

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）	所属		役職
		こせき じゅんいち 古関 潤一	東京大学大学院工学系研究科		教授
②研究 テーマ	名称	リモートセンシング技術を活用した道路土構造物の維持管理の効率化に関する研究開発			
	政策 領域	[主領域] 領域8：維持管理や長寿命化対策に必要な評価手法及び技術に関する研究開発	公募 タイプ	タイプII	
	[副領域] 領域7：災害時の対応や防災対策に必要な検討評価手法及び対策技術に関する研究開発				
③研究経費（単位：万円）		平成30年度	平成31年度	平成32年度	総合計
		1,997万円	2,300万円	2,003万円	6,300万円
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏名		所属・役職			
竹内 渉		東京大学生産技術研究所・准教授			
清田 隆		東京大学生産技術研究所・准教授			
柳浦 良行		基礎地盤コンサルタンツ（株）技術本部・本部長			
吉川 猛		基礎地盤コンサルタンツ（株）技術本部・課長			
Lin Wenli		東京大学大学院工学系研究科 特任研究員			
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）					
<p>本委託研究は、リモートセンシング技術（合成開口レーダー[SAR]）を活用し、広域の道路変状の経時変化を求め、道路点検や防災対策予算の優先度の評価、もらい災害の事前予知など、道路の維持管理の効率化および地質リスクの低減を図る技術を開発することを目的とする。</p>					

⑥ これまでの研究経過

6.1 概要

FS での各種課題を踏まえて、各道路土構造物の管理への SAR の活用方法を検討し、変状に適合した衛星データの選定、適切な解析方法の検討などにより解析精度の向上を図った。解析により明らかになった変状について、地盤工学的な考察を行った。

6.2 道路土構造物の管理に対する合成開口レーダー[SAR]の活用方法の検討

各道路土構造物の管理において、土構造物毎の変状の特徴を考慮した SAR の活用方法を検討し、SAR 利用における課題を整理した。その概要を表 6.2-1 に示す。

表 6.2-1 構造物毎の変状の特徴を考慮した SAR 活用方法および SAR 利用の課題、

土構造物	変状の特徴	SAR 活用方法	SAR 活用の課題
のり面対策工 (アンカー)	<p>対策工は、周辺の変状に巻き込まれて変状することが多い 対策工周辺が変状 ⇒対策工の緊張力増加、受圧板変位 対策工にクラック</p>	対策工周辺の変状	変状の大きさが異なる 周辺地盤：cm 構造物：mm
地すべり	<p>過去に滑动した痕跡 (地形判読) 再滑动開始 外力：雨、地震 安定・対策工施工まで滑动</p>	地すべり土塊の範囲の特定 土塊の活動度合い	主測線方向の変位量、大きさ (cm)
大規模切土 (吹付、法枠含む)	<p>なかなか点検に行けない 用地外で変状 湧水、小段にクラックの発生 切土まで広がる崩壊につながる</p>	用地外での変状の範囲 のり面内湧水・変状	用地外の崩壊の範囲、変状の方向、大きさ (cm) のり面内の湧水、クラック
片盛片切又は谷埋め盛土	<p>路肩の沈下⇒路面補修 水の盛土への侵入 盛土材の泥濘化 湧水 盛土崩壊 外力：雨、地震</p>	盛土材の脆弱化、水位上昇に伴う路肩の沈下	盛土の沈下量 (mm) 盛土のり面の湧水
軟弱地盤上の盛土	<p>路面の沈下 周辺の引き込み沈下、盛り上がり</p>	路面年間沈下量 (mm)、盛土周辺の沈下、隆起量	盛土の沈下量 (mm)
土石流、山腹崩壊	<p>用地外で山腹崩壊、溪流上流に堆積土 土石流の発生 外力：雨、地震</p>	用地外での山腹崩壊規模 (m)、溪流上流の堆積土量	用地外の山腹崩壊の把握、溪流上流の堆積土量の把握

6.3 道路土構造物への衛星SAR 差分干渉解析の適用方法の検討

6.3.1 検討路線の抽出（変状が発生している路線）

道路土構造物に変状が発生し、維持管理上問題が発生している（あるいは、していた）箇所を抽出し、本研究開発の検討路線とした。今回対象とした路線は、表6.3-1に示す。

表6.3-1 検討路線の抽出

名称	場所	対象構造物	提供者 (実施年度)	計測期間	変位方向
酒田	山形県 酒田市	軟弱地盤上の盛土	文献①② (H29)	2007 ～2012	鉛直
虻田	北海道 洞爺湖町	地すべり	NEXCO東 (H29)	なし	西南西へ
中条	新潟県 新発田市	軟弱地盤上の盛土	文献③ (H29)	2002 ～2008	鉛直
宝塚北SA	兵庫県 宝塚市	高盛土	NEXCO西 (H31)	2017 ～2018	鉛直卓越
高槻IC	大阪府 高槻市	軟弱地盤上の高盛土	NEXCO西 (H31)	2017 ～2018	鉛直
吉舎IC	広島県 三次市	のり面対策工 (アンカー)	三次河川国道 (H30)	2015 ～2017	北北東へ
高野IC	広島県 庄原市	のり面対策工 (アンカー)	三次河川国道 (H30)	2018	東へ

文献①：澤野幸輝、長尾和之、高橋修二、佐藤修治、友清悟：
軟弱地盤上の高速道路盛土における長期観測結果からの一考察、
第52回地盤工学研究発表会、2017年7月、pp. 1079-1080

文献②：友清悟、長尾和之、澤野幸輝、佐藤修治：
圧密沈下促進工法に伴う長期圧密沈下ひずみ速度に関する一考察、
第52回地盤工学研究発表会、2017年7月、pp. 1081-1082

文献③：塚越光二、星野雅幸、野上克宏：
軟弱地盤地帯における長期残留沈下の対策について、
土木学会第65回年次学術講演会、2010年9月、pp. 537-538

6.3.2 各道路土構造物の変状に適合した衛星データの選定

各道路土構造物に対して、複数の衛星データ（観測波長L、C又はXバンド）を用いて変状箇所のキャリブレーション解析を行い、解析精度に影響を与える因子の特定を行い、各道路土構造物の変状に適合した衛星データを選定した。

表6.2-1に示した土構造物における「SAR利用の課題」に対して、解析精度に影響を与える因子の特定を行い、どのような観測波長、解析方法等が適切であるかを評価したその結果を表6.3.2-1に示す。

表6.3.2-1 土構造物へのSAR利用上の課題と検討方法

土構造物	SAR利用上の課題（○：必要）								対象路線	
	変位の精度		変状土塊の範囲	主測線方向の変状	すべり土塊の深さ	草木の影響	崩壊の予兆	湧水		
	mm	cm、m								
のり面対策工	○(構造物)	○	○	○	○	○	○	○	虻田、吉舎IC、高野IC	
地すべり		○	○	○	○	○	○	○	虻田、高野IC	
大規模切土		○	○	○	○	○	○	○	高野IC	
片盛片切又は谷埋め盛土		○	○	○		○	○	○	(宝塚北SA)、(高槻IC)	
軟弱地盤上の盛土	○(路面)	○	○			○(構造物)			酒田、中条、(高槻IC)	
土石流、山腹崩壊		○	○	○		○	○		吉舎IC、高野IC	
検討方法(適用...)	C, Xバンドとの比較	●							吉舎IC	
	Lバンド(InSAR解析)		●	●					●	虻田、
	Lバンド(PSInSAR解析)		●						●	酒田、中条、
	Lバンド(SBAS解析)	●		●	●	●	●	●		吉舎IC、高野IC
	任意断面での変位ベクトル				●	●				吉舎IC
	変位ベクトルより深さの推定					●				吉舎IC
	反射強度の比較								○	(吉舎IC、高野IC)

・(○)は、H31年度以降で行う。

検討結果を述べる前に、H30年度にSAR解析を行った「吉舎IC」と「高野IC」の解析結果を説明した後、H29年度の解析結果も踏まえた表6.3の検討結果を述べる。

6.3.2.1 吉舎 IC での解析と実測との比較

① 地形、地質

吉舎 IC の地質図、旧地形図、平面図、地層断面図を 6.3.2.1-1～6.3.2.1-4 に示す。もともと IC 付近には池が存在し、池に向かって集水地形が形成されていたと考えられ、地質リスクのあった地域であることが分かる。

