

落石予防工の設計手法に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 2

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西弘明、葛西聡、安中新太郎、今野久志、
中村拓郎、荒木恒也、山澤文雄、寺澤貴裕

【要旨】

落石対策としては発生源対策である落石予防工による対策が望ましいとされるが、設計法が体系化されていない工法があるといった技術的課題がある。本研究では、設計・施工上の課題の明確化および、設計の基本的な考え方の提案を目的として、覆式落石防護網については、損傷事例収集および傾向分析から損傷が発生しやすい現場条件の抽出および現場適用上の留意点を明らかにした。ワイヤロープ掛工については、事象別のワイヤロープの設計方法の提案を行った。ロープ伏せ工については、模型実験および数値解析的検討から、設計では一般に照査されていない複数の落石が同時に発生した場合のロープ張力の発生状況を明らかにした。

キーワード：落石予防工、覆式落石防護網、ワイヤロープ掛工、ロープ伏せ工

1. はじめに

1. 1 落石予防工について

落石等の道路斜面災害の発生は、場合によっては人命に直接的に関わる災害であるとともに、道路の通行止め等が発生した場合、地域生活に大きな影響を与える。落石対策便覧¹⁾（以下、便覧）によると、落石等による災害を防止する手段は、落石対策工によるものと、通行規制によるものとに分けられる。そのうち落石対策工には、発生源に対策を施す落石予防工と、斜面途中ならびに道路際に対策を施す落石防護工とがある。

落石対策としては、落石防護工に比べ発生源対策である落石予防工による対策が望ましいとされ、便覧には、①切土工、②除去工、③接着工、④ワイヤロープ掛工、⑤ロープ伏せ工、⑥グラウンドアンカー工、⑦

ロックボルト工、⑧根固め工、⑨植生工、⑩排水工、⑪編柵工、⑫覆式落石防護網、⑬吹付工（+地山補強土工）、⑭張工（+地山補強土工）、⑮のり枠工（+地山補強土工、+グラウンドアンカー工）、⑯擁壁工（+グラウンドアンカー工）の 16 工法が記載されている。

1. 2 技術的課題について

落石予防工のうち、ワイヤロープ、ひし形金網（以下、金網）、アンカー類を主部材として構造設計される工法については、切土工・斜面安定工指針²⁾や便覧等を参考に設計が行われているが、これらのうち覆式落石防護網、ワイヤロープ掛工、ロープ伏せ工については、以下のような技術的課題があると考えられる。

覆式落石防護網は、写真-1.1 に示すように、斜面全体を金網とワイヤロープで覆うものであるが、写真-



写真-1.1 覆式落石防護網



写真-1.2 覆式落石防護網のひし形金網の破網



写真-1.3 ワイヤロープ掛工

1.2 に示すような金網の損傷が確認されている。覆式落石防護網は落石が発生した場合に、金網や地山との摩擦および金網張力によって落石を拘束する、あるいは金網と地山との間で落石を誘導し斜面下方へ導く工法であるため、金網が損傷すると覆式落石防護網の性能低下につながる可能性がある。

ワイヤロープ掛工は、写真-1.3 に示すように、対象とする特定の浮石や転石をワイヤロープで覆うなどして斜面上に固定する工法である。便覧の資料編においては設計の一例として、横ワイヤロープの強度とアンカーとするロックボルトの強度および定着長を求める方法が記載されているのみで、体系化された設計法が示されていない。

ロープ伏せ工は、図-1.1 に示すように、斜面に散在する浮石や転石に対し、ワイヤロープを格子状に組むなどして覆い、さらにワイヤロープの交点にアンカーを打設し斜面上に固定する工法である。便覧においては、ワイヤロープの強度については覆式落石防護網の設計に準じること、浮石等の質量や滑落時の荷重に十分に耐えられるように検討する旨の記載があるのみで、体系化された設計法が示されていない。

このような背景の下、本研究ではワイヤロープ、ひし形金網、アンカー類を主部材する落石予防工のうち、覆式落石防護網の損傷、ワイヤロープ掛工およびロープ伏せ工の設計方法に着目し、設計・施工上の課題の明確化および設計の考え方の提案を目的として、

- ① 覆式落石防護網について損傷事例収集および傾向分析から、損傷が発生しやすい現場条件の抽出および現場適用上の留意点の検討
- ② ワイヤロープ掛工について事象別のワイヤロープの設計方法の検討

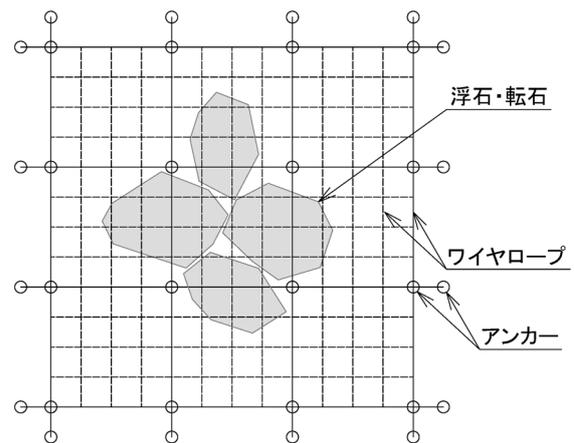


図-1.1 ロープ伏せ工の例

- ③ ロープ伏せ工について模型実験および数値解析的検討から、設計では一般に照査されていない複数の落石が同時に発生した場合についてのワイヤロープ張力の検証を行ったものである。

2. 覆式落石防護網の損傷事例収集および傾向分析と現場適用上の留意点の検討

2.1 調査方法

損傷事例収集は、点検資料および現地調査をもとに行った。この点検資料は、平成30年度および令和元年度に国土交通省北海道開発局が実施した道路土工構造物点検の結果を取りまとめた点検調書である。また、現地調査は道路土工構造物点検では対象とならない旧道・廃道区間を対象に行った。

2.2 点検資料による損傷事例収集および傾向分析

損傷事例の収集の対象は、図-2.1 に示すように「(覆式)落石防護網」との記載があった160箇所のうち、

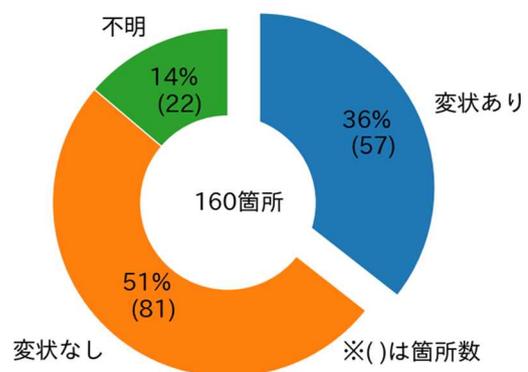


図-2.1 覆式落石防護網の変状、損傷割合

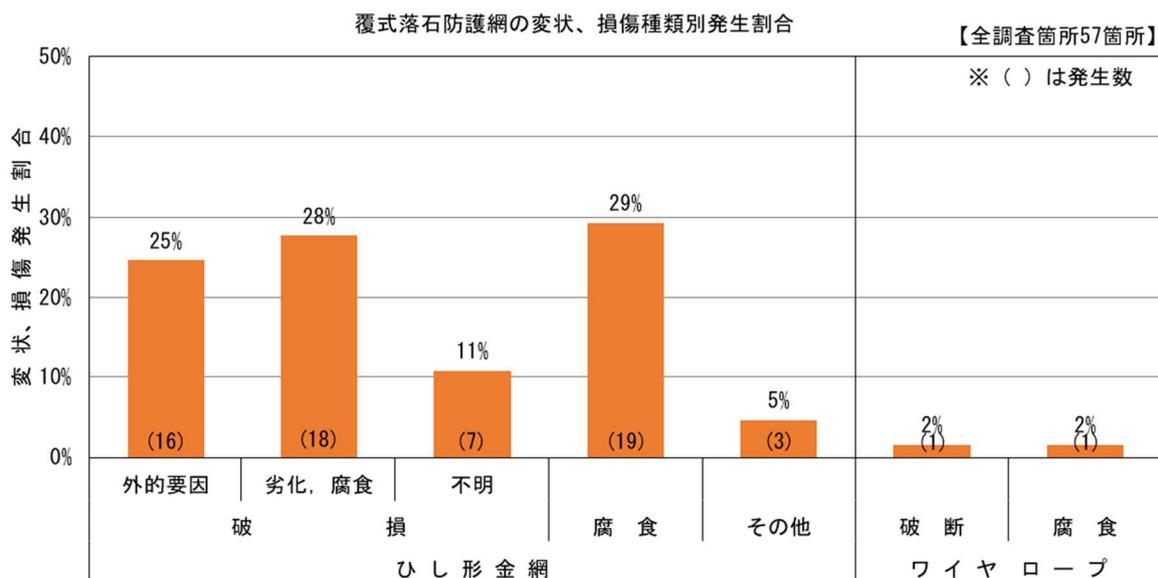


図-2.2 覆式落石防護網の変状、損傷種類別発生割合



写真-2.1 植生が原因のひし形金網の損傷



写真-2.2 斜面下部の落石等の堆積

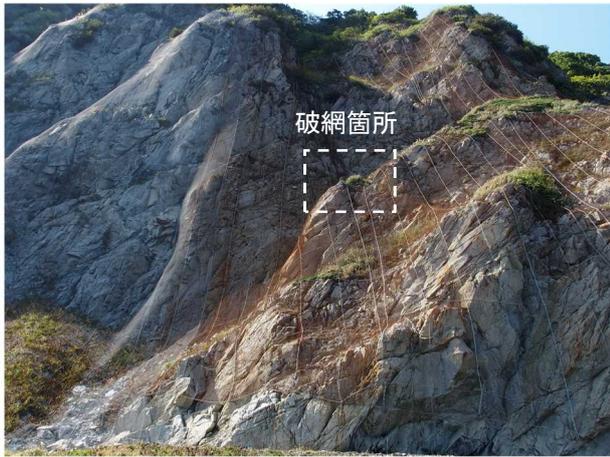
何らかの変状、損傷等の記載があった 57 箇所である。これより、調査対象の約 3 割において何らかの変状、損傷等に関する記載があったことが分かる。

図-2.2 に変状、損傷等の発生割合を示す。なお、ひとつの覆式落石防護網施工箇所にも複数の変状、損傷等がある場合も含まれるため、図中の割合は調査箇所 57 箇所の総損傷数に対する割合である。図より、変状、損傷等はひし形金網（以下、金網）に多く発生していることが分かる。金網の変状、損傷は破損しているものも含めると腐食が最も多いことが分かる。外的要因による金網の破損は、落石によるもののほか、写真-2.1 に示すように、植物の根返りが原因となっている事例もあった。そのため覆式落石防護網に影響を与える

可能性がある植生については、事前に処理を行うことが重要であると考えられる。金網、ワイヤロープ以外の変状としては、写真-2.2 に示すように、斜面下部の落石等の堆積が確認された。堆積した落石等による覆式落石防護網の膨らみにより、金網の設計時に想定していない張力が発生し損傷に至る可能性のあることから、堆積した落石等の除去など、適切な維持管理を行うことが望ましい。

2.3 現地調査による損傷事例収集

現地調査では、前述の点検資料による損傷事例において変状、損傷等の割合が多かった金網の損傷に着目した。現地調査で確認した覆式落石防護網の損傷事例を写真-2.3 から写真-2.7 に示す。



