

落石防護工に使用するひし形金網の落石衝突時における 回転エネルギーの影響に関する解析的検討

Numerical study on influence of rotational energy at rock collision of diamond-shaped wire net for rockfall protection structures

室蘭工業大学大学院 ○学生員 田中 優貴 (Yuuki Tanaka)
室蘭工業大学 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には、落石災害を防止するための落石防護工の一つとして、落石防護網や落石防護柵が数多く設置されている。いずれの場合も通常は落石をひし形金網が変形することで受け止める柔構造となっている。これらの落石防護工をより合理的な設計を行うためには、各構成部材の耐衝撃挙動を把握することが重要である。実際の落石は回転運動を伴う形でひし形金網に衝突することになる。従って、落石の回転運動がひし形金網の耐衝撃挙動に及ぼす影響を明らかにしておくことが必要となる。大変形を伴う柔構造の耐衝撃挙動を適切に評価するためには、実験的検討^{3~4)}のみでは困難であり、有限要素法等を用いた解析的検討⁵⁾を併せて実施する必要がある。

このような背景より、本論文では、ひし形金網に回転させた落石を衝突させることにより、その回転エネルギーがひし形金網に与える影響を把握するために、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。得られた解析結果と別途実施された実験結果を比較することにより回転エネルギーの影響について検討を行った。なお、本解析にはLS-DYNA⁶⁾を使用している。

2. 実験概要

図-1には、ひし形金網の形状寸法および重錘落下位置を示している。ひし形金網の形状寸法は、縦横3mの正方形とし、素線径を3種類(3.2, 4.0, 5.0 φ)に変化させている。金網は、図-1に示すようにその端部をワイヤロープ(18 φ)と結合している。写真-1(a)には、試験体の設置状況(全景)を示している。各ロープと金網の結合には、写真-1(b)に示すように素線の一山ごとにU字ボルトを使用している。また、各ロープの交点はクロスクリップで固定している。各ロープの端部はターンバックルを介して専用のロードセルと接合されており、ピン接合に近い状態となっている。また、ロードセルは写真-1(c)に示すように鋼製型枠とピン接合されている。

実験は、荷吊り用の帯を巻き付けた多面体重錘(質量300 kg)をトラッククレーンで所定の高さまで釣り上げ自由落下させることにより回転を与えている。実験における測定項目は、ロープの端部に取り付けたロードセルによるロープ張力および高速度カメラ撮影による金網のたわみ量である。なお、本論文では、素線径5 mmのひし形金

網を対象とし、落下高さ $H=20\text{ m}$ における全エネルギーに対する回転エネルギーの割合を変化させた全3ケースについて数値解析を実施している。

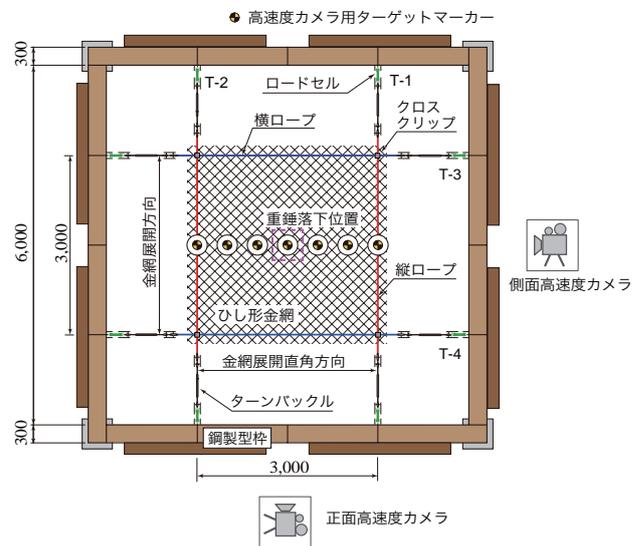
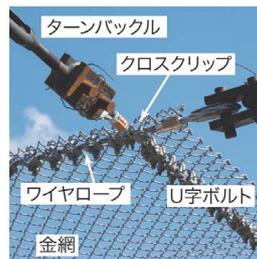


