

重錘落下時の落石防護柵用ひし形金網に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on dynamic responses of diamond-shaped wire-net used for conventional rockfall protection fence under steel weight dropping

室蘭工業大学大学院	○ 学生員	服部 桃加 (Momoka Hattori)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
(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	中村 拓郎 (Takuro Nakamura)

1. はじめに

我が国の道路沿いには落石災害から道路交通や人命を守るために、種々の落石防護工が設置されている。その一つである従来型落石防護柵は、H形鋼支柱、ワイヤロープ、ひし形金網(以後、単に金網)等から構成されており、比較的小規模な落石を対象として数多く設置されている。

同防護柵は、金網、ワイヤロープおよび支柱の弾塑性変形により落石の運動エネルギーを吸収する構造であり、落石対策便覧¹⁾に基づき、構成部材毎の可能吸収エネルギーの総和が落石エネルギーを上回るように設計されている。しかしながら、実防護柵の損傷状況を見ると、金網の貫通が確認されるなど、設計では想定していない損傷事例も報告されている。このような背景の下、著者らの研究グループでは、従来型落石防護柵に関する落石衝突時の耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、統一的な性能評価手法や耐衝撃設計法を提案することを最終目的として、種々の実験および解析²⁾を実施している。

本論文では、これら一連の研究の中で、落石防護柵に使用される金網の終局状況や動的挙動の把握を目的に実施された重錘落下衝撃実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、金網を梁要素を用いて詳細にモデル化した数値解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検討した。なお、本解析にはLS-DYNA (Ver. R9)を使用した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、試験体および鋼製型枠の形状寸法を示して

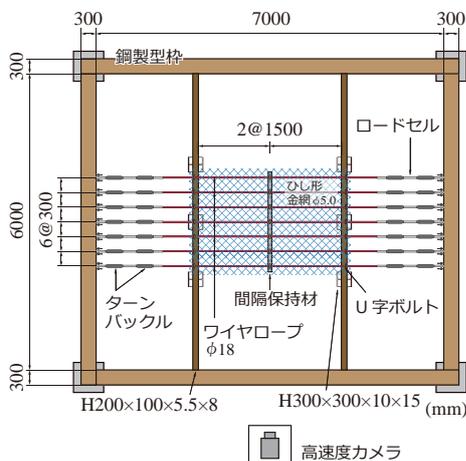


図-1 試験体および鋼製型枠の形状寸法

いる。試験体は、支柱間隔が3 mの従来型落石防護柵を模擬し、H形鋼支柱の上に、ワイヤロープ、金網および落石衝突時のワイヤロープの開きを抑制するための間隔保持材の順に設置をした。ワイヤロープ(φ18)は300 mm間隔で7本配置しており、1本当たり5 kN程度の初期張力を導入している。金網(目合50mm)は、図-2に示すように、山形に折り曲げられた素線を互いに交差させたものであり、編み込みの方向によって剛性が異なる異方性を有している。本研究では、実構造と同様にワイヤロープの軸方向に金網を展開し、その素線径はφ5.0 mmとした。なお、金網とワイヤロープは、間隔保持材または支柱にU字ボルトを用いて固定しており、ワイヤロープの両端部は、ターンバックル、ロードセルおよび連結器具を介して鋼製型枠に固定されている。

