

補強土技術を応用した斜面災害対策工の設計法と施工例

前田工織(株) ○福田 育広
前田工織(株) 伊藤 修二 吉田 眞輝
(株)プロテックエンジニアリング 岸 大二郎
岐阜大学工学部 正会員 馬 貴臣
岐阜大学工学部 正会員 辻 慎一郎

1. はじめに

国土の約7割を山間地で占めるわが国では、落石や土砂崩れなどの斜面災害が毎年いたるところで発生しており、時には痛ましい事故が生じている。それら災害を予防・防護するため、古くからさまざまな工法で斜面对策がなされている。

従来の斜面对策工法は大規模なエネルギーをもつ災害形態に抵抗できるように、重量があり強度の高いコンクリート製や鉄部材を用いた強固な構造物が一般的であった。しかし近年ではコスト削減や環境に調和した対策が求められ、繊維素材を用いた斜面安定工や補強土を用いた防護工が使用されている。

本文では土を使い環境および経済性に配慮できるとともに、高い衝撃吸収性能をもつ工法として注目されている補強土防護擁壁工法の設計法と・施工例を紹介する。

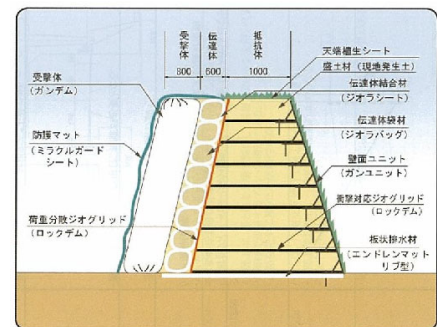
2. 落石対策用補強土防護擁壁 ジオロックウォール

(1) 構造概念

ジオロックウォール（GRW）工法は、衝撃対応ジオグリッドを配置した補強土擁壁と、落石規模に応じて設置する受撃体および伝達体というジオテキスタイル性袋材に中詰材（主に単粒度砕石や砂）を充填した緩衝層の効果により、幅広い落石エネルギーに対して適用できる工法である¹⁾。（図－1 参照）タイプは3つに分類され、補強土（抵抗体）のみのⅠ型、受撃体＋抵抗体のⅡ型、受撃体＋伝達体＋抵抗体のⅢ型とある。各最大対応エネルギーを表－1に示す。

従来の擁壁工と異なり土構造物である補強土の柔軟性と緩衝体の効果により高い衝撃吸収性能を持ち、100kJ程度の小規模落石から最大5000kJの大規模落石にまで対応できる工法である。

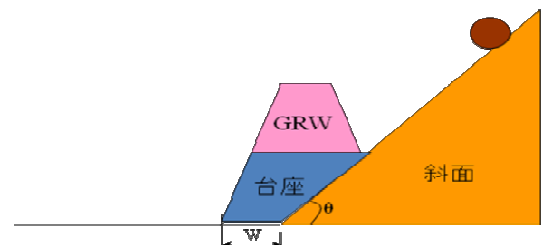
これらの落石エネルギーに対する費用対効果が高く、特に大規模落石に対して非常に有効的な工法である。しかしその構造から2.5～5.0m程度の設置幅を必要とし、急峻で斜面下に有効設置幅がない場合は構築不可となる場合がある。表－1に標準的な適用範囲を明記する。ただし、斜面勾配が45°以下程度であれば、図－2に示すように補強土によって嵩上げすることで、構築可能となり、現地状況と費用対効果を検証することで適用範囲を広げることが可能となる。



図－1. ジオロックウォール標準図（Ⅲ型）

表－1. タイプ別設置条件

タイプ	対応E(kJ)	必要設置幅(m)	斜面勾配(°)
Ⅰ型	～200kJ	2.5～3.0m	45°程度
Ⅱ型	～1000kJ	3.5～4.0m	
Ⅲ型	～5000kJ	4.5～5.5m	



図－2. 嵩上げによる設置のイメージ図

(2) 設計概念

GRW 工法は、1998 年富山県利賀村で実施した実物大実証実験をはじめ、2003～2004 年にかけて旧日本道路公団と共同で実施したモデル試験などの結果を解析し設計法を確立しており²⁾、その後も様々な実証実験を行いその性能を確認している工法である。(写真－1、2 参照)

