

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（FS課題対象）】

研究代表者	氏名（ふりがな）		所属	役職
	八嶋 厚 （やしま あつし）		岐阜大学	教授
研究テーマ	名称	レーザー波干渉を利用した亀裂性岩塊の遠隔からの安全な安定性調査法の確立		
	政策領域	[主領域] (7)防災・災害復旧対策 [副領域]	公募 タイプ	タイプ（FS実施）
研究経費（単位：万円）		平成20年度		
		273万円		
研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入して下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加して下さい。）			
氏名		所属・役職		
沢田 和秀		岐阜大学流域圏科学研究センター・准教授		
馬 貴臣		岐阜大学工学部・准教授		
<p>研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入して下さい。）</p> <p>亀裂性岩盤斜面の安定度評価法として、レーザー波の干渉を利用する方法を提案する。これまでの、煩雑で危険を伴う方法に比べ、遠隔から非接触で安全に調査できる手法である。模型実験を通して、提案手法の実務への適用性を確立する。</p> <p>まず、亀裂性岩塊による災害発生危険度について、全国の直轄国道および岐阜県管理道について現状把握を実施する。また亀裂性岩塊に対する既存の安定性調査法の整理を行い、提案する簡易評価法の提案が社会ニーズとして高いことを示す。次に、斜面上の模型岩塊による計測実験により現場計測への適用性を検討する。基礎実験として、既往の接触型計測手法と提案する非接触型計測手法を比較し、提案する計測手法の利便性と得られるデータが高精度であることを確認する。今後実施予定の現場計測への適用性確認として、岐阜県内で数多く実施した接触型計測による安定性評価をとりまとめる。以上の成果に基づいて、提案手法の実務への適用性を確認する。</p>				

F S 調査の結果

(1) 道路管理の現場における亀裂性岩塊による災害の現状整理

1) 亀裂性岩塊による災害の発生状況の整理

亀裂性岩塊による災害の発生頻度及び現状の発生危険度について、全国の直轄国道の防災カルテ及び岐阜県管理道路の防災カルテを基に整理を行った。表1は全国の直轄国道における要対策箇所数とカルテ対応箇所数である。同時に発生源対策が想定される要対策箇所数と全体に対するその比率を示した。表2は中部地方整備局、表3は岐阜県の県管理道である。表中の数字は、管理項目のうち落石・崩壊もしくは岩盤崩壊のみに着目している。

平成8年の総点検から平成18年までの10年間に、要対策箇所は減少している。しかしながら、ある箇所は定期点検業務などで、新たに要対策箇所として格上げされた場合もあり、対策による減少傾向は良好とは言えない。国および岐阜県が管理する道路斜面において、現状でも数多くの危険斜面が存在していることがわかる。また、対策工法として発生源対策を想定している箇所数もかなりの数であることが理解できる。

表1 全国の直轄国道における要対策箇所数とカルテ対応箇所数の変化

直轄国道 全国	要対策箇所数	カルテ対応箇所数	+	発生源対策が想定される 要対策箇所数	発生 源%
H8 総点検	4180	6407	10587	2995	28.3
H18 再点検	2226	6819	9045	1061	11.7
変化数	1954 減	412 増	1542 減	1934 減	16.6

表2 中部地整の直轄国道における要対策箇所数とカルテ対応箇所数の変化

直轄国道 中部地整	要対策箇所数	カルテ対応箇所数	+	発生源対策が想定される 要対策箇所数	発生 源%
H8 総点検	453	630	1083	292	27.0
H18 再点検	326	790	1116	185	16.6
変化数	127 減	160 増	33 増	107 減	10.4

表3 岐阜県管理道(約4200kmにおける要対策箇所数とカルテ対応箇所数の変化)

岐阜県 県管理道	要対策箇所数	カルテ対応箇所数	+	発生源対策が想定される 要対策箇所数	発生 源%
H8 総点検	1637	2172	3819	238	6.2
H18 再点検	1317	2372	3689	193	5.2
変化数	320 減	200 増	130 減	45 減	1.0

2) 亀裂性岩塊に対する既存の安定性調査法の整理

亀裂性岩塊に直接接触して3次元高感度加速度計を設置し安定性評価を行う既存の調査法について、概要及び測定精度の整理を行った。また、既存の調査法について、作業の効率性、安全性、経済性の観点から問題点の整理を行った。