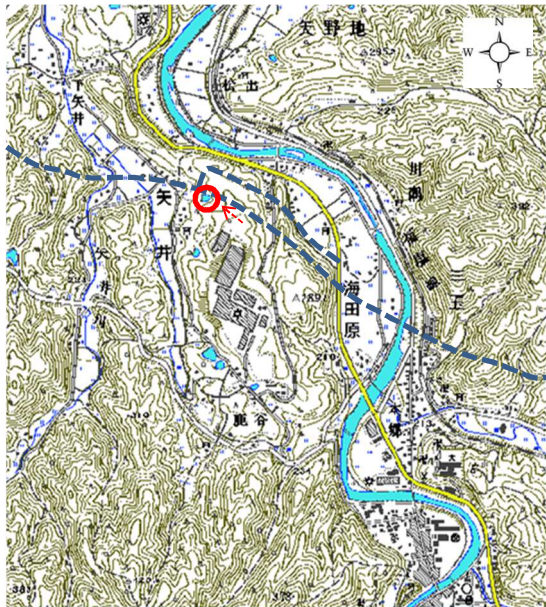


図 6.3.2.1-1 旧地形図

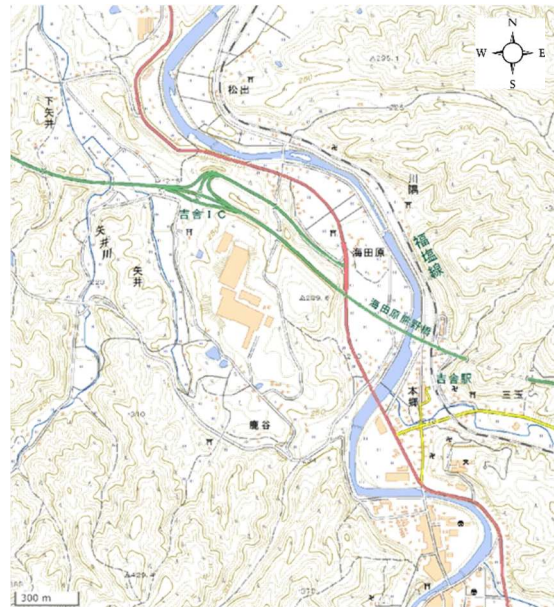


図 6.3.2.1-2 地形図（現在）

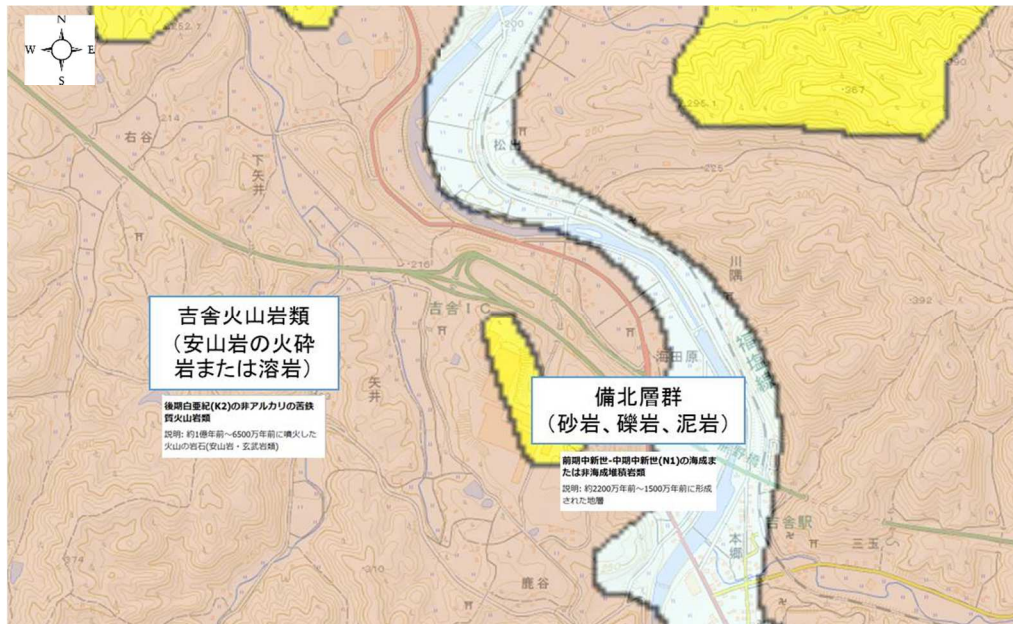


図 6.3.2.1-3 地質断面図

② 地盤変状

図 6.3.2.1-4 に平面図（崩壊範囲を含む）を示し、図 6.3.2.1-5 に変状が大きい箇所の地層断面図を示す。

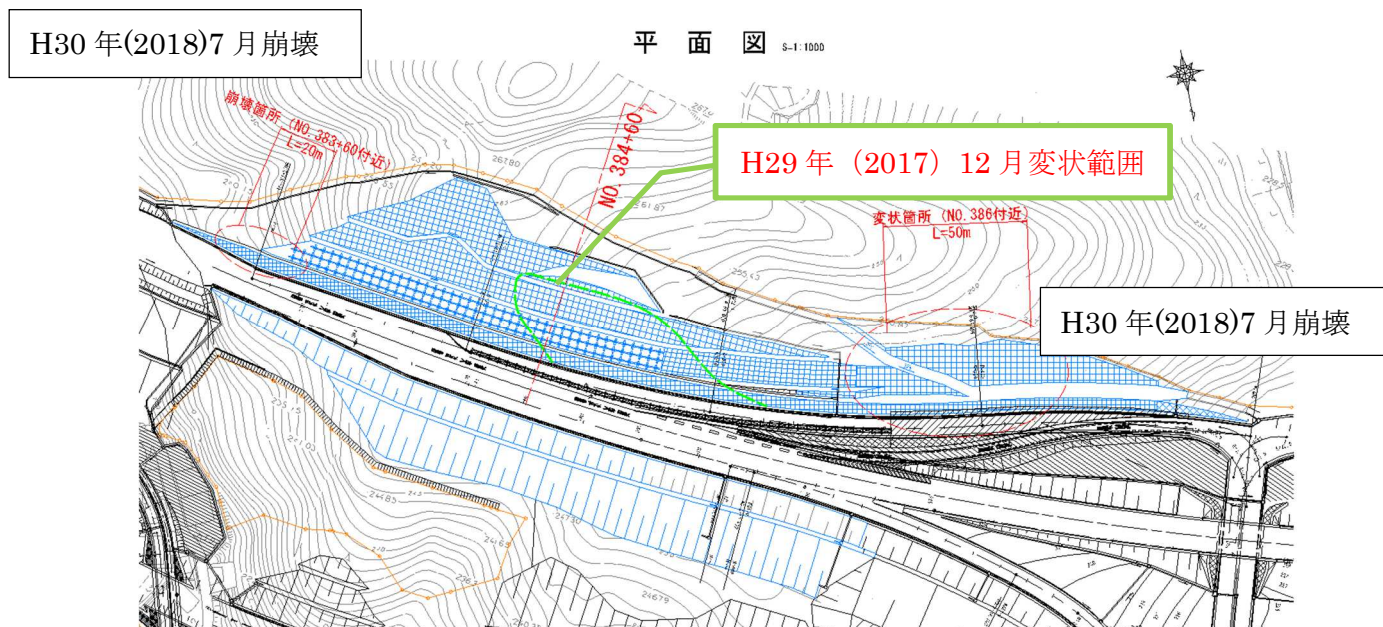


図 6.3.2.1-4 平面図

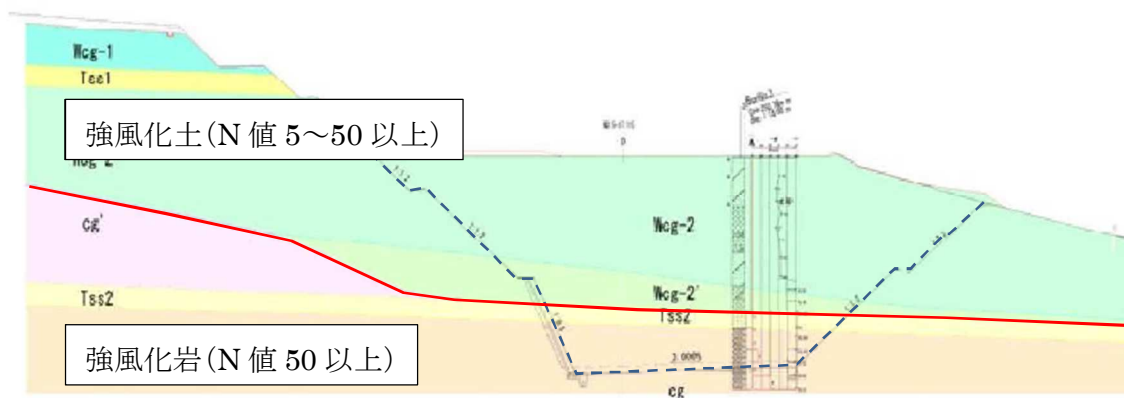


図 6.3.2.1-5 地層断面図 (No. 384+60 : 当初)

表 6.3.2.1-1 に工事に伴うのり面変状の時系列を示す。

表 6.3.2-1-1 工事に伴うのり面変状と対策の経緯および衛星 SAR 解析対象区間

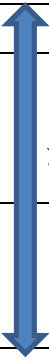
年度	工事及び変状等	対策	衛星 SAR 解析対象期間
H23(2011)年 8 月	切土工着手		
時期未定	法面崩落 (No. 384+20 付近下り)		
H25(2013)年 8 月	集水地形、湧水確認	法面詳細設計 吹付法枠工	
H25(2013)年 8 月 ～ H27(2015)年 3 月		アンカー工 吹付法枠工 水抜きボーリング	
H27(2015)年 1 月	吹付法枠はらみ出し、天端亀裂	動態観測	
H27(2014)年 3 月	【供用開始】		 だいち 2 号
H29(2017)年 12 月	法枠に開口亀裂進行を確認 (No. 384+60 : 最大変状) 追加地盤調査	防災点検 法尻に大型土嚢, 防護柵	
H30(2018)年 1 月	アンカーリフト試験 中断アンカー : 過緊張 下段アンカー : 定着部引抜け		
H30(2018)年 7 月	西日本豪雨 吉舎 IC 観測所 24h 連続雨量 232mm 時間最大雨量 30mm/h 38.4kp : 7 月 7 日 5 時 45 分頃 上面法肩土砂崩壊、下段法枠工の 折れ曲がり・破断発見 38.6kp 7 月 9 日 15 時 35 分頃 小段コンクリート亀裂、法枠・鉄 筋総入工変状発見	7 月 10～20 日 ・既設法枠工、不安定土塊 の撤去 ・地山湧水確認 ・水抜きボーリング追加 ・上部法面保護 (モルタル 吹付) ・大型土嚢設置 ・大型土嚢の追加 ・法面監視用伸縮計追加設 置	

