲・規模を推定する技術 の開発

# 2. 活動履歴

本共同研究は、平成21年4月1日から平成23年3月31日までの2カ年間の計画としてスタートした。以下に共同研究の活動履歴をまとめる。なお、共同研究全体打合せの最終回は平成23年3月22日を予定していたが、平成23年3月11日に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震の影響を考慮し、 共同研究参加各社の同意を得て、平成23年4月28日に延期して開催した。

#### 2.1 実施体制

本共同研究では、3Dレーザスキャナによる計測、すべり面推定手法の活用、地すべり性状把握の 3つの関連分野をまたぐ研究である。研究の目標と全体計画を鑑み、3Dレーザスキャナによる地す べり末端部の変状を面的に計測・把握する手法の検討を主体的に実施する「計測系グループ」と、現 地調査や計測結果等を基に地すべり現象を解析し、末端崩落の範囲・規模想定に繋げる「現象解析系 グループ」を作り、検討を進めてきた。図2.1に全体イメージを示し、また表2.1に各グループの構 成メンバーを示す。なお、トプコン販売株式会社は共同研究の正式メンバーではないが、坂田電機株 式会社との協力関係の下、計測に必要なレーザスキャナ機材の提供や差分解析等において協力を賜っ たため、表2.1に記載した。



図2.1 共同研究の全体像と研究担当グループ

研究グループ名	メンバー
計測系グループ	株式会社パスコ
	坂田電機株式会社
	トプコン販売株式会社
	応用地質株式会社
	土木研究所
	グループリーダー:株式会社パスコ下村氏
現象解析系グループ	応用地質株式会社
	日本工営株式会社
	土木研究所
	グループリーダー:日本工営株式会社児玉氏

表 2.1 研究グループ構成とメンバー

#### 2.2 実施工程

本共同研究の実施工程を表2.2に、また活動履歴を表2.3に示す。

平成21年度には、両グループで研究計画を議論した上で、計測対象斜面の候補地を抽出し、現地確認を踏まえて4箇所の計測対象斜面の選定を行い、計測系グループを主体に3Dレーザスキャナを用いた斜面変位計測を実施した。斜面変位計測に必要となった観測架台や参照点の設置にあたっては、現象解析系グループが中心となって設置工事を行った。現象解析系グループは、計測対象斜面の地質調査結果や他の変位計測データなど基礎資料の整理と、3Dレーザスキャナによる計測結果の対比等を行った。また、3Dレーザスキャナの計測性能評価を目的とし、土木研究所構内での実験を実施した。

平成22年度には、平成21年度に選定した4地区において斜面変位計測を継続した。これらの計測 箇所とは別に、構内実験等により、対流による計測精度への影響確認や、植生被覆斜面を対象とした 実験的な計測を実施した。

なお、共同研究期間となる2カ年の間には、崩落に至る程度の動きを有する斜面における好適な地 すべりサイトが得られなかったため、末端部付近の地形変状を計測により把握することができなかっ た。

2-2

-																							
	3年度	£3	り公表																				
	平成2	4月	成果の																				・第11回打合せ
Ī		3,Ħ																			否検討		
		2月																地な し)			特許の可		・第10回打合せ
		Ē															の作成	- (現) (現)	*				
		12A											大策を整3		_	中・小	2年1月	東外田 (2)	服告書執3				
		11,	Ģ									če choste Bio	楽題と解			- Mar - La							・第9回打合せ
	年度	10月	見とりまる									· [2]			日間造								
	平成22	<del>В</del> 6	十測、成男									実験計画			対面の詳考								
		8,9	現地書					1							路時計測								・第8回打合せ
		7,A	ĺ							1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1													
	ľ	69	ĺ					1		の設計 追加箇所	_		24										・第7回打合せ
		5月	ĺ							自加億所	測を実施 副を実施		- 反映さt										
		41	ĺ					五 追加者			中的に計		>次年度(	「「「「」」							· · · · ·		
		ЗД						第一回に			合には集		決策整理:	色加計測									・第6回打合せ
	ľ	2.A	ĺ					定時観測			見される場 「新した福		課題 一次			Τ			書秋筆				
		Ē									お子 2世 (1) 第一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一				也形など)	・分析			目次作成				・第5回打合せ
筅		12月									に場合、プ				· 通識座 (1	開始							
う開		11月									が見られ る情報が3				韓国の詳								・第4回打合せ
则技術	1年度	10月	中間評価								測(変化: 状に開す				臨時計測								
の予測	平成2	<del>В</del> 6	見地計測、								程度の計 ク等の変												・第3回打合せ
範囲(		В,	m								1:月1回 1:75%												
崩落		7.A								劉	治時計測			增									・第2回打合せ
部の		Ë9			#		幣	目斜面違い	設売	も権者との設置				問約面の記									<ul> <li>- 嘉瀬川ダム事前現地調査</li> </ul>
1末端	-	5 J		*	14 年末		集、内容 	定時観	「「「」」	設計・1		ļ	ļ	新設									<ul> <li>・手取川ダム現地調査 (5/26<sup>-27</sup>)</li> <li>・第1回打合せ(5/12)</li> </ul>
ずべい	-	4月		協定書			文献収								_								
地		東部 鶴田 5			0		0	0	٥	٥	0	0	۵	0		0	0	0	٥	٥			
研究	蜐	¥ Г	,																				
玉回	宅者内の分	と書			0		0	0	0		0	0	-	0		0	0	0	0	0			
長2.2	共同研:	0×1×0			0		0	٥	0	٥	٥	0	0	0		0	٥	0	٥	٥			
ΠH	ŀ	the distribution			0		0	0	0	0	0	0	0	0	,	0	0	0	0	0			
-		* 七	1				-									-			-				
	뛰	毎世留井			٥		۵	٥	٥	٥	٥	0	۵	0		٥	0	0	٥	٥			
	研究分	地の世			0		0	0	0	0	0	0	0	0	,	0	٥	0	0	0			
-		+					题				畲			すねべ場	羅	4	Q8;	Æ					
							<b>机技術と</b> 1		確認 の確認		現象発見	と計測	調む	植生、地:	(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	着 こどのよう	- 末端崩落	8억面で適 5					
		「「「」」の「「」」の「」」の「」」の「」」の「」」の「」」の「」」の「」」の		D.		≡成 E様の作成	1、既往劉	観ら	の適用条件	ta ma	茶館っく」	の崩壊実動	3条件課題 1.際決手法 目を視定	5回 構造、 11400年14日	間間の運動	E種・分析 Kの関係分 生する前	を基にし <sup>1</sup> 5の作成	に手法を まを評価す	しまとめる	類			
		*		ち針の確認 う担	JIK 扱い 用究協定	+ 囲碁の fl 〒 ム 伶体 f	又集により	漫測斜面の	する機器 0 機器、1	ト屋等の記 たとの調査 下屋設置	+進 +週(地3	<b>E槽によ</b> る	機器の適用 きの課題 2 時の実運」	北道北、武武	た、計 2 2 2 2 2 2 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2	■ ータの単 「「 ータの曲 「 「 」 ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	2.余期底 48	で作成しい その有効や	効果をとい	き等への 坊 かり			
				·研究7 ·研究5	3 晶形 -	・実施! ・システ	・ 文献心 を把握	· 定時観	・使用す ・自前の	·観測小 ·地権港 ·観測小	· 定時書 - 西時書	·大型土	<ul> <li>計測規</li> <li>計測段</li> <li>(災害息</li> </ul>	<ul> <li>・ 地形、</li> <li>こ 料 45、</li> </ul>	り性状な	- 計測: - 末端道 (未進) 調練が準	·3DLSI 囲・規模	・②-3 <sup>-</sup> させ、そ	·研究总	· 华会君 · 华会勇			
							以技術の把	國建造	服務	制約面への 設置	=	貧と計測 √要なし)	り課題と解	言の現地調		犬と 末端崩 >関係分析	有範囲予測	もの評価	통と りまと (告書)	見発表			
		研究補					既往鏑悰	計測納료	が手展相	定時観測 /屋・基礎	現地計測	室内実 まの結果必	計測時ơ. E理	計測斜面		斜面変わ 日・規模の	末端崩落 >整理	予測技術	研究成長	研究成果			
-							齒1.	<b></b> .−2.	<u>0</u> -3.	长 ①-4. 観測小	<b></b> .0−5.	①-6. (検討)	□-7. 決策號	\$- -	ŧ	► 2-2. 裕然展	②-3. 技術の	@-1.	5-2. 8 (∄	∭−3.			
										の地形変も						・規模のご			崩落範囲 マニュア.A		後討		ň
		研究項			制の構築					くしな画						·唐 湖範囲 の検討			べり末端 予測技術		講の可否?		
					田兇体					回地す				1		2)末端 則技術		1	の 地域で する の で		中相参		載

m+
6
鉴
赵
<u>+</u>
黑
pf-
6
閧
콘
擦
厝
5
Ř
궤
当
₩
5
*
٠ لە
÷
폰
5
臣
臣
ļα
++
++
++

# 2.3 活動履歴

本共同研究にて実施した打合せ、現地確認、現地計測および実験は以下のとおりである。

日付	打合・実験	参加者	主な検討概要
H21.5.12	第1回全体打合せ	全社	研究計画の確認、計測機器の紹介
H21.5.23	A地区現地確認	全社	A地区の現地確認、管理者との打
			合せ
H21.6.18,19	B地区現地確認	全社	B地区の現地確認、管理者との打
			合せ
H21.7.6	C 地区事前確認	全社	C 地区の現地確認
H21.7.10	黒田地区事前確認	全社	現地確認
H21.7.13	B 地区予備計測	計測系 G 主体	計測位置確認、架台設置方法確認
H21.7.16	第2回全体打合せ	全社	計測候補地での計測計画確認、構
			内実験計画確認
H21.8.4	第1回構内実験	全社	計測距離、対象物の角度を変えた
			計測
H21.8.31	C 地区事前準備	計測系 G	架台設置、計測点位置出し、草刈
			り、土砂除去
H21.9.2	第3回全体打合せ	全社	構内実験結果の報告、各計測斜面
			での計測状況確認
H21.9.9	D 地区事前確認	全社	D 地区の事前確認、管理者との打
			合せ
H21.9.10	C 地区第1回計測	計測系 G 主体	C地区での初期値計測
H21.9.11	B 地区事前確認	全社	架台・参照点設置
H21.9.15	A地区第1回計測	全社	A地区での初期値計測
H21.10.5	B地区リーグル用架台	応用地質㈱	左岸側計測架台の据え付け
	設置	土研	
H21.10.9,10	B地区第1回計測	全社	B 地区における初期値計測
H21.10.22	第2回構内実験	計測系 G 主体	対象物の乾湿の影響、2時期の再
			現性、2 方向の合成など
H21.11.9	第4回全体打合せ	全社	第2回構内実験結果の報告、各計
			測地の状況確認

- 衣 4.5 十戌 4 十戌に 天旭 し に 打 ロ ビ 、 坑地 唯 認 、 坑地 計 別 及 い ヲ	表 2.3	平成 21 年度に実施	した打合せ、	現地確認、	現地計測及び実験
---	-------	-------------	--------	-------	----------

H21.11.23	松本市 R158 号斜面事	土研	
	前確認		
H21.11.27	C 地区第2回計測	計測系 G 主体	C地区での2回目計測
H21.11.28	D地区第1回計測	計測系 G 主体	D 地区での初期値計測(貯水位が
			高い状態)
H21.11.28	B地区第2回計測	応用地質㈱	リーグル製による第2回計測(実
	(リーグル班)		質第1回)
H21.12.4	A 地区第2回計測	計測系 G 主体	A地区での2回目計測
H21.12.5	B地区第2回計測	計測系 G 主体	トプコン製による第 2 回計測(実
	(トプコン班)		質第1回)
H22.1.20	第5回全体打合せ	全社	第2回構内実験結果の報告、各計
			測値の状況確認
H22.3.16	第6回全体打合せ	全社	3DLS の計測原理学習
			B 地区再測定結果報告
			中間報告書読み合わせ
H22.4.27~29	D 地区第2回計測	計測系 G 主体	GLS-1000 と GLS-1500 の比較、
			堤体の計測(2回目)
H22.5.17	C 地区孔内傾斜測定	土研	
H22.5.29	B地区第3回計測	応用地質㈱	
	(リーグル班)	土研	
H22.6.10	第7回全体打合せ	全社	座標変換方法検討
			各地区の状況確認
			D 地区昼夜連続計測計画 等
H22.6.15	C 地区第3回計測	計測系 G 主体	
H22.7.1	A 地区第3回計測	計測系 G 主体	
H22.7.26~27	E 地区に関する打合	全社	E地区での計測に関する管理者へ
	せ・現地確認		の説明と依頼
H22.8.31	第8回全体打合せ	全社	構内実験計画確認等
H22.9.1	第3回構内実験	計測系 G 主体	植生被覆斜面の計測
			対流の影響確認
H22.9.8~9	D地区第3回計測及び	計測系 G 主体	
	24hr連続計測		
H22.10.8	A地区第4回計測	計測系 G 主体	

H22.11.16	B地区第4回計測	応用地質㈱	
	(リーグル班)		
H22.11.18	第9回全体打合せ	全社	
H22.11.23	C 地区構内傾斜測定	土研	
H22.11.26	C地区第4回計測	計測系 G	
H23.2.2	第10回全体打合せ	全社	
H23.4.28	第11回全体打合せ	全社	3.11 東北地方太平洋沖地震のた
			め、最終打合せは共同研究期間後
			に実施となった。

## 3. 計測機器および計測・処理方法

#### 3.1 計測に使用する機材

3D レーザスキャナはスキャナタイプのレーザセンサであり、ノンプリズムタイプの光波測距儀の 1 種である。3D レーザスキャナは地形や構造物の形状を計測することが可能であり、一般の光波測 距儀にくらべて高速、高密度な計測となる。

3D レーザスキャナの原理は、スキャナ本体から発せられたレーザビームが対象物に当たって戻っ て来るまでの時間から距離を計測し、そのときのレーザビームの水平角と鉛直角の計測値と合わせ て、計測対象の(X, Y, Z)の3次元座標を面的に取得するというものである。1,000~10,000Hzの 計測スピードを持ち、短時間に数10万点の面的な3次元情報を点群データとして取得することが可 能である。

3D レーザスキャナには航空機搭載型・地上設置型・卓上型と大きく3タイプに分類される。短い 距離を高精度で計測するものや、長距離から広い範囲を計測可能なものなど様々なモデルが存在す る。

本研究では、中距離レンジ(概ね 100~300m程度)を主な計測対象とするスキャナとしてトプコン社製 GLS-1000、長距離レンジ(概ね 400m以上)を主な計測対象とするスキャナとしてリーグル社製 LMS-420iを使用することとした。

#### 3.1.1 中距離計測用 3D レーザスキャナ (トプコン社製 GLS-1000, GLS-1500)

主な仕様を**表3.1.1**に示す。トプコン社製GLS-1000,GLS-1500は中距離用の地上設置型3D レー ザスキャナである。

本体にデジタルカメラを内蔵しているため、専用ソフトを用いることにより計測対象の画像を取 得してパソコン画面上で周辺状況を確認しながら計測範囲の設定や計測を容易に操作することが可 能である。

また、レーザは JIS の危険度クラス分けではクラス1の不可視光を用いているため、レーザが目 に入っても人体に影響がない安全設計となっている。

機種名		GLS-1000	GLS-1500
計測距離	反射強度 90%	330m	330m
	反射強度 18%	150m	150m
スキャンス	ピード	3,000 点/秒	30,000 点/秒
レーザクラ	ス	クラス1	クラス1
レーザ波長		1535nm 不可視光	1535nm 不可視光
計測精度	距離精度	4mm (o) / 1~150m	4mm (o) / 1 $\sim$ 150m
	角度精度	6″	6″
計測範囲	鉛直	±35°(最大)	±35°(最大)
	水平	360°(最大)	360°(最大)
重量		16kg	16kg

表 3.1.1 トプコン社製 GLS-1000、GLS-1500の主な仕様



図 3.1.1 GLS-1000の構成

\* GLS-1500の構成も同様である。

## 3.1.2 長距離計測用 3D レーザスキャナ(リーグル社製 LMS-Z420i)

計測距離が長い場合、リーグル社製LMS-Z420iを使用する。この計測器の仕様を表3.1.2に、機器構成を図3.1.2に示す。

スキャンスピードが速く長距離の計測でも計測する時間が短い。500m以上の距離でも安定して点 群を取得することができるなどの特徴がある。

機種名		LMS-Z420i
計測距離	反射強度 80%	1, 000m
	反射強度 10%	$350\mathrm{m}$
スキャンスピード		11,000 点/秒 (ミラー揺動式)
		8,000 点/秒 (ミラー回転式)
レーザクラン	ス	クラス1
レーザ波長		近赤外線
計測精度	距離精度	10mm (標準偏差+距離依存誤差≦20ppm)
	角度精度	$0.01 \deg$
計測範囲	鉛直	80° (最大)
	水平	360°(最大)
重量		約 18kg

表 3.1.2 LMS-Z420iのメーカー公称の仕様





図 3.1.2 LMS-Z420iの構成

#### 3.1.3 GLS-1000からGLS-1500への変更

近年、地上型中距離 3D レーザスキャナはスキャンスピードが向上しており、GLS-1000 は GLS-1500 にバージョンアップされ、GLS-1000 は製造中止となった。このため、研究に使用していた GLS-1000 から GLS-1500 に変更することになった。なお、バージョンアップで変更されたのは、スキャンスピードのみであり、3,000 点/秒から 30,000 点/秒に改良されている。

GLS-1000からGLS-1500に変更しても、研究成果に影響を与えないことを確認するため、同条件、 同一箇所で同時に計測する実験を行なった。実験場所は5.4節で詳述する栃木県日光市(D地区) とした。3Dレーザスキャナで計測したデータを図3.1.3、図3.1.4に示す。取得したデータ点数は ほぼ同等であり、計測結果に違いがないことを確認し、以後、GLS-1500で研究を進めることとした。



図 3.1.3 GLS-1000 により計測した点群データ

※計測ができた点に着色がなされている



図 3.1.4 GLS-1500 により計測した点群データ

※計測ができた点に着色がなされている

# 3.2 計測·処理方法

П

# 3.2.1 中距離計測用 3D レーザスキャナ

中距離計測用として使用したトプコン社製 GLS-1000、GLS-1500 は、その仕様および本研究の実験 で得られた結果から、研究目的である複数時期計測による微小変化の把握に関わる特性として次表 のような内容が挙げられる。

項目	内容				
計測距離	概ね 300m までの距離				
計測精度	距離精度:±4mm /1~150m、角度精度:6秒				
計測範囲	上下±40°、水平 360°				
スキャン密度	最小 5mm 間隔/100m				
レーザビーム径	計測距離に応じて複数のレーザビーム径設定が用意されている。				
気象・時刻条件	昼夜は問わない。小雨時は可能。強雨・霧時は困難。				
対象物条件	湿潤状態では反射しにくくなり、データ取得率が低下する。				
特定点の計測	専用の計測用ターゲットシールを用いることにより、ターゲットスキャン機能で特定点の計測が可能。				
	ターゲットスキャンは、概ね 200m までの距離が計測可能。				
データの	メーカー仕様で評定点マッチング法のうち 2 方法が用意されている。				
座標割付方法	<ol> <li>バック点法: 3D レーザスキャナを固定機械点に水平に設置し、バッ ク点方向角を与えることにより、毎回の計測データ点群に同一の機械 座標系を割り付ける。</li> </ol>				
	<ul> <li>② タイボイント法:計測データ点群と同時にターゲットスキャン等により複数点(タイポイント)の位置を計測し、それらに統一座標系の座標値を与えることで、計測データ点群の座標を割り当てる。これは複数の機械点からのデータ点群を合成するために用意された機能であり、合成時に対角線方向や水平・垂直方向に引き延ばしを行うアフィン変換が適用されるため、計測データ点群に歪みが生じる可能性がある。</li> </ul>				
	バック点法 タイポイント法				

表 3.2.1 中距離計測用 3D レーザスキャナ(トプコン社製)の特性

これらの特徴を踏まえ、繰り返し計測にあたっての計測準備、計測方法及び処理方法についての 留意事項を以下に整理した。

(1)計測準備

3D レーザスキャナの繰り返し計測にあたり、各種計測点(機械点、バック点、標定点、検 証点)を設置する。



図 3.2.1. スキャナ計測模式図

①機械点

- ・3D レーザスキャナを据付ける機械点は、対象斜面から 300m以内に配置する。
- ・計測対象範囲は、機械点から直接視認できる範囲に収まるようにする。
- ・機械点は、対象斜面に対して正対することが望ましい。計測方向と対象面が斜交すると、 変化量を正しく検出できないことがある。
- ・機械点は、毎回の計測において同一地点でなくても良い。ただし、固定点を設けることで、計測データの取得状態が安定化し、変化部位の検出が容易となる。また、微小な変位を検出する必要がある場合には、固定点の設置が望ましい。
- ・機械点を固定する場合、作業台としての足場確保、水平面の生成、台座自体の熱膨縮を 抑えることを目的として、コンクリートピラーなどを設置する。
- ・機械点が不動である場合、ローカル座標での計測が可能となる。

②バック点

- ・バック点は、固定機械点とセットでローカル座標系の基準点となる。
- ・バック点は不動箇所に設置する必要があり、機械点との距離は対象斜面と同等以上の距 離を確保することが望まれる(ただし、ターゲットスキャンを行うため、200mが限界)。
- ・3D レーザスキャナでターゲットスキャンを実施する必要があるため、バック点には3D レーザスキャナ専用計測ターゲットを設置する。
- ・寸法:150mm×150mm



図 3.2.2. 3D レーザスキャナ専用計測ターゲット

③標定点

- ・繰り返し計測による複数時期の計測データを重ね合わせる際に、座標変換精度を上げる ために標定点を設置することがある。
- ・標定点は、計測対象範囲の外周にできるだけ偏りをなくして4点以上配置する。
- ・標定点は不動・固定である必要はなく、計測回ごとに付替えてもよい。
- ・3Dレーザスキャナでターゲットスキャンを実施する必要があるため、標定点には3Dレー ザスキャナ専用計測ターゲットを設置する。
- ・設置距離は、ターゲットスキャンを行うため、3D レーザスキャナから 200m以内となる。

④検証点

- ・対象斜面の変動を確認するため、検証点を設置することがある。
- ・検証点は、変動が予測される斜面範囲内に、3D レーザスキャナ専用計測ターゲットを設置する。
- ・設置距離は、ターゲットスキャンを行うため、3D レーザスキャナから 200m以内となる。

(2) 計測方法

対象斜面を現地計測する際には、3Dレーザスキャナによる計測と並行して、トータルステーション等による基準点計測を実施する。

①計測基本条件

 ・計測日の天候に留意する。特に雨天時は計測が困難であること、その翌日等も対象斜面 が湿潤状態である場合には、取得データに影響が出ることがある。

②3D レーザスキャナ計測

- ・固定機械点の場合、3Dレーザスキャナは毎回同じ位置になるように設置する。
- ・機械設置に三脚を用いる場合は、計測時間が数時間になることを考慮し、三脚が動かな いように処置をする。
- ・機械を水平に設置する際は、水準器等を利用することが望ましい。機械高は各回とも同じになるように設定する。
- ・機械、三脚等は日照や温度変化の影響を受けないようにする。
- ・垂直方向のスキャン速度は速く、水平方向のスキャン速度は遅いため、計測時間はスキャン範囲の水平方向の角度が大きく影響する。このため、スキャン範囲設定においては水平方向の範囲に留意する。

- ・スキャン密度は、対象物の状況に合わせて設定する。法枠工等にみられる凹凸の著しい 形状は、密度を高めることでエッジが明瞭に現れる。植生に覆われる部位は、スキャン 密度を高めることで植生を通過し地表面に到達する点を増やすことができる。一方、ス キャン密度を高くすると計測時間が大幅に長くなることに留意する。
- ・ビーム径はメーカーが推奨する距離別の設定に合わせることが望ましい。

③基準点計測

- ・計測点の位置関係を把握するために、機械点、バック点、標定点、検証点についてトー タルステーション等により基準点計測を行う。
- ・トータルステーションは、3D レーザスキャナの台座を利用して機械点に設置するのが効 率的である。
- ・不動である機械点とバック点を用いて、ローカル座標を決定する。この場合、ローカル 座標系にて複数時期の比較が可能である。
- ・機械点、バック点が不動でない場合、不動既知点を利用した基準点測量もしくは GPS 測量により、公共座標値を各計測回とも求める。

④記録

・3Dレーザスキャナおよびトータルステーションにより取得されるデータとともに、天候、 気温、湿度ならびに斜面状況写真を記録することが望ましい。

(3) 処理方法

3D レーザスキャナによって計測されたデータは、位置情報(x, y, z)と受光強度およびカ メラ撮影から割り付けられた色情報(R, G, B)を持ったテキストデータとして出力される。

複数回の計測データを用いて斜面形状の変化を検出するには、それぞれの計測データの座標 値を統一座標系に整理し、その上で2時期間の変化を明らかにするための差分解析を行う。

①座標変換

複数回の計測を通じて3Dレーザスキャナを据え置いたまま実施する場合、連続計測デー タの解析として、原則として座標変換を行わずに扱うことができる。一方、3Dレーザス キャナの撤去・再設置を行う場合には、座標変換が必要となる。

座標変換方法としては、3D レーザスキャナの計測方法や対象斜面との位置関係、標定 点の配置状況から、3D レーザスキャナの持つ機械オリジナル座標変換法、および本研究 で検討した重心移動回転法のうち、適した方法を選択する。

(連続計測データの解析)

・3D レーザスキャナを据え置いたまま、連続的に計測した場合には、機械座標系として各 回のデータを座標変換せずに直接重ねることができる(図3.2.3)。



図 3.2.3 連続計測データの座標統一化のイメージ

(機械オリジナル座標変換法)

- ・3D レーザスキャナに、メーカー側によって標準装備されている座標変換法である。
- ・バック点法により、各回のデータを座標変換して重ねることができる。3D レーザスキャナに対して計測対象斜面が離れているような場合、機械の微小な傾きが座標ずれを発生させ、本来の変位とは異なる差分が現れることがある。
- ・タイポイント法により、各回のデータを座標変換し重ねることができる。用意された変換処理プログラムで、点群の配置に歪みを生じさせることがあり、差分解析において微細な変位検出を阻害することがある。

(重心移動回転法による座標変換)

- ・本研究により、地すべり斜面の微細な変位を把握するための座標変換手法として、重心 移動回転法が最も適しているとされた。以下に手順を示す(図3.2.4)。
- i)対象範囲外周に配置した標定点について、ターゲットスキャンにより 3D レーザにお ける機械座標値(Hl)を求めるとともに、トータルステーションによりローカル座標 値(Ht)を求める。
- ii) 複数の標定点 H1 群における重心座標(Gl)と、Ht 群における重心座標(Gt)を求める(図 3.2.4 の(1))。
- iii) GlからGtへシフトする水平移動量(Ms)を求め、Gl, HlをMs分移動させた座標 をそれぞれGl', Hl'とする(図 3.2.4の(2))。
- iv) Hl' について Gl' を中心に回転させ、回転後の座標 Hl" と Ht の較差が最も小さく なる回転移動量(*Mr*)を求める(図 3.2.4 の(3))。
- v) 3D レーザスキャナで計測した点群データについて、水平移動 Ms、回転移動 Mrにより座標変換する(図 3.2.4 の(4))。



図 3.2.4 重心移動回転法による座標変換

②差分解析

差分解析は、2 時期間における斜面の微細な変動を検出するために行う。差分解析方法 としては、斜面の向きと変動方向の関係から2つに大別される。

一般的には斜面の前方へのはらみ出しが多いことから、斜面前後方向を解析軸として、 その方向の変化量を求めるのが効果的である。また、地すべり頭部などで沈下が推定され る場合には、上下方向を解析軸とすると検出が容易である。

一方、はらみ出しよりも斜面が形成する面に沿った方向への変動(例えば表層クリープ、 構造物の開口亀裂等を伴う側方移動など)が主となる場合には、解析軸方向の変化量検出 が困難であり、面投影した画像データにより2時期の変化を検出することが必要となる。

その他、検証点を利用すれば、2時期の座標値の変化から特定点における変化方向・変 位量を求めることが可能である。

#### (解析軸方向の変化量検出)

・推定される変動方向から解析軸を設定し軸方向への変化を検出する。解析軸は、斜面前

方へのはらみ出しが推定される場合などは斜面前後方向に、地すべり頭部などで沈下が 推定される場合などは上下方向に設定する。

- ・3D レーザスキャナで計測された点群は、機械を据え置いた連続計測の場合を除き、各回において同一地点を計測したものではないため、点同士の直接比較は困難である。変化量検出方法としては以下のようにいくつかの方法がある。これらは、計測対象の状況や計測データの密度等に応じて適宜選択する。
- i)初回計測点群からTIN(Triangulated Irregular Network;不整三角形網)法を 用いた表面モデルの生成もしくはグリッド法による初期表面値の設定を行い、初回表 面の位置と2回目の3Dレーザスキャナ計測点の位置の解析軸方向の差(変化量)を 求める。



