

# 落石対策手法の高度化に関する研究

2022年9月

岩手大学大学院連合農学研究科

地球環境創生学専攻

松嶋 秀士

## 目次

第1章 序論.....	1
1. 1 研究背景 .....	1
1. 1. 1 落石災害の発生状況 .....	1
1. 1. 2 社会環境の変化 .....	4
1. 1. 3 落石調査の現状 .....	7
1. 1. 4 落石調査におけるICTの利用状況 .....	8
1. 1. 5 落石防護柵の損傷実態と落石対策便覧との違い.....	10
1. 2 研究目的 .....	11
1. 3 論文の構成 .....	12
第2章 落石防護柵の落石被災事例 .....	15
2. 1 被災事例から見る構造上の問題点について .....	15
2. 2 損傷事例 .....	15
2. 3 考察 .....	23
2. 3. 1 中間支柱の損傷における考察 .....	23
2. 3. 2 端末支柱の損傷の考察 .....	24
2. 3. 3 金網の損傷の考察 .....	25
2. 3. 4 ワイヤロープの損傷の考察 .....	25
2. 3. 5 柵の飛び越えについての考察 .....	26
2. 4 まとめ .....	26
第3章 落石調査へのUAV搭載レーザ測定の有用性 .....	27
3. 1 UAVレーザ測定を利用した落石調査の目的 .....	27
3. 2 調査地の概要 .....	28
3. 3 調査地における落石の発生状況 .....	30
3. 3. 1 地震による落石発生状況 .....	30
3. 3. 2 降雨による落石発生状況 .....	31
3. 4 UAVレーザ測定と落石調査方法 .....	32
3. 4. 1 UAVレーザ測定 .....	32
3. 4. 2 机上判読と現地調査 .....	34
3. 5 落石（浮石・転石）机上判読への利用 .....	35
3. 5. 1 グリッドサイズの検討 .....	35
3. 5. 2 机上判読の抽出率 .....	36
3. 6 データの有効活用 .....	39
3. 7 まとめ .....	42
第4章 落石調査におけるモバイルレーザスキャナの活用に向けての検討 .....	43

4. 1	モバイルレーザ機器を利用した落石調査への応用	43
4. 2	モバイルレーザ測量機器及び地形データ作成方法について	45
4. 2. 1	測定機器の諸元について	45
4. 2. 2	iPad及びiPhoneのLiDAR性能確認	46
4. 2. 2. 1	測定距離による精度変化の確認	46
4. 2. 2. 2	計測モードの違いによる精度の確認	47
4. 3	落石調査の計測対象斜面について	48
4. 4	モバイルレーザ適用結果	48
4. 4. 1	落石個体のレーザ適用結果（a箇所での検証結果）	48
4. 4. 2	落石発生源地点のレーザ適用結果（b箇所での検証結果）	50
4. 4. 3	斜面上の落石のレーザ適用結果（c箇所での検証結果）	52
4. 4. 4	広範囲な斜面のレーザ適用結果（d箇所での検証結果）	54
4. 5	まとめ	56
第5章	実規模実験による従来型落石防護柵の挙動と補強に関する研究	57
5. 1	従来型落石防護柵の補強の必要性について	57
5. 2	被災事例から見る構造上の弱点と現行の計算方法	58
5. 3	従来型落石防護柵の実験	59
5. 3. 1	実験タイプ	59
5. 3. 2	実験方法	60
5. 3. 3	測定項目と方法	62
5. 4	従来型落石防護柵の実験結果	63
5. 4. 1	支柱の変形について	63
5. 4. 2	ワイヤ張力について	65
5. 4. 3	重錘衝撃力について	67
5. 4. 4	従来型落石防護柵の実験まとめ	67
5. 5	落石防護柵の補強方法について	69
5. 5. 1	支柱の補強	71
5. 5. 2	金網の補強	71
5. 5. 3	ワイヤロープの張力低減	71
5. 5. 4	柵高のかさ上げ	71
5. 6	補強落石防護柵の実験結果	72
5. 6. 1	支柱の変形について	72
5. 6. 2	ワイヤ張力について	74
5. 6. 3	重錘衝撃力について	75
5. 6. 4	緩衝装置のスリップ量について	76
5. 6. 5	補強落石防護柵実験の考察	77

5. 7	まとめ	77
第6章	落石防護柵に用いられるひし形金網の挙動と特性について	79
6. 1	ひし形金網の特性把握の必要性について	79
6. 2	実験内容と供試体について	80
6. 3	実験方法	82
6. 3. 1	面内静的試験	82
6. 3. 2	面外静的試験	83
6. 3. 3	面外動的試験	84
6. 3. 4	測定機器について	85
6. 4	実験結果	86
6. 4. 1	線径の違いによる挙動について	86
6. 4. 1. 1	面内静的試験	86
6. 4. 1. 2	面外静的試験	87
6. 4. 1. 3	面外動的試験	87
6. 4. 2	材質の違いによる挙動について	88
6. 4. 2. 1	面内静的試験	88
6. 4. 2. 2	面外静的試験	89
6. 4. 2. 3	面外動的試験	90
6. 4. 3	形状の違いによる挙動について	92
6. 4. 3. 1	面内静的試験	92
6. 4. 3. 2	面外静的試験	93
6. 4. 3. 3	面外動的試験	94
6. 5	まとめ	95
第7章	人力運搬可能な流木の二次流出対策工の試験施工	97
7. 1	人力運搬可能な2次流出対策の必要性について	97
7. 2	調査地について	98
7. 2. 1	調査地の場所と地形	98
7. 2. 2	山腹崩壊の発生原因となった2018年8月豪雨について	102
7. 3	山腹崩壊発生に伴う土砂・流木の現地調査	102
7. 3. 1	簡易貫入試験による崩壊特性の把握	102
7. 3. 2	流木堆積量	103
7. 4	倒木の流出対策について	104
7. 4. 1	想定荷重	104
7. 4. 2	対策工の構造	105
7. 4. 3	対策工の材料諸元	106
7. 4. 4	対策工の静的載荷試験	106

7.4.5 立木の耐荷重について .....	108
7.4.6 試験施工箇所の設計方法の検討について .....	109
7.5 試験施工について .....	110
7.6 まとめ .....	112
第8章 結論 .....	113
8.1 本研究のまとめ .....	113
8.2 落石対策便覧への提言 .....	115
8.3 今後の課題 .....	120
謝辞 .....	122
参考文献 .....	123

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 落石災害の発生状況

国土の7割以上を山地が占める我が国において、斜面災害は日常的な災害であるといえる。実際、道路交通白書（2021年度版）<sup>1)</sup>によれば、2009年までの災害発生件数は1000件程度に対して、2010年以降に発生した多大な被害を与えた斜面災害は、年平均で約1400件以上となっており増加傾向である（図-1.1）。

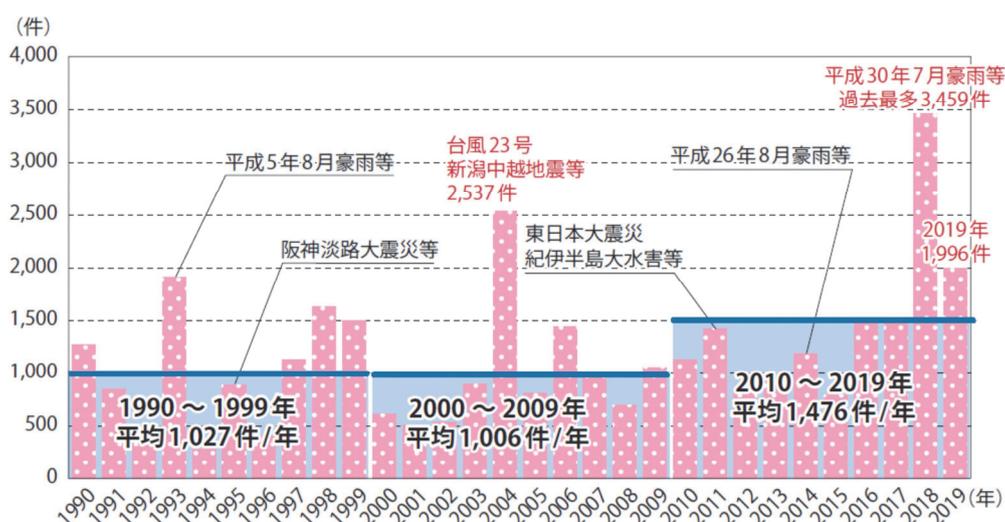


図-1.1 土砂災害の発生件数推移 国土交通省白書（2021年度版）より

このような斜面災害としては、「地すべり」・「土石流」・「斜面崩壊（崖崩れ）」・「落石」などが主要な災害といえる。斜面災害は、山地斜面から土塊・岩塊が移動する現象であり、山間部であればどこでも発生する危険性を秘めている。特に、近年の異常気象などから広域災害が多発しており、道路・鉄道における線構造物について防災点検などを実施することで危険箇所の抽出などが進められている<sup>2)</sup>。

我が国における落石防護施設は、日本の地形・地理的条件から山間部谷底付近に構築されていることが多いが、施設延長から言えば2021年度時点で道路総延長1,281,072.8Km<sup>3)</sup>、平成30年度時点で鉄道総延長27,789.1 Km<sup>4)</sup>である。このように道路は、山間部での施設延長が長く落石災害の危険性が高いが、国土交通省を始めとする各機関では、道路防災点検などで斜面調査を実施し、落石被害履歴状況、斜面特性などから落石災害の危険箇所の把握に努めている。

表-1.1に示すように1968年8月（昭和43年）に起きた飛騨川バス転落事故を契機として、道路防災の基礎資料を得るために、全国一斉に総点検が実施された。

近年では、1996年に総点検が実施され、その点検結果をカルテとして保有し、毎年度当該カルテに基づく、カルテ点検が道路管理者毎に実施されている。

表-1.1 落石事故の履歴と行政及び学会の対応について

都道府県	事故名	死亡者数	事故後の動き	マニュアルの発行	シンポジウム
〔高知県〕	久礼落石事故	1人	道路管理者瑕疵が認められる (国内の落石対策が本格化)		
〔岐阜県〕	飛騨川バス転落事故	104人	第1回防災点検 (1968.09)		
〔静岡県〕	石郡第五他洞門崩壊事故	1人	第2回防災点検 (1970.10)		
〔山梨県〕	早川町落石事故	1人	第3回防災点検 (1971.07)		
〔静岡県〕	東伊豆有料道路落石事故	5人	第4回防災点検 (1973.10)		
〔静岡県〕	東伊豆岩盤崩落事故	3人	第5回防災点検 (1976.07)	<b>落石対策の手引</b> (日本国有鉄道 1978.03)	<b>第1回 落石の衝撃力に関するシンポジウム</b> (金沢大学 1983.07)
〔北海道〕	上磯郡岩盤崩落事故	6人	第6回防災点検 (1980.03)	<b>落石対策便覧</b> (道路協会 1983.07)	<b>第2回 落石の衝撃力に関するシンポジウム</b> (金沢大学 1986.07)
〔北海道〕	層雲峡岩盤崩落事故	3人	第7回防災点検 (1989.09)	<b>防災点検ガイドブック(案)</b> (建設省道路局 1990.09)	<b>第1回 落石の衝撃問題に関するシンポジウム</b> (土木学会 1991.03)
〔滋賀県〕	大津市落石事故	2人	第8回防災点検 (1990.09)	<b>道路防災点検要領</b> (道路保全技術センター 1996.08)	<b>第2回 落石の衝撃問題に関するシンポジウム</b> (土木学会 1993.06)
〔高知県〕	北川村二股落石事故	1人		<b>落石対策技術マニュアル</b> (鉄道総合技術研究所 1999.03)	<b>第3回 落石の衝撃問題に関するシンポジウム</b> (土木学会 1996.06)
〔高知県〕	大月町落石事故	1人		<b>落石対策便覧</b> (道路協会 2000.06)	<b>第4回 落石の衝撃問題に関するシンポジウム</b> (土木学会 1998.06)
〔福井県〕	玉川岩盤崩落事故	15人			<b>第5回 落石の衝撃問題に関するシンポジウム</b> (土木学会 2000.06)
〔栃木県〕	藤原町落石事故	1人			
〔徳島県〕	鳴門北灘落石事故	3人			
〔北海道〕	豊浜トンネル岩盤崩落事故	20人	第9回防災点検 (1996.03)		
〔高知県〕	北川村島落石事故	1人			

しかしながら、道路における落石災害は後を絶たず、道路管理者の瑕疵責任を問われた落石事故は2014年(平成26年)から2018年(平成30年)の5年間で年間平均400件程度あり(図-1.2)、秋田県を例にすると落石の報告は年間約700件であった(図-1.3)<sup>5)</sup>。

また、防災点検時に作成されたカルテ対象箇所以外からの落石は、秋田県並びに全国的に見ても半数を超え、斜面のどこから落石が発生してもおかしくないことが言える(図-1-3,4)<sup>6)</sup>。

これらの落石災害については、落石自体が局所的な災害であるため、直接的被害額から見るとそれほど高額とはならないが、発生数と通行障害による迂回損失等の間接的損失(救急活動の遅延など間接的な人的・物的損失を含む)を考慮するならば、かなりのリスクを有する災害といえる。

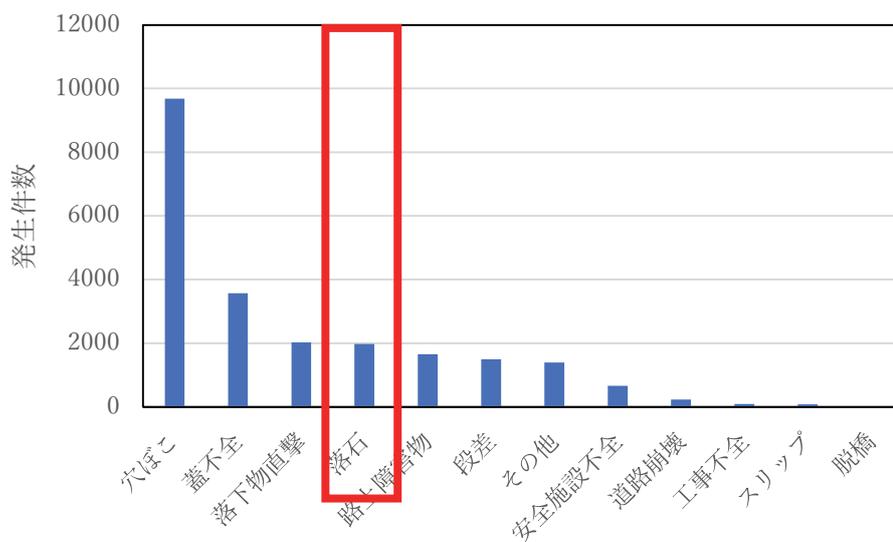


図-1.2 道路瑕疵責任件数 H26~30年

2020年2月：国土交通省道路局，平成30年道路交通管理統計，p.19をグラフ化

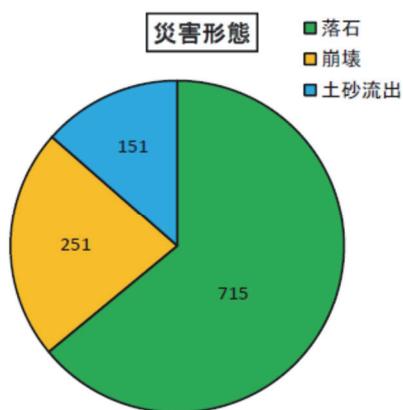


図-1.3 秋田県における道路災害状況

2017年(平成29年)秋田県落石等道路防災計画 p.8より

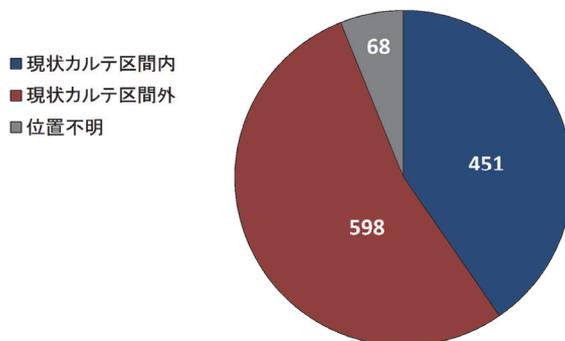


図-1.4 秋田県における災害発生箇所の内訳

2017年(平成29年)秋田県落石等道路防災計画 p.8より

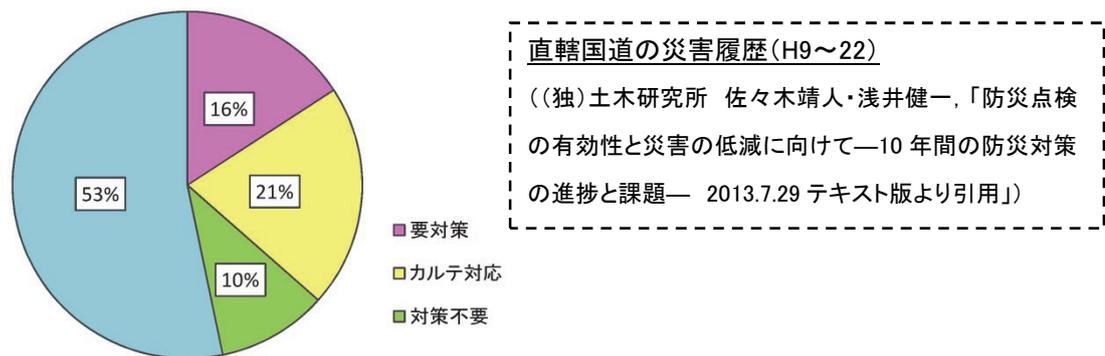


図-1.5 直轄国道の災害履歴 (1997～2010年) 7)

### 1.1.2 社会環境の変化

1959年にスタートした道路整備5ヵ年計画によって、道路の新設および改良が進み、山間部で路側が斜面の場合には落石対策用のワイヤロープ金網式落石防護柵（以下、既設落石防護柵）が設置されており、その総延長は我が国全体で数千kmにも及ぶ膨大な距離に達しているといわれている。これらの既設防護柵は、建設年数が国道で平均40年以上、県道など地方自治体の管理道路で30年以上経っており、設計寿命に近いものも多い(図-1-6, 7)。さらに設置当初から年月が経ち、斜面の風化や浸食が進んだ落石危険地帯においても今後5～10年の間に一斉に更新を余儀なくされる事態も想定される。

また、2012年の中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故を機に、2013年に道路法を改正し道路施設の点検と維持修繕を義務付けたことにより、道路土工構造物についての点検要領が2017年8月に道路土工構造物点検要領として策定された。長大切土や高盛土が特定土工点検となり5年に1度の点検となっているが<sup>7)・8)</sup>、その他の落石防護施設については通常点検となり、巡視等で異常が認められた場合、点検を行うこととなっているが、点検対象が順次増えているため、今後落石防護施設についても特定点検対象になることも考えられる。

また、インフラの安全性の向上と効率的な維持管理を実現するため、インフラ長寿命化基本計画（2013年11月29日）や国土強靱化基本計画（2018年12月14日閣議決定）において、防災・減災およびインフラの老朽化対策における研究開発、および、新技術の普及・社会実装の推進が求められている。

しかしながら、道路施設の修繕予算はトンネルや橋梁などに多くを割かれ、落石防護施設などの防災への割り当ては少ないのが現状である(図-1.8)。さらに、各地方自治体の土木技術者の人員は減少を続けており(図-1.9)、少ない予算で効率的に落石防護施設を含めたインフラを維持管理する必要があると考えられる。

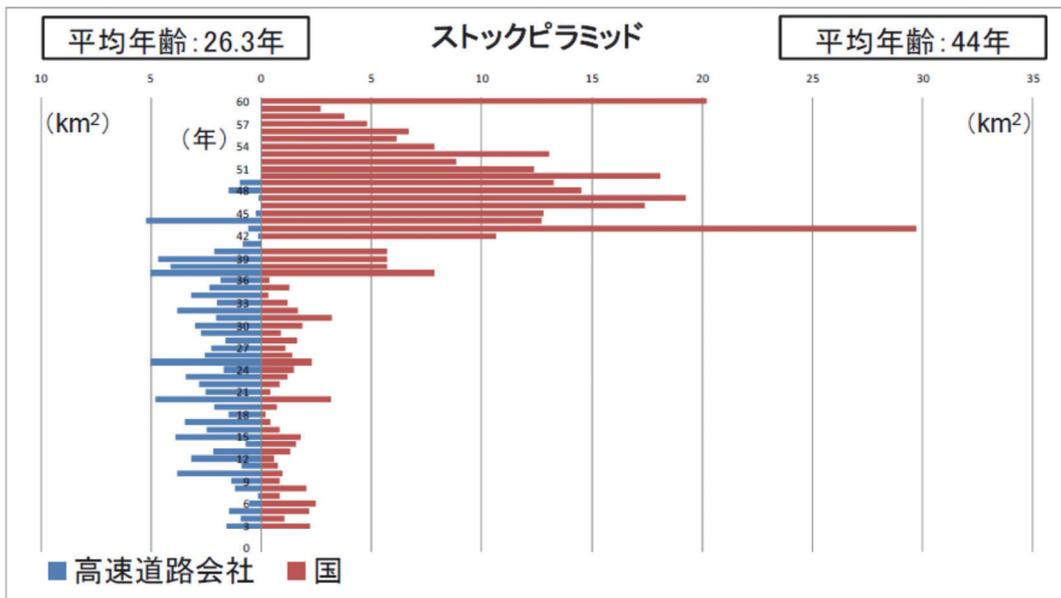


図-1.6 道路構造物の施工からの年齢（国道，高速道路）<sup>9)</sup>

2012年：国土交通省 年第一回国道(国管理)の維持管理等に関する検討会 資料3, 国道(国管理)の維持管理等の現状と課題について, P21

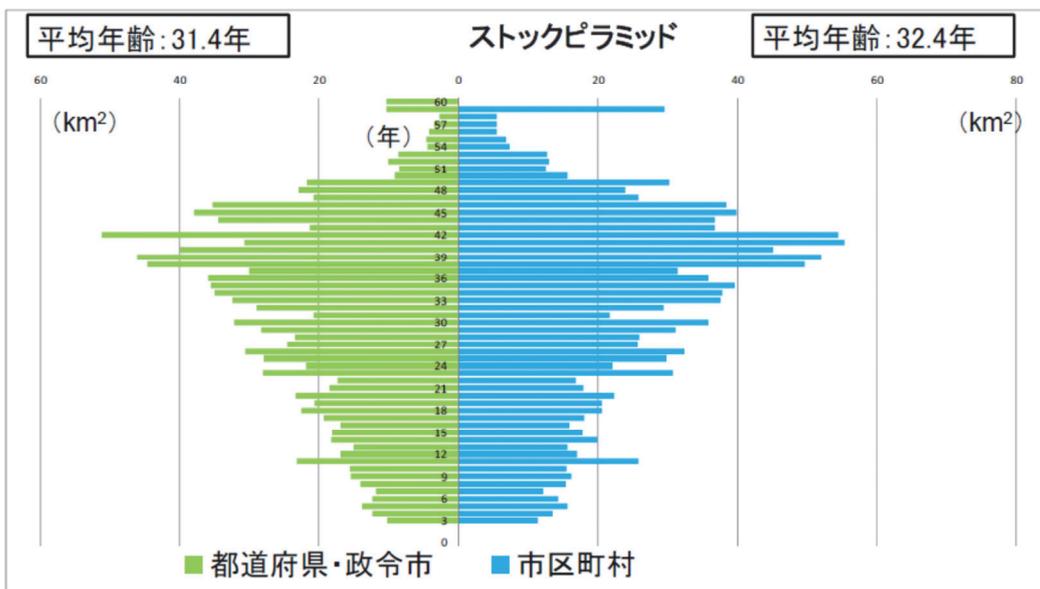


図-1.7 道路構造物の施工からの年齢（都道府県・政令市，市区町村）<sup>9)</sup>

2012年 国土交通省 第一回国道(国管理)の維持管理等に関する検討会 資料3, 国道(国管理)の維持管理等の現状と課題について, P. 21

- 平成22年度の維持管理費は前年度比約12%削減
- 管理延長は、新規供用に伴い、毎年200km程度増加

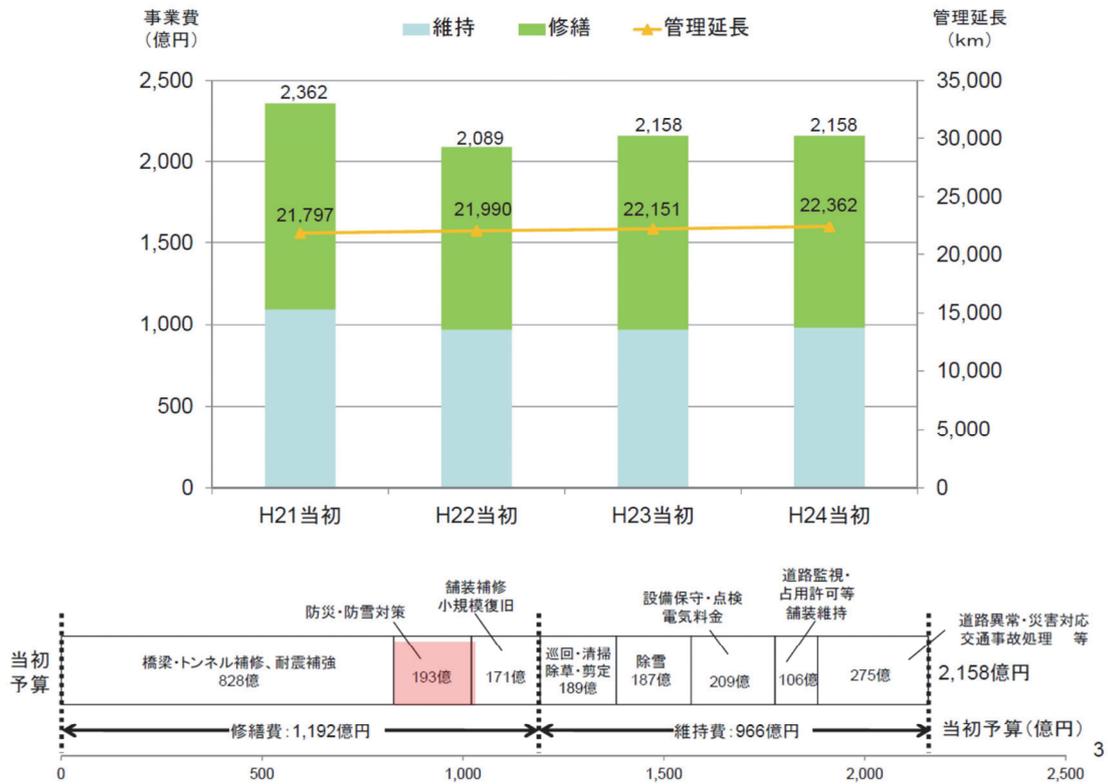


図-1.8 維持管理費と管理延長について<sup>9)</sup>

2012年 国土交通省 第1回国道(国管理)の維持管理等に関する検討会, 資料3, 国道(国管理)の維持管理等の現状と課題について, p.3

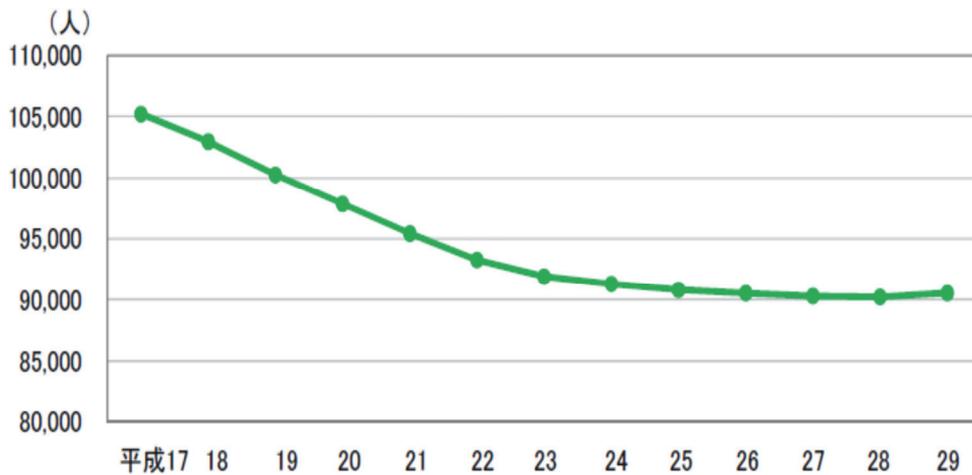


図-1.9 市町村における土木技術者数の推移<sup>10)</sup>

2018年 国土交通省 第20回メンテナンス戦略小委員会(第3期第2回) 配付資料, 資料3, 維持管理の現状と課題に対する取り組み状況, p.3

### 1. 1. 3 落石調査の現状

落石対策の基準書である落石対策便覧は、1983年に初版が発刊され以来、2000年及び2017年の改定を経ながら道路技術者の実務書として広く活用されており、我が国における落石対策技術の指標としての役割を果たしており、調査、設計、施工及び維持管理に関する最新の知見が盛り込まれている。

近年の地震や豪雨災害等の頻発同様に落石災害も多発しており、落石対策への取り組みが急がれている中、人手を要する個々の浮石や転石の大きさや分布を把握することは落石調査において必須であるものの、省人化や精度向上のため落石対策便覧(2017年p. 58)には、リモートセンシング技術を利用と記載があるが、具体的な手法や事例については記載がない。また、落石調査の対象となる現場は人が容易にたどり着けない高所が多く、調査精度の低下や安全性の問題も指摘されている<sup>11)</sup>。

一般に、高い高度から広域を計測対象とする航空レーザ測量では、密な植生に被覆された地表において高密度のレーザ点群が取得困難であるため、落石危険箇所を見出す観点から利用することは難しい(図-1.10)。このため近年利用され始めているUAV (Unmanned Aerial Vehicle, 以下UAV) 搭載レーザ測量による高精度測量データを用いて、斜面移動発生危険度評価や土砂災害の被害状況に関する地形情報の定量的かつ広域的な分析が行われつつあり<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup> 落石調査への利用も報告されている<sup>14)</sup>。しかしながら、落石が多発する斜面における浮石や転石の抽出精度や、机上判読と現地踏査の比較などに関する実務上の問題への適用性については十分に検討されていない。

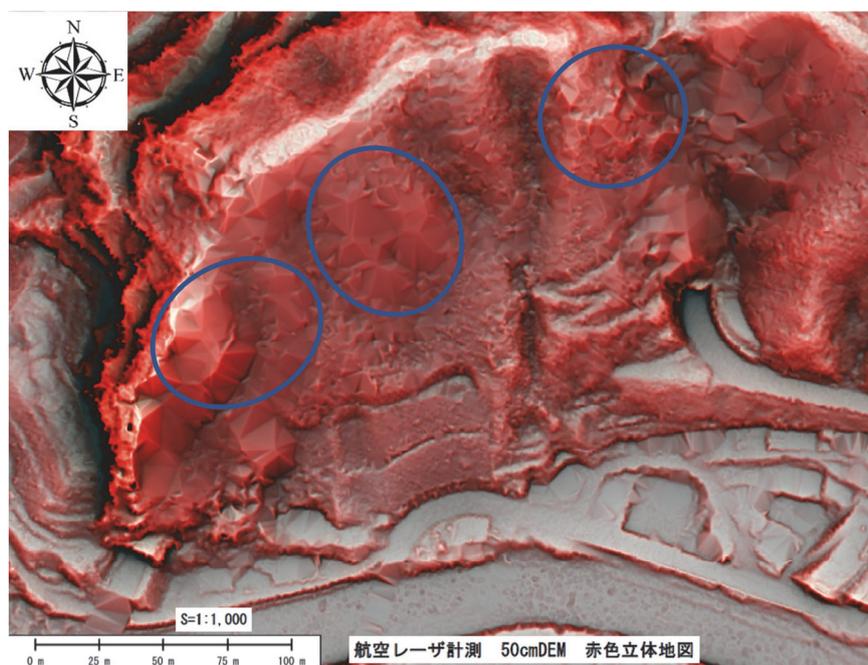


図-1.10 航空レーザ測量による赤色立体図(測量データは国土交通省酒田河川国道事務所提供)、青丸部は樹木が密な箇所を示す

### 1. 1. 4 落石調査におけるICTの利用状況

落石調査の際、落石対策便覧では、過去の被災履歴なども参考にするように定められている。しかしながら落石災害については、都道府県にて対応が異なり道路パトロールの際に発見した落石の履歴を場所や落石径などデータベース化している県(秋田県、島根県)は、データを基に落石対策の優先順位を決定しているが(図-1-11, 12, 13), その他の県では、各土木事務所内のパトロール日誌にのみ記載されている場合が多く、人的・物的被害が生じる落石災害が生じた既存箇所のみが危険性を認められ優先されるため、結果的に落石対策が後手になるような悪循環が生じている。

このため、国道・県道など社会生活に必要とされる主要な道路に関しては、落石の危険性を事前に把握できるような手法の確立が要望されている。

落石箇所における危険度把握、対策工検討などに関する研究はこれまでにされているが、危険性が確認できない区域における落石危険箇所の抽出や、その危険度を想定できる手法の研究についてはこれまで少ない。また、斜面調査では、急な斜面を登り広範囲の調査を行うが、近年のICT技術を用いて省人化の検討が行われている事例は少ないのが現状である。

#### アンケート調査結果

#### 巡視・点検・診断結果等の維持管理情報の管理方法

- 維持管理情報は、台帳として整理されておらず、委託業務の報告書として整理している自治体が多い
- このため、維持管理情報は紙資料での管理が最も多く、再利用可能なデータベースの形での管理は進んでいない

質問4 貴担当部署が管理する公共構造物・公共施設の巡視・点検、診断結果等の維持管理情報を、施設の台帳やそのほかの維持管理台帳等に整理していますか？(複数選択)

質問4	全体(N=5899)	道路(N=1326)	河川・ダム(N=700)	砂防(N=129)	下水道(N=1152)	港湾(N=169)	公園(N=1034)	海岸(N=151)	空港(N=39)	公営住宅(N=1198)
①施設台帳に維持管理情報を整理している	15%	19%	7%	8%	17%	5%	14%	14%	18%	16%
②維持管理情報を別の台帳等に整理している	24%	26%	18%	26%	19%	38%	25%	28%	36%	25%
③委託業務の報告書等として、施設毎でなく実施時期等により整理している	48%	55%	28%	20%	63%	43%	52%	32%	49%	40%
④整理していない	20%	16%	48%	36%	13%	15%	14%	21%	5%	19%
⑤その他	5%	3%	5%	12%	6%	5%	3%	11%	5%	5%

質問3 貴担当部署が管理する公共構造物・公共施設の巡視、点検、診断結果等の維持管理情報はどのように管理していますか？(複数選択)

質問3	全体(N=5899)	道路(N=1326)	河川・ダム(N=700)	砂防(N=129)	下水道(N=1152)	港湾(N=169)	公園(N=1034)	海岸(N=151)	空港(N=39)	公営住宅(N=1198)
①エクセル等の編集可能な形式で管理しており、情報の閲覧・検索・集計等が容易に可能な様式で管理(データベース化)している	20%	34%	6%	13%	23%	22%	13%	11%	10%	20%
②エクセル等の編集可能な形式で管理しているが、データベース化はしていない	30%	36%	19%	24%	25%	26%	33%	35%	46%	32%
③紙資料で管理している(報告書、調書のファイリングなど)	58%	49%	61%	44%	69%	50%	67%	45%	62%	53%
④報告書等の紙資料をPDF化(又は画像化)した電子データを管理している	7%	16%	6%	6%	4%	9%	6%	7%	8%	3%
⑤その他	8%	6%	21%	22%	6%	8%	3%	17%	8%	7%

図-1.11 維持管理情報のデータベース化状況

2018年 国土交通省 第20回メンテナンス戦略小委員会(第3期第2回) 配付資料, 資料3, 維持管理の現状と課題に対する取り組み状況, p. 8



### 1. 1. 5 落石防護柵の損傷実態と落石対策便覧との違い

落石対策の基準書である落石対策便覧は1983年に初版され、2000年、2019年と2度にわたり調査・設計・施工及び維持管理における最新の知見を盛り込み改定されてきている。  
15)、16)、17)

1950年代からの高度成長期より、多く設置されてきた落石対策用のひし形金網、ワイヤロープ及びH形鋼の支柱で構成された落石防護柵（以後、従来型落石防護柵と言う）の設計計算式は、初版から大きな変化は見られないが、被災した柵の変形や破損状況を見ると計算式とは異なる点がある。例えば、中間部の支柱の損傷は便覧ではまっすぐ15°倒れるとしているが(図-1.14)<sup>16)</sup>、被災した支柱はねじれながら変形をしている(写真-1.3)。また、金網を突き抜けているもの(写真-1.2)やワイヤが破断・脱落するもの(写真-1.3)など基準書通りではない損傷も多く見受けられ、想定外の挙動があると予想される。

また、従来型落石防護柵の実験は寒地土木研究所<sup>18)</sup>や右城氏<sup>19)</sup>など行っており、落石対策便覧との違いや整合性について報告されているが、柵高の違いによる挙動変化や補修及び補強に関する研究については行われていないのが現状である。

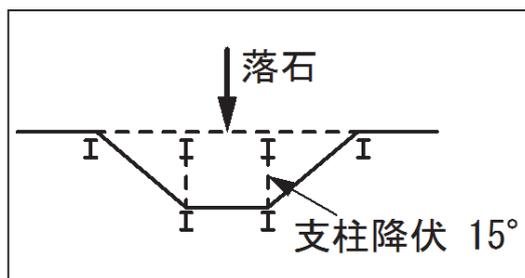


図-1.14 落石対策便覧における支柱転倒モデル  
(2000年：落石対策便覧，P.154図5-19より)



写真-1.1 被災した中間支柱の変形



写真-1.2 落石が金網を突き抜けた事例



写真-1.3 落石でワイヤが破断及び落石が柵を飛び越えた事例

## 1. 2 研究目的

近年の土砂災害の増加とともに増えている落石災害は、事前の兆候がなく突発的に発生し発生源が特定しにくい災害であることから事前に予防対策を行うことが困難な災害である。このような状況から落石災害への予防や防災への対策等を講じるにあたり、斜面調査を行い落石発生の危険箇所を特定し、落石災害時の危険性を把握できるようにすることは重要であると考えられる。