図 6.3.2.1-6 に実測された地盤変状を示す。

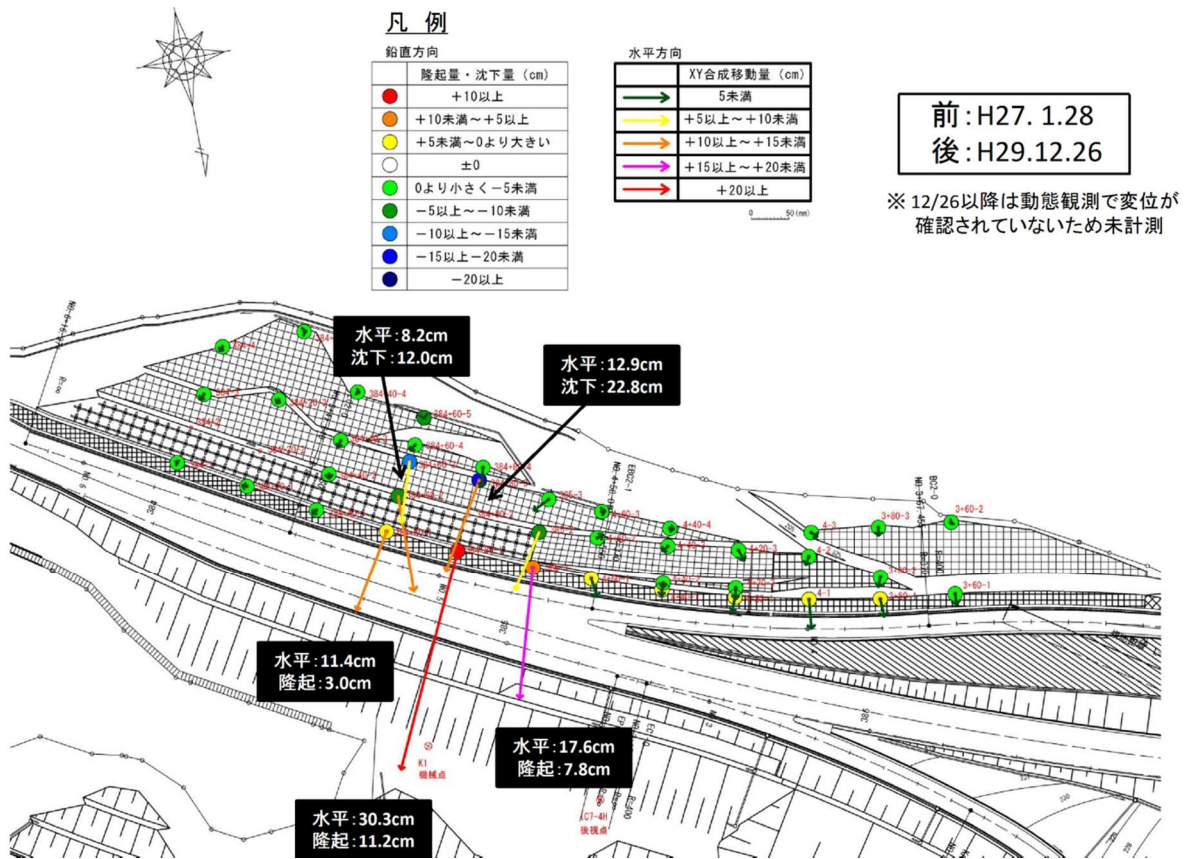
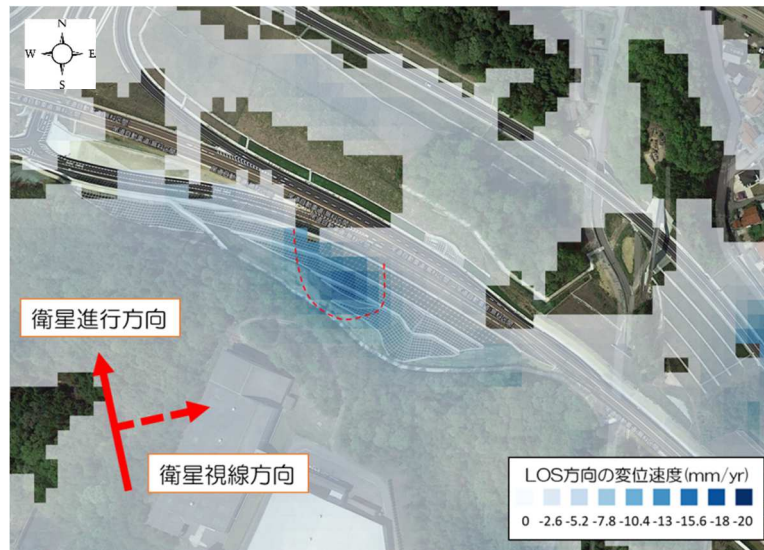


図 6.3.2.1-6 定点測量による変位

③ SBAS 解析 (Lバンド) によるのり面の变状範囲

SBAS 解析を用いて、すべり土塊の変状範囲を解析した。その結果を図 6.3.2.1-7 に示す。地盤調査結果に基づくすべり土塊の範囲とほぼ一致することが分かる。



6.3.2.1-7 SBAS 解析 (Lバンド) によるすべり土塊の範囲

④ SBAS 解析 (Lバンド) によるのり面主測線方向の鉛直、水平変位量

SBAS解析 (Lバンド) によるのり面変位量 (衛星方向への変位量) を後術する「6.3.3 任意な検討断面における道路土構造物の挙動を把握」に提案する手法を用いて、衛星方向への変位量をのり面主測線方向の鉛直、水平変位に分解した。

その結果を図6.3.2.1-8に示す。

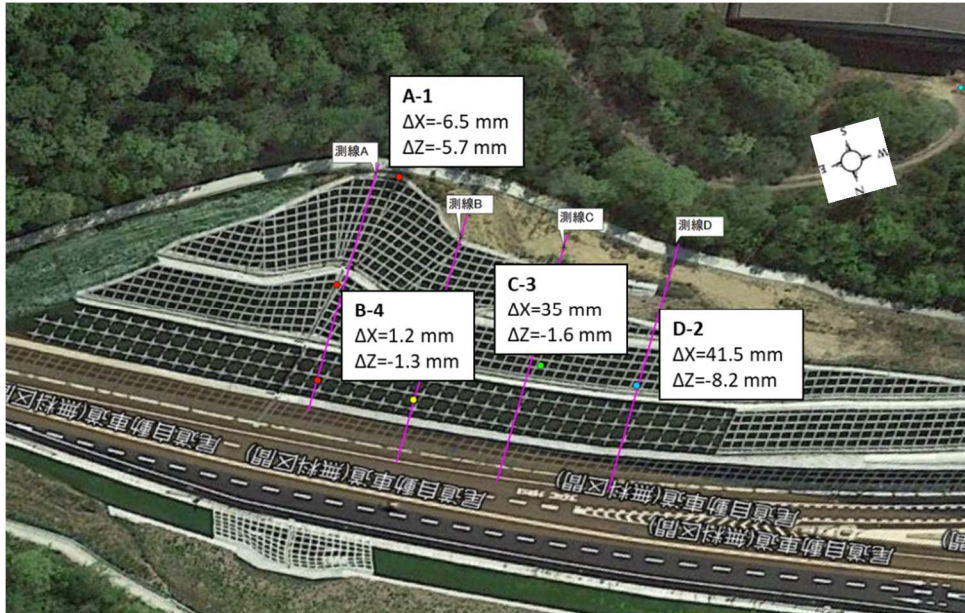


図 6.3.2.1-8 SBAS 解析によるのり面主測線方向の鉛直、水平変位量

⑤ SBAS 解析 (Cバンド) によるのり面の変状範囲

のり面変位量 (特に法枠等の構造物) を、SBAS 解析 (Cバンド) を用いて検討した。検討結果を図6.3.2.1-8に示すが、図6.3.2.1-9に示したLバンドの結果に比較して、明確なすべり土塊が得られなかった。



図 6.3.2.1-9 SBAS 解析 (Cバンド) によるすべり土塊の範囲

⑥ PS-InSAR 解析 (C バンド) によるのり面変位量

のり面変位量 (特に法枠等の構造物) を PS-InSAR 解析 (C バンド) を用いて検討した。検討結果を図 6.3.2.1-10 に示す。同図より、法枠のり面では干渉点が取得できておらず、上述のすべり土塊の範囲と合わせて、C バンドののり面への適用は困難であることが分かった。

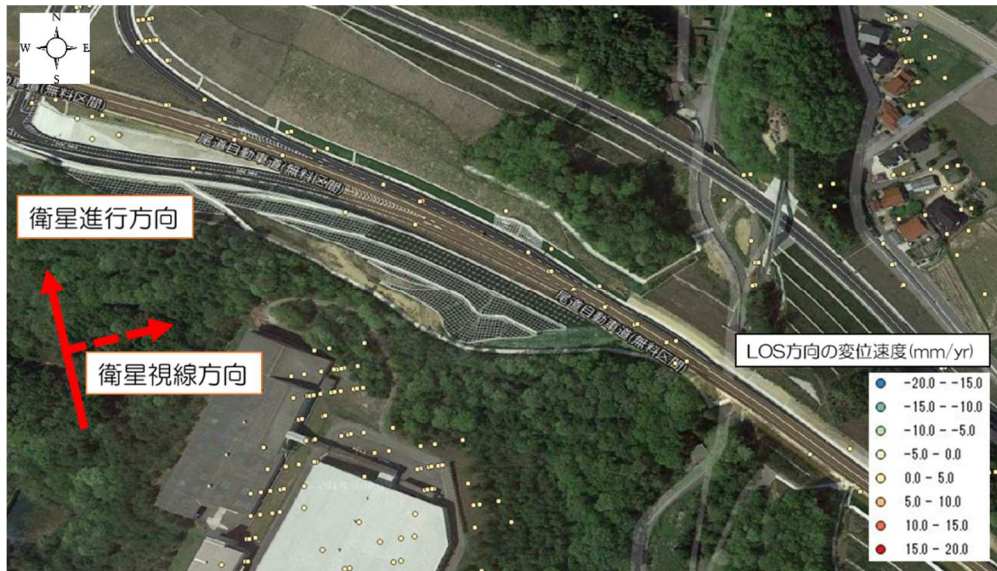


図 6.3.2.1-10 PS-InSAR 解析 (C バンド) による干渉点の分布

6.3.2.2 高野 IC での解析と実測との比較

① 地形、地質

高野 IC の地質図、旧地形図、平面図、地層断面図を 6.3.2.2-1～6.3.2.2-3 に示す。IC はもともと池があった場所に作られ、また、当該法面は谷地形に沿うように施工されていることがわかる。

