重錘衝突を受ける従来型落石防護柵の動的応答解析

Dynamic response analysis of conventional rockfall protection fence under impact loading

室蘭工業大学大学院	○学生	E員	田畑	翔大 (Shoudai Tabata)
室蘭工業大学大学院	正	員	小室	雅人 (Masato Komuro)
(国研) 寒地土木研究所	正	員	西	弘明 (Hiroaki Nishi)
(国研) 寒地土木研究所	正	員	今野	久志 (Hisashi Konno)
(国研) 寒地土木研究所	正	員	荒木	恒也 (Nobuya Araki)

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには, 落石等の自 然災害から人命や道路交通の安全を確保するため,多く の落石対策施設が数多く設置されている。その中でも比 較的小規模な落石等に対する落石対策施設の一つに従来 型落石防護柵がある。落石防護柵は、支柱、ワイヤロー プおよび,ひし形金網により構成される.また各構成部 材の吸収可能エネルギーの総和で与えられる吸収エネル ギー E_T が, 落石運動エネルギー E_iを上回るように設計 されている.しかしながら、実際には、支柱基部の局部 座屈による横倒れやひし形金網の破網による落石の貫通 など、設計上では想定していない損傷事例が多く報告さ れている. 従って, 落石防護柵をより安全かつ合理的に 設計を行うためには, 落石荷重作用時の動的挙動を正確 に把握することが重要である.

このような背景のもと、著者らのグループでは、従来型 落石防護柵の耐衝撃挙動やエネルギー吸収機構等を詳細 に検討するための基礎的資料を得ることを目的として重 錘衝突実験を実施してきた¹⁾.本論文では、それら一連の 実験の中で比較的エネルギーが小さい実験条件を対象に 三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し,数値解析的側面か らその動的挙動を把握するとともに、実験結果との比較 を行った.なお、本解析にはLS-DYNA²⁾を使用している.

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、試験体の形状寸法および重錘衝突位置を 示している. 試験体は落石対策便覧³⁾(以後, 便覧)に基づ き設計された柵高2m, 延長9m(支柱間隔3m×3スパ ン)の従来型落石防護柵である。防護柵は、鋼製支柱の他、 水平に設置されたワイヤロープと落石を補足するための ひし形金網およびロープ間の落石すり抜けを阻止するた めの間隔保持材から構成される.表-1には、使用した 各部材の諸元を示している.端末および中間支柱には H 形鋼を、ワイヤロープにはφ18を、ひし形金網には素線 径 3.2 mm を用いた。水平ロープ間隔は 0.3 m である。写 真-1(a)には、試験体の設置状況を示している。中間支 柱(あるいは間隔保持材)とワイヤロープおよびひし形金 網は,写真-1(b)に示すようにU字ボルトを介して固定 している. また, ワイヤロープは写真-1(c)に示すよう に索端金具を介して端末支柱に固定されている. なお, 鋼 製支柱基部はコンクリート基礎によって埋め込まれてい る. また, 便覧に基づく本試験体の設計可能吸収エネル

ギーは, 52.5 kJ である.

2.2 実験方法

実験は、門型フレームに吊り下げた鋼製重錘をクレー ンで所定の高さまで吊り上げ、振り子運動によって落石 防護柵に水平衝突させることで実施した. 重錘は, 重さ 890 kg, 直径 0.5 m, 長さ 0.62 m で先端が丸みを帯びてい る鋼製のものを使用した。また、ワイヤロープ張力を測定 するために, 図-2(a)に示すように, 索端金具1本につ き4枚のひずみゲージを貼付し、それらの平均値を用い



図-1 試験体概要





写真-1 試験体の設置状況

表-1 使用部材の諸元

部材名	諸元
端末支柱	$H175 \times 175 \times 7.5 \times 11$
中間支柱	$H200 \times 100 \times 5.8 \times 8$
ワイヤロープ	18 ϕ 3 × 7 G/O
索端金具	$25 \phi \times 500$
ひし形金網	3.2 ¢ (目合い 50 mm)



