

柔構造バリアネットの斜面崩壊に対する効果について

Effect of flexible protection barriers on slope failure

千葉 幹^{*1}

Miki CHIBA

井村 俊則^{*2}

Toshinori IMURA

坂口 哲夫^{*1}

Tetsuo SAKAGUCHI

Louis Bugnion^{*3}下条 和史^{*2}

Kazuhito SHIMOJO

Abstract

Flexible protection barriers have not been as widespread as retaining walls in Japan, and it is difficult to confirm their effectiveness using full-scale tests because of safety management issues. However, the flexible protection barrier will become more useful tool in slope failure protection as new designs are developed. Here, we report on an experiment conducted in Switzerland in 2008. This experiment utilized full-scale collapse where soil flowed down-slope and the load was measured at the barrier. The flexible protection barrier safely caught 140 m³ of soil. According to the calculated flow velocity determined using high-speed video cameras, flexible protection barriers could endure loads on many slopes in Japan, although they require a 'catching space' downstream of the barrier to collect collapsed soil.

Key words : flexible protection barrier, field experiment, Switzerland

1. はじめに

土砂災害防止法の施行に伴い、待受け式擁壁の設計において、崩壊土砂が衝突する際に擁壁に作用する力や土砂捕捉容量が考慮されるようになってきた。このため待受け式擁壁へ作用する力についての研究が進められており、基礎地盤の変形等による擁壁の変位の影響が小さいことが示唆される(内田ら, 2006)など、新たな知見が得られている。

柔構造バリアネットは、急傾斜地の崩壊によって発生した土砂をリングネットで受け止め、斜面下方への被害を防ぐための対策工法である。その施工性や環境への影響を考えた場合、場所によっては待受け式擁壁よりも有利な工法になると考えられる。しかし、現在のところ、待受け式擁壁ほど普及していないこともあり、崩壊土砂衝突時にどのように力が作用するのか明らかになっていない。また土砂災害防止法で想定されている崩壊土砂による力が作用した場合、安全性が確保できるのか、確認されていない。

この課題を解決するにあたって、実物大の崩壊実験を通じてデータを収集し、柔構造バリアネットの安全性を検討することは有効な方法であるが、日本では1971年川崎市生田緑地内における実験での事故のあと、数事例(八木ら, 1985; Ochiai et al., 2004 など)しか実施されておらず、安全管理の面から、今後もそれほど頻繁に実

施されるとは考えにくい。

今回、スイス連邦の研究機関であるWSL (The Swiss Federal Institute for Forest Snow and Landscape Research) とGEOBURUGG社が共同で実施した実物大実験(Bugnion et al., 2008)を見学し、柔構造バリアネットに対し、崩壊土砂衝突による力がどのように作用するのか計測されたデータを入手する機会を得たので、その実験結果について報告する。またこの実験で得られた限られた条件下でのデータに基づくものであるが、土砂災害防止法で想定されている崩壊土砂による力に対する柔構造バリアネットの安全性についても検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置の構造

実験は2008年8月28日、スイス連邦セントレオナルドで実施された。実験を行った斜面は、高さ38.8 m、平均勾配51.7°, 斜面長50 mで、斜面上端部に設けられた流出装置から土砂を流下させ、斜面下端部に設置された柔構造バリアネットが土砂を捕捉する構造(図-1)となっている。

流出装置は、土砂をせき止めている板を倒すことで、土砂を流下させる仕組みである。柔構造バリアネット(図-2)は、高さ3.5 m、幅15 mのリングネットを支柱で支える構造となっている。支柱は、斜面脚部から約1.5 mの位置にほぼ垂直に、ヒンジ構造を介してアンカー

本報告の一部は、平成21年度砂防学会発表会において発表したものである。

*1 正会員 財団法人砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation (kikaku@sff.or.jp)

*2 正会員 柔構造物工法研究会 Member, Japan Flexible Barrier Association

*3 スイス連邦森林・雪・景観研究所/雪・雪崩研究部門 Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL)/WSL Institute for Snow and Avalanche Research