#### 図 3.2.5 初期計測点群から TIN 法を用いた表面方法の作成・比較イメージ図

ii)解析軸に直交したグリッドを生成し、グリッド内の各回の計測点群の平均値を求めて
 差を検出する。グリッドサイズは任意で設定すればよいが、スキャン密度より大きい
 サイズとする。



図 3.2.6 グリッドによる比較イメージ図(平均値)

iii)上述のグリッドを用いて、単純平均ではなくグリッド内の計測点群のうち最も奥にある点や、統計処理により最頻値を求めて、2時期間の差を検出する。斜面表面に植生がみられる場合などに有効である。



## 図3.2.7 グリッド内統計処理のイメージ図(最も奥にある点を検出する場合)

(面投影した画像データによる変化検出)

- ・斜面が形成する面に沿った方向への変動が推定される場合には、斜面の法線方向(もしくはそれに近似した方向)に計測データを面投影して画像データを生成し、2時期の画像の差から変化を検出する。
- ・面投影する計測データとしては、色調(R,G,B)、反射強度、投影方向に沿った位置(基 準面からの距離)などがある。
- ・画像を生成するための計測データは、対象斜面の状況に応じて適宜選択する。斜面内の 色調の異なる部位(自然斜面中の人工構造物、色調の異なる地層の帯など)、レーザ光 反射率の異なる部位(含水率の高い部分、反射材・反射塗料など)、特徴的な形状(切 土面・法枠工・擁壁等の線形が明瞭な構造物、断層・地層面・亀裂等の線状構造)など が挙げられる。
- ・生成する画像データとしては、色調データから生成するカラー画像、反射強度から特異 部位(強反射部、低反射部)を抽出した強度区分画像などがある。また、特徴的な形状 を表現するために、エッジ抽出処理(位置データから形状急変部を抽出)やリニアメン ト抽出処理(位置データからウェーブレット解析などにより抽出)を行い、画像化する方 法がある。
- ・2 時期の画像データから変化を検出する手法としては、変化状況が比較的単調な場合に は、重ね処理により変化ベクトルを求める方法がある。また、複雑な変動を呈する場合 には、PIV (Particle Image Velocimetry; 粒子画像速度計測)法等により変化ベクトル を面的に求める方法がある。

#### 3.2.2 長距離計測用レーザスキャナ

一般的に 3D レーザスキャナ計測では、計測距離が長くなるにつれてデータの誤差が大きくなり、 データ取得密度も低下するため、長距離計測では崩落に至る地すべり末端部の前兆となるような斜 面変動を計測することが困難となることが予想される。

このため、本研究ではリーグル社製のLMS-Z420iを用いた長距離計測により、斜面変動の検出に 必要な精度を確保するための計測手法について検討した。表 3.2.2 に、精度や使用条件に関わる機 器の特性を示す。

項目	内容	
計測距離	大気条件、対象物の反射率が良ければ、1,000m までデータ取得可能	
計測精度	距離精度: (標準偏差+距離依存誤差) ≦ 20ppm	
	※遠くなるにつれ誤差が大きくなる。	
	(誤差は、距離 100m につき約 2mm 以下)	
	角度精度:0.01°	
	※遠くなるにつれ誤差が大きくなる。	
	(誤差は、距離 100m につき 10mm 以下)	
計測範囲	上下:0~80°、水平:360°	
スキャン密度	最小 7mm 間隔/100m	
レーザビーム径	広がり角:0.014°	
	※遠くなるにつれ径は大きくなる。	
	(距離 100m で約 25mm、距離 500m では約 125mm)	
気象・時刻条件	昼夜は問わない。小雨、薄霧時は、計測可能距離は短くなるが計測は 可能(図3.1.3を参照)。強雨・濃霧時は長距離計測が困難。	
対象物条件	湿潤状態では反射しにくくなり、データ取得率が低下する。	
参照点の計測	標定点計測用の反射板を用いることにより、標定点スキャン機能で特 定点の計測が可能。	
データの	メーカ仕様では、特に推奨されている方法はない。	
座標割付方法		

表 3.2.2 長距離計測用 3D レーザスキャナ (リーグル社製)の特性

(1) 計測関連機器の設置上の留意点

①機械点

i) 観測台の使用

本計測では、複数の時期に計測する度に 3D レーザスキャナを再設置する必要がある。

再設置の際には、誤差の原因となりうる条件を極力取り払い、また座標マッチングの 計算負荷を軽減するため、機械点の位置を固定するのが望ましい。このため、機械の 設置は三脚ではなく、建屋のコンクリート基礎に固定した鋼製の観測台を用いること とした。

ii) 設置位置

3D レーザスキャナの観測台は、斜面全体を見渡せ、レーザ光が対象斜面に対してでき るだけ高角度で入射し、陰になる部分の面積が小さくなるような位置を選定する。計 測対象斜面の下端付近のレーザ光は地表付近を経路とするため、屈折による誤差に留 意する必要がある。

②標定点

i) サイズと形状

評定点には反射率の高い円形の反射体を用いる。反射体の位置は、反射体から反射し た複数のデータを平準化し中心位置を算出する。計測対象物のレーザ照射密度は、距 離に応じて小さくなるため、長距離計測では中距離よりも大きなサイズの反射体が必 要になる。リーグル社製のLMS-Z420iでは、反射体の直径は距離100mにつき10cmが 推奨されている。B 地区では、評定点までの距離が500m程度であるため、直径50cm のかなり大型の反射体が推奨されるが、計測中の風の影響が大きいことが予測された ため、サイズを小さくした。なお、複数の方向からレーザをあてる場合は、レーザ方 向に対しできるだけ高角度な面をもたせるため、円筒形や球形のものを用いることも ある。

ii) 設置点数

評定点は、理論的には3点あれば空間を決定できる。しかし自然環境中に設置するため、不慮の故障に備えて多めに設置することが望ましい。B地区では設置点数は、5ヶ所とした。

iii) 配置

評定点の位置は、地すべりやクリープ等の影響で、地形が変位していないと思われる 場所を選定することが最も重要である。また、X軸とY軸の周りの回転検証により誤 差を軽減するため、できるだけ水平角90度以上の広い範囲に配置することが望ましい。 B地区では地形的制約から、70度の範囲とした。

iv)設置方法

評定点は、構造物や地盤にネジ止め等で固定し常時設置することが望ましい。現場条 件等で常時設置が困難な場合は、設置のたびに評定点の高精度な測量の実施が困難な ことから、位置や姿勢の再現性が高い方法を選定する必要がある。B 地区の設置方法 は、反射体が大きく常時設置が困難であったため、コンクリート基礎に予めパイプを 固定しておき、計測のたびに反射体をネジ止めすることとした。

(2) 計測時の留意点

①本スキャン

計測対象物の表面位置座標の点群データを取得するスキャンのことをいう。反射率の低い領域では、データ密度が小さく精度が低下するため、繰り返しスキャン等により充分な データ密度を確保することが重要である。B 地区では、植生の影響で反射率が低い領域が 広かったため、同じ領域のスキャンを時間をおかずに数回繰り返して実施した。

②評定点スキャン

評定点のみの狭い領域にレーザを照射し、反射体からの多数の反射データの座標分布から評定点の中心座標を得るスキャンのことをいう。B地区では、反射体が推奨のサイズよりも小さく、精度を確保するのに充分な数のデータを得られない可能性があることから、本スキャンと同様に繰り返しスキャンを実施した。

(3) 座標マッチングの留意点

地形の変位量は、2時期の地形の差分から求める。差分の算出は、2時期のデータの座標マッ チングを行い、同じ座標系の上に重ねて行う必要がある。したがって、地形変位量の検出精度 は、3D レーザスキャナの精度だけではなく、2時期の点群データの座標マッチングの正確さに も規定される。このため、座標マッチングのために重ねあわせる点は、可能な限り多くして正 確性を向上させることが望ましい。

以上のことを考慮し、B 地区では評定点マッチング法と面マッチング法を併用して座標マッ チングを行った。

①評定点マッチング法

評定点マッチング法は、空間のある特定の複数の不動点を固定点とみなし、それを基準 にして座標のマッチングを行う手法のうち、3D レーザスキャナで認識しやすい物体を計測 対象物周辺に設置しそれを固定点にする手法のことを指す。その際、固定点のことを評定 点と呼ぶ。本手法は、自然斜面のように、固定点となる物体に乏しく不規則な形状に適し ている。評定点の位置出し測量を行うことで、汎用座標系の上でデータを処理することが 可能である。 ②面マッチング法

面マッチング法は、空間のある特定の複数の不動面を固定面とみなし、それを基準にし て座標のマッチングを行う手法である。計測対象斜面にもともとある物体を利用し、数千 ~数万個オーダーの多数のデータを基とした複数の面の形状・姿勢を基準にするため、高 いマッチング精度が得られる。人工構造物が多い斜面または人工構造物そのものを対象と した計測に適した手法である。

i)座標マッチング法に用いる基準面の選定

基準面は次の条件に留意して選定する。

- ・変位量が充分小さいと考えられる。
- ・比較的平らで、一定の面積がある。ゆがんだ護岸やコンクリート吹き付け面が使える。 数十平方メートル(5×8mなど)であることが望ましい。
- 3軸の回転を検証するため、互いに平行でない3面以上が適切である。

B 地区においては、計測対象範囲にある広い面を有する構造物としては、異なる方向の2面からなる道路側壁コンクリートと湖の護岸コンクリートがある。本来は、異なる方向の3つ以上の面が抽出できると高い精度を得やすいが、護岸コンクリートは時期により水没する可能性があるため、マッチングには道路側壁コンクリートだけを用いることとした。

ii) メッシュサイズ (メッシュ内のデータ点数)の調整

メッシュサイズを大きくするとメッシュ内のデータ点数が多くなるため精度が高くな る。しかし、メッシュサイズを大きくしすぎると、面の平滑度が低くなり計算が収束し にくいことがあるため、メッシュサイズは 0.3~2mの範囲で試行計算し、収束しやすく かつできるだけ大きくなるような値を採用した。

iii)メッシュの座標の代表値の求め方

メッシュの座標の代表値は、メッシュ内データ点群の座標の算術平均値や二乗平均値 で求められるが、メッシュ内データ点群の変動幅が大きいときには中央値が有効である といわれている。B地区では、各メッシュの座標の代表値は、中央値をとることとした。 iv) 点群の重ね合わせ方法

2時期の点群データのうち片方の点群データをXYZ各軸の周りに回転させ、各面の個々 のメッシュ毎の差分総和が最小になるよう座標系の回転角を求める。この方法では、最 小二乗法などのような単純な逆計算では差分総和が最小となる回転角を求めることがで きないため、片方のデータを一定の角度刻みで XYZ 各軸の周りに回転させながら、メッ シュ毎差分総和を算出し、これが最小となるような各軸の回転角の組合せを見つける。

この方法は、XYZ 各軸周りの回転角の組み合わせが多いために、計算量が膨大になる ことから、メッシュ毎差分総和が最小になる XYZ 各軸周りの回転角の解を滑降シンプレッ クス法によって求める。滑降シンプレックス法については、次節を参照されたい。垂直 に近い壁面を測って、点群を平面図に表すと、ほぼ一直線上に載る(図 3.2.3)。



図 3.2.3 壁面を計測した点群を横から見たイメージ図

計測した壁面を再度計測し同じ図上に重ねた際に、再計測データに Z 軸回りの回転誤 差があると、図 3.2.4 のように点群が重ならず 2 つの面が現れる。この誤差を補正する には、2 つのデータ間の隙間が無くなるよう、新しいデータを Z 軸回りに回転させる。



図 3.2.4 壁面を2回計測して点群を重ねたイメージ図

図 3.2.5 に示す 2 回計測の点群の差分(赤いハッチング部分)がなくなるように、X 軸・Y 軸・Z 軸の回転角の最適化を行う。

各点群データを赤線で示す面に投影し、メッシュ化、メッシュ毎差分を計算する。メッシュ毎差分値の総和がハッチング部分の体積であり、これを最小化するよう2回目の点 群データ(青色データ)を回転させる。最適の回転角は滑降シンプレックス法で求める。





3.2.5 2回計測した点群の差分を最小化する方法のイメージ図

(4) 「滑降シンプレックス法」について

滑降シンプレックス法とは、非線形最適化問題において、最適解(目的関数の最小値)を繰 返し計算によって探索して得る手法の一種である。今回求めたい変数は、2時期の計測結果を 重ね合わせるための XYZ 各軸周りの回転角である。メッシュごとの差分値の総体積(図3.2.5) を目的関数とし、これが最少となるような回転角を探索する。

滑降シンプレックス法について、木村元「滑降シンプレックス法による多次元連続パラメー タの最適化」(http://sysplan.nams.kyushu-u.ac.jp/gen/index.html)を引用して、以下に概 説する。

計算方法の概要

N 次元変数関数に対して N+1 個以上のシンプレックス(探索点) x j について以下を定義 する。

探査点	定義	備考
x <sub>h</sub>	目的関数値が最大の点	関数最大化なので、最悪の点
X s	目的関数値が2番目に大きい点	
x 1	目的関数値が最小の点	関数最小化なので、最良点
X g	$x_i = x_h$ なる点を除いた全ての重心	

本研究では、シンプレックス(探索点) x<sub>j</sub>は、XYZ 各軸の周りの角度(回転角)であり、 目的関数値は図 3.2.5 に示したメッシュ毎差分値の総体積とする。この体積を最小化する XYZ 各軸の周りの角度(回転角)を求める。

XYZ 各軸の周りそれぞれを一定間隔の角度で組み合わせ、シンプレックス(探索点) x<sub>j</sub>とする。

②操作方法

i) シンプレックス(探索点)の設定

XYZ 各軸の周りの角度をそれぞれ一定間隔で変化させ、組み合わせを設定する。組み合わせごとに目的関数値(メッシュ毎差分値の総体積)を計算する。 $x_h$ 、 $x_s$ 、 $x_1$ 、 $x_g$ の座標値を得る。



図 3.2.6 シンプレックス(探索点)の設定イメージ

ii) 「反射」操作

最悪点x<sub>h</sub>を次の計算式で得られるx<sub>r</sub>で置き換える。

 $x_r = (1 + \alpha) x_g - \alpha x_h$  ただし、 $\alpha$  (>0) は反射係数



- 図 3.2.7 「反射」操作のイメージ図 iii)「拡大」操作
  - $x_{g} x_{r}$ 方向に沿って $x_{r}$ を次の $x_{e}$ に置き換える。

 $x_e = \gamma x_r + (1 - \gamma) x_g$  ただし、 $\gamma$  (>0) は拡大係数



図 3.2.8 「拡大」操作のイメージ図

iv)「縮小」操作

x<sub>h</sub>を次のx<sub>c</sub>で置き換える。

 $x_{c} = \beta x_{h} + (1 - \beta) x_{g}$  ただし、 $\beta (0 < \beta < 1)$ は縮小係数



図 3.2.9 「縮小」操作のイメージ図

v)「収縮」操作

シンプレックス全体を $x_1$ の方向へ半分に縮小する。  $x_i=0.5(x_1+x_i)$ ただし、 $i=1, 2, \cdot \cdot n+1$ 



図 3.2.10 「収縮」操作のイメージ図

③操作フロー

これらの操作を、次の手順で組合せ、シンプレックスを更新する。基本的に、最悪点を シンプレックス重心の逆側へ移動して目的関数値(メッシュ毎差分値の総体積)を小さく するように計算を行う。経験的に $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 2$ の組み合わせが良いといわれて いるが、目的関数値が収束しない場合もあり、工夫が必要になる。



図 3.2.11 「滑降シンプレックス法」の操作フロー図
# 4. 構内実験

### 4.1 構内実験の目的

3Dレーザスキャナの基本特性を確認するとともに、地すべり計測に利用した場合に想定され る環境条件の影響等を確認するため、独立行政法人土木研究所の構内で以下に示す(1)~(7) の実験を行った。

- (1) 測定可能距離範囲と入射角度による影響の確認実験
- (2)2方向から測定した点群の合成方法の確認実験
- (3)変位の検出性能の確認およびビーム径の影響確認
- (4)2時期の再現性確認実験
- (5) 測定対象の乾湿状況の影響確認実験
- (6)対流の影響確認実験
- (7) 植生の影響排除のための確認実験

# 4.2 実験実施箇所

実験は、図4.2.1に示す独立行政法人土木研究所構内の3箇所で実施した。



図 4.2.1 構内試験実施場所

# 4.3 計測可能距離範囲と入射角度による影響の確認実験

(1) 目的

地すべり末端部の崩壊範囲を3Dレーザスキャナで計測する場合、スキャナ本体から対象 斜面までの距離は100mを超えると想定される。また、レーザが照射される点は計測の度に わずかにずれるため、斜面に対するレーザの入射角によっては計測結果に影響する可能性が ある。このようなことから、計測距離と入射角をパラメータとした計測実験を行った。

(2) 実験方法

3Dレーザスキャナと斜面を模擬したベニヤ板を図 4.3.1、写真 4.3.1 のように配置し、 スキャナからベニヤ板までの距離とベニヤ板の角度をパラメータとした表 4.3.1 に示す 4 ケースと表4.3.2に示す5ケースについて計測する方法で実施した。また、ベニヤ板は図 4.3.2 に示す寸法とし、大きさの異なる反射シール(20mm 角、50mm 角)をそれぞれ 2 枚貼り付 けた。なお、スキャナによる計測は計測対象のベニヤ板上で 10mm 間隔の点群が得られるよ うな設定で行い、比較検討のためトータルステーションでも測量することとした。



#### 図 4.3.1 実験資機材の配置

	Case 1	Case2	Case3	Case4		
対象距離 (m)	100	300	200	350		
ベニヤ板1角度(°)	0	0	0	0		
ベニヤ板2角度(°)	45	45	45	45		

表 4.3.1 実験ケースその1

表 4.3.2 実験ケースその2

	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
対象距離 (m)	200	200	200	200	200
ベニヤ板角度(°)	0	30	45	60	60



全景



機械点(スキャナ)

計測対象のベニヤ板

# 写真4.3.1 実験資機材の配置

1) 計測距離に関する基本性能確認

図4.3.2、図4.3.3、図4.3.4に3Dレーザスキャナによる計測結果を点群データ(3次元 座標データ)で示す。図4.3.2 はスキャナの位置を視点場としたときの点群表示、図4.3.3 は実験ケース毎に示した側面方向の点群データ、図4.3.4 は実験ケース毎に示した正面方向 の点群データである。なお、各図中の茶色の点は、トータルステーションで計測した座標デー タを3Dレーザスキャナの座標データに合わせて表示したものである。また、図4.3.4 で白 い円状ないしは楕円状にデータのない箇所が見られるが、これは反射シールが強反射したた めにデータが取得できなかった箇所である。

計測距離(ベニヤ板~スキャナ間の距離)に対する点群データ(座標データ)の取得点数、 平均誤差、RMS(平均二乗偏差)、正規化RMSを表4.3.3、図4.3.5に示す。ここで、平 均誤差はベニヤ板位置の真値とレーザ計測数値の水平方向の差分(誤差)をベニヤ板全体の 点群について平均した値、RMSはデータの散らばり具合を示す二乗平均平方根、正規化R MSはRMS値を平均距離で正規化したものである。これらを見ると、データの取得点数は 計測距離が長くなるほど低下し、平均誤差やRMS値は大きくなる傾向にあることがわかる。

図4.3.6は垂直にしたベニヤ板の、図4.3.7は45度に傾けたベニヤ板の誤差の頻度分布を 示したものである。これらを見ると、ベニヤ板が垂直の場合には計測距離に関係なく同程度 の誤差となっているが、ベニヤ板を45度に傾けた場合には計測距離が長くなると誤差が大き くなっていることがわかる。また、同じ計測距離でも45度の場合は垂直の場合よりも大きな 誤差が生じている。

以上のことより、計測距離が長くなり、レーザの照射方向に対して計測対象が傾いている 場合には計測誤差が大きくなることが確認された。また、300m を超えると急激に誤差が大 きくなることから、地すべり末端の計測においては 300m 程度までの計測距離を限度とする ことが望ましい。



図 4.3.2 計測データ投影図 (手前から 100m、200m、300m、350m)





(1)計測距離 100m



(2)計測距離 200m



(3)計測距離 300m



(4)計測距離 350m



計測距離	データ取得点数 (点)		平均誤差 (cm)		RMS (cm)		正規化 RMS (cm)	
H I 1773 Mart 16	垂直	$45^{\circ}$	垂直	$45^{\circ}$	垂直	$45^{\circ}$	垂直	$45^{\circ}$
100m	13,384	10,233	3.1	6.2	3.1	6.2	0.3	0.5
200m	12,882	9,422	3.6	9.1	3.7	9.1	0.3	0.8
300m	10,609	5,339	3.8	12.4	4.3	12.7	2.1	2.9
350m	7,549	1,322	4.4	15.2	7.0	16.7	5.4	6.9

表 4.3.3 誤差算出結果(距離との関係)



図4.3.5 計測距離~誤差関係







図 4.3.7 誤差の頻度分布(45度)

2)入射角度に関する基本性能確認

計測対象であるベニヤ板の角度に対する点群データ(座標データ)の取得点数、平均誤差、 RMS(平均二乗偏差)、正規化RMSを表4.3.4、図4.3.8に示す。また、図4.3.9は誤差の 頻度分布を示したものである。

これらを見ると、データの取得点数は角度が大きくなるほど低下し、平均誤差やRMS値は 大きくなる傾向にあることがわかる。また、レーザとベニヤ板の交角が小さくなると誤差が大 きくなり、取得できる計測データは減少することが確認された。

したがって、地すべり末端の計測においては、交角が大きくなるようなスキャナの配置検討 が必要になると考えられる。

角度(°)	データ取得点数 (点)	平均誤差 (cm)	RMS (cm)	正規化 RMS (cm)		
0°	12,882	3.6	3.7	0.3		
30°	10,749	6.6	6.7	0.6		
45°	9,422	9.1	9.1	0.8		
60°	6,222	13.2	13.2	1.2		
75°	1,008	26.3	26.4	2.6		

表4.3.4 誤差算出結果(角度との関係)

※計測距離:200m



図 4.3.8 ベニヤ板の角度~誤差関係



図 4.3.9 誤差の頻度分布

#### 4.4 2方向から計測した点群の合成方法の確認実験

(1) 目的

地すべり末端部の崩壊範囲を3Dレーザスキャナで計測する場合、種々の現場条件により、 必ずしも1箇所からの計測で崩壊範囲全域を計測できるとは限らない。このような場合は、 異なる2点にスキャナを据えて計測し、それぞれのデータを合成することになる。

2 方向から計測したデータの合成方法には「機械点バック点法」と「タイポイント法」が あり、これら合成方法の違いによって計測結果に差異が生じる可能性がある。そこで、土木 研究所構内の施設を計測対象とした2方向からの計測を行い、得られたデータを「機械点バッ ク点法」と「タイポイント法」で合成し、それらを比較することとした。

(2) 実験方法

図 4.4.1 に示すようにスキャナとバック点を配置し、器械点 B、C からスキャニングを行い、各点から取得されたデータを合成した。計測対象は写真 4.4.1 に示すコンクリート構造物とした。実験機材の配置平面図を図 4.4.2. に示す。







図 4.4.2 計測点の配置図



写真 4.4.1 計測対象のコンクリート構造物

図 4.4.2 に合成した点群データ(3次元座標データ)を示す。赤色の範囲は機械点Bから 計測したデータ、青色は機械点Cから計測したデータである。また、黒色の点は、トータル ステーションでの計測結果を3Dレーザスキャナと同一座標系で示した点である。

**図** 4.4.3 に機械点バック点法で合成した場合の、**図** 4.4.4 にタイポイント法で合成した場合の誤差の頻度分布を示す。

これらの結果より、タイポイント法の方が機械点バック点法よりも誤差の少ない合成がで きることを確認した。





図4.4.3 誤差の頻度分布(機械点バック点法)



図 4.4.4 誤差の頻度分布 (タイポイント法)

# 4.5 変位の検出性能の確認およびビーム径の影響確認

(1) 目的

斜面の変位が検出できることの確認を目的とする。

加えて、トプコンのGLSシリーズの3Dレーザスキャナは、レーザビーム径の絞りを設 定することが可能であり、ビーム径の絞り方によっては計測距離の延伸が期待できる。そこ で、ビーム径の違いが計測結果に与える影響も確認することとした。

(2) 実験方法

図4.5.1 に示すようにスキャナとベニヤ板を配置し、ベニヤ板を表4.5.1 に示す移動量と 角度の組み合わせ8ケースで計測する方法とした。また、それぞれの実験ケースの中で、ビー ムの絞りを4通り(0-200、0-40、25-60、9-25)に変えて計測し、座標変換はバック点法を 用いることとした。

移動	計測	移動量 (mm)	角度(゜)	
水平移動	Case 1	0	0	
(ベニヤ板 1)	Case 2	10	0	
	Case 3	50	0	
	Case 4	100	0	
角度変化	Case 5	0	0	
(ベニヤ板 2)	Case 6	0	30	
	Case 7	0	45	
	Case 8	0	60	

表 4.5.1 実験ケース



図 4.5.1 実験資機材の配置

図 4.5.2 にベニヤ板を傾けたときの点群データ(3次元座標データ)を示す。赤色に近い ほどレーザの反射強度が大きいことを表し、青色に近いほど反射強度が小さいことを表して おり、ベニヤ板の傾きが大きくなりレーザとの交角が小さくなると反射強度が小さくなるこ とがわかる。

図 4.5.3~4.5.6 にベニヤ板を垂直にしたまま水平移動した時 (Case1~4)の誤差の分布、 図 4.5.7~4.5.10 に一定距離のままベニヤ板の角度を変えた時の誤差分布を示す。

図4.5.2~4.5.5を見ると、計測対象のベニヤ板が移動しても誤差は小さく、ビームの絞り の影響もないことがわかる。一方、図4.5.7~4.5.10を見ると、ベニヤ板を傾ける角度が大 きくなると誤差が多くなり、ビームの絞りによる差異も表れていることがわかる。このよう な差は、傾いた対象物に投影されたレーザビームが楕円状に拡大したために生じたと考えら れる。ビームの絞りについては、角度によって誤差は大きくなるものの、0-200の絞りで測 定したものが最も小さい誤差で測定されている。このようなことから、今後の実験は絞りを 0-200に設定することとした。



図 4.5.2 反射強度変化(赤:反射強度大、青:反射強度小)





# 図 4.5.3 誤差分布 (Case1 水平移動 Omm)

図 4.5.4 誤差分布 (Case2 水平移動 10mm)



## 図 4.5.5 誤差分布 (Case3 水平移動 50mm)











図 4.5.8 誤差分布 (Case6 角度 30°)



## 図 4.5.9 誤差分布 (Case7 角度 45°)





#### 4.6 2 時期の再現性確認実験

(1) 目的

地すべり末端の崩壊範囲の計測が求められる地すべりは、初生的な地すべりや応急緊急対 応が必要な地すべりと考えられる。このため、3Dレーザスキャナは三脚に据えられた状態 で使用される可能性が十分高い。他方で、長期的な計測を行う場合には、スキャナ用の基礎 を構築したとしても着脱して使用する可能性が高い。

このようにスキャナを着脱して使用すると、その前後で多少の誤差が生じる可能性が考え られる。そこで、スキャナ着脱前後の計測値の確認を目的として再現性の実験を行うことと した。

(2) 実験方法

図 4.6.1 に示すように、通常の計測後にスキャナを一旦取り外し、再設置してから同一の 計測対象を同一の位置から計測する方法とした。



図 4.6.1 実験方法

(3) 実験結果

図 4.6.2 にベニヤ板が垂直の場合の誤差分布、図 4.5.3 にベニヤ板が 60°傾いているときの誤差分布を示す。

これらの結果を見ると、計測対象のベニヤ板が垂直でも傾斜していても、再設置すると誤 差が生じることがわかる。また、計測対象が傾いてレーザとの交角が小さくなると誤差はよ り大きくなることがわかる。

以上のことより、可能な限り3Dレーザスキャナは着脱せずに使用するのが望ましいと考 えられる。



図 4.6.2 誤差分布 (垂直)



図 4.6.3 誤差分布(傾斜 60°)

# 4.7 計測対象の乾湿状況の影響確認実験

(1) 目的

計測対象である斜面が乾燥している場合と濡れている場合では、その反射率やレーザの散 乱状況が変化するため、計測値が変化する可能性が考えられる。そこで、計測対象の乾湿条 件が計測値に与える影響を確認することを目的に実験を行うこととした。