落石被害を受ける保全対象は、被災箇所と比較して対策区間（路線長）が長大であるため、個々に落石対策検討を行うと費用対効果が小さくなる。よって対象となる路線全ての想定される危険箇所について調査・危険度判定などの斜面調査を実施することは、緊急度や経済性などの観点から合理的ではなく、十分な落石調査がされていないのが現状である。

また、落石対策対応済みの箇所においても、設置から30～40年以上経過している箇所の総延長は、膨大な施設延長の更新時期を迎えている。

落石対策の設計指針である落石対策便覧は、1983年に初版が発刊されているが、それ以前については明確な設計指針がないことから、斜面調査を実施すると想定以上の落石が存

在することや、落石跳躍高さに対して柵高が不足している場合も被災事例からも知ることができる。

通常であれば新たな落石防護柵を設置するが、インフラ長寿命化基本計画（2013年11月29日）や国土強靱化基本計画（2018年12月14日閣議決定）などの社会背景から、既設のインフラストックを有効活用し長寿命化することも求められている。

そこで、本研究では、未確認落石危険箇所の抽出法等について既存調査法の精度向上を図れるような調査手法について省人化、効率化及び緊急対策の観点も盛り込み提案するとともに、既設落石防護柵の問題点を把握し、補強することで長寿命化を図れる方法についても提案する。

要約すると以下の通りである。

- (1) LP（レーザプロファイラ）データ、UAV（Unmanned Air Vehicle）レーザデータ、モバイルレーザデータ（iPad, iPhoneなど）を利用し、それぞれの特徴を生かして落石調査における利用方法の提案し、現状行われている専門技術者による落石危険箇所の抽出と落石発生源の把握手法の改善を行い、山地内に現在も残留する浮石や転石など未確認落石危険箇所を把握・減ずる手法を確立する。
- (2) 既設落石防護柵の被災事例の特徴を把握し、実物実験にてその損傷を再現するとともに補強法の検討を行い実規模実験にてその性能を検証及び補強方法を確立する。
- (3) 災害発生後の2次災害を防ぐ目的として、災害発生源へ人力運搬可能な応急対応技術を確立する。

以上のように、対象となる山間地域での未確認落石危険箇所・範囲を把握する方法と既設落石防護柵の補強方法の検討及び緊急対策工の提案を目的とする。

### 1. 3 論文の構成

本論文は図-1.15に示すような流れと概要で構成されている。

第2章は、落石被害の実情について調査し、現状の課題についてまとめる。本研究では、約8年間にわたる落石防護柵の被災事例をまとめ損傷形態およびその構造的な問題について明らかにする。

第3章は、落石調査におけるUAVレーザ測量を用いた落石箇所の特定の有用性について、公共LPデータとの比較を行うとともに、対象斜面を踏査し落石箇所を把握した上で、UAVレーザ測量結果と実際の踏査結果との比較を行うことで、落石調査における浮石や転石位置と調査漏れの精度向上と、踏査ルート及び急崖部の事前把握による省人化に役立つ

手法を明らかにする。

第4章では、近年発売されたiPad及びiPhoneに搭載されたLiDAR機能を利用して、UAVレーザ測量結果では得られなかった落石の大きさや浮石・転石の安定度に加え、落石を抱えた樹木との関係について、詳細な落石調査を行うことができることがわかった。

さらに、本調査手法は、一人でもできることから省人化も可能であることを提言する。

第5章は、既設落石防護柵の補強方法について、従来型落石防護柵と補強型落石防護柵の比較実験を行い、その有効性について明らかにし、強靱化及びインフラの長寿命化に向けての提言を行う。

第6章は、落石対策便覧において、落石防護柵に使用するひし形金網の吸収可能エネルギーが一律25 k Jとなっているが、ひし形金網の線径・材質及び形状によって吸収可能エネルギーは異なることが予想される。しかしながら、既往の研究報告例が少ないため、今回同一実験条件にて各種金網の実験を行い、それぞれの金網の特性の違いについて明らかにする。

第7章では、災害発生時の緊急対応として落石のみならず堆積した流木についてもその対策工の検討を行うとともに設計法・実証実験及び試験施工結果をまとめた2次流出防止工の有効性を明らかにする。

第8章では、本研究で得られた新たな落石調査手法及び既設落石防護柵の補強方法についてまとめた結論と、今後の課題について述べる。

【論文構成】

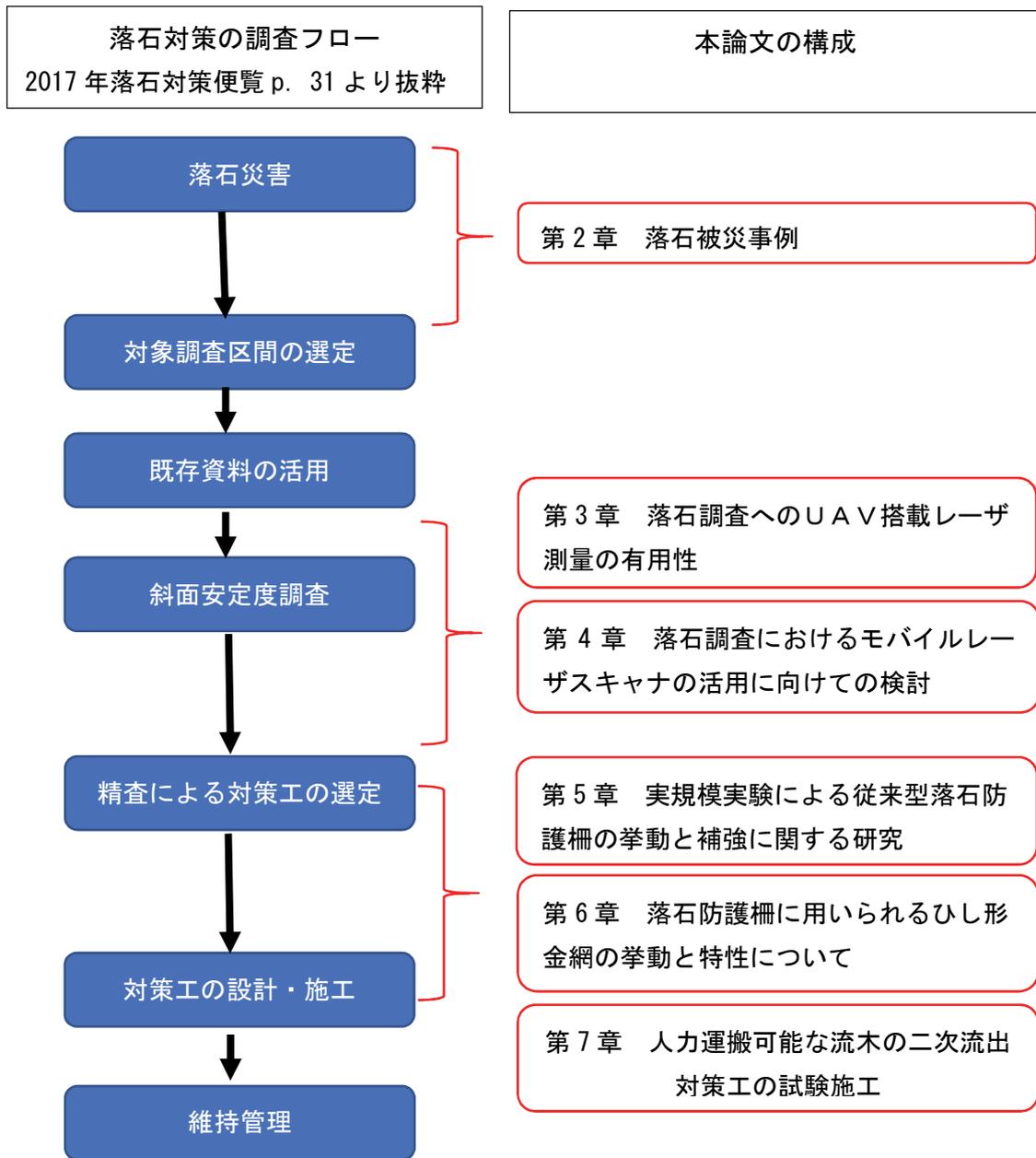


図-1.15 論文構成について

## 第2章 落石防護柵の落石被災事例

### 2.1 被災事例から見る構造上の問題点について

落石防護柵は山道を車で走るとよく見かけ、施工延長は、かなりの距離になることが推察される。筆者が過去8年間にわたり山道で遭遇した一般的な落石防護柵の損傷事例に加え、国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所と筆者所属の株式会社ビーセーフとの共同開発研究テーマである「落石防護網・柵の性能評価および補修・補強技術に関する研究」共同研究報告書（案）P.14～18に記載されている損傷事例を加え事例をまとめることで、落石防護柵の損傷原因や落石対策便覧との違いと、構造上の弱点を補強方法の検討を行った。

### 2.2 損傷事例

原因別にまとめると表-2.1の内容となり、損傷事例写真を表-2.2にまとめた。

表-2.1 落石防護柵の損傷発生箇所

損傷箇所	件数
中間支柱の変形	15
端末支柱の変形	10
金網の損傷	17
ロープの損傷	8
索端金具からのワイヤ脱落	5
柵の飛び越え	5
想定を超える落石	5
発錆	8
柵への堆積物	9
擁壁の損傷	5
柵高不足	10
合計	97

表-2. 2 落石防護柵損傷事例（抜粋）

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.1	高知県	R493	中間支柱変形	
No.2	山梨県	小関町	中間支柱変形	
No.3	静岡県	浜松市	中間支柱変形	
No.4	長野県	坂城町	端末支柱変形	

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.5	高知県	R493	端末支柱変形	
No.6	熊本	阿蘇 R57	端末支柱変形 ロープ・金網脱落	
No.7	—	—	端末支柱変形	
No.8	—	—	端末支柱変形	

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.9	高知県	R493	金網突き抜け	
No.10	富山県	南砺市	金網突き抜け	
No.11	-	-	金網突き抜け	
No.12	-	-	金網突き抜け	

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.13	高知県	R493	ワイヤロープ脱落	
No.14	高知県	R493	ワイヤロープ脱落 金網損傷	
No.15	長野県	木祖村	ロープ脱落	
No.16	—	—	ロープ脱落	

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.17	長野県	木祖村	落石飛び越え	
No.18	静岡県	熱海市	落石飛び越え	
No.19	愛媛県	八幡浜市	落石飛び越え	
No.20			想定外落石	

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.21	—	—	想定外の落石群	
No.22	—	—	積雪による変形	
No.23	高知県	R493	土砂 金網突き抜け	
No.24	—	—	発錆	

NO.	都道府県	場所	損傷内容	損傷写真
No.25	兵庫県	佐用町	擁壁損傷	
No.26	高知県	R493	支柱腐食	
No.27	兵庫県	夢前町	土砂堆積	
No.28	兵庫県	川西市	強度不足	

## 2. 3 考察

### 2. 3. 1 中間支柱の損傷における考察

もっとも多くの損傷した箇所は、中間支柱である。落石対策便覧<sup>16)</sup>では、図-2.1に示すような道路側にまっすぐ倒れることを想定しているが、損傷事例を見るとねじれながら倒れていることがわかる。実際に支柱を片持ち梁にて曲げ試験を行うと、損傷事例と同様ねじれながら曲がる事を再現した(写真-2.1)。これは、支柱に用いられているH鋼の断面性能に起因していると考えられる。

支柱に用いられているH形鋼の断面係数を比較すると、X軸とY軸の断面係数の比は、1:0.15であることから、強軸直角方向(Y方向)荷重をかけても、荷重方向が少しでもずれると弱軸側にねじれが発生し変形してしまう(表-2.2, 図-2.2)。この断面係数の差によって、ねじれながら変形すると言える。

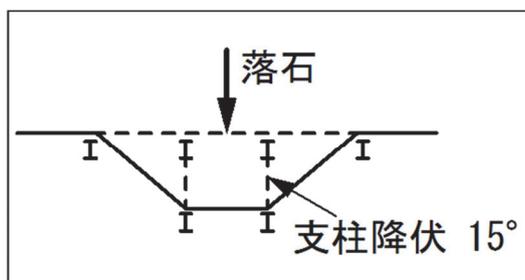


図-2. 1 落石対策便覧における中間支柱の変形モデル



写真-2. 1 支柱片持ち梁曲げ試験状況

表-2. 2 H形鋼 H200 × 100 の断面性能

標準断面寸法					断面積	断面二次モーメント		断面係数	
公称寸法	$H \times B$	$w$	$t$	$r$	$A$	$I_x$	$I_y$	$W_x$	$W_y$
(高さ×辺)	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
200 × 100	200 × 100	5.5	8	8	26.67	1,810	138	181	26.7
					比率	1.000	0.076	1.000	0.148
					塑性断面係数				
					$Z_x$		$Z_y$		
					cm <sup>3</sup>		cm <sup>3</sup>		
					200		41.4		
					比率	1.0	0.207		

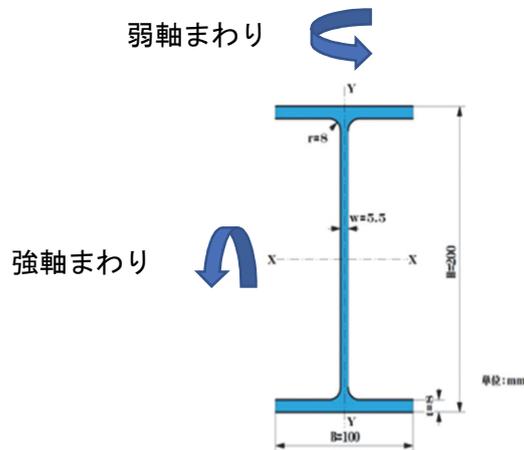


図-2. 2 中間支柱の断面形状

### 2. 3. 2 端末支柱の損傷の考察

端末支柱の変形状態は、ほとんどの場合柵面内方向へ倒れるように変形していた (図-2.2(左))。

これは柵上部に落石が衝突したワイヤロープにワイヤの破断荷重に近い荷重が加わることにより変形したことが考えられる (図-2.2(右))。

端末支柱には中間支柱で用いられている H 形鋼規格サイズ H200×100 より大きい断面である H175×175 などが用いられているが、H 鋼の弱軸方向へ荷重であるため 2 本分のワイヤ破断荷重 (159kN) を載荷すると変形してしまう。

被災事例よりワイヤの破断やワイヤを固定している金具からワイヤが脱落するなど、落石を受けるとワイヤ破断荷重相当の力が作用することがわかる。

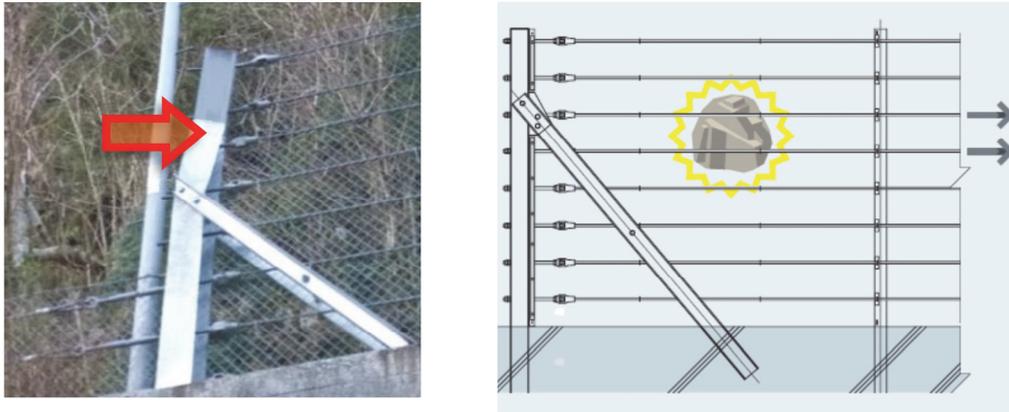


図-2.3 端末支柱の変形形態 (右)実際の変形状況柵面内方向に変形 (左)落石衝突時の端末支柱への作用力モデル

### 2.3.3 金網の損傷の考察

H鋼を用いた落石防護柵に用いられている金網は通常 $\phi 3.2$ の線径で網目サイズが $50 \times 50\text{mm}$ であり、落石対策便覧において金網の吸収可能エネルギーは $25\text{kJ}$ である<sup>17)</sup>。

損傷事例を見ると約 $200\text{mm}$ 以下の貫通したものや(表-2, No. 9), 金網だけが損傷したケースも見受けられた(表-2, No. 10, 11)。貫通した落石は径が小さいことから落石エネルギーは $10\text{kJ}$ 程度であり、高速で衝突し金網を突き破ったと考えられる。このように想定した落石エネルギー以下の場合でも落石防護柵が損傷し道路側に落石が到達する可能性がある。

また、金網の吸収可能エネルギーは $25\text{kJ}$ (2017年落石対策便覧, P. 186)としているが、詳しく実験を行われておらず設定根拠が明確になっていない。

現在、落石防護柵に使用されるひし形金網は多種にわたり素線、線径、形状など様々であるため、それぞれ金網の特性を調べるため比較実験が必要と考えられる。

### 2.3.4 ワイヤロープの損傷の考察

ワイヤロープの損傷を見ると端末部のワイヤを固定している金具(索端金具)からの脱落とワイヤロープが破断した事例が見られる。

例えば、落石対策便覧の計算式を用いて<sup>17)</sup>柵高 $2.0\text{m}$ 柵延長 $30.0\text{m}$ の場合のワイヤロープに作用する張力は、 $21.1\text{kN}$ であるが、ワイヤロープの破断荷重は $159\text{kN}$ であることからワイヤの破断には至らないはずである。しかしながら災害現場では破断していることから、想定を超える張力が発生することがわかった。

想定外も想定し、ワイヤロープの張力を低減させる必要があると考えられる。

### 2. 3. 5 柵の飛び越えについての考察

落石が柵を飛び越え、応急処置的に単管パイプなどを用いてかさ上げを行い対応している箇所が多くみられた。

落石対策便覧の初版が 1983 年に制定されたが<sup>15)</sup>、それ以前については基準書がないため柵高の設定根拠がなかったため、落石防護柵の柵高が不足している箇所が多くあると考えられる。

また、現在においても斜面の凹凸によっては想定を超える（通常落石の跳躍高さは 2.0m としている）跳躍により柵を超える事例もある。

このような潜在的な柵高不足の箇所は多数存在すると考えられ補修する必要があると考えられる。

### 2. 4 まとめ

落石防護柵の被災事例を原因別に整理し、損傷要因を分析したがまとめると以下の通りである。

- (1) 中間支柱は基準書のようにまっすぐ倒れず、ねじれながら変形する  
(表-2.2 写真 No. 1, 2, 3 : 写真-2.1 : 図-2.2)
- (2) 端末支柱は面内方向に変形する (表-2.2 写真 No. 4, 5, 6, 7, 8 : 図-2.3)
- (3) 落石の衝突により金網を突き抜けが起きる場合がある  
(表-2.2 写真 No. 9, 10, 11, 12)
- (4) 想定以上の張力によりワイヤロープが破断・ワイヤ固定金具からの脱落が起きる  
(表-2.2 写真 No. 12, 13, 14, 15)
- (5) 柵を飛び越える落石がある (柵高不足) (表-2.2 写真 No. 17, 18, 19)

であった。

(2) については 2019 年の落石対策便覧の改定において、端末支柱の性能照査方法が明記された<sup>17)</sup> ことにより、今後の設計においては変形は抑えられると思われる。改定内容は、端末支柱に落石衝突位置のワイヤ 2 本に降伏張力を与え、許容応力範囲ないであるか照査する必要がある。

しかしながら、既設落石防護柵を利用し補修・補強を行う際は、端末支柱の照査は必要であるため基準を満たすよう端末支柱に働くワイヤ張力を小さくする必要があり、緩衝装置という一定の力でスリップする張力を低減する装置が必要と考えられる。

以上これらの損傷事例から既設落石防護柵の損傷要因をまとめることにより、補修または補強すべき点について明らかにすることができたと考えられる。

### 第3章 落石調査へのUAV搭載レーザ測量の有用性

#### 3.1 UAVレーザ測量を利用した落石調査の目的

地震や豪雨災害等の頻発により、落石災害が多発しており、落石対策への取り組みが急がれている。落石対策をする上で個々の浮石や転石の大きさや分布を把握することは必須であり、斜面全体を踏査してこれらの調査を行うこととなっている<sup>17)</sup>。また、落石調査において現地の被災履歴、防災カルテ、地質図や地形図をもとに基本調査や安定度調査が行われるが<sup>17)</sup>、特に近年入手が容易となった航空レーザ測量データを用いて資料調査を行うことで急崖部の抽出や露岩の位置等を空中写真と組み合わせることで推定することが可能である。<sup>11), 20), 21)</sup>

一方、落石調査の対象となる現場は、人が容易にたどり着けない高所が多く、調査精度の低下や安全性の問題も指摘されている<sup>11)</sup>。また、一般に高い高度から広域を計測対象とする航空レーザ測量では、密な植生に被覆された地表において高密度のレーザ点群が取得困難であるため、落石危険箇所を見出す観点から利用することは難しい(図-3.1)。このため近年 UAV (Unmanned Aerial Vehicle, 以下 UAV) 搭載レーザ測量による高精度測量データを用いて、斜面移動発生危険度評価や土砂災害の被害状況に関する地形情報の定量的かつ広域的な分析が行われつつあり<sup>12), 13)</sup>落石調査への利用も報告されている<sup>14)</sup>。しかしながら、落石が多発する斜面における浮石や転石の抽出精度や、机上判読と現地踏査の比較などに関する実務上の問題への適用性については十分に検討されていない。

本章では、過去に降雨や地震による落石災害の発生している山形県鶴岡市五十川地区を対象に現地調査を行い、UAVレーザデータによる赤色立体地図を作成し、落石調査の判読に適したグリッドサイズの検討を行った。さらに、レーザ測量結果による机上判読の結果と現地調査の結果を比較することで、判読の精度を検証した。以上を踏まえて、落石調査におけるUAVレーザデータの活用法や有用性及び省人化について検証を行った。

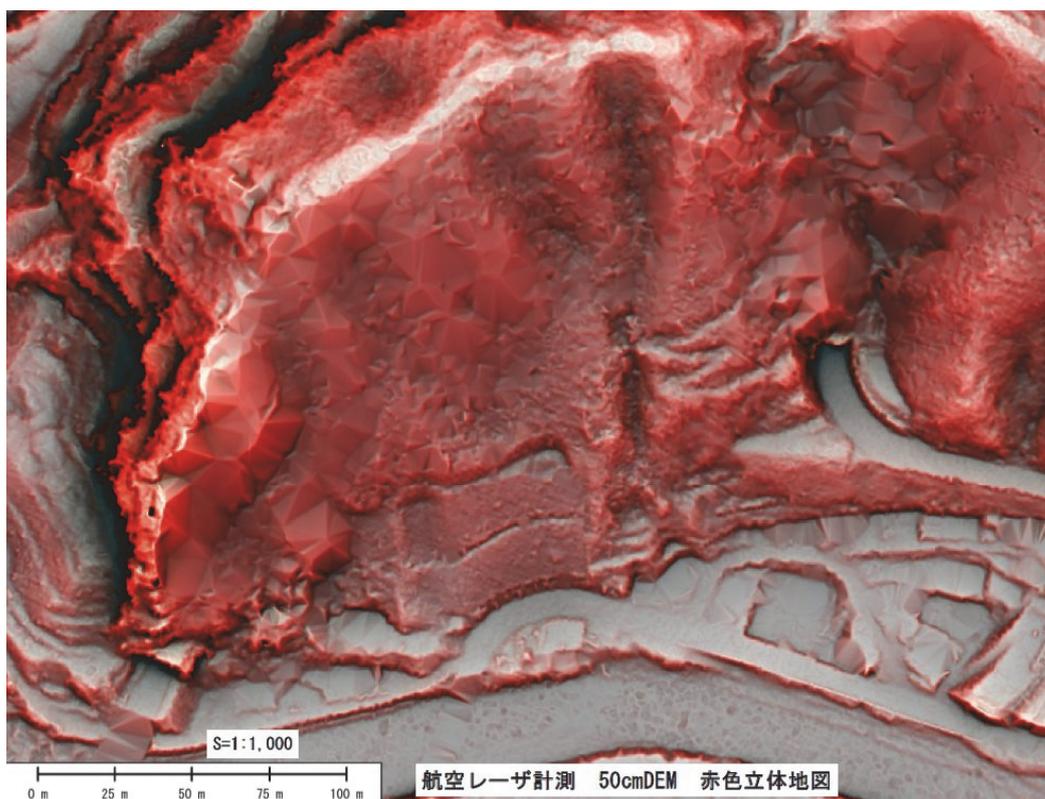


図-3. 1 五十川地区周辺の航空レーザ測量による赤色立体図(測量データは国土交通省酒田河川国道事務所提供)

### 3. 2 調査地の概要

調査地は山形県鶴岡市五十川の右岸に位置し、標高 10～120m 程度の山腹斜面である(図-3. 2 及び図-3. 3a)。五十川地区は朝日山地から日本海へ注ぐ河川の一つである五十川の河口付近に位置し、周辺では海岸まで迫る山地の西端が海側に張り出している。周辺の地質は主に新第三系中新世の堆積岩類であるが、本調査地は沿岸に分布する中新世に貫入した板状節理が発達する玄武岩類(温海ドレライト)の領域の北端にあたる(大沢ほか, 1988)(図-3. 2)。

山頂部では、基盤岩の風化が進んだ風化層からなる緩傾斜( $<30^{\circ}$ )面が分布する。この緩傾斜面の下部には、遷急線や滑落崖を境に急傾斜地( $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ )になり(図-3. 3b), 崖錐状堆積物や小沢が分布し、古い転石群が多く、古い崩壊によって形成された滑落崖や浅い谷地形が認められる(図-3. 3a)。

近年では、1967年8月に豪雨による崩壊(地元住民からの聞き取りにより)や2019年6月18日の地震による落石(図-3a: 赤線), 2020年7月7日の降雨による落石(図-3. 3a: 青線)が発生している。斜面の植生は、樹齢約50年生のスギ人工林と広葉樹林である。

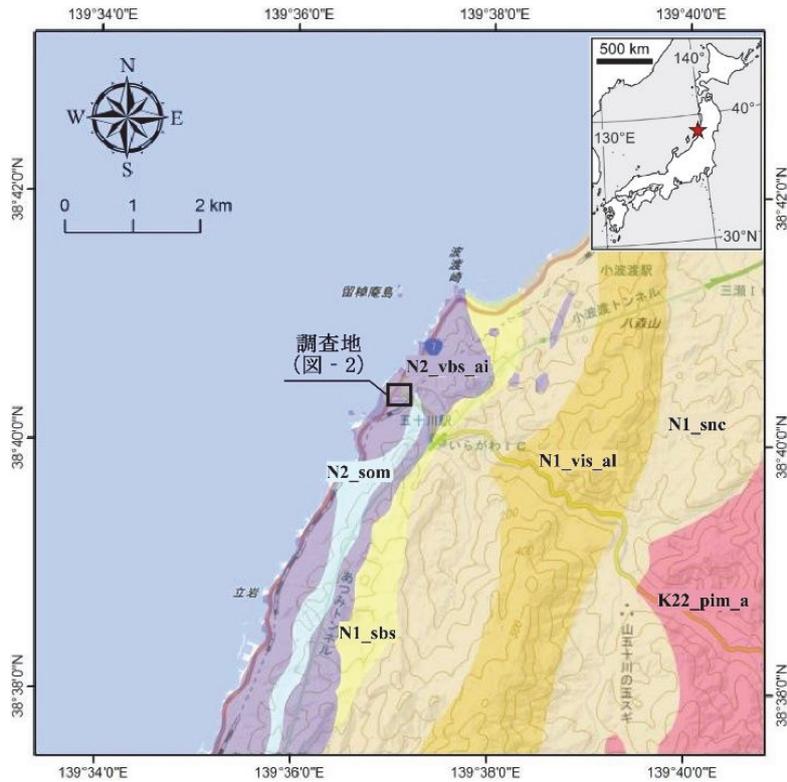


図-3. 2 五十川地区周辺の地質（地理院地図およびシームレス地質図より作成）  
 地質凡例はシームレス地質図 Ver. 2 の統一凡例による。ここでは、N2\_vbs\_ai は玄武岩貫入岩（温海ドレライト），N2\_som は鼠ヶ関層珪質泥岩，N1\_sbs は早田層砂岩・泥岩，N1\_snc は五十川層礫岩・砂岩および一霞層礫岩，N1\_vis\_al は温海層安山岩溶岩・火砕岩，K22\_pim\_a は西田川花崗閃緑岩を示す<sup>22)</sup>。

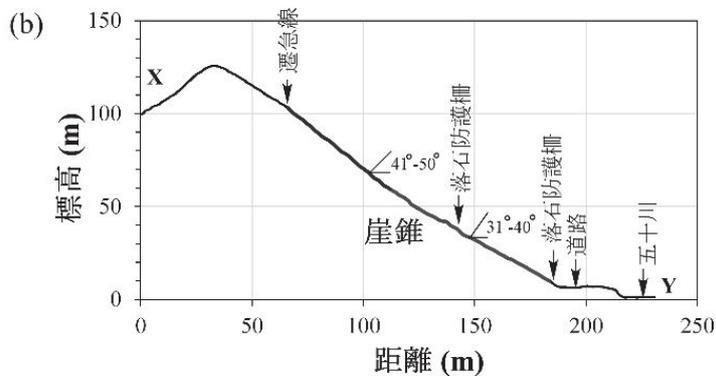
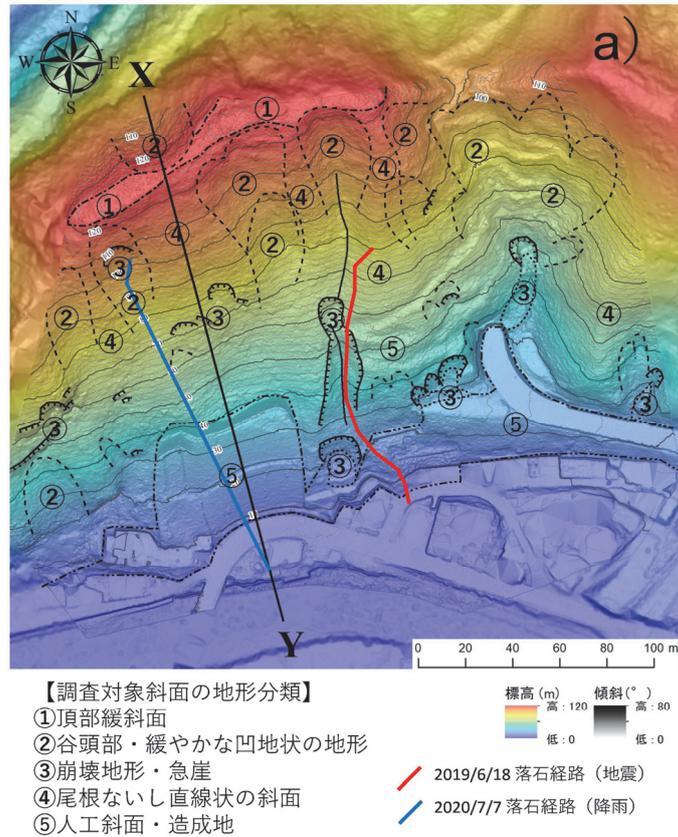


図-3.3 調査地の地形

a) 平面図と近年発生した落石経路, b) 縦断面図 (XY 断面))

### 3. 3 調査地における落石の発生状況

#### 3.3.1 地震による落石発生状況

2019年6月18日に山形県沖でマグニチュード6.7の地震が発生し、鶴岡市五十川地区では最大震度5強が記録された<sup>23)</sup>(気象庁, 2019), 400~750galの最大加速度の地震動(防災科学技術研究所, 2019)<sup>23)</sup>に伴い調査地付近でも斜面崩壊や落石が多く発生している<sup>24)</sup>。その中でも、調査地において落下高さ約75mから落石(1.0m×0.9m×0.8m)が民家近くまで到達した災害が発生した。落石の発生源は、五十川から比高約80mの斜面上部の

転石で、落石の抜け出しによる崩壊跡が確認された（写真-3.1）。この斜面は斜面勾配最大約  $50^{\circ}$  の凸型の斜面をなしており、直径 0.5m～4.0m 大の転石から構成される崖錐性堆積物が見られる。



写真-3. 1 地震による落石の発生源の崩壊跡



写真-3. 2 雨による落石の発生源の崩壊跡

### 3.3.2 降雨による落石発生状況

2020年7月7日21時頃に降雨に伴って長径約2mの落石が五十川の近くまで到達した。

発生源は、五十川から比高約 100m 上方の旧崩壊跡滑落崖であり、岩盤の剥離跡 (1.8m×1.5m×0.8m) と思われる形跡が認められた (写真-3.2)。

また、剥離跡の前には、幹が前に倒れ、根が露出している倒木がある。つまり、落石の発生前に、岩塊を覆った樹木の根系が、縦亀裂に侵入したことが示唆され、この亀裂によって分離した岩塊が不安化して抜け落ちて落石となったと考えられる。よって、今回の落石の誘因は、風化により形成された被殻上の岩が縦亀裂に侵入した樹木根侵入により分離され、更に当日の雨と風が加わり耐え切れず落石化したものと推察される。

### 3. 4 UAV レーザ測量と落石調査方法

#### 3. 4. 1 UAV レーザ測量

使用したUAVとレーザ機器の諸元および計測諸元を表-3.1に示す。計測は2020年4月16日 (天候晴れ, 風向西向き, 風速1.86m/秒, 気温10.6℃, 気圧1020hPa: 現地計測値) に行い, 計測時間は30分であった。

表-3. 1 UAV とレーザ機器の諸元

機器	機器名	細目	仕様
GNSS 受信機	NovAtel OEM617	観測間隔	1 秒
		受信周波	2 周波
IMU	PHOENIX IMU-44	測位精度	0.02m
		速度精度	0.010m/sec
		姿勢精度	0.005deg
		方位精度	0.009deg
		出力レート	200Hz
レーザ測距 装置	RIEGL miniVUX-1 UAV	計測精度	30mm
		最大計測距離	250m(反射率 60%)
		パルスレート	100,000 回/秒
		レーザ照射角	360°
		レーザ拡散角	1.6×0.5mrad
		マルチパルス	あり(5 回)
UAV 機体	DJI MATRICE 600PRO	飛行可能時間	18 分
		自動飛行機能	あり
		最大飛行対地高度	150m
		運行可能最大風速	離陸時 5m/秒

レーザ測量で得られた点群データの地盤到達率を図-3.4 に示す。ここで、点群データの地盤到達率は「任意のサイズの判定グリッドにおけるグラウンドデータの得られる分割グリッドの割合」と定義される<sup>25)</sup> (日本測量調査技術協会, 2008)。岡本らは、航空レーザ測量による計測を念頭に判定グリッドを 5m 四方, 分割グリッドを 1m 四方とすることを提案している<sup>26)</sup>。ここでは、UAV レーザ測量であることや直径 1m 以下の転石等も判読対象と

することを考慮して判定グリッドを 1m 四方，分割グリッドを 20cm 四方として計算を行った。

その結果，計測範囲全体における平均の地盤到達率は 57.0%であったが，その分布は地表面の植生の影響により大きく異なっている。すなわち，裸地や草本の範囲ではほぼ 100%の地盤到達率が得られるのに対し，林地ではおおむね 50%以下の値となっており，特に樹木が密に分布する箇所では 20%程度の範囲もみられる。

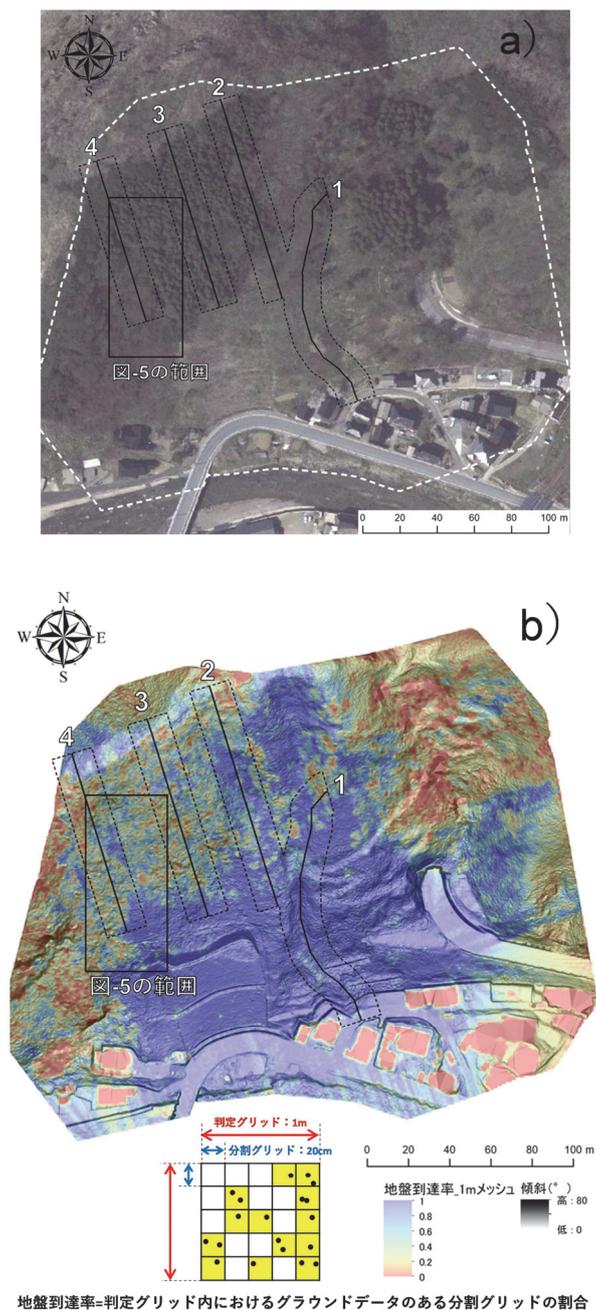


図-3. 4 現地調査位置と UAV レーザ測定の地盤到達率およびオルソ画像の対比 a) 地理院地図シームレス写真に現地調査位置を加筆, b) UAV レーザ測定の地盤到達率)

