

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

平成29年3月

国立研究開発法人土木研究所
国立大学法人室蘭工業大学
神鋼建材工業株式会社
東京製綱株式会社
日本サミコン株式会社
株式会社ビーセーフ
一般財団法人土木研究センター
株式会社シビル
株式会社第一コンサルタンツ
日本プロテクト株式会社
株式会社アイビック
国土防災技術株式会社
東亜グラウト工業株式会社
東興ジオテック株式会社
日特建設株式会社

Copyright © (2017) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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

国立研究開発法人土木研究所

寒地土木研究所

寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム

上席研究員

西 弘明

総括主任研究員

今野 久志

元研究員

山口 悟^{※1}

研究員

荒木 恒也

つくば中央研究所

地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム

上席研究員

佐々木哲也

主任研究員

加藤 俊二

国立大学法人室蘭工業大学大学院

工学研究科くらし環境系領域社会基盤ユニット

准教授

小室 雅人

講師

栗橋 祐介

神鋼建材工業株式会社 製造本部 取締役副本部長兼技術部長

仲岡 重治

防災事業総括部

担当次長

郷戸 健二

製造本部

技術部設計室担当課長

掃部 孝博

東京製綱株式会社 エンジニアリング事業部 技術開発部 部長

高森 潔

マネージャー

橋口 寛史

日本サミコン株式会社 技術部

部長

渡部 敏

次長

佐藤 彰

課長

高野 芳弘

所長

中村佐智夫

研究所

次長

佐竹比呂志

札幌支店

会長

吉田 博

株式会社ビーセーフ

代表取締役社長

松嶋 秀士

開発設計部長

小島 明德

一般財団法人土木研究センター

常務理事

苗村 正三^{※2}

技術研究所 地盤・施工研究部

部長

了戒 公利

部付部長

石塚与志雄

次長

堀内 晴生^{※3}

土橋 聖賢

株式会社シビル	代表取締役社長	窪田 潤平
	技術顧問	勘田 益男
	創造技術部 次長	近藤 智裕
	創造技術部 課長	中村健太郎
落石対策技術研究会		
株式会社第一コンサルタンツ	代表取締役社長	右城 猛
日本プロテクト株式会社	代表取締役社長	加賀山 肇
	テクニカルリーダー	有木 剛
	テクニカルチーフ	高市 圭三
柔構造物工法研究会		
株式会社アイビック 秋田支店	技術営業部長	北嶋 智哉
	元支店長	市川 寿人
国土防災技術株式会社	営業本部 営業課長	杉本 知広
東亜グラウト工業株式会社	技術顧問	村石 尚
	斜面防災グループ 取締役・技術開発室長	木村 佳嗣
	技術開発部長	梅沢 広幸
東興ジオテック株式会社 技術本部 技術管理部		
	兼 環境技術部（法面）担当課長	濱田 誠
日特建設株式会社	技術開発第一部長	三上 登

- ※ 1 : 現 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部道路計画課
- ※ 2 : 現 一般財団法人土木研究センター 参与
- ※ 3 : 現 一般財団法人土木研究センター 主幹研究員

要旨

近年、高エネルギー吸収型といわれるような様々な落石防護工（落石防護網・柵）が開発され、採用事例も増えてきているが、我が国においてはそれらの性能評価に関する統一的な指標がないのが現状である。本報告書では、「本編」、「実験による性能照査手法編」、「資料編」の3部構成としており、本編では、従来型落石防護工を含め、近年採用事例が増加している高エネルギー吸収型落石防護工の設計法の現状と課題点の整理を行うとともに、それらに関して実施された実験や解析事例の収集整理を行った。さらに高エネルギー吸収型落石防護工の海外における性能照査基準について調査取りまとめを行った。また、落石防護工の落石捕捉事例や損傷事例等について取りまとめた。実験による性能照査手法編では、落石防護工として求められる機能と性能を示すとともに、高エネルギー吸収型落石防護網・柵に対して統一的な実験的性能照査手法を示した。さらに現場適用にあたっての留意事項の一例を整理した。資料編では、設計上残された課題点の解決のために参考となるような検討事例について取りまとめを行っている。