既存の調査方法と提案している調査方法の比較及びその精度についての整理は、岐阜大学内で実施したモデル実験の結果を基に(2)2)で説明する。

既存の調査方法についての効率性については、これまでに実施されてきた旧 J H 方式と呼ばれる調査法を基に説明する。この方法では、地震計を調査対象の岩塊とその付近で安定していると思われる岩塊について、直接設置して岩塊の安定性を評価するものである。そのため、危険度が不明確な岩塊に作業者が直接接触して地震計を設置することが、安全性の面で大きな問題となっている。地震計を直接設置するには、対象岩塊に粘土やモルタルで加速度計を固定する時間と作業が必要となる。この間、作業者は危険な岩塊の近くで計測を実施しなければならない。

一方、提案手法では、岩塊に接近・接触しなければならないのは、レーザー反射強度がごく小さい場合に、反射ターゲットを貼付けるか、反射用塗料を塗布する場合のみであり、安全性の面で非常に優位である。また、従来の方法では、一箇所あたりの計測に対して最低 90 万円（その後地震計 1 箇所追加あたり 45 万円）の経費が必要となるが、提案手法を適用した場合、地震計の設置する時間等を節約でき、レーザーの反射さえ確保できれば、何力所でも計測が可能である。そのため、経費の面においても十分に優位である。安全性や効率性についても、下記説明のモデル実験により把握できる。

(2) レーザー波干渉を利用した遠隔からの亀裂性岩塊に対する安定性調査法の適用可能性に関する検討

1) 反射ターゲット設置方法の検討

遠隔からの反射ターゲットの設置については、J R 総研の研究レポートによりエアガンでの設置が可能であることが確認されている。本研究では、J R 総研の方法を適用した場合、どのような反射材料を遠隔から設置するかについて、モデル実験を通じて調査した。U ドップラーメーカーのアドバイスを受け、モデル実験で検証した結果、反射剤の混入した塗料でなくても、白色の塗料を薄く均一に岩塊に塗布できれば、十分に反射材の役目を果たせることがわかった。

2) 模型実験による適用可能性の検討

不安定岩塊の簡単なテストモデルを設定し、既存の安定性調査法とレーザー波干渉を利用した遠隔からの安定性調査法による計測を実施した。

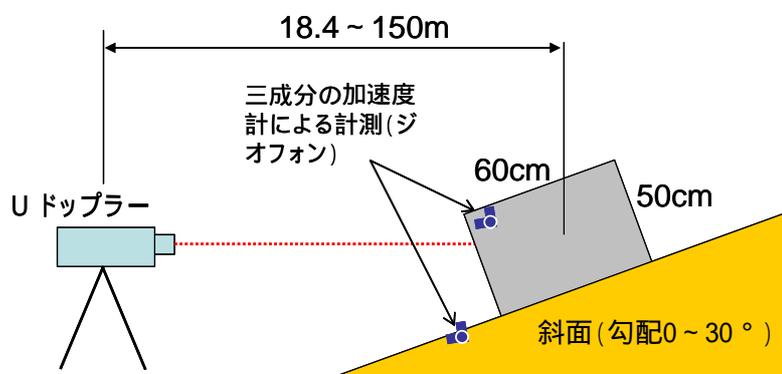


図 1 モデル実験の概要図

図1のようにLDVと人工斜面上に設置した人工浮石（コンクリートブロック）を設置し、提案手法および従来方式で計測した。斜面の角度、コンクリートブロックの設置方向などを変化させることで、浮石の不安定性を再現した。図2の4枚の写真は実験の様子を示したものである。遠隔よりレーザーを対象岩塊に照射し、反射波との干渉により岩塊の動的速度応答を測定する。