後述する現地調査の実施範囲内における地盤到達率の平均値は、全体で 63.5% (測線 1 で 89.9%, 測線 2 で 69.8%, 測線 3 で 48.8%, 測線 4 で 46.5%, 図-5 の範囲で 51.9%) であった。

### 3.4.2 机上判読と現地調査

3.4.1 で得られたグラウンドデータを用いて、グリッドサイズの異なる 4 種類の DEM (1m, 50cm, 20 cm, 5cm) を作成した。また、比較のために航空レーザ測量により得られたグラウンドデータ (国土交通省酒田河川国道事務所提供) を用いて 50cm の DEM を作成した。机上判読には、これらの DEM により作成した赤色立体地図 (アジア航測株式会社特許 3670274, 4272146) を用いた。

机上判読による転石等の抽出と現地調査による確認は、図-3.5 の範囲と図-3.4 に示す 1 ~4 の調査測線を中心とした幅 20m の範囲で行った。このうち測線 1 は 2020 年の地震時に発生した落石の経路である。なお、図-3.5 の範囲ではグリッドサイズの検討を行い、測線 1~4 では、後述する 3.5.1 で得た結果を踏まえて、グリッドサイズ 20 cm の赤色立体地図を用いた判読を行った。

現地調査では、転石等の直径がおおよそ 0.5m を超えるものを対象とし、その位置を測線沿いに設置した測量杭からの距離と方向により特定した。併せて、それらの大きさと安定度を記録した。なお安定度は、落石対策便覧 ((公社) 日本道路協会, 2017) に基づき評価した。

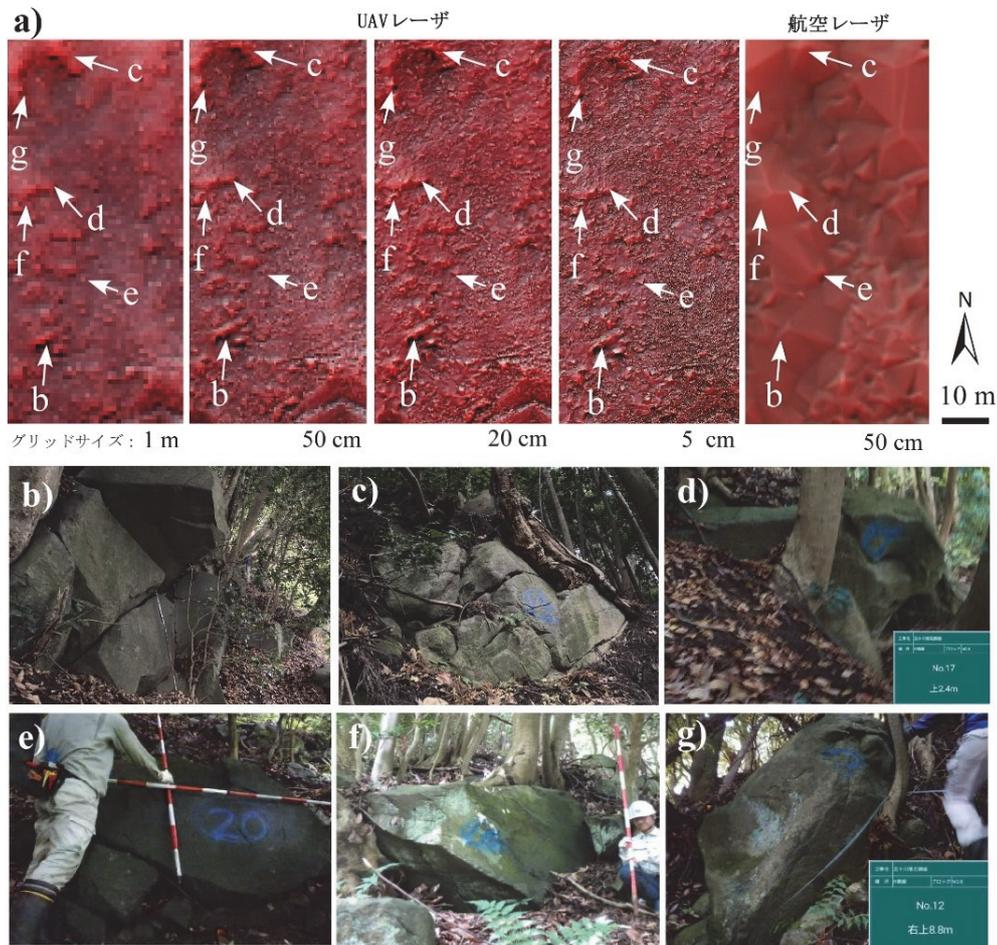


図-3. 5 赤色立体地図と浮石と転石の代表例 (a) グリッドサイズの違いUAVレーザデータや航空レーザデータ(2010年)から作成された赤色立体地図の比較 (b) 浮石の一例 (3.5m × 2.8m × 1.5m) (c) 浮石の一例 (1.5m × 7.0m × 1.0m) (d) 転石の一例 (2.4m × 4.0m × 2.0m) (e) 転石の一例 (1.5m × 2.0m × 0.8m) (f) 転石の一例 (7.0m × 10.0m × 1.0m) (g) 転石の一例 (2.0m × 1.7m × 0.8m) a)は降雨による落石の崩壊源とその周辺の赤色立体地図。その範囲は図-4に示す

### 3. 5. 落石（浮石・転石）机上判読への利用

#### 3.5.1 グリッドサイズの検討

図-3.5aは、グリッドサイズの異なるDEMから作成された赤色立体地図である。図-3.5aの範囲では、浮石(図-3.5bとc)や転石(図-3.5d-g)が分布しており、これらの分布箇所は赤色立体地図では“円錐状凸型”の地形に特徴づけられ、グリッドサイズ50cmと20cmでは、この微地形が明瞭に表現されている。ただし浮石タイプか転石タイプの区分はできない。一方、グリッドサイズ1mと5cmでは、グリッドサイズ50cmや20cmと比べ、1mでは凸部分が不明瞭であり、5cmでは細かい凹凸まで表現されているため、かえって分かりにくい。したがって、斜面上の転石や浮石を机上で抽出するには50cmもしくは20cm

グリッドサイズで行うことが望ましい。一方、航空レーザデータから作成された赤色立体地図を見ると、これらの地形は不明確であった。これは航空レーザ測量の高度に対して杉が密な植生となっているためと推察される。

### 3.5.2 机上判読の抽出率

図-3.6 と表-3.2 に落石調査範囲における机上判読と斜面踏査の結果を示す。踏査で確認した転石・浮石（以下、転石等と略す）箇所との比較により、机上判読における抽出率は、落石調査範囲1では机上判読で見つかったものが34箇所、そのうち誤判読が2箇所、ほかに見落としが5箇所であり、結果として37箇所あるうちの32箇所が机上判読で抽出可能であった。



写真-3. 3 斜面の不陸を転石・浮石と判断した地形例  
(点線は地形表面の不陸を示す)

表-3. 2 落石調査範囲における落石の調査結果と赤色立体地図を用いた落石箇所抽出率

調査範囲 No	落石No	大きさ	安定度	赤色立体地図 有無	現地浮石転石 有無	調査範囲No	落石No	大きさ	安定度	赤色立体地図 有無	現地浮石転石 有無
1	No.1	1.0×1.1×0.6	2	○	○	3	No.50	5.3×3.5×1.6	3	○	○
	No.2-1	0.9×0.5×0.7	3	○	○		No.51	4.0×3.0×2.0	3	○	○
	No.2-2	0.6×0.5×0.5	3	○	○		No.52	15×1.5×1.6	3	○	○
	No.2-3	0.6×0.5×0.7	3	○	○		-	-	-	○	×
	No.3	0.8×0.6×0.3	1	○	○		No.53	1.5×0.9×0.4	2	○	○
	No.4-1	1.6×0.9×1.3	2	○	○		No.54	1.6×1.3×0.8	3	○	○
	No.4-2	0.5×0.6×0.6	3	○	○		No.55	1.3×1.0×1.2	1	○	○
	No.4-3	0.6×0.7×0.7	3	○	○		-	-	-	○	×
	-	-	-	○	×		No.56	2.0×1.4×1.6	1	×	○
	No.5	0.9×0.9×0.6	1	○	○		No.57	1.6×2.0×1.5	2	○	○
	No.6	0.7×0.8×0.3	3	○	○		No.58	2.2×1.4×1.4	2	○	○
	-	-	-	○	×		No.59	1.9×1.1×1.4	1	○	○
	No.7	1.0×1.0×0.5	3	○	○		No.60-1	1.2×3.0×1.5	2	○	○
	No.8	1.0×1.0×1.0	3	○	○		No.60-2	0.7×2.3×1.0	2	○	○
	No.9	0.3×0.7×0.4	3	×	○		No.60-3	1.3×1.9×1.0	2	○	○
	No.10	0.6×0.4×0.3	1	○	○		No.60-4	0.6×1.1×1.0	2	○	○
	No.11	0.3×0.4×0.3	2	×	○		No.60-5	1.0×2.0×1.0	2	○	○
	No.12	1.1×0.9×0.6	1	○	○		No.61	2.0×1.8×1.7	2	○	○
	No.13	0.5×0.5×0.4	3	○	○		No.61-1	1.4×0.7×0.9	3	○	○
	No.14	1.1×0.8×1.0	1	○	○		No.61-2	1.0×0.6×1.1	3	○	○
	No.15	1.0×1.0×0.5	1	○	○		No.62	1.6×1.1×1.1	4	○	○
	No.16	0.9×0.7×0.4	1	○	○		No.63	1.6×1.1×1.1	4	○	○
	No.17	0.8×0.8×0.4	1	○	○		No.64-1	1.1×0.7×0.9	3	○	○
	No.18	0.8×0.9×0.5	1	○	○		No.64-2	0.7×0.5×0.7	2	○	○
	No.19	0.6×0.4×0.4	1	○	○		No.64-3	0.7×1.0×0.5	2	○	○
	No.20	0.5×0.6×0.6	1	○	○		No.65	1.2×0.7×0.9	1	○	○
	No.21	0.6×0.4×0.2	1	○	○		No.65	1.0×0.6×0.9	3	○	○
	No.22	1.5×0.7×0.5	1	○	○		No.67	1.2×1.0×0.7	3	○	○
	No.23	1.2×0.8×0.5	1	○	○		No.68	0.8×1.0×0.2	5	×	○
	No.24	0.9×1.0×0.5	1	○	○		-	-	-	○	×
	No.25	0.3×0.7×0.7	1	○	○		No.69	0.9×0.7×0.2	5	○	○
	No.26	0.6×0.3×0.2	1	×	○		No.70	0.8×0.6×0.5	3	○	○
	No.27	1.2×1.2×0.2	1	○	○		No.71-1	0.6×0.5×0.5	2	○	○
	No.28	0.5×0.9×0.4	1	○	○		No.71-2	0.5×0.4×0.4	2	○	○
	No.29	0.3×0.7×0.3	2	○	○		No.71-3	0.4×0.5×0.3	2	○	○
No.30	1.2×1.2×1.1	5	○	○	No.72	0.8×0.8×0.8	5	○	○		
No.31	0.9×0.5×0.5	4	○	○	No.73	1.0×0.7×0.7	5	○	○		
No.32	0.6×0.6×0.5	3	×	○	No.74	1.1×1.7×0.9	5	○	○		
No.33	0.35×0.4×0.3	3	×	○	No.75	2.1×2.1×1.2	3	○	○		
No.34	0.7×0.6×0.4	2	○	○	No.76	0.7×0.7×0.7	1	○	○		
No.35	1.2×0.8×0.4	1	○	○	No.77	2.0×1.0×0.6	3	○	○		
No.36	1.0×0.7×0.8	1	○	○	No.78	3.5×2.8×1.5	3	○	○		
No.37	1.1×0.7×0.5	1	○	○	-	-	-	○	×		
No.38	1.2×1.2×0.5	1	○	○	No.79	1.5×1.7×1.2	2	○	○		
No.39	2.5×2.5×1.0	1	○	○	No.80	1.5×2.0×0.8	2	○	○		
No.40	0.6×0.4×0.5	1	×	○	No.81	2.6×2.4×0.7	3	○	○		
No.41	1.5×0.7×1.5	1	○	○	No.82	2.1×2.4×1.1	3	○	○		
No.42	1.0×1.0×0.5	2	○	○	No.83	1.6×1.4×0.6	2	○	○		
No.43	1.7×1.0×0.7	2	○	○	No.84	1.6×1.8×1.2	2	○	○		
-	-	-	○	×	No.85	7.0×10.0×1.0	3	○	○		
No.44	1.2×1.2×1.2	1	○	○	No.86	2.4×4.0×2.0	3	○	○		
No.45	1.0×1.5×1.0	2	○	○	No.87	2.4×4.0×2.0	2	○	○		
No.46	4.5×2.7×1.4	2	○	○	No.88	1.5×1.9×1.0	2	○	○		
No.47	3.0×2.1×2.5	2	○	○	No.89	2.6×1.3×0.8	3	○	○		
No.47	1.8×1.3×0.7	2	○	○	No.90	2.0×1.7×0.8	2	○	○		
No.48	1.8×1.3×0.7	3	○	○	No.91	2.0×2.0×1.0	2	○	○		
No.49	15.0×15.0×1.0	3	○	○	No.92	1.5×7.0×1.0	2	○	○		

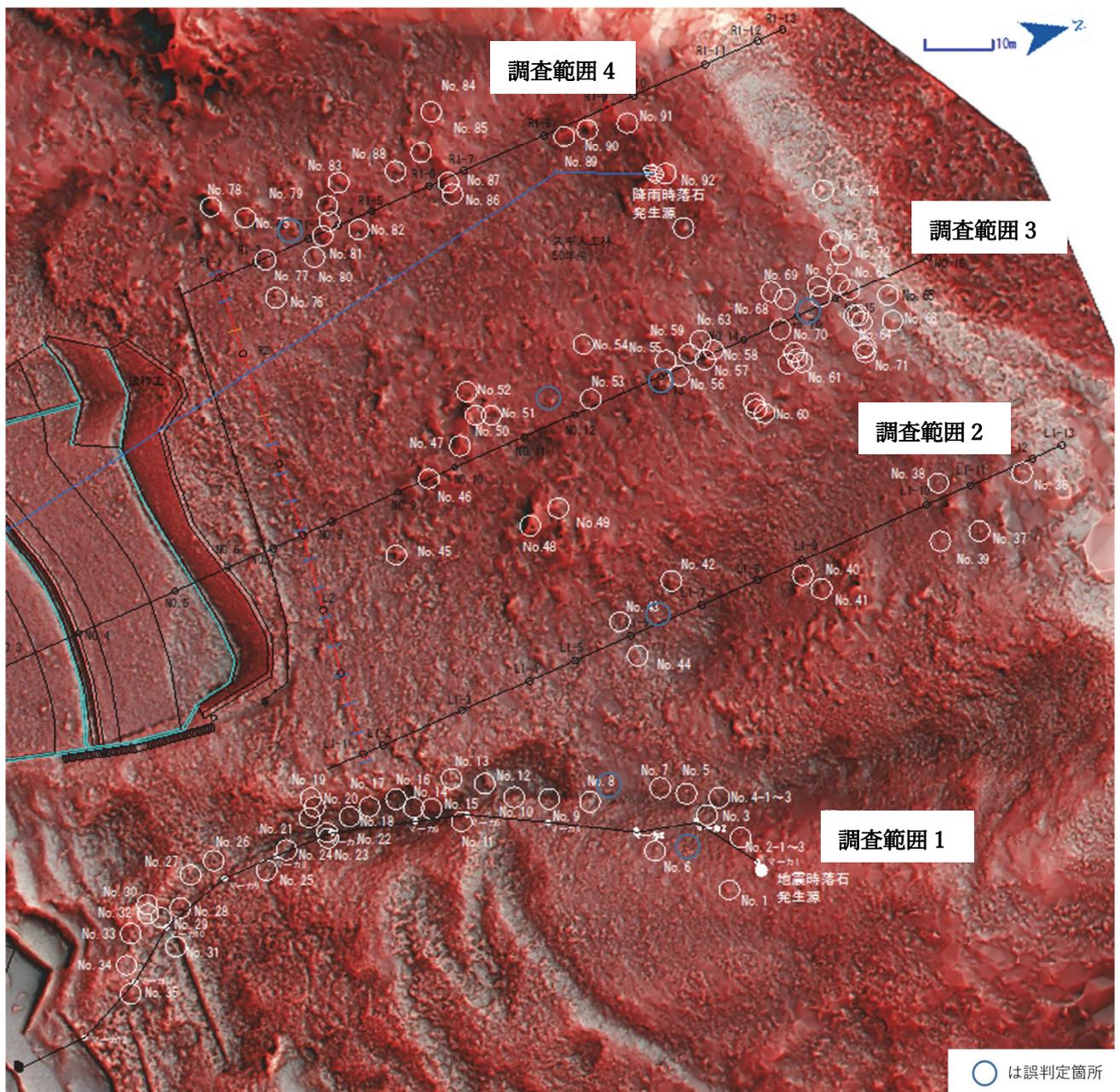


図-3. 6 落石調査範囲1~4における落石の分布（グリッドサイズ 20 cm）

抽出率は 86.4%（32 箇所/37 箇所）となった。抽出できなかった転石等を見ると、大きさが 1 辺 1.0m に満たないもので、かつ地中に 2/3 以上埋もれたものがほとんどであった。

また、赤色立体地図上では転石等のように見えるが、現地を調査すると斜面の不陸であったものも見受けられた(写真-3.3)。

これに対し落石調査範囲 2~4 では、机上判読で見つかったものが 70 箇所、そのうち誤判読が 5 箇所、ほかに見落としが 3 箇所であり、実際には 68 箇所あるうちの 65 箇所が抽出された。抽出率は 95.6%（65 箇所/68 箇所）となった。抽出した落石は、比較的大き

な落石が多く、1m 以下のものが少なかったため、落石調査範囲 1 に比べ抽出率が高かったと考えられる。

以上より、大きさが 1m 以上の転石等に関して落石調査の事前検討としては赤色立体地図などの微地形強調図を用いてその位置を把握することは有効であると考えられる。また、この手法を用いることにより、高い精度で落石位置を特定できるため、落石エネルギー算出や落石影響範囲（落石経路）などの落石対策を検討する上で有効なデータとなる。ただし、落石の大きさや安定度までは判読できないため、現地にて計測する必要がある。

### 3.6 データの有効活用

UAV レーザ測量の結果から任意の位置の断面を抽出することが可能である。今回実際に落石が発生した地震時と降雨時の落石経路の断面を抽出し、実際の停止位置とシミュレーション結果の比較を行った。

地震時による落石シミュレーション結果を図-3.7 及び図-3.8 に示す。シミュレーションに使用する変数である等価摩擦係数は、落石対策便覧より斜面状態から 0.35 とした。

その結果は半数以上が家屋へ衝突する結果となり(図-3.7)実際の停止位置である家屋手前とは異なる結果となった。また、斜面調査を行った際の転石位置をグラフに重ね合わせると、停止位置が発生源から水平距離が 90~110m 付近で多いことから、実際の等価摩擦係数はもっと大きいと推察される。

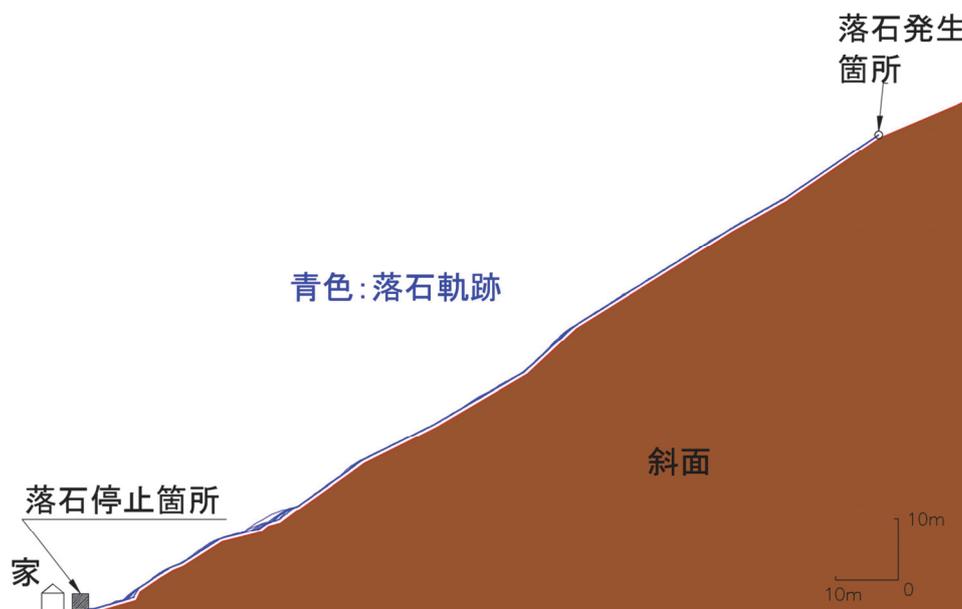


図-3.7 落石経路の断面を抽出した落石シミュレーション結果

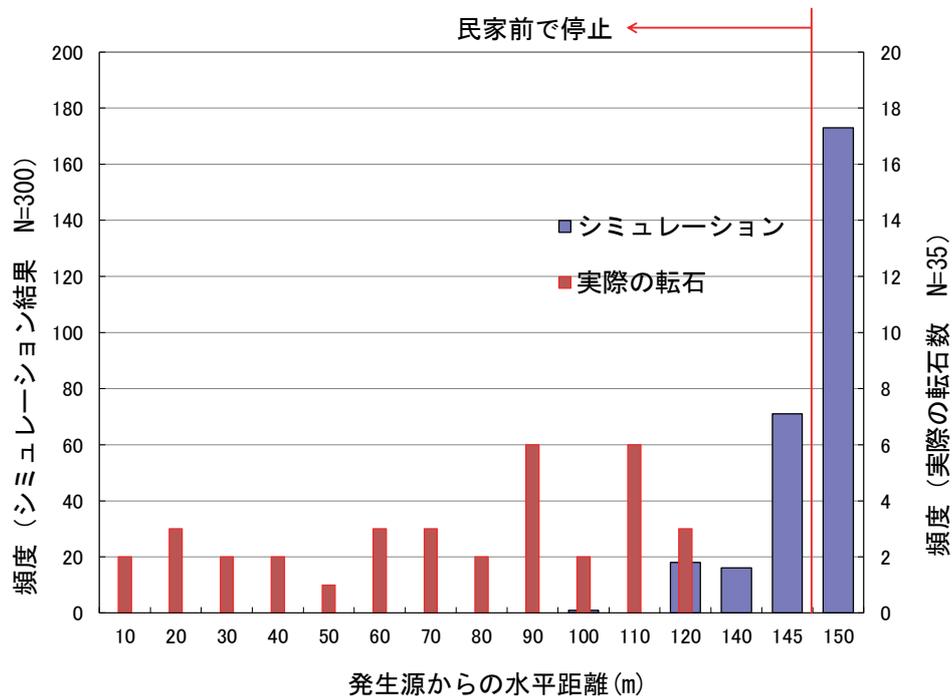


図-3. 8 落石シミュレーション結果(停止位置)  
 落石サイズ (1.0×0.9×0.8m, W= 18.7kN)

次に降雨時に発生した落石箇所におけるシミュレーション結果(図 3.9, 3.10)は、ほぼすべての落石が道路上に落下する結果となり、今回の落石と同様な結果が得られた。また、今回の落石経路の延長線上にある五十川の護岸には、上流から流れてきた石とは異なる角張った石が数多く見受けられた。これらの石は斜面からの落石と考えられ、また落石経路の斜面には転石がほとんどないことからシミュレーション結果と一致する。

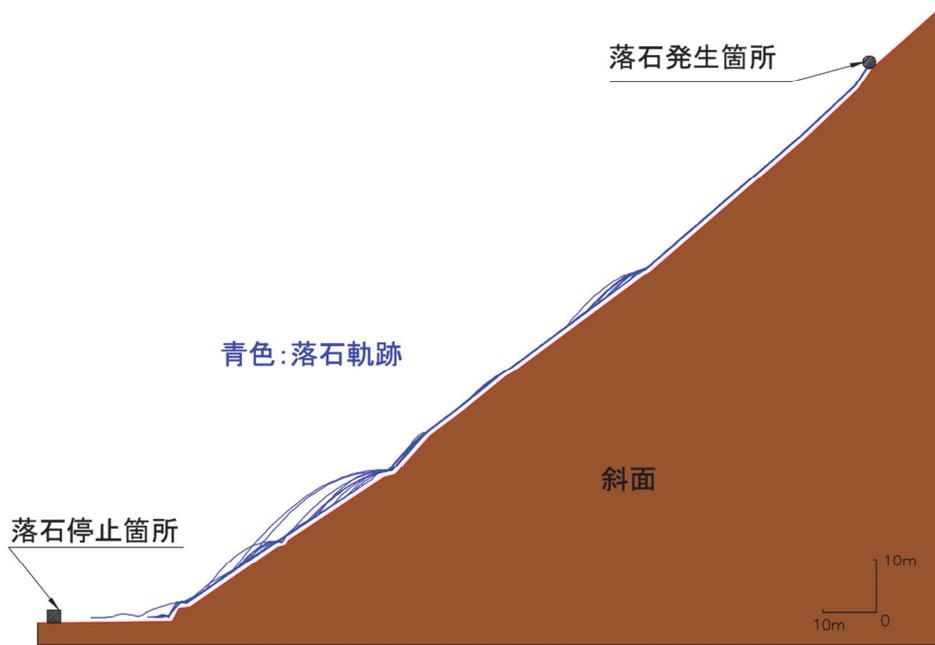


図-3. 9 降雨時の落石シミュレーション結果

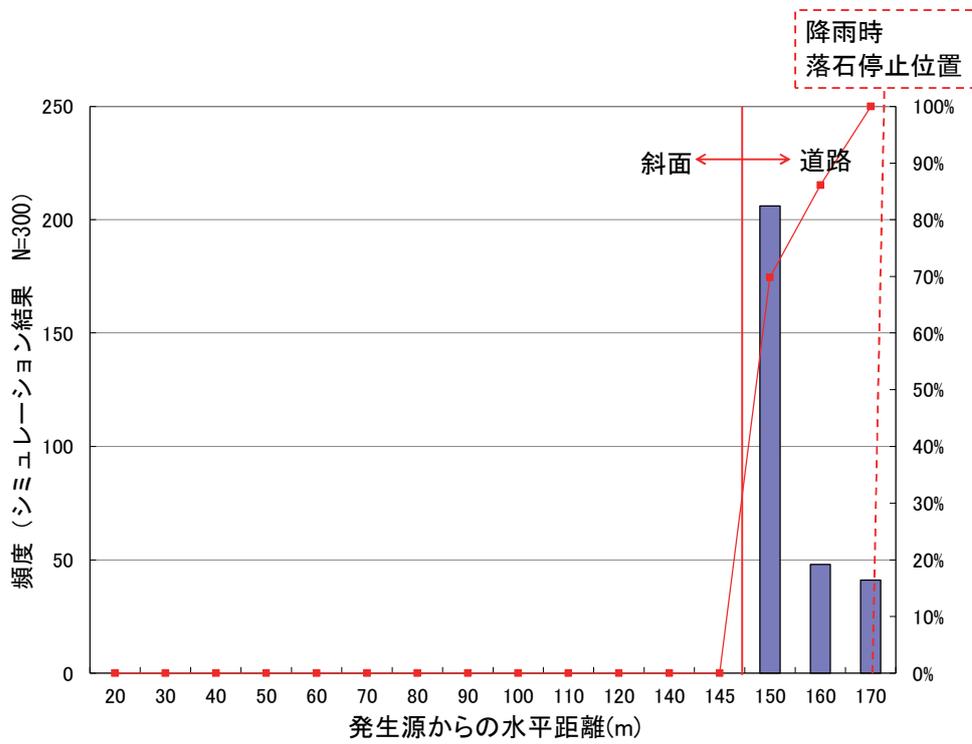


図-3. 10 降雨時の落石シミュレーション結果(停止位置)  
 落石サイズ(1.8×1.5×1.3m, W= 91.9kN)

以上の結果から現地の植生等により等価摩擦係数の検討は必要だが、UAV レーザ測量結果から得られた断面を用いて落石シミュレーションを行うことは有効であり、現地にて横断測量することなく断面を作成することができるため、浮石や転石位置から落石経路を想定し落石シミュレーションを容易に行うことができる。

### 3. 7 まとめ

本研究では、落石災害の発生した山形県鶴岡市五十川地区において、UAV レーザ測量による高精度な地形データによる地形解析を行い、UAV レーザデータから作成された赤色立体地図を用いて落石の分布を特定し、その結果と現地調査との整合性について考察した。その結果は以下のようなになる。

- (1) 落石の分布する斜面では、UAV レーザデータから作成された微地形強調図を作成する際は、グリッドサイズを 20 cm または 50 cm で作成することが落石の抽出に効果的である。
- (2) UAV レーザデータから作成された赤色立体地図を用いた浮石や転石の抽出率は 80 パーセントを超える確率で抽出できるが、大きさが 1 辺 1.0m に満たないもので、かつ地中に 2/3 以上埋もれたものは抽出できない。
- (3) 赤色立体地図では、浮石や転石の安定度は判定できないため現地踏査が必要となるが、浮石転石箇所を事前に把握でき踏査ルートを選定を事前に行えるため現地踏査時間を短縮することができると考えられる。
- (4) 現地踏査では、落石位置や標高を把握するには詳細な測量が必要であるが、UAV レーザデータを用いると浮石転石の位置をスピーディーかつ正確に把握できるため、その後の落石エネルギー算出や落石シミュレーションなど落石運動の検討にも効果的であると考えられる。

## 第4章 落石調査におけるモバイルレーザスキャナの活用に向けての検討

### 4.1 モバイルレーザ機器を利用した落石調査への応用

近年、落石災害が頻発しており、落石対策への取り組みは急務となっている。一方、落石対策をする上で個々の浮石や転石の大きさ・分布を把握することは必須であるが<sup>17)</sup>、落石調査の対象となる現場は急峻な斜面が多く、調査精度の低下や安全性の問題が懸念されている。

UAV レーザ測量による落石危険箇所の抽出<sup>14)</sup>など斜面防災への利用も進んでいるが、計測機器及び測量費用が高額であり手軽に利用できない現状がある。また、レーザ測量機器の進展は著しく、携行可能なモバイルレーザ (mobile laser scanning) もいくつかの機種が登場している。さらに、2020年にはLiDAR(Laser Imaging Detection and Ranging)機能搭載のiPad Pro及びiPhone 12 Pro (Apple)も発売されており、砂防等の現地調査でも利用されつつある<sup>28),29),30)</sup>。ここでは携行可能な小型レーザ測量機器をモバイルレーザと呼ぶこととする。今後、こうした機器の活用が期待されている。

本章では、山形県鶴岡市五十川地区(図-4.1)の過去に複数発生した落石災害斜面(図-4.2)において、通常3名で行う標尺等用いた落石調査(写真-1)にモバイルレーザを用いることにより、一人で転石の計測することで省人化が可能か試みた。また得られた計測データから、落石径や樹木の胸高直径など計測可能か検討を行った。

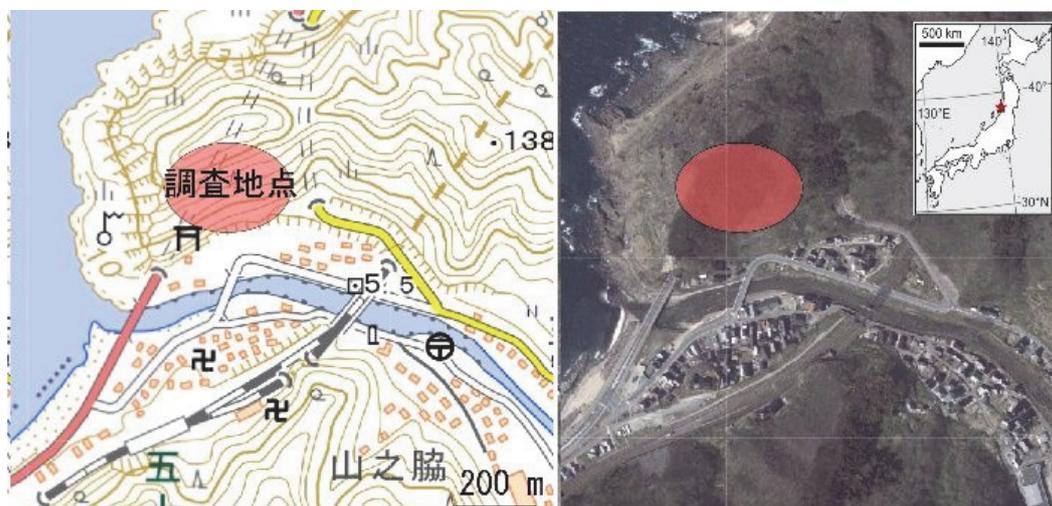


図-4.1 山形県鶴岡市五十川地区調査地 (国土地理院 地理院地図より)

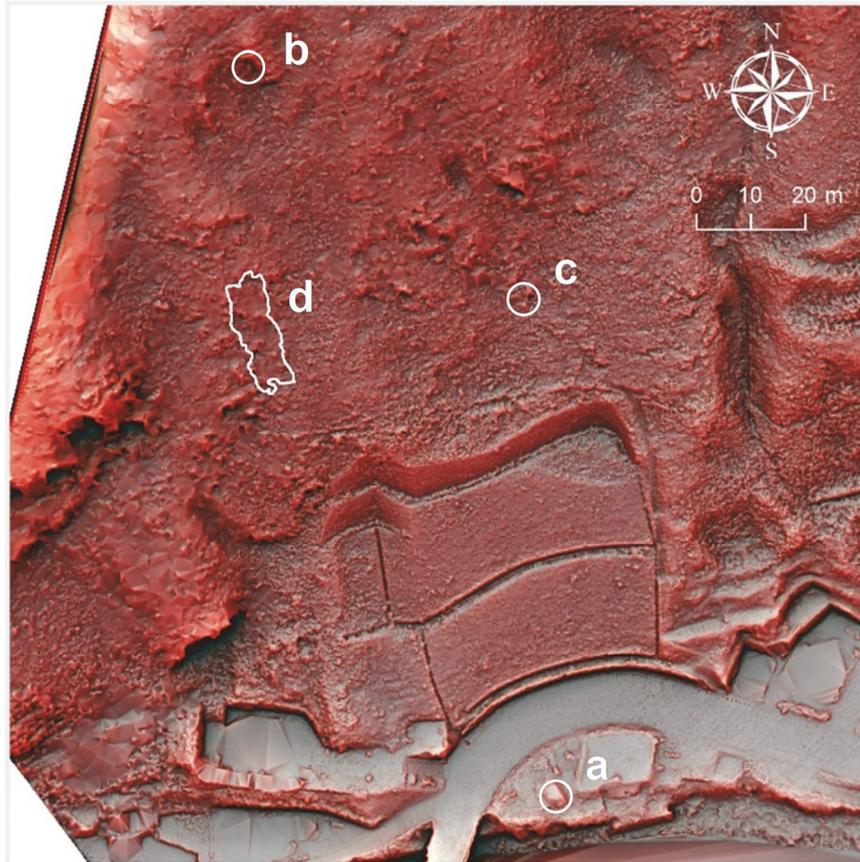


図-4. 2 調査地における UAV レーザ測量データを用いた赤色立体地図とモバイルレーザスキャン実施箇所

a : 2020 年 7 月 7 日に落下した落石个体 (4. 4. 1 参照), b: 2020 年 7 月 7 日落石時の発生源 (4. 4. 2 参照), c : 浮石・転石が密集する斜面 (4. 4. 3 参照), d : 浮石・転石が点在する斜面 (4. 4. 4 参照)



写真-4. 1 標尺を用いた落石径計測

## 4. 2 モバイルレーザ測量機器及び地形データ作成方法について

### 4. 2. 1 測定機器の諸元について

モバイルレーザには、現状大きく分けて2種のタイプの機器が存在する。

1つは、これまで車載型（MMS）や、UAV搭載型に用いられていたような比較的軽量でレーザ計測装置（スキャナ）を携帯できるようにしたものである。車載型やUAV搭載型の装置は、一般的にレーザスキャナだけでなく慣性装置（IMU）やGNSSを同載しており、照射（反射）した点の3次元絶対値座標を面的に取得するものである。これに対し、携帯（ハンディ）型は一般的に、より計量化するためにGNSS等を同載せず、スキャンした計測点群から同一点を自己解析して3次元点群を構築するもので、任意座標での取得となる。このスキャナは車載型等に使用されるレーザ装置と同一なので、100m程度離れた物体も計測することが可能である。しかしバッテリー等を含めた機器の重量は数kgあり、ギリギリ手で運ぶことができる重さである。

もう1つは、最近市販化されたスマートフォン（iPhone）やタブレット（iPad）にレーザスキャナが搭載された極軽量タイプのものである。点群位置を求める原理は基本的に同じであるが、軽量かつ低消費電力で稼働できるようにしたためレーザの出力は小さく、計測できる距離は5m程度である。

このように、従来の携帯型と極軽量タイプの機器は、重量や計測可能距離が大きく違うのが特徴である。また、構築・出力されるデータの種類も異なり、iPhoneやiPad搭載型はカメラが同載されているため、色付き点群が構築できるほか、テクスチャ付きの3次元面群も出力できる。なお、計測・点群及び面群の作成は、スマートフォン等にアプリをインストールすることで可能となる。本研究ではこの2タイプをそれぞれ試行した。

測定には表-4.1に示した3つの機器を使用した。従来の携帯型モバイルレーザ（以後AR-PX-80と記載）は測定可能距離が100mあり地上設置型のレーザスキャナに近い性能を有している。また、極軽量タイプとしてiPad Pro及びiPhone12 Proを用いて計測を行った。なおiPad及びiPhoneのLiDAR機能については詳細な性能の記載がないため事前に精度の確認を行った。その結果は後述の4.2.2に述べる。