キーワード：高エネルギー吸収型落石防護工、落石防護網、落石防護柵、実験的性能照査手法

実験による性能照査手法編

1. 概要

近年、高エネルギー吸収型といわれるような様々な落石防護工（落石防護網・柵）が開発され、採用事例も増えてきている。これら落石防護工の性能（安全性）は、道路交通や人命に直接的に関わるものであることから、想定される落石作用に対して要求される性能が確保されていなければならない。しかしながら、我が国においてはそれらの性能照査手法に関する統一的な指標がないことから、海外等の事例を参考に開発者独自の実験や解析に委ねられているのが現状である。このことから、落石防護工として求められる性能を明らかにするとともに、統一的な性能照査手法を確立することが求められている。

上記背景より、「実験による性能照査手法編」では、落石防護工として求められる性能を示すとともに、高エネルギー吸収型落石防護網・柵に対して各種工法を横並びで性能比較ができるように標準的な実験的性能照査手法を示した。

また、各種工法の適用現場における設計落石条件や設置条件等が実験条件と異なることも想定される。このような条件の相違に対しても各種工法が要求性能を確保できることを明らかにする必要があることから現場適用にあたっての留意事項の一例を整理した。

2. 求められる性能と限界状態

落石防護網・柵として求められる性能としては以下のことがあげられる。

- ① 想定される落石を確実に捕捉できること（捕捉性能）。
- ② 落石や土砂が堆積したときの撤去、破損したときの部材の取り替え、補修が容易なこと（維持管理性能）。
- ③ 耐久性に優れること（耐久性能）。

上記に示した落石防護網・柵として求められる3つの性能のうち、実験による性能照査手法編の実験手法により確認する性能は捕捉性能であり、性能照査実験終了後には、下記に示すような土工指針等の考え方に従ってあらかじめ設定した各部材の性能マトリックスに照らして、各構成部材が照査エネルギーに対してどの性能水準にあるかを整理する。

落石防護網・柵を構成する部材の性能1に対する限界状態は、落石による変形・損傷が軽微なものに留まり構成部材の交換が必要でない限界の状態を設定すればよく、一般的には部材の力学特性が弾性域を超えない限界の状態を設定すればよい。

落石防護網・柵を構成する部材の性能2に対する限界状態は、一般的には塑性化等を許容する部材のみ塑性変形等が生じ、その塑性変形等の修復を容易に行い得る限界の状態として設定すればよい。この際、部材の交換等を含めた損傷に対する修復方法を考慮して設定する必要がある。

落石防護網・柵を構成する部材の性能3に対する限界状態は、一般的には部材の耐力が大きく低下し始める限界の状態として設定すればよいが、設置位置によっては部分的な破断を許容する場合もある。

落石防護網および落石防護柵の性能マトリックスの一例を表2.1および表2.2に示す。

表 2.1 落石防護網の主要構成部材毎の一般的な限界状態 (例)

性能水準	阻止面	支柱	ワイヤロープ ^{*2}	支柱基礎、アンカー
性能 1	損傷が生じない、もしくは損傷が軽微で部材交換を要しない限界の状態	力学特性が弾性域を超えない限界の状態 ^{*1}	力学特性が弾性域を超えない限界の状態	力学特性が弾性域を超えることなく、支柱基礎またはアンカーを支持する地盤の力学特性に大きな変化が生じない限界の状態
性能 2	損傷の修復を容易に行いうる限界の状態	力学特性が弾性域を超えない限界の状態 ^{*1}	損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ^{*3}	副次的な塑性化に留まる限界の状態

*1：落石が支柱を直撃したときに損傷や変形が生じるのはやむを得ないが、支柱の損傷が全体系の崩壊等につながらないとともに、比較的容易に修復が可能でなければならない。