実験に用いたコンクリートブロック



実験模型と地震計

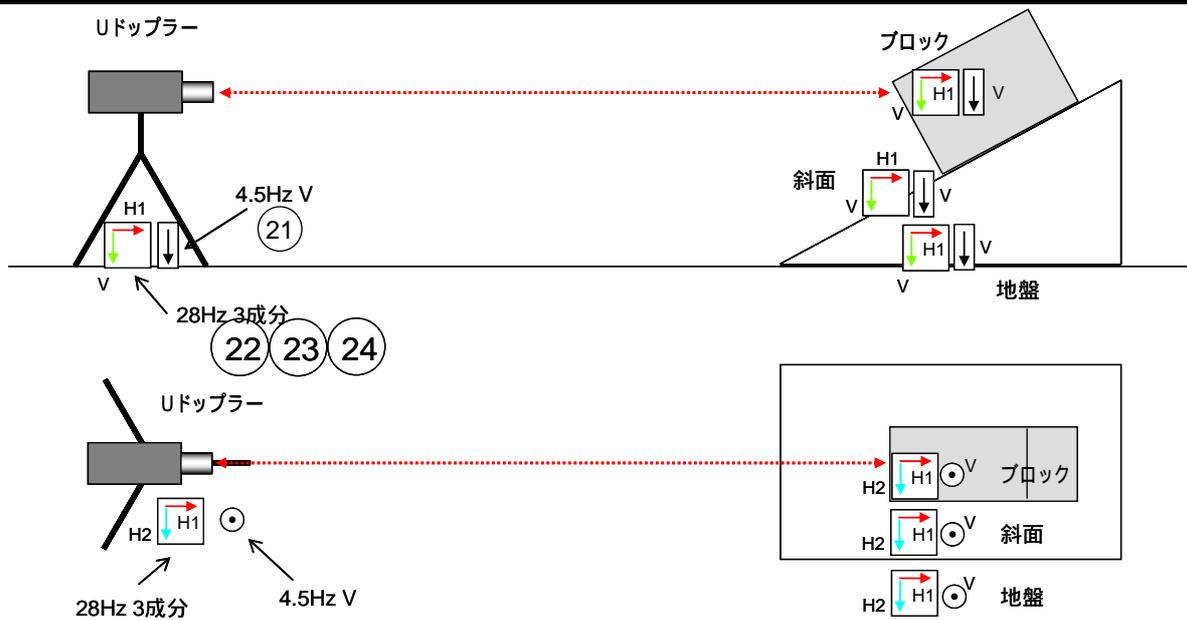


図2 実験概要と実験の様子

転石・浮石の大きさや状態、斜面の硬さや勾配等は、転石・浮石の安定性に影響を与える。そのため、以下に示す条件を考慮し、それぞれの条件を組み合わせると計26ケースの実験を実施した。

- ・ブロック: 2種類 (大60×50×40cm、小40×30×20cm)
- ・斜面種類: 2種類 (人工斜面と地盤)
- ・ブロック状態: 自然に置く、埋込み、上下重ね
- ・人工斜面の勾配: 3種類 (0°、20°、30°)
- ・測定距離: 18.4m、29m、150m
- ・反射板材料: 反射板 (測量用)、塗料、スプレー、修正液、白いテープ

これらを組み合わせた26ケースについて、1つの実験ケースに対し、6回ずつ計測を実施した。各回の計測時間は65s、記録サンプル速度は200Hzである。また従来手法と比較するために、地震計の計測は合図で同期記録を行った。ただし、記録サンプル速度は250Hzである。図3には、提案手法と既存手法の計測器の設置状況を示した。図中1～24の で囲った番号はデータ取得チャンネル番号である。



ジオフォンデータファイル チャンネル内容一覧表

チャンネル番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
設置位置	地盤	斜面	ブロック	地盤			斜面			ブロック		
ジオフォン	4.5Hz	4.5Hz	4.5Hz	28Hz			28Hz			28Hz		
成分	V	V	V	V	H1	H2	V	H1	H2	V	H1	H2
チャンネル番号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
設置位置	-	-	-	-	-	-	-	-	Uドップラー地点			
ジオフォン	-	-	-	-	-	-	-	-	4.5Hz	28Hz		
成分	-	-	-	-	-	-	-	-	V	V	H1	H2

図3 提案手法と既存手法の計測方法（計測器の設置位置）

図3のように既存の岩塊安定性評価の計測方法と、レーザー干渉による計測方法の比較を行った。図4は、150mの遠方からレーザー干渉により計測した速度振幅時刻歴である。