表-4. 1 測定機器諸元

項目	従来の携帯型	スマホ・タブレット型	
型番	Paracosm 製 AR-PX-80	iPad Pro	iPhone 12 Pro
外観			
測定距離	1～100m	5m	5m
測点数	300,000 点/秒	—	—
視野	360° × 30°	—	—
精度	±3cm	—	—
サイズ (mm)	幅 : 162 高さ : 264 厚さ : 162	幅 : 280.6 高さ : 214.9 厚み : 6.4	幅 : 146.7 高さ : 71.5 厚み : 7.4
重量	約 3kg	682 g	187g
出力形式	3次元点群	色付き3次元点群 テクスチャ付き3次元面群	
点群データ作成	本体専用ソフト	3D Scanner App Prono points Scasn	

#### 4.2.2 iPad 及び iPhone の LiDAR 性能確認

##### 4.2.2.1 測定距離による精度変化の確認

本検証にて同一物体を 1m・2m・3m・5m の 4 段階の距離で計測し、3Dモデルが正確に再現できるか確認した。

測定距離の検証は、会議室のキャビネットやモニター設備にて実施した。なお、点群データ取得するアプリは、3D Scanner App (Laan Labs) の無料アプリを用いた。平坦な場所でレーザスキャナを使用し上記 4 段階の距離にて 3 回ずつ計測を実施した結果を表-4.2 に示す。距離が 3m を超えると測定差異が 20～46 mmとなり従来の携帯型モバイルレーザと同程度の測定精度を確保するには、2m 以内で計測する必要があることがわかった。

表-4. 2 iPad Pro, iPhone 12 Pro に搭載するレーザスキャナの精度検証(High モード)

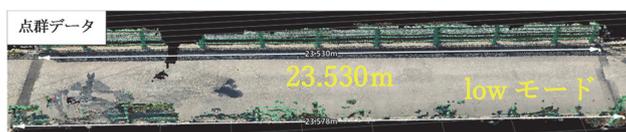
計測対象実測値 モニター W×H=0.51×0.31 キャビネット W×H×D=0.73×0.92×0.52(m)			
計測対象		測定距離	
測定距離(m)			
1.0	2.0	3.0	5.0
実測値との差異(mm)			
5~20	15~36	20~46	計測不能

#### 4. 2. 2. 2 計測モードの違いによる精度の確認

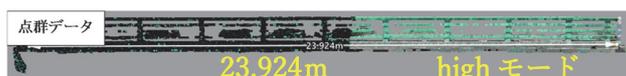
次に、橋梁高欄を対象に計測モードの違いによる精度の検証を行った。3D Scanner App は計測モードに Low と High があり、これらのモードの違いについても検証を行った。検証の結果、Low モードでは実測値 23.950m に対し 0.4m の誤差が生じた。また、High モードでは誤差が 0.026m であったため、計測は High モードで行うことが望ましい(写真-4.2)。また、高欄の手摺などの丸みを帯びた形状は、正面からスキャンしただけでは形状が把握できない。複雑な形状を把握する場合は、色々な角度からスキャンする必要がある(図-4.3)。



(上)現地実測の状況



(中)Low モードによる点群データ



(下)High モードによる点群データ

写真-4. 2 橋梁における計測モードの違いによる精度の検証

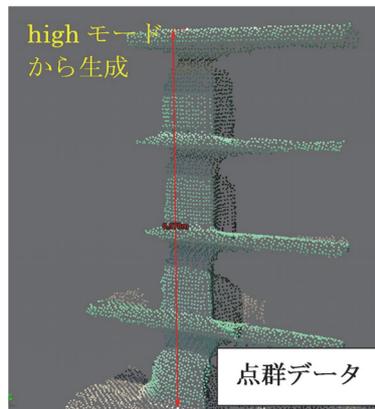


図-4. 3 高欄のスキャン状況

#### 4. 3 落石調査の計測対象斜面について

調査地は山形県鶴岡市五十川の右岸に位置する。過去の豪雨や地震による崩壊によって形成された滑落崖や崖錐状堆積物や浅い谷地形が発達し、不安定な浮石や古い転石群が多く認められる。調査地域の地質は、板状節理が発達する中新世中期の温海(あつみ)ドレライトを基盤とし、斜面の植生は樹齢約 50 年生のスギ人工林と広葉樹林が分布する。

計測箇所は、2020 年 7 月 7 日に落下した落石个体 (図 - 4.2 a) とその落石の発生源 (図-4.2 の b), および斜面途中の不安定な浮石や古い転石群が分布する箇所である (図-4.2 c, d)。

#### 4. 4 モバイルレーザ適用結果

##### 4.4.1 落石个体のレーザ適用結果 (a 箇所での検証結果)

写真-4.3 は図-4.2 の a 箇所の落石にて、それぞれの機器にて計測及び比較を行った。なお、iPhone で稼働するアプリには複数のものがある。ここでは、3D Scanner App に加え、同様の点群計測アプリ prono Points Scan (PronoHearts, Inc) でも計測を行った。

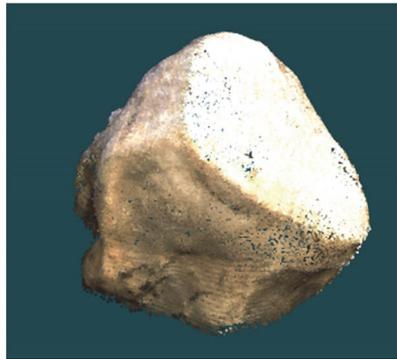
測定方法は、写真-4.3 のように対象の落石に対して 2m 以内の距離を保ちつつ 1 周しながら計測を行った。それらの計測結果 (図-4.4) を比較すると、どのタイプの機種で計測 (スキャン) しても、短時間で落石の 3 次元形状をよくとらえていた。アプリの違いによる抽出度合いの違いは視覚的に大きな違いは無く、iPad や iPhone の LiDAR 性能に依存していると推察される。

iPad や iPhone による計測時間は約 3 分程度であり、標尺を用いた計測時間とあまり違いはなかった。

レーザスキャンにより得られた点群データと標尺を用いた計測を基に求めた体積を表-3 にまとめた。AR-PX-80 で得られた点群データを基に、図-4.5 に示すようなボクセル化(サイズ 20cm)を行うことで、落石の体積を計測することが可能である。標尺による計測は、3 辺長から長方体として体積計算するため、点群データから求めた体積より大きくなる。



写真-4. 3 計測状況 (AR-PX-80 を用いた計測)



AR-PX-80



iPad Pro



iPhone 12 Pro  
(3D Scanner App)



iPhone 12 Pro  
(pronoPointsScan)

図-4. 4 機器及びアプリの違いによる計測結果(図-2 の a 箇所 落石本体)

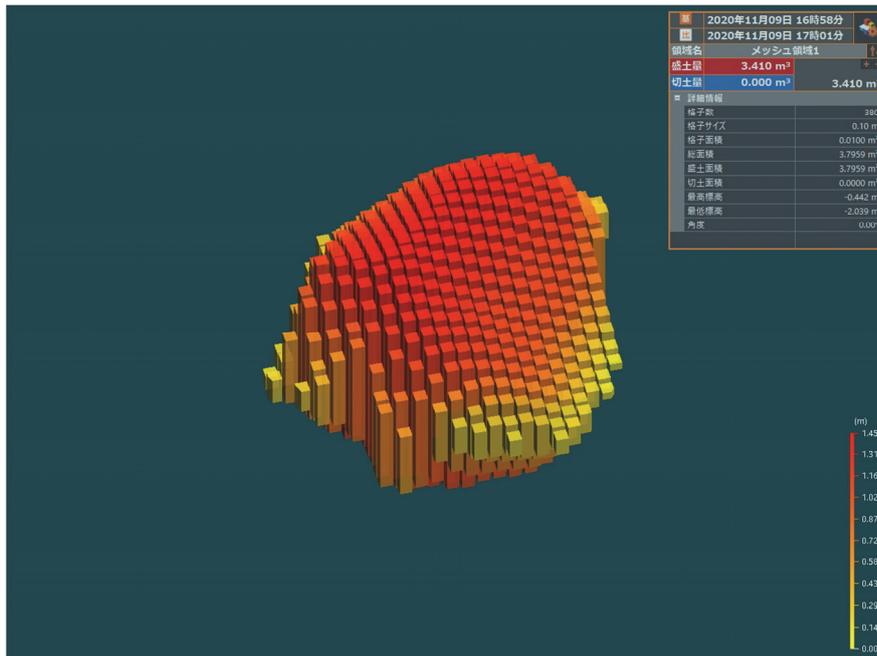


図-4. 5 点群データのボクセル化による落石の体積換算図（AR-PX-80 の点群データより）

#### 4.4.2 落石発生源地点のレーザ適用結果（b箇所での検証結果）

図-4.6 の左は写真，右は現地で作成したスケッチであり，落石の発生源の状況を示す。亀裂や岩の割れ目に入りこんだ根があり，2次元的なスケッチでは表現が難しい。図-4.7 は iPad による計測により 3D 化したもので，画面上で拡大・縮小・回転など視点を変えて現地状況を確認することができ，機構解析には効果的である。

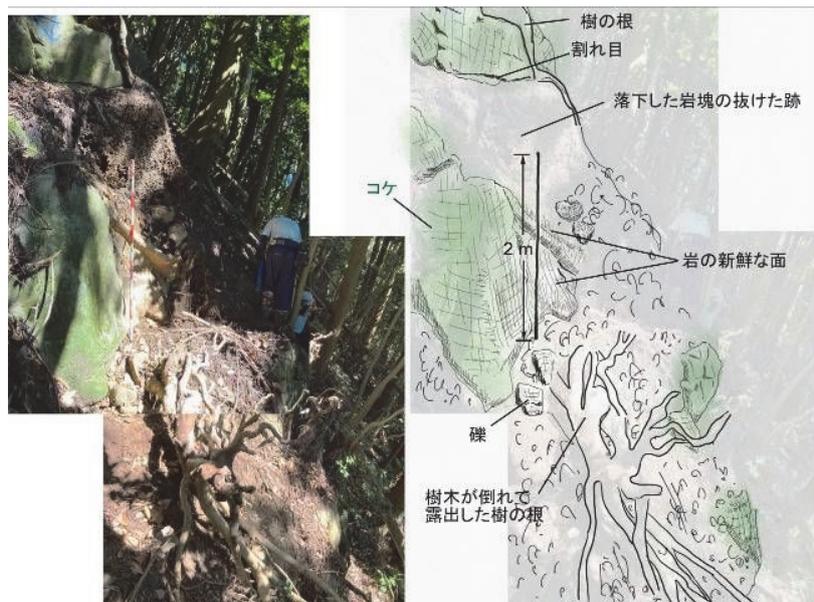


図-4. 6 落石発生源の写真と説明スケッチ

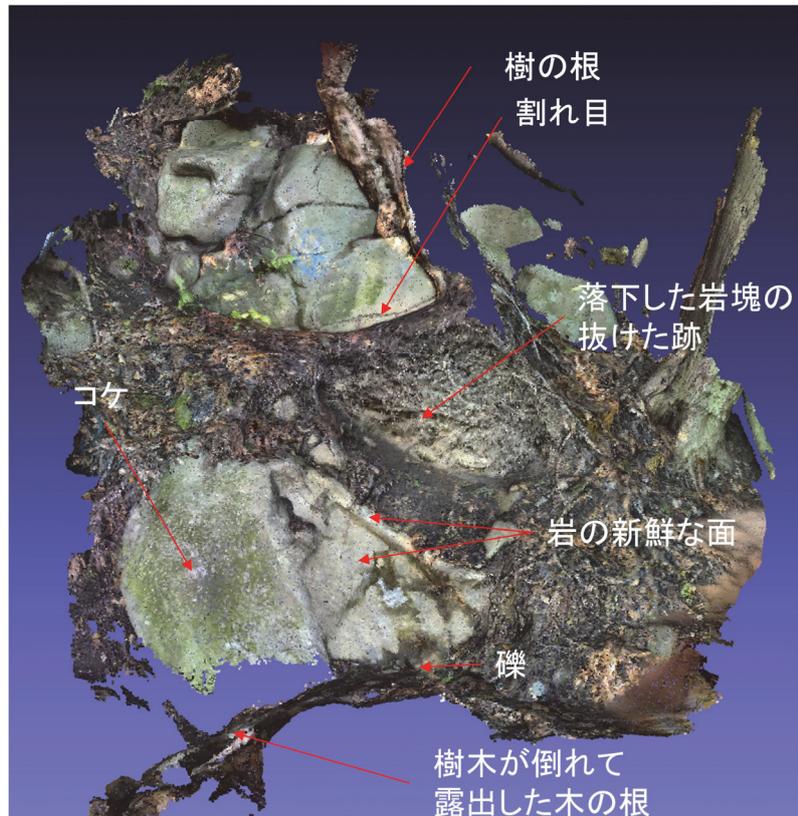


図-4. 7 iPadによる計測結果を用いた発生源の説明  
(カラー付き3次元点群データより)

なお、調査箇所bにおいて、AR-PX-80は、斜面が急峻で本体の重量があり移動が困難であると判断し計測を諦めたが、軽量のiPadとiPhoneにて計測を行うことができた。また、iPhoneでは自撮り棒を使用することにより移動距離を短くできるとともに、手をもって撮影しづらい箇所でも計測可能であった(写真-4.4)。



写真-4. 4 自撮り棒を利用した計測状況

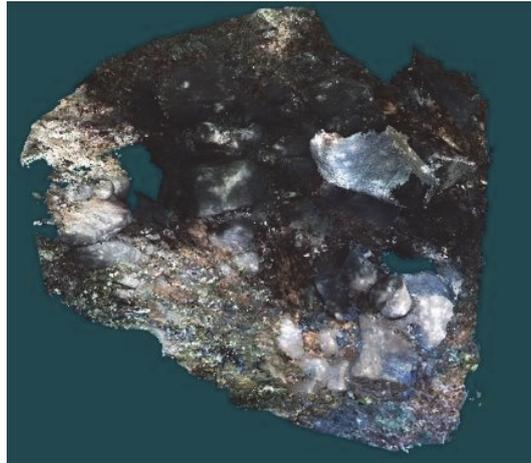
#### 4.4.3 斜面上の落石のレーザ適用結果（c箇所での検証結果）

比較的斜面勾配が緩く AR-PX-80 でも計測可能な場所（写真-4.5）を選び，斜面上の落石を計測した。AR-PX-80 では，計測経路に大きな段差があり正面からスキャンしただけでは形状が把握できない。そこで，一人で移動することが困難であったため，数名により機器をリレー方式で受け渡ししながら計測を行ったが，iPad 及び iPhone では一人で計測を行うことができた。

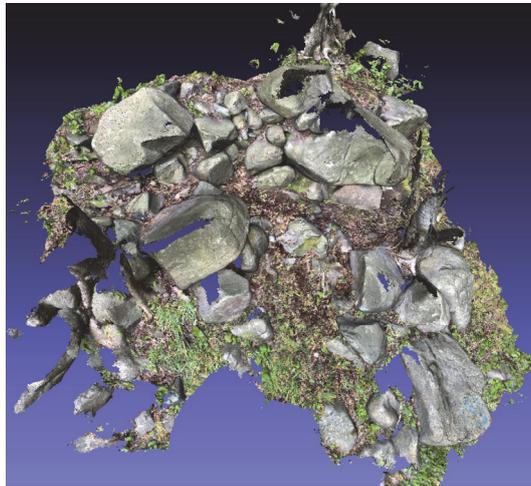
計測結果については，機器の差はほとんどなく落石の頭頂部など一部計測できていない箇所があったが，落石の大きさを調べる目的であれば問題はなく，それぞれの計測結果を図-4.8 に示す。また，計測時間は AR-PX-80 で5分程度であり iPad 及び iPhone は3分であった。



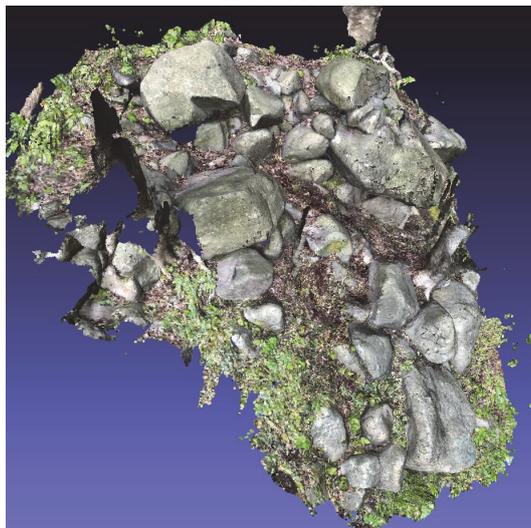
写真-4. 5 調査箇所 c の状況



AR-PX-80



iPad Pro



iPhone 12 Pro

図-4. 8 浮石・転石が密集する斜面の計測結果

#### 4.4.4 広範囲な斜面のレーザ適用結果（d 箇所での検証結果）

広範囲に浮石・転石群が点在する斜面において、UAV レーザ測量やモバイルレーザ測量を実施した。測定方式や表示方法を変えて 5 つのケースで比較した(表-4.4)。この箇所は斜面勾配が 40° 以上あり AR-PX-80 による計測は困難であると判断し行わなかった。

モバイルレーザ測量における斜面の計測では、幅約 5m 長さ約 10m を計測した時点でデータサイズをオーバーする警告がでたため、計測箇所を R1-2~3 と R1-3~5 の 2 箇所に分け、合計幅 5m、長さ 20m の計測を行った。計測時間は、1 箇所当り 5 分であった。

モバイルレーザで得られた成果（色付き点群を鳥瞰表示したもの）の一部を図-4.9 に示す。現地の転石と樹木の分布が良く再現できており、アプリ上でこれらの寸法を直接計ることもできる。

iPad 及び iPhone の LiDAR で計測される三次元データは任意座標となるため、事前に行われた横断測量時の測量杭（R1-2~5：図-4.10）を含む範囲を計測し、測量杭の位置を基に、任意座標から平面直角座標系第 10 系への座標補正を行った。座標補正した数値表層モデル（Digital Surface Model：DSM）から、樹木のデータをフィルタリングした DEM(Digital Elevation Model)を作成した。この際、空間分解能は 1cm とした。さらに、作成した DEM を基に、傾斜量図、高度段彩図、赤色立体地図および 10cm 間隔の等高線図を作成した(図-10b, c)。

表-4.4 斜面計測の測定方法及び処理方法について

図-5 番号	計測方法	表示方法	点群 処理	グリッドサイズ
a)	iPhone/ iPad LiDAR	点群画像	未処理	未処理
b)		地形図	DEM	1 cm
c)		微地形 強調図	DEM	1 cm
d)	UAV LiDAR	地形図	DEM	20 cm
e)		微地形 強調図	DEM	20 cm



図-4. 9 モバイルレーザ測量における斜面の状況

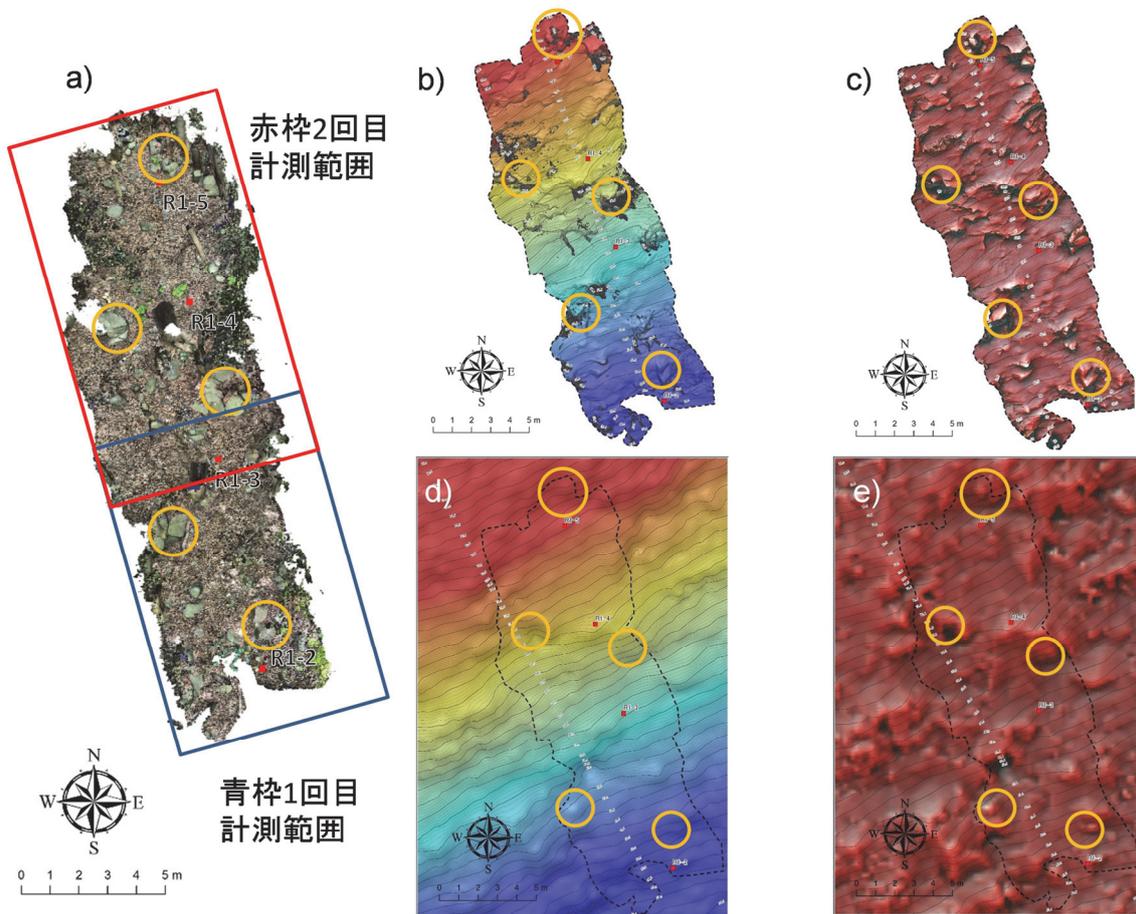


図-4. 10 モバイルレーザ測量と UAV レーザ測量の比較

- a) iPad Pro レーザ測量結果 b) iPad Pro レーザ地形図 c) iPad Pro レーザ赤色立体地図  
 d) UAV レーザ地形図 (e) UAV レーザ赤色立体地図 (オレンジ色の○印は比較的規模の大きな転石の位置を示す)

UAV レーザデータとモバイルレーザ測量結果による赤色立体地図を比較する（図-4.10c, e）と、図-4.10 にオレンジ色の○印で示した、規模の比較的大きな浮石・転石群や急崖は、モバイルレーザの方がより鮮明に表現しており、規模の小さな段差地形も判断可能である。

UAV レーザ測量の場合、森林に分布する小規模な浮石・転石の抽出については、植生の影響によりレーザ光がグラウンドに到達している点が少ない可能性があるため、十分に表現されないことがあると考えられる。以上より、モバイルレーザ測量の結果を用いて落石危険箇所を抽出し、さらに樹木との関係や落石の安定度も判読できると考えられる。

この結果より、国や自治体保有の航空レーザ測量データや UAV レーザ測量データにより落石が発生する危険性がある箇所をある程度絞り込み、現地にて絞り込んだ箇所のみモバイルレーザ測量を実施することで、より効果的な詳細なデータを得られると考えられる。

#### 4. 5 まとめ

落石調査においてモバイルレーザを使用することにより、各機器の精度検証と適用性および作業の効率化や省人化の検討を行った。その結果、浮石・転石の計測には非常に有効であり精度も実用に耐えうるものであることがわかった。また、モバイルレーザスキャナのデータより浮石・転石の大きさや安定度など取得することができ、調査に必要な人員も少なくかつ効率的に行えることが可能である。

さらに、机上で複数人での判読も可能であるため現地調査員の落石知識レベルに依存することもなくなると考えられる。

ただし、iPad 及び iPhone の場合は、得られたデータが任意座標であるため、既往地形図等と合成する場合は、位置座標が明確なものを同時にスキャンする必要がある。また、計測範囲が狭いため、広範囲を計測する場合や落石源や樹木等の影になる部分を計測する時は、漏れがないような工夫が必要である。

以上のことから、国や自治体保有の航空レーザ測量や UAV レーザ測量に加えてモバイルレーザスキャナを用途に合わせて利用することにより落石調査の更なる高度化と省人化が図られると考えられる。

## 第5章 実規模実験による従来型落石防護柵の挙動と補強に関する研究

### 5.1 従来型落石防護柵の補強の必要性について

1950年代以降のわが国の高度経済成長と1954年より始まった道路整備5ヵ年計画によって、道路の新設及び改良が進み山間地道路などには、落石対策用のひし形金網、ワイヤロープ及びH形鋼の支柱で構成された落石防護柵（以後、従来型落石防護柵と言う）が設置されてきた。また、治山事業、急傾斜地崩壊対策事業、林道事業なども同様である<sup>31)</sup>。その総延長は膨大な距離に達しているが、これらの従来型落石防護柵の耐用年数は施工後30～50年<sup>32)</sup>であり、耐用年数が過ぎていることから修繕を余儀なくされることも想定される。

落石対策便覧<sup>17)</sup>によると、従来型落石防護柵が耐えうる落石が衝突する時の運動エネルギーは25kJ～50kJ（例えば、250kg～500kgの落石が10mの鉛直高さから落下した場合に相当するエネルギー）である。従来型落石防護柵を突き破って自動車に衝突した2009年の富士山五合目駐車場のようない人身事故も発生している<sup>33)</sup>。

また、柵を超える落石発生箇所では、応急処置として単管パイプなどでかさ上げを行っている場合もある（写真-5.1）。このような箇所の対策工としては、落石エネルギーが超過した箇所では高エネルギー吸収柵へ、柵高が不足している箇所では既設の防護柵を撤去し同構造の柵を新たに設置している。

本研究では、従来型落石防護柵の挙動を実規模実験により把握し、弱点となる部分を補強することにより、従来型落石防護柵の吸収可能な落石エネルギーを倍増させ、さらに、既設の支柱に加工することなく柵高をかさ上げすることができる構造の検討を実施した。



写真-5.1 従来型落石防護柵応急処置の例  
（ベニヤ板で覆われている箇所が応急処置箇所）

## 5. 2 被災事例から見る構造上の弱点と現行の計算方法

過去5年間にわたり富山県，長野県，岐阜県，高知県など被災した防護柵28件を調査すると，以下の3つの問題点があることがわかった（写真-5.2）。

### 1) 支柱の変形

中間支柱は，基部でねじれ座屈を起こしている。写真-5.2(a)

端末支柱は，柵面内方向に変形している。写真-5.2(b)

### 2) ワイヤロープの破断及び脱落

ワイヤロープへの破断荷重を超える外力の作用によるワイヤロープの破断または，ワイヤを固定している金具からのワイヤの脱落。写真-5.2(c)

### 3) 金網の破網

落石が金網を突き抜ける。写真-5.2(d)

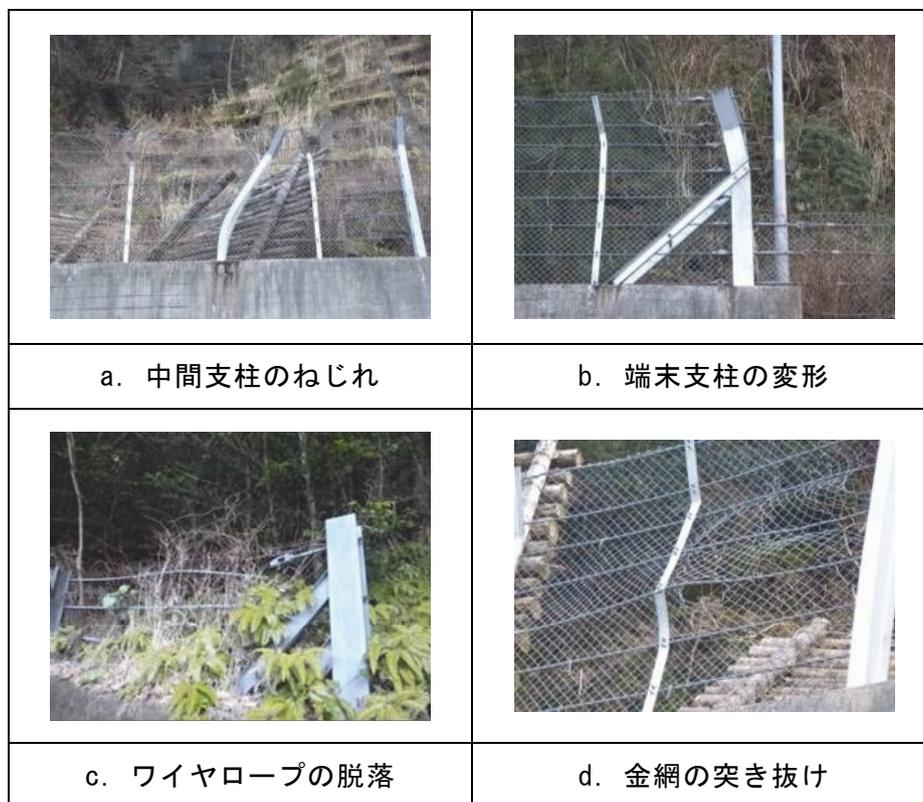


写真-5. 2 落石防護柵の被災事例

一方，落石対策便覧<sup>17)</sup>における支柱の変形と吸収可能エネルギーの算出根拠は，以下の通りに示されている。

- a) 落石の衝突位置は，図-5.1に示すように支柱間の中央で柵高の2/3の位置とし，落石の衝突方向は柵に直角としている。
- b) 落石が支柱の中間に衝突した場合には，2本の支柱が塑性変形するものとしている。
- c) 柱の変位角を $15^\circ$ と仮定し，落石がスパン中間に衝突し両側の2本の支柱が塑性回

転するものとして、支柱の吸収エネルギーを算出している。

d) ワイヤロープは、弾性変形するものとして、その長さを考慮して弾性限界での吸収エネルギーを計算している。ただし、エネルギー吸収を期待するワイヤロープは、落石径も考慮して2本のみとしている。

e) 金網の吸収エネルギーは、一様に25kJを用いることになっている。

しかしながら、上述した被災事例を見ると支柱は $15^\circ$  曲がる前にねじれ座屈を起こし、ワイヤロープが脱落、金網の突き抜けなど、落石対策便覧に記載されている現象とは異なる事例も報告されている<sup>33) 34)</sup>。支柱はエネルギー吸収量も多いが、ねじれを起こすことにより急激に耐力を失うため、支柱のねじれを防ぐことが補強のポイントであると推察できる。

今回、支柱の変形形態、ワイヤロープにかかる張力や金網の挙動など不明な点が多い従来型落石防護柵の性能と挙動について実規模実験を行い検証することとした。

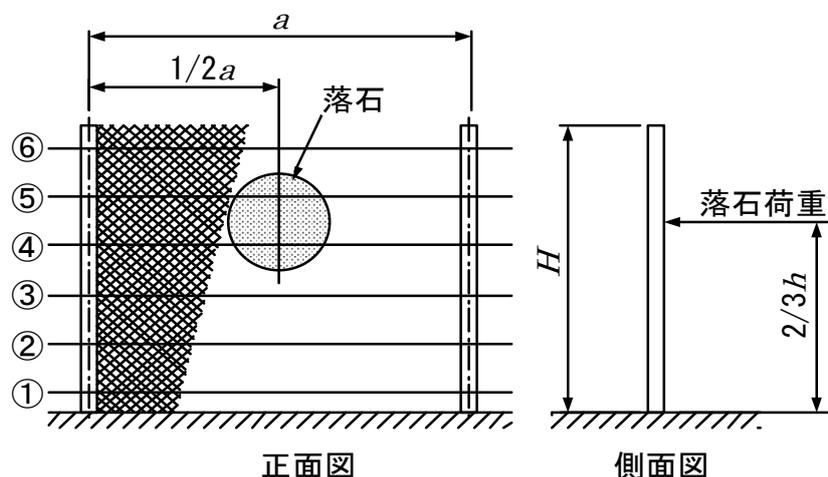


図-5. 1 落石防護柵の落石作用位置

### 5. 3 従来型落石防護柵の実験

従来型落石防護柵における落石時の詳細な挙動、限界状態等については、部材レベルの実験や柵高  $H=2.0\text{m}$  の実験報告がされているが<sup>35) 36) 37) 38) 39)</sup>、柵高の違いによる挙動については実験が行われていない。

そこで、柵高の違う2種類の落石防護柵について実規模実験を行い挙動と性能を把握した。

#### 5.3.1 実験タイプ

実験タイプは、柵高の異なる  $H=2.0\text{m}$  及び  $H=3.5\text{m}$  タイプとし、1 スパン（隣り合う支柱の間隔） $3\text{m}$  を5 スパン総延長  $15.0\text{m}$  にて行った（表-3.1）。

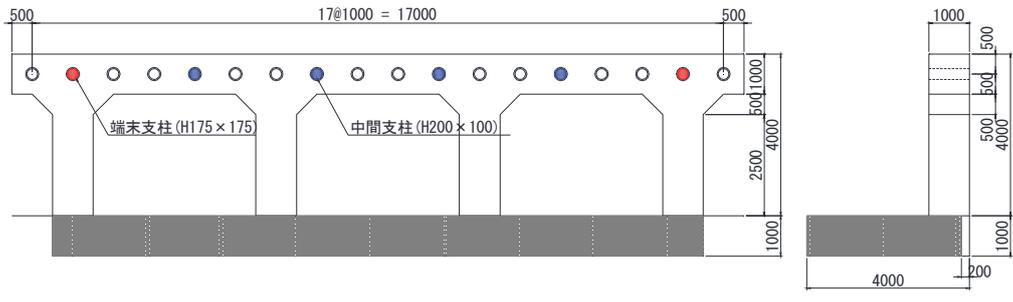
表-3. 1 実験 CASE

実験 CASE	柵高	重錘エネルギー
CASE-1	H=2.0m	50.0kJ
CASE-2	H=3.5m	50.0kJ

### 5.3.2 実験方法

実験方法は、実験架台に埋め込んだφ318.5の鋼管の中に、モルタル充填して一体化させた支柱のφ267.4鋼管(L=1000mm)部を架台に貫通させL=250mmのクサビ(SS400)を用いて架台との隙間を埋めた。

さらに、溝形鋼〔100×65〕とボルト(M12 4本)を用いて支柱同士を固定し水平に設置した柵に対し、クレーンで吊り上げた重量6.37kNの重錘をエネルギーが50.0kJになるよう7.85mの高さから自由落下させ行った(図-5.2)。重錘落下位置は、落石対策便覧<sup>3)</sup>に記載されている柵高の2/3とし(図-5.3)、使用する重錘はEOTA<sup>40)</sup>(European Organization for Technical Approvals)型の重錘を使用した。

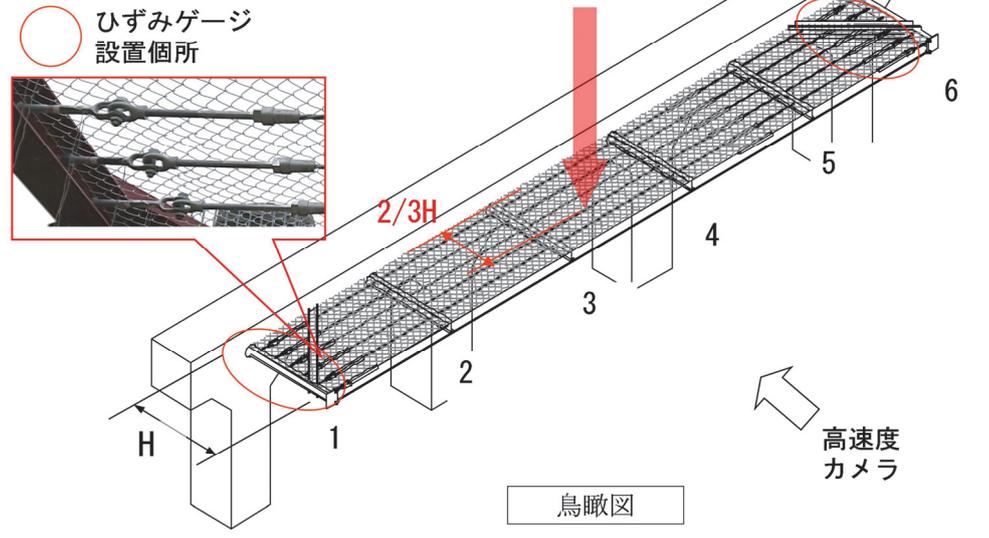


重錘諸元

重量 (kN)	L (m)	落下高さ (m)	適用実験
6.37	0.7	7.85	50kJ
7.65	0.8	13.07	100kJ

重錘: 加速度計

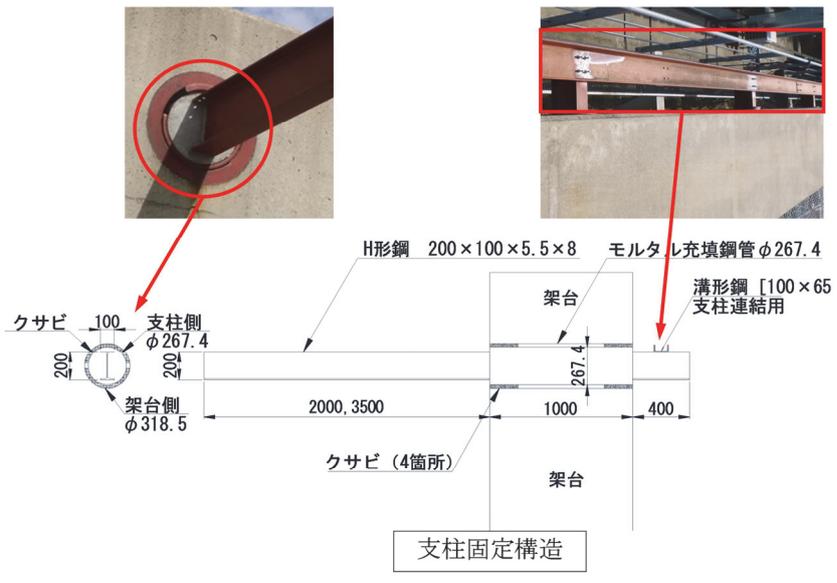
実験架台



ひずみゲージ  
設置箇所

高速度  
カメラ

鳥瞰図



支柱固定構造

図-5. 2 実験用架台と試験体 (1.2...は支柱 No)