2.2 実験方法および測定項目

写真-1には、重錘落下衝撃実験時の状況を示している。実験は、重錘をトラッククレーンを用いて所定の位置まで吊り上げ、着脱装置を用いて自由落下させることにより実

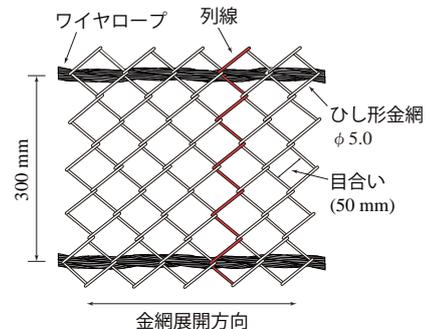


図-2 ひし形金網の形状

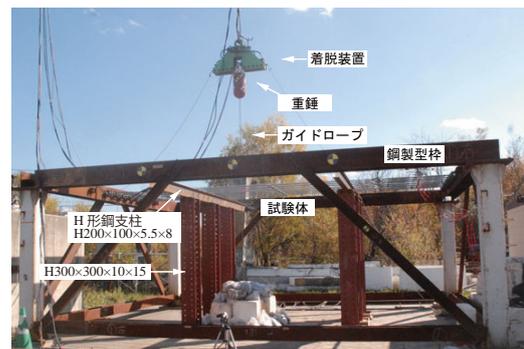


写真-1 実験状況

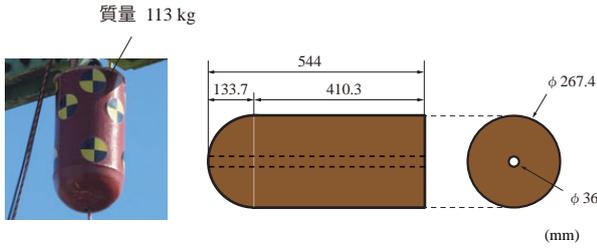


図-3 本実験に使用した重錘の寸法

表-1 実験ケース一覧

実験ケース名	金網の素線径 (mm)	設定落下高 (m)	設定衝突速度 (m/s)	設定衝突エネルギー (kJ)
H5L45	5.0	5.0	9.9 (10.5)	5.4 (6.1)
H15R56		15.0	17.2 (16.2)	16.2 (14.4)

*() は実測値

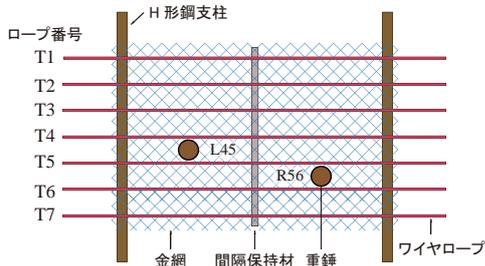


図-4 重錘衝突位置

施している。本実験で用いた重錘は、図-3に示すように質量 113 kg、直径 267.4 mm、高さ 544 mm であり、重錘先端部が球状となっている。また、重錘中央部の貫通孔(φ36)にガイドロープを通すことで、所定の位置に正確に落下するように配慮している。

表-1には、本研究で対象とした実験ケースを一覧にして示している。実験は、図-4に示すように、L45(実験ケース H5L45)に重錘を落下させた後に、金網を取り替えることなく R56(実験ケース H15R56)に重錘を落下させている。

本実験の測定項目は、(1)ひずみゲージより算出したロープ張力、(2)高速度カメラによって計測した重錘貫入量、(3)重錘上面に取り付けた加速度計から算出した重錘衝撃力である。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-5には、本数値解析で用いた有限要素モデルを示している。金網には2節点梁要素、間隔保持材には4節点シェル要素、それ以外には全て8節点固体要素を用いた。要素の積分点数に関しては、8節点固体要素に対して1点積分、4節点シェル要素に対して断面内板厚方向に3点積分、2節点梁要素に対して4点積分とした。

境界条件は、ロープ両端部をピン支持固定とし、H形鋼支柱は実験時にボルト等で固定されている箇所を完全固定として定義した。また、U字ボルトとH形鋼支柱または間隔保持材間についても完全固定を定義した。

本解析では、重錘が傾くことなく理想的な状態で金網に

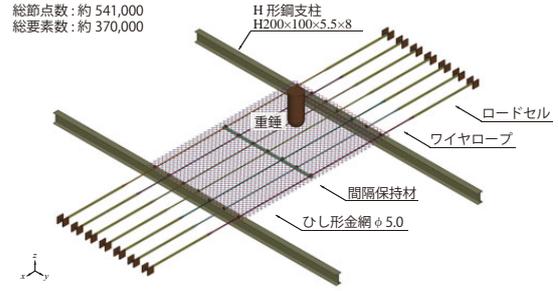


図-5 有限要素モデル

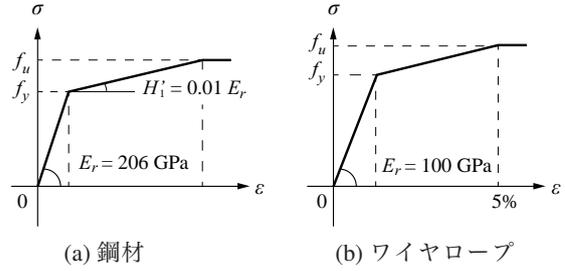


図-6 材料構成則

表-2 材料物性値

	弾性係数 E_r (GPa)	降伏応力 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)
金網	206	245	386
間隔保持材		358	468
ワイヤロープ	100	914.7	1496.1

衝突するように重錘中心線のz軸方向成分のみを可動としている。また、金網の素線間には線と線の接触を、金網とワイヤロープ、ボルトおよび重錘間には線と面の接触を、それ以外には面と面の接触面を定義した。いずれの接触面においても剥離およびすべりを考慮し、摩擦係数は予備解析を行い0.4と設定した。また、重錘の全節点には、実測衝突速度を付加させることで解析を実施している。なお、ワイヤロープの初期張力、減衰および重力は考慮していない。