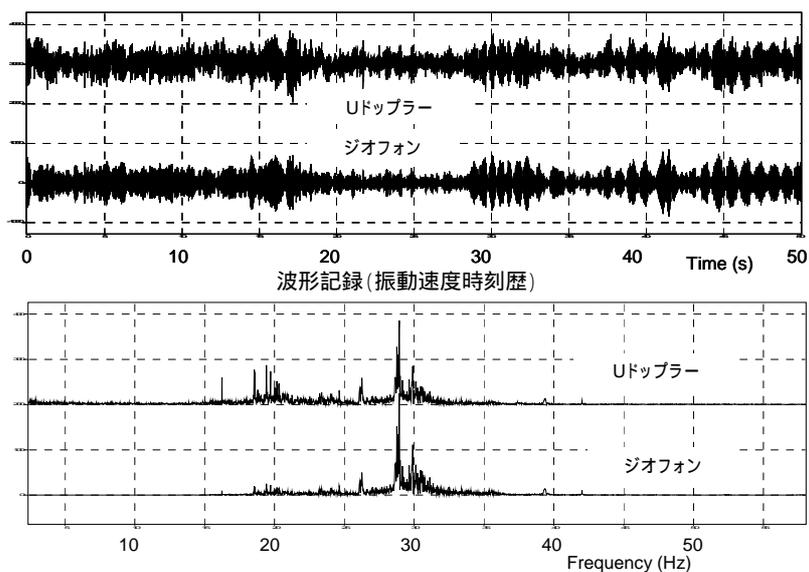


図4 既存手法と提案手法の計測結果比較（150m遠隔、小ブロック、20度斜面）

図4の下段は速度振幅時刻歴のスペクトル解析結果である。計測データ、解析データとも既存方法とほぼ同様の波形を得ることができた。これにより、遠隔から正確な変位計測ができることが実証された。ただし、この場合コンクリートブロックに測量用ターゲットが貼り付けてあり、レーザーの反射状況が最適な状況だった。

反射材について、修正液・白色絶縁テープ・高輝度反射塗料・白色スプレーを用いて、計測反射実験を試みた。高輝度反射塗料は、塗料中に粉碎したガラスが含まれている。結果として、白色スプレーを薄く均一に塗布した場合のみ、レーザーの反射が得られ、計測が可能となった。塗料を厚く塗布すると、塗料内で乱反射が起こり、レーザーの反射が得られないことがメーカーの実験で明らかになっている。JR総研が報告しているエアガンからの塗料照射の場合も、薄く均一に塗料が広がった面を計測対象とすることが好ましいことが分かっている。また、2日間行った実験のうち一日は雨であった。雨は振動・反射率に大きく影響を与えるため、雨天での計測は避けるべきである。

岩塊の安定性評価について、図5および図6を用いて説明する。両図に示したH1、H2およびVは地震計の計測方向で、図7のように設置してある。図5は、小ブロックを不安定な状態（縦置き）で20度の斜面に設置した既存手法による計測結果を速度スペクトル比でまとめたものである。ブロック/斜面（赤線）およびブロック/地盤（青線）の卓越周波数に注目したい。グラフは、左上から、レーザー計測方向・レーザー計測方向に水平に垂直（右上）・鉛直（28Hz地震計）（左下）・鉛直（4.5Hz地震計）（右下）でまとめた。それぞれ、13Hz付近に卓越した周波数を有している。一方、同様の計測をした図6と比較する。図6は、小ブロックを安定な状態（横置き）で20度の斜面に設置した既存手法による計測結果を速度スペクトル比でまとめたものである。示したグラフは図5と同様にまとめた。図5と同様にブロック/斜面（赤線）およびブロック/地盤（青線）の卓越周波数に注目すると、それぞれ24Hz付近に卓越した周波数が見られる。縦置きブロックの卓越周波数は低く、より安定した横置きブロックの卓越周波数は比較的高いという一般物理の概念と一致する。先に示したとおり（図4）、提案手法は、地震計による既存計測方法と同様の計測結果が得られることが本実験で確認できたため、ここで説明した方法を使用すれば、岩塊の安定性評価を行うことが可能である。

3)実現場への適用について

申請者らは、これまでに岐阜県との事業により森林内にある不安定な亀裂性岩盤の現場に数多く出向き、現場の状況を確認している。図8のように、危険性のある岩塊は、裸地もしくは森林内にあることが多い。手入れされていない人工林の杉や檜は幹が細く、樹幹に葉を保っている状態であるため、人工林の斜面地は、日照がなく低木が育つことはない。このような状況下では、計測のターゲットとなる岩塊に対して、レーザー照射の方向を遮るものは多くないため、実際の現場で十分適用可能と考える。ただし、反射材の塗布方法については、安全性と効率性を十分に検討しなければならない。