GRW 工法の設計は上記実験の解析結果を考慮した、衝撃荷重を等価な静的荷重に置換えて、すべりの安定計算(極限均衡法)により照査を行う。

落石対策工法の検討は、落石エネルギーに対する照査と、落石衝撃力を静的荷重に置き換えて照査するケースがある。(前者は落石防護柵、後者はロックシェッドなど) エネルギー照査は、落石エネルギーに対して構造物の変形によりエネルギー吸収できることを確認する合理的な方法である。GRW 工法も土構造物の柔軟性で落石エネルギーを吸収・分散する構造であるが、土とジオテキスタイルを用いたハイブリッドな工法であるため衝撃吸収機構が非常に複雑であり、現段階では定量的なエネルギー照査ができない。そのため本工法では力の照査での検討を行っている。

また GRW は、衝撃吸収性能が高く基礎にほとんど衝撃力が伝達しないため、外的な照査は行わない。



写真－1. 実物大実証実験



写真－2. モデル実験

(3) 設計手法

○落石衝撃力の推定

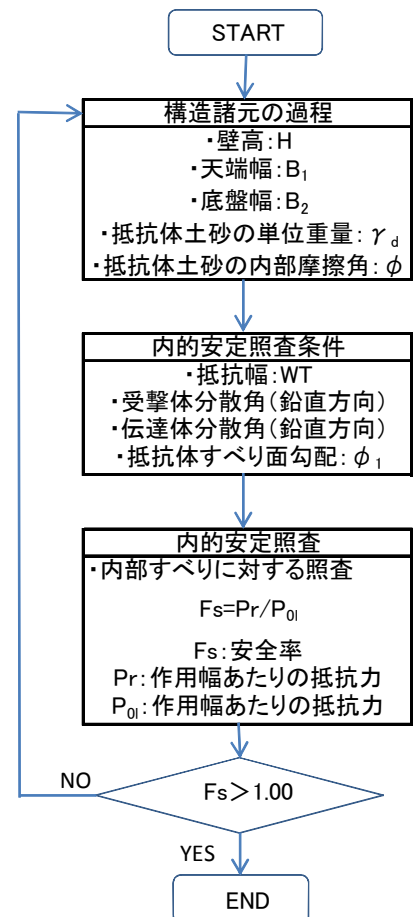
図－3 に設計フローを示す。先に明記したように本工法は力の照査を行うために落石による衝撃力を推定する必要がある。本検討では、落石対策工の検討に一般的に用いられる「衝撃便覧の推定式」³⁾ から導く。これを設計外力として安定検討を行う。

$$P = 2.108 \times mg^{2/3} \times \lambda^{2/5} \times H^{3/5} \cdots (1)$$

ここで H は斜面の状態を考慮した換算落下高さを用いる。またこの式では落石の衝突現象を弾性体間の衝突現象とみなしているためラーメの定数(λ)の選定が重要となる。本工法では上述した実験より 530kN/m³ と設定している。

○構造諸元の過程

GRW の検討では、上記の落石衝撃力に対して破壊が起こらない形状を選定する。タイプの選定は表－1 の対応エネルギーを目安に、式(1)により算出された落石衝撃力 P に抵抗できる壁高 H、天端幅 B₁、底盤幅 B₂ を設定し抵抗体の断面形状を決定する。抵抗体の壁面勾配は受撃面(落石衝突側)を 1:0.2、谷側は 1:0.3 を標準とする。これは受撃面に対しては落石の駆け上りを防止するため、急勾配にしており、谷側については補強土の植生などを考慮し、一般的に多く採用されている勾配としている。



図－3. 設計フロー図

○内的安定照査

本工法は落石規模によりタイプが分別されているが、ここでは一連の設計手法の紹介として GRWIII 型を例に用いる。この中で使用される受撃体や伝達体の効果である分散角や、有効幅はモデル実験により確認された数値⁴⁾であり、これらを GRW の設計検討での定数として用いる。衝撃力の分散モデルを図-4、5 に明示する。