で地盤に定着されており、5 m 間隔で計 4 本立てられている。リングネットは、直径 300 mm の円状に束ねられた鋼線を連結させたもので、力がかかると鋼線が円状からひし形などに変形する。リングネットの上部と下部それぞれに接続され支柱と連結されたワイヤロープ（以下、サポートロープという）計 2 本と、4 本の支柱それぞれの上部から斜面に向かって接続されているワイヤロープ（以下、リテイニングロープという）計 4 本が接続されており、これらのロープはアンカーにより地盤に固定されている。各々のリテイニングロープとサポートロープには、リング状に加工した鋼管にワイヤロープを通し、ワイヤロープに一定以上の引張荷重がかかるとリング状の鋼管が変形することでアンカーに伝わる荷重を軽減できる仕組みとなった装置（以下、ブレーキリングという）が付いている。

2.2 実験条件

この実験斜面では、これまで 4 回の実物大実験が行われている。この結果を踏まえ、本実験では、これまでよりもエネルギー吸収量の小さいブレーキリングを用いた上、設置箇所も少なくすることで、ブレーキリングによる衝撃力吸収効果を小さくした。また満砂に近い、もしくは満砂状態における柔構造バリアネットの挙動を観測するため、初めての試みとして、途中排土することなく 6 回にわたり土砂を流下させ柔構造バリアネット内に土砂を堆積させた。

流下させた土砂は、概ねレキ（最大粒径は 60 mm）が 5 割、有機質土が 4 割、シルト 1 割で構成されており、密度 2.1 t/m^3 、含水比 11% であり、流下させた量は、1, 2 回目が 60 m^3 ずつ、3~6 回目がトラック 1 台分（約 10 m^3 ）ずつである。

観測に用いられた機器は、高速度カメラ 2 台、ビデオカメラ 3 台、荷重計 4 台である。カメラは、土砂が流下するときの状況を撮影し、速度や流動深の計測に資するため、斜面上部および斜面下部の斜面横と、斜面をほぼ正面から撮影できる位置に設置された。荷重計は、上部および下部サポートロープの左右端にそれぞれ 1 箇所ずつ設置され、土砂衝突時、リングネットが変形することでサポートロープにかかる引張荷重の計測を目的に、1, 2 回目の流下時は 1 kHz で、3~6 回目の流下時は 1 Hz で計測した。また柔構造バリアネット内における土砂の堆積状況の計測のため、支柱設置部分 4 箇所および支柱と支柱の間 3 箇所の合計 7 箇所において、土砂の堆積形状と支柱の傾きがスケールで計測されたほか、リテイニングロープ各 1 箇所と上下サポートロープ左右端に各 2 箇所にブレーキリングが設置されており、制動量が計測された。静的荷重と制動量の関係は、別途実施された試験により把握されている（図-3）。