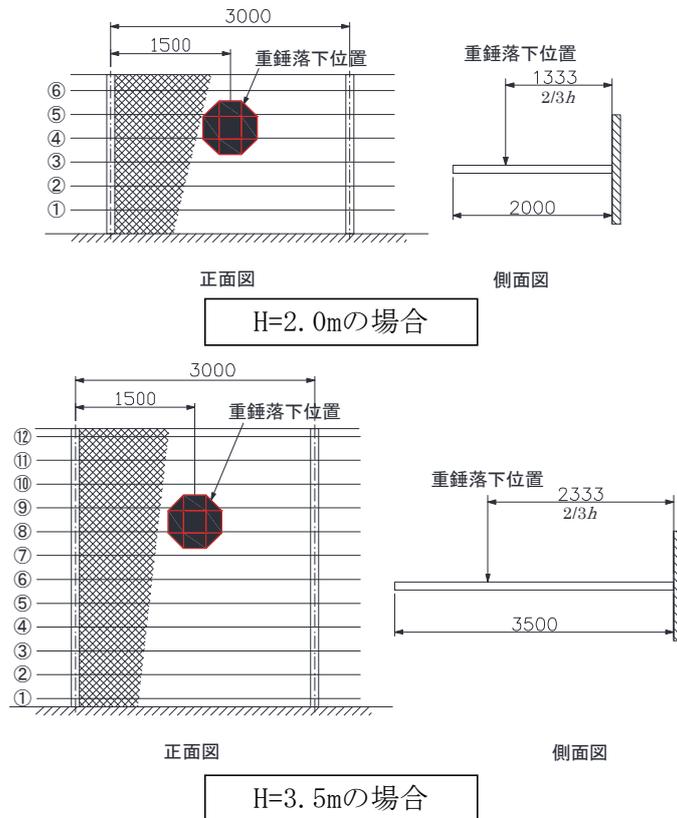


図-5. 3 重錘落下位置とワイヤロープ番号

### 5.3.3 測定項目と方法

測定・計測項目は以下の通りである。

- 1) 重錘に取り付けた加速度計より測定した衝撃力
- 2) 端末支柱部の金具（丸鋼）に取り付けたひずみゲージによるワイヤロープの張力（金具全数のキャリブレーションを行い，得られたひずみと荷重の関係を事前に求めた）
- 3) 重錘衝突スパンの支柱基部取り付けられたひずみゲージによる支柱ひずみの挙動
- 4) 高速度カメラで撮影した中央スパン両側の支柱先端の変位量と変位角

使用材料諸元は表-5.2，測定機器は表-5.3の通りである。

表-5. 2 使用材料諸元

材料名	諸元
端末支柱	H175×175×7.5×11 mm
中間支柱	H200×100×5.5×8 mm
ワイヤロープ	φ18 mm 3×7 G/0 破断強度：157kN
ひし形金網	φ3.2 mm 50×50 mm Z-GS3

表-5. 3 測定機器

計測項目	測定機器
ワイヤ張力	ひずみゲージ：2枚1ゲージ法 3線式結線法
支柱変位	高速度カメラ：FASTCAM SA1.1（株）フォトロン製）2000fps
衝撃力	加速度計：東京測器 ARJ-1000A
データロガー	キーエンス：NR-500, NR-ST04

## 5. 4 従来型落石防護柵の実験結果

### 5. 4. 1 支柱の変形について

高速度カメラから得られた画像に、支柱の変形(図-5.2：支柱 No.3, 4間)軌跡をトレースした(写真-5.3)。柵高の違いによる支柱変位角に違いがあるが、どちらの軌跡も直線的ではなく曲線を描いていることから支柱がねじれながら変形していることがわかる。

連続写真(写真-4)から支柱の変形の経時変化を見ると、20msの時点ですでに支柱のねじれが発生しており、ワイヤロープのたわみがねじれを助長していることがわかる。

支柱頭部の変位を比較すると(表-5.4)、柵高が高くなると変位が大きくなることがわかるが、支柱のねじれについては、どちらも大きな違いが見られない。

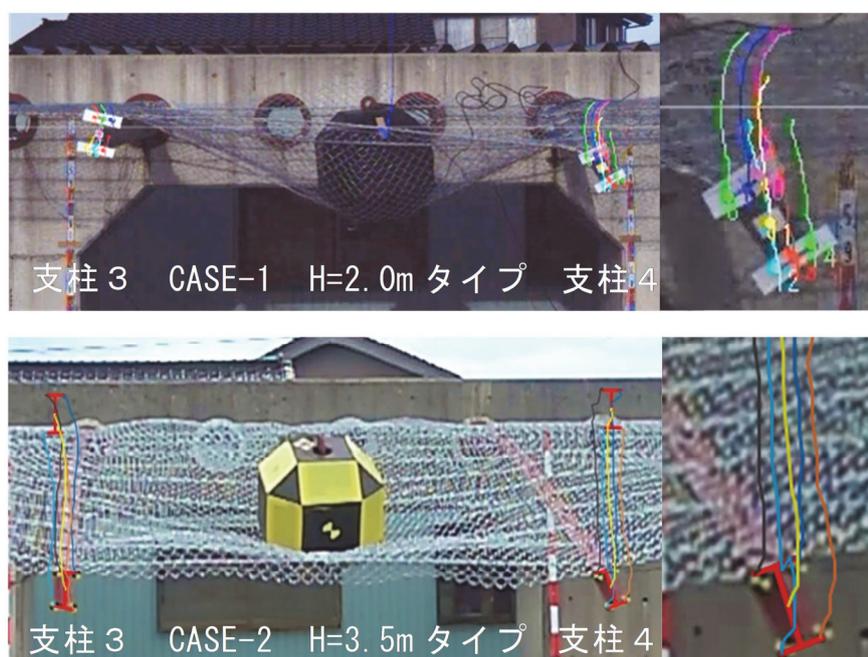


写真-5. 3 重錘衝突時の支柱の挙動

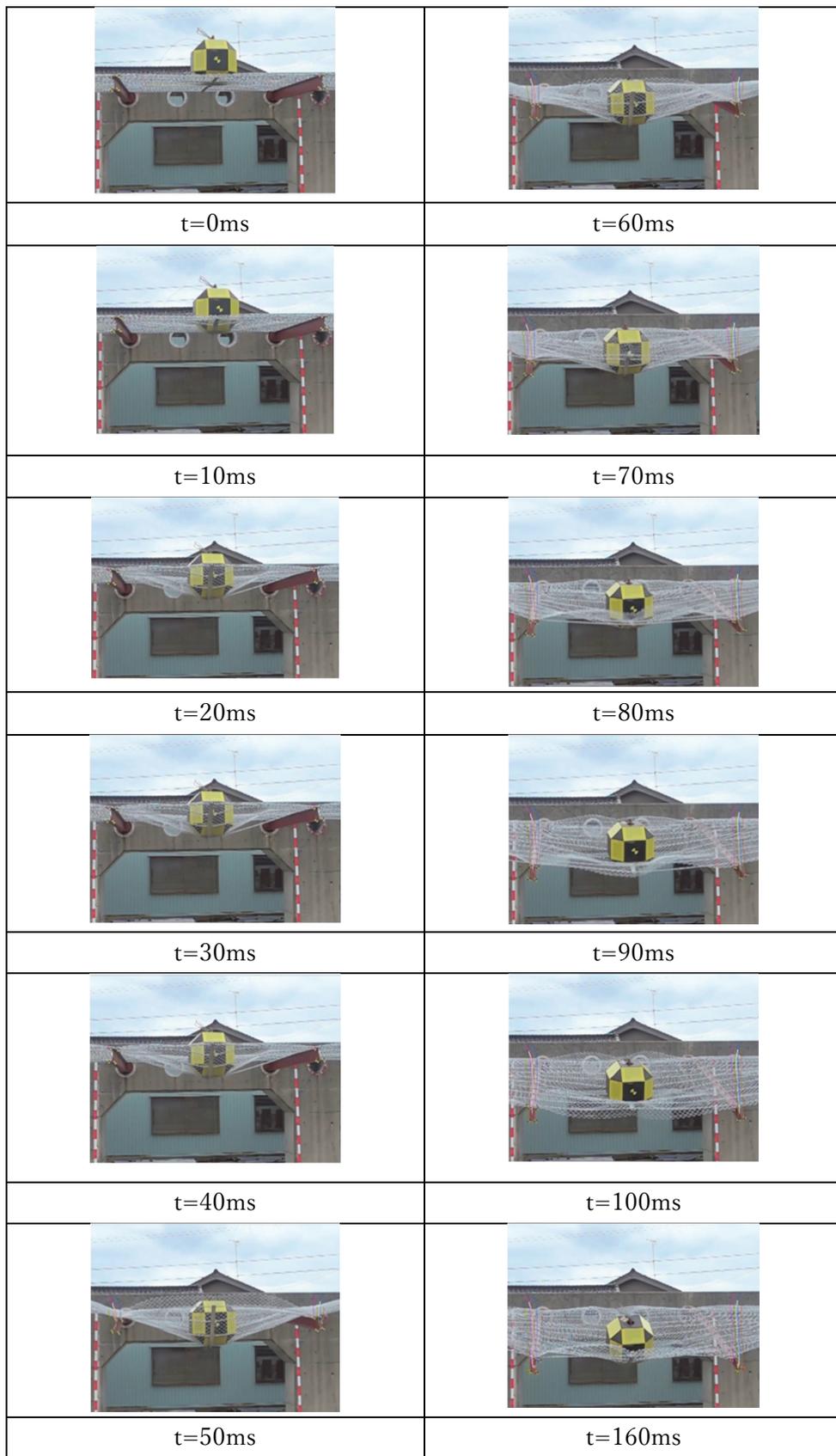


写真-5. 4 衝突時の経時変化 (CASE-2)

表-5. 4 支柱の変形について

タイプ	支柱 No	変位量 (mm)	変位角 (°)	ねじれ角 (°)
CASE-1	3	89	2.5	18
	4	300	8.5	25
CASE-2	3	943	15.1	18
	4	955	15.3	27

#### 5. 4. 2 ワイヤ張力について

重錘落下位置にある 2 本のロープにかかる張力の経時変化を図-5. 4 に示す。CASE-1 では、ワイヤの破断荷重である 157kN を超える 177. 7kN が作用し、ワイヤロープの素線の一部が破断した (写真-5. 5)。

CASE-2 における最大張力は 86. 1kN であり、柵高によりワイヤに作用する張力に違いがあることがわかった。

また、CASE-1 では重錘衝突部の金網に破れを確認したが (写真-5. 5. 5. 6)、CASE-2 では金網の破れは確認されなかったことから、CASE-2 では、ワイヤロープ及び金網にかかる作用力が小さかったと考えられる。

また、落石対策便覧<sup>17)</sup>では、落石防護柵にかかる荷重を落石衝突部のワイヤロープ 2 本で計算を行っているが、実験では全てのロープに張力が発生している (表-5. 5)。

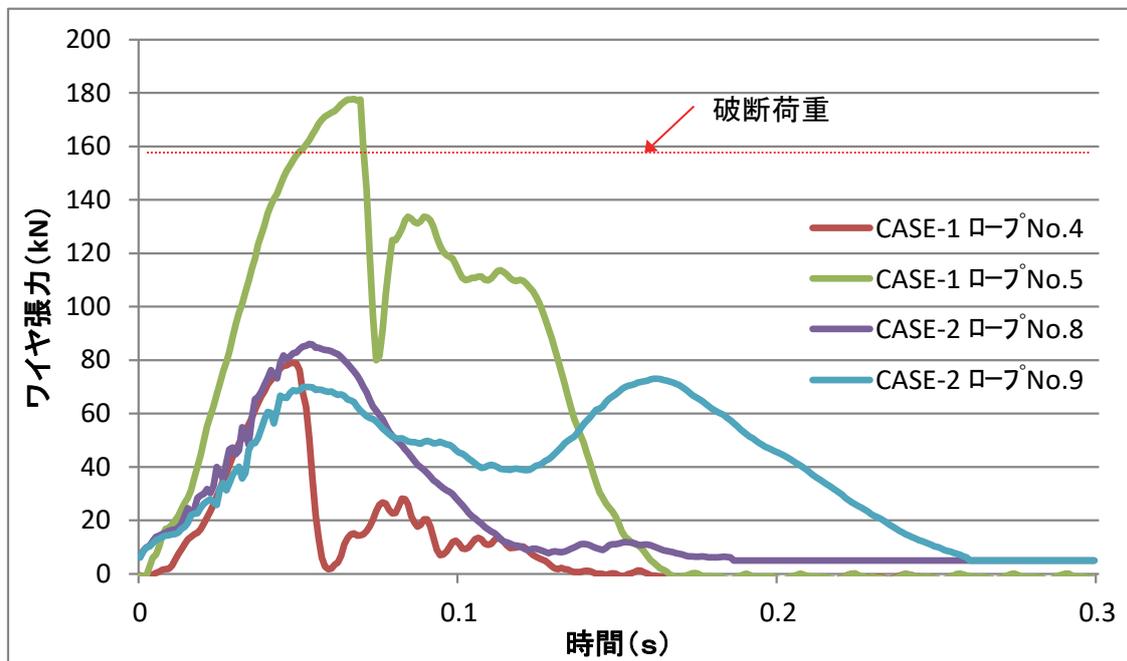


図-5. 4 ワイヤ張力の経時変化



写真-5. 5 ワイヤロープの素線切れ (CASE-1)



写真-5. 6 金網の破れ (CASE-1)

表-5. 5 ワイヤ張力測定結果 (CASE-2)

ロープNo.	端末支柱 (左) (kN)	端末支柱 (右) (kN)
1	9.2	8.9
2	9.8	11.7
3	12.7	14.9
4	11.5	12.3
5	9.4	9.1
6	9.9	8.6
7	16.6	16.3
8	86.1	78.7
9	73.0	67.0
10	35.0	18.2
11	26.4	25.8
12	32.5	24.4

※ロープ番号は支柱基部から上部に向かって付番

### 5.4.3 重錘衝撃力について

重錘の重心近くに固定した加速度計の測定記録より、重錘が防護柵に衝突する時の重錘衝撃力を算出した。その経時変化を図-5.5に示す。

衝撃力の最大値については、柵高の違いは見られなかったが、H=2.0mの場合、金網の一部が破網していたため、衝撃力がその影響を受けた可能性もある。いずれのCASEとも2つのピークが見られ、高速度カメラの画像で確認すると、最初のピークは衝突時に支柱とワイヤロープの抵抗によるものである。

2つ目のピークは重錘のリバウンド時であり、支柱の変位量が最大になった時のものであることが確認できた。

柵高の違いにより、最大変位に至るまでの時間が異なるため、2つ目のピークの応答時間が異なると考えられる。

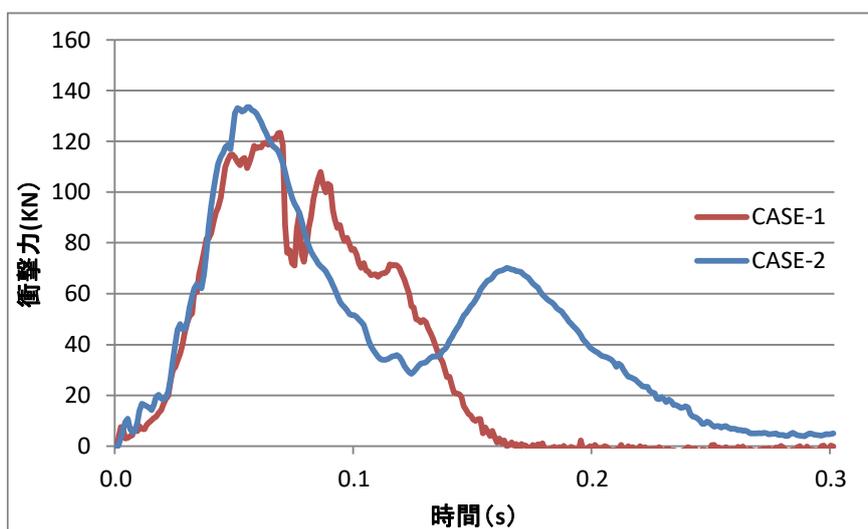


図-5.5 衝撃力の経時変化

### 5.4.4 従来型落石防護柵の実験まとめ

今回の実験結果と落石対策便覧に記載されている落石防護柵の吸収可能エネルギーとの比較を試みた。落石対策便覧<sup>17)</sup>に記載されている支柱及びワイヤロープの吸収可能エネルギーの算出式は以下の通りである。

1) 支柱

$$E_p = 2F_y \cdot \delta = 2F_y \cdot h \cdot \tan \theta \quad \dots(\text{式-1})$$

2) ワイヤロープ

$$E_R = 2T_y \cdot L \cdot S = \frac{L}{E \cdot A} (T^2 - T_0^2) \quad \dots(\text{式-2})$$

ここに

$F_y$  :支柱下端が塑性ヒンジを形成する力

$$F_y = \sigma_y \cdot Z/h \quad \dots(\text{式-3})$$

$\sigma_y$  :支柱H鋼材の降伏点応力度(SS400 で 235N/mm<sup>2</sup>)

$Z$  :H鋼材の断面係数(181000 mm<sup>3</sup>)

$h$  :重錘の衝突高さ

$\theta$  :支柱の変位角

$L$  :ロープ長

$E$  :ワイヤロープの弾性係数(100,000N/mm<sup>2</sup>)

$A$  :ワイヤロープの断面積(129 mm<sup>2</sup>)

$T$  :ワイヤロープ張力

$T_0$  :初期張力 (5.0kN)

上記式を用いて、実験結果より得られた変位角、ワイヤ張力の値を代入して、それぞれの吸収エネルギーを算出してみた(表-5.6)。ワイヤロープについては、重錘が衝突したワイヤ2本のそれぞれに計測した張力にて算出した。

金網の吸収エネルギーは落石対策便覧に計算式がなく、一律25kJとなっているため、実験結果では、重錘エネルギー50kJより、支柱及びワイヤロープの吸収可能エネルギーの差より算出した。

落石対策便覧式と比較すると、全体の吸収エネルギーは、落石対策便覧式によるエネルギーが若干大きいものの、CASE-1及びCASE-2ともほぼ同程度だった。

部材別エネルギーは、支柱とワイヤロープで大きな違いとなった。特にワイヤロープについては、重錘と接触していないワイヤにも張力が発生していることから、ワイヤロープの吸収エネルギーはもっと大きいと考えられ、金網のエネルギー吸収は小さいと言える。

また、支柱は変形の途中でねじれ座屈を起こして耐力を失っているため(写真-5.7)、変位角から求める吸収エネルギーより実際は小さいと考えられる。

表-5.6 落石対策便覧式と実験結果の比較

柵高	支柱	ワイヤ	金網	全体
落石対策便覧式				
H=2.0m	22.79kJ	5.66kJ	25.00kJ	53.45kJ
H=3.5m	22.79kJ	2.64kJ	25.00kJ	50.43kJ
実験結果				
H=2.0m	8.27kJ	21.96kJ	19.77kJ	50.00kJ
H=3.5m	23.07kJ	6.18kJ	20.75kJ	50.00kJ



H=2.0m 支柱 No.4



H=3.5m 支柱 No.4

写真-5. 7 支柱のねじれ状況

## 5. 5 落石防護柵の補強方法について

### 5. 5. 1 支柱の補強

従来型落石防護柵の実験結果より，使用している H 形鋼支柱のねじれが問題であることが分かった。この H 形鋼の断面特性は，弱軸まわりの断面係数が，強軸まわりの  $1/7$ ，塑性断面係数も  $1/5$  程度であることから(表-5. 7)，防護柵の面内方向の力に対しては極めて脆弱であるため，ねじれ座屈を起こしたことがわかる。

写真-8 に補強した支柱構造を示す。補強材として支柱下端の局部座屈防止を目的とした補強部材(写真-5. 9-a))，支柱頭部間を 2 本の鋼材で連結する補強部材(写真-5. 9-b)) を用いて(写真-5. 8)，支柱の横変位とねじれ剛性を向上させることで，支柱は防護柵の延長方向に対し直角方向(面外方向)のみに変位し，衝撃吸収能力を向上させることができると考えた(図-5. 6)。

表-5. 7 中間支柱 (H-200×100×5.5×8) 断面性能<sup>12)</sup>

断面積	断面二次モーメント		断面係数		塑性断面係数	
	$I_x$ ( $\text{cm}^4$ )	$I_y$ ( $\text{cm}^4$ )	$W_x$ ( $\text{cm}^3$ )	$W_y$ ( $\text{cm}^3$ )	$Z_x$ ( $\text{cm}^3$ )	$Z_y$ ( $\text{cm}^3$ )
$A$ ( $\text{cm}^2$ )						
26.27	1,810	138	181	26.7	200	41.4
比率	1.000	0.076	1.000	0.148	1.000	0.207

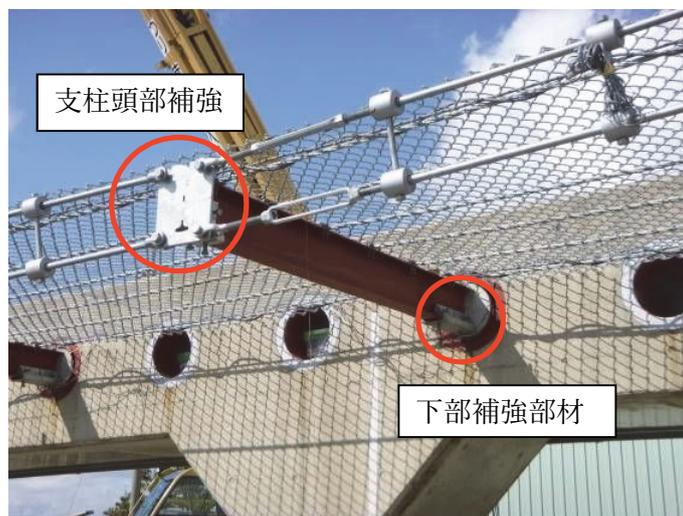
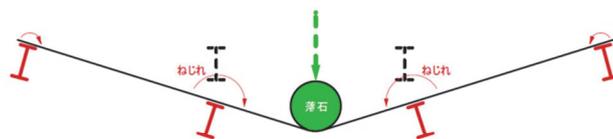
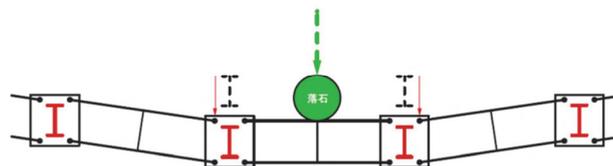


写真-5. 8 支柱の補強部材



(a) 既設防護柵のねじれ変形



(b) 補強した既設防護柵のねじれ変形

図-5. 6 ねじれ拘束のイメージ図<sup>13)</sup>

### 5.5.2 金網の補強

金網の突き抜け対策とエネルギー吸収能力を向上させるため、高強度ワイヤ金網(3本よりφ2.6mm)を用いた(写真-5.9-c))。

### 5.5.3 ワイヤロープの張力低減

端末支柱の変形要因であるワイヤにかかる張力を低減させるために、一定の張力でワイヤをスリップさせエネルギーを吸収する緩衝装置を用いて対応することとした(写真-5.9-d), e))。スリップさせる張力は、端末支柱の降伏応力以内になるよう予めフレーム解析を行い20kNと設定した。

### 5.5.4 柵高のかさ上げ

落石の飛び越えに対応するため、既存支柱に支柱を継ぎ足し柵高をかさ上げできる接続部材を用いることとした(写真-5.9-f))。

これらの部材は、現地での作業を軽減するために、現地加工することなく、既設の落石防護柵にはめ込みボルトで締め込むだけの構造とした(図-5.7)。

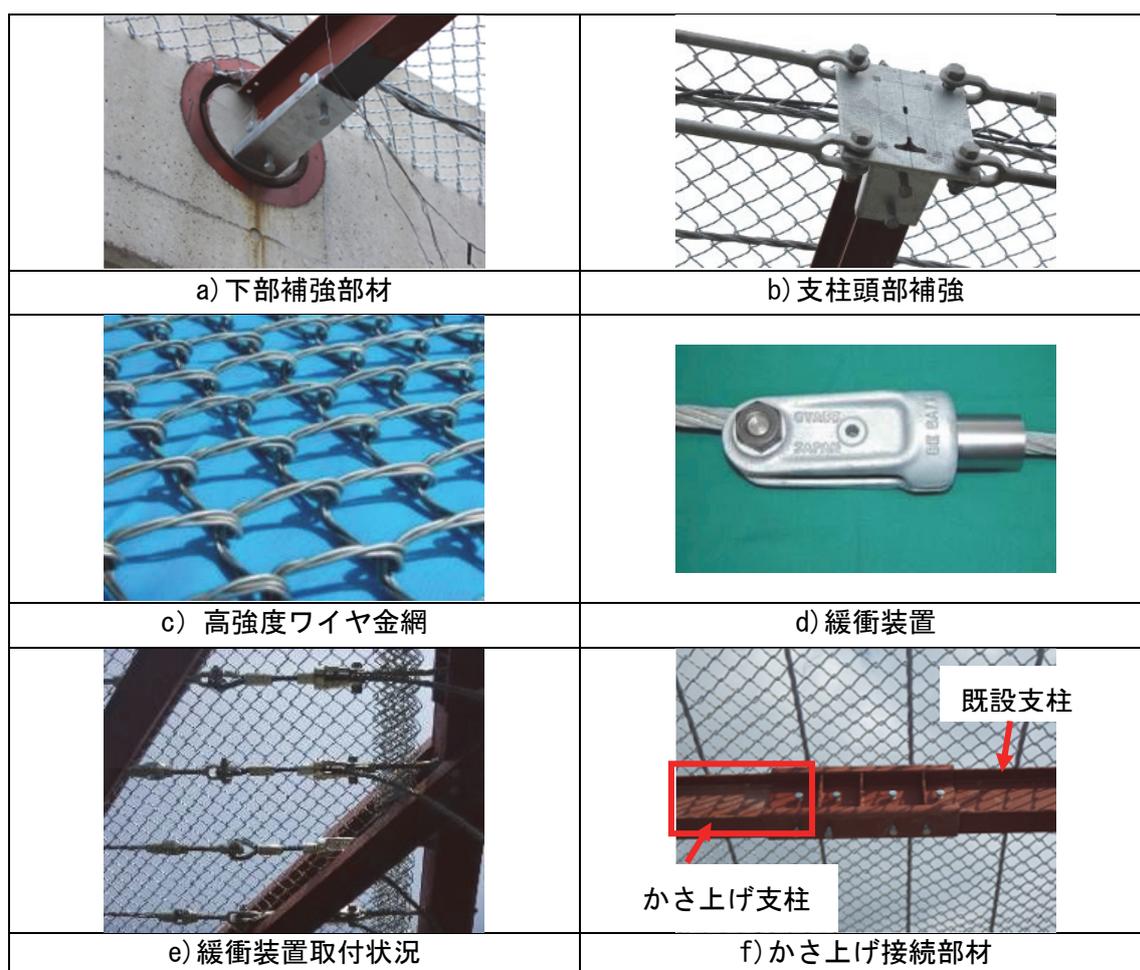


写真-5.9 補強に用いる部材

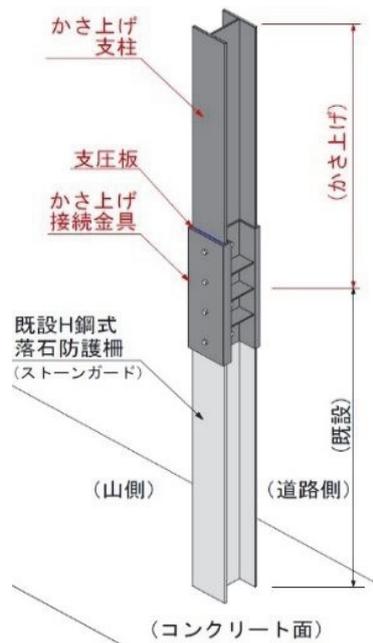


図-5. 7 支柱のかさ上げ方法

## 5. 6 補強落石防護柵の実験結果

実験は、写真-5.9 の補強金具を取り付け緩衝装置の有無と柵高の違いによる挙動を把握するため、表-5.8 に示す CASE にて行った。実験方法は、従来型と同じであるが、重錘重量を 7.65kN とし、重錘のエネルギーが従来型の倍である 100kJ になるよう落下高さを 13.07m より落下させた。

表-5. 8 実験 CASE

実験 CASE	柵高	緩衝装置
CASE-1	H=2.0m	なし
CASE-2	H=2.0m	あり
CASE-3	H=3.5m (かさ上げ)	あり

### 5.6.1 支柱の変形について

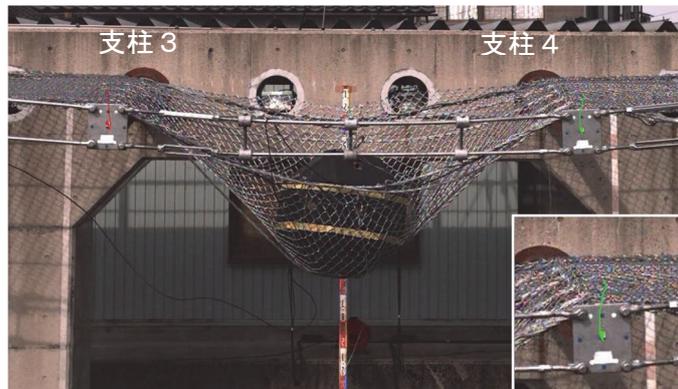
高速度カメラから得られた画像に、支柱の変形(図-5.2 : 支柱 No. 3, 4 間)軌跡をトレースした(写真-5.10)。軌跡はほぼ真下に向かって変形しており、支柱のねじれが無補強の場合とくらべ小さいことがわかる。また、CASE-3 のかさ上げの場合において、既存支柱とかさ上げ支柱を接続した「かさ上げ接続部材」に損傷はなかった。

支柱の変形について実験結果を表-5.9 に示す。H=2.0m の場合 (CASE-1, 2) 無補強の実験と比べ重錘エネルギーが倍になっても、変位角は逆に小さくなっているが、H=3.5m (CASE-3) の場合は、無補強と比べ約 1° 程度大きくなった。

CASE-1



CASE-2



CASE-3



CASE-3



写真-5. 10 重錘衝突時の支柱の挙動

表-5. 9 支柱の変形について

タイプ	支柱 No	変位量 (mm)	変位角 (°)	ねじれ角 (°)
CASE-1	3	164	4.7	0
	4	158	4.5	0
CASE-2	3	208	5.9	2
	4	223	6.4	3
CASE-3	3	995	15.9	4
	4	1028	16.4	7



写真-5. 11 端末支柱の変形状況 (CASE-3)

ねじれ角は最大でも  $7^\circ$  であり補強の効果が見られ、支柱の性能を十分に引き出したことにより、エネルギーが倍になってもねじれ角が小さい結果になったと考えられる。

また、端末支柱に着目すると、緩衝装置の効果により重錘衝突後の変形は見られなかった (写真-5.11)。

### 5.6.2 ワイヤ張力について

各 CASE で重錘が衝突したワイヤロープ 2 本の内、最も大きい張力が発生したロープにて比較を行った。

緩衝装置を設けていない CASE-1 において、最大張力 174.9kN が発生しワイヤロープが破断した。CASE-2, 3 においては、緩衝装置の効果により、CASE-2 では 19.9kN, CASE-3 では 31.1kN の最大張力を計測し、ワイヤロープの損傷や端末支柱の変形は見られなかった (図-5.8)。

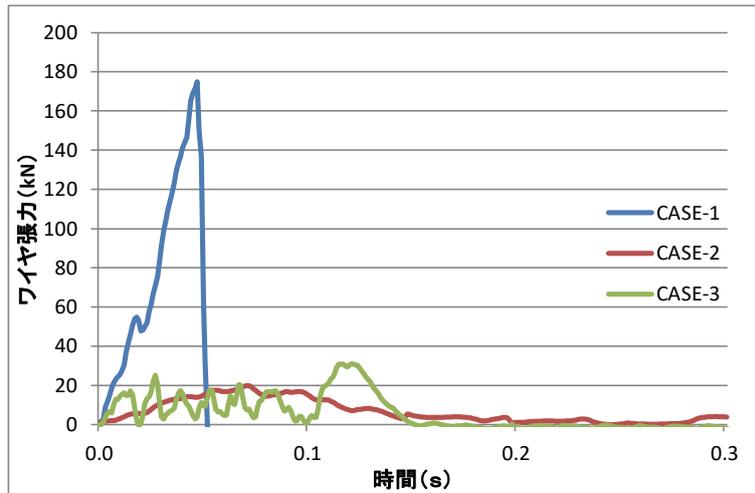


図-5. 8 ワイヤ張力の経時変化

### 5.6.3 重錘衝撃力について

無補強の場合と比較すると CASE-1 では、重錘エネルギーが倍になったことに比例して、衝撃力も大きくなったことがわかった。

補強タイプの CASE-1 と CASE-2 を比較すると、ピーク時間に違いがみられ緩衝装置のスリップによるものと考えられる。また、衝撃力を比較すると CASE-2 の方が 15kN 小さくなっていた。

緩衝装置を用いた補強の柵高の違いは、無補強の場合はほぼ同じ値を示していたが、CASE-3 の衝撃力が小さくなった。これは、緩衝装置の設置や、高強度ワイヤ金網使用により各部材のエネルギー吸収バランスが、無補強の場合と異なっているためと考えられる (図-5.9)。

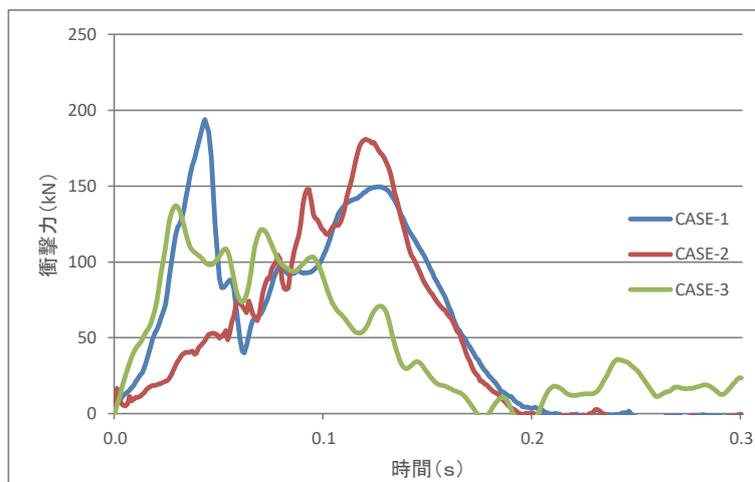


図-5. 9 衝撃力の経時変化

#### 5.6.4 緩衝装置のスリップ量について

緩衝装置は、ワイヤに一定の張力が発生すると装置が保持しているワイヤがスリップすることにより、重錘のエネルギーを吸収する（写真-5.12）。

CASE-2 及び 3 において緩衝装置を用いたが、それぞれの CASE におけるスリップ量を表-5.10 に示す。

重錘が衝突したワイヤは大きくスリップしているが、近傍のワイヤにおいてもスリップが確認され、エネルギー吸収を効果的に行っていることがわかった。

緩衝装置のスリップ張力は、図-5.8 より波形は短い周期で変動しているが、ワイヤロープがスリップしている時の平均値を 20kN とし、総スリップ量を乗じた吸収エネルギー量は、CASE-2 で 39.94kJ、CASE-3 で 26.78kJ となった。



写真-5.12 緩衝装置のスリップ状況

表-5.10 緩衝装置のワイヤスリップ量

#### CASE-2

ロープNo.	端末支柱(左) (m)	端末支柱(右) (m)	総スリップ長 (m)
1	0.030	0.070	1.997
2	0.010	0.022	
3	0.152	0.053	
4	0.370	0.654	
5	0.040	0.363	
6	0.073	0.160	

### CASE-3

ロープNo.	端末支柱(左) (m)	端末支柱(右) (m)	総スリップ長 (m)
1	0.000	0.000	1.339
2	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	
4	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	
6	0.095	0.025	
7	0.103	0.550	
8	0.003	0.465	
9	0.043	0.015	
10	0.025	0.015	

#### 5.6.5 補強落石防護柵実験の考察

支柱頭部及び下部の5.1に示す補強材の効果により、支柱のねじれを抑えることが可能となり耐力を向上させることができた。

緩衝装置が無い場合（CASE-1）、ワイヤロープに大きな張力が発生し破断したが、緩衝装置を設けることにより（CASE-2, 3）、ワイヤロープ張力の低減とエネルギー吸収が効果的に機能したことが確認できた。

5.5.2及び5.5.3に示す高強度ワイヤ金網、かさ上げ部材を用いた場合、重錘エネルギーが増加しても、損傷なく重錘を捕捉することが可能となった。

従来型と同様の方法にて、実験結果から各部材のエネルギー吸収量を求めた(表-5.11)。金網の吸収量は、重錘エネルギー100kJから金網以外の部材のエネルギーの差で求めた。CASE-1は、ワイヤが破断したため除外した。

表-5.11 各部材のエネルギー吸収量

タイプ	支柱	ワイヤ	金網	緩衝装置
CASE-2	9.17kJ	2.57kJ	48.32kJ	39.94kJ
CASE-3	24.59kJ	1.92kJ	46.71kJ	26.78kJ

#### 5.7 まとめ

本研究では、被災事例から従来型落石防護柵の構造上の弱点を把握するとともに、実規模実験により従来型落石防護柵の挙動を把握した。

既存の落石防護柵に簡単な金具を取り付けることにより、落石吸収エネルギーを2倍に増加させることが可能であることを実験にて確認できた。本研究で得られた結果を整理すると以下の通りである。