① 受撃体による衝撃吸収

受撃体は最初に落石エネルギーを受ける部位であり縦方向に衝撃力を分散する。分散角は上下に 45° となる。

② 伝達体による衝撃分散

伝達体は衝撃力を延長方向に広く分散させる役割があり、抵抗体の有効抵抗幅に影響して伝達体の幅 $\times 4$ 倍で片側分散する。すなわち落石衝突位置を中心として伝達体幅の 8 倍 + 落石径分が抵抗体の有効幅となる。伝達体の設置されない I および II 型については抵抗体の壁高さ = 抵抗体の有効幅とする。

③ 抵抗体による衝撃吸収

受撃体と伝達体の効果により減衰された衝撃力と抵抗体のすべり抵抗力のつり合いを比較する(図-6)。その結果抵抗体のすべり抵抗力: Pr /衝撃力によるすべり力: $Pol = 1.0$ 以上で安定とする。

抵抗体内のすべり崩壊線は、受撃体のない I 型では 23° 受撃体つきの II、III 型では 28° で発生するものとする。これは先に明記したモデル実験により確認された崩壊形態で実測値を採用している。すべり崩壊線より上の抵抗体重量とジオグリッドの効果による疑似粘着力が有効幅 L に作用し、落石衝撃力に対するすべり抵抗力となる。

(4) 適用事例 ～富士山落石災害～

2009 年 7 月に発生した落石災害の対策工としてジオロックウォールが採用され、昨年 11 月末より施工が開始された。設計落石エネルギーは 210kJ ほどで、II 型が採用された。冬季入場禁止期間のため作業が休止されていたが、5 月より作業再開されている。

災害発生場所は写真-3 に示すように、当初斜面上に高エネルギー柵を設置する案が有力であった。しかし観光地であることから環境に配慮できる工法として既存防護柵下の駐車場の一部を使用して本工法で対応することとなった。



写真-4. 施工中 (正面側)



写真-5. 施工中 (ポケット部)

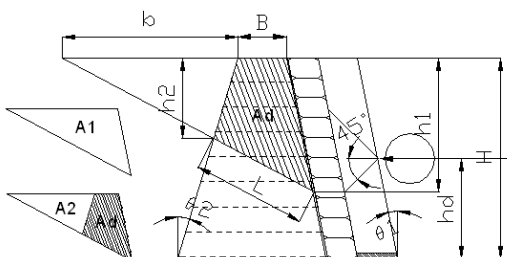


図-4. 分散モデル (抵抗体)

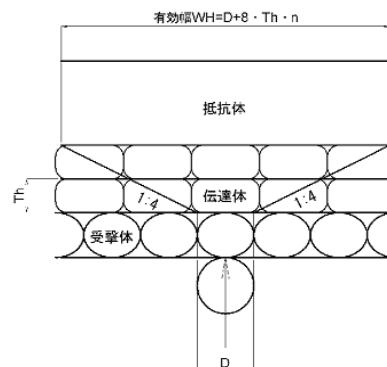


図-4. 分散モデル (受撃体・抵抗体)

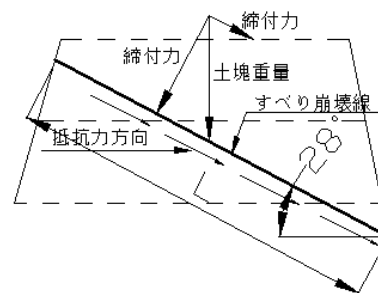


図-6. すべり面での抵抗力



写真-3. 落石発生斜面

3. 急傾斜対策用補強土防護擁壁 QK ウォール

(1) 基本概念

QK ウォール (QKW) 工法とは急傾斜地における表層崩壊（がけ崩れ）土砂の衝撃力に対応する擁壁工法である。QK の名前の由来は急傾（キュー・ケイ）斜対策で使用する工法という意味である。本工法開発の背景としては平成 13 年に制定された「土砂災害防止法」（以後新法と明記）の条文⁵⁾ から近年土砂の移動の力を考慮した設計が一般的になってきていることにある。