3. 結果

1 回目の土砂流下後の土砂堆積状況を写真-1 に示す。

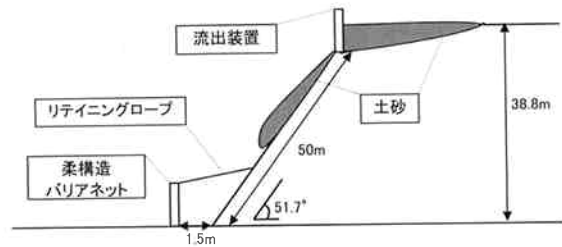


図-1 実験の概略図

Fig. 1 Outline drawing of experiment

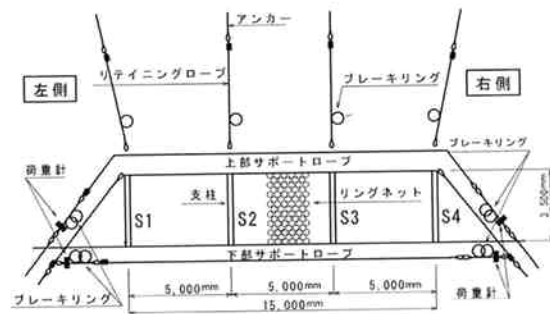


図-2 柔構造バリアネットの模式図

Fig. 2 Structural drawing of flexible protection barrier

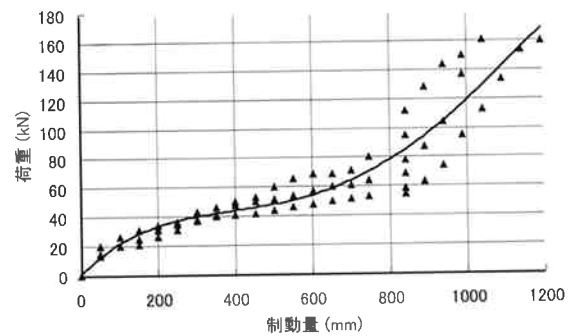


図-3 ブレーキリングにかかる荷重と制動量の関係

Fig. 3 Relation between static load and braking amount

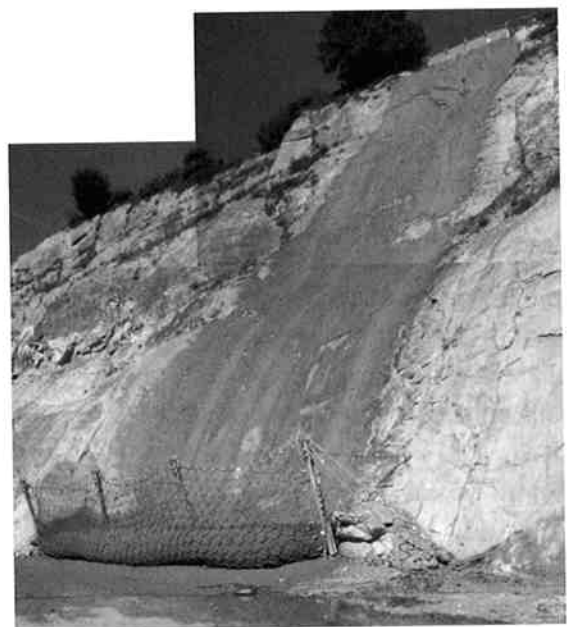


写真-1 土砂堆積状況

Photo 1 Soil captured by the flexible protection barrier.

柔構造バリアネットが捕捉した土砂量は、1回目 55 m³、2回目 50 m³、3～6回目平均 8.75 m³ ずつで、最終的に約 140 m³ となった。

また 1, 2 回目, 6 回目 (最終) の計 3 回の土砂流下後における柔構造バリアネットの支柱の傾き, 柔構造バリアネットに堆積した土砂の堆積高および堆積土砂表面部の斜面からの長さ (堆積表面長) が, 4 本の支柱およびそれらの支柱間における 7 箇所の断面において計測された。これら 7 箇所の平均値による断面図を図-4 に, 6 回目の土砂流下後のリングネットの状況を写真-2 に示す。土砂が堆積するに従ってリングネットが前面に押し出され, 最終的に堆積表面長にして 4.1～7.7 m (平均で 6.3 m) 押し出された。また土砂が堆積することによって生じた支柱の傾きとリングネットが押し出される方向へ変形したことにより, リングネットの高さは 1.6～2.0 m (平均で 1.8 m) 低くなった。リングネットを構成する円形のリングが細長く伸び, ほぼ線状になるというような部材の変形はあったが, 土砂の捕捉効果に重大な影響を及ぼすと考えられるような鋼線の切断, 支柱の破損などは見られなかった。

高速度カメラおよびビデオカメラによって撮影された映像より, 土砂がリングネットに到達するまで 4.5 秒かかったことから, 土砂の平均流下速度は 11 m/s となる。またリングネットに衝突する直前は, 砂ぼこりで非常に見えづらいが, 流動深は約 0.6 m 程度であった。

ブレーキリングの状況として, 2 回目の土砂流下後に撮影したサポートロープ左側のブレーキリングの状況を

写真-3 に示す。ブレーキリングにかかる荷重とその荷重に応じた制動量の関係 (図-3) より, 流下した土砂がリングネットに作用したことによって発生した引張荷重を, リテイニングロープと上下サポートロープに設置したブレーキリングにおいて計測された制動量より推定した。その結果, 2 回目での増加量が最大であり, また中央部に近いほど大きくなる場合が多かった (図-5)。中央部 2 箇所 (S2, S3) のリテイニングロープにつけたブレーキリングは, 伸びきった状態となった。

また上下サポートロープの左右端 4 箇所に設置した荷重計から得られた引張荷重を図-6 に示す。なお, 1 回目の実験では, 計測器のエラーにより, 上部サポートロープ左右端部におけるデータが計測できていなかった。図-6 より, 上下サポートロープに作用する引張荷重の特徴は次のようにまとめられる。