(a) 索端金具

(b) 中間支柱

図-2 ひずみゲージ位置

て張力を測定した.実験における測定項目は,1)重錘後 部に取り付けた加速度計による衝突加速度,2)索端金具 に取り付けたひずみゲージによるワイヤロープ張力,3) 支柱基部に取り付けたひずみゲージ(図-2b参照)によ る軸方向ひずみ,4)試験体上方からの高速度カメラ撮影 による重錘貫入量および5)支柱天端変位量である.本論 文では,防護柵中央部の柵高0.5mの位置に落下高さ2.5 m,想定衝突エネルギー21.4 kJで衝突させたものを対象 に数値解析を実施した.

3. 数值解析概要

3.1 解析モデル

図-3には、有限要素モデルを示している. ワイヤロー プに関しては,解析精度や接触問題を適切に評価するた めに、8節点固体要素を基本とし、その一部に圧縮力を 伝達しないケーブル要素を挿入することでモデル化した. ワイヤロープは索端金具要素を介して端末支柱に完全固 定されるものとし,間隔保持材および中間支柱とワイヤ ロープは実構造と同様に8節点固体要素でモデル化した U字ボルトを介して固定した. ワイヤロープ – U字ボル ト,中間支柱および重錘間には,接触および剥離・すべり を伴う接触面(摩擦係数 0.4)を定義した。境界条件はコン クリート基盤底面を完全固定とし、側面はそれぞれ面に 垂直な方向を固定とした.また、本解析では1)防護柵の 変形性状やロープ張力に着目すること、2) 重錘を間隔保 持材に衝突させていること、および3)実験では重錘のす り抜け現象が起きていないことから、ひし形金網のモデ ル化を省略した.

数値解析は、高速度カメラの撮影映像から得られた重 錘衝突速度(V=7.07 m/s)を初速度として重錘に付加す ることで実施している.また実験における重錘の衝突位 置を可能な限り正確に解析条件に反映させている.なお、 解析時間は 200 ms とし、本数値解析ではワイヤロープの



図-3 有限要素モデル



初期張力および減衰を考慮していない.

3.2 材料構成則

図-4には、ワイヤロープ、鋼製支柱および間隔保持材 に用いた鋼材の応力 – ひずみ関係を表している.いずれ もバイリニア型の等方構成則を適用した.(a)図に示すワ イヤロープは便覧を参考に一次弾性係数 E_1 および二次弾 性係数 E_2 を決定した.(b)図に示す鋼材については塑性 硬化係数Hを弾性係数01%とした.また端末支柱、中 間支柱、および間隔保持材の降伏応力 f_y に関しては、各 構成部材のミルシートを参考に、それぞれ314、381、385 MPaとした.いずれの場合も降伏判定は von Mises の降伏 条件に従うものとした.なお、U字ボルトおよび鋼製重錘 に関しては、実験時に塑性化が生じてないことより、弾 性体(弾性係数 $E_s = 200$ GPa、ポアソン比 $v_s = 0.3$)と仮定 した.また、鋼製重錘は所定の質量となるように単位体 積質量を換算している.

4. 数値解析結果および考察

4.1 重錘貫入量

図-5には、重錘衝突位置における重錘貫入量の時刻 歴応答波形について、実験結果と解析結果を比較して示 しており、重錘が防護柵に衝突した時間を零としている. 図より、実験結果を見ると、重錘衝突後、約50 ms までほ



図-8 支柱基部ひずみ



図-7 天端変位

ば線形的に貫入し,約90 ms で最大値到達後,リバウンド 状態に至っていることが分かる.一方,数値解析結果を 見ると,最大貫入量に関しては,実験結果と比較して若 干大きく示されているものの,波形の立ち上がりは実験 結果とよく対応していることが分かる.

4.2 ロープ張力

図-6には、重錘衝突位置近傍のワイヤロープ張力(R1, R2, R3, 図-1参照)の時刻歴波形を示している.なお, それ以外のワイヤロープには張力がほとんど生じてない ことを実験結果および数値解析結果から確認している.