(2) 実験方法

図 4.7.1 に示すように、乾燥状態にあるコンクリート構造物を計測し、その後、同一の配置条件で構造物を濡らして計測する方法とした。

実験ケース	計測条件
Case 1	計測対象のコンクリート壁面が乾いている状態で計測する。
Case 2	計測対象のコンクリート壁面を濡れた状態にして計測する。

表 4.7.1 実験ケース



図 4.7.1 実験方法

図 4.7.2 に、計測対象物が乾燥している場合と湿潤している場合の誤差分布を示す。この 結果を見ると、計測対象物の乾湿の影響はほとんどないと考えられる。

しかし、その一方で図 4.7.3 に示す点群データからデータ取得状況を見ると、湿潤状態の 場合にはデータの得られていない箇所が複数ある。これは水滴等の水分がレーザを吸収し、 反射強度が小さくなったために生じたと考えられる。また、図 4.7.4 に示すように反射強度 は湿潤状態の方が全体的に小さくなっている。なお、図 4.7.3、図 4.7.4 中の四隅の黒い点 は、トータルステーションの計測結果を3Dレーザスキャナと同一座標に示したものである。



図 4.7.2 誤差分布(絞り 0-200)







(1) 乾燥状態



(2) 湿潤状態図 4.7.4 乾湿別の反射強度の平面分布(赤:反射強度大、青:反射強度小)

#### 4.8 対流の影響確認実験

(1) 目的

ダム湖に面した地すべりや地すべり末端部が河川に面している場合、3Dレーザスキャナ のビームは河川やダム湖を横断することになる。このような河川などの上空は水蒸気の影響 で対流が生じやすい条件にあり、レーザビームが通過する空気の密度が変化することで計測 結果が変化する可能性が十分考えられる。そこで、水蒸気が計測結果に与える影響を確認す ることを目的に、計測対象物と3Dレーザスキャナの間で散水して計測する実験を行うこと とした。

(2) 実験方法

図 4.8.1、写真 4.8.1 に示すように資機材を配置し、散水前の状態で計測したのち、ベニ ヤ板と3Dレーザスキャナの間の路面に散水して計測を行う方法とした。計測は、散水前に 3回、散水後に16回とし、散水後さらに散水中に3回、散水後に4回行うこととした。なお、 ベニヤ板とスキャナの間隔は200m とした。



図 4.8.1 実験方法



写真 4.8.1 実験状況(3D スキャナ設置箇所から計測対象を望む)

図 4.8.2 に3Dレーザスキャナによる計測結果を点群データ(3次元座標データ)で示す。また、散水前後、散水中の各計測で確認された点群データ(座標データ)の取得点数、平均誤差、 RMS(平均二乗偏差)を表4.8.1 に示し、図4.8.2、図4.8.3 に平均誤差、RMSを示す。

これらを見ると、ベニヤ板が垂直の場合よりもベニヤ板を傾けた場合の方が、平均誤差とRM Sが大きくなっていることがわかる。また、散水後の平均誤差とRMSは、垂直の場合も傾けた 場合も概ね一定値を示しており、計測対象~スキャナ間の水蒸気やそれに伴う対流の影響はほと んど見られなかった。

散水中は点群データ(座標データ)の取得点数が極端に少なくなっているが、これは散水され ている水滴がレーザを吸収したことで生じたものであり、現場で使用する際には降雨や濃霧の影 響を十分に考慮しなければならないことが確認された。なお、散水前の1回目と2回目の平均誤 差とRMSが大きく変化しているが、これはスキャナの起動後のウォームアップ時間が不十分 だったためと考えられる。



24回目(再散水後2回目)

図 4.8.2 スキャナで取得した点群の 3D 表示(側面:垂直板方向)

<u> 武</u> 卿友/H	垂直板			斜め板		
訂測余件	平均距離差(m)	RMS(m)	比較地点数	平均距離差(m)	RMS(m)	比較地点数
01散水前_1回日	0.000	0.000	13,866	0.000	0.000	6,892
02散水前_2回目	0.000	0.009	13,909	-0.003	0.039	6,887
03散水前 3回目	0.000	0.009	13,862	-0.010	0.038	6,942
04散水後_1回目	0.000	0.009	13,799	-0.015	0.041	6,876
05散水後_2回目	0.001	0.009	13,842	-0.013	0.036	6,917
06散水後 3回目	0.000	0.009	13,812	-0.019	0.041	6,885
07散水後_4回目	-0.001	0.009	13,821	-0.019	0.039	6,923
08散水後_5回目	0.001	0.009	13,827	-0.021	0.041	6,920
09散水後 6回目	0.001	0.009	13,870	-0.015	0.037	6,930
10散水後_7回目	0.001	0.009	13,829	-0.022	0.040	6,955
11散水後_8回目	0.001	0.009	13,853	-0.011	0.038	6,916
12散水後 9回目	0.002	0.009	13,840	-0.024	0.043	6,899
13散水後_10回目	0.001	0.009	13,832	-0.010	0.038	6,893
14散水後_11回目	0.001	0.009	13,803	-0.018	0.042	6,846
15散水後 12回目	0.001	0.009	13,806	-0.014	0.038	6,863
16散水後_13回目	0.001	0.009	13,825	-0.018	0.038	6,905
17散水後_14回目	0.003	0.009	13,815	-0.019	0.040	6,891
18散水後_15回目	0.001	0.009	13,823	-0.017	0.038	6,870
19散水後_16回目	0.003	0.009	13,884	-0.021	0.041	6,901
20再散水中の測定1回目	-0.003	0.018	629	_	-	0
21再散水中の測定2回目	-0.008	0.019	207	_	-	0
22再散水中の測定3回目	-0.006	0.018	293	_	-	0
23再散水後_1回目	0.000	0.009	13,837	-0.046	0.056	6,881
24再散水後_2回目	0.002	0.009	13,834	-0.040	0.052	6,911
25再散水後_3回目	0.001	0.009	13,838	-0.044	0.055	6,923
26再散水後 4回目	0.001	0.009	13,826	-0.034	0.047	6,876
平均(全回数)	0.000	0.010	12,284	-0.020	0.040	6,104
平均(散水中除く)	0.001	0.009	13.837	-0.020	0.040	6.900

表 4.8.1 散水前後の計測誤差

0.100 0.080 1 0.060 ŀ 0.040 0.020 L 誤差(m) ð Δ -A 4 <u>A</u> ~ 4 -A -A 0.000 -0.020 -0.040 -0.060 -0.080 - --0.100 ---------04散水後\_1回目 01散水前\_1回目 02散水前\_2回目 03散水前\_3回目 05散水後\_2回目 06散水後\_3回目 07散水後\_4回目 09散水後\_6回目 10散水後\_7回目 11散水後\_8回目 12散水後\_9回目 3散水後\_10回目 4散水後\_11回目 5散水後\_12回目 6散水後\_13回目 17散水後\_14回目 8散水後\_15回目 19散水後\_16回目 ------20再散水中の測定1回目 21再散水中の測定2回目 22再散水中の測定3回目 23再散水後\_1回目 25再散水後\_3回目 26再散水後\_4回目 08散水後\_5回目 24再散水後\_2回目

→ 平均距離差(m) → RMS(m)

#### (垂直板)



# (斜め板)図 4.8.3 散水前後の誤差・RMS

#### 4.9 植生の影響排除のための確認実験

(1) 目的

計測対象である地すべり末端部が裸地であることは稀であり、その多くは植生で覆われて いる。3Dレーザスキャナの計測に対して、植生の生育や季節変化はノイズデータとなるた め一般的には排除すべきものであるが、地すべりの切迫状況などによっては植生の影響を含 んだまま斜面の挙動を評価しなければならないケースも考えられる。そこで、植生がどの程 度計測値に影響するか確認することを目的とした実験を行うこととした。

(2) 実験方法

図 4.9.1、写真 4.9.1 に示すように資機材を配置し、裸地と植生箇所を同時に数回計測す る方法とした。

- ・植生が繁茂する斜面を対象に、スキャン計測を実施
- ・計測距離:約20~200m(平均約100m)
- ・スキャン条件を統一し、地表面を捉える点が増えることを期待し、複数回のスキャン を実施(5回)
- ·計測日 2010年10月8日



図 4.9.1 実験方法



「 写真 4.9.1 計測対象の植生が繁茂する斜面

図4.9.2、図4.9.3、図4.9.4に斜面の点群データ(3次元座標データ)を示す。計測した 3Dレーザスキャナから見て正面、左側、右側からの点群データを反射強度画像で表示した。

取得した点群データは、植生部(葉・枝・幹)を計測している状況が伺える。また、側方 から確認すると、植生が被覆する範囲においても地盤面を捉えている点が存在する状況も確 認された。



図 4.9.2 点群データ取得状況(正面)



図 4.9.3 点群データ取得状況 (左側)



図 4.9.4 点群データ取得状況(右側)

図 4.9.5 に計測 1 回目の点群データ(3 次元座標データ)を示す。植生を計測している点 と地盤面を計測している点が混在している点群データが取得されていることから、以下の手 法で植生の影響を除去し、地盤面の形状を抽出することを試みた。

- ・ 点群データを、0.5×0.5m メッシュで区分
- ・ 各メッシュ内において、z 値が最小となる点を代表値として抽出
- ・ 上記処理を、1回目計測のみで最小値を抽出、また複数計測回を重ね合わせて抽出する場合を試行

図4.9.6 に計測1回目の点群データから植生除去処理を行なった結果を示す。メッシュ単位で最小値となるz値を抽出した部分を黒色で表示し、それ以外の部分を赤色表示している。

図 4.9.7 に植生除去後の点群データを示す。メッシュ単位で最小値となる z 値を抽出する ことにより、植生部を完全に除去するまでには至っていないものの、地盤面を計測したと思 われる点が多く抽出された。この傾向は複数回の計測データを重ね合わせてもほぼ同等の結 果となり、複数計測回を重ね合わせても計測精度の向上は見込めないが、同じ条件で計測し た場合に、ある程度地盤面の形状を再現することが示された。

図4.9.8~図4.9.11 に計測1回目から5回目の植生除去後の点群データを重ね合わせた結果を示す。



図 4.9.5 点群データ(計測1回目)



図4.9.6 植生除去処理の状況(計測1回目)



図 4.9.7 植生除去後(計測1回目)



図 4.9.8 植生除去後(計測1回目~2回目)



図 4.9.9 植生除去後(計測1回目~3回目)



図 4.9.10 植生除去後(計測1回目~4回目)



図 4.9.11 植生除去後(計測1回目~5回目)
# 5. 現地計測箇所の概要

## 5.1 計測対象候補箇所と選定・非選定理由

計測対象の候補地点として、これまでに 13 箇所(A~M 地点)をあげ、資料調査や現地確認のう え、実施箇所の選定を行った。各候補地の選定・非選定とその理由を表 5.1.1 に示す。

採否	地点名	計測対象	検討日・検討方法	採否理由
実施	Α	ダム貯水池斜面	5/23現地視察	計測機器を設置する適当な場所がある(対岸の橋台)。 既往調査、計測データが豊富。
実施	В	原石山のり面	6 /18現地視察	対岸観測小屋から500~600m離れているため、長距離計 測可能なLS を使用する必要あり。既往調査、計測デー タが豊富。
実施	C	道路沿い斜面・旧道路   面	7/6現地視察	既往調査、計測データが豊富。
実施	D	アーチダム堤体湛水に よる堤体の変形	9/9現地視察	3D スキャナの評価のために実施
候補	E	土研構内土工施設	_	適当な現場がない場合、実施を検討する。
非選定	F	ダム貯水池斜面	5/27現地視察	地すべりの動きとしては本研究のイメージに合ってい るが、計測機器を設置できる貯水池対岸まで300m以上 あるうえ、アクセスが悪く基礎設置工事が困難。
非選定	G	大規模地すべり地	6 /18打合せで協議	全体が動いており不動点が取れない。
非選定	Н	道路沿い斜面(擁壁)	7/10現地視察	計測機器を設置できる対岸も動いている可能性があり 不動点が取れない。
非選定	I	ダム貯水池斜面	8/22~23現地視察	3地区のうちのひとつ(他の2地区は、現在動きがない こと、対象構造物が水没していることにより、非選定)。 末端部はNWL で水没するが、構造物はそれより上にあ る。地理的に遠い。
非選定	J	原石山のり面	6 /18打合せで協議	地理的に遠く、定期観測には不向き。
非選定	К	道路沿いの斜面	6 /26電子メール協 議	末端が道路上方約50mの斜面の途中に位置し、計測機 器を設置できる適当な場所が無い。
非選定	L	不安定岩盤斜面	9/2打合せで協議	斜面が急勾配で3D スキャナの計測範囲を超える。変動 形態が地すべり末端のはらみ出しとは異なる。
非選定	М	旧道のモルタル吹き付 け斜面の部分崩壊箇所	11/23現地視察	崩壊面がほとんど植生工で覆われ、計測基準点の設 置場所がない。計測機器を設置できる適当な場所がな い。

表5.1.1 候補地の概要と選定・非選定一覧表

### 5.2 A 地区

### 5.2.1 A 地区の地形地質

### (1) 地形

A 地区は、関東山地のほぼ中央部を流れる河川の左支川・N 川の貯水池内に位置する。周辺 は河床と尾根部の比高差 150~550m の起伏に富む山地である。N 川は上流部で東南東方向に 流下するが、A 地区付近でほぼ東方向に流れを変える。この変化点で河川の流路方向以外に地 形傾斜、沢密度、支谷の発達状況も変化する。変化点より上流では地形傾斜が急で沢密度が大 であり、支谷の発達状況としては右岸に大きな支流が多く分布している。変化点より下流では, 斜面の平均傾斜は上流より若干ゆるいが、山腹部には大小様々な緩斜面が分布し、沢密度は全 般的に小さい。



図 5.2.1 A 地区周辺の地形(10m コンタ平面図 S=1:20,000)

(2) 地質

A地区付近の地形状況は地質分布状況を反映しており、北傾斜の衝上断層(E-W60~85°N) を境として、南北で地質が異なる。またA地区付近で衝上断層がN川を横切っている。

衝上断層より北側は主として粘板岩,砂岩,礫岩,チャートおよび石灰岩より構成され、この中では砂岩がもっとも卓越し、全体のほぼ70%を占める。一方、南側は粘板岩が卓越し、次いで緑色岩(輝緑凝灰岩)が多く、他に砂岩、チャート、ごく一部に石灰岩が分布するが、粘板岩と緑色岩(輝緑凝灰岩)とで全体の約90%を占める。南側では特に、付加帯の特徴である「ブロックインマトリックス」を強く示している。



### 5.2.2 A 地区の斜面変動履歴

(1) 斜面変動の概要

A地区では昭和63年以降、地質状況についての検討が行われてきた。その後、平成3年10 月に発生した災害時には、地すべりに伴って以下の現象が確認されている。

- 頭部滑落崖の発生
- ② 県道起点側、路面の変状及びアンカー付杭の変形
- ③ 県道終点側、路面及びブロック積擁壁の亀裂、フトンカゴの変形
- ④ 上記区間内、小崩壊・落石の発生



写真 5.2.1 A 地区全体写真(対策工施工前)



写真 5.2.2 標高 740m 付近の急崖・段差地形



写真 5.2.3 標高 690m 付近の滑落崖(比高差 5-8m)

平成3年以降も、降雨時等には地すべり変動が認められる。

# (2) 調査履歴

A地区では昭和 63 年以降、地すべり調査が実施されている(表 5.2.1)。

調査期間	調査内容	検討内容
昭和63年	<ul> <li>・ボーリング調査2孔(NI-1~2)</li> </ul>	
平成元年	・ボーリング調査3孔(NI-3, NIII-1, NIV-1)	・地すべり概略確認
平成2年	・ボーリング調査2孔(NI-4,NⅡ-1)	
平成3年	<ul> <li>・地表踏査</li> </ul>	・カルテ作成
	・ボーリング調査2孔(B-1~2)	・対策工設計(鋼管杭・アンカー工
	<ul> <li>・地盤伸縮計5基設置・観測</li> </ul>	・井桁擁壁工)
	・自記水位計設置4孔(NI-1~4)・観測	
平成4年	・ボーリング調査2孔(NI-2~3)	・計画安全率検討
	・孔内傾斜計観測	<ul> <li>対策工概略設計</li> </ul>
平成7年	・ボーリング調査6孔(R27-1~4,NI-2~3)	
平成8年	・地盤傾斜計観測	<ul> <li>計画安全率(地震時)検討</li> </ul>
平成 10 年		・概査とりまとめ
平成 11 年	・自記水位計観測	・観測データ資料整理
	・地盤伸縮計観測	
	・地盤傾斜計観測	
平成 12 年	・ボーリング調査2孔(R27-5~6)	・機構解析
	・自記水位計観測	・安定解析
	・地盤伸縮計観測	
	・地盤傾斜計観測	
平成 13 年	・ボーリング調査9孔(NI-7,7',R27-7,	・機構解析
	NII−2, NIII−2, NIV−2, N I −5~6)	・安定解析
	・現場透水試験	・対策工検討
平成 14 年	・孔内傾斜計観測	・対策工検討
	・触針式・自記水位計観測	・カルテ作成
平成 15 年	・ボーリング調査 2 孔 (N II −3, NIII −3)	・対策工設計(鋼管杭)
		<鋼管杭工施工>
平成 16 年	・孔内傾斜計観測	<試験湛水開始>
	・地下水位観測	
	・地盤伸縮計観測	
平成 17 年	・孔内傾斜計観測	
~平成 21 年	・地下水位観測	
	・地盤伸縮計観測	

表 5.2.1 A 地区 地すべり調査履歴の概要



図 5.2.3 A 地区平面図(S=1:10000)



図 5.2.4 A 測線断面図(S=1:10000)

#### 5.2.3 A 地区の斜面変動機構

(1) 地すべりの規模・形態と変位速度

A地区付近は衝上断層近傍の地質脆弱部分に相当する。隣接するN川渓岸部には、チャート、 粘板岩、輝緑凝灰岩よりなる堅硬な基盤岩が露出するが、当地区の斜面には認められない。

A 地区は地形的に凸状で周辺斜面よりも川側に突き出しており、移動岩盤も緩みが進行し、 全般に攪乱された状態である。

A 地区付近の地質は流れ盤構造を呈し、A 地区の地すべり移動土塊は、不動岩盤である粘板 岩上位に分布する、風化の進行した輝緑凝灰岩を主体とする。斜面末端から連続する 3 つのブ ロックに区分され、地すべり規模は末端のブロックで長さ約 460m、最大幅約 165m、最大層厚 46m である。中間のブロックは長さ約 130m、最大幅約 160m、最大層厚約 44m である。最上 位のブロックは長さ約 145m、最大幅約 110m、最大層厚約 42m である。末端ブロックと中間 ブロックの間には約 50m に渡って明瞭な滑落崖が分布する。中間ブロックと上位ブロックの間 には、約 100m に渡って明瞭な滑落崖が分布し、平成 3 年の災害発生時に変動した履歴を持つ。 地すべりブロックの変位量は平均して 2mm/年程度である。

#### (2) 変動機構

対策工施工前、対策工施工後ともに、降雨を誘因とした変動の履歴がある。また、試験湛水 中には約 400mmの連続降雨時に、貯水位の急上昇を防止するため、貯水位を急激に低下させ たことがあった。このときには一時的に 8mm 程度の変動が認められた。

#### 5.3 B地区

#### 5.3.1 B 地区の地形地質

(1) 地形

B 地区は M 川流域に位置するダムの原石山のり面である。M 川流域には、三段の段丘面が 発達し、高位段丘面(比高約 55m、約 5 万年前)の分布が最も広く、よく連続している。この 高位段丘面を境として高標高部で谷幅が急に広くなり、風化の進行が認められるとともに、沢 の切れ込みも深くなる。比高約 35m の中位段丘面下位では急崖ないし急斜面をなし、河床部か らの比高約 5m に低位段丘面が存在している。

段丘面分布から読み取れる河道の変遷は、以下のように推定されている。

上位段丘面形成時;左岸側から右岸側へ河道が移動し、原石山付近が活発に側方浸食された。

中位段丘面形成時;・河道は左岸へ曲流しており、原石山付近では滑走斜面となっていた。

低位段丘面形成時;原石山中央部付近が攻撃斜面として活発な側方浸食を受けた。その上下流の尾根部 は、中位段丘面の形成時期に滑走斜面として形成された斜面が、そのまま浸食を受け ずに取り残された。

貯水池周辺の斜面は、遷急線および遷緩線により5つの斜面に区分されている。



図 5.3.1 貯水池周辺斜面の模式断面

沢沿いおよび M 川本川に面した低標高部に斜面 I 、Ⅱが分布しており、尾根沿いにⅢ、Ⅳ、 Vが分布している。斜面勾配は I が最も急で、以下 II 、Ⅲ、Ⅳ、Vの順で緩傾斜となり、浸食 時期の新しい斜面ほど急斜面となっている。 (2) 地質

流域の地質は石灰岩、塩基性火山岩規、チャートなどからなる二畳紀のブロックをオリスト リスとして含むユニット、塊状砂岩からなるユニット、三畳紀のブロックをオリストリスとし て含むユニットから構成されており、B地区周辺では主として塊状砂岩〜泥岩(粘板岩)およ び珪質泥岩(粘板岩)が広く分布する。これらは厚い砂岩層の間に層厚数m〜数十mの破砕さ れた粘板岩層を挟んでおり、全体に互層状の岩相を示す。

地質構造は、基本的に北北東・南南西走向で、西傾斜 40~60° をなす単斜構造である。貯 水池周辺ではチャートを含む粘板岩優勢層が最下部層であり、砂岩粘板岩互層がその上位に位 置する。さらに砂岩粘板岩互層は上位ほど塊状砂岩の割合が大きくなる。また、これらの地層 は波長数 100m の褶曲を繰り返しながらさらに大きなスケールの複向斜構造の一部を構成し、 複向斜軸部に塊状砂岩の優勢な地層が分布しているものと想定されている。



図 5.3.2 美濃帯の中・古生界の地帯区分 (大塚 1966) 1)に加速



図 5.3.3 B 地区周辺地質図

## 5.3.2 B 地区の斜面変動履歴

(1) 斜面変動の概要

B地区の斜面変動は切土のり面全体に渡って発生している。



写真 5.3.1 のり面全景



図 5.3.4 のり面掘削時 (S60.4~H3.8) から H19.11 までの相対変位量







EL=1190m の捆削面



SI-4層付近のアンカー工施工状況



アンカーエと周辺地盤の変形状況 89年8月

図 5.3.5 SI-4 層付近の変状状況

(2) 調査及び変動履歴

B地区は昭和 63 年以降、のり面の掘削を開始し、対策を実施しながら施工を継続してきた。 それらの対策内容、変動履歴について表 5.3.1 に示し、平面図を図 5.3.6 に、断面図を図 5.3.7 に、変動量の推移を図 5.3.8 に示す。

調査期間	施工状況と変動状況
① 掘削当初	クリープ性地山の掘削にあたり、のり面の緩みを防止するため、4~6m/本のロックボルトを逆巻で施
(1988 年3 月	エした。SI-4 層露出までは、光波測距で最大 0.9mm/日、平均 0.3 mm/日の変位速度で推移し、変位の
~1989 年6 月)	増大は認められなかった。掘削の主体は硬質ブロック状の砂岩層であり、この間の挙動はのり面下方へ
	の若干の倒れ込みを示すものの、主として自由面(掘削面)方向への運動ベクトルを持つのり面表層部
	のリバウンドである。
② 掘削時の変状	SI-4 曽の掘削に住い、光波測距の変位速度が増大し、折れ点より上流側の範囲で変位が大さく認めら
(1989 年6 月	れに。これは、いー4 増より谷側に相対的に使見な砂石増が万位9 る9 るとともに いー4 増か法仇11辺(1)
~7月)	」 追盗の山际/ に半行して万冊9 るにのと考えられた。変位の増入は下位保高から工位保高に広催した。 
	1.000周囲の変換では取べい。0.00000000000000000000000000000000000
	観測孔では斜面の倒れ込み変位に伴い、受け盤の層理面(不連続面)沿いなどでズレが生じ、この部分
	でせん断変位が認められた。緊急的対策工、暫定的対策工のアンカー工は孔内傾斜計の変位深度
	(I-14,GL-26m など)から円弧すべりを想定して計画されている。
	のり面の立体的な挙動として、SI-4 層付近およびのり面中段〜上段の変位量が大きい。また、下流
	側のり面は上流側のり面よりも変位量が小さく、VI測線はV測線よりもさらに小さくなっている。変位
	方向としては、孔内傾斜計変位で認められたのり面谷側方向への倒れ込みと推定される。
	なお、光波の変位量の方が孔内傾斜計の変位量よりも大きい傾向が認められ、孔内傾斜計計測深度よ
	り床部よりのり面か変位したり能性もめる。
③ 温水則の対東上	系忌的対象として利退盪への押え盗工を美肥し、31-4 眉の膨れ出しを防止することにより、変状速 産け急激に低下した。その後、転空的対策として気種の水体きボーリング。の以面でのマンカーエを実
	及は志劇に低下した。その後、皆た的別家として石種の小扱さホーリング、のり面でのアンガーエを笑   梅  かがら 下位煙草での盾石の採取を日的に河庄般すで掘削  た 管理其進を設けて 村道般以下の
	掘削が行われた。
~1993 年12 月)	追加対策工として先行切土終了箇所への腹付け盛土が掘削に平行して施工された。その後、村道盤よ
	り下位の標高では、将来の湛水時の円弧すべりに対する安定化を図るため、河床押え盛土が標高1,130m
	まで施工された。また、恒久対策工として、下段排水トンネル、上段排水トンネルが施工された。一連
	の対策により、変状は下位標高から上位標高に向って徐々に減少し、光波測距の変位速度は最終的に
	0.2mm/日程度になった。
	1993 年7 月~8 月にかけての降雨に伴い既設のアンカーエに荷重増加が認められたため、アンカー
	何里の牴減を図る日的で増し打ちアンカーか施士された。この降雨に伴い SI-4 層付近の岩盤変位計   (C.4.のにまえ)標本付が認められている
	(い4,0/にも51振変位が認められている。 ニの問ののはあの亦形け SLA 屋とぼぼ同様の桝状を方するSLS 屋 SLA 屋の堀削時め 咳雨め
	融雪により地下水が増加した際に変状速度が増加した。また、降雨や融雪時には一時的に変位が進行し
④ 試験湛水時	一連の対策工効果によって、光波測距などで湛水に伴う変位速度の増加は発生していない。のり面全
(1993 年12 月	体の変位速度は 0.02mm/日~0.05mm/日(光波)と試験湛水前より小さくなった。のり面は安定している
~1996 年8 月)	が、当初 SI-4 層に設置されたアンカーにおいて荷重低減が認められたため、平成8 年7 月にアンカー
	の再緊張が実施された。岩盤変位計の変位速度も試験湛水前に比して小さくなった。変位の増加は一部
	を除き認められず、概ね変位速度が一定または減少する傾向が認められた。
	のり面瀝削当初は下流側のり面の変状が大きかったが、この間ののり面変状は上下流のり面全体で同
(1998 年 4 月	柱皮 (0~10000 柱皮/平, 元波) の倒れこみか認められるのみでのる。   米波測5の傾向から クリープけほぼ笑声度で徐友に進行  ているまのの 速度に大きた恋化けたいこ
~2002 年3 月)	レルスのロビッションについて、フラーンにははは、サビスと「「「ビビリ」しているものの、 ビスにへどは多にはないととが確認されている。アンカー荷重計では、SI-4 層付近に施工された増打アンカーで1~4 + f /年程度
	の荷重増加が認められる。岩盤変位計では変位速度の増加はほとんど認められず、変位速度は概ね一定
	で推移している。
⑥ 最近の変動状況	光波測距の変位速度は、年間降水量の多かった2003,2004 年でもほぼ一定である。また、150 年確率
(~2007 年12 月)	降雨 (実効雨量 424mm)を経験した平成 18 年に一時的に 3~5mm の変位が認められたが、その後は降雨前
	の変位速度に戻っており、大きな問題は発生していない。また、同時期の SI-4 層付近の増打ちアンカー
	荷重計で1~2tの荷重増加が認められたが、その後は降雨前の荷重増加速度に戻っている。
	岩盤変位計でも 2006 年の豪雨時に SI-4 層付近で 0.5mm(G-8,G-31,G-32 等)程度の変位が認められた
	か、その後は蒙雨前の変位速度に戻っている。

表 5.3.1 B 地区 地すべり調査履歴の概要



図 5.3.7 断面図及び対策工の経緯



図 5.3.8 掘削開始以降の変動量

#### 5.3.3 B 地区の斜面変動機構

(1) 斜面変形の規模・形態と変位速度

変動している切土のり面は、最大幅 350m 比高差 300m の規模を持つ。形態としては明確な すべり面を持つ地すべりではなく、のり面全体がいわゆるクリープ変形を起こしているとされ ている。変位速度は掘削当初は光波測量で最大 6mm/日、平均 2mm/日の変位が認められたが、 現在では光波の変位速度やアンカー荷重計加速度は小さくなり、速度はほぼ一定である。運用 段階に入ってからは速度(光波、アンカー荷重計)に大きな変化はないことが確認されている。