- ・ 最大で 64 kN (上部サポートロープ左側, 6 回目) と

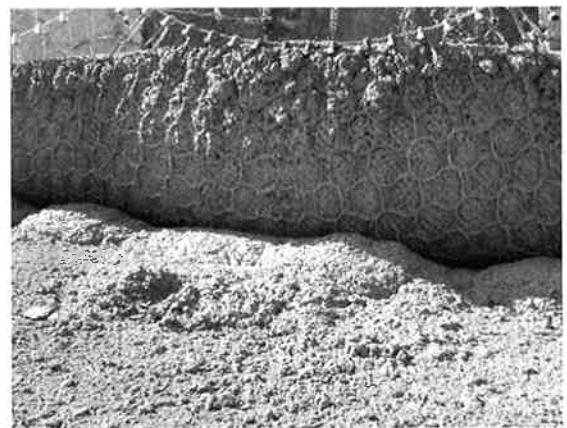


写真-2 リングネットの状況
Photo 2 Deformation of ring nets

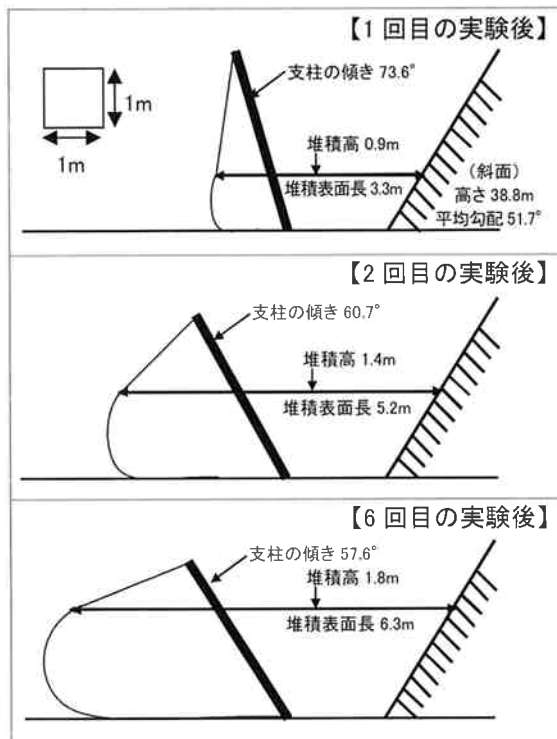


図-4 柔構造バリアネットの変形
Fig. 4 Deformation of flexible protection barrier



写真-3 ブレーキリングの状況
Photo 3 Deformation of brake rings

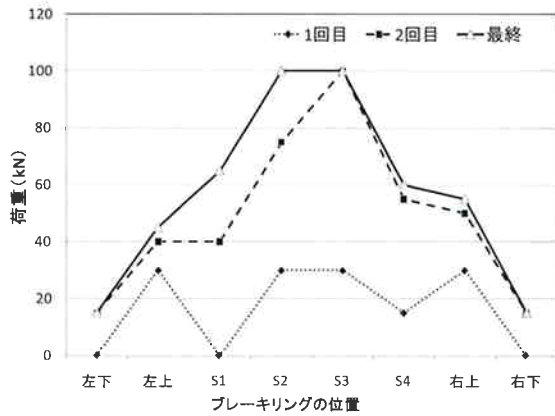


図-5 ブレーキリング制動量から推定される荷重
Fig. 5 Load estimated by braking amount

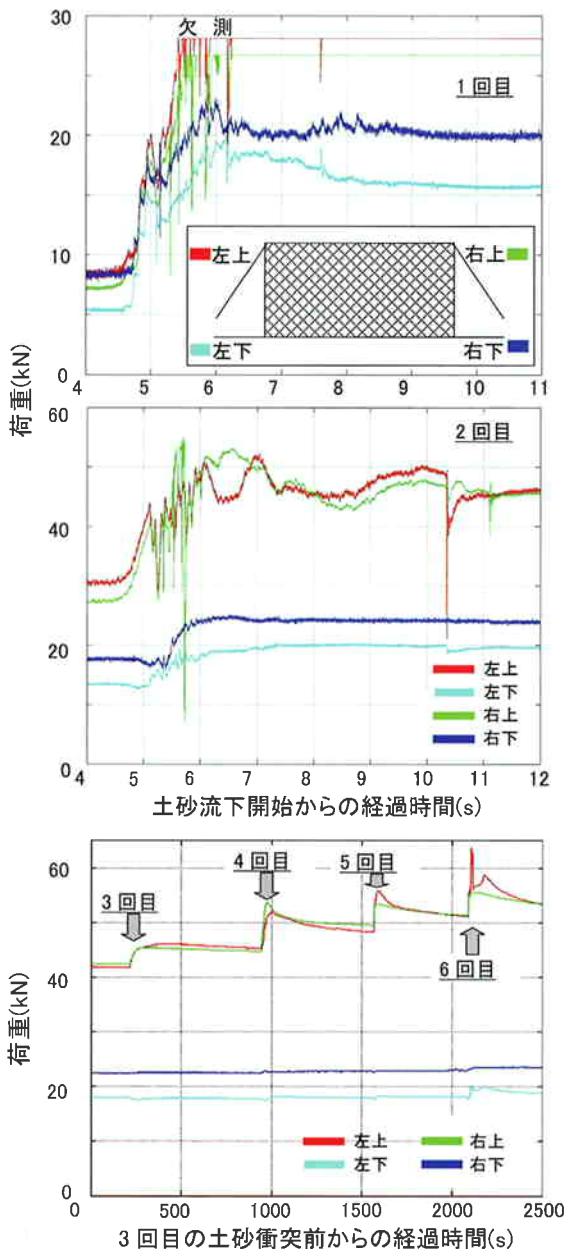


図-6 土砂衝突時にサポートロープで計測された荷重
Fig. 6 Loads measured by load cells at support ropes during sediment impact

なった。

- ・ 最大荷重と最終的な荷重の差は、0～10 kN となった。
- ・ 土砂衝突時の荷重増加量は、0～27.5 kN となった。
- ・ 最大荷重、最終的な荷重、増加量ともに上部サポートロープの方が、下部サポートロープよりも大きい。

4. 考察

柔構造バリアネットの崩壊土砂の捕捉能力について検討する。リングネットで捕捉した土砂量は、1回目および2回目の実験で、流下量（各 60 m³）に対し 55, 50 m³であったため、92, 83% となる。一部の土砂は斜面下端まで至らず、斜面上に残ったと考えられることから、実際に衝突した土砂に対する捕捉率はこれ以上になる。