(a) 斜面全景



(b) 破網箇所

写真-2.3 起伏のある斜面の岩塊凸部付近の破網



(a) 斜面全景



(b) 斜面下部

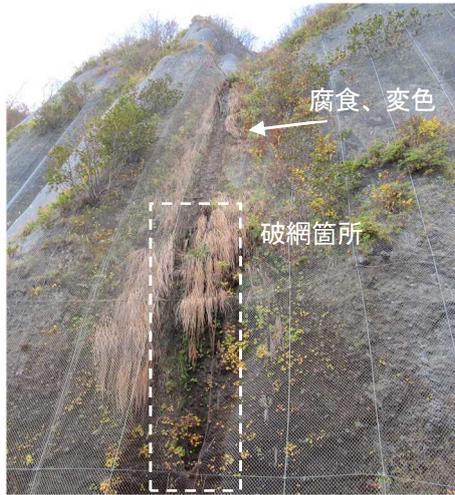
写真-2.4 集水地形に施工された覆式落石防護網の損傷

写真-2.3は、沿岸部の覆道上の斜面に施工された覆式落石防護網の部分的な破網の状況である。ひし形金網（以下、金網）は全体的に茶褐色に変色しており、海からの飛来塩分の影響により腐食が生じていると推察される。写真-2.3(a)に示すように当該斜面は起伏のある自然斜面であり、節理を伴っている。また、破網箇所は勾配の変化点付近であり、写真-2.3(b)に示すように鋭角をなす岩塊の凸部付近から損傷が生じている。このような斜面の起伏や岩塊の形状により、金網に集中的に生じた張力や腐食の影響により破網したと推察される。

写真-2.4は、写真-2.3の位置に隣接する斜面に施工された覆式落石防護網の損傷状況である。写真-

2.4(a)より、覆式落石防護網は斜面全長にわたり損傷していることが分かる。また、写真-2.4(b)より、斜面下部には岩塊のほか、斜面上部の植生のものと思われる枝や根の堆積も確認できる。これより、出水時などに斜面上部からの崩壊が発生し、覆式落石防護網を損傷させたものと推察される。

写真-2.5は、沿岸部の自然斜面に施工された覆式落石防護網の金網の腐食、破網の状況である。写真-2.5(a)および写真-2.5(b)より、斜面下方で金網が広い範囲で腐食、破網していることが確認できる。また、写真-2.5(a)より、斜面上部から筋状に金網の腐食やさびによる変色が確認できる。また、冬期（2月）に調査を行った際には氷塊・つららの発生（写真-2.5(c)）を



(a) 斜面全景

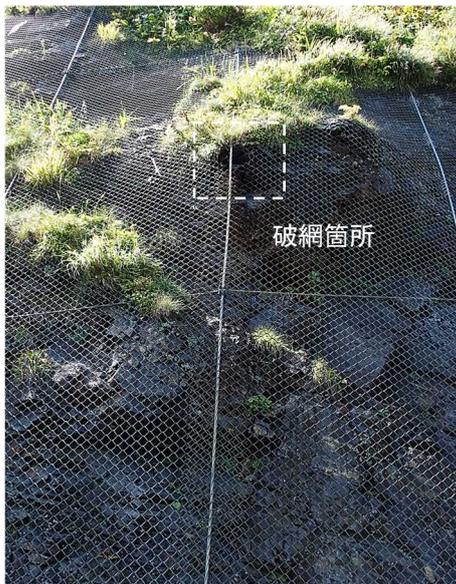


(b) 破網箇所



(c) 冬期の状況

写真-2.5 腐食によるひし形金網の破網 (1)



(a) 斜面全景



(b) 破網箇所

確認しており、1年を通して水の供給があるものと推察され、その影響により金網が腐食、破網に至ったと考えられる。

写真-2.6は、沿岸部の自然斜面に施工された覆式落石防護網の金網の腐食、破網の状況である。写真-2.6(a)より、岩盤斜面であるが、破網箇所の周囲に植生が繁茂している状況が確認できる。調査時(2月および8月)においては湧水の確認はできなかったが、斜面に植生が繁茂していることから水の供給があることが推察される。また、写真-2.6(b)に示すように、破網箇所から斜面下方に向かって金網の腐食やさびによる変色を確認できることから、この破網も湧水による腐食を原因としたものと考えられる。また、写真-2.6(c)に示すように、破網箇所下方の金網の腐食も著しく、



(c) 素線の断面減少

写真-2.6 腐食によるひし形金網の破網 (2)

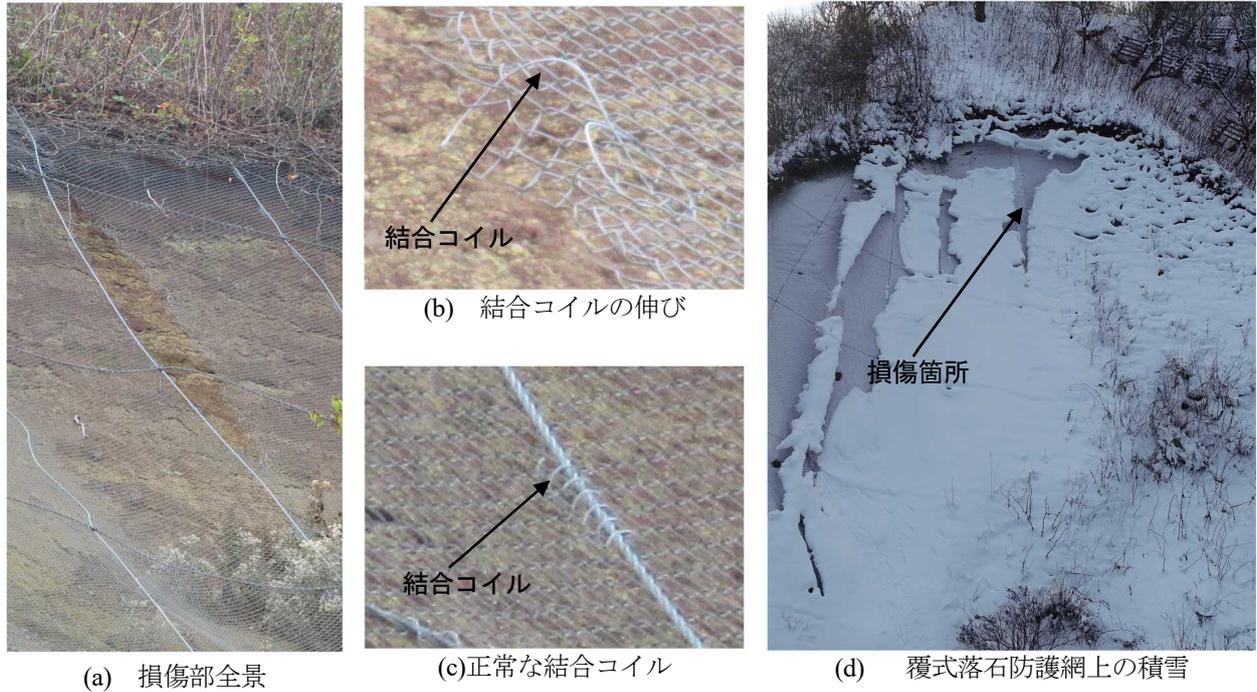


写真-2.7 ひし形金網の重ね部の開き

素線の破断や断面減少も確認できることから、今後、破網範囲がさらに拡大すると想定される。

覆式落石防護網に用いられる金網には、一般的には亜鉛めっき鉄線や合成樹脂被覆鉄線が用いられており、腐食に対する抵抗性を有しているが、沿岸部などの厳しい腐食環境下に加えて、地表水や湧水の供給がある箇所では腐食が促進されるため、こうした状況下に覆式落石防護網を適用にするには、腐食環境を考慮した金網の選定や、点検時に湧水の有無やその周囲での腐食や破網などの変状の有無の確認、さらに、変状が認められた場合には速やかに補修を行うなどの維持管理による対策が必要であると考えられる。

写真-2.7は、沿岸部の自然斜面に施工された覆式落石防護網の損傷事例である。写真-2.7(a)より、金網の重ね部の開きが確認できる。図-2.3に覆式落石防護網の設計標準図³⁾から抜粋した金網重ね部の詳細図を示す。これによると、覆式落石防護網の金網は横方向に300mmずつ重ねられており、隣接するワイヤロープと結合コイルを用いて固定している。しかしながら、写真-2.7(b)に示すように、当該箇所の結合コイルは引き伸ばされたように損傷している。なお、正常な結合コイルは写真-2.7(c)を参照されたい。この斜面では、風化、浸食によるものと考えられる斜面と覆式落石防護網との間に部分的に隙間が発生していた。この隙間の範囲で覆式落石防護網に設計では想定していない鉛直方向のたわみが生じたことや、写真-2.7(d)に示す覆式

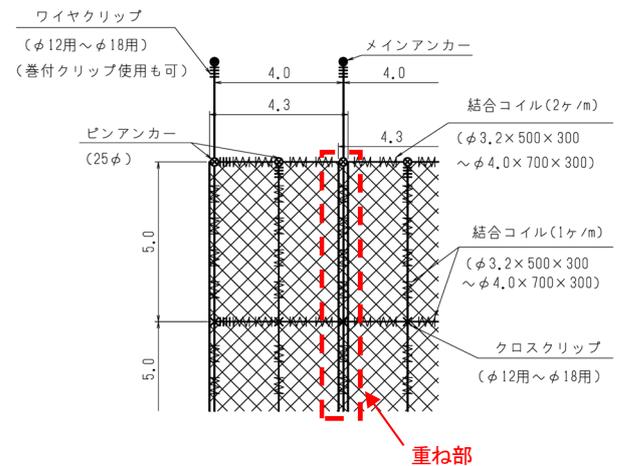


図-2.3 ひし形金網の設計標準図 (文献3から抜粋して一部加筆)

落石防護網上の積雪荷重の影響により、金網面に想定以上の張力が発生した結果、重ね部の結合コイルが引き伸ばされたように損傷に至ったものと推察される。また、こうした隙間では、覆式落石防護網の落石予防機構である金網や地山との摩擦および金網張力による落石の拘束はできない。また、隙間内で金網の跳躍により、金網への衝撃作用が生じる懸念もある。よって、こうした隙間が生じた場合には速やかに斜面と覆式落石防護網を密着させる補修を行うことが望ましい。

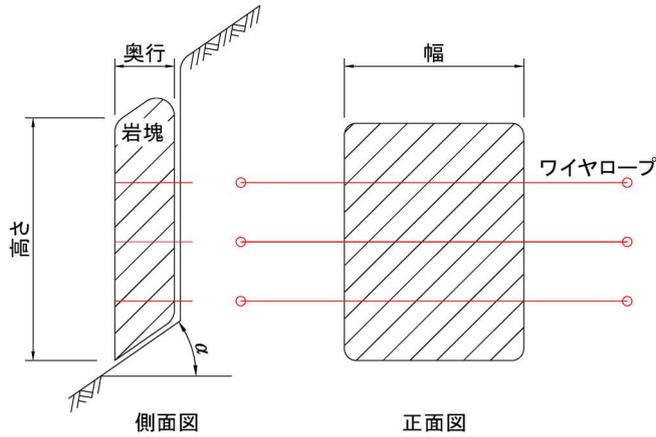


図-3.1 岩塊形状の例

3. ワイヤロープ掛工の設計に関する検討

3.1 ワイヤロープ掛工の設計の現状

ワイヤロープ掛工は、対策の対象とする特定の浮石や転石に対し、ワイヤロープで覆うなどして斜面上に固定する工法である。

便覧¹⁾の資料編においては設計の一例として、図-3.1に示す形状岩塊を対象に、横ワイヤロープの強度とアンカーとするロックボルトの強度および定着長を求める方法が記載されている。その設計の手順を図-3.2に示す。まず、図-3.3に示す滑落時荷重の算出図により、式(3.1)からすべり力 S および、式(3.2)からすべり力に対する抑止力 P_s を算出する。次に、式(3.3)から地震荷重 P_{se} を算出する。 P_s と P_{se} のうち大きい方が岩塊の設計抑止力となり、横ワイヤロープの設計荷重となる。

$$S = W \cdot \sin \alpha \quad (3.1)$$

$$P_s = S / \cos \alpha \quad (3.2)$$

$$P_{se} = k_h \cdot W \quad (3.3)$$

ここで、 S : すべり力、 P_s : 滑落時荷重に対する抑止力、 P_{se} : 地震時荷重、 k_h : 設計水平震度、 W : 岩塊重量、 α : 斜面勾配である。