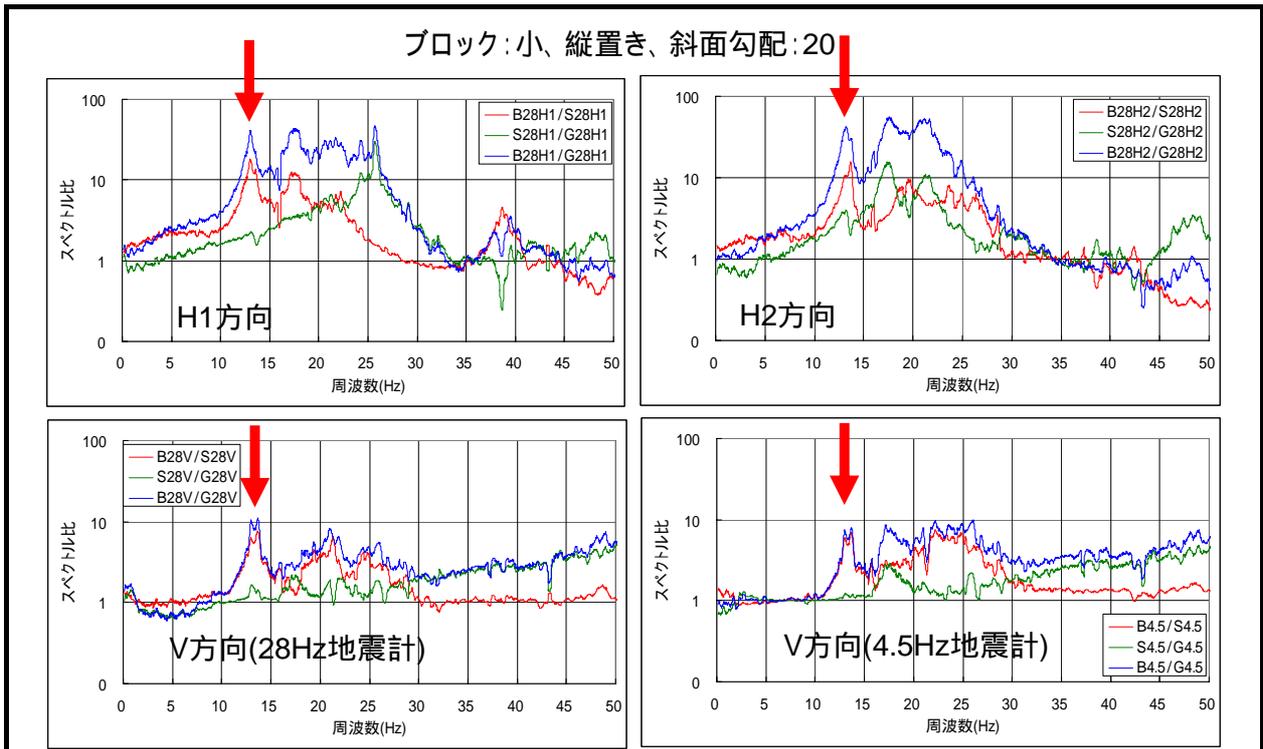


図5 不安定な小ブロックの計測結果 (既存手法)