(2) 変動機構

のり面の変状発生メカニズムについては、以下のような推定がなされている。すなわち、 ①切土のり面法尻に分布する SI-4 層(軟質で層理面方向へすべりやすい)に応力が集中し、この 部分が掘削面方向に膨れ出す。②この部分の上位に分布する砂岩、粘板岩層が SI-4 層にのしか かるようにのり面下方へ倒れ込み、のり面の変状が発生している。





## 5.4 C地区

### 5.4.1 C 地区の地形地質

## (1) 地形

C地区は、奥羽脊梁山脈の南部を流下する G川上流域左岸部を通る旧国道の東側斜面に位置 する。周辺の地形は、標高 450~750m の傾斜 30°~40°を示す急峻な斜面からなる壮年期の山 地である。谷部には沖積低地が狭小に分布し、山麓斜面には急斜面より変化する緩やかな斜面 が点在する。これらの緩やかな斜面は、既往地すべり地形分布図において地すべり地形として も抽出されている。



図 5.4.1 C地区周辺の地形(国土地理院数値地図 10m メッシュ標高を使用した鳥瞰図)

(2) 地質

C地区周辺には、先第三系の花崗岩類を基盤岩としてこれを覆う新第三系中新統(砂岩・凝 灰岩および凝灰角礫岩・流紋岩・安山岩溶岩等)が分布する。これらの地質構造はNNW~NNE 走 向で東側に 5~20°の緩やかに傾斜する同斜構造を示すため、C地区の斜面に対しては流れ盤の 地質構造となる。既往地質調査によれば斜面に対し傾斜 5°~10°の流れ盤となることが確認 されている。

C 地区の地質は主として新第三系中新統の砂岩からなり、ボーリング調査で一部に流紋岩が 確認されている。これらを段丘堆積物、崖錐堆積物、盛土が被覆する。

C 地区の砂岩は細~中粒砂岩で構成され、所々に泥岩やシルト岩の薄層を挟む。亀裂が少な く調査ボーリングでは短棒~棒状コアで採取される。未風化部の色調は青灰色を示す。



図 5.4.2 C 地区周辺の地質

#### 5.4.2 C 地区の斜面変動履歴

(1) 斜面変動の概要

C地区では1999年(平成11年)調査以前から変状が報告されており、旧国道(供用は終了 している)上には亀裂が生じていたとされている。現況では、道路上に地すべりの滑落崖に相 当する段差・開口割れ目(写真 5.4.1)が認められ、移動土塊上には分離小丘等の地すべり地 にみられる微地形、樹木の幹曲がりの分布が確認できる。



写真 5.4.1 地すべり頭部の道路の変状

(2)調査履歴

C地区は1999年12月から2010年11月まで(平成11年12月~平成22年11月)地すべり調査が実施されている(表5.4.2)。

1999年~2002年3月(平成11年~平成14年3月)の調査では、変状が生じている旧国道 部を滑落崖とした、崖錐堆積物および段丘堆積物と岩盤との境界をすべり面とする浅い地すべ りを想定していた(図5.4.3)。一方で、ひずみ計観測により岩盤中においても累積歪みを確認 していたが、その累積ひずみが地すべりによるかの判定はできていなかった。

その後の2002年7月(平成14年7月)以降の追加調査により、岩盤中にもすべり面を持つ 深い地すべりが存在することが確認された(図5.4.4、図5.4.5)。

調査期間	内容	主な見解
1999年9月~2000年3月	・ボーリング:3孔	・パイプひずみ計観測の結果、旧表土内及び崖錐堆積
(平成11年9月~平成12年3月)	・パイプひずみ計設置・観測:3孔	物下面でひずみの累積を確認し、すべり面と判断
		<ul> <li>・地すべりを ABCDE の 5 ブロックに区分。道路の変状</li> </ul>
		に直接的影響を与えているのは BC ブロックと判定
2001年11月~2002年3月	・ボーリング2孔	・パイプひずみ計観測により深部(岩盤中)でも、ひ
(平成 13 年 11 月~平成 14 年 3 月)	・パイプひずみ計設置・観測	ずみが3深度で累積することを確認し、斜面全体が緩
	・電気探査2測線	んでいると判断
2002年7月~2003年3月	・ボーリング4孔	・孔内傾斜計観測により深部(岩盤中)の三深度のひ
(平成14年7月~平成15年3月)	・孔内傾斜計設置・観測:1孔	ずみのうち、最深部のものが地すべり変位、それ以浅
	・パイプひずみ計観測	の2深度については傾斜計ガイド管の座屈によるもの
		と判断
		・表層部の未固結堆積物中の浅いすべり(Lsd1)と、岩
		盤深部を通る深いすべり(Lsd2)と判定
2008年10月~2009年11月	・ボーリング:3孔	・滑落崖から延びるすべり面は、傾斜計ガイド管の変
(平成 20 年 10 月~平成 21 年 11 月)	・孔内傾斜計設置・観測:3孔	形状況より従来の傾斜70°よりやや低角度になる
		・傾斜計ガイド管にはクリープ的な変形が観測された
2010年5月~2010年11月	・孔内傾斜計観測:1孔	<ul> <li>・変位速度は6ヶ月間で約30mm(5mm/月)を記録した。</li> </ul>
(平成 22 年 5 月~平成 22 年 11 月)		

表5.4.2 C地区 地すべり調査履歴の概要



図 5.4.3 2002 年 3 月(平成 14 年 3 月) までの地すべりブロック区分



図 5.4.4 2002 年 7 月(平成 14 年 7 月)以降の地すべりブロック区分 (ただし、現在では、Lsd1 ブロックは存在せず、Lsd2 ブロックのみと考えら れている。)



図 5.4.5 主側線断面図(位置:図 5.4.4の断面線)

#### 5.4.3 C 地区の斜面変動機構

(1) 地すべりの規模・形態と変位速度

C地区の地すべりは、未固結堆積物を主体とした浅い地すべり(Lsd1 ブロック)と岩盤深部にすべり面を持つ深い地すべり(Lsd2 ブロック)で構成されるとされていたが(図5.4.4、図5.4.5)、現在では浅いすべりは存在せず、深いすべりのみと考えられている。地すべりの規模は、Lsd2 ブロックは長さ約100m、最大幅約120mである。旧国道上の変状部を滑落崖とし、Lsd2 ブロックは斜面下の河床部に到達する。

2002 年度の孔内傾斜計観測による各ブロックの変位速度は、Lsd2 ブロックで約 1.5mm/月とされる。一方、2008 年度~2010 年度の地すべり頭部での孔内傾斜計観測では、水平成分よりも大きな 沈下成分の変位が記録されると共に、約 5~6mm/月の変位速度が認められた<sup>\*1</sup>。

(2) 変動機構

既往調査では各地すべりブロックの変動機構について次のようにまとめている。 ただし、現在では、Lsd1 ブロックは存在せず、Lsd2 ブロックのみと考えられている。

【Lsd1 ブロック】

軟質な崖錐堆積物の上位に約7mの道路盛土が実施されるとともに、交通荷重が加わった。これにより、頭部盛土したときと同様となり、崖錐堆積物中にすべり面が形成され、新規地すべりが発生したと推定される。

【Lsd2 ブロック】

斜面の広い範囲で継続的なクリープ変位を生じて風化帯に空洞状部を形成し、さらに、風化 帯と新鮮岩帯との境界において既存の弱面を通るせん断変位を生じて粘土をともなう弱層(すべ り面)が形成されつつあった、または形成されていた。そこに道路盛土および交通荷重が加わり、 地すべり活動が明瞭になったと考えられる。

<sup>\*1</sup> 本間宏樹、神山嬢子、千葉伸一、藤澤和範(2011): すべり面の急傾斜部における孔内傾斜計観測孔の挙動とその 解釈. 土木技術資料, Vol. 53, No. 3.

## 5.5 D地区

### 5.5.1 D 地区の地形地質

(1) 地形

D地区はK川沿いに位置する。流域には標高1500~1800mのピークを含めS山地と呼ばれる1000m以上の山々が連なり(図5.5.1)、険しい山地ならびにこれらを刻む深い渓谷をなす地形となっている。



図 5.5.1 地形図<sup>2) を一部改変</sup>

下野地学学会(1979):日曜の地学9栃木の地質をめぐって(承認番号 平11総使,第202号),築地書館

(2) 地質

D地区を含む広域の地質は主に中生代の粘板岩・砂岩層、花崗閃緑岩・ひん岩から構成される 貫入岩、中新世のデイサイト-安山岩質の溶岩・凝灰岩層の3種類で構成される。

D 地区周辺では花崗岩・花崗閃緑岩及び中生代の砂岩泥岩互層であり、火山岩類は基盤岩の 谷部を埋めた形で分布している。





山元孝広ほか(2000):20万分の1地質図幅「日光」

BARREN BAR

(承認番号 平成 11 総使, 第 202 号), 産業技術総合研究所地質調査総合センター

# 5.5.2 プラムラインデータの状況

**D**地区ではプラムラインによる堤体変位計測が実施されており、そのデータによる堤体の変 位傾向は概ね以下の通りである。

- ・上下流方向の変動が卓越している。
- ・上下流方向では、3~4月に-方向(下流側)変位が最大、8~9月に+方向(上流側)変位 が最大で、貯水位の変動傾向と概ね整合している。
- ・堤体中央部かつ上位の観測点ほど変位が大きい。
- ・貯水位保持期間の変位は気温あるいは水温の影響を受けている可能性がある。

# 6. 計測結果

# 6.1 A 地区

## 6.1.1 計測方法

# (1)計測日

本地区における計測は、表 6.1.1 に示す計測日に実施した。計測時の斜面状況を写真 6.1.1 に示す。

日	計測日	備考
第1回計測	2009年(平成21年) 9月15日(火)	天候 : 曇り
第2回計測	2009年(平成21年) 12月 4日(金)	天候 : 晴れ
第3回計測	2010年(平成22年) 7月 1日(木)	天候 : 曇り
第4回計測	2010年(平成22年) 10月 8日(金)	天候 : 曇り

表 6.1.1 A 地区計測日



(1) 第1回計測時



(2) 第2回計測時



(3) 第3回計測時

(4) 第4回計測時

写真 6.1.1 斜面状況

#### (2)使用機器

本地区における計測では、表 6.1.2 に示す計測機器を使用した。

種類	機器名	備考		
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1000	2009(平成 21)年度		
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1500	2010(平成 22)年度		
トータルステーション	ニコントリンブル社製 S6			
機器設置台	パスコ社製 鋼製架台	調查期間中現地据付		

表 6.1.2 使用計測機器一覧

#### (3) 計測点配置

本地区においては、計測対象斜面(地すべり地)の対岸側から計測することとし、器械設置 点は道路橋の橋台位置に選定した(図 6.1.1 および写真 6.1.2)。

現地座標系決定のためのバック点を不動点となる橋台に設定(図 6.1.1 および写真 6.1.4) した。



3D レーザースキャナによる計測範囲(らいでんぼう横より)





写真 6.1.2 器械設置点



写真 6.1.3 器械設置状況(日射対策)



写真 6.1.4 バック点の設置

標定・検証用として地すべり斜面内に計測用ターゲットを設置(表 6.1.3 および写真 6.1.5 ~写真 6.1.14) した。

検証点は当初斜面中に3点設置したが、H22年度中に水位上昇が予定されたため、3回目に 上方にシフトした位置に追加設置した。

また、標定精度向上のために標定方法を変更したことから、3回目に標定用ターゲットを追 加設置した。

			計測回					
地点	目的	設置位置	1	2	3	4	備考	
			回	回	回	回		
バック点	現地座標設定用	橋台コンクリート	0	0	0	0		
No.1	検証用	H 鋼柵	0	0	0	$\times$	4回目は水没	
No.2	検証用	モルタル吹付面	0	0	0	$\times$	4回目は水没	
No.3	検証用	H 鋼柵	0	0	0	$\times$	4回目は水没	
N1	検証用	法枠工梁	—	—	0	0	3回目から追加	
N2	検証用	モルタル吹付面	—	—	0	0	3回目から追加	
H1	標定用	斜面上部	—	—	0	0	3回目から追加	
H2	標定用	斜面上部	—	—	0	0	3回目から追加	
H3	標定用	法枠工梁	_	_	0	0	3回目から追加	
H4	標定用	斜面内	_	_	0	0	3回目から追加	

表 6.1.3 計測用ターゲット設置一覧



写真 6.1.5 標定・検証用ターゲットの設置



写真 6.1.6 検証用ターゲット No.1



写真 6.1.7 検証用ターゲット No.2



写真 6.1.8 検証用ターゲット No.3



写真 6.1.9 検証用ターゲット N1



写真 6.1.10 検証用ターゲット N2



写真 6.1.11 標定用ターゲット H1



写真 6.1.12 標定用ターゲット H2



写真 6.1.13 標定用ターゲット H3



写真 6.1.14 標定用ターゲット H4

(4)スキャン諸元

3D レーザスキャナの計測諸元は表 6.1.4 に示すとおりである。

日	項目	適用値	備考		
	データ取得間隔 (水平)	5cm (200m 地点)			
第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)	2009年(半成21年) 9日15日(水)		
口	ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1000		
	データ取得数	2,311,646 点			
	データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)			
第	データ取得間隔 (垂直)	5cm(200m 地点)	2009 年(平成 21 年) 12 月 4 日(金)		
2 回	ビームモード設定	標準(0-200m)	12 月 4 日 (並) トプコン社製 GLS-1000		
	データ取得数	3,182,092 点			
	データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)			
第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)	2010 年(半成 22 年) 7 月 1 日(木)		
5 日	ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1500		
	データ取得数	1,277,836 点			
	データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)			
第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)	2010年(平成22年)		
4 回	ビームモード設定 標準(0-200m		トプコン社製 GLS-1500		
	データ取得数	697,933 点	1		

表 6.1.4 3D レーザスキャナ計測諸元

#### 6.1.2 計測結果

(1) 検証点の計測結果

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標値を次 表に示す。

点名	1回目(2009/9/15)			2回目(2009/12/4)			3回目(2010/6/15)			4回目(2010/10/8)		
	X座標	Y座標	Z座標									
1	164.379	3.598	-33.618	164.381	3.596	-33.617	164.388	3.599	-33.618			
2	180.577	-6.995	-32.328	180.578	-6.997	-32.324	180.576	-6.995	-32.325			
3	198.479	-32.299	-33.642	198.480	-32.300	-33.643	198.479	-32.297	-33.644			
H1							206.959	67.930	3.069	206.967	67.923	3.065
H2							229.525	4.180	6.140	229.528	4.164	6.146
H3							208.876	-14.128	-18.118	208.874	-14.133	-18.116
H4							144.827	53.012	-22.323	144.825	53.002	-22.330
N1							191.537	-9.960	-26.202	191.537	-9.959	-26.197
N2							170.361	13.674	-28.371	170.362	13.673	-28.373

表 6.1.5 検証点の TS 計測値

※4回目は水没の影響によりH1~H4、N1~N2のみ

#### (2) 3D レーザスキャナの計測結果

3D レーザスキャナにより計測したデータを処理し、視覚的に把握できるように整理した。

3D レーザスキャナによる計測は、対象斜面に対してほぼ正対する方向から実施している。対 象斜面は急勾配を呈し、変動方向は斜面前方へのせり出しが想定されることから、計測データを 軸変換して立面図(斜面を正面から見る方向)を作成した。

3D レーザスキャナ計測により取得された点の分布を立面図に表現したものを図 6.1.2~6.1.3 に示す。図 6.1.3 の拡大図は、図 6.1.2(1)中の青枠範囲を拡大したものである。

また、3D レーザスキャナからの距離により色分けした立面図を図 6.1.4 に、3D レーザスキャ ナが受光したレーザ反射強度を立面図に表現したものを図 6.1.5 に示す。

これらをみると、スキャナ計測結果は斜面の微細形状をよく捉えているのがわかる。2回目の 計測に比べ1回目の計測結果の方が、取得点数が少なくなっており、特に画像中央から右側にか けての大間隔法枠工部などは、計測点状況が大きく異なる。これは、1回目の計測では、前日ま での降雨により斜面が湿潤状態にあったことが原因であると推測される。



図 6.1.2(1) 計測点分布図(立面図)(第1回計測)



図 6.1.2(2) 計測点分布図(立面図)(第2回計測)



図 6.1.2(3) 計測点分布図(立面図)(第3回計測)



図 6.1.2(4) 計測点分布図(立面図)(第4回計測)


図 6.1.3(1) 計測点分布図(立面図拡大)(第1回計測)



図 6.1.3(2) 計測点分布図(立面図拡大)(第 2 回計測)



図 6.1.4(1) 計測距離別分布図(立面図)(第1回計測)



図 6.1.4(2) 計測距離別分布図(立面図)(第2回計測)



図 6.1.4(3) 計測距離別分布図(立面図)(第3回計測)



図 6.1.4(4) 計測距離別分布図(立面図)(第4回計測)



図 6.1.5(1) 反射強度分布図(立面図)(第1回計測)



図 6.1.5(2) 反射強度分布図(立面図)(第2回計測)



図 6.1.5(3) 反射強度分布図(立面図)(第3回計測)



図 6.1.5(4) 反射強度分布図(立面図)(第4回計測)

#### 6.1.3 差分解析

多時期の計測データを用いて、2時期間の差分解析を行い、変動状況を整理した。

(1)検証点における差分解析

計測対象範囲に設置した標定・検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した 座標値を整理し、多時期間における変動を把握した。なお、変動を把握する際、斜面正面方 向の変動を把握するため、TS 計測値を水平方向に回転させた。

**表**6.1.6(1)に回転させたターゲットの TS 計測値を、表 6.1.6(2)にターゲットの変動を示 す。また、検証点の変動量を図 6.1.7に示す。なお、H1~H4 地点は三脚を設置して計測を 行っており、三脚設置の誤差が含まれる可能性があるため変動量の把握対象外とした。図表 をみると、検証点は4時期間で1mmから9mm変動したことになる。トータルステーショ ンの計測精度を考慮すると、2時期間ではほぼ変化がない。

表 6.1.6(1) 検証点の TS 計測値(水平回転後)

占々	1回目(2009/9/15)			2回目(2009/12/4)		3回目(2010/6/15)			4回目(2010/10/8)			
「泉石」	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
1	72.308	295.611	-33.618	72.308	295.614	-33.617	72.316	295.615	-33.618			
2	79.500	313.579	-32.328	79.500	313.581	-32.324	79.499	313.578	-32.325			
3	79.651	344.575	-33.642	79.651	344.576	-33.643	79.652	344.573	-33.644			
N1							86.778	322.294	-26.202	86.778	322.293	-26.197
N2							82.987	290.788	-28.371	82.987	290.790	-28.373

表 6.1.6(2)	検証点の移動量
------------	---------

占夕	△1-2回目			△1-3回目				∆3-4回目※							
見る	Δx	Δy	Δz	∆xy	∆xyz	Δx	Δy	Δz	∆xy	∆xyz	Δx	Δy	Δz	∆xy	∆xyz
1	0.001	0.003	0.001	0.003	0.003	0.008	0.004	0.000	0.009	0.009					
2	0.000	0.002	0.004	0.002	0.004	-0.001	-0.001	0.003	0.001	0.003					
3	0.000	0.001	-0.001	0.001	0.001	0.001	-0.002	-0.002	0.002	0.003					
N1											0.001	-0.001	0.005	0.001	0.005
N2											0.000	0.002	-0.002	0.002	0.003

※3-4回目は水没の影響によりN1~N2のみ



図 6.1.6 ターゲットの位置と軸方向(水平回転後)



### 図 6.1.7(1) 検証点の時系列移動(T.S.値 x 軸方向)





## 図 6.1.7(3) 検証点の時系列移動(T.S.値 z 軸方向)



図 6.1.7(4) 検証点の時系列移動(T.S.値 xy 変化量)



(2) 3D レーザスキャナ計測データの差分解析

3D レーザスキャナにより計測したデータ群について、2 時期間の差分解析を行った。複数 の時期のデータを重ねる場合には、統一の座標系に変換する必要がある。ここでは、各時期 において計測した複数の標定用ターゲットの計測データに、トータルステーションにより計 測した座標値を割当て、スキャンデータ全体を座標変換する方法を用いて座標変換を行った。 採用した標定点は、第1回と第2回のデータはバック点および検証点1~3であり、第3回、 第4回のデータは標定点H1~H4である。

差分解析手法は、各時期の点群データを統一サイズ・範囲となる 10cm×10cm メッシュグ リッドに変換した。この際、各メッシュの代表点は、メッシュ中心点に最も近い値を採用し た。差分方向は斜面に正対した水平方向とした。

結果を図 6.1.8~6.1.12 に示す。数値は+側が前方へのせり出し方向である。これらをみ ると矢板・モルタル吹き付け、のり枠工等の人工構造物付近は概ね±1cm 程度の変化となっ ており、ほとんど変化がないことが確認される。それ以外の範囲については時期により前方 へのせり出し、後退があるように見えるが、これは植生の影響が現れているものと考えられ る。これらのことより、人工構造物付近の 3D レーザスキャナ計測データの差分解析結果は、 概ねトータルステーション計測により把握した検証点の移動と一致しているものと考えら れる。



図 6.1.8 2 時期差分図(立面図)(第1回と第2回の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。 斜面に対して前方へせり出す動きを正とする。



図 6.1.9 2時期差分図(立面図)(第2回と第3回の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。 斜面に対して前方へせり出す動きを正とする



図 6.1.10 2時期差分図(立面図)(第3回と第4回の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。 斜面に対して前方へせり出す動きを正とする



図 6.1.11 2 時期差分図(立面図)(第1回と第3回の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。 斜面に対して前方へせり出す動きを正とする



図 6.1.12 2時期差分図(立面図)(第1回と第4回の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。 斜面に対して前方へせり出す動きを正とする

## 6.2 B地区(中距離計測)

# 6.2.1 計測方法

(1)計測日

本地区における計測は、表 6.2.1 に示す計測日に実施した。

曰	計測日	備考
第1回計測	2009年(平成21年)10月9日(金)	天候:晴れ
第2回計測	2009年(平成21年)12月5日(土)	天候:曇りのち雨

表 6.2.1 B 地区計測日



(1) 第1回計測時



(2) 第2回計測時

写真 6.2.1 斜面状況(対岸より)



写真 6.2.2 斜面状況(器械点 T1 より)



(1) 第1回計測時

(2) 第2回計測時

写真 6.2.3 斜面状況(器械点 T2 より)

(2)使用機器

本地区における計測では、表 6.2.2 に示す計測機器を使用した。

種類	機器名	備考
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1000	
トータルステーション	ニコントリンブル社製 S6	
機器設置台	コンクリートピラー	ピラーは現地設置
	水平基台	

表 6.2.2 使用計測機器一覧

(3)計測点配置

本地区においては、計測対象斜面の対岸からは 400m以上の距離があり、使用する 3D レー ザスキャナでの計測可能範囲を超えていることから、対象斜面と同岸の上下流側から計測する こととし、器械設置点は斜面上流側の盛土地(器械点 T1)と、下流側の管理用道路沿い(器 械点 T2)に選定した。器械点が不動であるとし、対岸にトータルステーション設置点を設け て現地座標系を割り付けることとした(図 6.2.1 および写真 6.2.4~6.2.5)。

また、標定用として、3D レーザスキャナで計測可能な範囲に計測用ターゲットを設置(表 6.2.3 および写真 6.2.6~6.2.7) した。



(1) 器械点 T1

(2) 器械点 T2

写真 6.2.4 器械設置点



写真 6.2.5 トータルステーション設置点

	日的	◎11里/六里	計測回		/世 <del>*</del> /
地尽	日山	<u> </u>	1回	2回	御石
T1-1	標定用(T1用)	道路近傍小段面	0	0	
T1-2	標定用(T1用)	中間小段面	—	0	
T1-3	標定用(T1用)	道路面上	—	0	
T1-4	標定用(T1用)	最下段排水工脇	—	0	
T2-1	標定用(T2用)	管理用道路沿い	—	0	
T2-2	標定用(T2用)	斜面中法枠工	—	0	
T2-3	標定用(T2用)	道路面上	—	0	
T2-4	標定用(T2用)	中間小段面	0	$\times$	2回目は荒天のため計測不可
T2-5	標定用(T2用)	コンクリート擁壁	_	0	第2回に暫定設置

表 6. 2. 3   計測用ターケット設置	「三覧
------------------------	-----



(1) T1-1 点

(2) T1-2 点

写真 6.2.6 計測用ターゲット設置点



(1) T1-3 点

(2) T1-4 点



(3) T2-1 点



(4) T2-2 点



(5) T2-3 点



(6) T2-4 点



(4)スキャン諸元

3D レーザスキャナの計測諸元は表 6.2.4 に示すとおりである。

器械点	日	項目	適用値	備考		
		データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)	2009年(平成21年)		
	第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)			
	」 回	ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1000		
<b>7</b> 11		データ取得数	12,889,624 点			
11		データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)			
	第	データ取得間隔 (垂直)	5cm(200m 地点)	2009年(平成21年) 12月5日(十)		
		ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1000		
		データ取得数	5,644,803 点			
		データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)			
	第	データ取得間隔 (垂直)	5cm(200m 地点)	2009年(半成 21 年) 10 月 9 日(金)		
	口	ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1000		
То		データ取得数	8,316,015 点			
12		データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)			
	第	データ取得間隔 (垂直)	5cm(200m 地点)	2009年(平成21年) 12月5日(十)		
	⊿ 回	ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1000		
		データ取得数	1,187,566 点			

表 6.2.4 3D レーザスキャナ計測諸元

#### 6.2.2 計測結果

3D レーザスキャナにより計測したデータを処理し、視覚的に把握できるように整理した。

3D レーザスキャナによる計測は、対象斜面に対して斜め横方向から実施している。対象斜面 は急勾配を呈し、変動方向は斜面前方へのせり出しが想定されることから、計測データを軸変換 して立面図(斜面を正面から見る方向)を作成した。

なお、第1回計測では2時期を標定するための計測点を設けていないため、以下の図面は作成 していない。

(1) 器械点 T1 からの計測結果

器械点 T1 からの 3D レーザスキャナ計測により取得された点の分布を、立面図に表現した ものを図6.2.2に示す。また、3D レーザスキャナからの距離により色分けした立面図を図6.2.3 に、3D レーザスキャナが受光したレーザ反射強度を立面図に表現したものを図6.2.4に示す。



図 6.2.2 計測点分布図(立面図:器械点 T1)(第2回計測)



図 6.2.3 計測距離別分布図(立面図:器械点 T1)(第2回計測)



図 6.2.4 反射強度分布図(立面図:器械点 T1)(第2回計測)

#### (2) 器械点 T2 からの計測結果

器械点 T2 からの 3D レーザスキャナ計測により取得された点の分布を、立面図に表現したものを図 6.2.5 に示す。また、3D レーザスキャナからの距離により色分けした立面図を図 6.2.6 に、3D レーザスキャナが受光したレーザ反射強度を立面図に表現したものを図 6.2.7 に示す。



図 6.2.5 計測点分布図(立面図:器械点 T2)(第2回計測)



図 6.2.6 計測距離別分布図(立面図:器械点 T2)(第2回計測)



図 6.2.7 反射強度分布図(立面図:器械点 T2)(第2回計測)

(3) 器械点 T1、T2 のデータの合成

器械点 T1 と T2 からの 3D レーザスキャナ計測により取得された点を同一座標系に変換した 上で合成し、立面図に表現したものを図 6.2.8~6.2.10 に示す。

これらをみると、左右2方向から計測してそれらを合成することで、斜面全域を平面的に概 ね網羅していることが確認される。また3次元図を図6.2.11に、T1、T2いずれの方向からも 計測された範囲の断面図を図6.2.12~13に示す。これらの図より、2方向から計測された範囲 において、地形形状に段差等が生じている状況は確認されず、2方向からの計測結果が適切に 合成されていることが確認される。

以上の結果より、斜面に正対できない条件地においても、左右2方向から計測してそれらを 合成することで、斜面全体を把握することが可能であるといえる。

なお、2回目の計測時は悪天候で斜面中の構造物が湿潤状態であったため、良好な天候時に 計測すれば、データ取得度が向上し、斜面中央部付近もより計測点が捉えられると予想される。



図 6.2.8 計測点分布図(立面図:器械点 T1 および T2)(第2回計測)



図 6.2.9 計測距離別分布図(立面図:器械点 T1 および T2)(第2回計測)



図 6.2.10 反射強度分布図(立面図:器械点 T1 および T2)(第2回計測)



図 6.2.11 3次元図(器械点 T1 および T2)(第2回計測) 赤点:T1、青点:T2。T1 方向より望む



図 6.2.12 断面測線位置図(平面図:器械点 T1 および T2)(第2回計測) 赤点:T1、青点:T2、



図 6.2.13(1) 断面図(測線1:器械点T1およびT2)(第2回計測)