3.2 材料構成則

図-6には、本数値解析で用いた鋼材およびワイヤロープの応力-ひずみ関係を示している。本研究では、トリリニア型の弾塑性体モデルを適用することとした。

図-6(a)に示す鋼材の弾性係数 E_r は $E_r = 206$ GPa、塑性硬化係数 H'_1 は弾性係数の1%とし、引張強度まで線形に増大するモデルとした。鋼材の材料物性値には、実験に使用した鋼材のミルシートより、表-2に示す値を用いた。なお、金網のJIS規格には、引張強さのみが規定されており、降伏応力に関する規定はない。ここでは、使用した金網の引張強さが386 MPaであることから、SS400材相当(降伏応力 $f_y = 245$ MPa)とした。

図-6(b)に示すワイヤロープの降伏応力 f_y および引張強度 f_u に関しては、前者は落石対策便覧を参考に、後者はミルシートを用いて、それぞれ降伏荷重 $P_y = 117$ kN および破断荷重 $P_u = 193$ kN と設定し、ロープ断面積 $A_w = 129$ mm² で除すことにより算出した。また、弾性係数 E_r は $E_r = 100$ GPa と設定した。

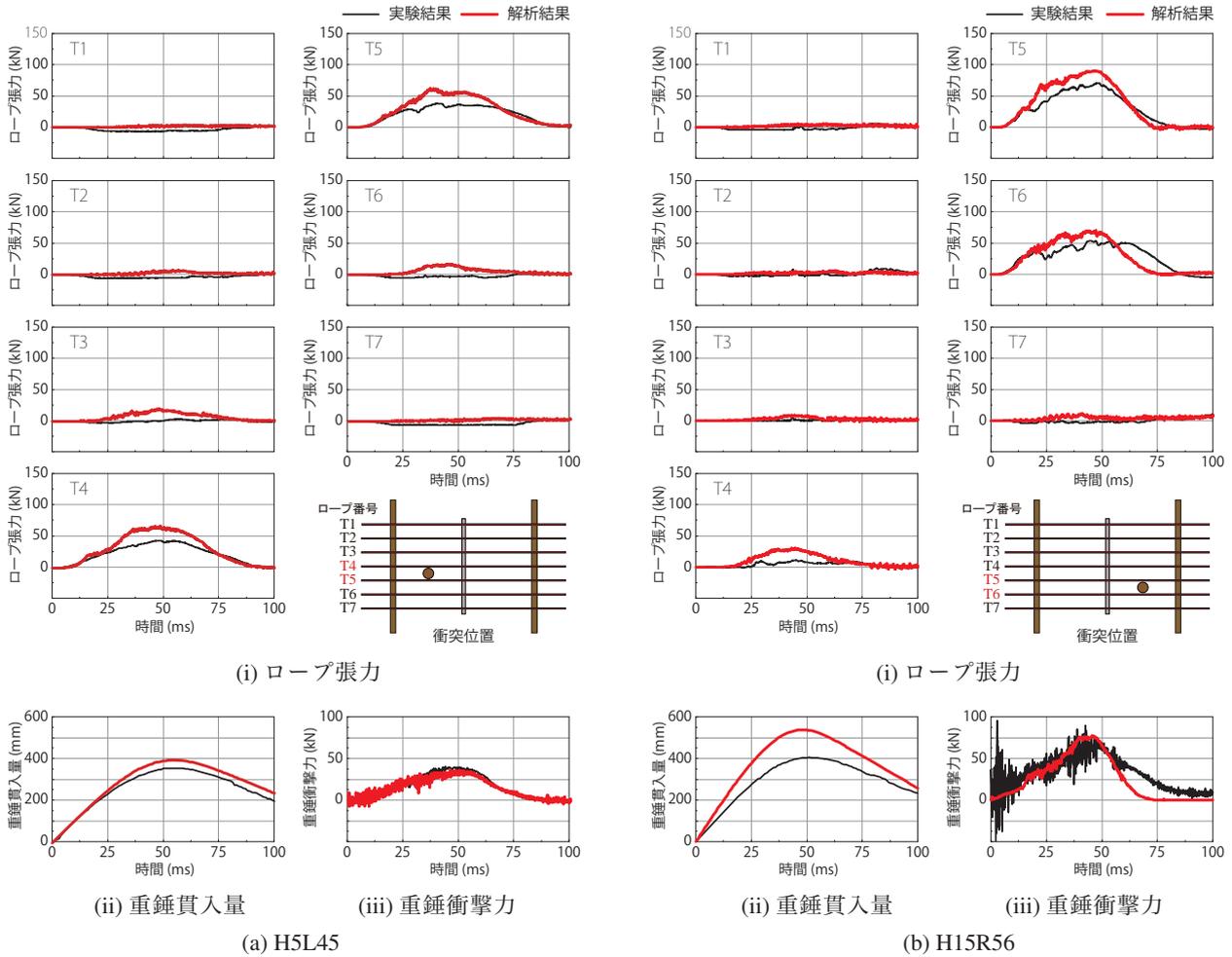


図-7 各種時刻歴応答波形

なお、鋼材の単位体積質量 ρ_s 、ポアソン比 ν_s は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。降伏判定には von Mises の降伏条件を用いた。また、重錘に関しては、実験終了後に塑性変形が生じていないことを確認していることから弾性体と仮定し、密度は重錘質量 113 kg を解析モデルの体積で除した値を入力した。

4. 数値解析結果および考察

4.1 各種時刻歴応答波形

図-7は、本研究で対象とした2ケースにおけるロープ張力、重錘貫入量および重錘衝撃力の実験結果と解析結果を比較する形で示したものである。黒線は実験結果を、赤線は解析結果を示している。なお、重錘貫入量は、重錘の鉛直方向変位である。実験結果における重錘衝撃力は、重錘上面に取り付けた加速度計から得られる加速度波形に重錘質量 (113kg) を乗じることで評価し、解析結果の重錘衝撃力は、重錘と金網の接触反力の総和として算出した。なお、横軸は重錘が金網に衝突した時刻を零としている。