従来型の擁壁工の設計では、図-7 に明示するように堆積土や裏込め土の土圧程度を設計外力としていたが、新法による土砂衝撃力を考慮する設計法により、図-8 に明示するように断面形状が従来の形状よりも大きな構造物になる傾向が出てきた。そのため極力安価で抵抗力が大きくなる形状が検討されてきた。

QKW はその衝撃吸収性能により、土砂衝撃力を考慮した状態で小さな断面でコストに配慮できる工法となっている。

(2) 構造概念

QKW 工法は、土を袋体で拘束し、強度を向上させる「ソルパックの理論」⁶⁾ を応用したもので、衝撃対応ジオグリッドで盛土材を巻き込み敷設をすることで急峻な斜面下でも、少ない設置場所で構築が可能となる補強土防護擁壁である。図-9 に構造概念のイメージを示す。基本的にはもたれ形状となり、地山に擦りつけた擁壁の天端で土砂衝撃力を受け止める構造となる。QKW は図-9 に示すように、上載荷重が大きくなることでジオグリッドに張力が発生し盛土材の拘束力が向上する。よってジオグリッドの許容荷重以内であれば極力上載荷重をかけて張力を発生させることで内部強度は増強する。この特徴を利用し、QKW はもたれ上に構築した QKW の天端に土砂を衝突させその安定を図る構造としている。

また新法では、斜面の崩壊高さにより崩土の推定土砂量が定められており⁷⁾、それを捕捉できるポケット量を確保することとなっている。天端に取り付ける防護柵は、基礎を土中埋め込みとしているが崩落後の土砂量を堆積できるだけのポケットとして利用できるように、QKW 背面に設けたコンクリートアンカーから引っ張りを取り転倒防止処置を行っている。（図-10）

(3) 設計手法

① 捕捉土量の確保

図-11 に QKW の設計フローを示す。QKW は耐衝撃力が高いため土砂の衝撃力には安定する場合が多い。しかし堆積土砂量の確保ができずに適用不可となる場合があるため、QKW では、まず捕捉土砂量を確保できる形状を選定する。捕捉土量は経験上斜面高さより推定されており各文献に明記されている⁷⁾ ものを参考値として使用する。