(1) 従来型落石防護柵は柵高の違いにより支柱の変位及びワイヤロープ張力に違いがあり、

エネルギー分担も異なることがわかった。

(2)従来型落石防護柵の衝撃挙動では、被災事例と同様な支柱のねじれを実験にて再現することができた。

(3)支柱のねじれを少なくする補強部材、高強度金網及び緩衝装置を追加することで、従来型落石防護柵に対し2倍の落石エネルギーが吸収できることを実験で確認できた。

(4)かさ上げ部材を用いた支柱のかさ上げを行った場合でも、接続部の損傷なく落石を受け止めることが可能であることを確認できた。

## 第6章 落石防護柵に用いられるひし形金網の挙動と特性について

### 6.1 ひし形金網の特性把握の必要性について

落石対策に関する技術基準としては、落石対策便覧（日本道路協会）があげられる<sup>17)</sup>。従来型落石防護柵については、支柱をH形鋼としワイヤロープとひし形金網にて落石に対する阻止面を構成し、金網の吸収エネルギーは計算では算出できない為、一律25kJ<sup>17)</sup>となっている。

また、落石対策便覧<sup>17)</sup> (p. 193) では、従来型落石防護柵の構造細目について、金網は落石の荷重に応じて適切な線径の金網を用いると記載されているが、その判断基準や比較検討する資料はない。

筆者が過去5年間にわたり富山県、長野県、岐阜県、高知県など被災した防護柵28件を調査すると、6件で金網の損傷が見られた（写真-6.1）。

金網は落石の阻止面として重要な構成部材であるが、その特性を把握するために行われた実験は、小室、荒木らのワイヤロープ等複合構成で行った報告がある<sup>33) 34) 38) 43)</sup>。また、金網単体での試験では、村石らの静的な試験を行った実験<sup>44)</sup> や動的な試験を行った実験<sup>45)</sup> があるが、面内方向（金網伸長方向）へ伸長する試験や材質や形状を変えた実験の報告はない。

さらに、近年では落石防護柵の新工法が数多く開発されてきているが、使用されている金網は、網目の大きさ・線径・厚みや材質など多様化してきており<sup>33) 44)</sup> 金網の特性を十分把握して使用する必要があると考えられる。

本研究では、金網を同一条件にて実験を行い、線径や材質及び形状の違いによる金網の特性を明らかにすることにより、落石防護柵に使用される金網の選定の目安を示すことを目的とした。



写真-6.1 落石が金網を突き抜けた事例  
(調査日 2016年3月6日)

## 6. 2 実験内容と供試体について

実験に使用するひし形金網の材料は、軟鋼線 SWMGS-4, SWMGH-4 硬鋼線 SWGF1, 軟鋼線の素材成分である炭素量を増加し引張強さを高めた特殊材の4種類で行うこととした。

比較検討するひし形金網の線径は、落石防護柵に一般的に使用されているφ3.2に加えφ2.6, 4.0, 5.0の4種類を用いた。

ひし形金網の網目寸法は、落石防護柵に一般的に使用されている標準形状 50mm(図-6.1左)と異形形状である46mm(図-6.1右)の2種類を用いて以下の比較試験を行った。また、ひし形金網の形状及び名称について図-6.2に示す。

以上の材料、線径及び形状の違いについて比較検討するために、以下の(1)～(3)の検討項目について実験を行った。

### (1) 線径の違い

材質 SWMGS-4 を使用し線径φ3.2 mm, φ4.0 mm, φ5.0 mmにて行う (Case-1, Case-2, Case-3)。

### (2) 材質の違い

同一線径φ3.2 mmにて材質を SWMGS-4, SWGF-1, 特殊材にて行う (Case-1, Case-4, Case-5)。

### (3) 形状の違い

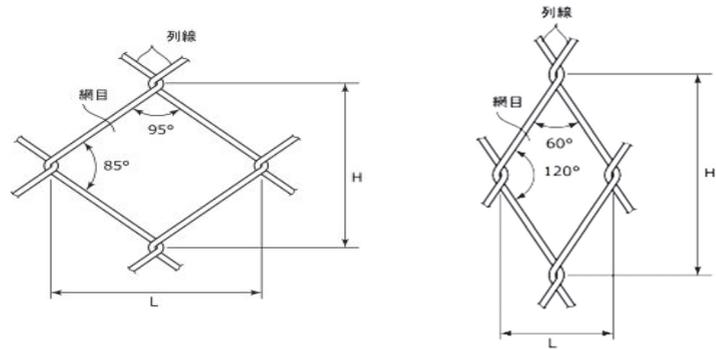
JIS 規格のひし形の形状 (標準形状) を変えた異形形状ものと (図-6.1右), φ2.6の線材を3本より合わせたワイヤひし形金網 (写真-6.2) とした。(Case-6, Case-7)。

また、各実験 Case に使用するひし形金網の材料特性と網目寸法を表-6.1にまとめた。

表-6.1 実験に使用する金網の材料特性と実験ケース

実験Case	材質	線径(mm)	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	断面積(mm <sup>2</sup> )	耐力(kN)	伸び%	網目寸法(mm)
Case-1	SWMGS-4	3.2	428	8.04	3.44	25.0	50.0
Case-2		4.0	430	12.57	5.40	24.0	
Case-3		5.0	421	19.63	8.27	25.0	
Case-4	SWGF-1	3.2	1190	8.04	9.57	5.0	
Case-5	特殊材	3.2	870	8.04	7.00	7.5	46.0
Case-6							
Case-7	SWMGH-4	2.6×3	746	15.93	11.88	8.0	50.0

\*1 表記載の引張強さ、伸びの値は材料検査成績書の値を記載



JIS 形状 (標準形状)

異形状

図-6. 1 ひし形金網の形状について

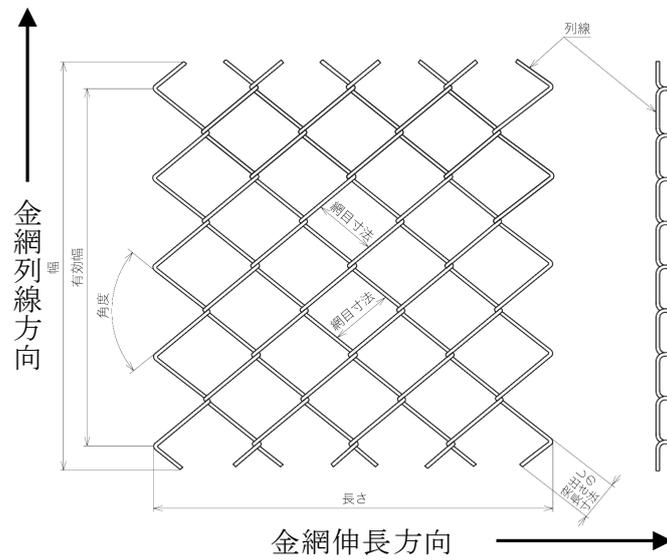


図-6. 2 ひし形金網の形状及び各種名称  
(JIS G 3552 より)



写真-6. 2 ワイヤひし形金網

### 6. 3 実験方法

ひし形金網の試験方法は JIS 等には規定がなく，過去に行われた実験<sup>44)</sup>を参考に試験装置を作成し評価を行った。

静的試験では金網を 1 枚の面材として考え，引張強度を調べるために金網の面内方向（金網伸長方向）への引張試験（ここでは面内静的試験と記載）と落石衝突方向に対しての引張強度を調べる面外方向（金網面に直角方向）への引張試験（ここでは面外静的試験と記載）を行った。落石に近い衝撃力を受けた時の挙動を調べる試験として，水平に張った金網面に対して，吊り上げたおもり（重錘）を自由落下させ金網が，破壊するまでの落下高さを求める衝撃試験（ここでは面外動的試験と記載）を行った。

各材料の面内及び面外静的試験による荷重と変位の関係，及び面外動的試験による重錘補足時の衝撃力とたわみ量の違いと金網が破壊するまでの落下高さ（入力エネルギー）を評価することとした。

#### 6. 3. 1 面内静的試験

面内引張試験には写真-6. 3 及び図-6. 3 に示すように，1000mm×1000mm の範囲を支持点として，4 辺のうち 6 本の鋼棒（金網拘束金具）で対向する 2 辺を固定することにより横方向変位を拘束し（写真-6. 3 の左右），他の対向する 2 辺を 7 本の鋼棒で油圧ジャッキを用いて一様に引張荷重を作用させる（写真-6. 3 の上下方向）装置を用い，いずれかの素線が破断するまで載荷し，ロードセル（荷重計）による荷重と変位計による金網の変位量を計測した。

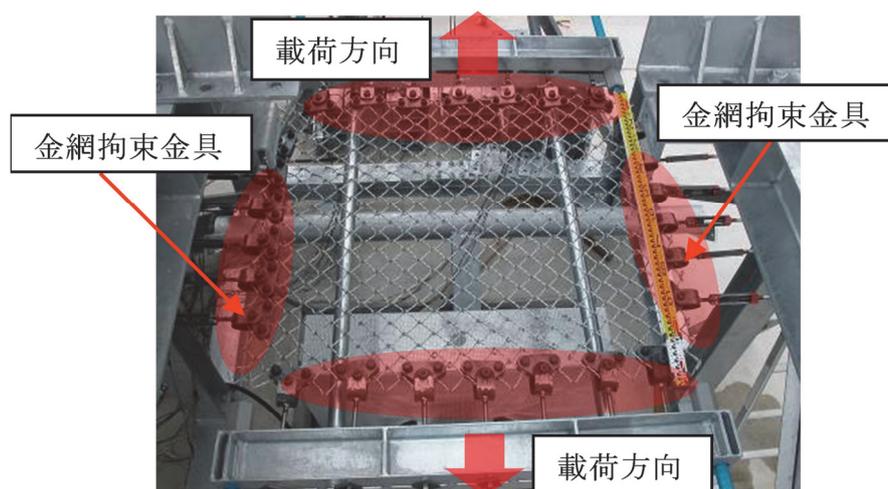


写真-6. 3 面内静的試験状況

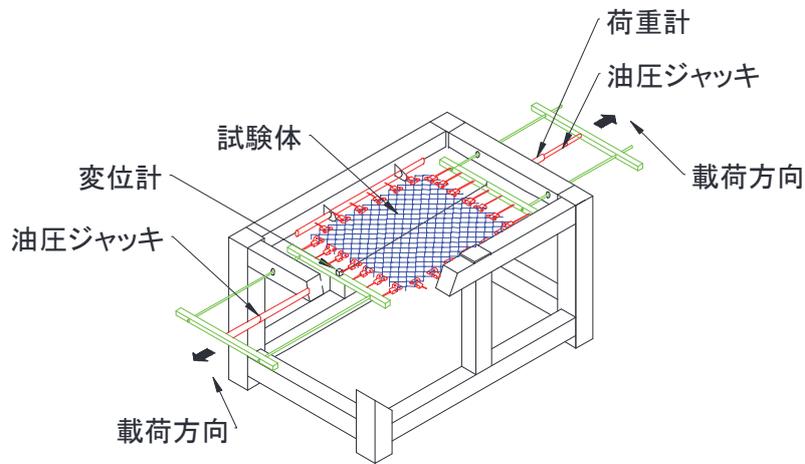


図-6. 3 面内静的試験装置概略図

### 6.3.2 面外静的試験

面外静的荷重試験においては面内引張試験と同様の装置を用いたが、横方向は幅 1000mm の位置に鋼管を配置し、金網が荷重方向へ弓状に変形しないよう鉛直変位を拘束した（写真-6.4，図-6.4）。

直径 400mm，質量 1.53kN の鋼製の半球を金網上に載せ下方より鋼棒を用いて引張り，ロードセルを用いた荷重と変位計より金網の変位量を計測した。

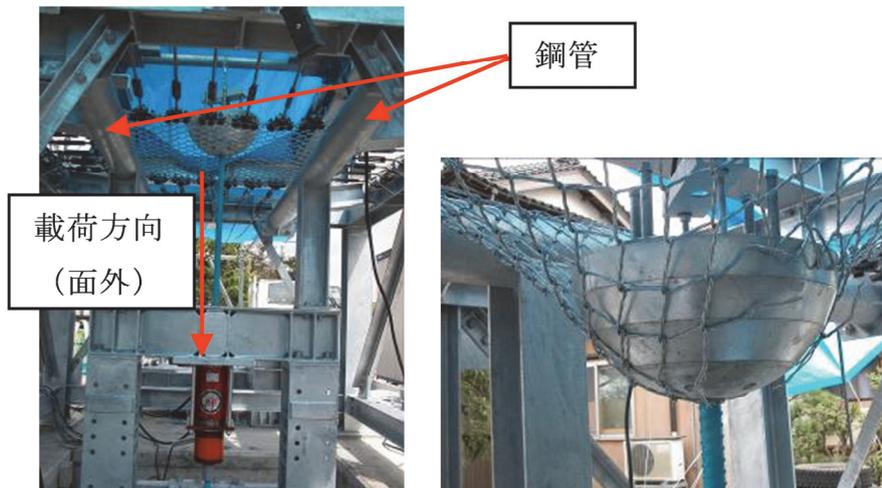


写真-6. 4 面外静的試験状況

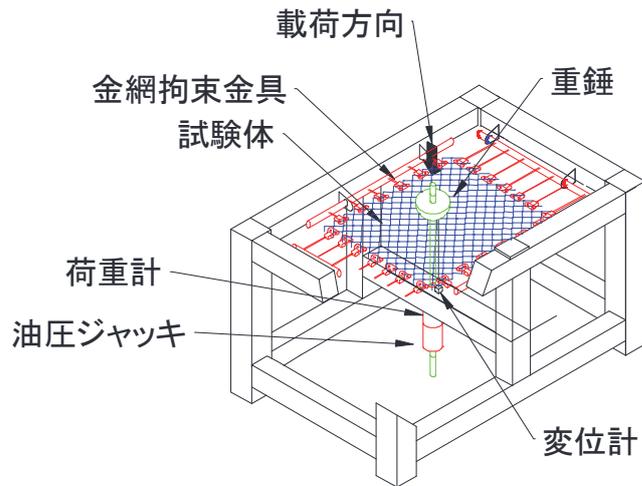


図-6. 4 面外静的試験装置概略図

### 6.3.3 面外動的試験

面外動的試験では面外静的試験と同様の装置と直径 400mm、質量 2.21kN の鋼球をホイストにて吊り上げた後、重錘離脱装置を用いて落下させた。鋼球の落下高さを 100mm ずつ増加させ、その都度新しい金網に交換し、金網が破断するまで落下高さを増大して試験を繰り返した（写真-6.5，図-6.5）。重錘には加速度計を設置し、衝撃力と重錘のたわみ量を計測した。

変形の様子を高速度カメラにて撮影し、実験後のたわみ量をメジャーにて目視計測で行った（写真-6.6）。

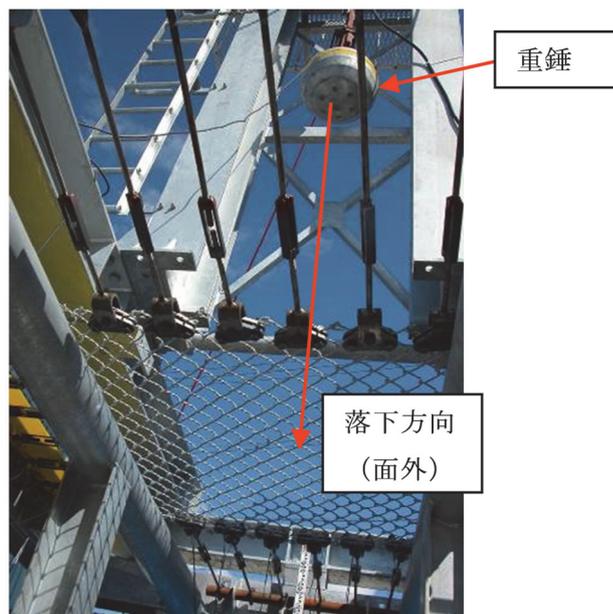


写真-6. 5 面外動的試験状況

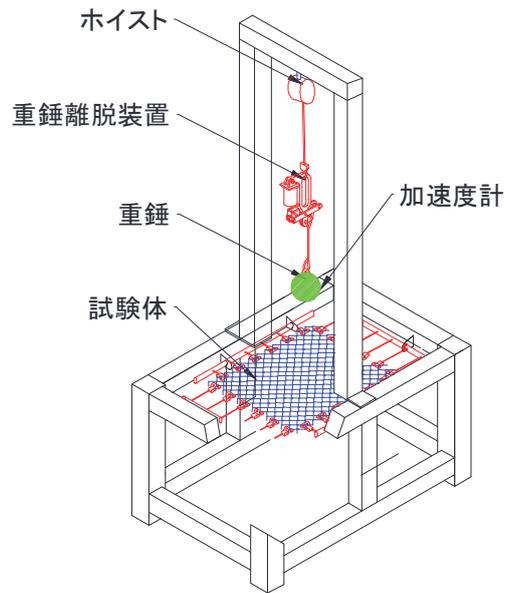


図-6. 5 面外静的試験装置概略図



写真-6. 6 面外動的試験状況(たわみ量計測)

#### 6.3.4 測定機器について

計測に用いる機器を表-6.2 にまとめた。面内静的試験に使用するロードセルは定格容量 200kN の CLC-200KNA を用い、面外静的試験では定格容量 2MN の KCE-2MNA とした。面内及び面外静的試験に使用する変位計は、定格容量 1000mm の DP-1000C を用いた。面外動的試験に使用する加速度計は、定格容量  $1000\text{m/s}^2$  の ARJ-1000A を用いデータ計測は、データロガーとして NR-500 とひずみ計測ユニットの NR-ST04 を用いた。

表-6. 2 測定機器

計測項目	測定機器
荷重	ロードセル：東京測器 KCE-2MNA, CLC-200KNA
変位(静的)	変位計：東京測器 DP-1000C
変位(動的)	加速度計，高速度カメラ (480fps)，目視計測
衝撃力	加速度計：東京測器 ARJ-1000A
データロガー	キーエンス：NR-500, NR-ST04 サンプリング周期：静的 1s 動的 1ms

## 6. 4 実験結果

### 6. 4. 1 線径の違いによる挙動について

#### 6. 4. 1. 1 面内静的試験

各線径において、金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量及び荷重の結果を図-6.6 にまとめた。変位量と荷重の関係は一定の勾配で変位せず、初期、中期、後期で傾きが異なることがわかる。経過を観察すると、初期はひし形形状を保持しようとする耐力が影響し、中期はひし形の形状変形が始まり、後期は形状変形が限界に達し素線自体の耐力によるものと考えられる。

線径が大きくなると破断荷重も大きくなるが、最大変位量に大きな違いがないことがわかった。

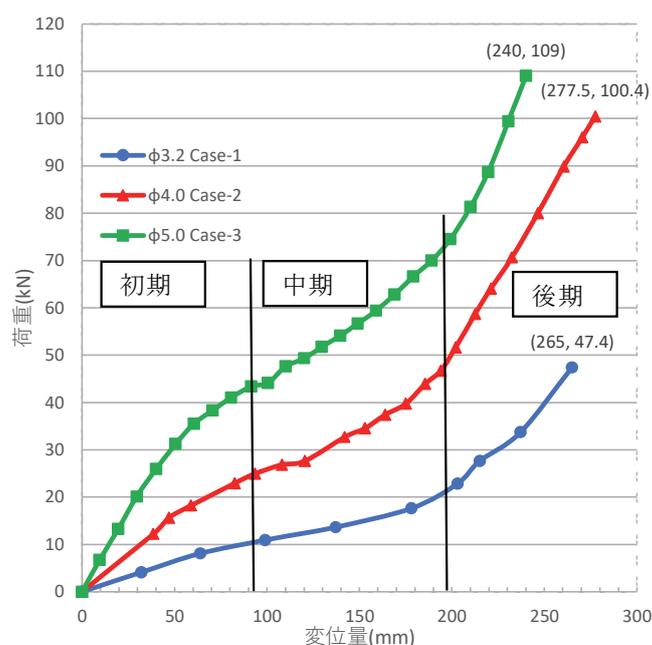


図-6. 6 線径の違いによる面内静的試験結果

#### 6.4.1.2 面外静的試験

各線径において、金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量と荷重の結果を図-6.7にまとめた。

面内静的試験のような勾配が異なる直線的な傾きではなく2次曲線を描いており、経過観察すると重錘との接触箇所近傍で金網の形状の変形が始まり、その後素線が破断した(写真-6.4右)。

金網の素線の断面積に比例した破断荷重となっているが、面内静的試験同様に最大変位量に大きな違いは無かった。

類似の試験を村石ら<sup>44)</sup>が行っているが、線径が変化しても変位量に違いは少ないという類似の傾向が得られている。

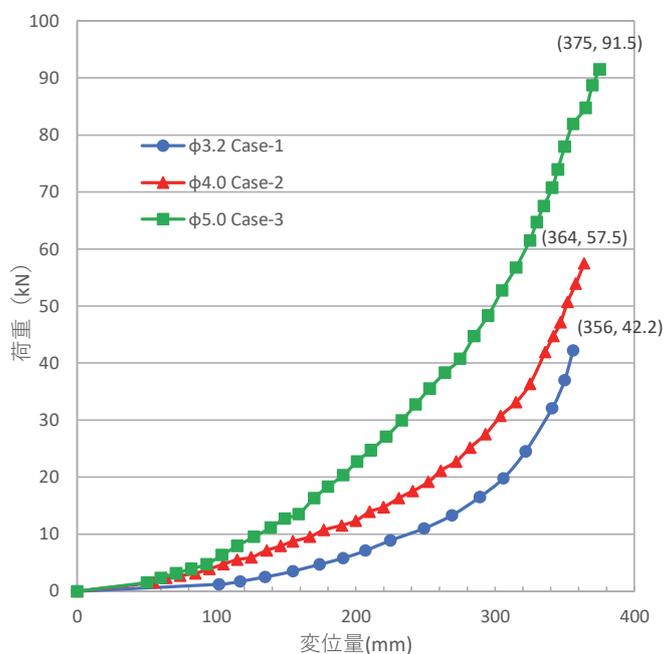


図-6.7 線径の違いによる面外静的試験結果

#### 6.4.1.3 面外動的試験

各線径において金網の素線が破断なく重錘を受け止めた時の重錘落下高さ、金網のたわみ量、入力エネルギーの結果を表-6.3にまとめた。また、その際の衝撃力を図-6.8に示す。

素線の耐力に比例して重錘の落下高さや衝撃力が異なっているが、たわみ量は素線の耐力に依存しておらず落下高さや素線の耐力に依存していると考えられ、面外静的試験のような一定の値を示さなかった。

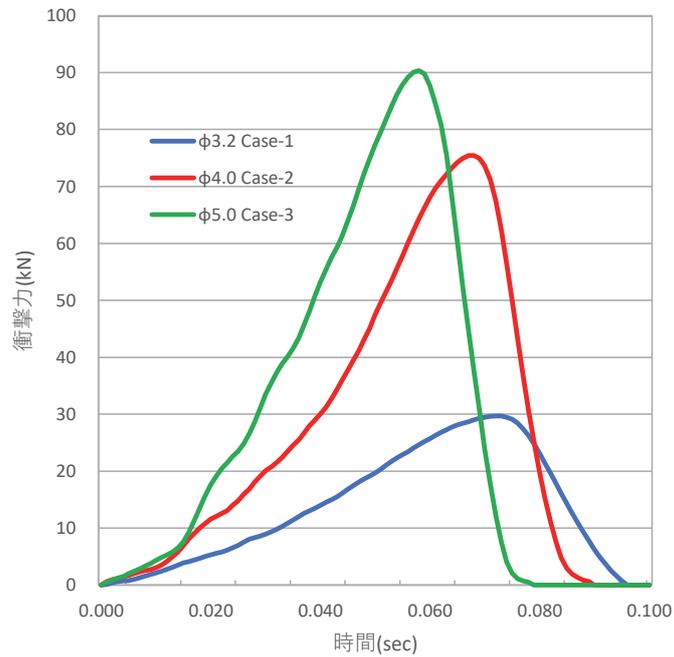


図-6.8 線径の違いによる面外動的試験結果

表-6.3 線径の違いによる面外動的試験結果

	落下高さ (m)	たわみ量 (mm)	入力エネルギー (kJ)
Case-1	0.8	340	1.9
Case-2	2.4	272	5.8
Case-3	3.5	310	8.4

## 6.4.2 材質の違いによる挙動について

### 6.4.2.1 面内静的試験

各材質において、金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量及び荷重の結果を図-6.9 にまとめた。6.4.1.1 同様に初期・中期・後期でグラフの傾きが異なり材質を変えても似通った曲線を描いている。CASE-4 と CASE-5 を比較すると初期・中期では同じ挙動を示しているが、後期では破断荷重に違いがあり各材質の引張強さに比例した結果となっている。

線径の違い同様に材質が異なる場合でも最大変位量に違いがなかったことから、線径及び材質に関係なくひし形金網の形状で最大変位量が決まると考えられる。

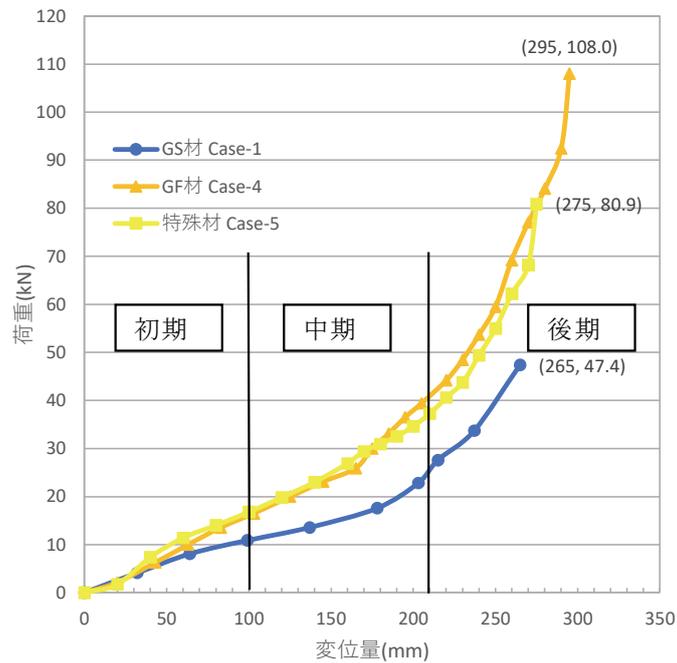


図-6.9 材質の違いによる面内静的試験結果

#### 6.4.2.2 面外静的試験

各材質において、網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量と荷重の結果を図-10 にまとめた。6.4.1.2 の線径の違い(図-6.7)と同様に 2 次曲線を描いており最大荷重は引張強さに比例しているが、最大変位量には違いが見られない。この結果においても 6.4.2.1 の面内静的試験と同様に、ひし形金網の形状で最大変位量が決まると考えられる。

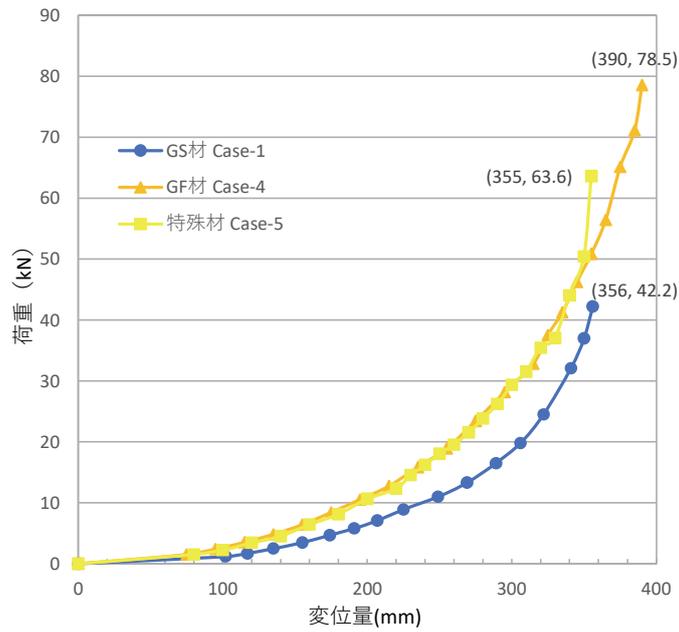


図-6.10 材質の違いによる面外静的試験結果

#### 6.4.2.3 面外動的試験

各材質において、金網の素線が破断なく重錘を受け止めた時の重錘落下高さ、金網のたわみ量及び入力エネルギーの結果を表-6.4 にまとめた。また、その際の衝撃力を図-6.11 に示す。

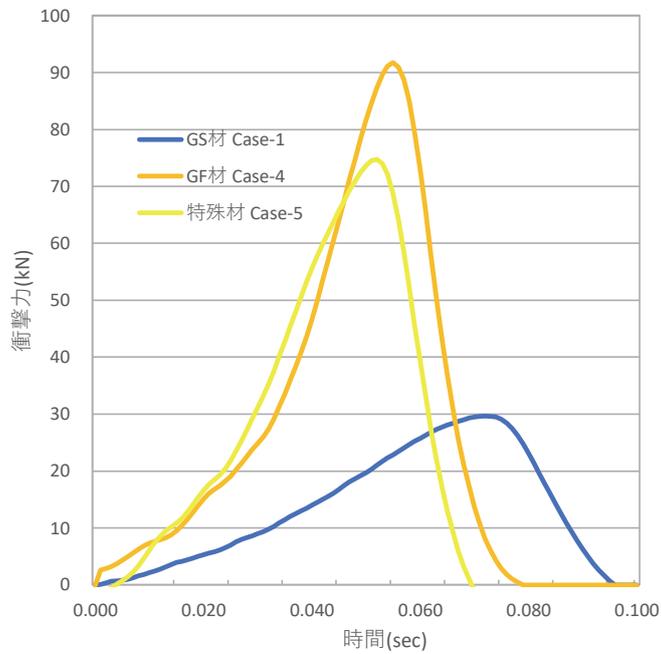


図-11 材質の違いによる面外動的試験結果

表-6.4 面外動的試験結果

	落下高さ (m)	たわみ量(mm)	入力エネルギー(kJ)
Case-1	0.8	340	1.9
Case-4	2.9	318	7.0
Case-5	2.5	350	6.0

素線の引張強さに比例して落下高さ及び衝撃力が異なっているが、たわみ量は4.1.3線径の違い同様に落下高さと素線の耐力に依存していると考えられる。

破損状況であるが、特殊材及び SWGF-1 において素線がせん断破壊を起こし重錘径以上の破網が見られた(写真-6.7)。

軟鋼線である SWMGS-4 では、重錘形状内で数本破断しており破断の様子に違いが見られた(写真-6.8 Case-1)。

硬鋼線である SWGF-1 は、軟鋼線と比べ引張強さはあるが伸びがなく(表-6.1)一定以上の力が加わると破断し易いため、このような破壊が起きたと考えられる。

他の材料では素線が破断しても重錘を受け止めるか重錘の球形状の形がわかるような貫通が見られる(写真-6.8)。

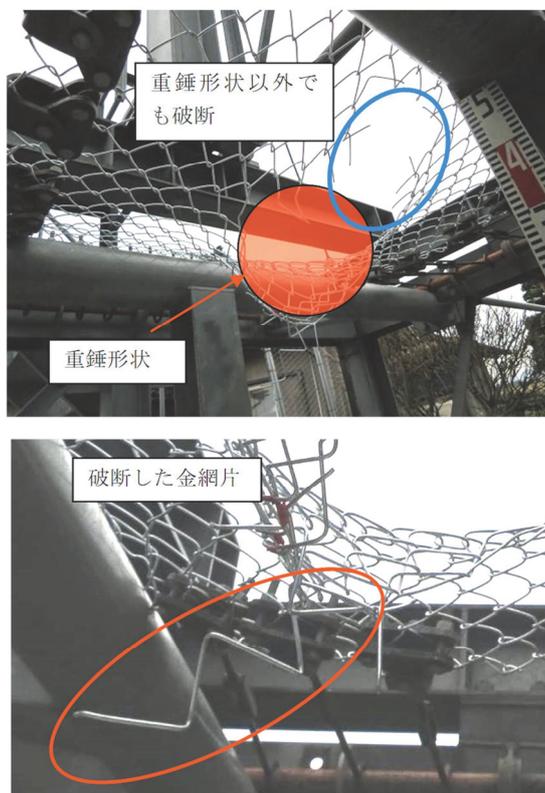


写真-6.7 SWGF-1 における面外動的試験状況

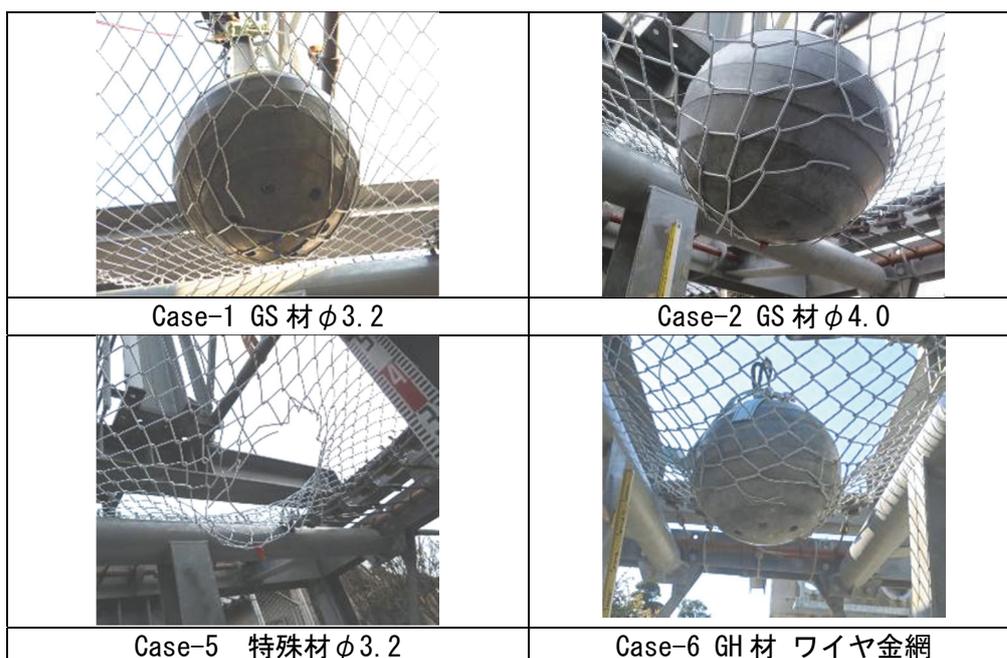


写真-6. 8 各 Case における面外動的試験破断状況

#### 6. 4. 3 形状の違いによる挙動について

##### 6. 4. 3. 1 面内静的試験

標準形状(図-1 左)とは異なり、ひし形の角度(図-6. 1 右)や素線の形状の違い(写真-6. 2)について今までの試験方法と同様なひし形金網の幅方向(金網の列線方向)に加え、長さ方向(金網伸長方向)の2方向(図-6. 2)で引張試験の比較を行った。

特殊材の標準形状(図-6. 1 左)の結果(Case-5)をベンチマークとして比較し、その結果を図-6. 12, 6. 13 に示す。

Case-5 と Case-6 は同じ材質であるが、形状の違いにより変位量は幅方向では小さく、長さ方向で大きく明確な違いがあった。Case-6 では幅方向である鋭角側に荷重をかけた場合、初期からひし形の形状を保持したまま荷重が上昇し形状の変化があまり見られないまま後期へと移り素線が破断した。長さ方向である鈍角側に荷重をかけた場合、中期においてひし形の形状変形が変位量 110mm から 380 mmまで続いた。また破断までの変位量は幅方向の鋭角側に比べ3倍の伸びの違いが見られた。

Case-7 のワイヤ金網では CASE-5 特殊材(標準)と比較すると荷重及び変位量とも両方向において 1. 3~1. 5 倍の値を示している。6. 4. 1. 1 や 6. 4. 2. 1 では線径や材質を変更しても変位量に大きな違いが無かったが、Case-7 のワイヤ金網は標準形状と同じ網目寸法であるが約 100mm 変位量が大きかった。

以上のことから、標準形状では線径や材質を変更しても耐力に比例した傾向を示していたが、金網の形状を変えることにより標準形状と異なる挙動を示すことがわかった。

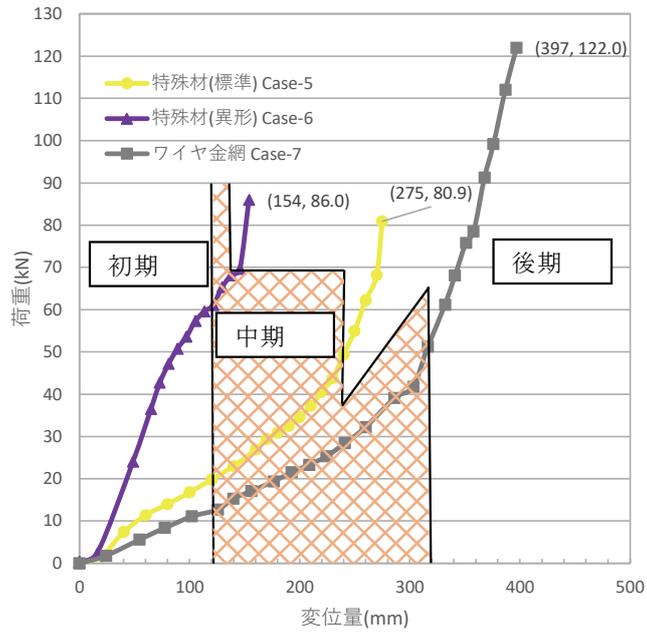


図-6. 12 形状の違いによる面内静的試験（幅方向）

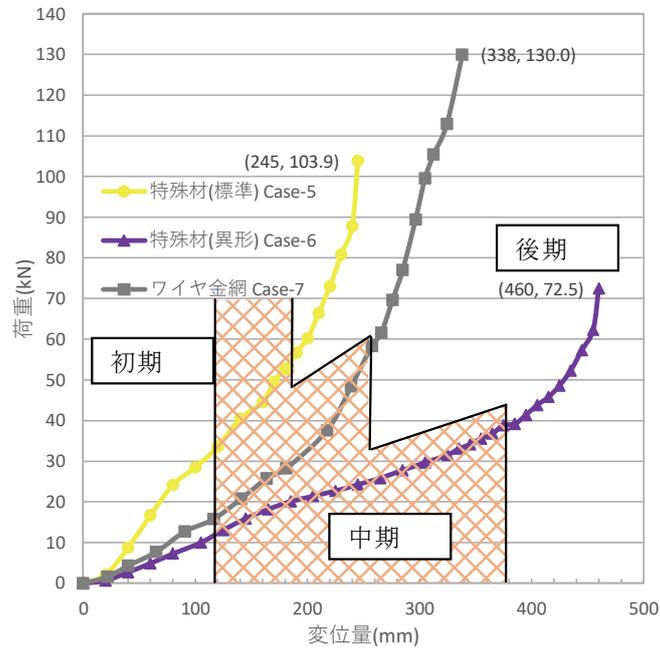


図-6. 13 形状の違いによる面内静的試験（長さ方向）

#### 6.4.3.2 面外静的試験

各形状において、網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量と荷重の結果を図-6.14にまとめた。