◆ T1 □ T2



図 6.2.13(2) 断面図(測線 2:器械点 T1 および T2)(第2回計測)

#### 6.3 B地区(長距離計測)

#### 6.3.1 計測目的と計測方針

#### (1) 計測目的

この計測の目的は、前述の中距離に加えて長距離条件での 3D レーザスキャナの地形変位計測 への適用性や精度に関わる検討を行うことである。本地区では、計測対象斜面から 400m 以上離 れたダム湖の対岸側に長距離計測用のリーグル社製 LMS-Z420i を設置して計測を行い動態観測 で確認されている斜面の地形変位が捉えられるかどうかを検証することとした(図 6.3.1)。



図 6.3.1 計測対象斜面 (Google マップより作成)

(2)斜面の特徴

計測対象斜面は、ダム湖に面した幅約 500m、高さ約 250m、傾斜約 30 度の長大法面である。 計測対象斜面に占める面積は草地が最も広く、次いでコンクリート製の構造物である。また、 地盤が露出した部分はほとんど見られない(**写真 6.3.1**)。



写真 6.3.1 対岸から見た計測対象斜面(赤枠は計測範囲)

斜面のコンクリート製の構造物のうち、下部斜面の一部に露出している道路側壁やアンカー 施工部の全面張りのコンクリート面は、表面が比較的平らで反射率も高いことから、計測で高 い精度を確保するのに充分な密度のデータを得やすいものと考えられる。一方、法枠工の領域 は、コンクリート枠の幅が狭いことに加え、草や低木がコンクリート面を覆うように繁茂して いることから、高い精度を確保するのに充分な密度のデータを得にくいと予想される(写真 6.3.2)。



コンクリート面が多い斜面下部



草地が多い斜面上部

写真 6.3.2 B 地区の斜面の状況

(3) 3D レーザスキャナで検証する地形変位

当斜面では1989年から2007年までの19年間、挿入式孔内傾斜計による動態観測が実施され ており、これによると、斜面の中央部周辺において約100mmの累積変位が記録されている(図 5.3.8)。また、対岸からの光波測量による動態観測では、2004年11月から2010年12月まで の間に、斜面全域で概ね5mm/年程度の縮み変位が見られる中、スポット的に最大20mm/年の変 位が記録されている(図6.3.2)。

本計測では、これらの動態観測の結果のうち、光波測量で確認されたスポット的な変位に着 目することとした。



図 6.3.2 光波測量年変位量コンター(数値の単位は mm)

(4) 計測方針

リーグル社が保証している LMS-Z420i の測距精度(機器のスペックについては 3.3 章を参照) は、距離依存誤差 20ppm(距離 100m 当たり±2mm)に標準偏差を加えたものであり、計測距離が 500mを超える長距離条件においては、個別のデータに大きなばらつきが発生する可能性がある。 また、計測対象の条件(植生や湿潤状況)や距離の遠さに起因した取得データ密度の低下、計 測時の気温や風などの環境の変化によっても、誤差が発生する可能性がある。このため、B 地 区の長距離計測では、以下の方針で現地計測とデータ処理を行い、誤差発生の可能性の低減を 目指すこととした。

- ① 計測ごとに 3D レーザスキャナと評定点の位置をできるだけ固定することとする
- ② データ密度が低いことによる誤差の発生を防止するため、繰り返しスキャンによりレー ザ反射率が低い領域のデータ密度が低くならないようにする
- ③ 個別データの座標のばらつきを相殺するため、統計的にデータを平準化処理する
- ④ 計測方法の工夫で誤差が軽減できる可能性があれば、メーカの保証精度を超える誤差でない場合でも誤差の軽減に努める

### 6.3.2 計測方法

(1) 計測日と気象等条件

B地区の長距離計測は、表 6.3.1 および写真 6.3.3~写真 6.3.7 に示すように、2009 年に3回、 2010年に2回の計5回実施した。いずれの計測日も晴れまたは曇り空であり、計測条件としては 良好であった。

計測回	計測年月日	天気
1 回目	2009年10月9日	晴れ
2 回目	2009年10月10日	曇り後晴れ
3 回目	2009年11月28日	晴れ時々曇り
4 回目	2010年5月29日	曇り後晴れ
5 回目	2010年11月16日	晴れ

表 6.3.1 計測の概要



写真6.3.3 1回目(2009.10.9の遠景)



写真 6.3.4 2回目 (2009.10.10の遠景)









写真6.3.7 5回目(2010.11.16の遠景)

(2) 計測機器

本地区における計測では、表 6.2.2 に示す計測機器を使用した。

3D レーザスキャナの設置については、再設置時の位置や姿勢のずれを極力軽減するため、専 用の鋼製ピラーの観測台を建物のコンクリート基礎に固定して立ち上げてその上に固定した

(図 6.3.3、写真 6.3.8)。また、評定点についても同様の理由で、コンクリート基礎にアンカー ボルトで鋼製筒を設置して固定した。評定点の反射体の直径は、計測距離が約 500m でのデー タ密度を考慮し 50cm が推奨される(3.3 章を参照)が、このサイズでは計測中に風の影響でふ らつき、誤差が発生する可能性がある。本計測では、データ数減少は、繰り返しスキャンで補 償されると考えられたため、直径を 30cm にサイズダウンすることとした(写真 6.3.9、図 6.3.4)。また、3D レーザスキャナの計測距離精度検証のためのトータルステーション測量用に、 評定点反射体の中央に測量用ミラーをその都度設置した(写真 6.3.10)。

なお、設置作業は2009年10月5日に実施した。

種類	機器名	備考
3D レーザスキャナ	リーグル社製 LMS-Z420i	詳細は3.3章を参照
トータルステーション	トプコン GPT-3005 Hiper	
観測台(3D レーザスキャナ用)	鋼製ピラー	現地設置
評定点(標定点を兼ねる)	円形反射板(反射体の直径 30cm)	
固定筒 (評定点用)	鋼製管	現地設置

表 6.3.2 使用計測機器一覧



観測台構造図

図 6.3.3 観測台の構造



写真 6.3.8 観測台の設営状況



写真 6.3.9 評定点に設置した反射板 反射体直径 30 cm (白丸部)



写真 6.3.10 評定点に設置したトータル ステーション用反射体(円の中心)



図 6.3.4 評定点固定用の筒(鋼管パイプ)の設置方法

(3) 評定点の配置

評定点は P1~P5 の 5 箇所に設置した。これらの緒元については表 6.3.3 に、配置については写真 6.3.11 と図 6.3.5 にそれぞれ示す。

地点	目的	位置	基礎	設置状況
P1	評定点	管理用道路沿い	既 設 の コ ン ク リート基礎を利 用	0
P2	評定点	管理用道路より 上方一段目の小 段	小段のシールコ ンを利用	
Р3	評定点	管理用道路沿い	路 肩 に コ ン ク リート基礎を設 置	0
P4	評定点	管理用道路沿い	路 肩 に コ ン ク リート基礎を設 置	0
Ρ5	評定点	公園付近	柵の外側にコン クリート基礎を 設置	0

表 6.3.3 計測用ターゲット設置一覧



写真 6.3.11 観測台から見た評定点の位置



図 6.3.5 評定点の平面分布
(4) スキャン緒元

3D レーザスキャナの計測諸元は表 6.3.4 に示すとおりである。

本計測では、計測対象斜面までの距離が斜面上方ほど大きく、レーザと計測対象斜面がなす角は斜面上方ほど小さいため、斜面上側は有効データ密度が低いことに留意する必要がある。

項目		適用値	備考
計測角度範囲	水平	54度	
	鉛直	25 度	
計測距離範囲	範囲 最大 840m		斜面上部
	最小	400m	斜面下部
計測角度ステップ 水平		0.01度	9cm 間隔(約 500m 地点)
	鉛直	0.01度	9cm 間隔(約 500m 地点)
レーザ照射点数		約 1,350 万点	
有効データ点数		約 730 万点	
1スキャン当たりの所要	医時間	約26分30秒	

表 6.3.4 3D レーザスキャナ計測諸元

## 6.3.3 計測結果

(1) 計測時期及びデータの良否

取得したデータには、メーカ公称を超える誤差が発生したものがあり、検証の結果、3D レー ザスキャナや観測台の不均等な温度変化が原因とみられる姿勢変化が原因であると推定され た。各計測のデータの良否と計測方法の改良の経緯の概要について表 6.3.5 に示す。また、こ れらの詳細については、次の(2)に示す。

計測回	計測年月日	時間帯	取得データの品質と計測の改良点	良否
1回目	2009年10月9日	全日	機械精度を超える誤差が発生したが、原因 の特定に至らなかった。	×
		~夕方	1回目の計測と同様に誤差が発生し、原因 が機械への日射であると推定された。	×
2回目	2009年10月10日	夕方~	応急手当としてブルーシート屋根と傘を かけたが、完全に日射を防ぎきることができ ずに機械精度を超える誤差が発生した。	×
3回目	2009年11月28日	午前	予め日除けを用意して機械を設置した。上 側からの日射を一部遮ることができなかっ たが、機械精度を超える誤差は発生していな かった。	0
		午後	太陽が対象斜面方向に位置したため、機械 の正面から日射を受けて機械精度を超える 誤差が発生した。	×
4回目	2010年5月29日	全日	日除けに屋根を追加して機械を設置した。 一方で、計測中の機械の温度変化により発生 する歪を軽減させるために、計測途中で送風 を開始したが、不均等に機械の温度が低下し たため、機械精度を超える誤差が発生した。 また、メーカ公称の誤差の範囲内ではある が、アップスキャンとダウンスキャンのデー タに僅かな差が発生することが判明した。	Δ
5 回目	2010年11月16日	全日	機械への厳重な日除け、送風を開始時点か ら終始継続した結果、機械精度を超える誤差 は発生しなかった。	0

表 6.3.5 データの良否と計測の改良の概要

- (2) 計測時に発生した誤差の原因と対処の経緯
  - ① 日射や温度変化に伴う 3D レーザスキャナの姿勢変化
    - 1) 1 回目計測(2009年10月9日)

評定点と 3D レーザスキャナの位置関係から誤差を確認したところ、機械精度を超える角度 のばらつきが生じていることがわかったが、その日のうちには原因が特定できなかった。

2) 2 回目計測(2009年10月10日)

当日の天気を時間ごとに詳細に記録していなかったが、晴れている時間が長く、日射を受けている機器表面の温度が高かったため、原因の一つとして日射が推定された(**写真 6.3.12**)。



写真 6.3.12 2回目計測時 (2009 年 10 月 10 日 15:30 頃)の計測状況

このため、翌10月10日の計測にあたっては、3Dレーザスキャナへの日射を遮るための応 急対策としてブルーシートと傘を手配したが、日射を完全に遮ることができなかった(写真 6.3.13)。その結果、図6.3.6に示すように機械精度を超える角度のばらつきが生じた。



写真 6.3.13 2回目計測時(2009 年 10 月 10 日 15:40 頃)の日射を遮る応急対策の状況



図 6.3.6 2回目計測(2009年10月10日)の評定点への距離と角度(縦・横)の変化 ※14:26を基準(0値)とする

3) 3 回目計測(2009年11月28日)

以上の状況を踏まえ、3D レーザスキャナと設置台全体を囲う覆いを製作して日射を遮った (写真 6.3.14)。その結果、スキャン中に機械精度を超えるデータのばらつきが生じなくなっ た。このことから、誤差発生の原因は日射であることが特定された。



写真 6.3.14 3回目の計測時(2009年11月28日)の日射を遮る囲いの設置状況

この計測では、午前中は問題なかったが、午後の計測では計測対象斜面の方向に太陽が位 置したため、どうしても日射の影響を遮断することができず、課題として残された。 4) 4回目の計測(2010年5月29日)

ブルーシートの屋根を追加設置し日射対策を強化した(写真 6.3.15)。さらに、3D レーザ スキャナ周囲の温度環境を安定させるために、日射覆いの内側で扇風機を回し、強制対流を 生じさせることとした(写真 6.3.16)。計測の途中から送風を開始したところ、送風開始前 の8時21分と開始後の9時15分のデータの間に機械精度を超える距離のばらつきが生じた (図 6.3.7)。



写真6.3.15 ブルーシートの屋根の設置状況



写真 6.3.16 3D レーザスキャナを冷却するための送風状況



図 6.3.7 4回目の計測時の冷却方法の影響

5)5回目の計測(2010年11月16日)

これまでの経験を踏まえ、観測開始直前から完了まで送風機の位置、向き、風量を変えずに送風を続けたところ、誤差が小さいデータを得られた。

以上の結果より、メーカ公称の機械精度を超える誤差を生じさせないようにするためには、 日射や風などの計測器の温度に影響する条件を、計測開始から終了まで一定に保たなければ ならないことが明らかとなった。

② 3D レーザスキャナの水平方向の回転の向きの違

いによる機械誤差

3D レーザスキャナの水平回転方向によって、デー タが異なることが判明した。

3D レーザスキャナは、本体内の下方から上向きに 照射されたレーザビームを鉛直方向、水平方向に変 化させながら、レーザビームが対象物全体に当たる ように計測するものである。レーザビームの鉛直方 向は、ミラーを上下に揺動または回転させることで 制御し、水平方向は本体上半分を回転させて制御す ることで向きを変える。このとき、水平方向の回転 について、上から見て反時計回りをアップスキャン、



時計回りをダウンスキャンと呼ぶ(図6.3.8)。

通常の計測では、アップスキャンとダウンスキャンを交互に行う。図 6.3.9 に示すように、 両者のデータを比較すると、1/1000 度程度の差が認められた。この機器の分解能は 2/1000 度 であるため、その差は機械精度の誤差を越えるものではないが、回転方向を統一することによ り精度の向上が見込まれることから、5 回目の計測(2010 年 11 月 16 日)では、全てアップス キャンによって計測することとした。



図 6.3.9 4回目の計測(2010 年 5 月 29 日)のアップスキャンとダウンスキャンの比較

#### ③ 開始初期の内部温度の安定性

図 6.3.10 に 4 回目の計測(2010 年 5 月 29 日)における、計測開始からの 3D レーザスキャ ナの内部温度と外気温の推移を示す。3D レーザスキャナは電源を入れて計測開始後、約 40 分 は急に内部温度が上昇する。その後、外気温の変化と同様な傾向を示すようになる。このこと から、内部温度が安定するには1時間程度をみる必要があると考えられ、この間に計測された データは、誤差が大きいと推定される(熱で機械本体が膨張するなど)。したがって、計測に 緊急性がない場合は、計測を開始してから最初の1時間は、計測領域の設定、評定点位置の確 認など、準備計測を行い、内部温度が安定した後に本計測を行うことが望ましい。



図 6.3.10 計測開始からの 3D レーザスキャナの内部温度変化(4回目(2010年5月29日)

#### 6.3.4 座標マッチングの結果

(1) 参照面の設定と座標マッチングの方針

図 6.3.11 に示すように、座標マッチングに用いる参照面として、反射が良く誤差が少ない コンクリート面を5箇所選定し、これらの面について基準時刻のデータに同日異時刻のデータ をズレが最も小さくなるように重ねあわせ、座標系の補正角度を決定した。この結果を基に、 後述する(2)において、斜面全体の座標系の補正を行うこととした。



図 6.3.11 座標マッチングに用いる参照面の配置

(2) データの選定と同日異時刻データの座標マッチング

3回目計測(2009年11月28日)の午前と5回目計測(2010年11月16日)の午前の観測デー タから、表6.3.6に示すように、それぞれ4つ開始時間のデータを選定した。これらは全てアッ プスキャンで計測したものである。また、座標マッチングの基準とするデータの開始時刻は、 3回目計測(2009年11月28日)では、08:42のもの、5回目計測(2010年11月16日)では、 9:05のものとした。

座標マッチングの計算で誤差が最小値に収束したときの誤差量と XYZ 軸周りの回転量を3回 目計測については表 6.3.7 に、5回目計測については表 6.3.8 に示す。これらより、参照面で の収束誤差量は2.3~3.2mm と小さいため、斜面全体にその回転補正を適用することとした。

計測回	計測年月日	開始時間	メッシュモデルの条件
		08:42(基準)	
		09:35	
3回日	2009年11月28日	10:33	・メッシュサイズ:1.5m
		11:26	・メッシュ内最低データ点数:50
		09:05(基準)	・差分制限値 : 制限せず(1個以上)
		09:45	・メッシュ代表値 : 中央値(Median)
う回日	2010年11月16日	10:48	
		11:28	

表 6.3.6 座標マッチングに使用したデータ

表 6.3.7 基準時刻データとのマッチングの計算が収束したときの誤差量と各軸周りの回転量 (3回目の計測(2009年11月28日))

⇒」」 □□□□□□ □□□□□□ □□□□□□ □□□□□□ □□□□□□ □□□□	軸居	四市記去旨 (****)		
〒「伊川用 9日 4寸 冬」	Х	Y	Z	収 宋 砄 左 里(㎜)
09:35	-0.00133	0.00008	0.00010	2.4
10:33	-0.00258	-0.00035	0.00040	2.3
11:26	-0.00209	0.00133	0.00071	2.6

収束誤差量:メッシュ1つ1つの法線方向の差分の総和の平均値

08:42の基準時刻データとの平均的なズレの大きさを示す。

表 6.3.8 基準時刻データとのマッチングの計算が収束したときの誤差量と各軸周りの回転量 (5回目の計測(2010年11月16日))

計測開始時刻	軸尼	収古調美景 (mm)		
日 (則用)/日叶(水)	Х	Y	Z	收來於左重(㎜)
09:45	0.00012	-0.00217	0.00013	2.7
10:48	0.00060	0.00040	0.00046	2.9
11:28	0.00096	-0.00128	0.00018	3.2

収束誤差量:メッシュ1つ1つの法線方向の差分の総和の平均値

09:05の基準時刻データとの平均的なズレの大きさを示す。

(3) 同日の基準時刻データと異時刻の計測データの座標マッチング精度の評価

(2)で得られた座標補正の回転角を使用し、計測斜面全体の座標マッチングを行った。この

座標マッチングの妥当性を評価するため、図 6.3.12 に示すように北斜面(向かって右側)を 対象に基準時刻データとのズレを算出した。図 6.3.13 は、メッシュ化したデータの北斜面を 斜面投影(斜面に沿った面に投影)したもので、メッシュ内のデータ点数を段階的に色分けし て表現したものである。図の左が斜面の上方、右が斜面の下方となるように表示している。こ れによれば、1.6m 四方の1メッシュあたり、データ密度が高い斜面下方で20 点以上、密度が 低い斜面上方でも10~20 点のデータ量が確保されている。



図 6.3.12 座標マッチングの精度の評価に用いた北斜面の範囲



(メッシュサイズ: 1.6×1.6m)

同日異時刻のデータのマッチング精度を確認するため、各メッシュの法線方向の差分平均 値を算出した(表 6.3.9)。その結果、3回目計測、5回目計測ともに平均的な差分は2mm以 内であり、よくマッチングできていることが確認された。

計測回	計測日	計測開始時刻	差分平均值 (mm)	計算条件	
	2000 年 11 日 22 日	09:35	1.2		
3回目	( 主 淮 - 08 · 42)	10:33	1.3	・メッシュサイス 0.5m	
	(本中 00:42)	11:26	1.0	<ul> <li>・ &gt; ッシュ内ノーク 点数</li> <li>10 個主法け 排除</li> </ul>	
	2010 年 11 日 16 日	09:45	-1.6	10 四不何は別示	
5 回目	2010年11月16日	10:48	-1.0	を力 0.2回 以上を护除	
	(本中 09:05)	11:28	-1.6		

表 6.3.9 基準時刻データと同日異時刻データの各メッシュの法線方向の差分平均値

差分平均値:メッシュ1つ1つの法線方向の差分の平均値

(4)座標マッチングした同日重ねあわせデータの評価

座標マッチングをした同日の4データを重ねあわせたデータ(以降、同日重ねあわせデー タ)が、同日の地形を代表するデータとして扱えるかどうかを確認するため、データ座標の ばらつきの程度について、基準時刻データと比較した。データの比較は、0.5m サイズでメッ シュ化後、それぞれのメッシュ内の点群とメッシュの面との距離の標準偏差の頻度分布によ り行った。

4 データの座標マッチングで法線方向の距離のばらつきが大きければ、標準偏差の分布は なだらかになり、平均的に法線方向のズレが著しければピークが2個以上できる。図 6.3.14 によると、両者の標準偏差はほぼ同じ分布をしているため、同日重ねあわせデータは、基準 時刻データと同様に取り扱うことができると考えられる。



図 6.3.14 基準時刻データと同日重ねあわせデータのばらつきの比較

次に、上の図 6.3.14 のグラフデータを平面図に示した結果を図 6.3.15 に示す。

図 6.3.15 により、標準偏差 0.01~0.02 のばらつきの小さなデータは、コンクリート部分に 集中していることがわかる。したがって、反射のよいコンクリート部分はばらつきが少なく、 上方斜面の植生部分では反射が悪くばらつきが大きいことがわかる。



図 6.3.15 北側斜面における 5 回目計測(2010 年 11 月 16 日)の同日重ねあわせデー タのばらつきの分布 (メッシュサイズ:0.3×0.3m)

図 6.3.16 に 5 回目の計測(2010 年 11 月 16 日)の4 データ分の北斜面のデータ密度分布を 示す。道路沿いのコンクリートほど距離が近く、また反射率が高いため、計測データ密度が高 い結果となっている。



図 6.3.16 北側斜面における 5 回目計測(2010 年 11 月 16 日)の同日重ねあわせデータの 1 メッシュあたりのデータ点数 (メッシュサイズ: 0.3×0.3m)

(5) 3回目計測と5回目計測の同日重ね合わせデータの座標マッチング精度の評価

表 6.3.9 に示す3回目計測の同日重ねあわせデータと5回目計測の同日重ねあわせデータ を比較するため、(1)と同様の参照面を用いて上記2つのデータの座標マッチングを実施した。 3回目データと5回目データの誤差結果を表 6.3.10 に示す。3D レーザスキャナを再設置し たことを反映し、座標マッチングに要する軸周り回転量は比較的大きいものの、平均の収束 誤差は2.2mm と小さく、座標マッチングの精度は高いものと判断される。

表 6.3.10 3	3回目デーク	タと5回目デー	-タの評価関数によ	:る収束誤差と	収束時の座標回転量
------------	--------	---------	-----------	---------	-----------

軸周り回転量(deg)		平均収束誤差 (mm)	計算条件	
X	Y	Z		・メッシュサイズ:1.5m
			0.0	・メッシュ内最低データ点数:80
-0.00472	0.05091	0.00937	2.2	・差分制限値:制限せず(1個以上)
				<ul> <li>・メッシュ代表値:中央値(Median)</li> </ul>

#### 6.3.5 差分評価 (変位量の算定)

北側斜面において3回目計測(2009年11月28日)の同日重ねあわせデータと5回目計測(2010年11月16日)の同日重ねあわせデータの間の差がどのように地形変位量として評価できるか確認するため、北側斜面において両者の差分分布を求めた。

○ 道路側壁(図 6.3.17、写真 6.3.15 中の A)

一部を参照面として用いた道路側壁の差分は、概ね±2mm の範囲に収まっているが、 小段等では 10mm 程度のものも認められる。したがってマッチングの精度は全体的に mm オーダー程度に収まっていると考えられるが、小段などの傾斜が緩い部分については変 位量の算出に注意が必要と判断される。

○ 斜面中腹部~上部(図 6.3.17、写真 6.3.17 中のB、C、および写真 6.3.18) この斜面では、差分はプラス・マイナス 10mm 以上であり、かつ非常にばらつきが大き い。しかし、収束誤差量は小さいことから、複数のメッシュをまとめてよりマクロな領 域で見ることで、地形の変位領域を捉えることができる可能性がある。



図 6.3.17 北側斜面における 3 回目データ(2009 年 11 月 28 日) と 5 回目データ (2010 年 11 月 16 日)の差分図(メッシュサイズ: 0.9×0.9m)



写真 6.3.17 北斜面



写真 6.3.18 北斜面 C 部分

## 6.4 C地区

# 6.4.1 計測方法

(1)計測日

本地区における計測は、表 6.4.1 に示す計測日に実施した。

旦	計測日	備考
第1回計測	2009年(平成21年) 9月10日(木)	天候 : 曇り
第2回計測	2009年(平成21年)11月27日(金)	天候 : 曇り
第3回計測	2010年(平成22年) 6月15日(火)	天候:晴れ
第4回計測	2010年(平成22年)11月26日(金)	天候:曇り

表 6.4.1 C 地区計測日



(1) 第1回計測時



(2) 第2回計測時



(3) 第3回計測時



写真 6.4.1 計測地の状況

(2)使用機器

本地区における計測では、表6.4.2に示す計測機器を使用した。

種類	機器名	備考
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1000	2009(平成 21)年度
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1500	2010(平成 22)年度
トータルステーション	ニコントリンブル社製 S6	
機器設置台	水平基台(器械点 A)	
	三脚(器械点 B)	

表 6.4.2 使用計測機器一覧

(3)計測点配置

本地区においては、計測対象範囲(地すべり頭部)を上方および側方から計測することとし、 器械設置点は山側道路擁壁上(器械点A)と側方道路上(器械点B)に選定した(図6.4.1お よび写真 6.4.2)。このうち器械点Aの方が、より見通しが良く、器械点Bからの計測は補助 的な位置づけとして実施した。







(1) 器械点 A

(2) 器械点 B

写真 6.4.2 器械設置点

両器械点は不動であるとして現地座標系(器械点 A→B 方向を Y 軸とする;図 6.4.1 参照) を設定し、検証用として地すべり斜面内に計測用ターゲットを設置(表 6.4.3 および写真 6.4.3 ~6.4.5) した。

また、平成22年度から標定精度向上のために標定方法を変更したことから、3回目に標定用 ターゲット4箇所(H1~H4)を追加設置(図6.4.1、写真6.4.6)した。後述する3回目およ び4回目の差分解析にあたっては、これらの標定点を用いて重心移動回転法(3.2.1項参照) によるマッチングを行っている。なお、第1回および第2回については、TS計測した検証点全 点を標定点に見立てて重心移動回転法によるマッチングを行った。

			計測回				
地点	目的	設置位置	1	2	3	4	備考
			回	回	回	回	
No.01	検証用	アスファルト面 (垂直)	0	—	—	—	第1回目後に破損
No.01-1	検証用	アスファルト面 (垂直)		0	0	0	第2回目に設置
No.02	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.03	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.04	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.05	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.06	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.07	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.08	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.09	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.10	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.11	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.12	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.13	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.14	検証用	アスファルト面	0	0	0	0	
No.15	検証用	ガードレール	0	0	0	0	
No.16	検証用	ガードレール	0	0	0	$\bigcirc$	
No.17	検証用	ガードレール	0	0	0	0	
No.18	検証用	ガードレール	0	0	0	0	
H1	標定用	アスファルト面	—	—	$\bigcirc$	0	第3回目から追加
H2	標定用	アスファルト面	—	—	$\bigcirc$	0	第3回目から追加
H3	標定用	アスファルト面	—	—	$\bigcirc$	$\bigcirc$	第3回目から追加
H4	標定用	アスファルト面	—	_	0	0	第3回目から追加

表 6.4.3 計測用ターゲット設置一覧



(1) No. 01 および No. 01-1





(3) No. 03





(5) No. 05

(6) No. 06

写真 6.4.3 計測用ターゲット設置点



(1) No. 07





(3) No. 09





(5) No. 11

(6) No. 12

写真 6.4.4 計測用ターゲット設置点



(1) No. 13





(3) No. 15





(5) No. 17(6) No. 18写真 6. 4. 5 計測用ターゲット設置点



(1)標定点 H1 (写真手前) および H2



(2) 標定点 H3



(3) 標定点 H4

写真 6.4.6 標定点 (三脚によるターゲット据付)

(4)スキャン諸元

3D レーザスキャナの計測諸元は表 6.4.4 に示すとおりである。なお、データ取得数が計測 回毎に異なる結果となっている。特に第1回は取得点数が顕著に多い結果となっているが、デー タ保管・変換時の操作に起因すると考えられる。以後の解析は点群からメッシュデータへ変換 して実施しているため、精度への影響はない。

器械点	日	項目	適用値	備考		
		データ取得間隔 (水平)	5cm(20m 地点)			
	第	データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)	2009年(平成 21 年) 9月 10 日(木) トプコン社製 GLS-1000		
	日	ビームモード設定	標準(0 <b>-</b> 40m)			
		データ取得数	6,156,792 点			
		データ取得間隔 (水平)	5cm(20m 地点)			
第 2 回 A	第	データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)	2009 年(平成 21 年) 11 月 27 日(金)		
	回	ビームモード設定	標準(0-40m)	トプコン社製 GLS-1000		
		データ取得数	550,988 点			
		データ取得間隔 (水平)	5cm(20m 地点)			
	第	データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)	2010年(平成22年) 6月15日(火)		
	3 回	ビームモード設定	標準(0 <b>-</b> 40m)	トプコン社製 GLS-1500		
		データ取得数	737,785 点			
		データ取得間隔 (水平)	5cm(20m 地点)			
	第	データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)	2010 年(平成 22 年) 11 月 26 日(金)		
	4 回	ビームモード設定	標準(0-40m)	トプコン社製 GLS-1500		
		データ取得数	758,578 点			