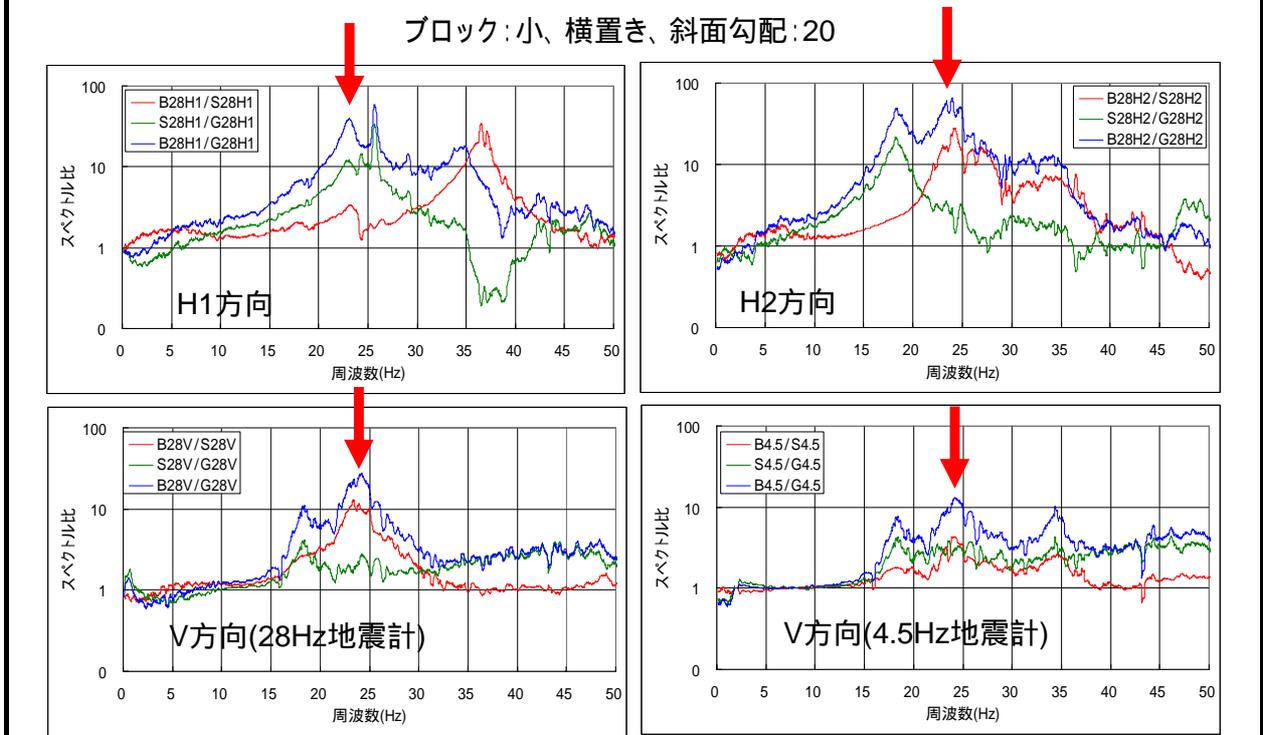


図6 安定な小ブロックの計測結果 (既存手法)

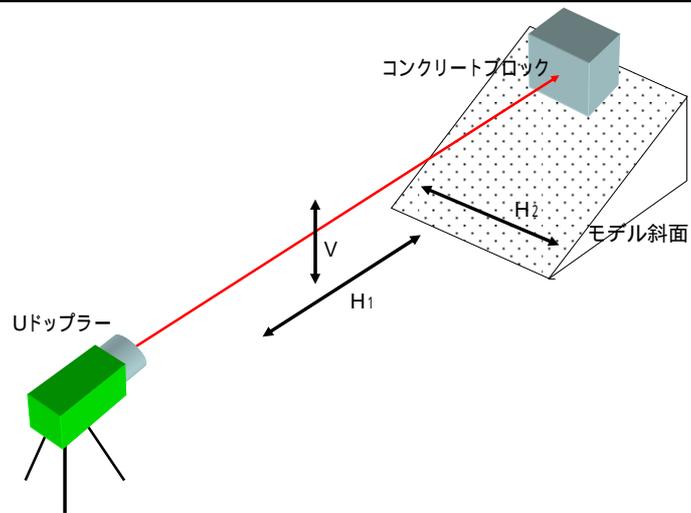


図7 各地震計の計測方向成分の表示



図8 a 人工林地内に存在する亀裂性岩塊の一例



図8 b 自然林内に存在する亀裂性岩塊の不安定部分の一例

本格研究の見通し

(FS研究から得られた成果により、本格研究における研究成果の見通し、研究の目標の達成見込み、成果の活用方法、手段、今後の展開等を記入して下さい。)