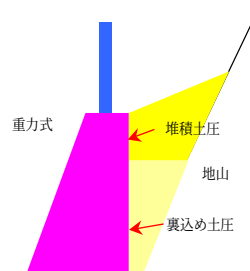


図-7. 従来設計外力

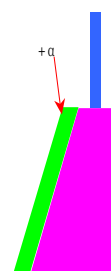


図-8. 安定形状案

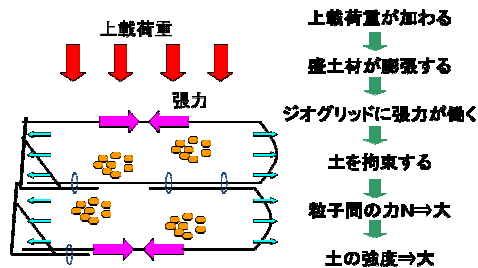


図-9. 構造概念図

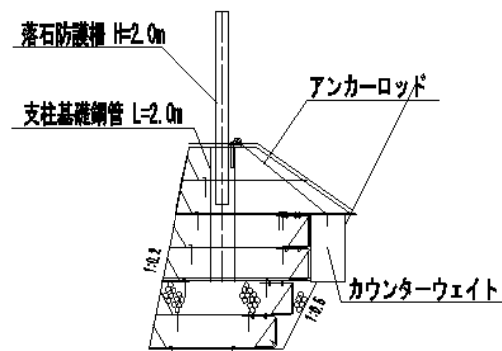


図-10. 一般構造図

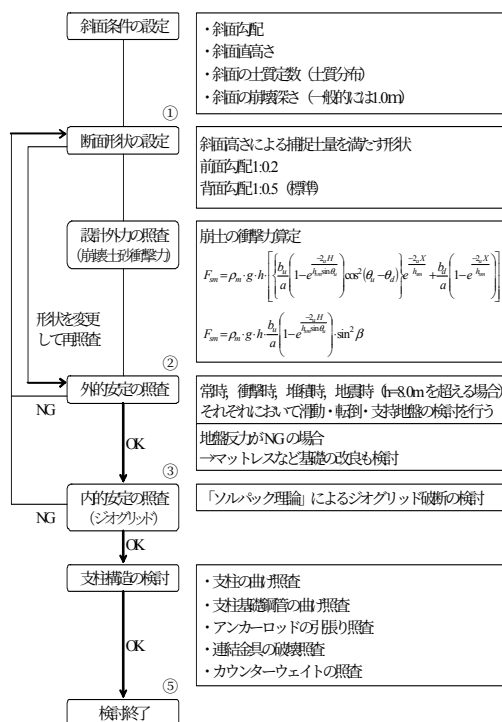


図-11. 設計フロー図

②外的安定の照査

常時（自立安定時）、土砂衝突時、土砂堆積時それぞれの状態での設計外力を考慮し安定検討を行っている。それぞれの状態を図－11,12 に明示する。

土砂衝突時は崩土の衝撃速度の算出式³⁾式（2）から算出される衝突時の移動の力 F_{sm} を設計外力とする。

$$F_{sm} = \rho_m \cdot g \cdot h \cdot \frac{b_u}{a} \left(1 - e^{\frac{-2_a H}{h_{sm} \sin \theta}} \right) \cdot \sin^2 \beta \cdots (2)$$

移動の力は天端スロープ部に直接作用するため、スロープ角度 θ で鉛直力と水平力に分解して用いる。

堆積時はポケット部に崩土が堆積した状態での安定を検討する。必要土量が堆積した状態で、地山を境界面として試行くさびによる土圧を天端スロープ部に作用させる。衝撃時同様、スロープ角度 θ で鉛直力と水平力に分解して設計外力として用いる。

③ 地山土圧の考え方

QKW は、表層崩壊における土砂の衝撃力とその土砂を堆積させた状態での安定を検討しているが、地山の状態により地山の土圧を考慮する場合がある。その場合は上記設計外力に加え、土圧の影響を考慮して検討する。

土圧は、試行くさび法や円弧すべり法などで考えるが、地山の状態により崩壊形態が異なるため、設計時によく検討する必要がある。

QKW は特に衝撃に対しての抵抗力が高いため、スリムな形状で設計できる。そのため抑え盛土的な効果は薄い。土圧が大きい場合、安定を確保するため大きな断面となる場合があるので、状況によっては斜面補強工と併用することが望ましい。（図－14）

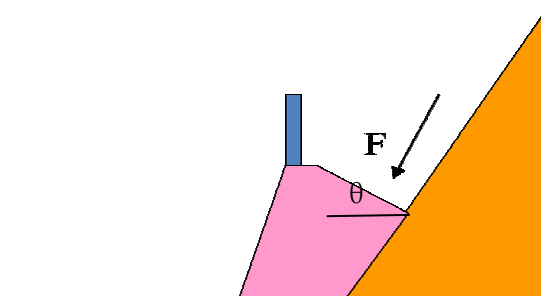
④内的安定の検討

内的安定は外的安定時の設計外力を考慮して、ジオグリッドの破断について検証する。

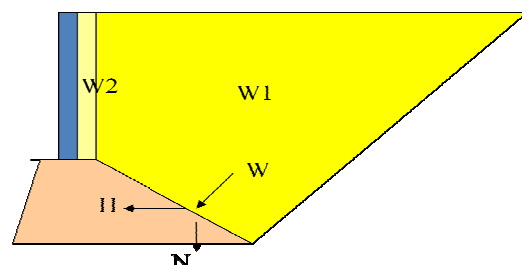
設計理念は先に明記した「ソルパック理論」であり外的安定時の上載荷重が作用した特にジオグリッドに張力 T が働き盛土材を拘束する。上載荷重が大きくジオグリッドの許容範囲を超える場合は再検討する。（図－15 参照）