(1) ロープ張力

図-7 (i) に示すロープ張力に着目すると、実験結果では、いずれのケースも重錘落下位置近傍の2本のワイヤロープ (H5L45 : T4, T5, H15R56 : T5, T6) に大きな張力が発生していることが分かる。最大ロープ張力を見ると、落下高が小さい H5L45 では 44 kN 程度 (T4)、落下高が大きい

H15R56 では 70 kN 程度 (T5) となっており、いずれも降伏荷重 ($P_y = 117 \text{ kN}$) には達していない。また、前者の H5L45 の場合には衝突位置近傍の2本のロープ (T4, T5) 張力がほぼ同程度であるものの、後者の H15R56 の場合には2本のロープ (T5, T6) 張力で 20 kN 程度の差が生じている。

一方、解析結果を見ると、実験結果と同様に重錘落下位置近傍の2本のロープに大きな張力が発生している。解析結果は、いずれのケースにおいても実験結果を若干過大評価しているものの、重錘衝突後から $t = 20 \text{ ms}$ 程度までの波形の立ち上がりをほぼ適切に再現していることが分かる。なお、両結果の最大ロープ張力の差は、20% 程度となっている。

(2) 重錘貫入量

図-7 (ii) に示す重錘貫入量に着目すると、実験結果および解析結果ともに、落下高が大きいほど貫入量が大きくなる傾向が確認される。実験結果と解析結果の最大貫入量を比較すると、落下高が小さい H5L45 では実験結果が 360 mm であるのに対し、解析結果は 397 mm を示しており、その差は 10% 以下である。一方、落下高が大きい H15R56 では、実験結果が 405 mm であるのに対し、解析結果は 538 mm と実験結果を若干過大に評価していることが分かる。これは、落下高が大きいほど衝突速度も速くなり、金網の局所的な変形が卓越するため、本解析モデルではその再現が難しいことを示唆しており、さらなる改善が必要である