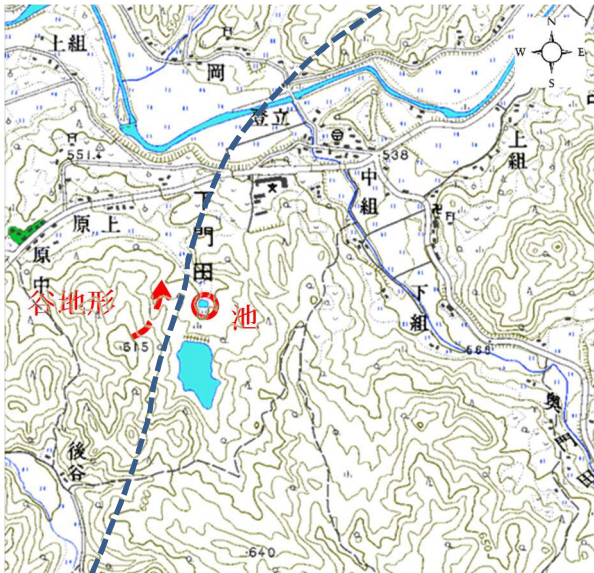


図 6.3.2.2-1 旧地形図

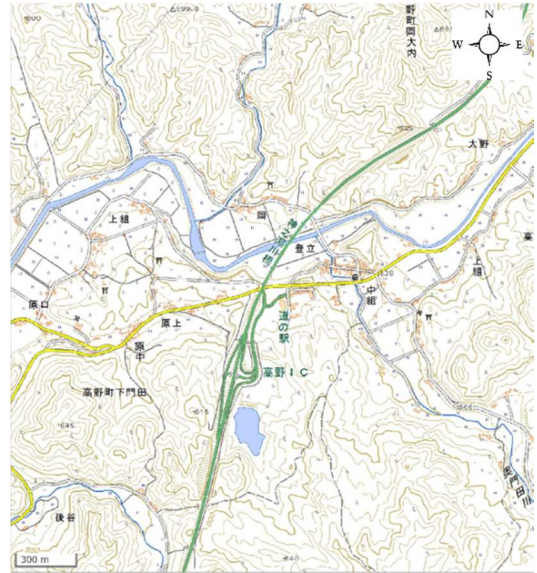


図 6.3.2.2-2 地形図 (現在)

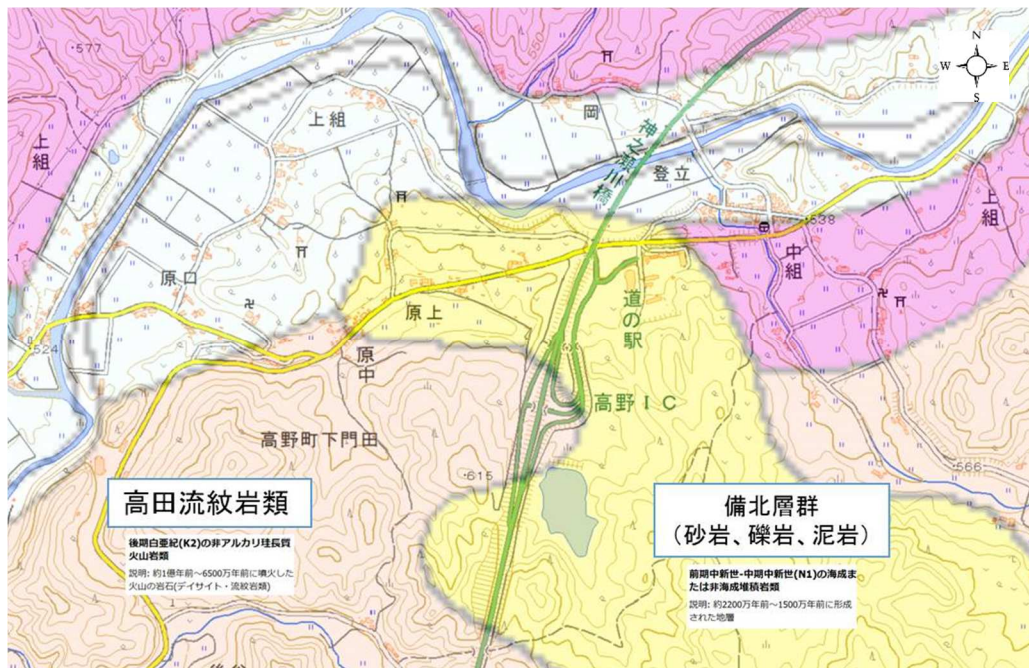


図 6.3.2.2-3 地質図

② 地盤変状

図 6.3.2.2-4 に変状が生じた平成 30 年 7 月 8 日以降に確認されたすべり土塊の範囲を示す。用地外からのすべりであることがわかる。

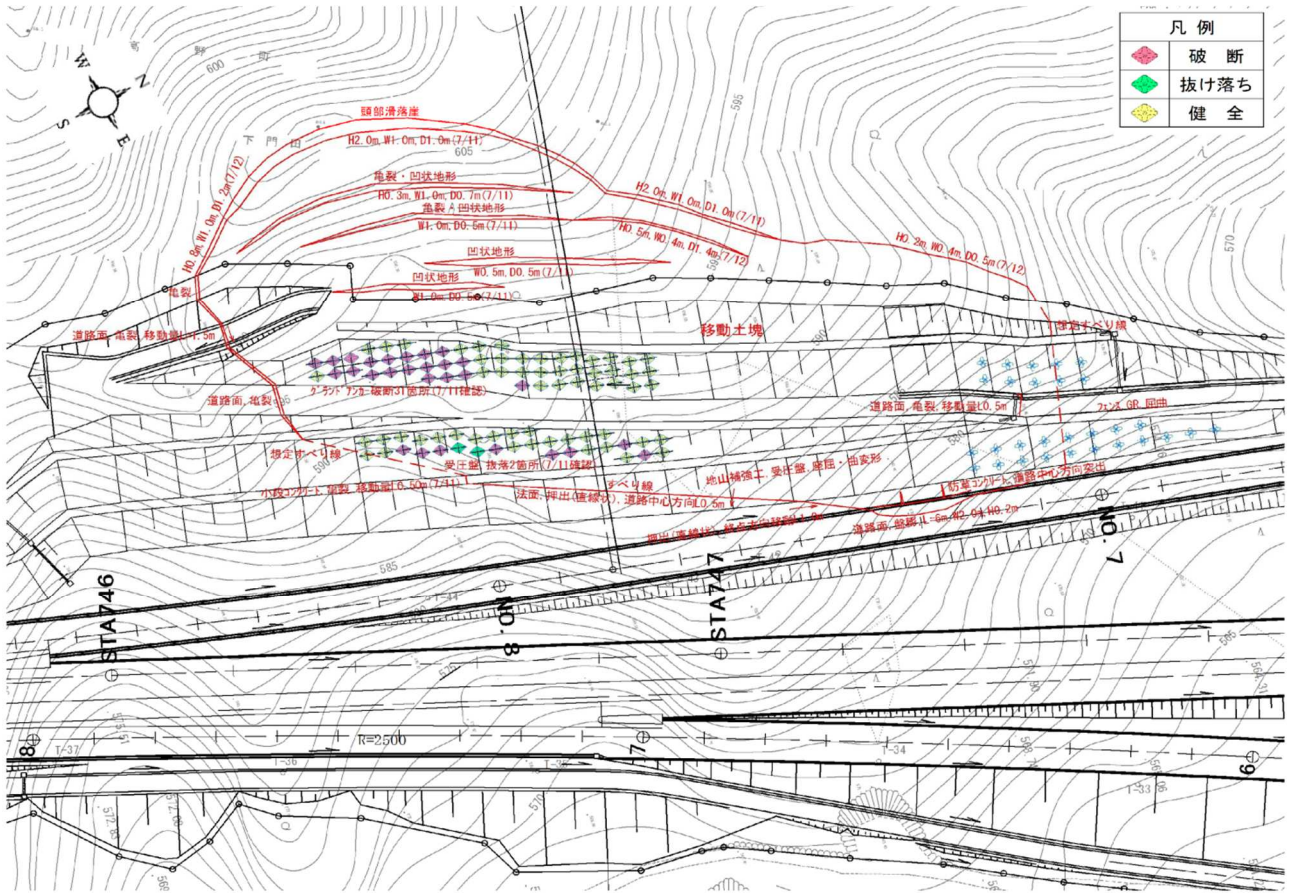


図 6.3.2.2-4 現地調査結果に基づくすべり土塊の範囲

表 6.3.2.2-1 に工事に伴うのり面変状の時系列を示す。

表 6.3.2.2-1 工事に伴うのり面変状と対策の経緯および衛星 SAR 解析対象区間

年度	工事及び変状等	対策	衛星 SAR 解析対象期間
時期未定			↑ ↓ だいち 2 号
H30(2018)年 7 月	西日本豪雨 高野 IC 観測所 24 時間連続雨量 151mm 時間最大雨量 25mm/h D ランプ (No. 7~No. 8+50) 7 月 7 日 13 時頃 ・法面変状アンカー飛び出し発見 7 月 8 日 ・切土斜面と上位斜面で地すべり ・グラウンドアンカー全 88 本中数本の破断を確認 7 月 9 日以降 ・法面の押し出し、法面中段管理用道路の舗装面亀裂、側溝のズレ、 ・ランプ舗装面の盤膨れ ・上位斜面で滑落崖確認 ・グラウンドアンカー全 88 本中 51 本のアンカー体の破断を確認	7 月 10 日~8 月 10 日 ・アンカー飛び出し防止工 ・仮設迂回ランプ設置 ・仮設防護柵設置 ・法面監視用伸縮計設置	