ワイヤロープの設計は、図-3.4に示す岩塊の固定状態の場合は、式(3.4)から設計抑止力によるワイヤロープの張力 T を算出し、使用するワイヤロープの破断荷重に対して、設定する安全率を下回らないことを照査する。

$$T = \frac{\max(P_s, P_{se})}{2n \cdot \sin \theta} \quad (3.4)$$

ここで、 T : ワイヤロープの張力、 n : ワイヤロープの本数、 θ : ワイヤロープと斜面の平面角である。

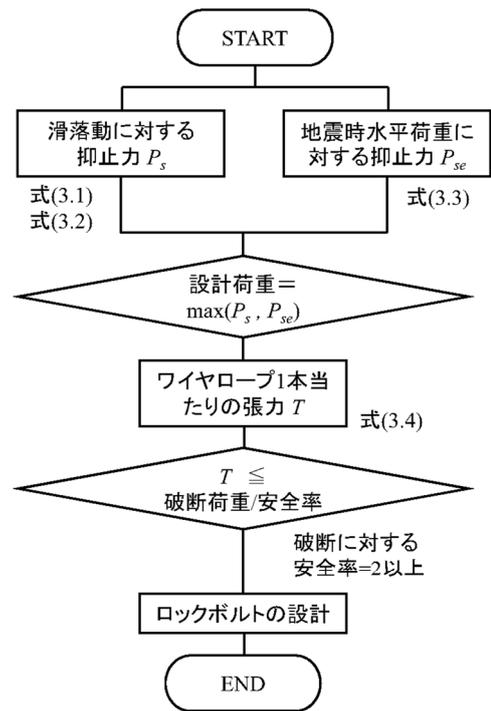


図-3.2 便覧におけるワイヤロープ掛工の設計手順

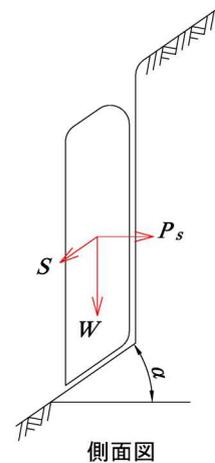


図-3.3 滑落時荷重の算出

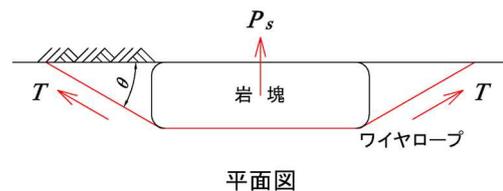


図-3.4 ワイヤロープによる岩塊固定の例

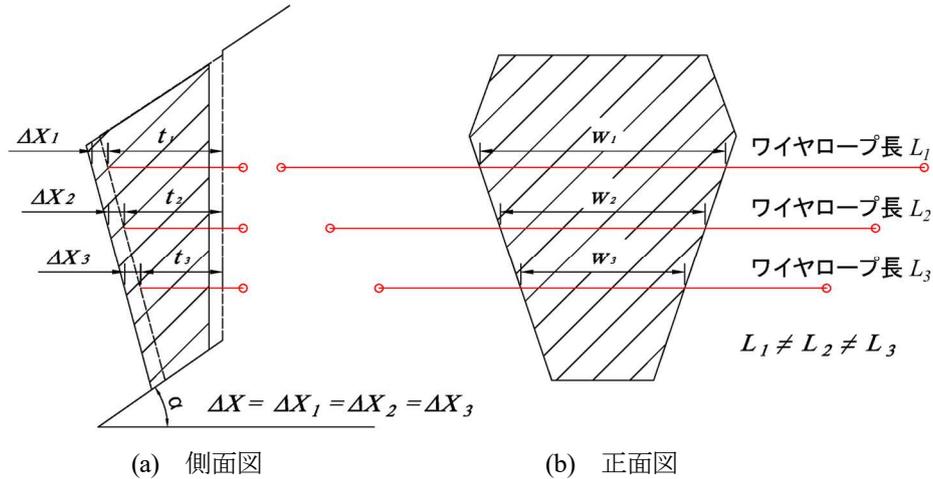


図-3.5 ワイヤロープ長が一律でない岩塊固定の例

ロックボルトの設計は、切土補強土工の考え方に準じて、ロックボルトの許容引張力について照査行う例が示されているが、ここでは省略する。

このように、便覧の資料編に示されている設計例では、図-3.1 に示すように岩塊の幅や奥行が一樣な形状であり、式(3.4)からも明らかなように、各ワイヤロープの張力 T は、配置するワイヤロープ本数で設計抑止力を均等に負担するという形で示されている。

3.2 滑落時および地震時荷重に対するワイヤロープの設計方法の検討

図-3.5 に示すようにワイヤロープ位置の岩塊の奥行 t_n ($n=1,2,3,\dots,m$) や幅 w_n ($n=1,2,3,\dots,m$) が一樣でなく、配置する各ワイヤロープ長 L_n ($n=1,2,3,\dots,m$) が一律とされない状況で、滑落時や地震荷重を対象として設計する場合、各ワイヤロープに発生する張力は異なることから、式(3.4)を用いて各ワイヤロープの張力を算出することはできないと考えられる。

そこで、本節では滑落時および地震時荷重を設計対象とする場合のワイヤロープの設計方法の検討を行った。

図-3.5(a)において、滑落時や地震荷重により岩塊が一律に ΔX 移動した場合を考える。この時、各ワイヤロープの伸び ΔL_n ($n=1,2,3,\dots,m$) は、図-3.6 より式(3.5)で表すことができる。この時の各ワイヤロープが弾性範囲内であると仮定すると張力 T_n ($n=1,2,3,\dots,m$) は、フックの法則より式(3.6)となる。この岩塊の移動により発生する各ワイヤロープ張力 T_n の総和と式(3.7)より求められる岩塊の設計抑止力によって発生するワイヤロープ張力 T' は等しくなると考えられることから式(3.8)が、また、それを展開し式(3.9)が得られる。

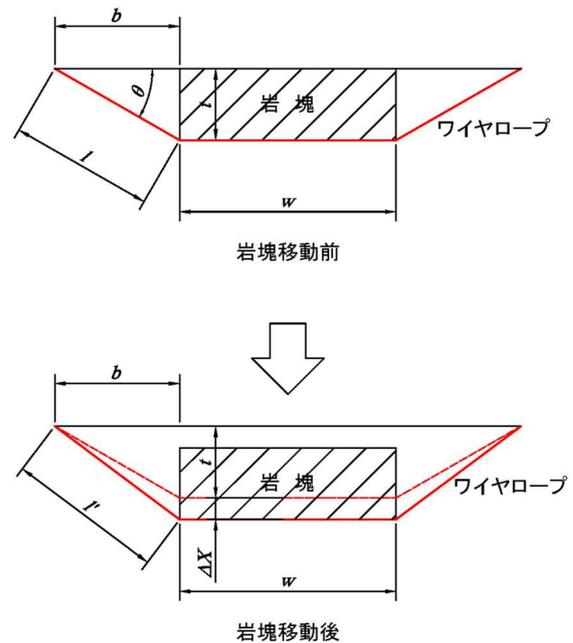


図-3.6 岩塊の移動によるワイヤロープの伸び

$$\Delta L_n = 2(l_n' - l_n) = 2 \left(\sqrt{(t_n + \Delta X)^2 + b_n^2} - l_n \right) \quad (3.5)$$

$$T_n = E \cdot A \cdot \frac{\Delta L_n}{L_n} = C \cdot \frac{\Delta L_n}{L_n} \quad (3.6)$$

$$T' = \frac{\max(P_s, P_{se})}{2 \cdot \sin \theta} \quad (3.7)$$

$$T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_m = T' \quad (3.8)$$

$$C \left(\frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2} + \frac{\Delta L_3}{L_3} + \dots + \frac{\Delta L_m}{L_m} \right) = T' \quad (3.9)$$

$$C = E \cdot A$$

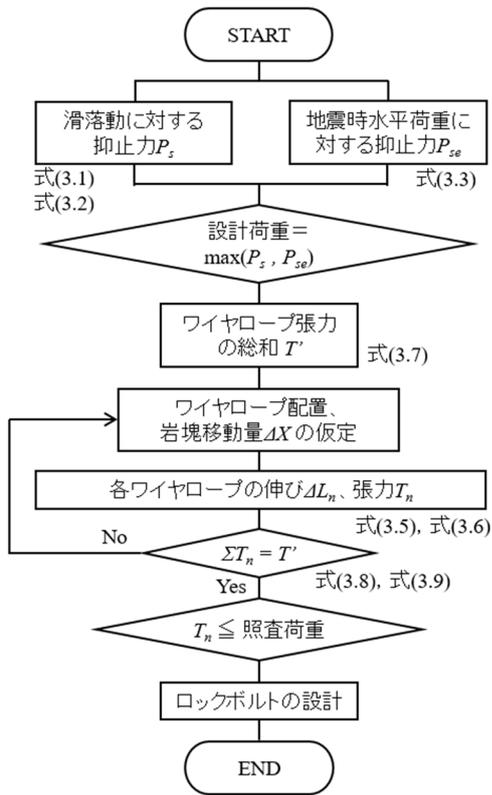


図-3.7 岩塊の滑落および地震荷重に対するワイヤロープ掛工の設計フロー案

ここで、 L_n : 岩塊移動前のワイヤロープ長、 ΔL_n : ワイヤロープの伸び、 l_n : 岩塊移動前のワイヤロープ斜辺長、 l_n' : 岩塊移動後のワイヤロープ斜辺長、 t_n : 岩塊の奥行、 b_n : 岩塊端部からアンカーまでの距離、 ΔX : 岩塊の移動量、 T_n : ワイヤロープの張力、 E : ワイヤロープの弾性係数、 A : ワイヤロープの断面積、 T' : 岩塊の滑落時に対する抑止力 P_s 、または地震時荷重 P_{se} から求まるワイヤロープ張力の総和、 θ : ワイヤロープと斜面の平面角である。

岩塊の奥行や岩塊幅が一樣ではなく、配置するワイヤロープ長が一律とならない岩塊の設計フロー案を図-3.7に示す。ワイヤロープの設計は、式(3.9)を満たす岩塊移動量 ΔX を繰返し計算で求めることにより、各ワイヤロープ張力 T_n を算出し、これが設定した照査荷重（例えば、降伏荷重/安全率、破断荷重/安全率など）を超えないことを照査することになる。