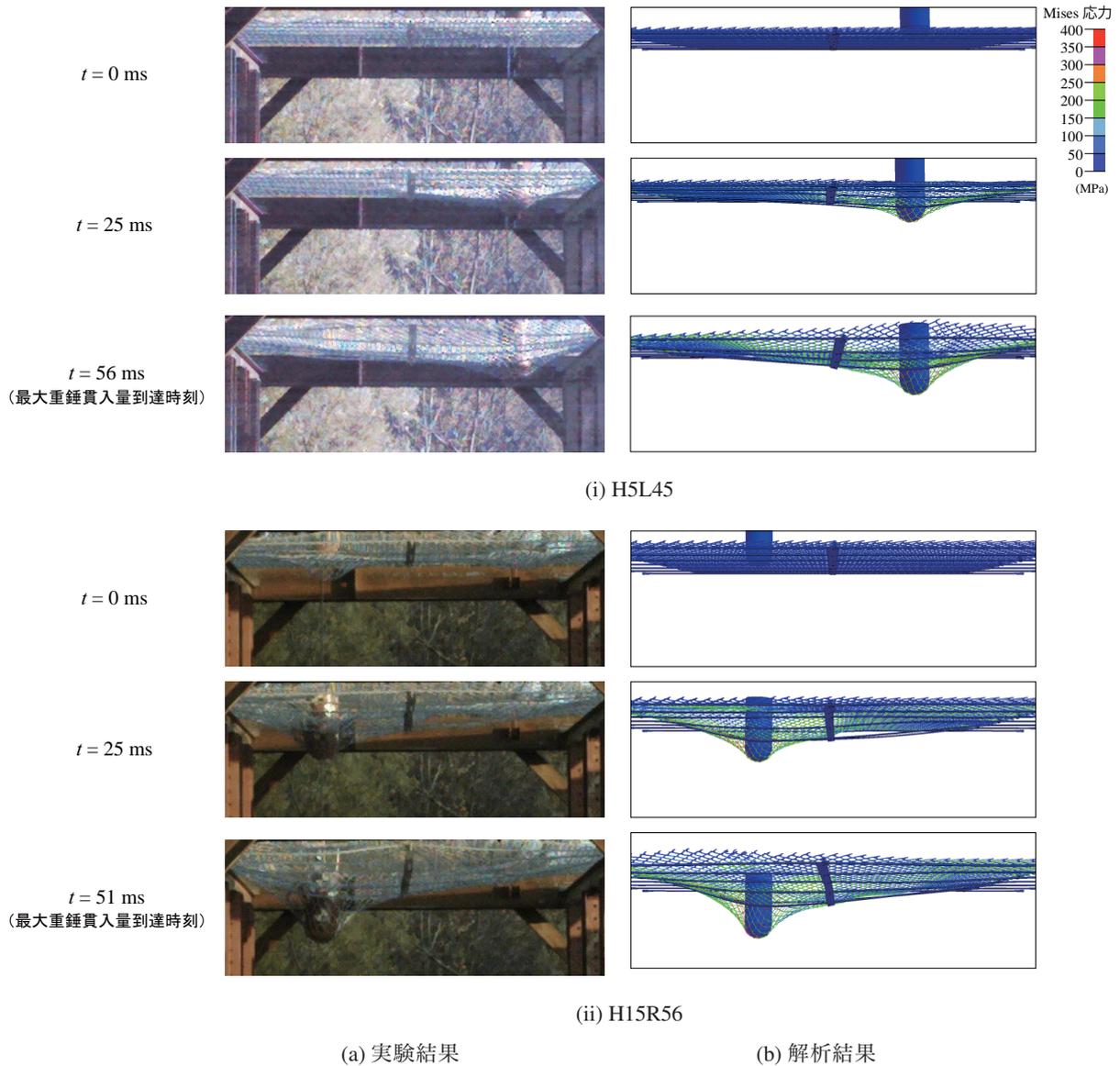


図-8 試験体の変形状況比較

ものと考えられる。

(3) 重錘衝撃力

図-7 (iii) に示す重錘衝撃力に着目すると、落下高が大きいほど最大衝撃力は大きくなる傾向が確認されるものの、その継続時間は $t = 95$ ms 程度となっており、落下高によらずほぼ同程度となっている。

実験結果と解析結果を比較すると、H5L45 の場合には、解析結果が実験結果の波形の立ち上がりや最大値をほぼ適切に再現していることが分かる。一方、H15R56 の場合には、解析結果の荷重継続時間は実験結果と比較して短いものの、重錘衝突後から最大値に至るまでは、実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。

4.2 変形状況の比較

図-8 には、重錘が金網に衝突した時刻から実験時の最大変位到達時刻 (H5L45 : 56 ms, H15R56 : 51 ms) までの金網やワイヤロープなどの変形状況について、実験結果と解析結果を比較する形で示している。なお、解析結果の表示色は、Mises 応力の大きさを示している。図より、解析結果は、重錘衝突時から最大変位到達時刻に至るまで実験結

果の金網やワイヤロープの変形を大略再現していることが分かる。また、重錘衝突位置近傍の金網は、落下高にかかわらず降伏応力 ($f_y = 245$ MPa) に達していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、落石防護柵に使用されるひし形金網の終局状況や動的挙動を把握するために実施した重錘落下衝撃実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。その結果、本数値解析モデルを用いることにより、実験結果のロープ張力、重錘貫入量および重錘衝撃力は、大略再現可能である。しかしながら、落下高が大きい場合には、重錘貫入量を過大に評価する傾向があることより、解析モデルのさらなる精度向上が必要であることが確認される。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 小室雅人，服部桃加，今野久志，荒木恒也：重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の衝撃応答解析，土木学会論文集（応用力学），Vol. 74, No.2, pp. I-303-I313, 2018.