③ SBAS 解析 (L バンド) によるのり面の変状範囲の解析

SBAS 解析 (L バンド) を用いて、すべり土塊の変状範囲を解析した。その結果を図 6.3.2.2-5 に示す。

変状が確認された平成 30 年 7 月 8 日以前からすべりの兆候があったことが分かる。すべり土塊周辺でも変位速度が卓越する領域があり、その原因究明が今後の課題である。

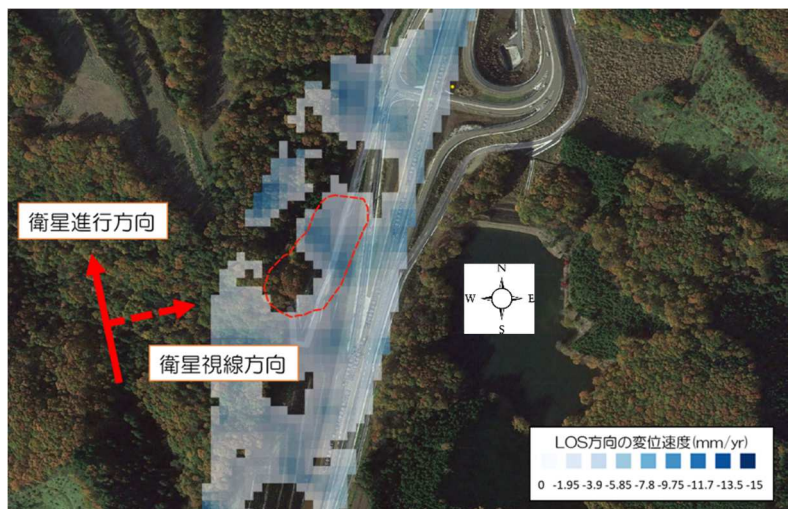


図 6.3.2.2-5 すべり土塊の拡大

6.3.2.3 変位の精度について

道路の維持管理において、表 6.3.2.3-1 に示すように対象とする土構造物で必要とされる変位の精度が異なる。概略として、コンクリート構造物や舗装面はmmオーダー、地盤変状では cm～m オーダーが必要と考えられている。

各種の衛星 SAR 解析を行った結果、表 6.4 に示す対象構造物ごとに以下の精度の変位が得られることを確認した。

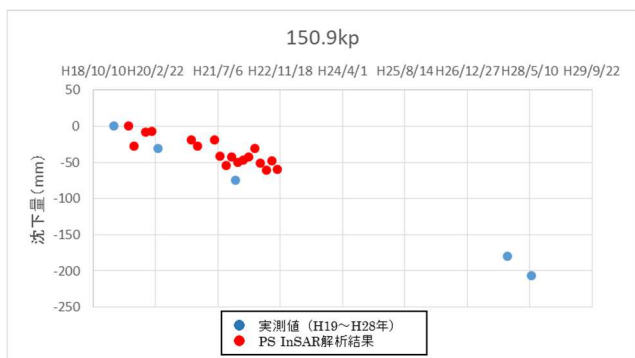
表 6.3.2.3-1 各土構造物、解析方法および使用バンドに違いにより得られる変位の精度

土構造物		解析方法	使用バンド	必要データ数	変位の精度		対象路線
					鉛直	水平	
のり面対策工	法枠等の構造物	SBAS	C	10 以上	解析困難		吉舎 IC
			L	10 以上	mm	mm	吉舎 IC
	周辺地盤		L		cm	cm	吉舎 IC
地すべり		InSAR	L		(cm)		虻田, 高野 IC
大規模切土		InSAR	L		(cm)		高野 IC
軟弱地盤上の盛土 (路面)		PSInSAR	L	20	mm	-	酒田、中条
山腹崩壊		InSAR	L	2	(cm)		高野 IC

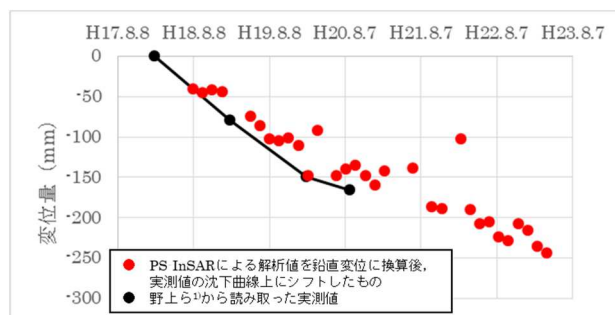
・変位の精度が(〇〇)の箇所は、InSAR 解析で変状土塊の範囲を中心に解析を行い得られた変位であり、参考値として扱う。

SBAS (C バンド) を用いてのり面対策工の変状解析を試みたが、前述の「図 6.3.2.1-8 SBAS 解析 (C バンド) によるのり面変位量 (衛星方向への変位量)」に示すように解析不能であった。この原因としては植生の影響等が考えられる。

軟弱地盤上の盛土 (路面) における変位の精度は、H29 年度に行った酒田および中条での解析結果より「mmオーダー」で可能であることが分かった (図 6.3.2.3-1 参照)



(酒田)



(中条)

1) 野上(ほか); 軟弱地盤地帯における長期残留沈下の対策について, 土木学会第65回年次学術講演会, pp537-538, 2010

図 6.3.2.3-1 軟弱地盤上の盛土 (路面) における衛星 SAR 解析と実測値の比較

6.3.2.4 変状土塊の範囲について

変状土塊の範囲としては、虻田、吉舎 IC、高野 IC で解析結果と地盤調査結果との比較を行った。その結果を図 6.3.2.4-1～図 6.3.2.4-3 に示すが、ほぼ一致することが分かる。特に高野 IC においては、被災前からすべり土塊の拡大を確認することができ、今後の維持管理に有効な情報を提供できることが分かった。

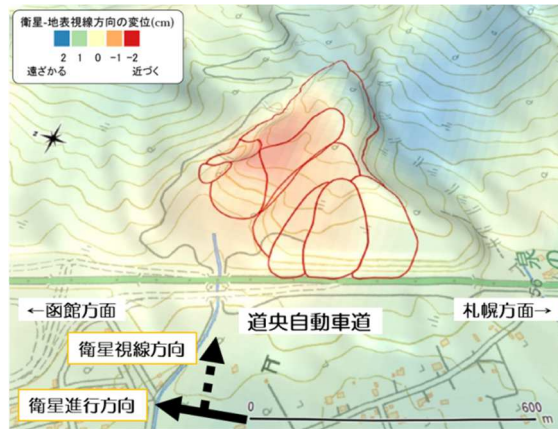


図 6.3.2.4-1 虻田におけるすべり土塊

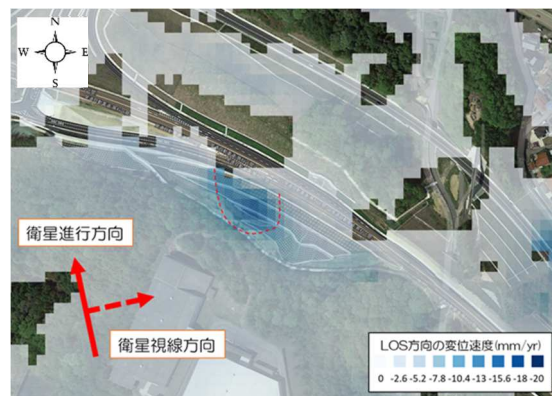


図 6.3.2.4-2 吉舎 IC におけるすべり土塊



図 6.3.2.4-3 高野 IC におけるすべり土塊の変化

6.3.2.5 すべり土塊の深さについて

地表変位データが判れば、地すべり線の形状推定は、「すべり線の形状推定法、(独)土木研究所他、平成25年5月」を用いて行うことができる。その概要を図6.3.2.6-1に示す。

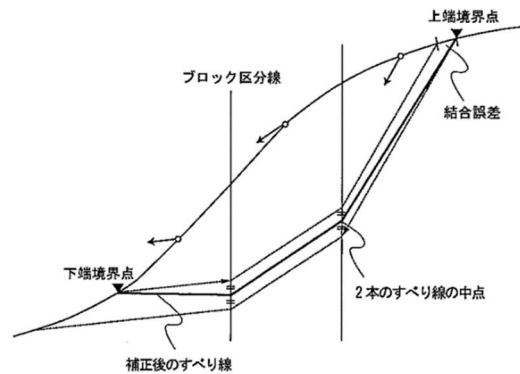


図 6.3.2.5-1 地表面の変位からすべり線を推定する方法の一例

吉舎 IC 測線 B (No. 384+60) における地すべり線推定結果を図 6.3.2.5-2 に示す。現場の地盤調査結果で得られているすべり線 (図 6.3.2.5-3) とほぼ一致する。