支柱基礎がヒンジの場合には、有意な傾斜を生じないこと。

*2：緩衝装置を装着した防護網においては、各性能水準に対して各緩衝装置に設定されている変形量・移動量以内であること。

*3：例えば、ワイヤロープの締め直し等で復旧が可能な状態であること。

表 2.2 落石防護柵の主要構成部材毎の一般的な限界状態 (例)

性能水準	阻止面	支柱	ワイヤロープ ^{*2}	基礎
性能 1	損傷が生じない、もしくは損傷が軽微で部材交換を要しない限界の状態	力学特性が弾性域を超えない、もしくは有意な傾斜を生じない限界の状態 ^{*1}	力学特性が弾性域を超えない限界の状態	力学特性が弾性域を超えることなく、基礎を支持する地盤の力学特性に大きな変化が生じない限界の状態
性能 2	損傷の修復を容易に行いうる限界の状態	力学特性が弾性域を超えない限界の状態 ^{*1} ^{*4} 損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ^{*1} ^{*3}	力学特性が弾性域を超えない限界の状態 ^{*3} 損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ^{*4}	副次的な塑性化に留まる限界の状態

*1：落石が支柱を直撃したときに損傷や変形が生じるのはやむを得ないが、支柱の損傷が落石防護柵全体系の崩壊等につながらないとともに、比較的容易に修復が可能でなければならない。また、支柱基部がヒンジの場合には、有意な傾斜を生じないこと。

*2：摩擦系の緩衝装置を装着した防護柵においては、性能 2 に対して許容すべり量以下であること。

*3：支柱に塑性化又は主たるエネルギー吸収を考慮する場合

*4：ワイヤロープに塑性化又は主たるエネルギー吸収を考慮する場合

3. 実験による性能照査手法

本章では、前章2.①の落石の捕捉性能を照査するための標準的な実験的性能照査手法を示す。なお、3.2 供試体寸法以外の項目に関しては、落石防護網、落石防護柵に対して共通事項である。

3.1 重錘衝突方法（実験場）

実験方法（実験場）は下記に示すように各種あるが、重錘の衝突は基本的にはどの実験方法で実施してもよい。

ただし、重錘の衝突速度、入射角が所定の精度で計測されること。

（解説）

重錘衝突方法としては、斜面滑走式（レール式）、斜面転落式、振り子式、水平滑走式（ワイヤ巻き取り装置）、鉛直落下式などがある。実験方法によって重錘衝突位置の衝突精度に違いがある。斜面滑走式（レール式）、水平滑走式（ワイヤ巻き取り装置）、鉛直落下式などは比較的精度よく目標とする衝突位置に重錘を衝突させることができるものと思われる。振り子式は、重錘を阻止面衝突前に切り離す必要があるが、目標とする衝突位置に精度よく重錘を衝突させるためには事前のキャリブレーションが重要である。斜面転落式は、重錘を自由に転落させて行うことから衝突位置に関する再現性の面ではやや難があるが、重錘の回転による柵の乗り越え等が懸念される形式の性能を確認するためには有効な実験方法と考えられる。また、重錘の衝突方向が水平方向と鉛直方向とでは重錘衝突時から阻止面の最大変位量に至るまでの位置エネルギーの影響度が異なることにも注意が必要である。いずれの重錘衝突方法を採用する場合においても、阻止面への重錘の衝突速度や入射角を精度よく計測することが重要である。

また、実験において、最大変位量に達する前に重錘衝突部分が地面等に衝突した場合には、照査エネルギーの一部が照査対象以外で吸収されることから重錘衝突部分は地面等に接触してはならない。

3.2 供試体寸法

(1) 網

供試体は、実物大を標準とする。

スパン数（2本の支柱と網で構成される範囲を1スパンとする）、支柱間隔は任意とする。

(2) 柵

供試体は、実物大を標準とする。

3スパン（支柱4本）を標準とする。また、支柱間隔は任意とする。

（解説）

現時点では、小型模型実験結果を基に数値計算等によって実物大供試体の耐衝撃挙動を評価するまでの知見が得られていないと考えられることから、性能照査実験に使用する供試体寸法は実物大を標準とした。