実験結果に着目すると,重錘中心が衝突した R2 ロープ の張力が最も大きく発生している.また,その発生時刻 は,図-5に示す最大重錘貫入量の発生時刻とほぼ一致し ている.なお,重錘衝突位置近傍のロープ張力を比較す ると,R1 が R3 よりも大きく示されていることが分かる.

一方,解析結果に着目すると,(c)図に示す R3 を除き, 波形の立ち上がりから除荷に至るまで,実験結果と非常 によく一致していることが分かる.なお,R2における最 大張力は,実験結果と比較して,若干小さい.これは,本 解析ではロープの材料物性値に公称値を与えていること から,約120 kN でロープが降伏域に到達し,張力が頭打 ちになるのに対し,実ロープの降伏荷重がそれよりも大 きいことに起因しているものと考えられる.

4.3 防護柵変形状況

図-7には中間支柱天端の動きについて実験結果と解析 結果を比較して示している.図より,実験結果に着目す ると,重錘衝突後,中間支柱の天端は後方に移動すると ともに,衝突位置(中央部)方向にも移動していることが 分かる.また,除荷時には,いずれの変位も0mm付近に 戻っていることから,支柱には大きな塑性変形は生じて いないことが分かる.一方,数値解析結果を見ると,後 方への移動に関しては,最大値から除荷時に至るまで実 験結果とよく対応していることが分かる.なお,側方移 動に関しては,波形の立ち上がりはよく対応しているも のの,最大値や除荷後の波形は大きく異なっている.こ れは,本解析では鋼部材間の摩擦係数を一律に0.4 に設定 していることが一つの要因と推察される.この点に関し ては,今後更なる検討が必要である.

図-8には、中間支柱の基部の軸方向ひずみについて実 験結果と解析結果を比較して示している.(a)図に示す衝 突側のフランジに着目すると、重錘衝突後、引張ひずみ が、一方(b)、(c)図に示す非衝突側のフランジひずみには 圧縮ひずみが発生していることが分かる.これは図-7に 示す中間支柱の動きと対応している.また、解析結果と 実験結果を比較すると、前者の方が後者よりも大きく示 されているものの、定性的には実験結果を再現している ことが分かる.

図-9には重錘最大貫入時における中央スパンの変形状況と Mises 応力分布を示している.図より、中間支柱基部では設計可能吸収エネルギーの約半分程度のエネルギーにおいて、降伏応力(381 MPa)を超える応力が発生していることが分かる.これは、前述の図-8(a)の軸方向ひずみが降伏ひずみ(1,905 µ)を大きく上回っていることからも確認される.

平成29年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第74号



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図-10 変形状況





図-10には、重錘衝突後における防護柵の変形状況について実験結果と解析結果を時刻歴で比較して示している。実験結果および解析結果を比較すると、リバウンド後の*t* = 200 ms において重錘貫入量に差があるものの、全体的には、解析結果は実験結果の変形形状を概ね再現できていることが分かる。

5. まとめ

本論文では、従来型落石防護柵を対象に三次元弾塑性 衝撃応答解析を実施した。本研究で得られたことを整理 すると以下のようになる。

- 提案の材料構成則および解析手法を用いることで、 重錘貫入量や中間支柱の応答性状を大略再現可能で ある。
- 2) また、ロープ張力においても解析結果は実験結果を ほぼ再現可能である.
- 3) 設計可能吸収エネルギーの約1/2程度のエネルギーが、下方に作用した場合、中間支柱基部には降伏応力を超える応力が発生することが確認された。

今後,重錘衝突位置や入力エネルギーを変化させた解 析を実施し,実験結果との比較によって解析精度の検証 を行う予定である.

参考文献

- 1) 荒木恒也,今野久志,西弘明,小室雅人:従来型落石 防護柵の重錘衝突実験,土木学会北海道支部論文報告 集,第73号,A-22(CD-ROM),2017.
- 2) Hallquist, J.O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.
- 3) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.