3.3 転動に対する照査およびワイヤロープの設計方法の検討

便覧の資料編に示されている設計例では、地震時における転動や岩塊のつま先部が風化・浸食を受けた場

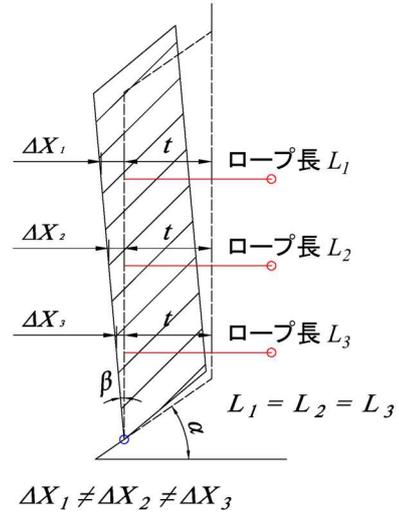


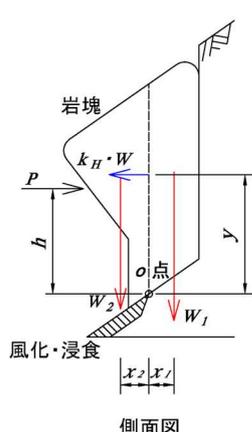
図-3.8 ロープ伸びが一律ではない岩塊の転動の例

合の岩塊の転動に対する照査がなく、これらの事象に対してのワイヤロープ掛工が性能を発揮できるかは不明確である。さらに、図-3.8に示すように岩塊形状が一律であり、各ワイヤロープ長 $L_n (n=1,2,3 \dots, m)$ が一律であっても、各ワイヤロープの伸び $\Delta X_n (n=1,2,3 \dots, m)$ が一律ではない状況で、式(3.4)を用いて各ワイヤロープの張力 T を算出することはできないと考えられる。

そこで本節では、転動に対する照査および転動を設計対象とする場合のワイヤロープの設計方法の検討を行った。

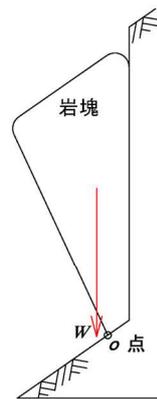
地震時の転動照査については、落石対策工の設計法と計算例⁴⁾に照査例が示されている。しかしながら、地震時のみならず、図-3.9に示す岩塊のつま先部が風化・浸食を受けた場合や、図-3.10に示すようにその時点では安定を保っているが、岩塊の重心が回転中心より転動側にある場合、さらにこれらの状況下で地震時水平荷重が作用した場合についても岩塊の転動が起り得る可能性は否定できない。よって、転動に対する照査は、ワイヤロープ掛工の供用期間中に想定され得る事象に対して適切に照査を行うことが望ましいと考えられる。

式(3.10)から式(3.12)は転動照査、抑止力算定の一例として、前述の図-3.9に示す岩塊のつま先部が風化・浸食を受け、さらに地震水平荷重が作用した場合についての転倒安全率 F_s の照査式、抑止力 P の算定の流れを示したものである。ここで、常時 ($k_H=0$) における転動を抑止対象とした場合、仮に \circ 点が岩塊重心直下の場合でも、式(3.10)より転動安全率 $F_s=1.0$ と算定さ



側面図

図-3.9 つま先部の風化・浸食+地震時水平荷重



側面図

図-3.10 岩塊の重心が回転中心より
転動側にある場合

れ、転動に対しては抑止不要となるが、風化・浸食の進行が懸念される状況では、適当な転動に対する安全率 F'_s を設定し、式(3.11)を満たす転動抑止モーメント $P \cdot h$ を算定することが望ましいと考えられる。

$$F_s = \frac{M_r}{M_l} = \frac{W_1 \cdot x_1}{k_H W \cdot y + W_2 \cdot x_2} \quad (3.10)$$

$$F'_s = \frac{W_1 \cdot x_1 + P \cdot h}{k_H W \cdot y + W_2 \cdot x_2} \quad (3.11)$$

$$P \cdot h = F'_s(k_H W \cdot y + W_2 \cdot x_2) - W_1 \cdot x_1$$

ここで、 F_s ：岩塊の o 点に関する転動安全率、 M_r ：抵抗モーメント、 M_l ：転動モーメント、 W_1 ： o 点より転倒抑止側にある岩塊重量、 W_2 ： o 点より転倒側にある岩塊重量、 x_1 ： o 点より転倒抑止側にある岩塊の重心から o 点までの距離、 x_2 ： o 点より転倒側にある岩塊の重心から o 点までの距離、 W ：岩塊重量、 k_H ：地震時設計震度、 P ：転動に対する抑止力、 h ： o 点から抑止力作用位置までの距離、 F'_s ：転動に対する安全率である。

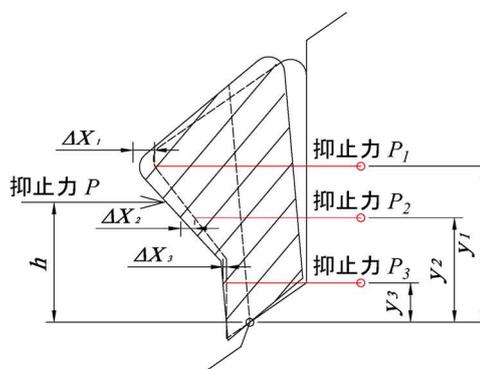
式(3.11)から算定される転動モーメント $P \cdot h$ と、図-3.11 に示す配置した各ロープによる抑止モーメント $P_n \cdot y_n$ の総和は等しくなると考えられることから、式(3.12)が得られる。

$$P_1 \cdot y_1 + P_2 \cdot y_2 + P_3 \cdot y_3 + \dots + P_m \cdot y_m = P \cdot h \quad (3.12)$$

ここで、 P_n ：岩塊転倒時に配置した各ロープによる抑止力、 y_n ： o 点から各ロープまでの距離である。

また、抑止力 P_n によりロープに発生する張力 T_n は、前述の式(3.6)および式(3.13)で表されるため、式(3.12)は、式(3.14)のように表すことができる。

$$T_n = \frac{P_n}{2 \cdot \sin \theta_n} \quad (3.13)$$



側面図

図-3.11 転動時の抑止力

$$2C \left(\sum_{n=1}^m \frac{\Delta L_n}{L_n} \sin \theta_n y_n \right) = P \cdot h \quad (3.14)$$

$$C = E \cdot A$$

ここで、 T_n ：抑止力 P_n のより発生するワイヤロープ張力、 E ：ワイヤロープの弾性係数、 A ：ワイヤロープの断面積、 L_n ：岩塊移動前の各ワイヤロープ長、 ΔL_n ：岩塊移動後の各ワイヤロープの伸び、 θ_n ：ワイヤロープと斜面の平面角である。

岩塊の転動に対する設計フロー案を図-3.12 に示す。岩塊の転動に対するワイヤロープ掛工の設計は、供用期間中に想定され得る事象、例えば、地震時の転動のほか、岩塊のつま先部が風化・浸食を受けた場合やそれに地震時水平荷重が作用した場合などのうち、転動安全率 F_s が最も小さい事象に対して行うことが望ましいと考えられる。ワイヤロープの設計は、岩塊の転動により発生する各ロープ位置での岩塊移動量 ΔX_n によるロープの伸び ΔL_n が式(3.14)を満たすことを繰返

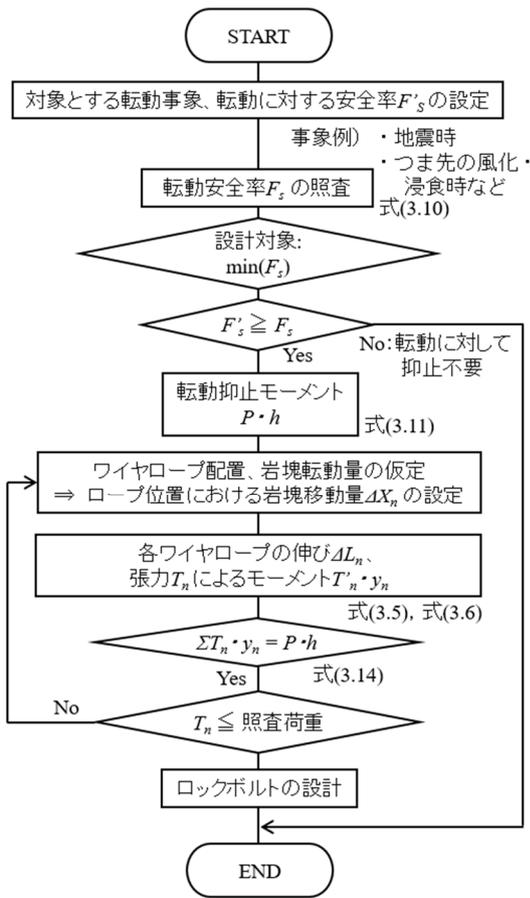


図-3.12 岩塊の転動に対するワイヤロープ掛工の設計フロー案

し計算により求めることにより、各ワイヤロープ張力 T_n を求め、これが設定した照査荷重（例えば、降伏荷重/安全率、破断荷重/安全率）を超えないことを照査することになる。

4. ロープ伏せ工の設計に関する検討

4.1 ロープ伏せ工について

ロープ伏せ工は、斜面に散在する浮石や転石に対し、ワイヤロープを格子状に組むなどしてネット状にしたもので覆い、さらにワイヤロープの交点にアンカーを打設し斜面上に固定する工法で、平成29年の便覧¹⁾改訂において、落石予備物質群を全体的に抑止する効果が期待できる工法として落石予防工に追加された工法である。しかしながら、便覧においては、ワイヤロープの強度については覆式落石防護網の設計に準じること、浮石等の質量や滑落時の荷重に十分に耐えられるように検討する旨の記載があるのみで、その体系的な設計法が示されていない。

表-4.1 に NETIS⁵⁾において、落石予防工に関する技術を検索した結果の内訳を示す。検索キーワードは、「落石」、「予防」である。平成29年4月時点では、検索ヒット数が34技術あり、落石防護柵に関する技術が14件41%と最も多く、ロープ伏せ工に関する技術は8件24%であった。令和2年4月時点では、前述の34技術のうち24技術が掲載終了、3技術が新たに追加となり、検索ヒット数は13件と少なくなっていたが、ロープ伏せ工に関する技術の6件46%は他の工法と比較して多く、数年の間に工法・製品の開発が進んでいる状況が伺える。しかしながら、前述したとおり、便覧においては覆式落石防護網の設計に準じる旨の記載があるのみで、体系的な設計法が示されておらず各工法が担保できる性能は不明確である。

そこで次節では、ロープ伏せ工の設計・施工資料等を収集比較し、覆式落石防護網のワイヤロープ強度の設計法と比較を行うことで、ワイヤロープ伏せ工の設計の考え方を整理した。

4.2 ロープ伏せ工の設計の現状

図-4.1 に収集した設計・施工資料^{6)~11)}から整理したロープ伏せ工の設計フローを、表-4.2 に便覧¹⁾における覆式落石防護網の設計方法との比較を示す。収集した6工法では、一部の工法で若干の差異はあるが、ほぼ図-4.1 に示す手順で設計が行われていた。また、ワイヤロープにかかる荷重や照査の方法も便覧における覆式落石防護網の設計に準じた設計が行われていた。