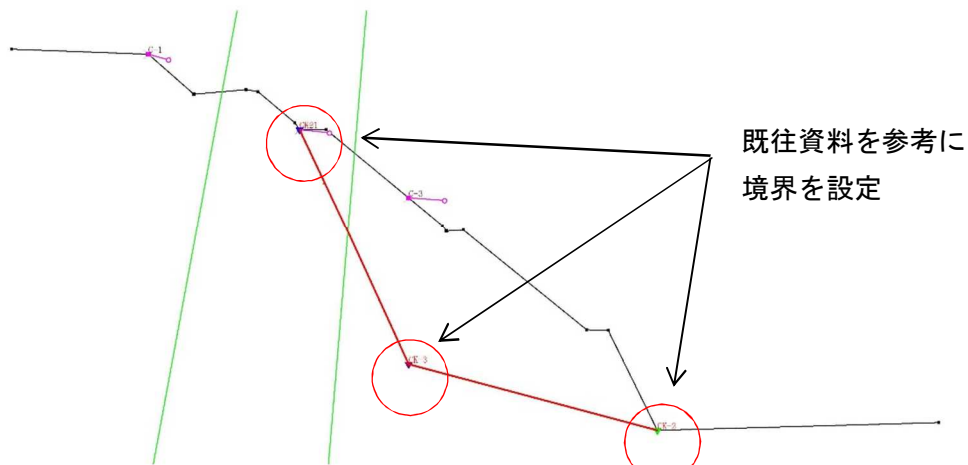


図 6.3.2.5-2 測線 B (No. 384+60) における地すべり線推定結果

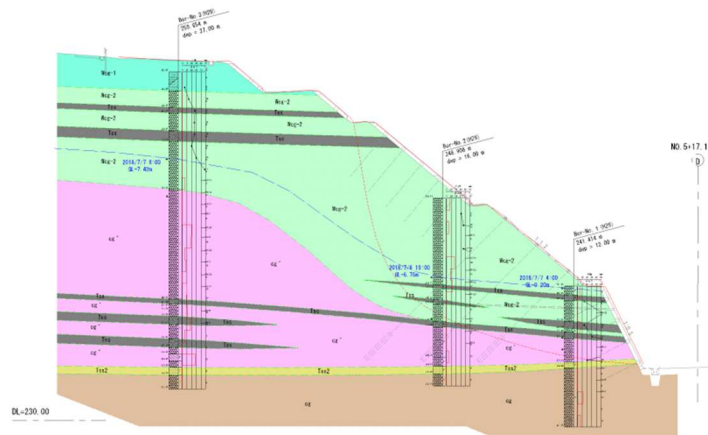


図 6.3.2.5-3 測線 B (No. 384+60) における地盤調査結果に基づく地すべり線

6.3.2-5 草木の影響について

吉舎 IC の SBAS の解析結果より、草木の影響を一番受けにくいのが、Lバンドであることが分かった。

6.3.2-6 崩壊の予兆について

「6.3.2-2 高野 IC での解析と実測との比較③ SBAS 解析 (Lバンド) によるのり面の変状範囲の解析」より、崩壊が確認される前に、変状が発生していたことがわかった。

6.3.2-7 湧水について

反射強度で湧水箇所の特定を行う可能性があるが、次年度以降の課題とした。

6.3.3 任意な検討断面における道路土構造物の挙動を把握

6.3.3-1 考え方

衛星視線方向の解析結果を用いて、道路土構造物の任意な検討断面における水平、鉛直方向変位の解析方法を検討した。

衛星視線方向の解析結果を用いて、道路土構造物の任意な検討断面における水平、鉛直方向変位の解析方法を検討した。

衛星 SAR は、南北又は北南方向の軌道を描き、ほぼ東西方向の衛星視線方向の地盤の変位を測定できる。道路土構造物の場合、図 6.3.2.5-1 に示すように任意な方向に主測線があり、この主測線方向の変位に変換する必要がある。

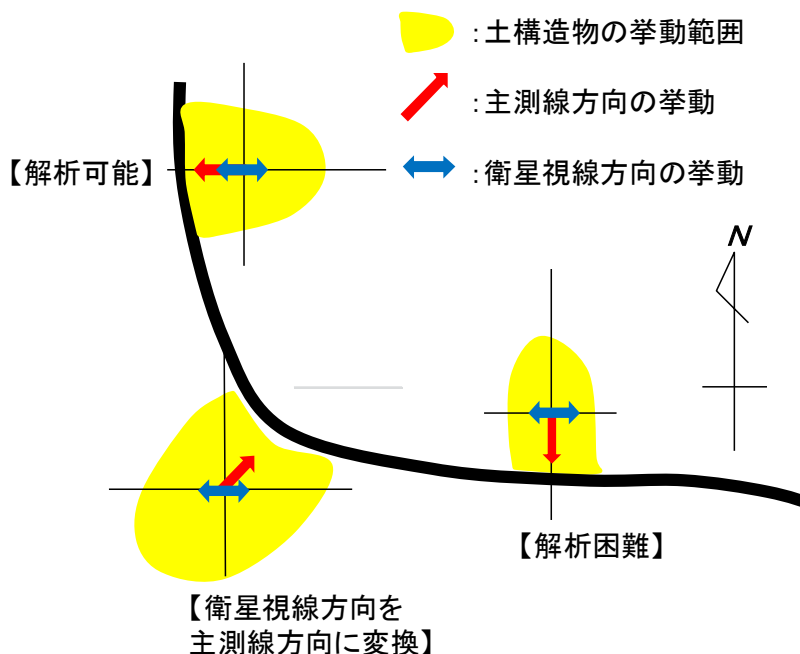


図 6.3.3-1 衛星視線方向と土構造物の主測線方向の関係

この衛星視線方向で得られた衛星 SAR データを土構造物主測線方向に変位に変化する方法としては、以下のような方法が考えられる。

図 6.3.2.5-2 に示す衛星 S_3 で観測した変位 d_3 から、変位 d_3 を満たす実変位 r' の存在範囲は、平面 w_3 上になる。これに衛星 S_1 と S_2 で観測した変位 d_1 と d_2 を加えると、衛星 S_1 から S_3 の観測結果を満たす実変位は、交線 AB と平面 w_3 の交点となり、実変位 r が求まる。数式で表すと、衛星で観測した変位 $d=(d_1, d_2, d_3)^T$ 、地盤の変位を $\Delta r=(\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z)^T$ として以下のようなになる。式(2)は(1)を行列式で表記したものである。 $(\cos\alpha_i, \cos\beta_i, \cos\gamma_i)$ は観測点からの衛星 S_i の方向を示す方向余弦である

$$d = N \cdot \Delta r \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\beta_1 & \cos\gamma_1 \\ \cos\alpha_2 & \cos\beta_2 & \cos\gamma_2 \\ \cos\alpha_3 & \cos\beta_3 & \cos\gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_y \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \tag{2}$$

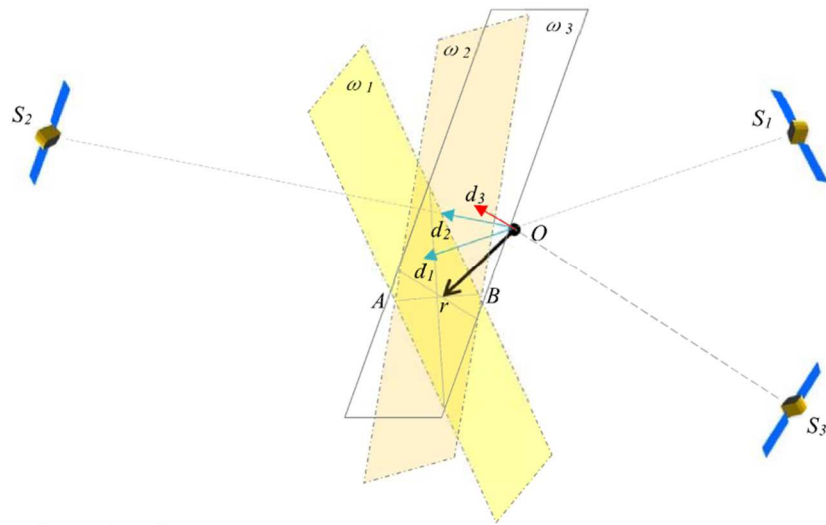


図 6.3.3-2 地盤変位と衛星視線方向との関係

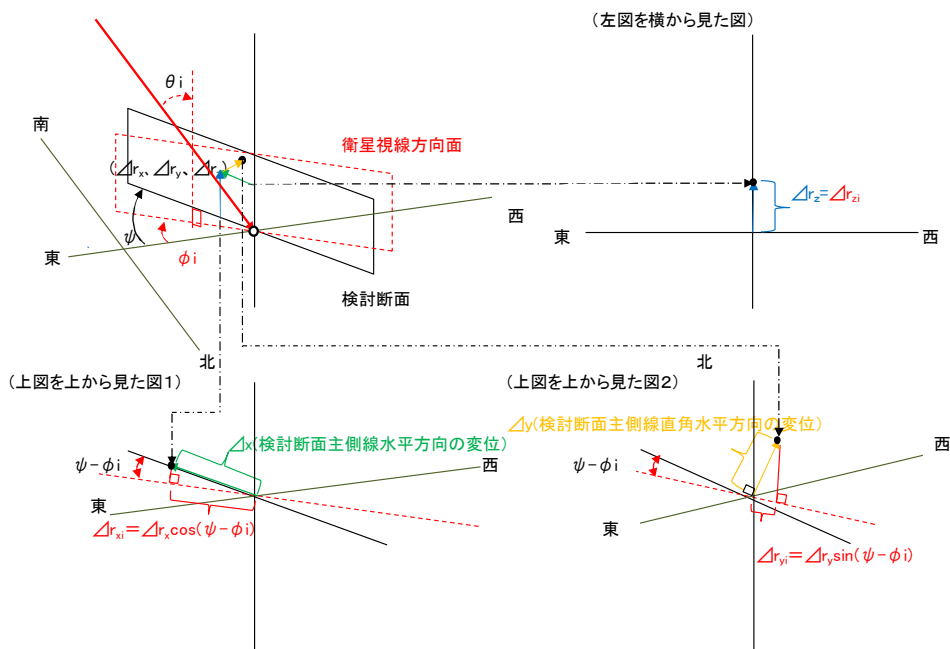


図 6.3.3-3 地盤変位と衛星視線方向との幾何学的な関係

【方法 1 : 一方向の変位が無い場合 (Δr_y (主測線直角方向) $\cong 0$)】

・方向余弦で表した場合

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \gamma_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