Case-5 の特殊材(標準)と Case-6 の特殊材(異形)を比較すると、荷重 10kN までの挙動に違いがあり異形の方が標準より変形量が多いが、その後は同じような荷重と変位置の関係を示している。Case-6 の経過観察より、ひし形の形状が徐々に崩れながら変形し、形状が安定すると荷重が上がり始めた。このひし形形状の変形が Case-5 より Case-6 が大きいため、グラフの曲線に違いが生じたと考えられる。

Case-5 と Case-7 のワイヤ金網を比較すると、同様な 2 次曲線を描くが、荷重で 1.6 倍、変位置で 1.3 倍の違いがあった。6.4.1.2 や 6.4.2.2 のように線径や材質を変更しても変位置に大きな違いが無かったが、Case-7 のワイヤ金網は標準形状と同じ網目寸法であるが、6.4.3.1 の結果と同様に変位置に違いがあった。

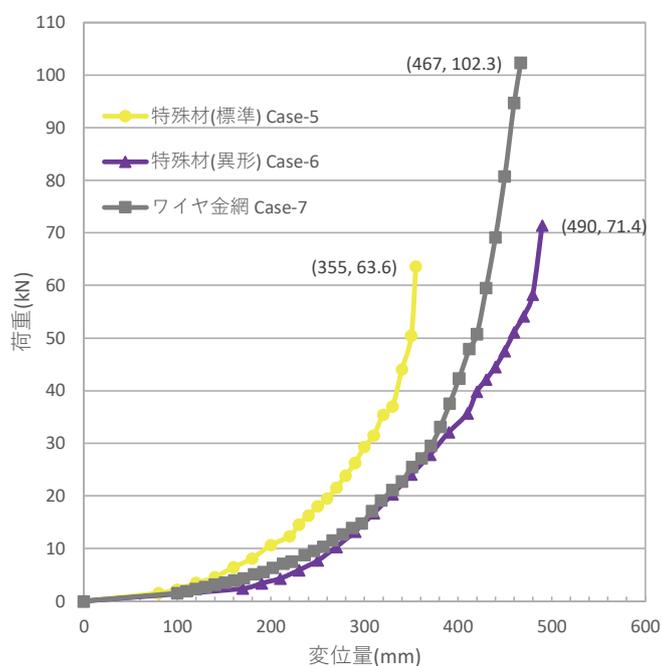


図-6. 14 形状の違いによる面外静的試験結果

### 6.4.3.3 面外動的試験

各材料を比較するため重錘の落下高さを一定とし、その際の金網のたわみ量と入力エネルギーの結果を表-6.5 にまとめた、また、その際の衝撃力を図-6.15 に示す。なお、重錘を受け止めた最大落下高さは特殊材料(異形)及びワイヤ金網ともに 2.9m であった。Case-5 特殊材(標準)と Case-6 特殊材(異形)を比較すると、衝撃力に違いはないが、たわみ量は 50 mm 大きくなった。

Case-5 特殊材(標準)と Case-7 のワイヤ金網を比較すると、たわみ量に違いはないが、衝撃力は小さくなったことから、変形が少なくソフトに受け止めたと考えられる。

表-6. 5 面外動的試験結果

	落下高さ (m)	たわみ量 (mm)	入力エネルギー (kJ)
Case-5	2.5	350	6.0
Case-6	2.5	400	6.0
Case-7	2.5	350	6.0

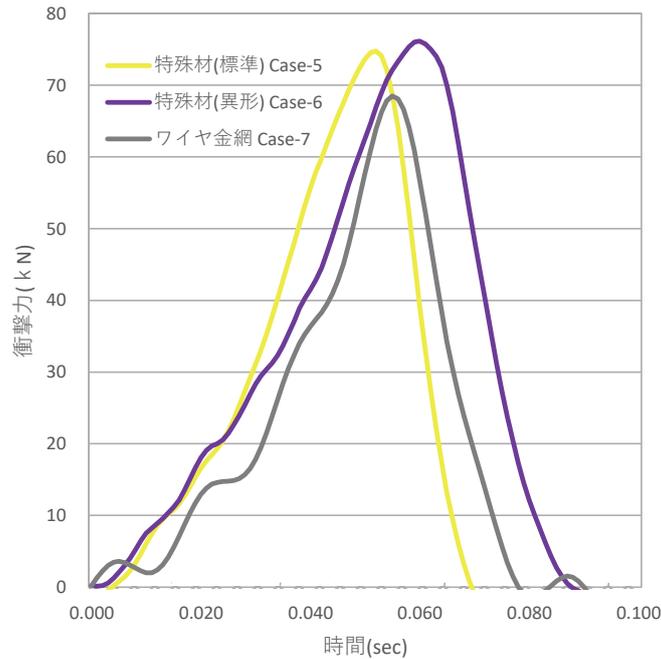


図-6. 15 形状の違いによる面外動的試験結果

### 6. 5 まとめ

本研究では従来型落石防護柵に用いられているひし形金網の特性について線径，材質，形状を変えることによる比較実験を行い，線径，材質，形状を変えることにより，それぞれ異なる挙動を示すことがわかった。

本研究で得られた結果を整理すると以下の通りである。

- (1) 面内静的試験及び面外静的試験において，標準形状のひし形金網は線径や素線の引張強さに比例して金網が破断する荷重は変わるが，変位量に違いは見られない。これは，村石ら<sup>6)</sup>や今野ら<sup>7)</sup>の報告書と同様な傾向が得られた。
- (2) 引張強さの大きい硬鋼線を金網に使用することにより吸収可能エネルギーは大きくなるが，表-1 に示す素線自体の伸びが少ないため，局所的な集中荷重を受けると，せん断破壊により破断範囲が広範囲に広がる。このため小さな落石が金網に高速で衝突する場合など落石防護柵へ使用する際は，注意が必要である。
- (3) ひし形形状の角度を変えることにより，面内静的試験及び面外静的試験では，標準形

状と違う挙動を示し、幅方向と長さ方向で異なる挙動を示す（図-12, 13, 14）。

落石防護柵では、落石衝突時に金網が柵高方向及び柵延長方向とも変形するが、金網の形状を変更することにより、落石衝突時の変形を制御できると考えられる。

例えば、落石衝突時に柵高が低くならないように変形させることが可能になると考えられる。

(4)素線を 3 本より合わせたワイヤ金網は、変形性、耐荷重に優れており、エネルギー吸収量を向上することが可能と考えられる。

また、落石衝突時における金網が受け止める衝撃力は、ワイヤロープ及び支柱に伝わることから、衝撃力を低減することにより、ワイヤロープや支柱への負担を軽減できると考えられる。

今回の実験から、ひし形金網の異なる線径、材質及び形状の挙動の違いを確認することができたが、今後落石防護柵を開発する上で特殊な金網を用いる場合などには、金網の特性を調べる標準試験方法の確立が必要と考えられる。また、使用する金網の特性を把握した上で、落石防護柵全体（吸収可能エネルギー、変位量など）の評価及び検討が必要と考えられる。

今後は落石防護柵の実態に合わせ、横ロープを配した場合や、その間隔の違いによる挙動の違いについてさらに実験を行い、金網の特性を明らかにするとともに落石防護柵の設計方法を確立する予定である。

## 第7章 人力運搬可能な流木の二次流出対策工の試験施工

### 7.1 人力運搬可能な二次流出対策の必要性について

近年、流木を伴った災害が全国的に多く発生している。流木を伴った土石流が家屋に衝突することによって、建物の倒壊・破壊の程度を増大させる例が数多く報告されている<sup>46)</sup>。また、流木が流下することで、ボックスカルバートや橋梁を閉塞させ、その地点から氾濫が発生する災害事例も非常に多い<sup>47)</sup>。2018年（平成30年）7月豪雨では、西日本を中心に2,581件もの土砂災害が広域に多発し、同年の8月30日から31日にかけて、山形県内各地で豪雨による浸水や土砂災害が発生した<sup>48)</sup>。今回対象地とした山形県最上町東法田地区においては、山腹崩壊に伴う土砂・流木の流出が発生しすることで河川の橋梁を流木が塞ぎ、土砂が集落や農地に氾濫する災害が発生した(写真-7.1, 7.2)。

土砂災害が発生した河川の上流域には、土砂や流木が谷などの溪床に残っていることが多く、こうした流木が次の降雨により流出するなど二次災害の危険性がある。応急対応が必要となることも多いが、治山ダムや砂防堰堤などの工事には時間がかかる。そこで、人力で運搬可能な材料を用い、現地にある立木を利用することで、短期間に流木の二次流出対策（応急対策）が可能な方法の検討を行い、現地に試験施工を行った事例を報告する。



写真-7.1 最上町東法田地区にて橋梁を流木が塞いでいる状況<sup>48)</sup>



写真-7. 2 最上町東法田地区での土砂堆積状況<sup>48)</sup>

## 7. 2 調査地について

### 7. 2. 1 調査地の場所と地形

2018 年（平成 30 年）8 月に山腹崩壊に伴う土砂・流木の流出が発生した最上町は、山形県北東の内陸部に位置し、奥羽山脈を境に宮城県に隣接している（図-7. 1）。

今回調査（試験施工地）の対象とした箇所は、最上町東法田地区を流れる最上川の支川小国川の支流の沢内川である。沢内川流域は、尾根や沢明確に発達した地形がみられ尾根上には牧草地など平らな地形となっている。沢内川を踏査した結果、一部斜面の崩壊地や複数の沢から流路の洗堀による立木の流出が確認できた。特に図-2 に示す町道から 400m 上流の崩壊地は、今回発生した最も大きい山腹崩壊地であり、崩壊地の下部には崩土と流木の堆積も多く見られた（写真-7. 3, 7. 4）。流木が次の降雨により流出する危険性もあると判断されたので、本地点を中心に調査を進めることとした。なお町道終点には本災害後に治山ダムが設置されている。

調査地の地質は、20 万分の 1 シームレス地質図から、凝灰質砂岩、シルト岩など第四紀中期更新世の堆積岩類からなり、台地になった上部斜面には第四紀中期更新世のデイサイト・流紋岩からなる火砕流堆積物が分布している。上部斜面の地質に見られる火砕流堆積物は、鬼首カルデラから噴出したと考えられる。崩壊発生前の 2006 年～2007 年に撮影された航空レーザー測量データ（撮影機関：国土交通省 東北地方整備局 新庄河川事務所）から地表の数値標高モデル（DEM(Digital Elevation Model)）を作成し、Arc GIS ver10.4 により等高線図を作成した（図-7. 3）。さらに図-4 は、国土地理院 地理院地図による調査地の崩壊発生前のオルソ画像（撮影年月 2013 年 9 月～11 月）である。図-3 および図-7. 4 の計測・撮影後の 2018（平成 30）年に山腹崩壊が発生し、土砂と流木の堆積の見られる場所に試験施工をしたので、その測線について DEM から作成した縦断図（図-7. 5）と縦断測線を図-3 に赤線で示す。

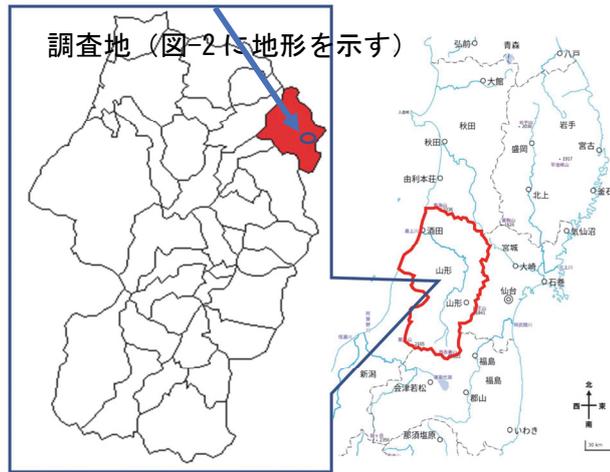


図-7. 1 調査地について

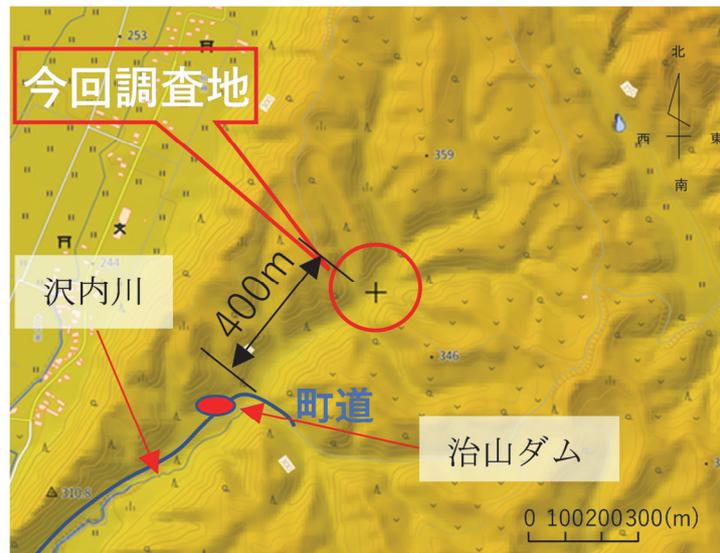


図-7. 2 調査地の地形

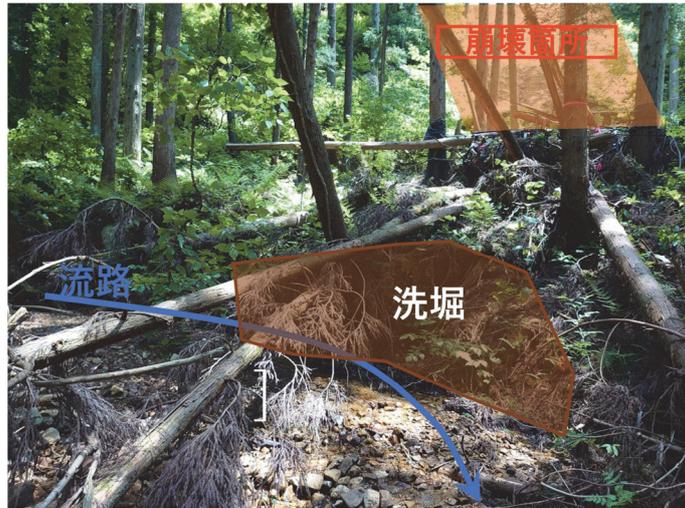


写真-7. 3 斜面より流出した木々の状況



写真-7. 4 溪床部の流木状況

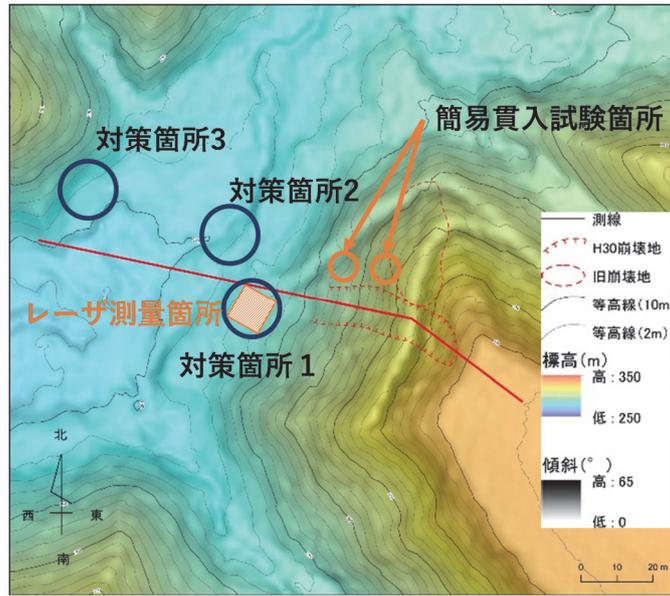


図-7. 3 調査地の等高線図

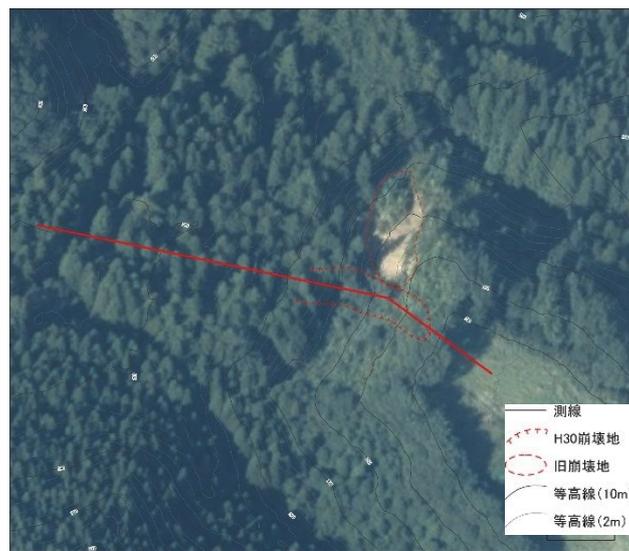


図-7. 4 地理院地図による調査地のオルソ画像（撮影年月 2013年9月～11月）

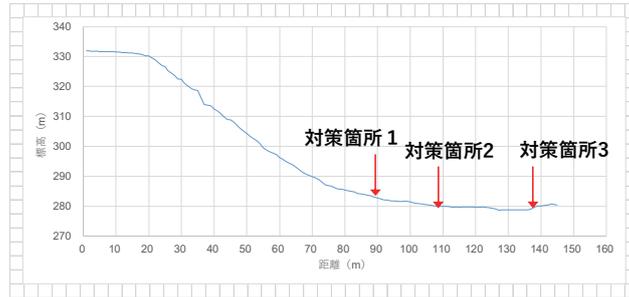


図-7. 5 縦断図

### 7.2.2 山腹崩壊の発生原因となった2018年8月豪雨について

2018年8月30日から31日にかけて前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み、大気の状態が非常に不安定となり、山形県を中心に大雨となった。アメダス最上町瀬見地区では、8月30日の正午過ぎから降雨を観測した。31日午前3時に1時間で45.5mmを記録し、その後も3時間にわたり20mm以上の雨が降り続いた。この観測所では、30日0時から31日23時までの48時間の積算雨量は221.5mmとなった(図-6)。本降雨で山腹崩壊が発生し、斜面下方に土砂と流木が流出・堆積した。

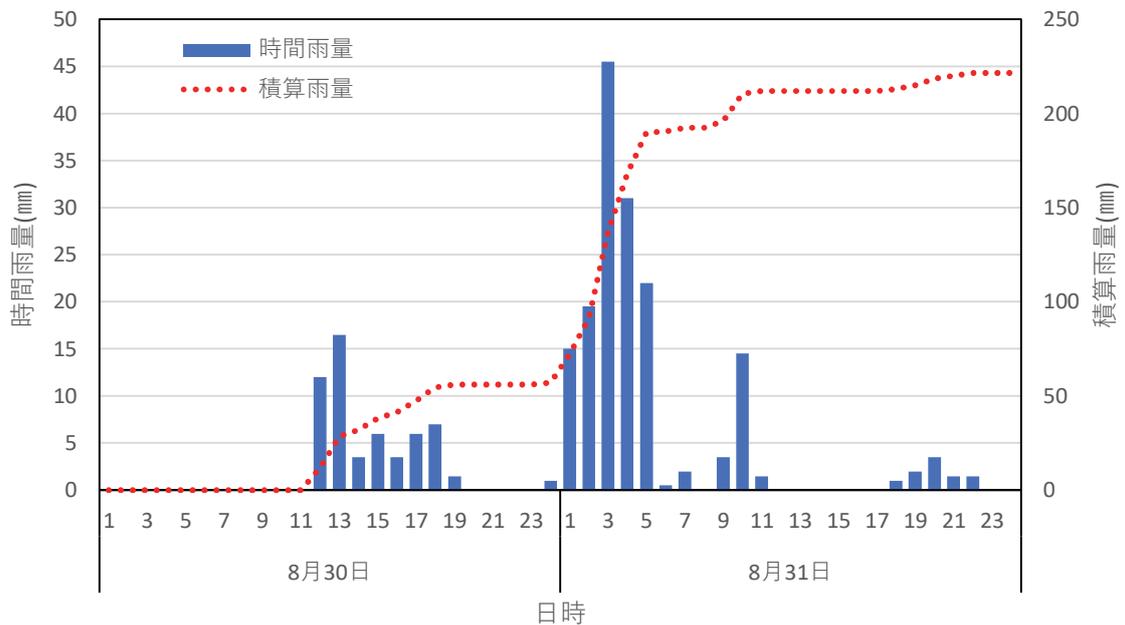


図-7. 6 2018年8月30日から31日にかけて降雨状況(アメダス最上町瀬見より)

## 7.3 山腹崩壊発生に伴う土砂・流木の現地調査

### 7.3.1 簡易貫入試験による崩壊特性の把握

山腹崩壊発生に伴う土砂・流木の現地調査を行うとともに、崩壊地の特性を把握するため簡易貫入試験を行った。実施箇所を図-7.3及び写真-7.5に示す。地点1は崩壊地に向

かって左側の未崩壊の下部斜面，地点 2 は斜面上部でそれぞれ調査した。地点 1，地点 2 における調査結果から表層の分布は 1 m 以下であり（図-7.7），今回の崩壊は比較的表層で生じたと推定される。また風化土層の厚さは 0.9m 程度と考えられる。土砂崩壊は幅 10.5m 長さ 29.8m にて発生しており推定崩壊土砂量は約 280 m<sup>3</sup>である。



写真-7. 5 UAV による崩壊地箇所と調査地点 (2021. 6. 3 撮影)

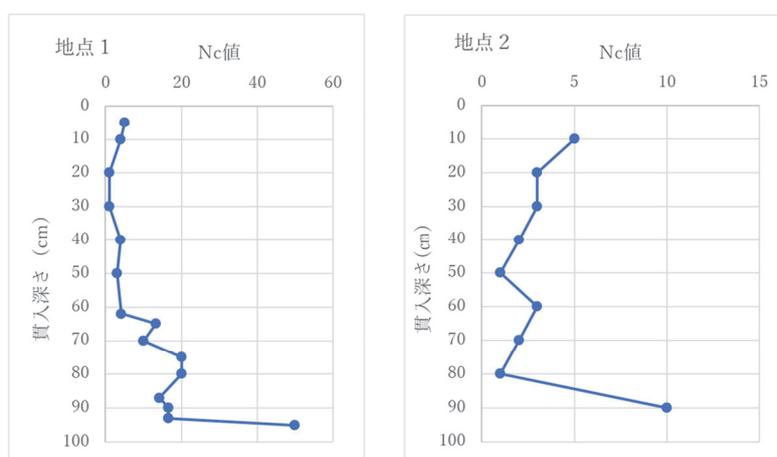


図-7. 7 崩壊地における簡易貫入試験結果

### 7.3.2 流木堆積量の計測

今回の調査では，10m×10m区画に堆積している流木と試験施工予定箇所に堆積した流木，試験施工予定箇所の脇に堆積した流木，その他崩壊地周辺に堆積した流木の材積を測定した<sup>30)</sup>。崩壊地の流木材積は 11.6 m<sup>3</sup>であった。試験施工の脇には 5.5 m<sup>3</sup>の流木が堆積しており，想定される重量は，生木の杉の比重を 1.0 として計算すると，総流木重量は

53.9kN となる。今回の堆積量計測はメジャーを用いて行ったが、補足と机上での検討を行うために 2020 年 3 月に発売された LiDAR 機能搭載のスマートフォン「iPad Pro」(Apple)を用いてによるレーザー測量も併せて行った<sup>30)</sup>(写真-7.6)。なお、調査地の植生は、溪流沿いにスギの造林地が広がりスギが優先している。一部に広葉樹のサクラや崩壊地周辺にはホオノキなどが見られる。流木はスギがほとんどであった。また、流木堆積箇所付近の溪流山脚部は洗掘されており(写真-7.3)今後の降雨により更に浸食が進み、倒木が流出する可能性がある。



写真-7. 6 流木の状況(iPad レーザー計測画像)

## 7. 4 倒木の流出対策について

### 7. 4. 1 想定荷重

崩壊斜面にとどまっている倒木の安定度を評価する指標は調べたところ存在しなかったため、落石対策<sup>17)</sup>における浮石や転石が滑動しないよう対策する際に使用する計算式を用いて、本調査地の流木の流出する力(抑止力)を求めてみた。

計算の概念図を図 7.6 に示す。S の滑り力に対して、 $P_s$  はその抑止力であり斜面勾配と材積重量によって抑止力が変化する。

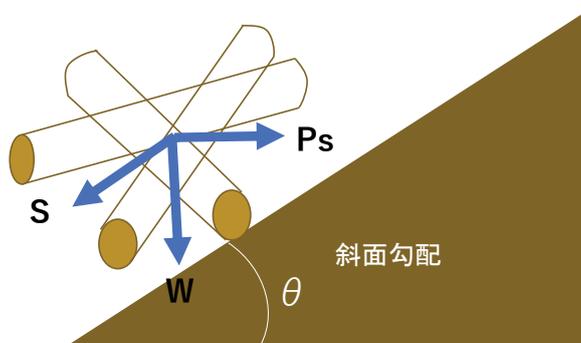


図-7. 6 流木の流出抑止力の計算概念

すべり力  $S = W \cdot \sin \theta$  …(式-1)

抑止力  $P_s = S / \cos \theta$  …(式-2)

となる。

ここに

総流木重量  $W = 53.9\text{kN}$

斜面勾配  $\theta = 30^\circ$

より、 $P_s = 31.1\text{kN}$ となる。

以上のことから安全率 2.0 を考慮し、約 70 kN の荷重に耐えられる構造物が必要であることがわかった。

#### 7.4.2 対策工の構造

近年、山地災害や土砂災害の多発による流木対策が急務となっているが、新たな流木捕捉技術による流木対策として、流木捕捉工（仮称）の提案もされている<sup>49)</sup>。しかし、現行の流木対策工や流木捕捉工（仮称）も含めて、人力運搬での想定はされていない<sup>49) 50)</sup>。土砂崩壊地や流木の堆積地帯は溪流上流部に存在し、谷止工などの恒久対策構造物は、重機や車両が進出可能な場所である下流部となり、工事は長期間となる。

流出を抑えるには、発生後なるべく早くかつ重機等使用することなくできるように考える必要がある。

そこで、軽量(人力で運搬可能)かつ工具を必要とせず、現地の立木を利用した構造を考えた。

対策工の概念図を図 7.7 に示す。捕捉する面材は、繊維で編み込んだ落石対策に使用するネットを使用し、面材で受けた荷重を繊維ロープで受け持つ。繊維ロープは現地にある立木を利用しワイヤクリップ等金具を使用せず結束を行う。

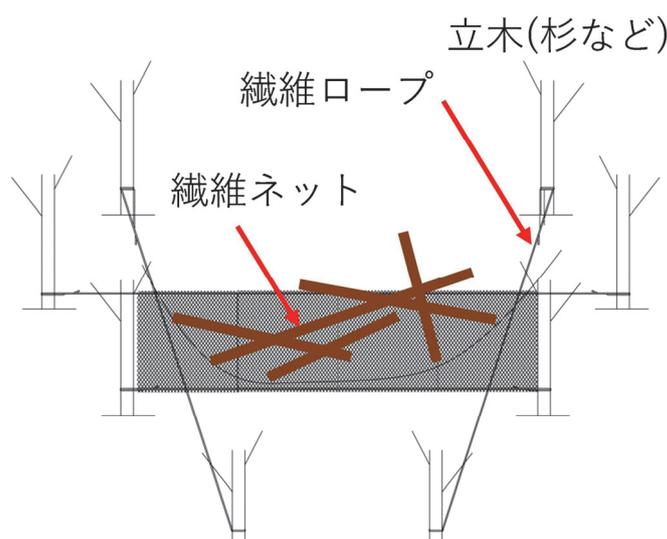


図-7.7 対策工の概念図

### 7.4.3 対策工の材料諸元

使用する材料は、ネット及びロープともポリエステル製の軽量で高強度かつ耐候性に優れた材料を選定した(表-7.2)。

人力運搬を想定しているため、ネットの大きさは2.0m×2.0mで重量は10kgとし、ネット同士をつなぎ合わせることができるようにすることで、さらに大きな面積をカバーできるようにした。

ロープを固定する現場の立木位置が一定ではないため、20m重量5.2kgを1本とし、必要本数を用いることとした。

表-7.2 使用材料諸元

材料名	諸元
ネット	ポリエステル製 網目サイズ：縦方向90mm，横方向65mmの菱形 単位重量：2.5 kg/m <sup>2</sup>
ワイヤロープ	ポリエステル製 ロープ径：φ24 mm 破断強度：70kN 単位重量：0.26 kg/m

### 7.4.4 対策工の静的載荷試験

対策工の性能を確認するため実験用架台にネットの大きさ2.0m×2.0m，長さ5.0mのロープを4本用い、ネットに山砂を詰めた大型土嚢袋を載せ検証を行った(図-7.8)。計測項目は積載重量，ネットの変位，ロープ張力とした(表-7.3)。

実験用架台は、山留材300×300mmを幅5.0m奥行き5.0m四方に組み立て、ネットのたわみを考慮し高さ2.0mとした。

載荷時にロープに加わる張力の測定は、ロープと架台を接続する金具に、ひずみゲージを取り付け張力計測した。ひずみゲージを取り付けた金具は、事前にキャリブレーションを行い、ひずみ-荷重関係を求めた(図-7.9)。

実験は、最初に9.8kNの大型土嚢袋を中央に載荷した後、0.3kNの土嚢袋や3kNの小型土嚢袋で隙間を埋めるように配置して行った。

実験結果を図-7.10に示す。沈下量は9.8kN大型土嚢袋を載荷した後は変位量が少なく載荷した荷重に対して比例した変位量を示した。

ワイヤ張力は、載荷荷重15kNまでは比例していたがその後張力は増減を見せた。これは、ワイヤのサグが変化したことによると考えられる。最大積載荷重は44.13kNであったが、これ以上積載すると崩れる恐れがあったため試験を中止した(写真-7.6)。

表-7.3 計測項目と測定機器について

計測項目	測定機器
ワイヤ張力	ひずみゲージ：2枚1ゲージ法3線式結線法
ネット変位	メジャーによる目視計測
データロガー	キーエンス：NR-500, NR-ST04

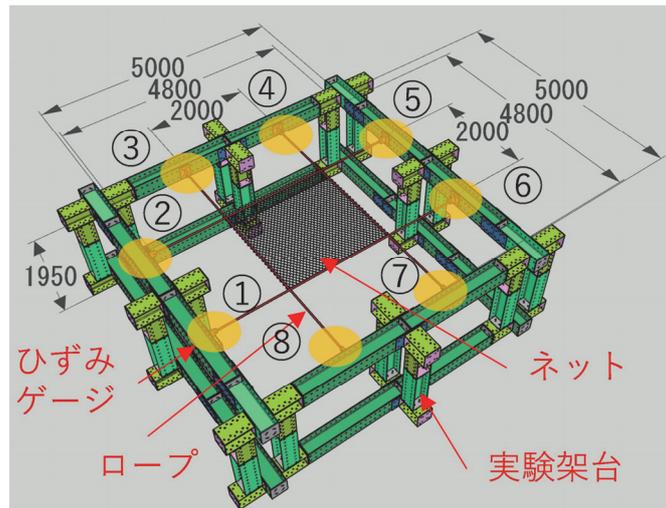


図-7.8 実験架台モデル図

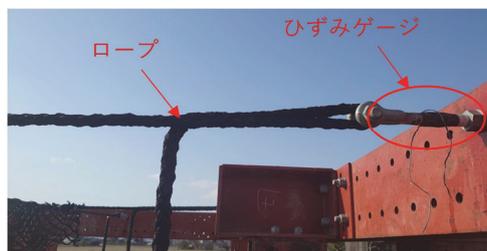


図-7.9 ひずみゲージの取付状況

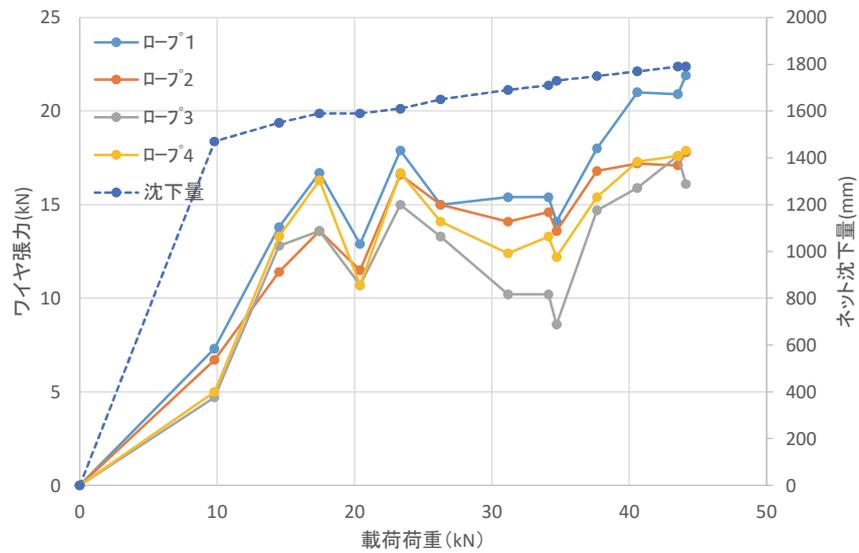


図-7.10 積載荷重とワイヤ張力及び沈下量の関係



写真-7.6 試験状況(最大積載時)

試験の状況よりまだ余裕がありワイヤ破断強度にも達していないが、調査地における流木の流出を防ぐには十分な効果があることが分かった。

#### 7.4.5 立木の耐荷重について

浮石や転石の移動を抑えるロープ掛工では、発生源に対してワイヤを張り、ワイヤをロックボルト等のアンカーにて固定するが、コンプレッサーやレッグハンマー等重量物を運搬する必要があるため今回は現地にある立木を利用できないか検討を行った。

現地に多く見られる杉に関する引き倒し試験結果<sup>51)</sup>より抵抗モーメント算出式(式-3)が導かれているので、その計算式を用いて検討を行った。

$$M_{max} = 1233.6 \cdot D^{2.21} \text{ (kN} \cdot \text{m)} \quad \dots \text{(式-3)}$$

ここに

D：胸高直径(m)

ワイヤロープの破断強度は 70kN であるため、安全率 2 を確保すると許容引張張力は 35kN となり、胸高直径 0.2m の場合の抵抗モーメントは 35.2kN・m である。1 m以下の高さでワイヤを設置すれば問題はないと考えられる。

#### 7.4.6 試験施工箇所の設計方法の検討について

試験施工に際し、以下の手順にて設計方法を検討してみた。

##### (1) 材積量及び斜面勾配の確認

調査地における対策箇所の材積量は 5.5 m<sup>3</sup>

斜面勾配は 30°

##### (2) ワイヤロープを固定する樹木の選定及び胸高直径

堆積している流木を覆うように設置できるよう、なるべく大きい木を選定(図-7.11)。

今回ロープを固定する木の樹種は杉であり胸高直径は 2 本とも 0.35m であった。

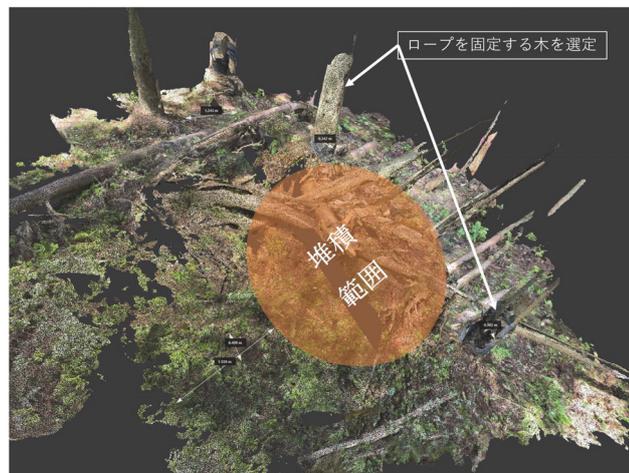


図-7.11 ワイヤロープを止める樹木の選定箇所(iPad レーザー測量結果より)

##### (3) 対策工にかかる荷重とワイヤロープの照査

流木滑動時の荷重及び抑止力を 7.4.2 の式-1 及び式-2 を用いて算出する。

試験施工箇所では、抑止力  $P_s = 31.1\text{kN}$  となる。

##### (4) ワイヤロープの設計

ワイヤロープは  $\phi 24\text{ mm}$  (破断荷重 70kN) を  $n=2$  本使用し、安全率を 2.0 以上とする。

式-4 よりワイヤロープの張力を計算すると

$$T = P_s / 2n \cdot \sin \theta \quad \dots \text{(式-4)}$$

$$=30.0\text{kN} < 35.0\text{kN}$$

ここに

T：ワイヤロープの張力

n：ワイヤロープの本数

$\theta$ については図-12に示す。堆積している流木の位置とロープを固定する木の位置から $\theta$ を求めるが、今回流木や周りの木々をiPadにてレーザー測量し得られた結果から設置位置や $\theta$ (図-7.12)など机上で測定した。