表 6.4.4(1) 3D レーザスキャナ計測諸元

器械点	日	項目	適用値	備考			
В	第 1 回	データ取得間隔(水平)	5cm(20m 地点)				
		データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)	2009 年(平成 21 年) 9月 10 日(木) トプコン社製 GLS-1000			
		ビームモード設定	標準(0-40m)				
		データ取得数	3,047,745 点				
	第 2 回	データ取得間隔(水平)	5cm(20m 地点)	2009 年(平成 21 年) 11 月 27 日(金) トプコン社製 GLS-1000			
		データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)				
		ビームモード設定	標準(0-40m)				
		データ取得数	550,977 点				
	第 3 回	データ取得間隔 (水平)	5cm(20m 地点)	2010 年(平成 22 年) 6月 15 日(火) トプコン社製 GLS-1500			
		データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)				
		ビームモード設定	標準(0-40m)				
		データ取得数	335,238 点				
	第 4 回	データ取得間隔(水平)	5cm(20m 地点)	2010年(平成 22 年) 11 月 26 日(金) トプコン社製 GLS-1500			
		データ取得間隔(垂直)	5cm(20m 地点)				
		ビームモード設定	標準(0-40m)				
		データ取得数	662,358 点				

表 6.4.4(2) 3D レーザスキャナ計測諸元

### 6.4.2 計測結果

(1) 検証点の計測結果

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標値を次 表に示す。

点名	1回目(2009/9/10)			2回目(2009/11/27)		3回目(2010/6/15)			4回目(2010/11/25)			
	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
1	-15.060	6.437	-1.545	-15.062	6.438	-1.549						
1-1				-14.911	6.912	-1.540	-14.911	6.913	-1.547	-14.912	6.912	-1.543
2	-10.596	8.479	-2.478	-10.597	8.486	-2.487	-10.591	8.523	-2.529	-10.579	8.540	-2.544
3	-7.812	8.765	-2.845	-7.812	8.773	-2.856	-7.807	8.814	-2.904	-7.805	8.847	-2.926
4	-8.252	11.429	-3.692	-8.253	11.437	-3.702	-8.265	11.476	-3.762	-8.270	11.497	-3.787
5	-6.419	7.601	-2.957	-6.419	7.610	-2.967	-6.420	7.657	-3.015	-6.414	7.687	-3.034
6	-2.619	11.516	-4.006	-2.618	11.522	-4.017	-2.627	11.559	-4.075	-2.629	11.580	-4.101
7	-3.291	7.806	-3.478	-3.289	7.813	-3.489	-3.289	7.854	-3.542	-3.281	7.881	-3.565
8	1.006	10.707	-4.296	1.007	10.713	-4.307	0.999	10.747	-4.367	0.996	10.765	-4.394
9	5.538	11.010	-4.402	5.540	11.017	-4.413	5.531	11.052	-4.470	5.527	11.073	-4.496
10	11.055	10.182	-4.658	11.053	10.183	-4.667	11.049	10.216	-4.722	11.047	10.234	-4.746
11	9.575	6.919	-4.028	9.577	6.921	-4.036	9.576	6.946	-4.077	9.579	6.961	-4.094
12	16.758	6.985	-4.468	16.761	6.988	-4.477	16.753	7.012	-4.521	16.762	7.031	-4.542
13	15.800	4.290	-4.406	15.802	4.294	-4.415	15.799	4.319	-4.455	15.803	4.335	-4.473
14	21.306	6.450	-4.687	21.304	6.451	-4.696	21.298	6.477	-4.741	21.306	6.495	-4.762
15	-5.282	12.438	-3.038	-5.277	12.434	-3.047	-5.281	12.457	-3.104	-5.271	12.452	-3.128
16	2.620	12.394	-3.428	2.624	12.398	-3.439	2.622	12.434	-3.496	2.630	12.436	-3.525
17	10.470	11.405	-3.812	10.474	11.407	-3.822	10.472	11.434	-3.878	10.479	11.441	-3.907
18	17.992	9.791	-4.129	17.994	9.792	-4.139	17.995	9.820	-4.194	17.998	9.820	-4.217
H1							-22.131	3.439	-1.202	-22.131	3.440	-1.194
H2							-24.541	7.464	-0.711	-24.541	7.462	-0.707
H3							34.727	2.846	-4.073	34.728	2.846	-4.067
H4							29.612	-4.578	-4.223	29.612	-4.578	-4.218

表 6.4.5 検証点の TS 計測値 単位:m

(2) 3D レーザスキャナの計測結果

3D レーザスキャナにより計測したデータを処理し、視覚的に把握できるように整理した。

3D レーザスキャナによる計測は、対象範囲に対して斜め上方から実施している。対象範囲は 地すべり頭部でほぼ平坦地形を呈し、変動方向は下方への沈下になることから、計測データを平 面投影図に整理した。

1) 器械点Aからの計測結果

器械点Aからの3Dレーザスキャナ計測により取得された点の分布平面図を図6.4.2に示す。 また、3Dレーザスキャナからの距離により色分けした平面図を図6.4.3に、3Dレーザスキャ ナが受光したレーザ反射強度を平面図に表現したものを図6.4.4に示す。



図 6.4.2(1) 計測点分布図(平面図:器械点 A)(第1回計測)



図 6.4.2(2) 計測点分布図(平面図:器械点 A)(第2回計測)



図 6.4.2(3) 計測点分布図(平面図:器械点 A)(第3回計測)



図 6.4.2(4) 計測点分布図(平面図:器械点 A)(第4回計測)



図 6.4.3(1) 計測距離別分布図(平面図:器械点 A)(第1回計測)



図 6.4.3(2) 計測距離別分布図(平面図:器械点 A)(第2回計測)



図 6.4.3(3) 計測距離別分布図(平面図:器械点 A)(第3回計測)



図 6.4.3(4) 計測距離別分布図(平面図:器械点 A)(第4回計測)



図 6.4.4(1) 反射強度分布図(平面図:器械点 A)(第1回計測)



図 6.4.4(2) 反射強度分布図(平面図:器械点 A)(第2回計測)



図 6.4.4(3) 反射強度分布図(平面図:器械点 A)(第3回計測)



図 6.4.4(4) 反射強度分布図(平面図:器械点 A)(第4回計測)

2) 器械点 B からの計測結果

器械点Bからの3Dレーザスキャナ計測により取得された点の分布平面図を図6.4.5に示す。 また、3Dレーザスキャナからの距離により色分けした平面図を図6.4.6に、3Dレーザスキャ ナが受光したレーザ反射強度を平面図に表現したものを図6.4.7に示す。

器械点Aと比べ視点が異なるために、計測可否範囲が異なっていることがわかる。



図 6.4.5 計測点分布図(平面図:器械点 B)(第1回計測)



図 6.4.6 計測距離別分布図(平面図:器械点 B)(第1回計測)



図 6.4.7 反射強度分布図(平面図:器械点 B)(第1回計測)
### 6.4.3 差分解析

多時期の計測データを用いて、2時期間の差分解析を行い、変動状況を整理した。

(1)検証点における差分解析

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標 値を整理し、多時期間における変動を把握した。なお、H1~H4地点は三脚を設置して計測 を行っており、三脚設置の誤差が含まれる可能性があるため変動量の把握対象外とした。

**表** 6. 4. 6 に検証点の座標値および差分を示す。これをみると、検証点は 4 時期間で z 方向 (垂直方向) に 60~100mm 程度の沈下が生じ、Y 方向(斜面方向)に約 20~80mm 程度 移動したことになる。

トータルステーションで計測した検証点の変動量を次頁以降に図示する。

占々	1回目	3(2009/9/	10)	2回	目(2009/11)	/27)	3回日	∃(2010/6	5/15)	4回	∃(2010/11	/25)
「二日」	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
1	-15.060	6.437	-1.545	-15.062	6.438	-1.549						
1-1				-14.911	6.912	-1.540	-14.911	6.913	-1.547	-14.912	6.912	-1.543
2	-10.596	8.479	-2.478	-10.597	8.486	-2.487	-10.591	8.523	-2.529	-10.579	8.540	-2.544
3	-7.812	8.765	-2.845	-7.812	8.773	-2.856	-7.807	8.814	-2.904	-7.805	8.847	-2.926
4	-8.252	11.429	-3.692	-8.253	11.437	-3.702	-8.265	11.476	-3.762	-8.270	11.497	-3.787
5	-6.419	7.601	-2.957	-6.419	7.610	-2.967	-6.420	7.657	-3.015	-6.414	7.687	-3.034
6	-2.619	11.516	-4.006	-2.618	11.522	-4.017	-2.627	11.559	-4.075	-2.629	11.580	-4.101
7	-3.291	7.806	-3.478	-3.289	7.813	-3.489	-3.289	7.854	-3.542	-3.281	7.881	-3.565
8	1.006	10.707	-4.296	1.007	10.713	-4.307	0.999	10.747	-4.367	0.996	10.765	-4.394
9	5.538	11.010	-4.402	5.540	11.017	-4.413	5.531	11.052	-4.470	5.527	11.073	-4.496
10	11.055	10.182	-4.658	11.053	10.183	-4.667	11.049	10.216	-4.722	11.047	10.234	-4.746
11	9.575	6.919	-4.028	9.577	6.921	-4.036	9.576	6.946	-4.077	9.579	6.961	-4.094
12	16.758	6.985	-4.468	16.761	6.988	-4.477	16.753	7.012	-4.521	16.762	7.031	-4.542
13	15.800	4.290	-4.406	15.802	4.294	-4.415	15.799	4.319	-4.455	15.803	4.335	-4.473
14	21.306	6.450	-4.687	21.304	6.451	-4.696	21.298	6.477	-4.741	21.306	6.495	-4.762
15	-5.282	12.438	-3.038	-5.277	12.434	-3.047	-5.281	12.457	-3.104	-5.271	12.452	-3.128
16	2.620	12.394	-3.428	2.624	12.398	-3.439	2.622	12.434	-3.496	2.630	12.436	-3.525
17	10.470	11.405	-3.812	10.474	11.407	-3.822	10.472	11.434	-3.878	10.479	11.441	-3.907
18	17.992	9.791	-4.129	17.994	9.792	-4.139	17.995	9.820	-4.194	17.998	9.820	-4.217

表 6.4.6 検証点の TS 計測値(下段:第1回目との差分) 単位:m

占夕		較差	(1回目-2回	]目)			較差	(1回目-3	回目)			較差	(1回目-4回	回目)	
える	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXY	∆xyz	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXY	∆xyz	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXY	∆xyz
1	-0.002	0.001	-0.004	0.002	0.005										
1-1				0.000	0.000										
2	-0.001	0.007	-0.009	0.007	0.011	0.005	0.044	-0.051	0.044	0.068	0.017	0.061	-0.066	0.063	0.091
3	0.000	0.008	-0.011	0.008	0.014	0.005	0.049	-0.059	0.049	0.077	0.007	0.082	-0.081	0.082	0.115
4	-0.001	0.008	-0.010	0.008	0.013	-0.013	0.047	-0.070	0.049	0.085	-0.018	0.068	-0.095	0.070	0.118
5	0.000	0.009	-0.010	0.009	0.013	-0.001	0.056	-0.058	0.056	0.081	0.005	0.086	-0.077	0.086	0.116
6	0.001	0.006	-0.011	0.006	0.013	-0.008	0.043	-0.069	0.044	0.082	-0.010	0.064	-0.095	0.065	0.115
7	0.002	0.007	-0.011	0.007	0.013	0.002	0.048	-0.064	0.048	0.080	0.010	0.075	-0.087	0.076	0.115
8	0.001	0.006	-0.011	0.006	0.013	-0.007	0.040	-0.071	0.041	0.082	-0.010	0.058	-0.098	0.059	0.114
9	0.002	0.007	-0.011	0.007	0.013	-0.007	0.042	-0.068	0.043	0.080	-0.011	0.063	-0.094	0.064	0.114
10	-0.002	0.001	-0.009	0.002	0.009	-0.006	0.034	-0.064	0.035	0.073	-0.008	0.052	-0.088	0.053	0.103
11	0.002	0.002	-0.008	0.003	0.008	0.001	0.027	-0.049	0.027	0.056	0.004	0.042	-0.066	0.042	0.078
12	0.003	0.003	-0.009	0.004	0.010	-0.005	0.027	-0.053	0.027	0.060	0.004	0.046	-0.074	0.046	0.087
13	0.002	0.004	-0.009	0.004	0.010	-0.001	0.029	-0.049	0.029	0.057	0.003	0.045	-0.067	0.045	0.081
14	-0.002	0.001	-0.009	0.002	0.009	-0.008	0.027	-0.054	0.028	0.061	0.000	0.045	-0.075	0.045	0.087
15	0.005	-0.004	-0.009	0.006	0.011	0.001	0.019	-0.066	0.019	0.069	0.011	0.014	-0.090	0.018	0.092
16	0.004	0.004	-0.011	0.006	0.012	0.002	0.040	-0.068	0.040	0.079	0.010	0.042	-0.097	0.043	0.106
17	0.004	0.002	-0.010	0.004	0.011	0.002	0.029	-0.066	0.029	0.072	0.009	0.036	-0.095	0.037	0.102
18	0.002	0 001	-0.010	0 002	0 010	0 003	0 0 2 9	-0.065	0 029	0 071	0 006	0 0 2 9	-0.088	0 030	0 093



図 6.4.8(1) 検証点の時系列移動(T.S.値 x 軸方向)



図 6.4.8(2) 検証点の時系列移動(T.S.値 y 軸方向)



図 6.4.8(3) 検証点の時系列移動(T.S.値 z 軸方向)



図 6.4.8(4) 検証点の時系列移動(T.S.値 xy 変化量)



図 6.4.8(5) 検証点の時系列移動(T.S.値 xyz 変化量)

(2) 3D レーザスキャナ計測データの差分解析

3D レーザスキャナにより計測したデータ群について、2 時期間の差分解析を行った。複数 の時期のデータを重ねる場合には、統一の座標系に変換する必要がある。ここでは、各時期 において計測した複数の標定用ターゲットの計測データに、トータルステーションにより計 測した座標値を割当て、スキャンデータ全体を座標変換する方法を用いて座標変換を行った。 採用した座標変換方法は、重心移動回転法(3.2.1 項参照)である。用いた標定点は、第1 回及び第2回データについては検証点 No.01~18 であり、第3回及び第4回データについ ては標定点 H1~H4 である。

差分解析手法は、各時期の点群データを統一サイズ・範囲となる 10cm×10cm メッシュグ リッドに変換した。この際、各メッシュの代表点は、メッシュ中心点に最も近い値を採用し た。差分方向は垂直方向とした。

結果を図 6.4.9 以降に示す。数値は+側が上昇方向である。これをみると、地すべり頭部 で沈下が顕著であり、小ブロックごとの変化量の差も明瞭に示されている。また図 6.4.15 には水平方向の移動状況を示したが、斜面方向にせり出す傾向が確認される。これらの移動 傾向は移動方向・移動量ともにトータルステーションによる検証点計測結果と概ね一致して いる。



図 6.4.9 2時期差分図(平面図)(第1回と第2回の垂直方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。鉛直方向の上昇を正とする。



図 6.4.10 2時期差分図(平面図)(第2回と第3回の垂直方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。鉛直方向の上昇を正とする。



図 6.4.11 2 時期差分図(平面図)(第3回と第4回の垂直方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。鉛直方向の上昇を正とする。



図 6.4.12 2時期差分図(平面図)(第1回と第3回の垂直方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。鉛直方向の上昇を正とする。



図 6.4.13 2 時期差分図(平面図)(第1回と第4回の垂直方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。鉛直方向の上昇を正とする。



図 6.4.14 ターゲットの位置と軸方向・拡大箇所



図 6.4.15 X 軸方向の移動状況(赤:1回目、青:3回目)

滑落崖よりも背後の道路面は、本来不動域と考えられるが、東に向かって見かけの沈 下量が大きくなるような傾向を示しており、見かけの沈下量は、最大で20mm前後にな る(図 6.4.13)。

現地状況からは、道路面が全体的に回転しながら相対的沈下を裏付ける観察結果は得 られていないことから、この原因は計測作業における誤差に起因していると考えられる。

要因の一つとして、標定点4点の配置が、y軸方向に延びている一方でx軸方向が短いことがあげられる。このような配置の場合、y軸回りの精度が低くなる傾向がある。

また、標定用ターゲットの設置には測量用三脚を用いているが、道路面(アスファルト)での長時間作業では沈み込みが起こることがある。スキャナによるターゲット座標 取得時刻と TS による座標読み取り時刻が大きくずれると、両者が同一点でなくなる場合 があり、その影響が座標変換データに現れる可能性がある。

今回の調査結果は、それらが相まって実現象とは異なる見かけの沈下が含まれている と考えられる。

このように、3D スキャナによるモニタリングで注意すべき事項として、標定点の適切 な配置と、標定点設置における不動性、作業手順の配慮などが肝要であることが明らか となった。

## 6.5 D地区

# 6.5.1 計測方法

## (1)計測日

本地区における計測は、表 6.5.1 に示す計測日に実施した。

旦	計測日	備考
第1回計測	2009年(平成 21 年)11月 28 日(土)	天候:晴れのち曇り
第2回計測	2010年(平成22年) 4月29日(木)	天候:曇り
第3回計測	2010年(平成22年) 9月7日(木)	天候:曇りのち雨
	~9月8日(金)	連続計測試験を含む

表 6.5.1 D 地区計測日



(1) 第1回



(2) 第2回



(3) 第3回(9月7日)

) (4) 第 3 回 (9 月 8 日) 写真 6.5.1 計測対象状況(第 1 回)

(2)使用機器

本地区における計測では、表6.5.2に示す計測機器を使用した。

種類	機器名	備考
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1000	2009(平成 21)年度
3D レーザスキャナ	トプコン社製 GLS-1500	2010(平成 22)年度
トータルステーション	ニコントリンブル社製 S6	
機器設置台	コンクリートピラー	既存ピラーを利用
	水平基台	

表 6.5.2 使用計測機器一覧

(3)計測点配置

本地区においては、計測対象範囲(貯水ダム)の下流から計測することとし、器械設置点は 右岸側に設置されているコンクリートピラー(S)に選定した(図 6.5.1 および写真 6.5.2~ 6.5.3)。

現地座標系決定のための標定点を右岸側構造物および左岸側構造物に設定(表 6.5.3 および 写真 6.5.4~6.5.5)し、検証用としてダム面に計測用ターゲットを設置(表 6.5.3 および写真 6.5.6~6.5.7)した。



図 6.5.1 現地計測配置図



写真 6.5.2 器械設置点



写真 6.5.3 器械設置状況(日射対策)

			ゴロロ	十測回		
地点	目的	設置位置	1	2	3	備考
			回	回	回	
B1	標定用	右岸側擁壁	0	0	0	
B2	標定用	右岸側建物壁面	0	0	0	
B3	標定用	左岸側斜面	0	0	0	
B4	標定用	左岸側斜面	0	0	0	
B5	標定用	左岸側斜面	_	0	0	2回から追加
D1	検証用	堤体中央天端	0	0	0	
D2	検証用	堤体上段通路右岸側	0	0	0	
D3	検証用	堤体上段通路左岸側	0	0	0	
D4	検証用	堤体中段通路右岸側	0	0	0	
D5	検証用	堤体中段通路右岸側	0	0	0	

表 6.5.3 計測用ターゲット設置一覧



(1) 右岸側(2) 左岸側写真 6.5.4 標定用ターゲットの設置(全容)



(1) B1







(4) B4



(5) B5

写真 6.5.5 標定用ターゲットの設置(詳細)



写真 6.5.6 検証用ターゲットの設置



(1) D1

(2) 堤体内のターゲット 写真 6.5.7 検証用ターゲット (4)スキャン諸元

3D レーザスキャナの計測諸元は表 6.4.4 に示すとおりである。

日	項目	適用値	備考
	データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)	
第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)	2009 年(平成 21 年) 11 月 28 日(十)
日	ビームモード設定	標準 (0-200m)	トプコン社製 GLS-1000
	データ取得数	2,083,425 点	
	データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)	
第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)	2010年(平成 22 年) 4 月 29 日(木)
回	ビームモード設定	標準 (0-200m)	トプコン社製 GLS-1500
	データ取得数	1,894,861 点	
	データ取得間隔 (水平)	5cm(200m 地点)	
第	データ取得間隔(垂直)	5cm(200m 地点)	2010年(平成22年) 9月7日(木)~9月8日(金)
3 回	ビームモード設定	標準(0-200m)	トプコン社製 GLS-1500
	データ取得数	2,694,363 点	

表(	6.5.	4	3D	レーザス	キャ	ナ	·計測諸元
----	------	---	----	------	----	---	-------

(5)連続計測

本地区においては、計測時刻の違いによる取得データへの影響を把握することを目的として、 24 時間の連続計測を実施した。

3D レーザスキャナを器械点に一昼夜セットし、定時に堤体の計測範囲全域をスキャニング した。また、標定点および検証点についてターゲットスキャンを全域スキャンの間に実施した。

トータルステーションを器械点脇に三脚にてセットし、3D レーザスキャナのターゲットス キャンと同時期に標定点および検証点について座標を取得した。

	n-fJ-ri	当知時故	気温	気圧	144-47
月日	時刻	計測內容	°C	hPa	佩考
9月7日	16:00	ターゲット計測	26.6	999.0	天候 : 曇り
	17:00	全域スキャニング			天候 : 曇り
	18:00	ターゲット計測	21.8	942.0	天候:雨
	19:00	全域スキャニング			天候 : 曇り(壁面湿潤)
	20:00	ターゲット計測	20.4	942.4	天候 : 曇り
	21:00	全域スキャニング			天候 : 曇り
	22:00	ターゲット計測	20.6	941.0	天候:晴れ
	23:00	全域スキャニング			天候 : 曇り
9月8日	0:00	ターゲット計測	20.7	941.0	天候 : 曇り
	1:00	全域スキャニング			天候 : 曇り
	2:00	ターゲット計測	20.1	942.0	天候:雨
	3:00	全域スキャニング			天候:雨・霧
	4:00	(ターゲット計測)			天候:雨・霧
	6:30	(テスト)			天候:雨
	7:00	ターゲット計測	21.0	941.0	天候:雨
	8:00	ターゲット計測	21.6	942.0	天候:雨
	9:00	全域スキャニング			天候:小雨
	10:00	全域スキャニング			天候 : 曇り→雨
	10:40	ターゲット計測	22.2	943.0	天候:小雨
	11:00	全域スキャニング			天候:小雨
	12:00	ターゲット計測	21.0	942.0	天候:小雨
	13:00	全域スキャニング			天候:小雨
	14:00	ターゲット計測	21.4	942.0	天候:小雨

表 6.5.5 連続計測諸元

#### 6.5.2 計測結果

(1) 検証点の計測結果

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標値を次 表に示す。

占夕	1回	目(09/11/2	28)	20	目(10/4/2	7)	3回	目(10/09/	07)
「京石」	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
B1	100.000	161.305	109.792	100.000	161.302	109.786	100.000	161.305	109.792
B2	105.370	144.452	101.292	105.370	144.451	101.288	105.371	144.452	101.290
B3	269.177	114.328	42.718	269.173	114.326	42.710	269.182	114.320	42.710
B4	282.473	96.735	44.836	282.477	96.735	44.822	-	-	-
B5	-	-	-	349.288	115.353	91.252	349.284	115.341	91.255
D1	251.700	221.698	99.845	251.693	221.669	99.829	251.704	221.709	99.847
D2	206.395	235.698	71.077	206.398	235.687	71.064	206.403	235.705	71.076
D3	295.472	210.360	71.101	295.471	210.348	71.087	295.480	210.364	71.096
D4	209.152	236.779	41.038	209.157	236.776	41.023	209.159	236.775	41.035
D5	295.619	211.643	41.097	295.617	211.638	41.085	295.621	211.641	41.094

表 6.5.6 検証点の TS 計測値 単位:m

(2) 3D レーザスキャナの計測結果

3D レーザスキャナにより計測したデータを処理し、視覚的に把握できるように整理した。

3D レーザスキャナによる計測は、対象面に対してほぼ水平方向から実施している。対象面は ほぼ垂直に屹立し、水位変化に伴う堤体変動方向は前方へのせり出しとなることから、計測デー タを軸変換して立面図(堤体を下流正面から見る方向)を作成した。

3D レーザスキャナ計測により取得された点の分布を立面図に表現したものを図 6.5.2 に示す。 また、3D レーザスキャナからの距離により色分けした立面図を図 6.5.3 に、3D レーザスキャ ナが受光したレーザ反射強度を立面図に表現したものを図 6.5.4 に示す。

これらをみると、ダム形状が正しく計測されていることがわかる。洪水吐部は、器械点からみ て影になる部分があり、計測欠損となっている。また、堤体のうち流水跡で壁面が黒色化した部 分は、周辺に比べてデータ取得度が低いことがわかる。



図 6.5.2(1) 計測点分布図(立面図)(第1回計測)



図 6.5.2(2) 計測点分布図(立面図)(第2回計測)



図 6.5.2(3) 計測点分布図(立面図)(第3回計測)



図 6.5.3(1) 計測距離別分布図(立面図)(第1回計測)



図 6.5.3(2) 計測距離別分布図(立面図)(第2回計測)



図 6.5.3(3) 計測距離別分布図(立面図)(第3回計測)



図 6.5.4(1) 反射強度分布図(立面図)(第1回計測)



図 6.5.4(2) 反射強度分布図(立面図)(第 2 回計測)



図 6.5.4(3) 反射強度分布図(立面図)(第3回計測)

### 6.5.3 差分解析

多時期の計測データを用いて、2時期間の差分解析を行い、変動状況を整理した。

#### (1)検証点における差分解析

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標 値を整理し、多時期間における変動を把握した。なお、変動を把握する際、堤体正面方向(上 下流方向)の変動を把握するため、TS計測値を水平方向に回転させた。

表 6.5.7(1)に回転させたターゲットの座標値を、表 6.5.7(2)にターゲットの変動を示す。 これをみると、検証点は Y 軸方向(上下流方向)の移動が顕著であり、1~2回目で下流方 向に約 3cm 移動し、2~3回目に概ね1回目と同じ位置に戻る傾向が確認される。これは、2 回目計測時に貯水位があがっており、これに伴い堤体が変位したものと考えられる。 トータルステーションで計測した検証点の変動量を次頁以降に図示する。

占夕	1回	目(09/11/2	28)	2回	目(10/4/2	7)	3回	目(10/09/	07)
「二日」	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
B1	134.210	100.699	109.792	134.211	100.696	109.786	134.210	100.699	109.792
B2	145.502	87.085	101.292	145.503	87.084	101.288	145.503	87.085	101.290
B3	308.666	120.518	42.718	308.663	120.514	42.710	308.674	120.512	42.710
B4	327.584	109.186	44.836	327.588	109.188	44.822	-	-	-
B5	_	-	-	382.560	151.478	91.252	382.561	151.466	91.255
D1	252.240	213.522	99.845	252.245	213.493	99.829	252.240	213.534	99.847
D2	204.990	209.531	71.077	204.997	209.522	71.064	204.995	209.541	71.076
D3	297.072	219.407	71.101	297.076	219.396	71.087	297.078	219.414	71.096
D4	207.141	211.567	41.038	207.147	211.566	41.023	207.149	211.565	41.035
D5	296.728	220.652	41.097	296.728	220.647	41.085	296.731	220.651	41.094

表 6.5.7(1) 検証点の TS 計測値(水平回転後) 単位:m

表 6.5.7(2) 検証点の移動量 単位:m

占夕			∆1-2回目					△1-3回目		
気白	X座標	Y座標	Z座標	ΔXY	ΔXYZ	X座標	Y座標	Z座標	ΔXY	∆XYZ
B1	0.001	-0.003	-0.006	0.003	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
B2	0.001	-0.001	-0.004	0.001	0.004	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.002
B3	-0.003	-0.004	-0.008	0.005	0.009	0.008	-0.006	-0.008	0.010	0.013
B4	0.004	0.002	-0.014	0.004	0.015	-	-	-	-	-
B5	-		-	-	-	-	-	-	-	-
D1	0.005	-0.029	-0.016	0.029	0.033	0.000	0.012	0.002	0.012	0.012
D2	0.007	-0.009	-0.013	0.011	0.017	0.005	0.010	-0.001	0.011	0.011
D3	0.004	-0.011	-0.014	0.012	0.018	0.006	0.007	-0.005	0.009	0.010
D4	0.006	-0.001	-0.015	0.006	0.016	0.008	-0.002	-0.003	0.008	0.009
D5	0.000	-0.005	-0.012	0.005	0.013	0.003	-0.001	-0.003	0.003	0.004