⑤フェンス部材の検討

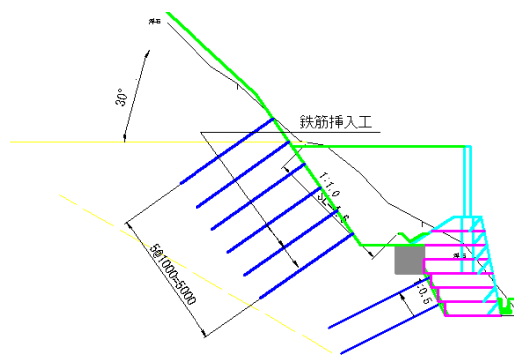
新法によるポケット量の確保は落石防護柵高さを利用していることが多く、本工法も防護柵を利用してポケットを確保している。よってポケット部の堆積土圧が柵に作用した時の柵の安定を検討する必要がある。防護柵は土中埋め込みとなるが、柵前面の土被りが少ないため、土塊抵抗力だけでは安定しない。QKW 背面に現場打ちによるコンクリートアンカーを設け、これと柵を連結することにより抵抗力としている。図－16 にフェンス構造を示す。ここでは各部材の細かな構造検討は省略する。



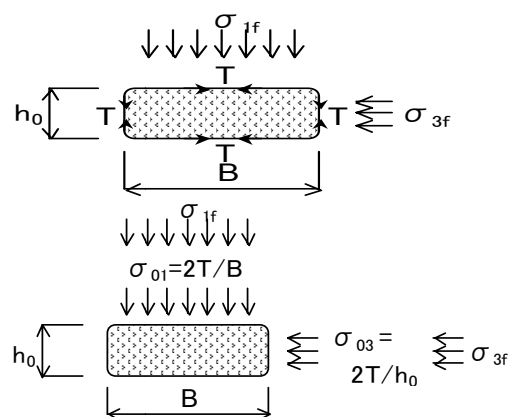
図－12. 衝突時概要図



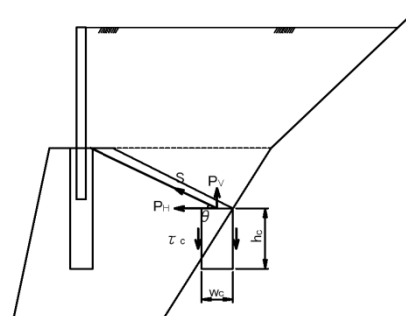
図－13. 堆積時概要図



図－14. 鉄筋挿入工を併用した設計断面例



図－15. ソルパック理論模式図



図－16. フェンス構造図

(4) 適用事例

QKW の各施工事例を紹介する。

① 民家背面に設置した例

民家からほとんど離隔がないため、QKW 構築箇所をそのまま作業道路として利用し、民家境界にほとんど立ち入ることなく構築した。また、植生を行い擁壁構造の圧迫感を軽減した。



写真-6. 事例①

② JR 路線わきで実施した例

基礎地盤に衝撃力による影響を少なくする特徴を利用して JR 線路脇の擁壁として使用した事例。列車の通行の妨げにならないよう植生を行わず、耐候性シートにより植生を行わないメンテナンスフリーとした。また、耐候性シートはグリーンを基調としており、視覚的に緑化させたように見せている。



写真-7. 事例②

4. おわりに

今回紹介した対策工は、主に大きな衝撃力が作用する場所では有効な構造物である。衝撃力による外力の小さな条件下では従来の対策工法が有利となる場合もある。斜面形状や災害形態は多種にわたるため、このような新工法と従来工法の良いところを引き出し使い分けることで、今後様々な斜面災害に対する提案幅を広げることに役立てたいと考える。

参考文献

- 1) 補強土防護擁壁・ジオロックウォール工法協会：ジオロックウォール設計・施工要領（落石防護ダイク型）
- 2) 補強土防護擁壁協会：落石防護補強土擁壁工（ジオロックウォールダイク型）設計の手引き（案）
- 3) （社）日本道路協会：落石対策便覧
- 4) （旧）日本道路公団関西支社大阪技術事務所：落石防護補強土擁壁工法に関する技術検討報告書
- 5) 土砂災害警戒区域における土砂災害防止対策の推進に関する法律 国土交通省告示第三百三十二号
- 6) 松岡：敵を味方につける地盤の補強法—性能表示された土のう（ソルパック）の活用—ジオシンセティックス論文集第 19 巻（2004 年）
- 7) （財）砂防フロンティア整備推進機構：土砂災害防止に関する基礎調査の手引き