・任意断面の東西方向からの回転角 (ψ)、衛星視線方位角 ($\varphi_{1,2}$)、

衛星視線入射角 ($\theta_{1,2}$) で表した場合 (図 2.4 参照)

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos(\psi - \phi_1) & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_3 \cos(\psi - \phi_3) & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

【方法 2 : 一方向の変位が無く、地盤の変位が変化する場合】

地盤の変位 ($\Delta r_x^i, \Delta r_z^i$) が時間的に変化する場合について、最小二乗法を応用した手法を用いて地盤の変位を求める。詳細は、資料編を参照のこと。

地盤の変位 ($\Delta r_x^i, \Delta r_z^i$) が時間的に変化する場合、式(3)は、

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \cos \gamma_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \cos \gamma_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & & & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 & & \vdots \\ 0 & \vdots & & \cos \alpha_i & & \vdots & 0 & \vdots & & \cos \gamma_i & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \cos \alpha_n & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \cos \gamma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_x^1 \\ \Delta r_x^2 \\ \vdots \\ \Delta r_x^i \\ \vdots \\ \Delta r_x^n \\ \Delta r_z^1 \\ \Delta r_z^2 \\ \vdots \\ \Delta r_z^i \\ \vdots \\ \Delta r_z^n \end{pmatrix} \quad (6)$$

となる。これを改めてベクトル形式で、

$$\mathbf{d} = \mathbf{Tr} \quad (7)$$

と表す。式(6)あるいは式(7)は未知数の方が多く、変位 \mathbf{r} を解くことができない。

ここで、式(7)を何らかの工夫を加えて解くことを考える。ここで、変位 \mathbf{r} を解くことは、式(8)に示す評価関数 E を変位 \mathbf{r} について最小化することと等価である。

$$E = (\mathbf{d} - \mathbf{Tr})^T (\mathbf{d} - \mathbf{Tr}) \quad (8)$$

式(8)が解けないことは明白であるので、式(8)に正則化項を付加して、次式のような評価関数を考える。

$$E = \frac{1}{2\lambda} (\mathbf{d} - \mathbf{Tr})^T (\mathbf{d} - \mathbf{Tr}) + \|\mathbf{Br}\|_1 \quad (9)$$

ここで、 λ は正則化パラメータであり、 \mathbf{B} は変位 \mathbf{r} を線形変換する正方行列である。また、右辺の第 2 項は L_1 ノルムを表す。ここで、 \mathbf{Br} が 0 成分を多く、あるいは 0 とみなしてよい成分を多く含むベクトルとなった場合、式(9)を最小化することで変位 \mathbf{r} を求められる可能性がある。

例えば、観測時間が隣接した変位に殆ど差が無い場合、変位の差は 0 とみなしてよい (例えば、時間的に近接したアセンディング、ディセンディングの観察結果)。このとき、行列 \mathbf{B} に隣接する変位の差をとる演算を組み込めばよい。行列 \mathbf{B} にどのような作用を与えるかは工学的に判断すればよい。

6.3.3-2 吉舎での解析値と実測値の比較

「図 6.3.2.1-6 実測されたのり面の地盤変状」に対し、測量による実測値と解析値との比較を図 6.3.3-4 に示す。実測値と解析値はほぼ相関するものの、実測値が±50mm 以上の大きな値を示すとき、解析値との乖離が大きくなる様子が認められる。図 6.3.3-5 に示す通り、法枠は破断、変状をきたしていることから、一部では、地盤変位よりも大きな変状をきたし、これにより実測値と解析値が乖離している可能性がある。

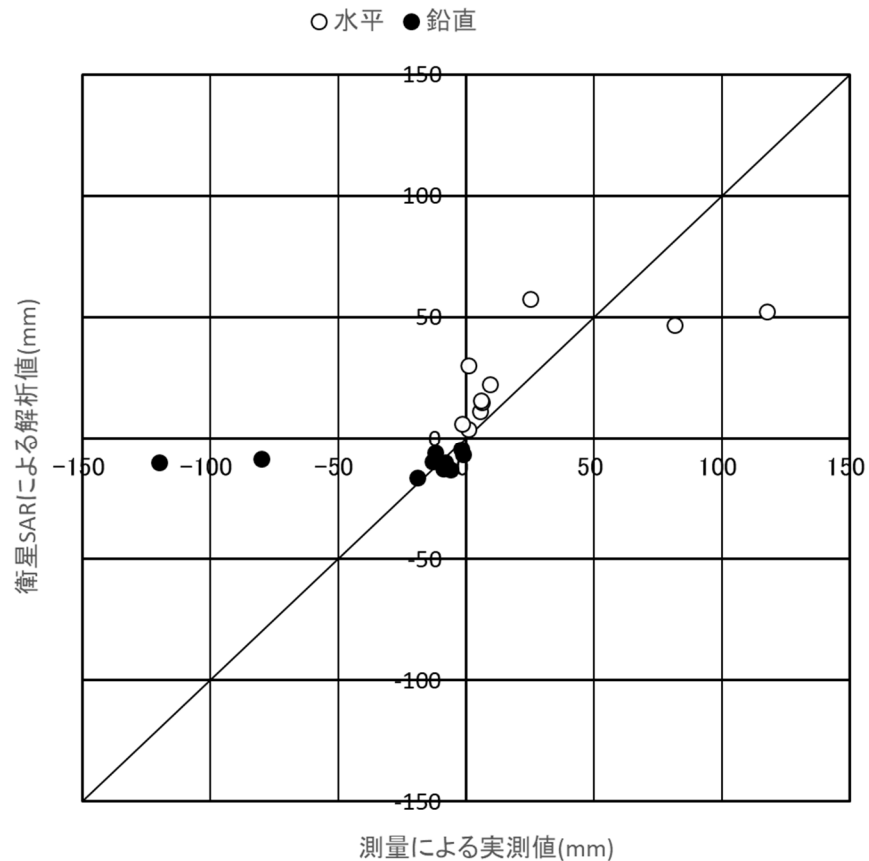


図 6.3.3-4 のり面変位の測量による実測値と衛星 SAR による解析値（のり面直角方向）



図 6.3.3-5 法枠の変状

6.4 道路土構造物の変状に関する地盤工学的な考察

解析を行った道路土構造物の変状状況の現地踏査を行い、変状の原因、構造物に与える影響などの地盤工学的な考察を行った。

6.4.1 吉舎 IC に関する地盤工学的考察

6.4.1.1 現地踏査

現地踏査の結果、以下のことが分かった。

- ・ 法面から湧水が多数確認された。
- ・ 図 6.4.1.1-1 及び図 6.4.1.1-2 に示す挟み層として分布している TSS は、膨張性粘度鉱物のスメクタイトを多量に含むことから、スレーキング性を有し、脆弱化しやすい地層である。

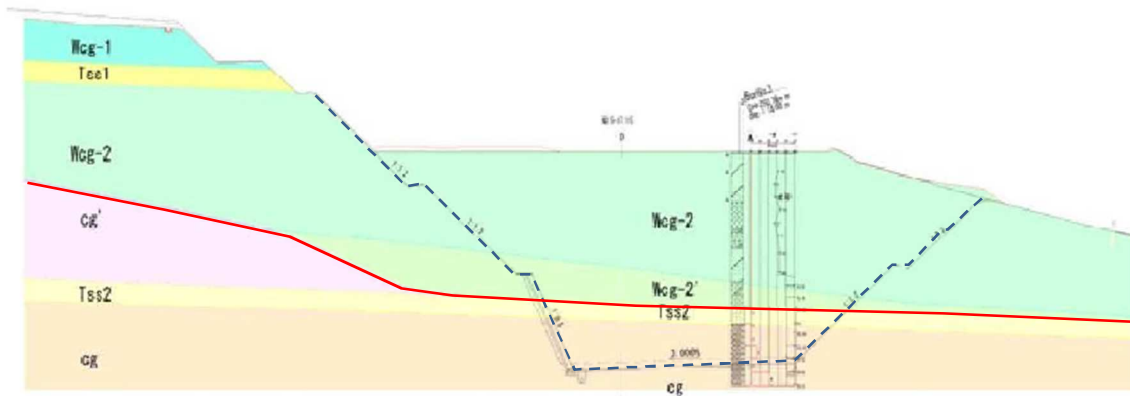


図 6.4.1.1-1 地層断面図 (No. 364+60 : 当初)

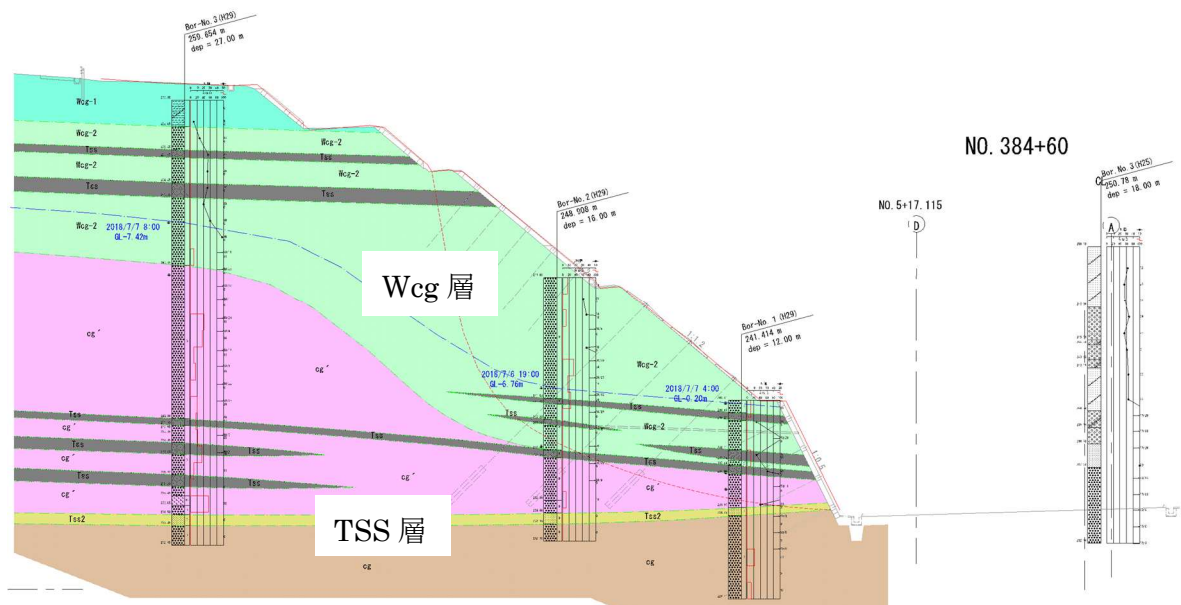


図 6.4.1.1-2 地層断面図 (No. 364+60 : ボーリング調査追加)