縦ロープの設計は、まず斜面内の落石分布等から設計の対象とする落石荷重を設定する。落石荷重は、表

表-4.1 NETIS における落石予防工の検索結果
単位：件、（）は%

	H29.4 時点	R02.4 時点
機械・工法	2 件 (6%)	1 件 (8%)
アンカー関係	4 件 (12%)	0 件 (0%)
防錆技術	1 件 (3%)	0 件 (0%)
緑化工法	1 件 (3%)	1 件 (8%)
接着工法	1 件 (3%)	0 件 (0%)
防護柵	14 件 (41%)	4 件 (31%)
防護網	2 件 (6%)	0 件 (0%)
ロープ伏せ工	8 件 (24%)	6 件 (46%)
ロープ掛工	1 件 (3%)	0 件 (0%)
根固め工	0 件 (0%)	1 件 (8%)
合計	34 (100%)	13 (100%)

検索キーワード：「落石」、「予防」

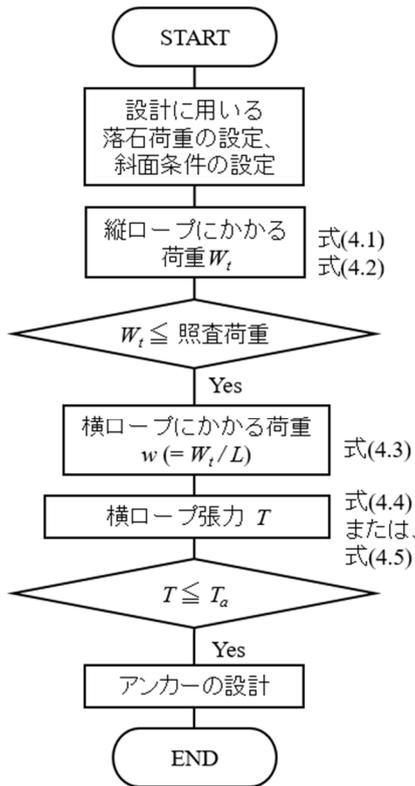


図-4.1 ロープ伏せ工の設計フロー

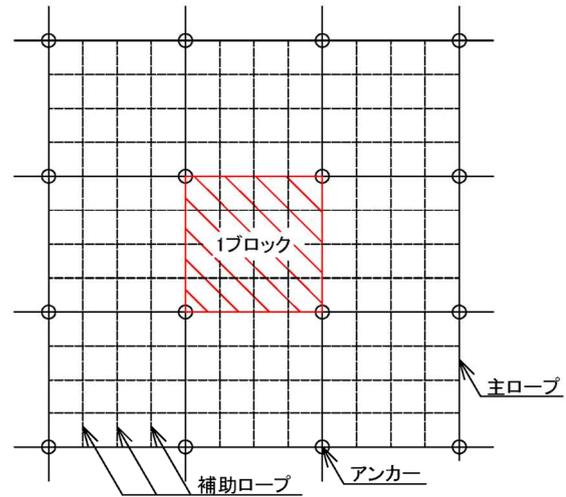


図-4.2 ロープ伏せ工の構成

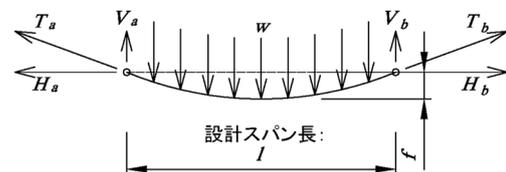


図-4.3 横ロープ張力の算定方法

図-4.2に示すとおり、1ブロック当りの落石荷重を設計対象としていた。ここで、1ブロックとは図-4.2に示すとおり、主ロープ交点に打設したアンカーで囲まれている範囲であり、縦2m×横2mが一般的であった。

次に、式(4.1)および式(4.2)より縦ロープにかかる荷重 W_t を算定し、ワイヤロープの許容荷重 T_a と比較する。ここで、ワイヤロープの許容荷重 T_a とは、ワイヤロープの破断荷重 T_b を安全率で除したものであり、収集した6工法では安全率は2または3以上としていた。覆式落石防護網の縦ロープは斜面上部でのみアンカー固定されているため、表-4.2に示すとおり、縦ロープには法長全長分の落石荷重および覆式落石防護網自重が作用するとして縦ロープにかかる荷重を算定しているが、ロープ伏せ工の場合、1ブロック毎にアンカーが打設されているため、1ブロック内の荷重のみで設計照査が行われていると考えられる。

$$W_t = K(W_1 + W_2) \quad (4.1)$$

$$K = \sin \theta - \mu \cos \theta \quad (4.2)$$

ここで、 W_t : 縦ロープにかかる荷重、 W_1 : 1ブロック当りの落石荷重、 W_2 : 1ブロック当たりロープ伏せ工の自重、 K : 斜面勾配補正係数、 θ : 斜面勾配、 μ : 落石と地山の摩擦係数である。

横ロープの設計は、式(4.3)により横ロープにかかる荷重 w 、式(4.4)または式(4.5)により荷重 w によってロープに発生する張力 T を算定し、縦ロープの時と同様にワイヤロープの許容荷重 T_a と比較する。ここで、ロープの垂下量 f は、図-4.3に示すとおり、横ロープの設計スパン中央部の垂下量であり、収集した6工法すべてにおいて設計スパン長 l (=アンカーの間隔) の10%としていた。これは、表-4.2に示すとおり、便覧における覆式落石防護網の設計における垂下量 f の仮定と同じである。

$$w = W_t/l \quad (4.3)$$

$$T = \frac{wl}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{4f}\right)^2} \quad (4.4)$$

$$T = \frac{wl^2}{8f} \quad (4.5)$$

ここで、 W_t : 横ロープにかかる荷重 = 縦ロープにかかる荷重、 l : 設計スパン長 (=アンカーの間隔)、 f : ワイヤロープの垂下量である。

横ロープ張力 T の算定において、式(4.4)を用いているものは、6工法中4工法であり、残り2工法は式(4.5)が用いられていた。これは、工法が開発された年次、

つまり、準拠した便覧の差異によるものだと考えられる。H29年に改訂された現在の便覧¹⁾においては、覆式落石防護の横ロープの設計は、ロープスパン端部(式(4.4))およびスパン中央(式(4.5))の張力を算出する数式が示されている。しかしながら、H29年改定以前の落石対策便覧¹²⁾においては、横ロープ張力として、式(4.5)のみが示されていたためであると考えられる。垂下量 f を設計スパン長 l の 10% としてスパン端部とスパン中央の張力を比較した場合、スパン中央の方が 1 割程度小さく張力を評価することになる。そのため、横ロープの設計においては、H29年に改訂された便覧に準拠し、ロープ端部の張力を用いて設計を行うことが望ましいと考えられる。

4.3 ロープ伏せ工の技術的課題

ロープ伏せ工の設計において、横ロープに作用する落石荷重 w は式(4.3)からも明らかのように、1 ブロック当りの落石荷重およびロープ伏せ工の自重が設計スパンに等分布荷重として作用するものとしている。この時、落石径や落石分布から 1 ブロック当たりの落石荷重を設定するため、落石の形状に関するパラメータが取り入れられていない。よって、1 ブロック当たりの落石荷重が同じであれば、落石の形状によらず横ロープ張力は同じ値として算定されることになる。しかしながら、落石径が設計スパン長よりも小さい場合もあると考えられ、この場合は等分布荷重を用いて算出

表-4.2 ロープ伏せ工と覆式落石防護網の設計方法の比較

【縦ロープの設計】	ロープ伏せ工	覆式落石防護網
設計の対象とする荷重	1 ブロック当たりの落石荷重 W_1 およびロープ伏せ工自重 W_2 (1 ブロックは、 縦 2m×横 2m が一般的)	横ロープ 1 スパン (標準で 4m) × 法長分の落石荷重 W_1 および覆 式落石防護網自重 W_2
斜面勾配、摩擦係数による補正	$K = \sin \theta - \mu \cos \theta$ K : 補正係数、 μ : 摩擦係数、 θ : 斜面勾配	$K = \sin \theta - \mu \cos \theta$ K : 補正係数、 μ : 摩擦係数 θ : 斜面勾配
縦ロープに作用する荷重	$W_l = K(W_1 + W_2)$	$W_l = K(W_1 + W_2)$
【横ロープの設計】		
対象とする荷重	縦ロープの場合と同じ	横ロープ 1 スパン (標準で 4m) × 縦 3 スパン (標準で 10m/1 ス パン) 分の落石荷重 W'_1 および 覆式落石防護網自重 W'_2
斜面勾配、摩擦係数による補正	縦ロープの場合と同じ	縦ロープの場合と同じ
横ロープに作用する荷重	$W_l = K(W_1 + W_2)$ が 等分布荷重 w として作用 $w = W_l/l$ l : 設計スパン長	$W_l = K(W'_1 + W'_2)$ が 等分布荷重 w として作用 $w = W_l/l$ l : 設計スパン長
横ロープ張力	設計スパン中央の垂下量 f をス パン長 l の 10% と仮定して張力 T を算定 $T = \frac{wl}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{4f}\right)^2}$ または、 $T = \frac{wl^2}{8f}$	設計スパン中央の垂下量 f をス パン長 l の 10% と仮定して張力 T を算定 $T_A = \frac{wl}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{4f}\right)^2} \quad (\text{端部})$ $T_c = \frac{wl^2}{8f} \quad (\text{中央})$

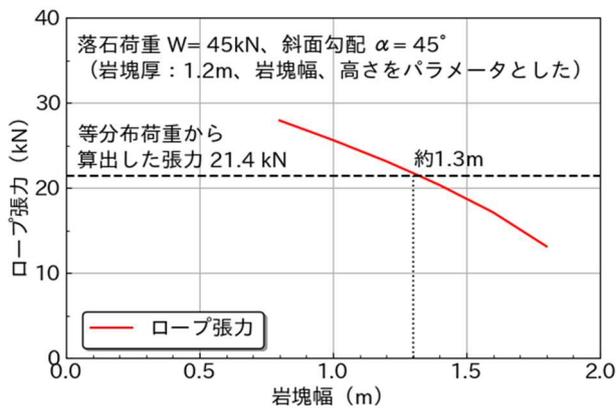


図-4.4 岩塊幅の違いによる横ロープ張力変化

するロープ張力よりも大きな張力が発生することになると考えられる。

図-4.4には、落石荷重が等分布荷重として作用した場合のロープ張力と、岩塊幅 (=ロープとの接触幅) を変化させて2点載荷荷重として作用させた場合のロープ張力の比較を示している。落石荷重 $W=45\text{kN}$ (1.2mの立方体、単位体積重量 $\gamma=26\text{kN/m}^3$ に相当)、斜面勾配 $\alpha=45^\circ$ 、落石と地山の摩擦係数 $\mu=0.5$ 、設計スパン長 $l=2.0\text{m}$ 、垂下量 $f=0.2\text{m}$ ($=0.1l$) として、等分布荷重によるワイヤロープの張力は式(4.3)により算定した。また、岩塊幅を変化させた場合は、図-4.5より式(4.6)から式(4.8)を導出し、ロープ張力 T を算出した。なお、岩塊寸法は、落石重量が 45kN となるように岩塊厚さを 1.2m に固定して、岩塊幅に応じた岩塊高さを設定した。また、ロープ長は等分布荷重の場合と等しい長さとした。

$$V = W/2 \quad (4.6)$$

$$H = \frac{W \cdot l_1}{2f} \quad (4.7)$$

$$T^2 = V^2 + H^2$$

$$T = \frac{W}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{l_1}{f}\right)^2} \quad (4.8)$$

$$= \frac{W}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\tan \theta}\right)^2}$$

$$= \frac{W}{2} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$$

ここで、 T : 横ロープ端部張力、 V : 横ロープ端部張力の鉛直成分、 H : 横ロープ端部張力の鉛直成分、 W : 落石荷重、 l_1 : 岩塊端部からアンカーまでの距離、 f :