図 6.5.5 軸の方向(xy 平面図、ダム上方より望む)



図 6.5.6(1) 検証点の時系列移動(T.S.値 x 方向)



図 6.5.6(2) 検証点の時系列移動(T.S.値 y 方向)



図 6.5.6(3) 検証点の時系列移動(T.S.値 z 方向)



図 6.5.6(4) 検証点の時系列移動(T.S.値 xy 平面移動)



図 6.5.6(5) 検証点の時系列移動(T.S.値 xyz 三次元移動量)

(2) 3D レーザスキャナ計測データの差分解析

3D レーザスキャナにより計測したデータ群について、2 時期間の差分解析を行った。複数 の時期のデータを重ねる場合には、統一の座標系に変換する必要がある。ここでは、各時期 において計測した複数の標定用ターゲットの計測データに、トータルステーションにより計 測した座標値を割当て、スキャンデータ全体を座標変換する方法を用いて座標変換を行った。 採用した標定点は、第1回データについては標定点 B01~B04 であり、第2回及び第3回デー タについては標定点 B01~B05 である。

差分解析手法は、各時期の点群データを統一サイズ・範囲となる 10cm×10cm メッシュグ リッドに変換した。この際、各メッシュの代表点は、メッシュ中心点に最も近い値を採用し た。差分方向は堤体に正対した水平方向とした。

結果を図 6.5.7 に示す。数値は+側が下流側方向である。これをみると、ダム堤体の上部 が 1~2 回目において下流側にはらみ出し、3 回目には概ね元の位置に戻る傾向が確認される。 これらの移動傾向は移動方向・移動量ともにトータルステーションによる検証点計測結果と 概ね一致している。



図 6.5.7(1) 2 時期差分図(立面図)(第1回と第2回の水平方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。下流側への水平移動を正とする。



図 6.5.7(2) 2 時期差分図(立面図)(第2回と第3回の水平方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。下流側への水平移動を正とする。



図 6.5.7(3) 2 時期差分図(立面図)(第1回と第3回の水平方向の差分) 10cm×10cmメッシュグリッドで差分解析。下流側への水平移動を正とする。

## 6.5.4 連続計測結果

時刻による計測データへの影響を把握するため、連続計測結果の整理を行った。 (1)検証点における差分解析

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標値を 整理し、2時刻間における変動を把握した。

**表**6.5.8 に検証点の座標値および2時刻間の差分を示す。表6.5.8 より、9月8日 18:00 における D4 の値は、2 時間前と比べ1~2cm 程度の差が生じている。これは、当該計測時において雨の影響が強かったためと考えられる。その他の時刻においては数 mm 程度の差となっていることから、連続計測試験中において、計測対象範囲は概ね不動であったと考えられる。

-		9/7 16:00	1 m		12 13:00			1/7 20:00			3.7 22:00		8 8	9.8 C.00	0	10 N	9/8 2:00	
Q.	標準入	教室人	2座4	新学X	教御人	1944	X座橋	大陸様	12座標	X段標	教室人	2足橋	構成×	教堂人	2座楼	×座橋	大変様	計画に
8	2 144.452	105.371	101,250	144.452	105,370	101.290	144,454	106,369	101290	144,453	106.372	101.290	144453	105.371	101.290	144,453	105.371	101.285
8	3 114.320	269.182	42.710	114.321	269.182	42.712	114.321	269,150	42.712	114.317	269,180	42 714	114.317	269,181	42.712	114.318	269.181	42.711
8	5 115.341	349.284	91.255	115,344	349.293	91,256	115,338	349.283	91257	115,235	349.283	91.256	115,337	349.283	91.256	115.338	349.281	91,256
0	1 221.709	251.704	89.847	221,709	251,705	199,847	221.707	251.705	99,847	221.706	251.706	99.847	221.704	251.705	59,846	221.708	251.707	99.B47
	2 235,705	206.403	71.076	235 704	206.400	71.074	235.701	206.400	71.078	235 700	206.402	21.075	235701	506.402	71.077	235,705	206.404	71,076
	3 210,364	295.480	71,096	210.362	295.478	71.068	210.360	295.478	71.098	210.258	255.480	71.097	210358	295,480	71.009	210.361	295.482	71,007
Î	4 236.775	209.159	41,035	236.776	209.157	41.036	せいある	209.157	41,036	236.772	209.157	41.036	236771	209.159	41,034	111.852	209.161	41,036
	5 211.641	295.621	41,094	211.640	295.620	41.094	211.626	295.620	41.095	211.636	265.621	41.085	211632	295.822	41.093	211.637	295.624	41.092
24		\$/8 7.00			9/3 8:00			00:01 8/1			1/8 12.00			3/8 14:00				
0	₩ 後×	群連人	2座墙	間後×	教徒人	2座4	×座緯	教徒人	2座橋	》 存载	製造人	2座橋	禁住×	関係人	2座4			
	2 144,454	105,369	101,288	144.453	105,371	101,290	144,453	105.371	101289	144,453	105,371	101.283	144452	105,371	101.289			
8	114,323	209.170	42.710	114.314	209.170	42.713	114,322	209.181	42.712	114.217	209.182	42.711	114317	209.180	42,713			
8	5 115,340	349.285	91,260	115.332	249,283	91,255	115.341	349,283	91254	115,333	349.283	91.254	115,339	349.283	91.256			
0	1 221.711	251.704	59.847	221.705	251,708	99,848	221.712	251,710	99.844	221.704	251.706	99.847	221710	251,708	90,848			
0	2 235,703	206.397	71.074	235,700	206,403	21.074	235.703	206,399	71.075	235,703	200.401	21.076	235.704	206.399	71,074			
0	3 210.365	295,477	71,100	210.355	295.482	71,099	210.361	295,479	71.097	210.358	255.480	71.098	210.361	295,479	71.068			
	4 236.773	209.157	41,036	236789	209.175	41.028	238,775	209,156	41.036	238.774	209.159	41.035	236773	209.156	41,035			
Î	5 211,630	295,619	41,093	211.633	295.623	41,002	211.629	295,620	41.003	211.635	020.003	41,093	211,640	295,620	41,094			

坦
畫
_
÷.
સોરો
6
ũ
氲
罰
疲
N
10
鋖
۴
~
细
靐
÷a.
2
6
Ň.
弼
00
ŝ
9
表

臣

	27	0000	0000	-0.003	-0001	0.001	0.002	-0.002	0000			
1/8 2:00	72	0000	0000	0005	-0002	-0.002	-0.002	-0002	-0.002			
- 0	AX	0.000	10000-	-0001	-0.004	-0.004	-0.003	-0.006	-0.006			
	22	0000	0.002	0000	0.001	-0.002	-0.002	0.002	0.002		4.7	14.6
3/8 C.00	24	0.001	-0.001	0.000	0.001	0.000	0000	-0.002	-0.001	12-00	NA NA	1
	AX AX	0000	0000	-0002	0.002	-0001	0000	0001	0004		AV T	90
	22	0000	-0.002	1000	0000	0.003	0.001	0000	0.000	Ī	47	11.61
7 22:00	5V	-0.003	0,000	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	0.000	-0.001	00-01-8/	I AV	
	AX	0.001	0.004	0.003	1000	0.001	0.002	0.002	0000		AV	NA I
	22	0:000	00000	-0:001	0.000	-0.004	0000	0.000	-0.001	Ī	77	11.60
17 20:00	AY	0.001	0.002	0:000	0000	0.000	0000	0:000	0.000	00.01 87	N NY	-
	AX AX	-0.002	0,000	0.006	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004		AV 1	VW V
	22	0000	-0.002	-0001	0.000	0.002	-0.002	-0.001	0000	Ī	47	116
77 13:00	AY	0.001	0,000	0.001	-0.001	0.003	0.002	0,002	0.001	00 B-000	A V V	14.1
6	AX AX	0000	-0.001	-0003	0000	0.001	0.002	-0.001	0001		AV 1	WO.
	2Z	1	1	1	/	1	1	1	/	Ī	4.7	3.6
/7 16:00	AY I	1	1	1	1	1	1	1	1	00-6 8/8	L AV	111
9	AX	1	1	1	1	1	1	1	/		AV 1	WO.
200	D.E	82	61	88	ia	D2	03	04	08		1 9 H	

800												
0.002			AZ	0,000	-0.002	-0.002	-0.001	0.002	0.000	0,000	1000-	
-0.001	Sold Sector	9/8 14:00	AV	0000	0,002	0.000	-0.002	0.003	0.001	0,003	0.003	
0004			AX I	1000	0000	-0006	-0006	1000-	-0003	1000	-0003	
0.000		3/8 12:00	22	0000	0.001	0000	-0.003	100:0-	-0001	0000	0000	
-0.001			AV	0.000	-0.001	0.000	0.004	-0.002	-0.001	-0.003	-0.003	
0000	1000000000		AX	0000	0.005	0.008	0.008	0000	0.003	1000	0.003	
-0.001		3/8 10:00	AZ.	1000	0.001	0.001	0.002	1000-	0.002	-0.008	-0001	
0.000	A COLORED		AV	0000	-0.005	0.000	-0.002	0.004	0.003	0.019	0.003	
0.004			AX AX	0,000	-0.008	-0.009	-0.007	-0.003	-0.006	0.014	-0.005	
0.000		9/8 8:00	AZ	-0.002	0.003	0.005	0.001	0.000	0.001	0.008	0.001	
0.001			AY	-0.002	0,000	0.002	-0.004	-0.000	-0.005	-0.018	-0.004	
1000			AX	1000	0008	8000	9000	0.003	0.010	9100-	0000	
/		8/8 7:00	52	10000	-0,006	-0.001	00000	0.002	-0,003	0.000	1000-	
/			0.0 7:00	AV	0,002	0,005	-0.004	0,000	0.007	0.005	0.004	0,000
/			AX	100/0-	-0.005	-0.002	-0.003	0.002	-0.004	1000	-0.001	
05		A8		82	63	85	ā	D2	D3	5	03	
_		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(2)スキャナ計測データの差分解析

スキャナ計測結果の整理方法は2時刻間の差分解析とした。なお、複数時期のデータを重ねる 場合には、統一の座標系に変換する必要があるが、本試験では3Dレーザスキャナを据え付けた 状態で連続計測を行ったため、機械座標系でそのまま重ねることが可能である。このため、ここ では標定用ターゲットの座標値を用いた座標変換は行わず、機械座標系の値をそのまま用いて重 ね合わせた。

差分方法は、スキャナ機械点からの距離の差分とした。結果を図 6.5.8 に示す。なお、数値は -側が下流側方向(計測距離が短くなること)を示している。

図 6.5.8(1)より、9月7日 17:00~19:00 において堤体が若干(1~3cm 程度)やや前方にせり出 す傾向がみられる。これは、同時間において温度が急に低下していることが関係している可能性が考 えられる。また、9月7日 23:00~9月8日 01:00 において全体的に上流へ移動する傾向も確認される が、これ以降は変動が無いことなどより、スキャナ機器が動いた可能性が考えられる。それ以外の時 間帯においてはほぼ変化がないことが確認された。



図 6.5.8(1) 連続計測差分図(機械座標) (9月7日 17:00 と 9月7日 19:00 の差分)



図 6.5.8(2) 連続計測差分図(機械座標) (9月7日 19:00 と 9月7日 21:00 の差分)



図 6.5.8(3) 連続計測差分図(機械座標) (9月7日 21:00 と 9月7日 23:00 の差分)


図 6.5.8(4) 連続計測差分図(機械座標) (9月7日 23:00 と 9月8日 01:00 の差分)



図 6.5.8(5)連続計測差分図(機械座標) (9月8日 01:00と9月8日 03:00 の差分)



図 6.5.8(6) 連続計測差分図(機械座標) (9月8日 03:00 と 9月8日 06:30 の差分)



図 6.5.8(7)連続計測差分図(機械座標) (9月8日 06:30と9月8日 08:00 の差分)



図 6.5.8(8) 連続計測差分図(機械座標) (9月8日 08:00 と 9月8日 10:00 の差分)



図 6.5.8(9) 連続計測差分図(機械座標) (9月8日 10:00 と 9月8日 11:00 の差分)



図 6.5.8(10)連続計測差分図(機械座標) (9月8日 11:00 と 9月8日 13:00 の差分)

### 7. 計測結果と現象解析

# 7.1 A地区

## 7.1.1 既往資料による変動機構

A地区の地すべりブロックは末端から3つのブロックが連続しており、地すべり規模は末端 のブロックで長さ約460m、最大幅約165m、最大層厚46mである。中間のブロックは長さ約 130m、最大幅約160m、最大層厚約44mである。最上位のブロックは長さ約145m、最大幅 約110m、最大層厚約42mである。末端ブロックと中間ブロックの間には約50m区間に渡っ て明瞭な滑落崖が分布することから、地すべりブロックが区分されると判断した。中間ブロッ クと上位ブロックの間には、約100m区間に渡って明瞭な滑落崖が分布し、平成3年の災害発 生時に変動した履歴を持つことから、地すべりブロックが区分されると判断した。平面図を図 7.1.1 に、A測線断面図を図7.1.2 に示す。

地すべりブロックの変位量は平均して 2mm/年程度であるが、豪雨時には一時的に 8mm 程 度の変動が確認されることがある。

地すべりブロック内の地す~	<b>ゞり変動観測計器とし</b>	_て以下の計器が設置されてい	いる。
---------------	-------------------	----------------	-----

・孔内傾斜計	NI-2, NI-7, NI-3, NI-5
• 鋼管杭歪計	中心測線上の鋼管杭に設置 点数は 39 点
・地下水位観測孔	NI-1, NI-2, NI-7, NIII-2, NI-3, NI-4, NI-6
• GPS	GPS-1, GPS-2, GPS-3

以下、変位計である孔内傾斜計、鋼管杭歪計、GPS について述べる。





以下、各観測計器の変動状況について述べる。

# <孔内傾斜計>

対策工施工前、対策工施工後ともに、降雨を誘因とした変動の履歴がある。特に試験湛水中 である 2007 年 9 月に連続雨量 400mm 程度で一時的に 1~4mm 程度の変動が認められた。こ の変動は雨量とともに貯水位も上昇したが、主に降雨による変動と考えられる。それに対し、 2009 年 4 月にも 1~8mm 程度の変動が認められたが、これは 117.5mm/日の雨量とともに、 急激な貯水位の低下(2009/4/1 565.02m→2009/5/11 533.67m)に伴う変動と考えられる。し たがって、2009 年 4 月の変動は厳密には雨のみによる変動とは断言できない。以下、各観測計 器の変動状況についてまとめる。

孔内傾斜計の変動状況をまとめたものを表7.1.1に示す。

7072	孔器	据准务	机形积和	实验深度	伏宠	文歌运算采度	情考
R-27	NI-2	55.0m	2002/12/06~2004/09/15		業積性の変動傾向は認められない		
R-27	NI-3	62.0m	2002/12/06~2005/02/17	-	業積性の変動傾向は認められない		
R-27	NI-5	42.0m	2001/11/30~2005/02/15	17, De 26, 5e 33, 5e	山倒・下流倒への変動 詳而時に変動、3方向トータルで約2.0mm 谷倒・上流倒への変動 詳問時に変動、3方向トータルで約2.5mm 谷倒への変動 請而時に変動、3方向トータルで約2.0mm	33. 5~34.0	
R-27	NI-7	50.0m	2001/11/30~2005/02/15		果積性の変動傾向は認められない		
R-27	NII-2	40.0m	2001/11/30~2005/02/15		業積性の変動傾向は認められない		
R-27	NIV-2	39.0m	2001/12/04~2004/09/16		累積性の変動傾向は認められない		

表 7.1.1 孔内傾斜計変動状況

・試験湛水前評価(2005/10/01以前データ)

・試験温水中詳価(2005/10/01以後データ)

7099	1.8	-	10.0.010	****	莱勒克派	*******	99
R-27	81-3	62.Dm	2005/00/12~計測中	45.0m 45.5m	谷信・(上洗剤)への支助 2007/09台県時、2009/04音雨時に支助、X方向トータルで約3mm 谷信・(上洗剤)への支動 2007/09台風時、2009/04菱同時に支助、X方向トータルで約3mm	45.0~45.0	
R-27	¥1-5	42.0m	2005/06/06~2130中	(24.0e) (29.5e) 33.5e 34.0e	岩僧・上洗祭への変態 没度23,50での変動と物は影を示す。たわみ変形? 山倒・下洗祭への変動 没度24,00での変動と物は影を示す。たわみ変形? 岩僧への変動 2007/09金属時,2008/04書酒時~2503/07/1変動。3万向トークルで約3,0m 岩僧への変動 2007/09金属時,2008/04書酒時~2503/07/1変動。3万向トークルで約3,0m	33, 5~34, 0	800 ti iza
R-27	81-7	50.0m	2005/09/09~計測中	40. On	谷街・下流街への変動 2007/09台集時、2008/04要用時に変動、、X方向トータルで約12mm	40	
R-27	NII-2	40.0m	2005/09/09~21310	14.0m 14.5m	谷根への変動 2007/09台集時、2009/04音雨時に変動、米方向トータルで約5.0mm 谷根への変動 2007/09台集時、2009/04音雨時に変動、米方向トータルで約5.0mm	14.0~14.5	
R-27	オロックアス	33.0m	2005/09/13~計測中		実験性の変動場向は認められない(変変16~2回区間は測定値が安定しない場向を示す)		
R-27	78572度	45.0m	2005/09/12~2007/02/28	1	業積極の変動傾向は認められない	-	

表 7.1.1 から、試験湛水前は N I -5 孔でのみ変動が、試験湛水中は N I -3、N I -5 孔、N I -7、NIII-2 の 4 孔において、変動が認められた。図 7.1.3~図 7.1.10 に孔内傾斜計変動図を示 す。また、各観測孔の変動深度における変動量と雨量、貯水位の関係を示した図を図 7.1.11 に 示す。



















また、各孔内傾斜計には降雨時と貯水位低下時とそれぞれ、以下のような特徴がある。降雨時の変動図を図7.1.12 に、貯水低下時の変動図を図7.1.13 に示す。

<2007年9月の台風時の降雨>

- ・降雨後は上方に位置する NI-5 孔が鋭敏に反応する。沈静化も速やかである。
- ・NIII-2 孔は豪雨で変動が生じているものの NI-5 孔よりも反応が鈍い。

<2008年4月の貯水位低下時>

- ・NI-5以外は貯水位低下に伴い、同時期に変動している。
- ・NI-5 孔は他の観測孔に比べ遅れて変動している。

このことから、最上位の NI-5 孔は降雨による変動の場合速やかに変動し、貯水位の変化に 伴う変動の場合は他の孔に遅れて変動すると言える。



図 7.1.12 降雨時の孔内傾斜計変動図



図 7.1.13 貯水位低下時の孔内傾斜計変動図

# <鋼管杭歪計>

鋼管杭歪計総括変動図を図7.1.14 に示す。鋼管杭歪計観測結果から導き出されたたわみ量お よびせん断力についても2007年9月の降雨時、2008年4月の貯水位低下時に変動が認められ る。

## $\leq GPS >$

GPS 変動図を図 7.1.15 に示す。GPS 変動図を見ると、GPS-1~3 全てで 2007 年 9 月の降 雨時、2008 年 4 月の貯水位低下時に変動している。その中で GPS-2 の変動が最も顕著である と言える。

以上から当ブロックの変動特徴として以下が挙げられる。

- ・連続雨量 400mm 以上の降雨時に地すべり滑動が活発化する。
- ・貯水位低下時にも地すべりは変動する傾向にある。
- ・GPS はブロック内に設置した GPS-2 の変動が最も顕著である。



図 7.1.14 鋼管杭歪計総括変動図(2005-2009)

GPS-3

GPS-2

GPS-1



図 7.1.15 GPS 変動図

# 7.1.2 計測結果の整理と考察

(1) 計測条件等

第6章に示した通り、A地区において、地上レーザスキャナ計測を4回実施した。

- ・第1回 2009/9/15
- ・第2回 2009/12/4
- ・第3回 2010/6/5
- ・第4回 2010/10/8
- (2) TS 計測結果の特徴

計測対象範囲に設置した検証用ターゲットをトータルステーションにより計測した座標値を 表7.1.1に示す。1~3点に関しては第3回まで計測できたが、第4回で水没し、計測できなかっ た。そのため、第4回目は第3回で増設したターゲットについて計測を実施した。

図7.1.16にターゲット位置図を示す。



A 測線概略位置

図 7.1.16 ターゲットの位置

トータルステーションにより計測した計測結果を、斜面正面方向の変動を把握するため、TS 観測値を水平方向に回転させた。ターゲットの軸方向については図7.1.17に示す。

回転させたターゲットの TS 観測値については表 6.1.6(1)、ターゲットの変動量については 表 6.1.6(2)を参照されたい。



図 7.1.17 ターゲットの位置と軸方向

1~3の各ターゲットの移動方向と移動量をグラフにして図7.1.18に示す。ターゲット1に ついては x 方向に8mm、y 方向に3mmの変動、z 方向にはほぼ変動していない。ターゲット 2については x 方向に-1mm、y 方向に-1mm、z 方向に-3mmの変動である。ターゲット3に ついては x 方向に1mm、y 方向に-2mm、z 方向に-2mmの変動である。

ターゲット2と3についてはやや沈下状の変動が認められるが、ターゲット1についてはそのような傾向は認められず、x+方向に変動している。変動量も最大でターゲット1の8mm であり、それ以外は2mm 程度の幅での変動のみである。したがって各ターゲットの変動に規則性は認められず、地すべり変動に伴う変動ではないと判断する。



(①:1回目計測(x=0, y=0, z=0)、②:2回目計測、③:3回目計測)

(3) スキャナーによる計測結果(差分)の特徴

図 6.1.8, 図 6.1.9, 図 6.1.11 で示された 3D スキャナー計測データによる第1回~第3回 計測の差分解析の結果、向かって左上の斜面がややせり出しているように見えるが、各時期の 差分ともにほとんど変化が認められなかった。

#### 7.1.3 計測期間における既設計器の観測状況

図 7.1.19 に 2008 年 12 月から 2011 年 1 月までの孔内傾斜計変動図を示す。深度別変動量は想 定すべり面深度での変動量である。観測期間の最大日降水量は 2009 年 10 月 26 日の 87.0mm/日で あり、最大連続雨量は 2009 年 10 月 5 日~10 月 8 日の 157.5mm である。各孔内傾斜計とも、最 大日雨量、最大連続雨量の記録時に顕著な変動は認められないものの、観測期間を通じて、わずか に変動しており、各孔とも 2 年間で 1mm 未満の変動量を観測している。

7.1.1 項にも示したように、当地区の孔内傾斜計では、連続雨量が 400mm 以上になった場合に、 顕著な変動が認められている。



図 7.1.19 孔内傾斜計変動図(2008 年 12 月~2011 年 1 月)

図7.1.20~図7.1.23にNI-5, NII-2, NI-3, NI-7の各孔の孔内傾斜計変動図を示す。



図 7.1.21 NII-2 孔内傾斜計変動図



図 7.1.23 NI-7 孔内傾斜計変動図

図 7.1.24~7.1.26 に GPS-1~3の 2009 年 10 月~2010 年 8 月の観測グラフを示す。GPS 観測 結果に有意な変化は認められない。

図7.1.27 に地下水位変動図を示す。変動が認められる地下水位観測孔はNI-1 孔のみである。 NI-1 孔は常時満水位付近に位置するため、貯水位の影響を大きく受けていると考えられる。その 他の孔については顕著な変動は認められず、降雨量との相関も認められない。











# 図 7.1.26 GPS-3 変動図



図 7.1.27 地下水位変動図

#### 7.1.4 考察

NI-1 孔の地下水位は、貯水位を反映していると考えられ、地下水位の上昇(2009 年 3 月以降 10m 程度)、下降(2010 年 7 月以降 10m 程度)が認められるが、それに伴う変動は孔内傾斜計、GPS とも に計測されなかった。また、既往の観測結果で大きな変動が確認された降水量に相当する降雨も観 測期間中には観測されなかった。したがって、観測計器結果から地すべり変動はほとんど認められ なかった。トータルステーション及びレーザスキャナによる観測・解析結果でも有意な変動は認め られなかったことから、これを支持する結果を示していると考えられる。

#### 7.1.5 本事例での評価及びまとめ

A地区では、3Dスキャナーとトータルステーションの計測を実施したが、大きな地すべり変動 は観測されず、有意な観測結果は得られなかった。

今後は連続降雨量 400mm を記録した場合、貯水位が大きく低下した場合などの前後で観測を行い、データの検証を行うことが望ましい。

課題として、今回ターゲットが貯水位の変化により水没してしまうことがあった。このことから ダム等で計測を実施する場合、ターゲット設置位置について十分な検討が必要である。また変動量 が小さい地すべりの場合、その変動量と機械誤差の区分の方法が明確ではない。今後研究を重ねた 上で、その変動量が信頼性の高い変動量なのか、それとも機械誤差であるのかについて区分が可能 となることが望ましい。

## 7.2 B地区の計測結果と現象解析

# 7.2.1 既往資料による変動機構

B地区の斜面変動は既往資料によると、「法尻に分布する SI-4 層に応力が集中し、SI-4 層が掘削 面に膨れだすことにより上位標高に分布する砂岩・粘板岩層が SI-4 層にのしかかるようなのり面下 方への倒れ込みによりのり面の変状が発生している」とする重力クリープとされる。のり面の変状 としては、亀裂、既存亀裂の開口、保護工継ぎ目の段差、亀裂からの湧水などが確認され、変位が 蓄積され肉眼で判定できる状態であることが推定される。

B地区の斜面変形機構について、既往観測による斜面の変形傾向を把握したうえで、既往調査・ 計測結果と地上 3D レーザスキャナ計測結果を元に考察する。



図 7.2.1 B 地区のり面の概要(長距離レーザ計測による三次元地形)
# (1) 孔内傾斜計の変動状況

1989 年から 2007 年までの 19 年間、挿入式孔内傾斜計による動態観測が実施されており、これによると、のり面の中央部周辺において約 100mm の累積変位が記録されている。孔内傾斜計変位の累積性は SL-4 層より上位が比較的明瞭である。道路より下位では累積性が相対的に不明瞭となる。



図 7.2.2 B 地区 孔内傾斜計観測孔位置図





(2) 光波測量による斜面の変形傾向

斜面変位の全体的な傾向を把握するために、既往光波測量観測による2004年1月~2010年 12月の観測データについて、一次関数に近似し平均的な年間変位量の算出を試みた(図7.2.4)。 図7.2.5は空間補間法(この場合は自然近傍法)により作成した変位量のコンター図である。

本図によると、林道より上位ののり面全体が比較的斜面手前にせり出す傾向にある。特に、 上流側のり面中腹部は周囲よりも極端に大きく、変位量は年間約 1.5~2cm を示す。

本のり面のなかで特に着目すべき箇所は、SI-4層より上位ののり面と上流側のり面の挙動と 考えられる。これらの箇所について計測結果を用いて斜面変動状況を検討する。



図 7.2.4 B 地区 光波測量変動の一次関数近似例



図 7.2.5 B 地区 光波測量年変位量コンター(数値の単位は mm)

#### 7.2.2 計測結果の整理と考察

(1) のり面全体の状況

2009/11/28 のデータより2010/11/16のデータを引いた差分図を図7.2.6に示す。差分図は、 赤色がプラス側変位で、標高値が1年間で増加傾向にあったことを意味する。

斜面変位の解釈としては、プラス側がのり面のはらみ出しでマイナス側が沈下を意味する。 はらみ出しは斜面変動によるのり面表面部の現象として理解できるが、沈下については対策工 による荷重や締め付け効果が影響していることも想定される。実際にどのような斜面変動で、 差分図のパターンが形成されるかは、実験的検証が必要と考えられる。

のり面全体でみると、上流側のり面ではプラス側変位とマイナス側変位のゾーンが交互にあ らわれているようにみえる。下流側のり面では、概ね Sl-4 層より上位でプラス側変位が卓越し、 下位がマイナス変位の傾向がある。ただし、下流側のり面の最大のり長部ではプラス側変位と なる。

次に、上流側のり面と下流側のり面に分けて、地表面変状と観測結果の関係について考察する。



# 図 7.2.6 B 地区のり面全体の差分図

(2009/11/28 のデータより 2010/11/16 のデータを引いた差分図)

(2) 上流側のり面の変位機構の考察

図 7.2.7 は上流側のり面の対策工の施工状況を示す。のり面上位ほど反射率の良いコンク リート構造物の範囲が少なくなり、観測距離がのり面上部ほど離れることも加わり、地上レー ザの観測条件としては悪化する。変位評価の着目箇所は、平坦性が高くデータ密度分布も良好 なのり面末端部のコンクリート擁壁であり、それより上位の変位については参考程度と考えら れる。