部材の変形については、満砂するまで土砂を流下させても土砂を捕捉する機能に影響することはない、破損も見られなかった。またリングネットが前方へ押し出されるため、柔構造バリアネットと保全対象との間の距離によっては、保全対象に力が伝わることも考えられる。堆積土砂の押し出しは、本実験において斜面の下端から平均で 5.2 m となったが、リングネットのふくらみのため、部分的にはこれよりも押し出し量が大きくなる地点もある。

また本実験では、単位幅あたり約 9 m² の土砂（堆積土量 140 m³、リングネット幅 15 m より）が堆積したこととなるが、これは単位幅あたり崩壊土量（全国地すべりがけ崩れ対策協議会、2004）からみて斜面高 30 m 未満の斜面をカバーできることとなる。これは、既往の研究結果（武蔵ら、2009）で示されている既往がけ崩れ災害の約 9 割をカバーできる斜面高であるが、これ以上の斜面高であれば、より支柱高を高くし、堆積容量を増やす必要がある。

土砂災害防止法に基づく国土交通省告示第 332 号（平成 13 年 3 月 28 日）では、「急傾斜地の崩壊に伴う土石等の移動により建築物の地上部分に作用すると想定される力の大きさ」（以下、土石等の移動による力という）を、土石等の密度と、斜面の形状（斜面の高さや勾配）や土質定数から計算される崩土の流下速度を用いて算出する式（以下、告示式という）が示されている。土砂災害防止法の基礎調査等で一般的に用いられている土質定数を使うと、告示式から、崩土の流下速度は、斜面高さ 5～100 m、斜面勾配 30～60 度の斜面において、斜面下端地点で 4 m/s～10 m/s の範囲となる。また実際に待ち受け擁壁が被災した事例で、告示式を用い土石等の移動による力が算出されている（全国地すべりがけ崩れ対策協議会、2004）。この事例について土石等の密度を 1.8 t/m³ として流下速度を試算すると、転倒した 5 事例で平均 9.7 m/s、転倒していない 15 事例では平均 4.4 m/s となった。告示式では、流下中の土石等の密度が個々の斜面ごとにそれほど変わらないと仮定した場合、土石等の移