落石防護網の性能照査実験では1スパン（2本の支柱と網で構成される範囲を1スパンとする）、落石防護柵の性能照査実験では、3スパン（支柱4本）の供試体を使用して重錘衝突実験を実施しているものがほとんどであるが、落石防護柵においても独立した1スパンの供試体で実験を実施しているものもある。

3.3 重錘形状・材料（表面）

重錘形状は多面体を標準とする。

材質はコンクリートを標準とする。

重錘の密度は $2,300\text{kg/m}^3$ 以上 $3,000\text{kg/m}^3$ 以下を標準とする。

(解説)

重錘形状としては、球体、立方体、多面体等が考えられるが、球体よりも立方体や多面体の方がワイヤロープの破断や金網の破網に対しては厳しい载荷条件になると想定される。また欧州における性能認証試験においては多面体が使用されている（海外における性能照査実験の重錘形状は**本編 3.1**を参照）。これらのことから、重錘形状に関しては多面体を標準とした。

重錘の材料は、コンクリート製が一般的であるが、鋼製を用いている事例もある。コンクリート製と鋼製とでは同一の重量でも阻止面への接触面積が大きく異なり、防護工の耐衝撃挙動への影響も考えられることから、材質はコンクリートを標準とした。ただし、エネルギー等価の実験を実施する場合に载荷面積を等しくするために重錘の密度を大きくする場合にはコンクリート以外の材料を使用する場合もある。

3.4 衝突速度

阻止面に接触する直前における重錘の衝突速度は 25m/s 以上を標準とする。

阻止面衝突直前の速度は、高速度カメラの画像データなどから算出した値を用いる。

ただし、鉛直落下実験の場合は、落下開始位置と阻止面衝突位置の高低差から衝突速度を算出してもよい。

(解説)

阻止面に接触する直前における重錘の衝突速度に関しては、欧州性能認証試験規定速度が 25m/s であること、また、落石対策便覧^りに記載されている既往の実験結果（**図 1-5**）において、斜面が長大となって落下高さが 40m を超えると、落石速度は一定値（終端速度）に達する傾向にあることが示されており、**図 1-5**より終端速度を計算すると 27m/s 程度となることなどを踏まえ、衝突速度に関しては 25m/s 以上を標準とした。

3.5 阻止面と重錘入射方向のなす角度

阻止面に対し垂直を標準とする。

斜めに衝突した場合、垂直成分を入力エネルギーとして評価する。

(解説)

現地における落石衝突を考えると、阻止面に対する落石の入射方向や角度は三次元的に様々な状況であるものと思われる。実験において全ての状況を再現することは困難であること、また、阻止面に対する重錘の入射角度が浅くなるに従って防護工に入力されるエネルギーが小さくなることが想定されることから、実験における重錘の入射角度は阻止面に対して垂直を標準とし、斜めに衝突した場合には垂直成分を入力エネルギーとして評価することとした。

3.6 重錘の回転の影響

入力エネルギーとしては、並進運動エネルギーのみを考慮し回転の影響は考慮しない。

(解説)

斜面転落式等による実験方法を採用した場合には、重錘が回転しながら阻止面に衝突することになるが、回転エネルギーの大きさが防護工の耐衝撃挙動に及ぼす影響に関する知見が十分でないことから、現時点では回転の影響は考慮せず、入力エネルギーとしては阻止面衝突時の並進運動エネルギーのみを考慮して性能

評価することとした。

3.7 重錘衝突位置

阻止面に対する重錘衝突位置は、水平方向はスパン中央、鉛直方向は試験を実施する工法の現地設置条件を踏まえた設計落石作用位置とすることを基本とし、阻止面の鉛直中央高さから設計落石作用位置の間で設定する。

(解説)

現地での落石防護工の阻止面に対する落石衝突位置は、水平方向は柱間の全ての位置、鉛直方向は地表面近傍の最下段から現地設置条件を踏まえた設計落石作用位置までが想定される。実験であらゆる衝突位置に対する防護工の性能を把握することは困難であり、工法の形式により载荷位置の違いに対する性能への影響度が異なることから、上記衝突位置を基本とした。