FS研究では、以下の点に重点を置いて調査研究を実施した。それぞれの項目における、本格研究に向けての目標及びそれに対する達成見込みと成果の活用について述べる。

(1) 道路管理の現場における亀裂性岩塊による災害の現状整理

(財)道路保全技術センターの協力により、全国の直轄国道の防災カルテから、いかに多くの斜面が落石・崩壊、岩石崩壊の危険にさらされている(要対策箇所およびカルテ対応箇所として表現されている)かが確認できた。同様に、岐阜県の協力を得て調査した結果、岐阜県管理道についても非常に多くの危険な道路斜面が、対策できないまま存在していることがわかった。そのなかでも、発生源対策が計画されている箇所もかなりの数であった。落石等による斜面災害を減らすには、定量的な安定性評価を実施して、優先順位に基づいた防災対策の実施が重要である。このことから、本研究に対する社会的ニーズの大きさを確認することができた。

亀裂性岩塊に対する既存の安定性調査法については、岐阜大学内で実施したモデル斜面上の浮石計測実験を通じて、提案手法と比較した。既存調査手法では、不安定な岩塊に直接接触し地震計を貼り付け、岩塊付近で計測を実施しなければならない。また、地震計の設置には養生期間がかかるものもある。一方、提案手法では、レーザーの反射を得ることができれば、危険な岩塊に接触する必要がないため、作業者の安全が確保される。レーザーの反射を得られない場合には、反射ターゲットを貼付けるか、反射用塗料を塗布するが、この場合の岩塊への接触時間はごく短時間ですむ。また、従来の方法では、一箇所あたりの計測に対して最低90万円(その後地震計1箇所追加あたり45万円)の経費が必要となるが、提案手法を適用した場合、地震計を設置する時間等を節約でき、レーザーの反射さえ確保できれば、何力所でも短時間に計測が可能である。そのため、経費の面においても十分に優位で、効率的である。

このように、本研究における落石等に関する亀裂性岩塊の安定度評価手法の提案は、社会的ニーズに加え、作業の安全性と効率を確保しながら経済的に評価できることから、その手法を確立させ、広く利用されるべきものである。

(2) レーザー波干渉を利用した遠隔からの亀裂性岩塊に対する安定性調査法の適用可能性に関する検討

レーザー波干渉を利用して岩塊の安定性を評価するには、対象岩塊からのレーザー反射を適切に得る必要がある。遠隔の対象物に対しては、JR総研が開発したエアガンによる設置方法が報告されている。本研究では、JR総研の方法を適用した場合、どのような反射材料を遠隔から設置すればよいのかについて、モデル実験を通じて調査した。Uドップラーメーカーのアドバイスを受け、モデル実験で検証した結果、反射剤の混入した塗料でなくても、白色の塗料を薄く均一に岩塊に塗布できれば、十分に反射材の役目を果たせることがわかった。

遠隔からのターゲット設置でなくても、レーザー反射を得ることができれば、既存手法のように作業者が危険岩塊付近に長時間居る必要がなく、安全に計測評価が可能である。モデル実験では、JR総研が開発した高輝度反射材のみでなく、種々の反射材を試し、白色スプレーでも反射を得られることを確認した。スプレー塗布であれば、岩塊に直接接触することなく安全に作業を進

められ、作業者が岩塊付近に居る時間を短縮できる。反射材の設置方法は、それぞれの現場に合わせて、最適な設置方法と反射材を選択する調査が必要である。岐阜県では、種々の岩種及び斜面形状を選択できる試験サイトが数多くあり、本格研究によりサンプルを蓄積し、反射材の選択法と設置手法を確立できる。

模型実験により、既存手法との精度比較を実施した結果、レーザーの反射を得られれば直接的な地震計の設置による計測とほぼ同精度の計測結果を得られることが確認できた。レーザーの反射を得るには、反射材の設置方法を確立する必要があるが、先述したように岐阜県内の危険岩塊サイトをサンプルとして、データを蓄積すれば、さまざまなサイトに適用可能となる。さらに、調査対象岩塊を特定した後の展開として、岩塊の詳細な挙動把握の方法に、図9に示す多点微動計測の適用を提案する。