動による力は、流下速度が増すほど大きくなる。同様に考えた場合、本実験で得られた平均の流下速度は 11 m/s であり、前述した流下速度を上回っていることから、斜面高さ 5~100 m、斜面勾配 30~60 度の斜面での崩壊や、待ち受け擁壁が被災した事例での崩壊における土石等の移動の力に対し、柔構造バリアネットは土砂を捕捉する機能を保つことができるといえる。

次に図-5 から、プレーキリングに作用したと推定される荷重について、1 回目と 2 回目と同じように土砂を流下させたにも関わらず、8 箇所のプレーキリング中、左上と右上の 2 箇所を除く 6 箇所で引張荷重の増加量が 1 回目よりも 2 回目で大きくなっており、平均増加量も、1 回目 16.7 kN に対し、2 回目が 31.9 kN と、2 回目の方が大きくなった。また 1 回目では 0~30 kN であった荷重の分布が、2 回目では 15~100 kN となっており、左右端よりも中央部での増加量が大きい。これは、1 回目の実験時のようにリングネットが十分変形できるときは、受けた力をリングネットにより吸収・分散できるが、2 回目の実験などのようにリングネットの変形が十分にできない場合は、吸収・分散する効果が落ちてくるためと考えられる。本実験で用いた柔構造バリアネットは、複数回の土砂捕捉を通じリングネットが変形していくことで、崩壊土砂による力を吸収・分散する効果は低下していったものの、満砂となるまで土砂を捕捉することが可能であったことを確認できた。

5. まとめ

本実験では実斜面の下部に柔構造バリアネットを設置し、満砂するまで複数回土砂を捕捉させたが、最後まで柔構造バリアネットが破壊されることはなく、流下土砂を捕捉することができた。高速ビデオカメラから読み取

った流下速度によると、本実験で用いた柔構造バリアネットは、最大粒径 60 mm 程度の土砂を対象とする場合、斜面高さ 5~100 m、斜面勾配 30~60 度の斜面で算出される土砂災害防止法上の土石等の移動による力に対し、耐えうるといえる。また土砂の捕捉について、コンクリート擁壁の場合は、擁壁の背面が土砂を捕捉する空間に該当するが、柔構造バリアネットは、リングネットが変形する範囲であるリングネット前面がその空間に該当するため、保全対象に土砂の影響が及ばないように留意しなければならない。

引用文献

- Bugnion, L., Denk, M., Shimojo, K., Roth, A., Volkwen, A. (2008): Full-scale experiments on shallow landslides in combination with flexible protection barriers, Proceedings of the first world landslide forum, parallel session, p.99-102
- 武蔵由育・水山高久 (2009): がけ崩れ災害における崩壊土砂の運動の実態, 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 61, No. 5, p. 31-36
- Ochiai, T., Y. Okada, G. Furuya, Y. Okura, T. Matsui, T. Sammori, T. Terajima, K. Sassa (2004): A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall, Landslides, Vol. 1, No. 3, p. 211-219
- 内田太郎・曾我部匡敏・寺田秀樹・近藤浩一・小山内信智・吉川修一・亀田信康 (2006): 衝突時に崩壊土砂が構造物に作用する荷重に関する実験, 構造物の変位が荷重に及ぼす影響, 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 59, No. 1, p. 3-12
- 八木則男・矢田部龍一・榎明潔 (1985): 降雨時の斜面崩壊予知に関する室内及び現地実験, 地すべり, Vol. 22, No. 2, p. 1-7
- 全国地すべりがけ崩れ対策協議会 (2004): 崩壊土砂による衝撃力と崩壊土砂量を考慮した待ち受け擁壁の設計計算, 155 pp.

(Received 6 September 2010 ;Accepted 25 January 2011)