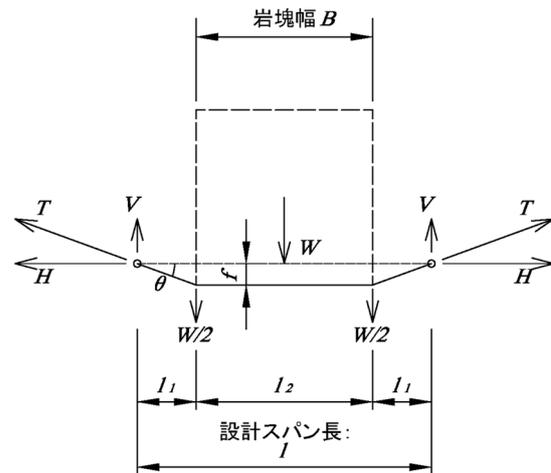


図-4.5 横ロープ張力の算出

ロープの垂下量、 θ : ワイヤロープと斜面の平面角である。

図-4.4より落石重量が等しくても岩塊幅が小さくなると、落石荷重が等分布荷重として作用した場合よりもロープ張力が大きく算定されることが分かる。試算した条件の場合は、岩塊幅約 1.3m よりも小さい場合に等分布荷重として作用した場合よりもロープ張力が大きくなった。これより、想定される落石径または、岩塊とロープとの接触幅が小さくなるのが想定される箇所のロープ伏せ工では、ロープ張力は等分布荷重を用いて算定する張力よりも大きな張力が発生する場合があるため、現地状況に応じた張力の算出方法で設計を行うことが望ましいと考えられる。

また、前節で示したとおり、縦ロープおよび横ロープは1ブロック当たりの落石荷重を用いて設計照査が行われているが、1ブロックの大きさが一般的には縦 $2\text{m} \times$ 横 2m と覆式落石防護網の設計スパンと比較して小さいため、隣接するブロックで同時に落石が発生した場合の性能は不明確である。

そこで、次章では模型実験および実物大モデルの数値解析的検討にて、岩塊幅の影響および隣接するブロックで同時に落石が発生した場合のロープ張力について検証を行った結果を述べる。

5. ロープ伏せ工におけるロープ張力の検証

5.1 実験的検討

岩塊幅の違いが横ロープ張力に及ぼす影響および隣接ブロックで同時に落石が発生した場合のロープ張力への影響について縮尺模型を用いて検証した。

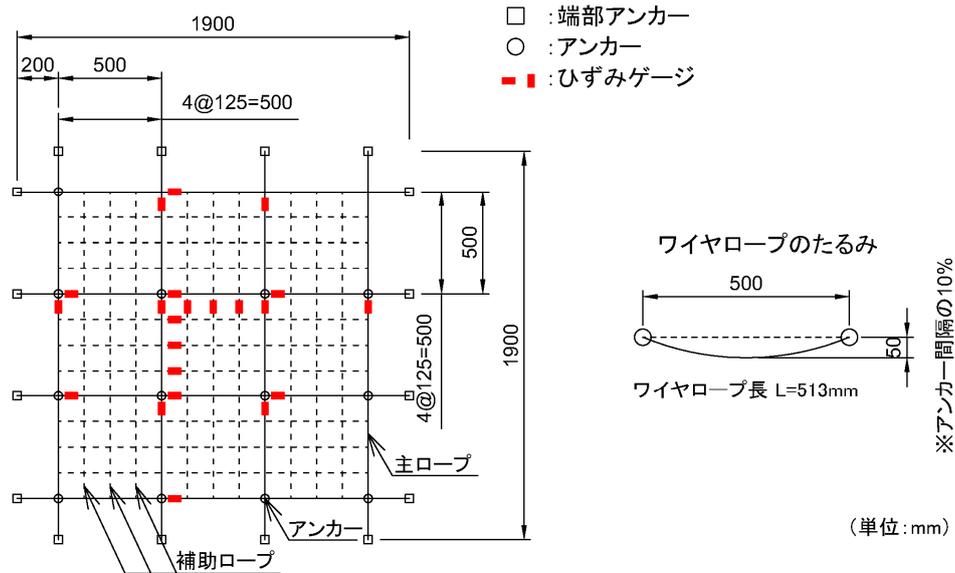


図-5.1 ロープ伏せ工の縮尺模型

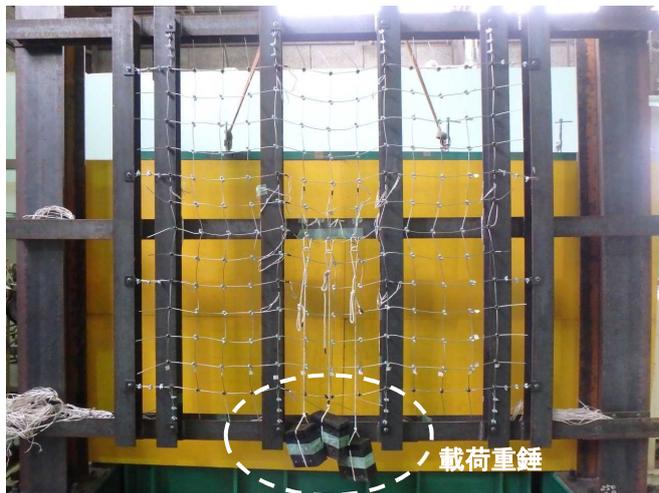


写真-5.1 実験状況



写真-5.2 ワイヤ交点



写真-5.3 アンカー部

5. 1. 1 実験概要

図-5.1 に検討に用いた縮尺模型および、写真-5.1 に実験状況を示す。四隅のアンカーで囲まれた1ブロックの大きさは、縦500mm×横500mm、全体で縦3ブロック×横3ブロックの1/4縮小模型である。ワイヤロープは、3mmのステンレスワイヤを用いた。ロープ交点およびアンカー部は、写真-5.2 および写真-5.3 に示すとおり、ワイヤクリップおよび高ナットを加工して交差するワイヤの緊結および架台への固定を行った。アンカー配置された500mm間隔のロープを「主ロープ」、主ロープ間に125mm間隔で配置したロープを「補助ロープ」と定義した。

ワイヤロープへの载荷は、写真-5.1 に示すとおり、重錘をワイヤロープに吊り下げるにより行った。

ワイヤロープのひずみ計測箇所は、図-5.1 に示すとおりで、φ5mmの銅パイプをベースとしてゲージ長1mmのひずみゲージをワイヤロープに貼り付けた。

実験ケースを表-5.1 に示す。ケース1およびケース2は、岩塊幅の違いが横ロープ張力に及ぼす影響を検証するため、ロープへの载荷幅をパラメータとした。ケース3からケース5は、隣接ブロックで同時に落石が発生した場合のロープ張力への影響を検証するため、中央ブロックのほか、左側ブロックまたは、上段ブロックに载荷を行った。

5. 1. 2 実験結果

図-5.2 から図-5.3 にワイヤロープ張力の発生状況を示す。なお、ワイヤロープ張力は、ひずみゲージのひずみ出力値から換算して求めた値である。

表-5.1 実験ケース一覧

ケース No.	载荷ブロック	载荷位置	载荷幅	载荷荷重 (1ブロック当たり)
1	中央	下主ロープ	125mm	98N×3個 = 294 N
2	中央	下主ロープ	250mm	98N×3個 = 294 N
3	中央	中段補助ロープ	250mm	98N×3個 = 294 N
4	中央+左	中段補助ロープ	250mm	98N×3個 = 294 N
5	中央+上段	中段補助ロープ	250mm	98N×3個 = 294 N

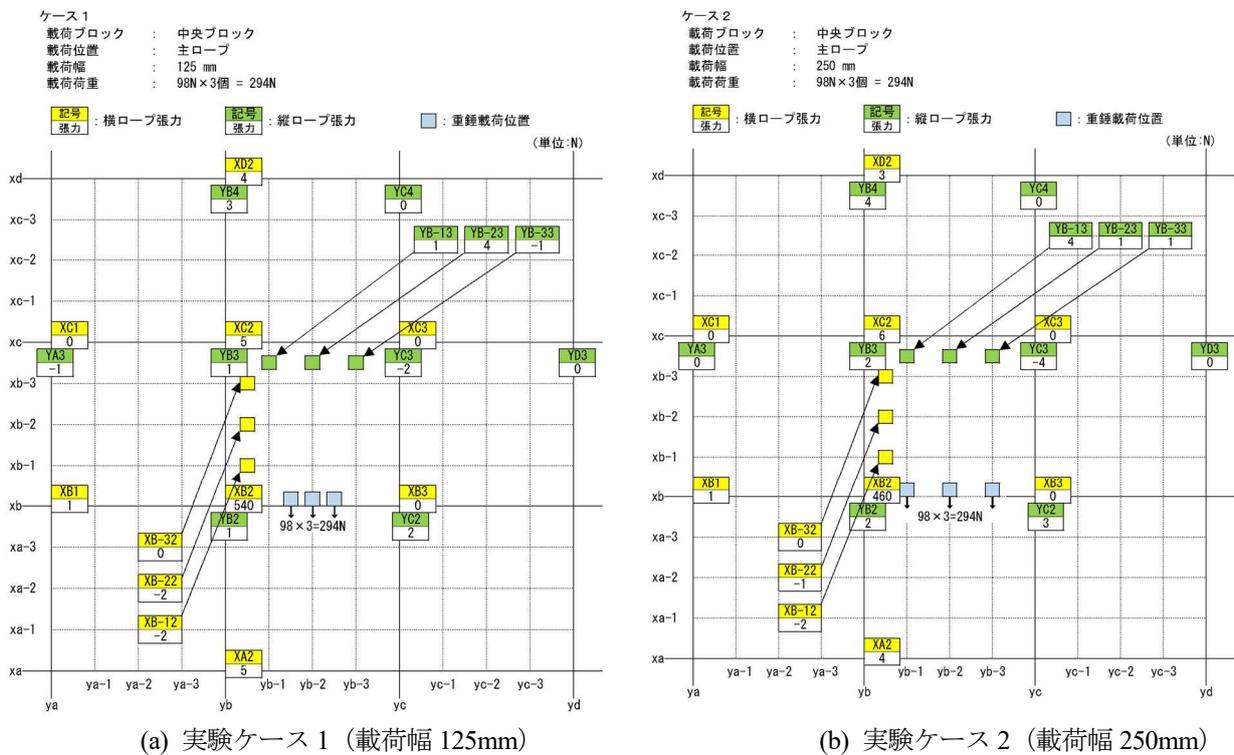


図-5.2 重錘载荷位置およびロープ張力 (载荷幅の影響)

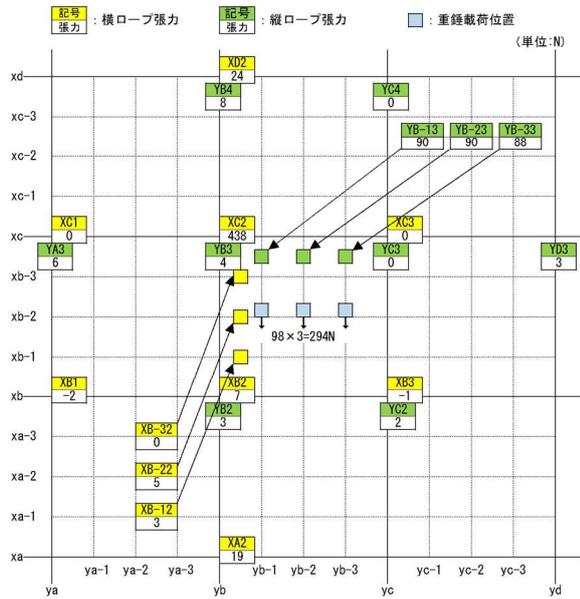
図-5.2(a)は载荷幅を 125mm とした実験ケース 1、図-5.2(b)は载荷幅を 250mm とした実験ケース 2 の結果である。中央ブロックの载荷位置左側 (ゲージ記号: XB2) の横ロープ張力は、実験ケース 1 で 540N、実験ケース 2 で 460N であり、载荷幅の小さい実験ケース 1 の方が横ロープ張力は大きくなっていることが確認できる。また、その他の箇所のロープ張力はごく僅かであった。