6.4.1.2 変状の原因

変状の原因としては、以下のことが考えられる。

- ① 全体に流れ盤構造になっており、すべりを発生しやすい条件が加算された。
- ② 図 6.4.1.1-1 と図 6.4.1.1-2 の比較により、すべりの要因となるスメクタイトを多く含む TSS 層（泥岩、凝灰岩が風化したもの）が当初の予想より、第一段法面法枠が施工された断面に数多くの出現し、崩壊発生の要因となった。
- ③ TSS 層等が、切土に伴う応力解放、それに連続する膨潤、スレーキングによりせん断強度が低下した。

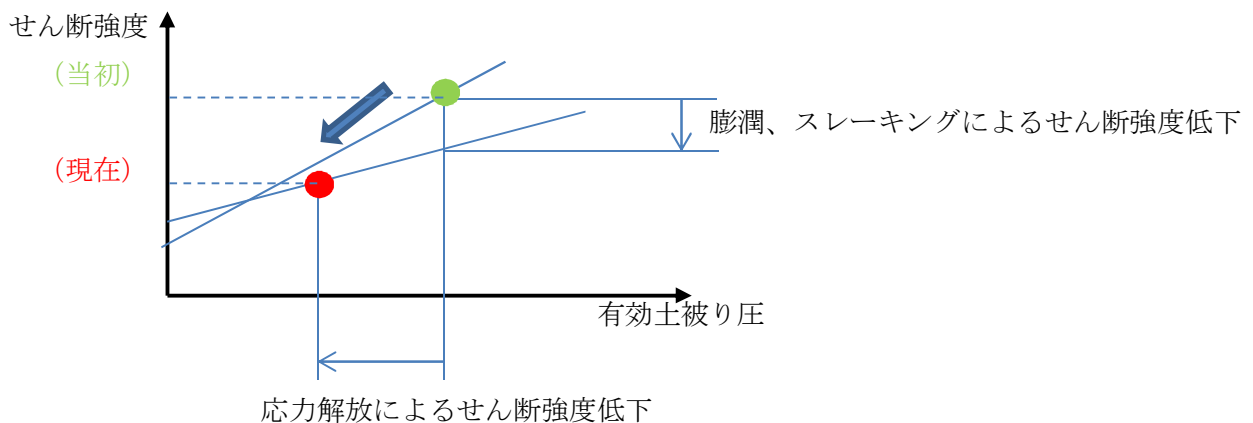


図 6.4.1.2-1 応力解放、膨潤、スレーキングによる地山のせん断強度の低下

- ④ TSS 層は、泥岩や凝灰岩が風化したものであり、土質的には粘土混じり砂、砂質土を呈し、上下の W_{cg} （砂礫）層に比較して、難透水層である。このため、TSS 上面に宙水として地下水が介在し、浮力によりすべり抵抗力を低下した。
- ⑤ 下段アンカーが、TSS 層を縫っておらず、アンカー定着部より深部ですべりが発生した可能性がある。

6.4.1.3 構造物に与える影響

一番下段の吹付法枠+鉄筋挿入工では、鉄筋が TSS を縫っていないため、十分な固定ができていない可能性がある。

中段のアンカー工（受圧板）の定着部は、TSS 層を縫っていないため、定着部が動く可能性がある。

6.4.2 高野 IC に関する地盤工学的考察

6.4.2.1 現地踏査

現地踏査の結果、以下のことが分かった。

- ・ すべり面の頭部は、滑落崖となったおり、尾根まで到達していた。
- ・ 既存アンカーの抜け出し、管理用道路のズレ等が発生していた。

6.4.2.2 変状の原因

地盤調査結果が、現段階で得られていないため、ここでは、省略する。

6.4.2.3 構造物に与える影響

変状の原因を考察できないため、ここでは、省略する。

⑦ 特記事項

7.1 研究で得られた知見、成果

研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 衛星 SAR により InSAR 解析により草木の影響を受けるが、Lバンドを用いることにより、すべり土塊の範囲を特定することは可能である。
- 2) 衛星 SAR により PS-InSAR 解析路面などの平坦な場所が連続し、沈下が卓越する箇所では、「mmオーダー」の沈下量を経時的に解析できる。
- 3) 衛星 SAR により SBAS 解析を用いて少ないデータ数（10 枚程度）で、地盤の変状を解析することができる。
- 4) 衛星 SAR 解析においてアセンディングやディセンディングなどで得られる衛星方向の変位量データを組み合わせることにより、任意断面の主測線方向の鉛直、水平方向変位を求めることができる。
- 5) Cバンドは波長が短く、一般的に精度が高いと言われているが、のり面では、若干の草木の影響で十分な解析成果が得られない場合がある。

7.2 学内外等へのインパクト

以下の論文を発表し、外部に対して研究成果の公表を行った。

- 1) 吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉、横田聖哉、柳浦良行、野口ゆい：SAR を利用した軟弱地盤地域における高速道路路面沈下量の把握、第 53 回地盤工学研究発表会、pp.1111～1112,2018.
- 2) 野口ゆい、古関潤一、清田隆、竹内渉、横田聖哉、柳浦良行、吉川猛：SAR を利用した地すべり土塊および道路変状の推定、第 53 回地盤工学研究発表会、pp.1113～1114,2018.
- 3) 古関潤一、横田聖哉、竹内渉、吉川猛、柳浦良行、野口ゆい：道路土構造物の維持管理の効率化のための干涉 SAR による変状調査方法、地盤工学会誌、pp.22-25、2018.
- 4) 吉川 猛、古関潤一、清田隆、竹内渉、柳浦良行、横田聖哉、野口ゆい：SAR を利用した軟弱地盤地域の高速道路路面変位状況の把握、土木学会第 73 回年次学術講演会、pp.219～220,2018.

7.3 研究の見通しや進捗についての自己評価

本研究の計画と実績を表 7.3-1 に示す。

表 7.3-1 本研究の計画と実績

研究項目	FS	本採択		
	H29 年度	H30 年度	H31 年度	H32 年度
1. SAR 差分干渉解析の適用方法検討（変状箇所のカリブレーション含む）				
・土構造物への SAR 差分干渉解析の適用方法の検討	■			
・変状箇所のカリブレーション	■			
・道路土構造物への SAR 差分干渉解析の適用方法の検討				
① 検討路線の抽出（変状が発生している路線）		■	■	
② 各道路構造物の変状に適合した衛星データの選定等による解析精度の向上		■	■	
③ 任意な検討断面における道路土構造物の挙動の把握		■	■	
④ 法面からの湧水箇所の検出			■	
⑤ 一路線における道路土構造物への SAR の適用方法の検討			■	
2. 地盤工学的考察				
・道路土構造物の変状に関する地盤工学的な考察				
① 変状範囲、前兆現象の検討			■	
② 地質リスクの検討		■	■	
3. 維持管理への具体的な適用方法				
・道路土構造物の管理に関する合成開口レーダー（SAR）の活用方法検討		■		
・道路土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点			■	
・道路土構造物の維持管理への SAR 活用マニュアルの作成				■

- : 計画
- : 実績（H29, H30 年度）
- : 計画（H31～年度）

「1. SAR 差分干渉解析の適用方法検討（変状箇所のカリブレーション含む）」では、変状が発生している 8 か所の検討路線の抽出し、のり面対策工、地すべり、大規模切土、山腹崩壊、軟弱地盤上での盛土で SAR 差分干渉解析の有効性を確認した。また、任意な検討断面における道路土構造物での主測線方向の鉛直、水平方向変位の解析を試みた。現状で十分な検討断面数では無いので、H31 年度以降同様な検討を継続して行いたい。検討にあたっては、法面からの湧水箇所の検出について解析を試みる。また、今まで個々の道路土構造物について解析を進めてきたが、H31 年度以降「一路線における道路土構造物」への SAR の適用方法についても検討を行いたい。

また、観測波長の異なる L、C バンドでのり面対策工（法枠等）で解析を試みたが、C バンドでは解析困難となった一方、JAXA で提供している L バンドの有効性を確認した。C バンドについては、何故、うまく解析できないか、要因をもう少し考察する必要がある。H31 年度以降についても、引き続き分解能の高い C あるいは X バンドについて、適用可能と考えられている平坦な土構造物（例えば路面など）等への適用性について、L バンドとの比較を行いたい。

「2. 地盤工学的考察」では、変状箇所の現地踏査を行い、変状の原因、構造物に与える影響について考察した。H31 年度以降、変状範囲の妥当性の検証、崩壊の前兆現象の活用方法、道路土構造物の地質リスク的な評価、室内試験などを組み合わせて地盤工学的考察を継続したい。

「3. 維持管理への具体的な適用方法」では、構造物毎の変状の特徴を考慮した SAR の活用方法を検討し、SAR 利用における課題を整理した。まだ、道路の維持管理の経験を含めた机上での考えだけである。H31 年度以降、土構造物への衛星 SAR の適用上の留意点や維持管理への SAR 活用マニュアルの作成などを行いたいと考えている。