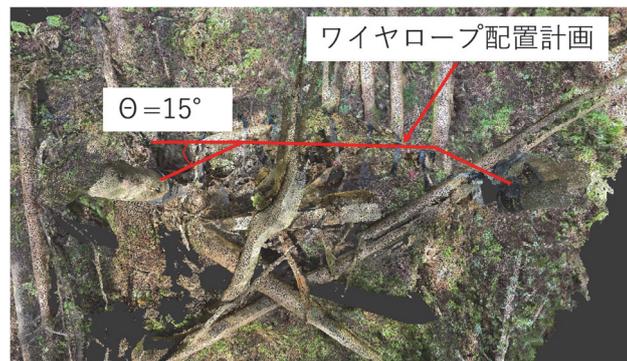


図-12 ワイヤロープ配置計画(堆積流木上面)(iPadレーザー測量結果より)

#### (5) ロープを固定する立木の設計

式-3を用いて転倒モーメントを算出し、2本のワイヤロープの設置高さ(式-4)の結果を乗じた後支持する流木の本数で除した値が立木の転倒モーメント以下であれば問題がない。

今回上段のロープを立木の高さ1.2mの位置に、下段を高さ0.3mの位置に設置することとした場合の立木に働く合成モーメントは

$$\text{上段ロープ } 30.0 \times 1.2 = 36.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{下段ロープ } 30.0 \times 0.3 = 9.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{合成モーメント } 36.0 + 9.0 = 45.0 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ となる。}$$

これに今回2本の立木でワイヤロープを支持すると1本あたりに働くモーメントは半分の22.5 kN・mとなる。

次に立木の転倒モーメントを算出すると式-3より抵抗モーメントは121.2 kN・mとなる。

ロープより働く立木1本当りの合成モーメント < 抵抗モーメントとなりロープ位置は適切である。

### 7.5 試験施工について

7.4での検討結果をもとに現地にて施工を行った。

作業員2名と世話役1名にて材料の運搬と設置をおこなったが、3箇所を設置を1日で

作業することが可能であった。設置日は 2020 年 11 月に行い冬期間の積雪への影響も観察した。

今回検討を行った流木堆積地以外に溪床部の上流からの流出についても効果がないか 2 か所設置してみた(表-7.3)。

また、流木堆積地ではネットを使用せずワイヤロープのみとし、その代わり 3 本のロープで支持することでも問題がないか併せて検討を行った。

融雪後の経過を観察すると、溪床部では積雪による沈降力と土砂の堆積により設置当初とくらべ上段のロープのたわみが大きくなっていて、設置する際はたわみを考慮して設置高さを検討する必要があることがわかった。

ただし、ロープは張り直すことが可能であるため融雪後の調査時に当初より高くして再設置した。

流木堆積地では融雪後に変化はなく流木の移動はなかった。雪によるグライドも懸念されたが影響はなかったと考えられる。

表-7.3 試験施工箇所の設置後と融雪後の比較

	対策箇所 1 流木堆積地	対策箇所 2 溪床部その 1	対策箇所 3 溪床部その 2
設置後			
融雪後			

ただし、本工法は流体力や衝撃力には耐えられないので、あくまで現位置に堆積している流木を捕捉することを目的としている。このため、狭まった谷部ではなく、扇状地などの堆積空間があり、試験施工した構造物に背後から土砂や流木が直撃を受けない場所が望ましい。また、耐久性能については明らかでないので、あくまでも災害発生直後の応急対策としての位置づけである。

## 7. 6 まとめ

近年、流木を伴った災害が全国的に多く発生しており流木の流出対策が急務である。2018年（平成30年）8月に山形県最上町東法田地区においては山腹崩壊に伴う土砂・流木の流出が発生する災害が発生した。上流域では倒木が堆積しており、今後の降雨により更に浸食が進み、倒木が流出する可能性がある。本豪雨被害による流木流出の緊急対応として、重機や工具など使用せず人力で運搬可能な対策工の検討を行ったが、繊維ネットとロープを用いることや立木を利用することである程度の規模であれば対応が可能であることがわかった。

また、実物実験を行い挙動と耐力の確認を行い、設計法についても検討を行った。

試験施工による課題も把握することができたため、現時点では今後流木の流出対策として利用できる可能性があると判断した。ただし、施工後の期間が短く、今後も現地での検証が必要である。

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 繊維ネットとロープ用いた対策であるため軽量であるため人力で運搬可能となり、発生源近くで対策が可能となる。
- (2) 重機や工具を不要であるため、運搬路を設ける必要がない
- (3) 立木を利用することでロープの固定することが可能となり材積量、斜面勾配、支持する立木の胸高直径に依存するがある程度の流木を保持することが可能である。
- (4) 落石対策のワイヤロープ掛工を参考し設計法を提案した。
- (5) 試験施工の経過観察より、上段のロープ設置高さは土砂や積雪によるたわみを考慮し高さを決定する必要がある。

また、この工法は落石にも応用でき、転石や浮石の移動を抑えるロープ掛工として利用することも可能であり、落石災害発生箇所の応急対応にも利用することが期待できる（写真-7）。



写真-7 落石対策に利用した場合の例

## 第8章 結論

### 8.1 本研究のまとめ

本研究では、頻繁に発生する落石災害に対し、その発生状況と落石防護施設の維持管理における課題を洗い出すとともに、落石調査における ICT 化による効率化及び省人化の検討や既設落石防護柵の損傷事例から問題点を整理し、補修・補強できる技術の検討を行った。さらに、土砂災害発生時に重機を使用せず、人力運搬可能な応急対応できる 2 次流出対策可能な工法の検討も合わせて行った。

以下、本研究で得られた知見をまとめると

第1章では、我が国の災害状況や各自治体における ICT の利用した斜面調査状況や維持管理の課題を調査し、研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の構成を取りまとめた。

第2章では、過去の被災事例を集め被災原因別に大別することにより、既存の落石防護柵の弱点と基準書との違いが判明し、補修及び補強すべき点を明らかにした。

第3章では、各自治体など保有のグリッドサイズが 50 cm を超える航空レーザ測量では、密な植生に被覆された地表において高密度のレーザ点群が取得困難であるため、落石危険箇所を見出す観点から利用することは難しかった。そこで、UAV を用いたレーザ測量を落石調査に応用し、高精度な地形データによる地形解析を行い落石の分布を特定した結果と現地調査との浮石や転石の位置の整合性について考察した結果、以下のことがわかった。

- ① 落石の分布する斜面では、UAV レーザデータから作成された微地形強調図を作成する際は、グリッドサイズを 20 cm または 50 cm で作成することが落石の抽出に効果的である。
- ② UAV レーザデータから作成された赤色立体地図を用いた浮石や転石の抽出率は 80 パーセントを超える確率で抽出できるが、大きさが 1 辺 1.0m に満たないもので、かつ地中に 2/3 以上埋もれたものは抽出できない。
- ③ 赤色立体地図では、浮石や転石の安定度は判定できないため現地踏査が必要となるが、浮石転石箇所を事前に把握でき踏査ルートを選定を事前に行えるため、現地踏査時間を短縮することができると考えられる。
- ④ 現地踏査では、落石位置や標高を把握するには詳細な測量が必要であるが、UAV レーザデータを用いると浮石転石の位置をスピーディーかつ正確に把握できるため、その後の落石エネルギー算出や落石シミュレーションなど落石運動の検討にも効果的であると考えられる。

以上のことから、広範囲にわたる落石調査において、UAV レーザ測量を用いることで、おおよその落石分布、踏査ルート選定や急崖部などの危険個所の予見を行う事ができるため、効率的に調査が行え、工数の削減が期待できるが、転石の安定度判定まではできないことがわかった。

第4章では、第3章で述べた UAV レーザ測量における落石の安定度の判定ができない

課題に対して、近年発売されたスマートフォン iPhone 12 や iPad pro に搭載されている LiDAR 機能を利用し、転石や斜面状態など計測できないか試みた。その結果、大きさや安定度などの情報を取得でき、精度も実用に耐えうるものであったことから、調査に必要な人員も少なくかつ効率的に行えることがわかった。

さらに、机上で複数人での判読も可能であるため、現地調査員の落石知識レベルに依存することもなくなると考えられる。

ただし、得られたデータが任意座標であるため、位置座標が明確なものを同時にスキャンする必要があることがわかった。

第5章では、第2章の被災事例から従来型落石防護柵の構造上の弱点を把握できたが、実規模実験により従来型落石防護柵の挙動が、被災事例と同様な挙動を示すことを確認した。また、既存落石防護柵に簡単な金具を取り付けることにより、落石吸収エネルギーを2倍に増加させることが可能であることを実物実験にて証明できた。本研究で得られた結果を整理すると以下の通りである。

- ① 従来型落石防護柵は、落石対策便覧に記載されている挙動とは異なり、柵高の違いにより支柱の変位及びワイヤロープ張力に違いがあり、エネルギー分担も異なることがわかった。
- ② 従来型落石防護柵の衝撃挙動では、被災事例と同様な支柱のねじれを実験にて再現することができた。
- ③ 弱点である支柱のねじれを少なくする補強部材、エネルギー吸収を高める高強度金網及び緩衝装置を追加することで、従来型落石防護柵に対し、2倍程度の落石エネルギーが吸収できることを実験で確認できた。
- ④ かさ上げ部材を用いた支柱のかさ上げ実験では、接続部の損傷なく落石を受け止めることが可能であることを確認できた。

第6章では、従来型落石防護柵に用いられているひし形金網は、吸収可能エネルギーが金網の形状等に関係なく一律 25 kJ と落石対策便覧に記載されている。しかしながら、ひし形金網は、線径、材質、形状の違いがあり、吸収可能エネルギーが一定であることは、考えにくい。そこで、線径、材質、形状を変えた比較実験を行ない、挙動の違いと特性を確認し、以下の知見を得られた。

- ① 伸びの少ない硬鋼線を用いた金網は、局所的に破断するため落石防護柵に使用する際には注意が必要である。
- ② ひし形形状の角度を変えたり、素線を3本より線にするなど形状を変化させると標準形状と異なる特性が見られ、その特性を利用することで、落石防護柵に応用できることがわかった。

ただし、使用する金網の特性を把握した上で、落石防護柵全体（吸収可能エネルギー、変位量など）の評価及び検討が必要であると考えられる。

第7章では、落石や土砂災害後の2次災害を防ぐため、重機を必要としない発生源対策

の検討を行った。

災害発生時には、緊急対策が必要とされているが、緊急対策工事を行うには、通常重機や重量物を運ぶ運搬路設ける必要がある為、数か月単位の期間が必要となる。そこで、人力で材料を運搬可能な繊維ロープと繊維ネットを用い現地の立木を利用した工法を考案し、実証実験と試験施工を行い検証を行ったところ、十分な強度と優れた施工性を確認することができた。また、合わせて計算方法も提案し現場設計にすぐに対応できることを可能にした。

## 8. 2 落石対策便覧への提言

落石対策の基準書である落石対策便覧は、1983年に初版が発刊され以来、2000年及び2017年の改定を経ながら道路技術者の実務書として広く活用されており、我が国における落石対策技術の指標としての役割を果たしており、調査、設計、施工及び維持管理に関する最新の知見が盛り込まれており、図-8.1に示す流れで落石対策業務が行われている。

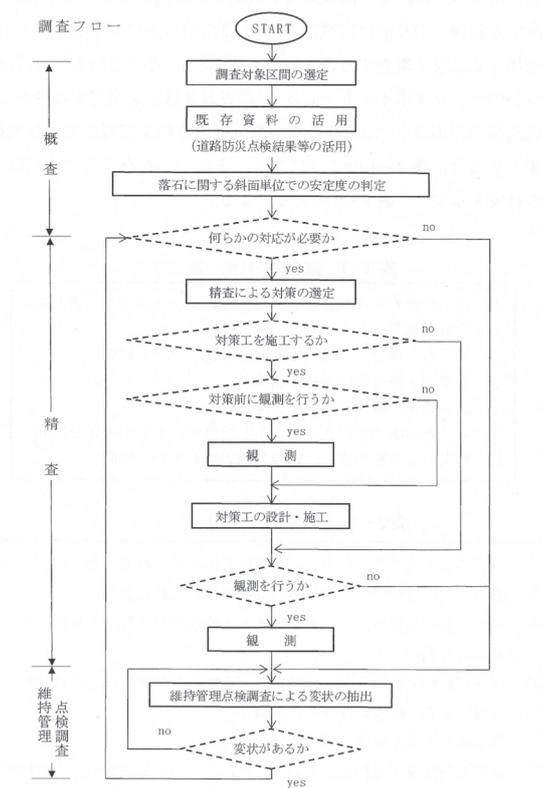


図-8.1 落石対策業務フロー (落石対策便覧2017年 P.31より)

### 8. 2. 1 概査について

落石対策では、まず斜面や法面の落石に関する安定度を広域的かつ迅速に判定し、精査あるいは緊急な対策の必要性を判断する概査を行う。地形判読は図-8.2の内容にて記載さ

れている。しかしながら、図-8.3のように5 mメッシュを用いた地形データを見ても急崖部を見つけることは困難である。

急崖斜面抽出は、地形図や空中写真を参考にすることにより、比較的大規模な岩盤斜面を抽出する手法である。1/25,000 程度の地形図を用いて、落石等の被災歴、異なる時期の空中写真等による微地形の変遷等を記入することにより、落石に関する有力な情報を得ることができる。なお、近年入手が容易となった10 mメッシュや5 mメッシュ等の標高データを用い、勾配区分図等を作成して急崖部を抽出し、露岩の位置等を推定することも可能である。

図-8.2 落石対策便覧 p.43より抜粋

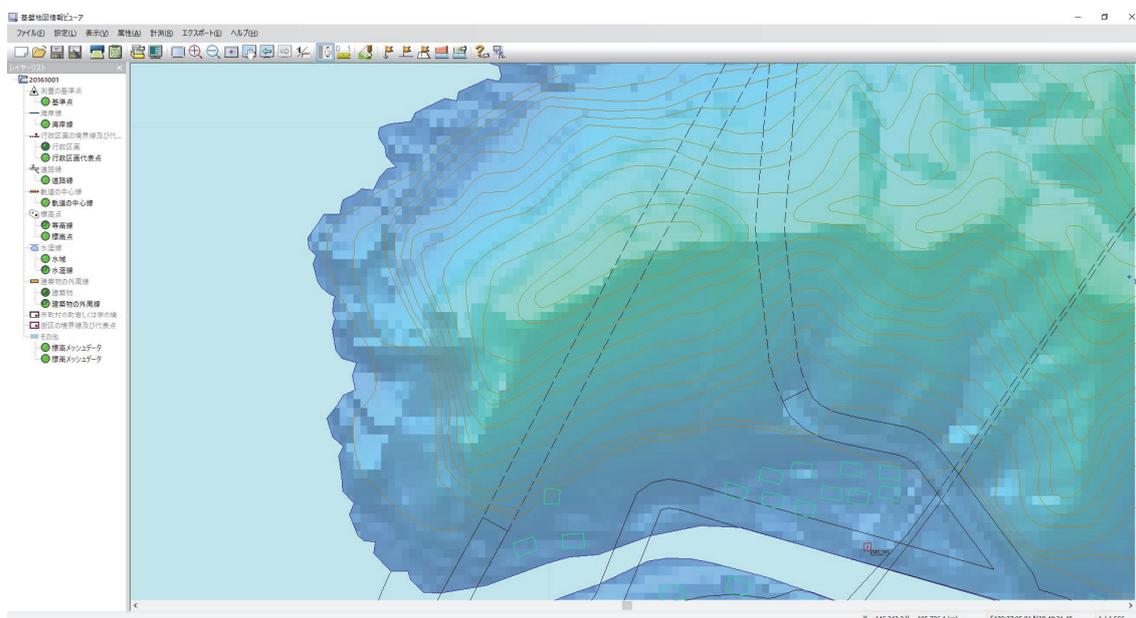


図-8.3 5mメッシュ標高データ (国土地理院 基盤地図情報 鶴岡市五十川地区)

そこで、国土交通省や各地方自治体が保有しているLPデータがないか確認を行うことで、より精度の高いデータの入手できる可能性がある。鶴岡市五十川地区では、国土交通省保有の50cmメッシュのデータを入手することができた。そのデータを用い図-8.4に示すような微地形強調図を作成することで、急崖部や沢部など大まかな地形を読み取ることができる。

今回入手したLP データでは、樹木が密の箇所で地形が不明瞭となっているが、より詳細な地形を得るには、ドローンを用いたレーザ測量が必要である。



図-8.4 50cmメッシュ微地形強調図

### 8. 2. 2 精査について

精査においては、落石対策便覧(20107年)p. 57にリモートセンシング技術を用いた調査と記載があり、写真測量やビデオ画像の判読及び航空レーザ測量データ等の活用の記載がある。図-8.5に航空レーザ測量データの記載部を抜粋した。

概査で提言した50cmメッシュの航空レーザデータのことであり、植生が疎な斜面では転石・浮石の判読は可能ではあるが、前述の通り、植生が密な箇所では判読できない。

しかし、ドローンによるレーザ測量を行うことで、植生が密な箇所でも浮石や転石が可能である。グリッドサイズ(メッシュサイズ)を20cm~50cmにて作成したDEMを用いることで、浮石や転石の判読が可能であり90%近くの抽出精度があることがわかった。航空レーザとUAVレーザのそれぞれをグリッドサイズ50cmにて作成したDEMを微地形強調図にて比較すると、図-8.6のようにUAVレーザ測量の結果の方が、より鮮明な地形を得られることがわかる。

このように、精査の段階では裸地斜面や疎な林分以外では航空レーザ測量のデータを用いて転石・浮石の判読は困難であり、UAVレーザ測量を用いることが望ましい。

③ 航空レーザー計測データ等の活用

近年、地表面を1m格子間隔以上の精度で標高値を取得できる航空レーザー計測が多く実施されるようになった。航空レーザー計測は樹木を透過し地表面の精密なデータを取得でき、従来の写真測量からの地形図と比較して高精度な地形図を作成できる。また、デジタルデータであるため鳥瞰図や傾斜区分図および断面図を容易に作成することも可能である。

航空レーザー計測は既に道路を含む多くの地域で実施されており、既存データを活用できる地域もある。本データを落石調査に活用することにより、現地踏査を効率的に実施できるだけでなく、落石発生位置・保全対象に対する落石エネルギー・落石経路等を詳細に検討することが可能となる。

ただし、航空レーザー計測データの精度を考慮し、空中写真や踏査結果も併用することが重要である。

図-8.5 リモートセンシング技術の活用について (落石対策便覧2017年 p.57より)

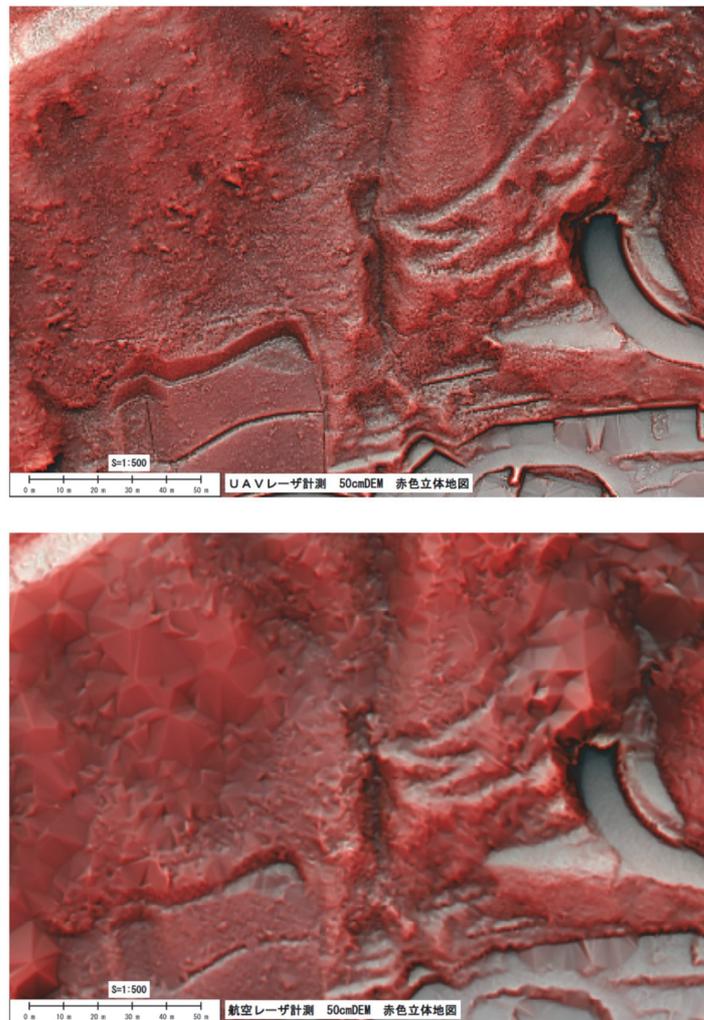


図-8.6 (上) UAVレーザー測量による50cmDEM (下) 航空レーザー測量による50cmDEM

## 8. 2. 2 現地踏査について

現地踏査では、地形、土質・地質、斜面表層の状況や植生など調査を行うが、通常3人で行うことが多く、現地では上記内容に加え落石の大きさや安定度を判断しなければならないため、落石について精通した人員が必要である。（図-8.7）

斜面の状況は写真等で判断できるが、安定度については調査員の主観が入るため判断が難しい。そこで、iPhoneなどの携帯可能なLiDAR機能を用いて転石等を計測することで、転石の大きさや安定度も3次元で観察することが可能であり、あえて専門の技術者が現地に行かなくても事務所にて複数人で判断することが可能となる。

最新のレーザ測量技術を落石調査へ利用した事例や調査方法などを盛り込み、効率化と精度アップが期待できると考えられる。

### (3) 詳細地表踏査

観察項目は概査時の現地踏査と大きな違いはないが、詳しい地形図をもとに斜面上部を詳しく踏査することによって、個々の転石や浮石の情報を調査し安定度の評価を加えることができる。また観察結果は、先の調査で作成した精査基本図（1/1,000～1/100程度）の平面図や正面図に記入し、大きな転石や浮石については番号をつけて図2-9に示す安定度判定をしておくといよい。

図-8.7 現地踏査の調査内容について（落石対策便覧2017年 p.58より）

## 8. 2. 3 対策工について

落石災害が発生した場合、対象斜面を調査し対策を講じるが現行の落石対策便覧では、予防工と対策工のみ記載されている。

予防工または対策工を行うには、数か月の期間を要し2次災害の発生が危惧されるが、緊急対策に対しての記述は見当たらない。

また、災害発生箇所に既設の落石対策施設がある場合でも、吸収可能落石エネルギーや柵高不足により、新たな落石防護柵など対策を講じるのが普通であった。

そこで、第7章で述べた緊急対策工法や第5章で述べた既設落石防護柵の補強技術を用いることで、より安全で、よりスピーディーな対策が講じることが可能となる。

また、既設落石防護柵の補強技術では、既存ストックを有効活用することができるため、国の施策であるインフラの長寿命化にも寄与できる。

落石対策便覧には、図-8.8のように緊急対策工と既設補強工の記載を追加すべきと考え、今後新たな工法を促すことも期待できる。

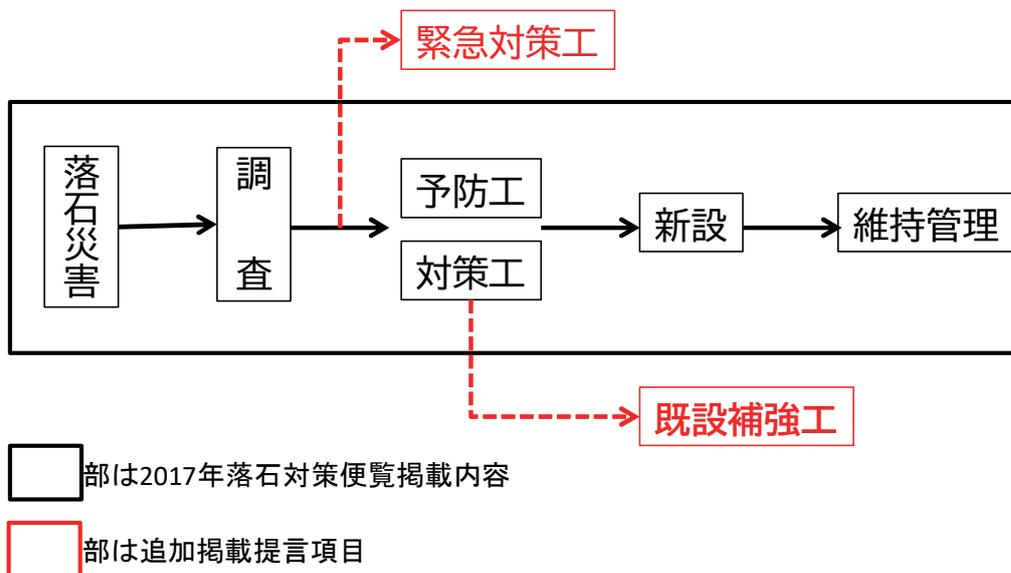


図-8.8 落石対策便覧の掲載内容と追加すべき項目

以上、これらの研究結果により、落石対策における調査から対策工までに対して、新たな手法を提案することができたことにより、落石対策が、より安全で効率的に行える高度化の技術を確立できたと考える。

### 8.3 今後の課題

今後我が国の土砂災害は、ますます増加すると予想され、同時に落石災害も増えると考えられる。また、インフラの老朽化に伴いどのように効率的な施設更新をしていくのか近々の課題である。今回、落石の調査の効率化及び省人化と落石防護柵の補修及び補強方法について研究を行ったが以下の課題が残されている。

#### (1) ICT技術を用いた維持管理への利用促進

今回各県のICT化への取り組み状況を調査し、秋田県や島根県における落石情報のデータベース化とLPデータとの連携や岐阜県や静岡県における全県範囲の高精度LPデータの整備と活用など先進的な素晴らしい取り組みをおこなっている都道府県はいくつかあった。

しかしながら、各自治体単位であるため、全国的に一般化する必要があると考えられる。

#### (2) レーザ測量を用いた落石調査の課題

UAVレーザ測量では1m以下の転石は抽出できなかったが、グリッドデータだけでなく、グラウンド点群データと合わせて検討することで抽出できないか検証が必要である。

今回行ったスマートフォンやタブレットなど軽量で誰でも扱える LiDAR 機能を用いた事例を増やすことで、斜面点検だけでなく保守点検や施工管理など他の利用方法も検討可能であると考えられる。さらに、モバイル機器の場合、点群データの座標が任意となってしまうが、RTK「Real-Time Kinematic」などの技術を用い位置情報を取得し点群データと連携させることが可能と考えられる。これにより正確な落石位置を手軽に取得することで、落石エネルギー算出精度の向上と省人化及び効率化が可能であると考えられる。

(3) インフラの長寿命化に向けて

今回落石防護柵について補修及び補強技術の確立を行ったが、道路土工構造物点検から漏れているインフラがあるのも事実である。このような施設について、補修及び補強の技術を確立していく必要である。

また、今回落石対策便覧と実規模実験との比較試験を行い落石対策便覧との挙動の違いが明らかになったが、より安心・安全な施設にするためにも、さらに研究を進め、実態にあった計算方法を作り出す必要があると考えられる。

(4) 災害緊急対策の課題

今回、人力運搬可能な2次災害を防ぐ工法の検討い小規模な流木や落石に対応できることがわかったが、大規模な対策には繊維ロープの強度や反力として利用する立木の強度に課題がある。今後は、千鳥状に配置するなどの方法によって解決できないか検討する必要がある。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、前岩手大学農学部教授井良沢道也先生（現岩手大学農学部名誉教授）に、研究全般にわたりご指導とご助言をいただきました。山形県鶴岡市五十川地区、山形県最上町東法田地区、秋田県湯沢市など多くの現場で調査に同行させていただき地形学的な見方や防災の観点など自身にとって今後の実務に活かせる有意義な経験となりました。さらに、先生の人脈のおかげで他分野の方々と交流することができ幅広い知識を習得できたことに深く感謝申し上げます。

岩手大学農学部 真坂 一彦教授には、井良沢 前教授の退官後、主指導教官として論文のとりまとめについてご助言を頂きました。弘前大学農学生命科学部 鄒 青穎助教には研究遂行に必要な基礎データ収集、現地調査への同行や論文のとりまとめにあつたてのご助言を頂きました。岩手大学農学部 齋藤 仁志准教授には、論文のとりまとめについてご助言を頂きました。

また、研究を進めるにあたり、奥山ボーリング株式会社の林一成氏、小松順一氏、深澤勇氣氏、アジア航測株式会社の落合達也氏、鈴木太郎氏には現地調査の同行や論文とりまとめにあつて多くのご助言や有益な情報を頂きました。

株式会社寒河江測量設計事務所の堀和彦氏、工藤一郎氏、成田南氏には、落石調査の課題のご助言、現地調査の同行及び UAV レーザ測量のご協力を頂きました。

プロファ設計株式会社の齋藤壮一氏、赤沼敬史氏には、モバイルレーザ測量機器を用いた現地測量や機器の特徴などご指導頂きました。

岩手大学農学部砂防学研究室の学部生である村井克成氏、羽田京香氏、工藤優太氏、小高敦志氏、白倉誠也氏には、現地調査や資料のとりまとめなど多岐にわたりご協力いただいた。

株式会社ビーセーフの社員の皆様には、落石防護柵の実験準備・計測・データのとりまとめなどご協力を頂いた。

私の父である吉田博金沢大学名誉教授には、実験・構造工学・落石対策など長きにわたりご指導頂いた。

みなさまのご意見、ご指導のもと博士論文をとりまとめにできたこと、ここに記して深く感謝申し上げます。

最後に岩手大学大学院連合農学研究科への進学を後押しし、応援してくれた家族のおかげで前向きに研究を進めることができたことに感謝いたします。

#### 【参考文献】

- 1) 国土交通省(2021)：道路交通白書2021，第2章，第2節，pp. 46
- 2) (社)日本道路協会(1996)：平成8年度道路防災総点検要領
- 3) 国土交通省(2021)：道路統計年報，表-3
- 4) 国土交通省(2019)：鉄道統計年報，営業キロおよび走行キロ表
- 5) 国土交通省(2020)：平成30年道路交通管理統計，pp. 91
- 6) 秋田県(2017)：秋田県落石等道路防災計画，pp. 8
- 7) 佐々木靖人・浅井健一，「防災点検の有効性と災害の低減に向けて—10年間の防災対策の進捗と課題—2013. 7. 29テキスト版より引用」
- 8) 国土交通省(2018)：道路土工構造物点検要領，pp. 9
- 9) 国土交通省：平成24年第一回国道(国管理)の維持管理等に関する検討会，資料3，国道(国管理)の維持管理等の現状と課題について
- 10) 国土交通省，平成30年第20回メンテナンス戦略小委員会(第3期第2回)，資料3，維持管理の現状と課題に対する取り組み状況
- 11) 宮下征士，・今西将文・宮田真考・西山哲(2017)：高密度航空レーザデータを使用した微地形強調図による落石発生源抽出の検証，土木学会論文集F3(土木情報学) 73巻2号 ppi\_92-i\_108.
- 12) Pellicani, R.; Argentiero, I.; Manzari, P.; Spilotro, G.; Marzo, C.; Ermini, R.; Apollonio, C. (2019)：UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy), *Geosciences*, 9, 248, <https://doi.org/10.3390/geosciences9060248>.
- 13) 土志田正二・新井場公德(2020)：土砂災害救助活動におけるドローン空撮情報の活用，2020年度日本地すべり学会第59回研究発表会講演集，pp. 68-69
- 14) 三浦健一郎・小室宣孝・蔵元直行(2021)：LPデータを用いた道路防災落石危険個所の抽出，地盤工学会誌Vol. 69 No. 6, pp. 30-33
- 15) 日本道路協会(1983)：落石対策便覧，初版
- 16) 日本道路協会(2000)：落石対策便覧，改定版
- 17) 日本道路協会(2017)：落石対策便覧，改定版
- 18) 今野久志，荒木恒也，寺澤貴裕，小室雅人，岸 徳光(2018)：重錘落下衝撃実験による従来型落石防護柵の落石すり抜けに関する研究，平成29年度土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 74 (CD-ROM)，A-07
- 19) 加賀山肇，右城猛，筒井秀樹，田中登志夫(2009)：落石防護柵用柵端金具の研究開発，平成21年度技術研究発表会，地盤工学会四国支部

- 20) 増田仁・沢田和秀・小野貴稔 (2014) : 転石調査のための高密度航空レーザ計測による斜面の可視化, 第2回調査・設計・施工技術報告会. pp. 17-24.
- 21) 西山哲・宮下征士・吉川慶・黒木紀男 (2021) : 道路防災点検の効率化のための地形量図の活用, 地盤工学会誌, 65-6(761), pp. 24-29
- 22) 大沢あつし・広島俊男・駒沢正夫・須田芳朗 (1988) : 20万分の1地質図幅「新庄及び酒田」, 地質調査所.
- 23) 気象庁 (2019) : 2019年6月18日山形県沖の地震に関する情報  
[https://www.jishin.go.jp/main/oshirase/20190618\\_yamagata.html](https://www.jishin.go.jp/main/oshirase/20190618_yamagata.html), 参照 2020-09-18.
- 24) 瀧澤誠介 (2020) : 山形県沖を震源とする地震への対応, 復旧・復興について, 河川, Vol. 72, No. 2, pp. 47-50.
- 25) 佐藤匠・久保毅・本間信一・今井 靖晃・浅田典親 (2008) : 航空レーザスキャナを利用した崩壊地抽出支援手法, 日本測量調査技術協会第30回測量調査技術発表会, 測技協ワークショップ2008, pp. 31-39.
- 26) 岡本芳樹・川村啓一・岡崎克俊・畠周平 (2011) : 4. 地形情報の要求性能と計測方法 (計測の精度と地盤到達率), 講座 わかって使うレーザ計測, 地盤工学会誌, 59-12(647), pp. 61-68.
- 27) 木本啓介・西村正三他 (2017) : UAV-LiDARによる地形計測と適用性検証, 応用測量論文集 Vol128, pp. 23-32
- 28) 河合貴之ら (2020) : 山地溪流の土砂移動・森林に関する現地調査におけるハンディ・レーザスキャナの活用～奈良県池郷川流域を事例として～, 砂防学会発表要旨集, p. 733-734
- 29) 河合貴之ら (2021) : 山地溪流の表面侵食・土砂移動状況調査におけるハンディ・レーザスキャナの活用～奈良県池郷川流域を事例として～, 砂防学会発表要旨集, p. 359-360.
- 30) 田中恵理子・田中圭 (2021) : iPhone搭載のLiDAR機能を用いたバリア情報の取得とその精度検証, 日本地理学会発表要旨集 2021s(0), 193, 2021
- 31) 中島利樹, 小澤岳弘 (2003) : 長野県達磨山における落石災害復旧工事について, 日本地すべり学会誌Vol. 40, No. 4, pp. 71-78
- 32) (一社) 日本溶融亜鉛鍍金協会 : <http://www.aen-mekki.or.jp> (参照日2020年12月28日)
- 33) (公社) 地盤工学会 (2014) : 落石対策工の設計法と計算例
- 34) (国研) 土木研究所 (2017) : 高エネルギー吸収型落石防護工等の性能照査手法に関する研究, 共同研究報告書, 第 491 号
- 35) 中村拓郎・今野久志・山澤文雄・寺澤貴裕・西弘明・小室雅人 (2019) : 従来型落石

- 防護柵の実規模衝突実験，寒地土木研究所月報，第791号，pp. 14-22
- 36) 荒木恒也，今野久志，寺澤貴裕，小室雅人，田畑翔大(2018)：従来型落石防護柵の実規模重錘衝突実験，平成29年度土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 74 (CD-ROM)，A-04
  - 37) 今野久志，荒木恒也，寺澤貴裕，小室雅人，岸 徳光(2018)：重錘落下衝撃実験による従来型落石防護柵の落石すり抜けに関する研究，平成29年度土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 74 (CD-ROM)，A-07
  - 38) 小室雅人，服部桃加，今野久志，荒木恒也(2018)：重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の衝撃応答解析，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol. 74，I-303-313
  - 39) 小室雅人，服部桃加，中村拓郎，西弘明，岸徳光(2020)，従来型落石防護柵の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討，構造工学論文集Vol. 66A，pp1016-1026
  - 40) EOTA(2008)：Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG 027)
  - 41) JFEスチール(株) (2018)：構造設計便覧，pp5-1-12
  - 42) 松嶋秀士，小島明德，川合慶直，吉田博(2014)：既設H鋼式落石防護柵の補強に関する研究，第11回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム，(38)\_1-6
  - 43) 荒木恒也，今野久志，西弘明，小室雅人，田中優貴：落石防護網に使用するひし形金網の重錘落下衝撃試験，土木学会構造工学論文集，Vol. 63A，pp. 1074-1083
  - 44) 村石尚，杉山友康，佐溝昌彦，安藤和幸(2001)：静的荷重下における落石防護ネットの変形特性，土木学会論文集 No. 693/VI-53，pp. 95-103
  - 45) 今野久志，西弘明，荒木恒也，加藤俊二，小室雅人(2015)：落石防護網に使用するひし形金網の実規模載荷試験，土木学会鋼構造年次論文報告書，第23巻，pp. 650-656
  - 46) 丸谷 知己ら：2017年7月の九州北部豪雨による土砂災害，砂防学会誌 Vol. 70，No. 4，p. 31-42，2017
  - 47) 南 哲行ら：1998年8月栃木県余笹川災害で発生した流木の実態，砂防学会誌 Vol. 53，No. 4，p. 44-51，2000
  - 48) 最上町東法田地区のH30年8月土砂災害状況(最上町ホームページより)
  - 49) <https://www.furusato-tax.jp/saigai/detail/543> 参照：2021. 7. 20
  - 50) 国土政策総合技術研究所：砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説，国総研資料 第 904 号 2016
  - 51) 林野庁：土石流・流木対策指針解説等，平成30年3月20日 2018
  - 52) 中林一ら：土石流緩衝樹林帯計画に向けた樹木引き倒し試験，砂防学会研究発表会概要集 59，pp. 345-355，2011