3.8 計測項目

実験の各段階における主な計測項目を以下に示す。

(実験前データ)

- ・重錘重量
- ・防護網・柵の公称高さ
- ・防護網・柵の形状寸法
- ・使用材料のミルシート

(実験データ)

- ・衝突直前の重錘速度
- ・阻止面への重錘入射角度
- ・阻止面の最大張出量
- ・各ロープ張力（設計上必要な場合）
- ・画像データ

(実験後データ)

- ・供試体の損傷状況（補修量の目安）
- ・実験後の網・柵高（網・柵高の変化）
- ・緩衝装置の動作状況

(解説)

実験の各段階における主な計測項目を示したが、必要と思われるデータは適宜計測すること。

3.9 評価方法

衝突実験結果は、5章に示す総括表（評価シート）に整理するとともに、構成部材の限界状態に照らして、構造体として各要求性能を満たす落石エネルギーを導き明示する。詳細は実験報告書としてとりまとめる。

(解説)

実験終了後には、あらかじめ設定した各部材の性能マトリックスに照らして、各構成部材が照査エネルギーに対してどの性能水準にあるか、またそれらを踏まえ構造体としてどの性能水準にあるかを整理する。

なお、実験終了後において部材の損傷状況が想定より軽微な場合であっても明示する落石エネルギーは実験での照査エネルギーを超えてはならない。

4. 現場適用と留意事項

落石防護網・柵の現場適用にあたっては、想定される落石状況や設置箇所の地形等に応じて以下の留意事項を考慮し適切な設計を行うことが必要である。2章②の維持管理性能に関しては3章の性能照査実験終了後における防護工の各部材の性能水準に応じて照査を行うこと。③に関しては、防護工が設置される環境に応じて適宜対応を検討すること。

4.1 設計における配慮事項

- (a) 落石の発生頻度が高い区間、落石が連続して発生することが想定されるような現場では、要求性能に応じたロバスト性を有している必要がある（複数回落石に対してエネルギー吸収性能を有すること、落石衝突後に阻止面の傾斜等により阻止面積が初期状態より減少する場合は減少量を考慮した設計を行う等）。
- (b) 落下速度の大きい小落石の発生が想定されるような現場では、落石が阻止面を貫通しない性能を有する必要がある。
- (c) 緩衝装置等を含む構成部材は、錆やクリープなどの経時変化に対する安定性等を有する必要がある。
- (d) 現場設置時の阻止面高さは、実験における載荷位置と設計上の落石作用位置が一致するよう設定することを基本とする。
- (e) 現地設置箇所の地形状況によっては、落石が阻止面に衝突したのち柵を乗り越え谷側にこぼれ落ちたり、阻止面下端からすり抜けたりするおそれがあるため、これらを防止するための配慮が必要である。
- (f) 落石衝突時または衝突後には阻止面には大きな変形を伴うが、道路側近に設置され路側に余裕のない場合には、設置条件によっては道路空間の安全性を確保できない（建築限界に支障を及ぼす）ことになることから、これに配慮する必要がある。
- (g) 阻止面をすり抜けた土砂や小落石が道路空間の安全性に影響を及ぼすおそれのある現場では、これを防止するための配慮が必要である。
- (h) 複数スパンから構成される構造に関し、中央部スパンへの衝突実験のみが実施され、端部スパンへの衝突時の性能が明らかでない場合には、端部スパンに落石が作用しないような配置等を検討する必要がある。
- (i) 現地における平面・縦断的配置が直線的にならない場合、エネルギー吸収性能が発揮されないことがあるので配慮が必要である。例えば、支柱強化型落石防護柵などで、柵の平面的配置が山側に凸な場合には、支柱に落石が直撃して曲がってもワイヤロープは緩む方向となり、ワイヤロープや緩衝装置のエネルギー吸収量は実験時と異なる場合がある。
- (j) 支柱強化型落石防護柵などの支柱が曲げ変形する工法では、設計上最大変形量を算出する場合には支柱の倒れ分と阻止面のはらみ分を考慮する必要がある。