図 7.2.7 上流側のり面の状況

図7.2.8 には上流側のり面の差分図と地表面の変状を重ねて示す。計測の目的として、光波 測量によりスポット的に変位速度が高い領域の検出を掲げていたが、差分分布との対応は不明 瞭であった。のり面下部には ABCD で示すプラス側変位とマイナス側変位のゾーンが交互に分 布する。光波観測による変位速度の大きい箇所の概ね直下に、プラス側変位の"ゾーン B"が ある。プラス側変位の"ゾーン D"は"ゾーン B"と比較すると縦断クラックが多く認められ る。

しかしながら、これらのゾーンのパターンが、どの程度の規模・メカニズムの斜面変動を示 すものかは現時点で推定が困難である。詳細な現地調査・継続観測を重ねて検討を進めるこが 望まれる。





(2009/11/28 のデータより 2010/11/16 のデータを引いた差分図)

#### (3) 下流側のり面の変位機構の考察

図7.2.9 は下流側のり面下部の対策工状況を示す。下流側のり面も上流側のり面と同様に、 のり面下部のコンクリート擁壁が評価の着目点になる。既往調査によれば、コンクリート擁壁 上部にはH22 年調査時に新たな縦断クラックが認められている。それ以前に生じた縦断クラッ クも含めると、道路近傍のコンクリート擁壁の広い範囲に及んでいる。



図 7.2.9 B 地区下流側のり面の状況

図 7.2.10 には下流側のり面の差分図と地表面の変状を重ねて示す。道路近傍のコンクリート擁壁部は、縦断クラックの範囲とプラス側変位の卓越する部分が、概ね整合がとれているようにみえる。すなわち、擁壁の押し出し変位がプラス側の変位として現れたものと考えられる。 なお、この部分はB地区のり面において長大のり面となるのり面下部に相当するため、過大な応力が加わり地表面の変状が生じている可能性がある。





(2009/11/28 のデータより 2010/11/16 のデータを引いた差分図)

(4) のり面内部変位検出の可能性

図 7.2.11 は下流側のり面中腹部に認められる小規模崩落跡である。スプーン状の崩落跡が2 か所存在し、いずれものり一段面内で生じている。発生時期の記録はないが、対策工との違和 感が無いため、のり面施工時に崩落した可能性がある。

この周囲における既往資料による地質図を図7.2.12に、差分図を図7.2.13に示す。地質図 によると、小崩落は砂岩に挟在される粘板岩の範囲を主として発生しており、地質的要因によ る崩落が疑われる。差分図には斑状にプラス・マイナス変位の範囲が混在しており、この範囲 ののり面がフリーフレームと植生工で保護されていることからも、変位検出には良い条件では なく、斜面変動を示すような規則性を見出すことはできない。このような小規模崩落の前兆的 変状を差分図で検出した場合、詳細な地質調査抜きには、のり面内部の小崩落を捉えているの か、のり面全体の変状を捉えているのかの判定は困難と考えられる。



図 7.2.11 B 地区下流側のり面中腹部の小規模崩落跡の状況



図 7.2.12 B 地区下流側のり面中腹部の小規模崩落跡周囲の地質構成



図 7.2.13 B 地区下流側のり面中腹部の小規模崩落跡周囲の差分図 (2009/11/28 のデータより 2010/11/16 のデータを引いた差分図)

#### (5) 問題点と課題

斜面変動は、時系列に進行し、その破壊過程は様々な条件より変化し得る複雑な現象と捉え られる。そのメカニズムの解明には地形・地質・地下水等様々な要因を分析し、総合的な判断 が必要なのは自明である。本研究は、緊急時の現場サイドの観点から、限られた情報より斜面 の変動機構や規模を推定することが主目的である。この観点から、長距離レーザ計測で得られ た知見と問題点、課題について下記にまとめる。

【知見】

- ・観測条件と適切な座標マッチング次第で、長距離レーザ計測も cm オーダー以下の変位を検 出できる可能性がある。
- ・観測条件は、固定式で十分な安定性を持つ架台と、計測器を恒温に保つ計測環境、適切な計 測環境管理が必要である。
- ・座標マッチングに際しては、十分な反射強度と大きさを持った参照面を用いることが、精度 向上に有効である。

【問題点】

- ・レーザ計測の特性により、反射率が良くより多くの点群が得られると精度を向上させることができる反面、構造物の有無により観測結果の精度と信頼性が大きく変化することに、計測限界がある。
- ・得られた観測結果について、観測範囲内の変動現象の結果とするのか、斜面をさらに包括する "メタスケール"で判断するのかで、観測結果の扱いが変わることが懸念される。
- ・今回の対象のり面のようなクリープ変形の場合は、解放面自体の緩慢な変形になり、マスと しての崩壊ブロックの特定が難しいことが予想される。逆に、小規模な地質構造(弱部・不 連続面の分布・構造)に変形が影響される可能性が考えられる。

【課題】

- ・観測範囲外の情報も合わせると斜面の危険度評価に有用と思われる。観測結果に十分な精度 を持つことを確認したうえで、様々な状況を統合的に判断する必要がある。
- ・実験的手法により、斜面変形が差分図にどのように現れるかをモデル化し、差分図のパター ンに当てはめることができる可能性がある。

#### 7.3 C地区の計測結果と現象解析

#### 7.3.1 既往資料による変動機構

C地区は斜面変動の末端ではなく地すべり頭頂部を対象とし、地すべり背後の不動域より滑落崖 頭部の道路の変状を観測している。しかしながら、観測位置より地すべり全体を見渡すことができ ず、土塊部分は樹木が生い茂り地面を捉えることができない制約がある。情報量としては限られた ものではあるが、得られたデータに基づき、地表面変位と地すべりの変動との関係について考察す る。なお、観測期間中に融雪期・多雨期を挟むが、これらの誘因について今回は考慮しない。

3D レーザスキャナ観測直前~前半に実施された既往調査<sup>\*1</sup>では、孔内傾斜計の変位と孔口抜け上 がり量・孔内伸縮計の縮み量を用いてすべり面の三次元変位方向が求められている。これによると、 傾斜計観測孔位置におけるすべり面の傾斜は約 60°で、既存ボーリングの結果と地表変状からすべ り面底面の傾斜は約 20°とされる。図7.3.1には、代表的な傾斜計観測孔の変動グラフを示す。

傾斜計変動から求められる水平変位速度は、3Dレーザスキャナ観測時期(2009年9月10日~2010年11月26日)に重なる2009年9月18日~2010年11月23日でみると、61.5mm/14.4ヶ 月(約4.3mm/月)である(図7.3.2)。これを、すべり面傾斜(60°)で換算すると、代表観測孔に おけるベクトル方向の変位速度は約8.6mm/月となる。



<sup>※1</sup> 本間宏樹、神山嬢子、千葉伸一、藤澤和範(2011): すべり面の急傾斜部における孔内傾斜計観測孔の挙動とその 解釈. 土木技術資料, Vol. 53, No. 3.



緑色部:08/12/27~09/11/19における水平変位量 青色部:09/11/19~10/5/17における水平変位量 赤色部:10/5/17~10/11/23における水平変位量

図 7.3.2 C 地区 孔内傾斜計の変動状況 (水平変位ベクトル) 経過

変位経時変化図中の★印は、3D レーザスキャナ計測時を示す。





# 7.3.2 計測結果の整理と考察

(1) 斜面変動の傾向

# ①垂直変位

3D レーザスキャナによる観測は、1回目計測から4回目計測の約14.7ヶ月(一ヶ月を30 日とする)にわたる。図7.3.4には1回目と4回目計測値の差分による地表面沈下コンター を、図7.3.5にはTS計測による検証点の沈下量を示す。滑落崖より移動土塊側ではアスファ ルト面が66mm~99mm沈下しており、滑落崖から離れた位置で沈下量がやや大きくなる傾 向がある。沈下速度に換算すると4.49mm~6.73mm/月となる。



図 7.3.4 道路面の地表面沈下量(2009 年 9 月 10 日~2010 年 11 月 26 日)



図 7.3.5 検証点の沈下量(単位:mm)(2009 年 9 月 10 日~2010 年 11 月 26 日)

②水平変位

図 7.3.6 に既往資料による孔内傾斜計の水平変位方向を、図 7.3.7 に TS 計測による検証 点の水平変位方向を示す。傾斜計の観測期間は約 4.8 ヶ月であり、この間の水平変位速度は 5~6mm/月となる。

検証点の水平変位方向は、滑落崖より離れたものは傾斜計とほぼ同じであるが、それ以外は10~20°程度の振れを示し安定していない。



図 7.3.6 傾斜計変位方向図 (沈下量の分布は図 7.3.4 による)



図 7.3.7 検証点の TS 計測による水平変位方向 (赤矢印で示す。なお、沈下量の分布は図 7.3.4、傾斜計変位方向は図 7.3.6 による)

③三次元変位状況

TS 計測による検証点の三次元変位を求めた。図 7.3.8 には検証点の変位ベクトルの長さ を、図 7.3.9 には変位ベクトルの傾斜角を示す。

変位ベクトルの長さでみると、100mm以上・以下のI・IIの範囲に分けることができる。 変位ベクトルの傾斜角では 54~59°、42~49°のi・iiの範囲に分けられる。この状況か ら、分断された道路面がある程度まとまりを持って変動していると考えられる。

これらの三次元変位ベクトル長で求める変位速度は、Iの範囲では102.5~118.2mm/14.7 月 (7.0~8.0mm/月)、II の範囲では78.3 ~87.5mm/14.7 月 (5.3~5.9mm/月)、であ る。結果として、孔内傾斜計に隣接する I の範囲では、代表観測孔におけるベクトル方向の 変位速度(約8.6 mm/月)に近い値が得られた。



図 7.3.8 検証点の TS 計測による変位ベクトルの長さ(単位:mm) (2009 年 9 月 10 日~2010 年 11 月 26 日)



図 7.3.9 検証点の TS 計測による変位ベクトルの傾斜角(単位:度) (2009 年 9 月 10 日~2010 年 11 月 26 日)

(2) 変動機構

亀裂により分断された道路面は、移動土塊の局部的な振る舞いを地表で分かり易く示してい ると考えられる。この道路面を仮に ABC の3つの "プレート"に分類すると、それぞれの特 徴を次のようにまとめることができる。

- ・Aプレートの移動方向は傾斜計の変位方向と同じ
- ・ABプレートの三次元変位ベクトルの傾斜は、既往資料で推定された値(約 60°)に近い
- ・BC プレートの移動方向は傾斜計のものより 10~20°斜交する(B プレートの移動方向は 不安定ともとれる)
- ・Bプレートの変位速度はAよりもやや遅くなる
- ・C プレートの変位ベクトルの長さはA プレートと大きな違いはないが、傾斜角が約45°と 緩くなる

AB プレートはその移動方向と変位傾斜角により、地すべり土塊の変動が地表にダイレクト に現れていると考えられる。B プレートは移動速度が若干遅く、移動方向が斜交するようなこ とから、地すべり土塊の滑動に追随して表層部が緩んでいる範囲の可能性がある。C プレート はすべり面傾斜が浅部でやや緩くなっている部分か、あるいは滑動に追随して表層部が緩んで いる範囲の可能性がある。



図 7.3.10 C地区地すべり頭部の変位区分

(3) 問題点と課題

C地区においては、地すべり土塊の滑動に伴い、プレート状に分割した道路面で比較的速い 水平・垂直変位が生じている。C地区で面的に取得できた変位ベクトルは、孔内傾斜計での観 測結果と比較して、全体として整合的である。変位速度の大きさでも、TS計測では7.0~8.0mm /月の合成変位量が得られたのに対し、孔内傾斜計では8.6 mm/月と、結果としてほぼ同等の 値が得られた。変位速度の大きい地すべりにおいては、道路面の変位から地すべり本体の変動 を推定することが可能と思われる。

ただし、不動域と推定される滑落崖背後の道路面では、マッチングに伴うと推定される有意 な誤差も生じており、マッチング方法や、その際に用いた標定点の位置等に留意し、誤差の大 きさに留意して評価を行うことが重要となる。

また、小規模な範囲でも地表面変位の挙動が変わることや、派生した小ブロックの動きや表 層部の緩みも検出されていると考えられるので、観測された変位より本体の変動をどのように 分離するかが問題と言える。そのため、地すべりの変形プロセスをより精度良く把握するには、 土塊内部の変位情報も重要である。

また、3D レーザスキャナの成果として沈下状況が捉えられたが、図 6.4.15 に示すように 道路面のエッジが三次元変位方向・傾斜を把握する部位となり得る。対象物のエッジを正確に 抽出しトレースすることができれば、TS 計測と同様に面的な三次元変位を把握できると考え られる。

# 7.4 D地区の計測結果と現象解析

#### 7.4.1 計測条件等

D 地区では以下の通り計3回、3D スキャナー及びトータルステーションによる計測を実施 した。

- ・第1回 平成21年11月28日
- ・第2回 平成22年4月27日
- ・第3回 平成22年9月7日(9月7日16時~8日14時は連続計測)
- ターゲット配置を 図7.4.1 に示す。



図 7.4.1 トータルステーションターゲット位置図





# 図7.4.2 トータルステーションターゲット及びプラムライン位置関係図

機械点から各計測点までの距離は、D1~D5 で 150~250m、バック点のうち最も遠い B5 が約 290mである。

また、D1~D5 については、機械点に正対する方向を 0°とすると、40°~45°の面に設置 されている。 第1回~第3回計測時の、気象等の条件を表7.4.1に示す。 このうち、計測値に影響を与える可能性のある条件を以下に整理した。

- ・1回目、2回目は気温がほぼ同等、貯水位は2回目が約20m高い。
- ・1回目、3回目は貯水位がほぼ同等で気温は3回目が10~15℃高い。
- ・3回目の1日目は連続計測前に約10℃の気温変化があったが、計測開始後から2日目の 計測終了まではほとんど変化なし。計測時間中は日照も観測されなかった

\*日照時間、降水量のグラフは計測地点から約3km北のアメダスデータを用いた。



表フ.4.1 各計測時の条件

# 7.4.2計測結果の整理と計測対象の変形機構

(1)TS 計測結果の特徴

各計測時のトータルステーションの計測データを表7.4.2に示す。

	点名	1回目(09/11/28)			2回目(10/4/27)			3回目(10/09/07)			
		X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	
機械点	S	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	
バック点	B1	134.210	100.699	109.792	134.211	100.696	109.786	134.210	100.699	109.792	
2回目新設	B2	145.502	87.085	101.292	145.503	87.084	101.288	145.503	87.085	101.290	
	B3	308.666	120.518	42.718	308.663	120.514	42.710	308.674	120.512	42.710	
	B4	327.584	109.186	44.836	327.588	109.188	44.822	-	-	-	
	B5	-	-	-	382.560	151.478	91.252	382.561	151.466	91.255	
	D1	252.240	213.522	99.845	252.245	213.493	99.829	252.240	213.534	99.847	
	D2	204.990	209.531	71.077	204.997	209.522	71.064	204.995	209.541	71.076	
	D3	297.072	219.407	71.101	297.076	219.396	71.087	297.078	219.414	71.096	
	D4	207.141	211.567	41.038	207.147	211.566	41.023	207.149	211.565	41.035	
	D5	296.728	220.652	41.097	296.728	220.647	41.085	296.731	220.651	41.094	

# 表 7.4.2 ターゲット計測結果

観測データの差分(ターゲット移動量)を表7.4.3に示す。

表 7.4.3 ターゲット移動量(単位:m)

点名	△1-2回目			∆1-3回目			△2-3回目			
	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	
B1	0.0010	-0.0030	-0.0060	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0010	0.0030	0.0060	
B2	0.0010	-0.0009	-0.0040	0.0010	0.0004	-0.0020	0.0000	0.0013	0.0020	
B3	-0.0030	-0.0040	-0.0080	0.0080	-0.0060	-0.0080	0.0110	-0.0020	0.0000	
B4	0.0040	0.0020	-0.0140	—	-	—	-	1	-	
D1	0.0050	-0.0290	-0.0160	0.0000	0.0120	0.0020	-0.0050	0.0410	0.0180	
D2	0.0070	-0.0090	-0.0130	0.0050	0.0100	-0.0010	-0.0020	0.0190	0.0120	
D3	0.0040	-0.0110	-0.0140	0.0060	0.0070	-0.0050	0.0020	0.0180	0.0090	
D4	0.0060	-0.0010	-0.0150	0.0080	-0.0020	-0.0030	0.0020	-0.0010	0.0120	
D5	0.0000	-0.0050	-0.0120	0.0030	-0.0010	-0.0030	0.0030	0.0040	0.0090	

これらのグラフを図7.4.3に示す。



図 7.4.3 各計測回間の座標軸別ターゲット移動量

ターゲット移動量は、Y軸(上下流方向)が最も大きく、堤頂中央のD1で2回目から3 回目の間に41mmの移動量が計測された。ついでZ軸(鉛直方向)の移動量が大きく、同じ く2回目から3回目の間に18mm、X軸(左右岸方向)が最も小さく同期間での移動量は5 mmであった。

1回目と2回目の差分は主として貯水位の差(2回目が約 20m高い)の影響を受けている と考えられ、1回目と3回目の差分は主として気温(3回目が約 20℃高い)及び水温(3回目 が水面付近で約 15℃高い)の差の影響が現れたものと考えられる。

2回目と3回目の差分は貯水位の低下(610.45m→591.69m:18.76m)による水圧の減 少と気温上昇(4.8℃→25.9℃:21.1℃)による堤体の熱膨張の両者の効果によって堤体の特 に上部が上流側へ変形したものと考えられる。

(2)スキャナーによる計測結果(差分)の特徴



各計測時の間の3Dスキャナーによる差分データを図7.4.4に示す。

図 7.4.4 各計測回間の 3D スキャナーによる差分データ(上段 1-2 回、下段 2-3 回)

1回目と2回目の差分では、概ね計測点 D2 より高標高部の中央から右岸側にかけて、 下流側に 0.03~0.05mないし 0.05m以上の移動量が現れているようである。非常用洪水吐 周辺部は形状の影響でデータ数が相対的に少なく判読が困難であるが、D2~PR-3 にかけ ての部分と色調そのものは同様の傾向を示しているようである。また下位標高では頂部と は逆の上流側へのわずかな変位を示す。

2回目と3回目の差分では、1回目と2回目の差分データとほぼ同様で逆向き(上流側へ移動)の傾向が現れている。移動量は上流側に0.03~0.05mないし0.05m以上であり、非常用洪水吐より右岸側でデータが密な状態である。

一方、計測点 D5 より下位の標高 520~560m付近の左岸側では、頂部とは逆方向となる、 下流側に向かって 0.01~0.03mないし 0.03~0.05mに相当する変位量が現れているように 見える。

#### 7.4.3 考察

(1)データの特徴と解釈

TS計測結果と3Dスキャナーによる計測結果に関する1回目と2回目の差分を図7.4.5にまとめた。



図 7.4.5 移動量のまとめ(1回目⇒2回目)

**TS**による変位量は、Y軸方向に着目すると堤頂(EL619m)のD1が約3cm、1回目 計測時の貯水位標高(593.56m)とほぼ等しいEL590mのD2,D3が約1cm、D4,D5が5 mm未満と、3Dスキャナーによる差分データと整合的である。

X 軸方向のデータを加味した場合、データにややばらつきが認められ、平面的にほぼ同 位置となる D2 と D4 の移動方向が約 45°、同標高の D4,D5 の移動方向が約 80°と大きく 異なる結果となっている。

次に、TS計測結果と3Dスキャナーによる計測結果に関する2回目と3回目の差分を図 7.4.6にまとめた。



図 7.4.6 移動量のまとめ(2回目⇒3回目)

TS による変位量は、Y 軸方向に着目すると堤頂(EL619m)の D1 が上流側へ約4cm、 EL590mの D2,D3 が約2cmであり、3D スキャナーによる差分データと整合的である。 また、EL560mの D4,D5 のうち D5 は上流側に5mm、D4 は逆に下流側に1mmと、こち らも3D スキャナーの計測結果による差分値と良く一致する。

X 軸方向のデータを加味した場合も1回目⇒2回目の結果と共通した傾向を持ち、デー タにややばらつきが認められる。 (2) プラムラインデータとの対比

ここで、堤体観測を実施しているプラムラインによる同時期のデータを確認する。対象 は、今回の計測時に最も大きな変位量を記録した、第2回⇒第3回の差分値とする。

プラムラインデータを含む、計測結果に関する2回目と3回目の差分を図7.4.7にまとめた。



図 7.4.7 移動量のまとめ (プラムライン含む:2回目⇒3回目)

まず、プラムラインのデータでは、リバースプラムラインのデータを反映した PO ラインに着目すると、堤頂中央部では左右岸成分がほとんどなく、約53mmの総変位量が記録されている。地山内からの変位累積も上流向きの一方向であり、3D スキャナーで確認されたような堤体の上部と下部で変位方向が逆転するような傾向は認められない。

PR-3のデータも含めると、堤体の各箇所での変形は、概ねアーチ直交に近い方向で発生

しているものと考えられる。

3Dスキャナーによる変動範囲及び変動量の測定結果は、概ね連続的に取得されており、 座標変換の結果得られた軸方向の変位量もかなりの精度が得られた。ただし今回のように 広範囲の計測対象が連続的な変形を示すようなケースではターゲットの計測を併用する必 要があり、今回はこのターゲットの計測結果に課題が認められた。

具体的には以下の通りである。

①座標変換後の軸が実際の変位方向(プラムラインデータを正とする)と一致しているに もかかわらず、ターゲットの差分データでは移動方向が軸と一致しない。

②特に低標高部で移動方向のずれが大きい。

③差分データの一部に実際の変形と逆方向の結果が出現する。

これらの原因は、現地状況及び計測結果から、機械点あるいはバック点・評定点の配置 もしくは各箇所自体の移動に起因するものではないかと考えられる。

すなわち、当地区では計測対象との位置関係から機械点・バック点・評定点の配置可能 箇所に制約が多く、精度が確保できる範囲内では対象に正対する方向の計測が出来なかっ た(機械点から計測対象正対方向に対して 40°~45°)。また、機械点周辺は全体に見ると 45°以上の急斜面内であり、他の各点も同様の急傾斜地あるいは堤体に近接した箇所で、 地山自体が温度変化や日照条件等によって膨縮あるいは回転等の変位・変形を起こし、こ れらの変位変形の結果 X 軸方向の各計測値に概ね同程度の誤差が加算されている可能性が ある。

これらを解消するためには、他方向からの計測を追加し、基準となる座標系の補正を行 う等の措置が必要と考えられる。

#### 7.4.4 D地区でのまとめ

堤体のような概ね平滑な面の変形についても、3D スキャナーとトータルステーションの計測を 併用することで、三次元的な変形の状態を把握することが出来た。

変形量のオーダーは、現在使用されているプラムラインと概ね一致していると評価できる。ただ し、計測の方向(対象に対して斜交した計測)や対象表面の状況(形状・色調・湿潤状態)による反 射強度やデータ密度の差は、データ評価の際に障害になる可能性が示唆される。

また、機械点やバック点・評定点の配置の際には、計測対象以外の変形や変位の可能性を想定し、 複数点・方向からの計測を実施することが望ましい。

# 8. おわりに

本共同研究では、地すべりが大きく滑動する前の段階における地すべり末端部付近の地形変化を面 的に把握することを目的として、3D レーザスキャナを用いた計測手法の検討を実施した。また、計 測対象斜面において生じている実現象の把握のため、現地調査や孔内傾斜計測定値の解析等を実施し た。以下に、本共同研究で得られた成果や課題をまとめ、今後の展望を示す。

#### 8.1 成果のまとめ

(1) 3D レーザスキャナを用いた地形計測手法と面的変位把握手法

トプコン社製 GLS-1500 を使用しての計測(中距離計測)を通して、機械が有する特性や、 繰り返し計測に当たっての計測準備、計測方法及び処理方法について、標準的に示すことので きる留意事項を整理した。また実地においては、より遠距離の計測も可能であるリーグル社製 LMS-Z420iを用いての計測(長距離計測)も行い、機器の特性等を得た。

複数時期の比較のための処理に際しては、参照点マッチング法のうち、メーカー仕様として バック点法とタイポイント法が用意されている。しかし複数時期のデータのマッチングに難が あることから、本共同研究ではタイポイント法から合成時のアフィン変換に代わる新たな変換 手法により、より正確に差分処理を行う手法(重心移動回転法)を提案した。また、長距離計 測においては、滑降シンプレックス法を用いた面マッチング法も試みた。3.2 節に記した事項 は、今後実地において斜面地形の計測や差分解析を行う際に、十分に使えるものである。

(2) 3D レーザスキャナの基本特性

土木研究所構内における 3D レーザスキャナの基本特性を確認するための実験により、入射 角度、ビーム径の影響、測定対象の乾湿による影響など、機器の特性を把握することができた。 ここで得られた事項は、実地での計測に際し(1)に示した事項と併せて留意すべきことである。

(3) 差分処理結果と現象解析

動きが想定された斜面等における計測結果(差分処理結果)と、トータルステーションによ る評定点の計測結果や孔内傾斜計等で計測されている調査結果との比較により、マッチング手 法等を検討した。適切な条件下においてなされる差分処理結果は、ある程度の精度(計測距離 や計測時の条件によって異なるが、1cm 前後)で地形変化を表していることを示すことができ た。

A地区では、孔内傾斜計、GPS、鋼管杭歪計観測のデータとの比較を行ったが、計測期間内 には変位量が1mm以下であった。3Dレーザスキャナ計測での差分解析でも有意な変動は認め られず、整合する結果が得られたと言える。

B地区では、中距離計測、長距離計測の両方を実施した。中距離計測は、2方向からの計測

結果を合成して、対象全体を計測できた。長距離計測は、計測距離が長いことによる測定誤差 を小さくするために、メッシュサイズ 0.5m の中でデータを平均した。そのことにより、同一 日の複数回の計測結果を差分した結果は、2mm 以下の誤差にとどまった。

C 地区では、地すべり頭部で 3D レーザスキャナ計測を実施し、沈下変状を捉えることがで きた。孔内傾斜計での変位ベクトルと比較して、変位の方向と速度は概ね近い値を示すことが 確認できた。

D 地区では、プラムラインの計測値と 3D レーザスキャナの計測値の変化を比較すると、これらの計測値の差異はほとんど見られず、概ね一致する結果が得られた。

#### 8.2 今後の課題

(1) 3D レーザスキャナに関する課題

実地での計測を通して、温度による機械誤差を有していること、対象物が濡れている場合に は反射強度が低下すること、地物の縁辺部など背後地盤等との間に距離がある場合等には計測 点が浮き上がる場合等不自然な位置を計測結果として捉える場合があることなど、機械自体が 特性的課題を有していることがわかった。そのため、現地での計測に際しては機械が有する特 性を理解した上で、極力正確な計測値が得られるように種々の工夫を施す必要があることがわ かったため、これら機械自体が有する課題の解決が図られるように期待する。

(2) 計測に際しての課題

機械を再設置する場合には同一地点に設置できるよう細心の注意を払うこと、機械が鉛直と なるようにすること等の留意が必要である。これらによる誤差を極力小さくするための方策に ついて検討することが必要である。

(3) 計測データの処理に関する課題

複数時期の比較のための処理に際しては、メーカー仕様としてバック点法とタイポイント法が用意されている。しかし複数時期のデータのマッチングに難があることから、本共同研究で はタイポイント法から合成時のアフィン変換に代わる新たな変換方法により、より正確に差分 処理を行う手法を提案した。しかし、データ取得時の機械誤差等に左右される部分も多いため、 現地において簡易かつ正確な計測を行う方法についてさらに検討が必要である。

(4) 地すべり末端部の変位と崩落範囲予測に関する課題

本共同研究期間内には、地すべり末端部のすべり面位置とはらみ出しの関係、またはらみ出 し範囲と末端部小規模崩落との関係を明らかにするところまでは至らなかった。そのため、今 後の計測結果によりこれらについて明らかにすることが必要である。

# 謝辞

本共同研究の実施にあたり、国土交通省および独立行政法人水資源機構の関係各位には、現地計測 に際しての各種の配慮、並びに観測資料をご提供いただいた。ここに厚く御礼を申し上げます。
## 引用・参考文献

- 1) 大塚勉(1986):美濃帯南部の中世界,日本地質学会,日本地質学会学術大会講演要旨,93,pp.213,© 日本地質学会.
- 2)下野地学学会(1979):日曜の地学 9 栃木の地質をめぐって(承認番号 平 11 総使,第 202 号), 築地書館,pp.3.
- 3) 山元孝広・滝沢文教・高橋浩・久保和也・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久(2000):20万分の1地 質図幅「日光」(承認番号 平成11総使,第202号),産業技術総合研究所地質調査総合センター.

共同研究報告書 Cooperative Research Report of PWRI No.443 September 2012

編集·発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754