この方法は、既存評価手法と同様に、安定基岩に対する不安定岩塊の挙動を相対的に把握することにより、不安定岩塊の転倒や回転挙動を予測するものである。一方、レーザー波干渉による計測だけで、この方法を適用するには、2基以上のレーザー計測器を必要とする。2基以上の計測器を使用することにより、既存手法の方法と同じ環境を整備し、遠隔から同手法が適用可能か検討する。しかし、実現場ではレーザー計測器をいくつも使用するのとは不可能であるため、安定基岩には地震計を設置し、それと同期させたレーザー計測を実施することで、不安定岩塊の挙動を予測できる計測手法の調査を実施する。この計測手法では、ひとかたまりの岩塊に対して、数点の振動を変位としてとらえることにより、対象岩塊自体の転倒や回転モードを予測することが可能と考えられる。

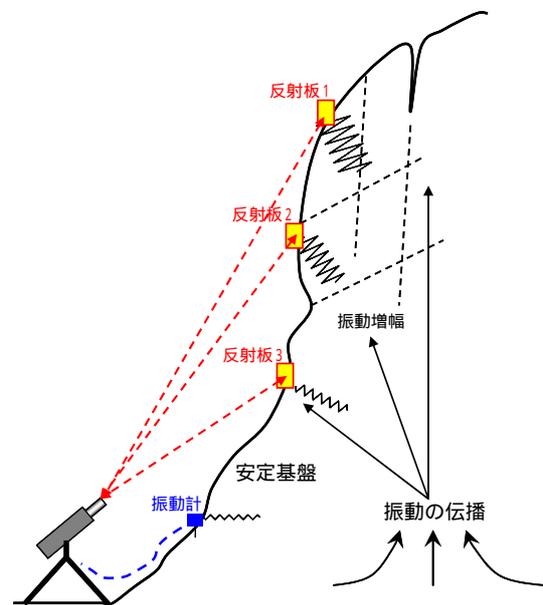


図9 多点微動計測のイメージ

この方法を確立できれば、全く同じレーザー計測器を用いて、安定性評価だけでなく、岩塊の挙動の予測も可能となる。

実現場への適用について、申請者らは、これまでに岐阜県との事業により森林内にある不安定な亀裂性岩盤の現場に数多く出向き、現場の状況を確認している。図8のように、危険性のある岩塊は、裸地もしくは森林内にあることが多い。手入れされていない人工林の杉や檜は幹が細く、樹幹に葉を保っている状態であるため、人工林の斜面地は、日照がなく低木が育つことはない。このような状況下では、計測のターゲットとなる岩塊に対して、レーザー照射の方向遮るものは多くないため、実際の現場で十分適用可能と考える。

申請者らは、岐阜県の協力を得ながら、亀裂性岩塊の安定化として、岩盤接着工やロープ掛工、ロープネット工を用いて、岐阜県内で多くの岩塊の安全化対策を実施してきた。そこでは、不安定であった岩塊が安定化したかを確認するために、既存評価手法を用いて、それぞれの岩塊につ

いて、対策前と対策後の加速度を計測し、対策工法の効果を検証してきた。それらの調査では、岩盤接着工で対策を講じても、接着面積の小さい頭頂部の浮石は、安定化しない場合が多いことが確認された。図8の現場もその一例である。つまり、その調査研究の結果、不安定岩塊を頭頂部に持つ、安定化された岩塊が存在し、加速度挙動が計測されてデータが蓄積されている。本格研究では、岐阜県の協力を得て、岩盤接着工を施した岩塊に対して、レーザー波干渉による安定性評価手法を適用させることにより、実現場における提案手法の適用性を検討する。これまでの調査研究の成果により、種々の岩種に区分された、数多くの実現場を対象として、本研究で提案する計測手法の妥当性を確認できる環境にある。

(3) 既存の安定性調査法とレーザー波干渉を利用した遠隔からの安定性調査法の比較検討

(1)および(2)で示したとおり、提案手法は、反射材の選択とターゲットの設置方法を確立できれば、より安全に経済的な計測及び評価を実施できる。また、先述した多点微動計測手法を用いれば、より詳細な動態計測が可能となり、発展的な使用方法を展開できる。社会のニーズに合わせた、安全・安価で効率的な不安定岩塊評価の手法として広く受け入れられる。

特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入して下さい。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入して下さい。)

平成20年度のFS研究の成果により、提案手法の実務への適用可能性がより明確となった。基礎的な模型実験の成果ではあるが、FS研究の達成度には非常に満足している。また、既存手法による計測結果を数多く収集・整理したことは、本格研究における比較項目として、提案手法の実現場における精度検討を実施する上で、非常に重要な財産となりうる。