図-5.3 は、隣接ブロックで同時に落石が発生した場合のロープ張力への影響を検証するため、中央ブロッ

クおよびその隣接ブロックとして、左側ブロックまたは上段ブロックに载荷を行った実験ケース 3 から実験ケース 5 の結果である。これらのケースは前述の実験ケース 1 および実験ケース 2 とは異なり、補助ロープを介して隣接するブロックへの荷重伝達を確認するため、重錘はブロック中央の補助ロープに吊り下げた。

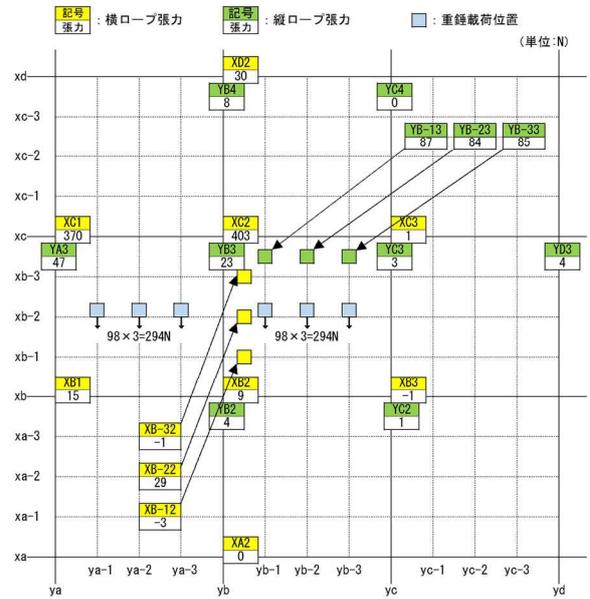
図-5.3(a)に示す実験ケース 3 では载荷ブロックの上横主ロープ (ゲージ記号: XC2) および縦補助ロープ (ゲージ記号: YB-13~YB-33) に主に張力が発生している。縦補助ロープには、概ね载荷荷重と同程度の

ケース3
 載荷ブロック : 中央ブロック
 載荷位置 : 中段補助ロープ
 載荷幅 : 250 mm
 載荷荷重 : 98N×3個 = 294N (1ブロック当たり)



(a) 実験ケース 3

ケース4
 載荷ブロック : 中央ブロック+左ブロック
 載荷位置 : 中段補助ロープ
 載荷幅 : 250 mm
 載荷荷重 : 98N×3個 = 294N (1ブロック当たり)



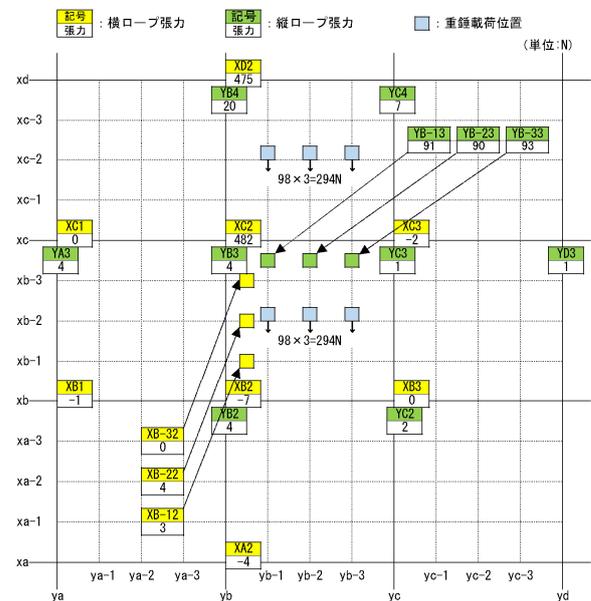
(b) 実験ケース 4

張力が発生していることが確認できる。また、それと接続されている横主ロープ (ゲージ記号: XC2) に発生した張力の大きさは 438N、さらに上段ブロックの上横主ロープ (ゲージ記号: XD2) に発生した張力の大きさは 24N であり、両者を合計した 462N は、同じく中央ブロックに載荷した前述の実験ケース 2 の横ロープ張力 (ゲージ記号: XB2) である 460N と同程度であることから、載荷荷重が縦補助ロープを介して 2 本の横主ロープに伝達されていることが確認できる。これより、中央のブロックで発生した落石の荷重は、上段のブロックでも負担していることが確認できる。単独のブロックのみで落石が発生した場合については、落石荷重を複数のロープで分担していると考えられるため、設計上は安全側になると考えられる。

また、載荷ブロックの左右方向の横主ロープ (ゲージ記号: XC1 および XC3) や縦主ロープ (ゲージ記号: YA3 および YD3) の張力の大きさは 0~6N であったことから、本実験ケースでは横方向ブロックへの荷重伝達は小さいものと考えられる。

図-5.3(b)に示す左側ブロックに重錘を追加した実験ケース 4 では、実験ケース 3 と比較すると、載荷ブロックの上横主ロープ (ゲージ記号: XC1 および XC2) および、縦補助ロープ (ゲージ記号: YB-13~YB-33) の張力は小さくなっていることが確認できる。しかしながら、実験ケース 3 では張力がごく僅かであった載

ケース5
 載荷ブロック : 中央ブロック+上段ブロック
 載荷位置 : 中段補助ロープ
 載荷幅 : 250 mm
 載荷荷重 : 98N×3個 = 294N (1ブロック当たり)



(c) 実験ケース 5

図-5.3 重錘載荷位置およびロープ張力 (隣接するブロックへの影響)

荷位置の横補助ロープ（ゲージ記号：XB-22）に 29N、
 載荷ブロック間の縦主ロープ（ゲージ記号：YB3）に
 23N の張力が発生していた。これより、横補助ロープ
 および縦主ロープにも荷重分担があることにより、載
 荷ブロックの上横主ロープの荷重分担が小さくなった
 ものと推察される。

図-5.3(c)に示す中央ブロックおよびその上段ブ
 ロックの載荷を行った実験ケース 5 では、実験ケース 3
 と比較すると、縦補助ロープ（ゲージ記号：YB-13～
 YB-33）には実験ケース 3 と同様に、概ね載荷荷重と
 同程度の張力が発生していることが確認できる。しか
 しながら、縦補助ロープ（ゲージ記号：YB-13～YB-33）
 と接続されている横主ロープ（ゲージ記号：XC2）に
 発生した張力は実験ケース 3 と比較して 44N 大きい
 482N の張力が発生していた。これは、ワイヤロープに
 は剛性があるため、上段ブロックの載荷位置の 3 本の
 縦補助ロープが下段の横ロープを押しするような状況が起
 こったためだと考えられる。これより、上下方向の複
 数のブロックで同時に落石が発生した場合には、上段
 ブロックのロープは、そのブロック自身の落石荷重お
 よび下段ブロックから伝達される落石荷重の一部も負
 担することもあると考えられ、落石荷重の大きさや範
 囲によってはロープ張力が照査荷重を上回ることも懸
 念される。

以上、模型実験の結果から、本実験の範囲内では、
 上下方向の複数のブロックで同時に落石が発生した場
 合については、1 ブロックの落石荷重のみでロープ張
 力を設計した場合よりも大きな張力が発生し得るこ
 とを確認した。しかしながら、実際の斜面においては、
 斜面形状や施工時のロープの張り具合などにより、複
 雑な荷重の伝達や分配が起こる場合と考えられるため、
 このような現地状況に応じたワイヤロープの設計、照
 査方法の確立が必要であると考えられる。

5. 2 数値解析的検討

ロープ伏せ工の実物大モデルを用いて、ロープ伏せ
 工で対策した斜面で落石が生じた場合を想定した数値
 解析を行い、隣接ブロックへの落石荷重の影響を検証
 した。なお、数値解析には LS-DYNA (Ver.R9) を使用し
 した。

5. 2. 1 数値解析概要

図-5.4 には本解析で用いた有限要素モデルを示し
 ている。ワイヤロープ間隔は縦・横方向ともに 0.5m の
 格子状で、アンカー間隔は 2m、ロープ伏せ工の全体寸
 法は幅 18m×長さ 18m である。ワイヤロープは 3×7 G/O
 $\phi 12\text{mm}$ とし 2 節点ケーブル要素でモデル化した。ワ

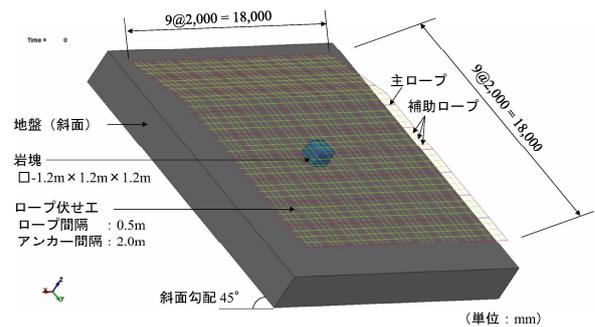


図-5.4 FE モデル

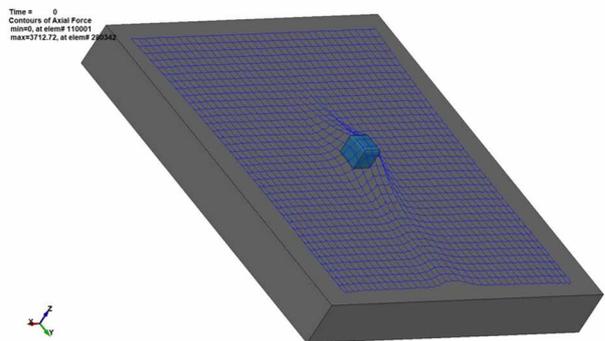


図-5.5 岩塊とロープの配置（落石現象前）

イヤロープの材料構成則は、トリリニア型の弾塑性体
 モデルを適用し、降伏張力 $T_y = 51.5 \text{ kN}$ 、弾性係数 $E =$
 100GPa と仮定した。また、破断荷重 $T_b = 68.6\text{kN}$ に到
 達する軸ひずみ ϵ_u は $\epsilon_u = 5\%$ とし、その後はひずみの
 み増大するように設定した。岩塊は上部 4 辺に R 面取
 りを有する 1.2m の立方体（設定重量約 45kN、単位体
 積重量 $\gamma = 26\text{kN/m}^3$ に相当）であり、8 節点固体要素
 を用いてモデル化している。なお、岩塊および地盤は
 弾性体を仮定した。斜面勾配は 45° とした。境界条件
 は地盤底部および側面を完全固定とし、ロープ伏せ工
 上端部の 2m 間隔毎のアンカー位置においても地盤と
 完全固定とした。前節と同様に、アンカー配置された
 2m 間隔のロープを「主ロープ」、主ロープ間に 0.5m 間
 隔で配置したロープを「補助ロープ」と定義した。