4.2 留意事項-実験と現地条件の違い

(1) 重錘衝突速度

- ・重錘の衝突速度は25m/s以上を標準としたが、実験実施上の制約から25m/sよりも遅い衝突速度でしか実

験ができない場合も想定される。現時点での知見からは、重錘の質量調整によるエネルギー等価実験の妥当性が明確でなく、防護柵の種類によって異なると考えられるため低速度での実験結果を 25m/s の実験結果へ一律に補正することは困難である。性能検証実験は本編 3.2.3 のように厳しい衝突条件で行われるべきであり、25m/s 未満の重錘衝突速度を採用する場合にはその速度を適用現場における落石の適用最大速度とすることが適切であるものと考えられる。

(2) 構造条件-寸法

- ・落石防護網では、基本的に設置面積の大きい方が、エネルギー吸収性能は大きくなるものと考えられることから、現地における設置延長および高さは実験供試体以上とする。ただし、落石作用時の変形量が大きくなる場合もあることから、設置条件によっては留意する必要がある。
- ・落石防護柵では実験供試体の延長を現地における最小設置延長とする。また、落石想定範囲におけるスパン長は、実験供試体の中央部スパン長とし、端部スパン長については、実験時の端部スパン長以上とする。ただし、落石作用時の変形量が大きくなる場合もあることから、設置条件によっては留意する必要がある。
- ・落石防護柵では、実験時と異なる寸法（高さ・支柱間隔等）とする場合は、設計条件において性能が確保されることを複数の実験結果との比較検証により信頼性を担保された解析等により示す必要がある。

(3) 構造条件-材料

- ・実験時と異なる構造部材（支柱・ワイヤロープ・ブレーキ装置・金網）を用いる場合は、それぞれに対し部材性能を示す必要がある。ただし、その部材が構造全体のエネルギー吸収性能や耐荷力に影響を及ぼすと考えられる場合（例えば、緩衝装置や固定治具等）には、それらの部材を組み込んだ全体構造試験体で再度性能照査実験を実施する必要がある。

(4) 载荷位置

- ・現地では阻止面の様々な位置に落石が衝突することが想定されることから、载荷位置が異なる場合のエネルギー吸収性能が示されている必要がある。
- ・支柱強化型落石防護柵などの支柱が曲げ変形する工法では、载荷位置が上段でも阻止面に斜めに衝突する場合や、载荷方向が垂直でも下段に载荷される場合は、上段に垂直に载荷される場合に比べ支柱が曲がりにくく、ワイヤロープと緩衝装置で大きな落石エネルギーを吸収しなければならない場合がある。その場合には、緩衝装置でのワイヤロープのスリップ量が大きくなり、落石の最大変位が、支柱が曲がる場合よりも大きくなる場合があることに留意する必要がある。
- ・現場適用時に最大変形量が問題となる場合には、実験時と異なる設計条件に関する最大変形量が適切な方法で示されている必要がある。

(5) 数値解析の適用範囲

実験条件と現場条件の違いに対して数値解析により性能が確保されることを示す場合がある。この場合には、使用する数値解析は、複数（2 つ以上）の実験結果との比較検討により信頼性が担保されていることが必要である。また、数値解析が適用できる範囲については、落石の作用位置の違いや構造寸法の違い（最小延長以外）などにとどめるものとする。現時点では、エネルギー吸収性能や耐荷性状に影響を及ぼす部材の変更、実験条件を上回る入力エネルギーや実験時を上回る衝突速度には解析を適用すべきではな

く、それらに対する性能照査は実験での確認を基本とする。

5. 評価シート（案）

次頁に評価シート案を示す。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6

落石防護工性能照査実験 評価シート (案)

実験供試体

形式 (製品名)	
延長	
高さ	
支柱本数	
支柱間隔	
緩衝装置	

実験条件

実験方式	
重錘形状	
重錘材質	
重錘寸法	
重錘質量	
重錘密度	

供試体形状寸法

(実験概要図、主要部材の規格、写真等)