数値解析は、図-5.5 に示すとおり、まず岩塊と斜面
 を完全固定とした状態で、重力によってロープと岩塊
 を接触・安定させ、ロープ長で 2m 間隔毎の縦・横ロ
 ープ交点を簡易に空間上に固定しアンカー配置点を設
 けた。その後、岩塊と斜面間に摩擦係数を設定し、岩

塊の固定条件を解除することにより落石現象を再現した。

表-5.2 に解析ケースを示す。本検討では、斜面と岩塊の摩擦係数をパラメータとして、2 ケースの数値解析を実施した。

5. 2. 2 数値解析結果

図-5.6 に数値解析を実施した 2 ケースにおける岩塊右下アンカー近傍の横主ロープおよび縦補助ロープ張力の経時変化を示す。図より、斜面と岩塊の摩擦係数を $\mu=0$ とした解析ケース C-0 の場合、岩塊が横主ロープと接触したと推察される点からワイヤロープ張力は急激に大きくなり、その後、降伏張力 T_y を僅かではあるが超過していることが確認できる。また、張力がピークに達した後は、岩塊の跳ね返りにより張力の大きさに振幅が確認できる。一方、斜面と岩塊の摩擦係数を便覧りに例示されている経験値である $\mu=0.5$ とした解析ケース C-050 においては、張力の増加は解析ケース C-0 と比較して緩やかであり、張力の大きさの振幅も確認できない。これより、斜面の風化等によりワイヤロープ格子面と斜面に空間が生じ、摩擦力を消失

表-5.2 数値解析ケース

ケース	摩擦係数 μ	落石荷重 W (kN) ※
C-0	0	31.8
C-050	0.50	15.9

※ 落石荷重 = 岩塊重量 $\times (\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$
 α : 斜面勾配

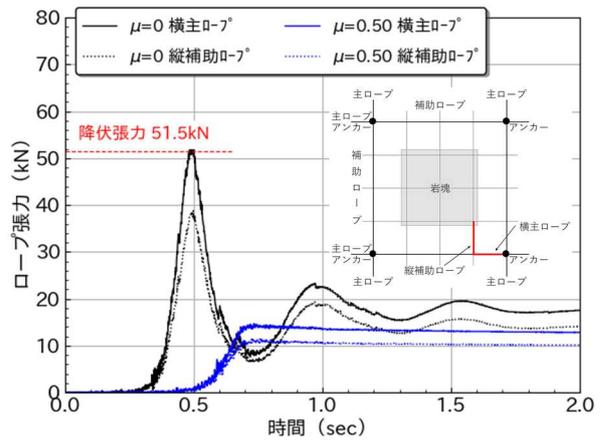
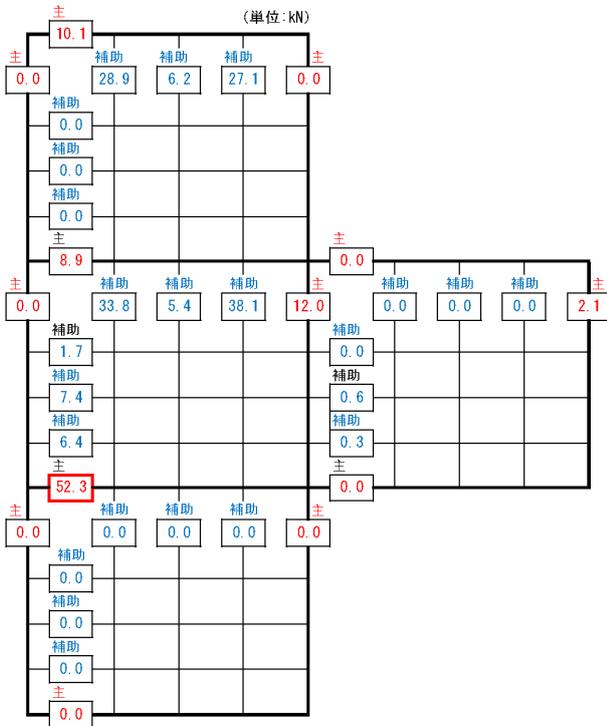


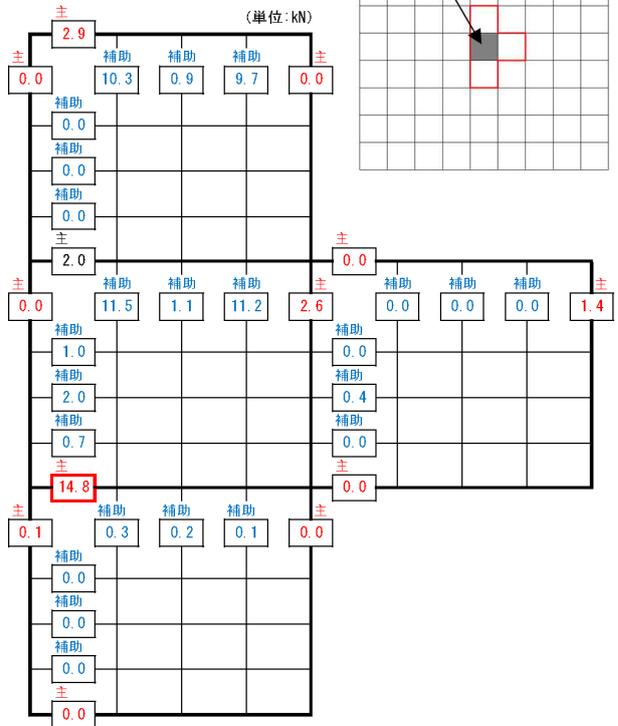
図-5.6 ロープ張力の経時変化

解析ケース : C-0



(a) 解析ケース C-0

解析ケース : C-050



(b) 解析ケース C-050

図-5.7 岩塊周囲のロープ張力

した落石がロープ伏せ工に作用した場合には、その落石荷重によってワイヤロープに大きな張力や、その振幅が発生する可能性のあることが示唆された。

図-5.7 に落石発生時における岩塊周囲の各ロープ張力の大きさを示す。なお、各ロープの張力の大きさは、落石を発生させたブロックの下横主ロープ（図中赤枠）の張力が最大となった時刻のものである。また、張力を示した範囲は図に示すとおり、落石を発生させたブロックの上下1ブロックおよび右側ブロックである。図より、両ケースともに落石を発生させたブロックの上段ブロックの横主ロープおよび縦補助ロープにも張力が発生していることから、前述の模型実験と同様に、縦補助ロープを介して上段ブロックのワイヤロープにも落石荷重の伝達が起こっていることが確認できる。また、右側ブロックのロープ張力の大きさは僅かであり、模型実験と同様に横方向ブロックへの荷重伝達は小さいものと考えられる。

以上より、数値解析的検討の結果から、本検討の範囲内では、模型実験と同様に、落石荷重は落石が発生したブロックのみならず、上方のブロックにも伝達することと、また、横方向への落石荷重の伝達は小さいことを確認した。これより、上下方向の複数のブロックで同時に落石が発生した場合については、1ブロックの落石荷重のみでロープ張力を設計した場合よりも大きな張力が発生し得ることが示唆された。しかしながら、本解析においては、図-5.4 に示したように極めて単純化した FE モデルを用いて落石現象およびロープ伏せ工による落石予防効果を再現しているため、より複雑な斜面形状や落石の挙動が異なる場合についてのモデル化などの数値解析手法や、それによるロープ伏せ工の性能検証方法については今後さらに検討が必要であると考えられる。

6. まとめ

本研究では落石予防工のうち、覆式落石防護網、ワイヤロープ掛工およびロープ伏せ工に着目し、設計・施工上の課題の明確化および、設計の考え方の提案を目的とした種々の検討を行った。

覆式落石防護網については、損傷事例収集および傾向分析から損傷が発生しやすい現場条件の抽出および現場適用上の留意点の検討を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 損傷・変状の多くはひし形金網に発生しており、その内訳は腐食が最も多く、破網しているものも確認された。

- 2) 外的要因による金網の損傷は、落石によるものだけでなく、植生が原因となっている損傷も確認された。
- 3) 集水地形や風化・浸食を受けやすい地質の斜面での覆式落石防護網の損傷や、岩塊凸部によるひし形金網の破網、斜面からの湧水や斜面上部からの水の供給による金網腐食が確認されたため、こうした状況下では事前対策や施工後の点検、補修などの維持管理による対策が必要である。

ワイヤロープ掛工については、事象別のワイヤロープの設計方法の検討を行い、以下の提案を行った。

- 1) 滑落時および地震時荷重を設計対象と対する場合のワイヤロープの設計方法の提案。
- 2) 転動時の照査方法およびワイヤロープの設計方法の提案。

ロープ伏せ工の設計の考え方の整理、模型実験および数値解析的検討の範囲内から、以下のことを明らかにした。

- 1) 斜面の風化等によりワイヤロープ格子面と斜に空間が生じ、摩擦力を消失した落石の荷重がワイヤロープに作用した場合には、大きな張力や、その振幅が発生する可能性がある。
- 2) 落石が発生した場合、補助ロープによる荷重の伝達により、上段ブロックにも落石荷重の伝達が行われる。
- 3) 複数のブロックで同時に落石が発生した場合、2)の荷重の伝達により、設計で一般的に行われている1ブロック内の落石荷重に対して計算したロープ張力よりも大きな張力が発生する可能性がある。

今後については、ロープ伏せ工における現地状況に応じた体系化されたワイヤロープの設計・照査方法の確立や、性能検証方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12
- 2) 公益社団法人 日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成21年度版）、2009.6
- 3) 北海道開発局：道路設計要領 第6集 標準設計図集、2020
- 4) 公益社団法人 地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例、2014.12

- 5) 国土交通省：新技術情報提供システム（NETIS）、
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/>、2017.4.4,2020.4.14 閲覧
- 6) シーシーエム協会：ロープネット工 技術資料、第7版、
2019.4
- 7) 神鋼建材工業株式会社：ケーブルネット SK 厚ネット
技術資料、2018.12
- 8) JFE 建材株式会社；ワイヤネット 設計・施工マニュアル、
2013.7
- 9) 株式会社テザック：落石予防工（ロープ伏工）スーパー
ロック<ネット式> 技術資料、改訂9版、2020.4
- 10) 株式会社小財スチール：ワイヤネット工 要領書
- 11) 落石工法研究会：フリーネット技術資料、2019.8
- 12) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2000.6

A STUDY ON DESIGN METHOD OF ROCK-FALL PREVENTIN WORKS

Research Period : FY2017-2020

Research Team : Cold-Region Construction
Engineering Research
Group (Structures)

Author : NISHI Hiroaki

KASAI Satoshi

YASUNAKA Shintaro

KONNO Hisashi

NAKAMURA Takuro

ARAKI Nobuya

YAMASAWA Fumio

TERASAWA Takahiro

Abstract : As a measure against rock-fall, it is desirable to take measures to prevent rock-fall, which is a measure against the source. However, there is a technical problem that the design method is not systematized on some rock-fall prevention. The purpose of this research is to clarify the design and construction issues of rock fall prevention, and to propose the basic idea of design. Regarding the cover-type rock-fall protection net, the site conditions where damage is likely to occur and the points to be noted in site application were clarified from the damage case collection and trend analysis. Regarding method of suppressing rock-fall with a wire rope, we proposed a wire rope design method for each event. Regarding the prevention wire rope net for rock-fall, model experiments and numerical analysis clarified the occurrence of rope tension when multiple rock-falls, which are not generally checked in the design, occur at the same time

Key words : Rock-fall prevention, cover-type rock-fall protection net, method of suppressing rock-fall with a wire rope, prevention wire rope net for Rock-fall