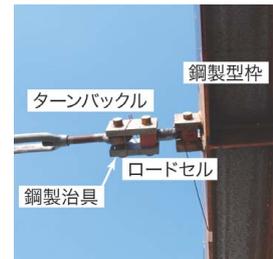
図-1 試験体概要図



(a) 全景



(b) クロスクリップ



(c) ロードセル

写真-1 試験体の設置状況

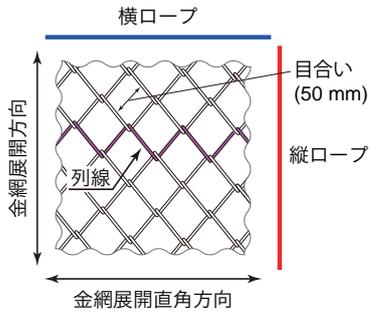


図-2 ひし形金網の形状と配置方向

また、図-2に示すように金網展開方向と金網展開直角方向で縦ロープと横ロープに区別して整理している。

3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

図-3には、数値解析モデルの要素分割状況を示している。本解析では、ひし形金網の素線の一山を原寸に基づいて忠実に梁要素で作成し、それらを連続的に組み合わせることにより、金網全体をモデル化した。その他の構成部材に関しては、鋼製型枠を構成しているH形鋼および溝形鋼は4節点シェル要素、ターンバックルは2節点梁要素、ワイヤロープは圧縮力を伝達しない2節点ケーブル要素、重錘およびロードセルは8節点固体要素を用いた。

ひし形金網の素線同士、金網-U字ボルト間および重錘-金網素線間には、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。なお、U字ボルトの締め付けトルクについては考慮せず、U字ボルトと金網を密着させることで接続している。また、ワイヤロープとU字ボルトは完全結合としている。境界条件は実際の実験条件と同様に鋼製型枠の柱基部を完全固定としている。

3.2 材料構成則

図-4(a)には、ワイヤロープに用いた応力-ひずみ関係を示している。ここでは、引張側をトリリニア型とする非線形弾性体モデルを適用した。なお、ワイヤロープの一次弾性係数 E_1 および強度特性(降伏応力および破断強度)は便覧¹⁾を参考に決定し、破断ひずみを5%と仮定し、その後はひずみが増大するように設定した。

(b)図には、ひし形金網の応力-ひずみ関係を示している。ここでは、塑性硬化係数 H' を弾性係数の1%とするバイリニア型の等方硬化則を適用した。なお、降伏の判定にはvon Misesの降伏条件式を採用している。

鋼製型枠、鋼製治具、ターンバックル、U字ボルトおよびクロスクリップに関しては、実験時に塑性化が生じていないことより、弾性体(弾性係数 $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$)と仮定した。また、コンクリート重錘に関しても実験では損傷が確認されていないことから弾性体(弾性係数 $E_c = 20 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_c = 0.167$)と仮定し、所定の質量となるように単位体積質量を換算している。

3.3 数値解析方法

数値解析では、高速度カメラの撮影映像の分析より得られた実験時の重錘衝突速度および角速度を初速度として重錘に付加することで载荷している。また、実験における重錘の落下位置および落下角を可能な限り正確に解

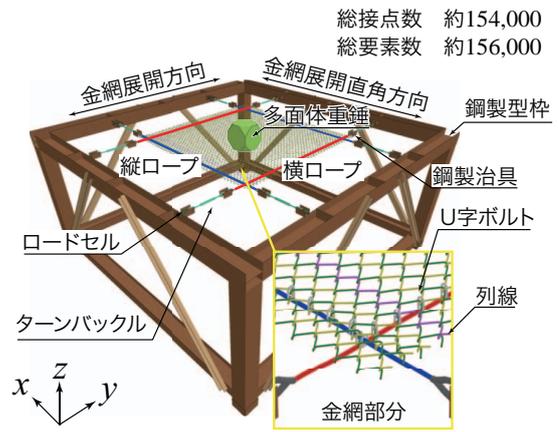


図-3 数値解析モデル

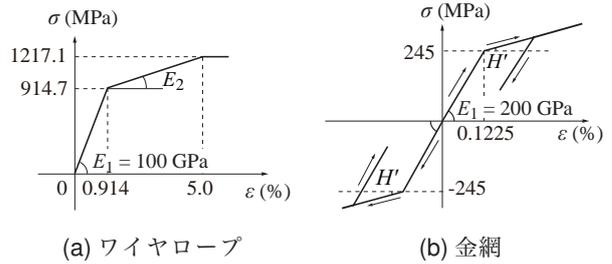


図-4 応力-ひずみ関係

析条件に反映させている。

表-1には、高速度カメラ映像から得られた重錘落下位置および落下角を一覧にして示している。図-5には、表-1に示す重錘落下位置のずれ量 δ_x 、 δ_y および落下角 α 、 β の定義を示している。

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初期張力、減衰および重力を考慮していない。また、実験では金網設置時に初期たわみが生じているが、本解析では初期たわみは考慮していない。

4. 数値解析結果および考察

4.1 金網変形状

図-6には、重錘衝突後における金網の変形状の一例として、Case1における実験の連続写真と解析結果を時系列的に比較して示している。なお、本解析では実験における金網設置時の初期たわみを考慮していないため、金網のたわみが実験と比較して小さく示されており、直接的な比較は難しいものの、金網の全体の変形状を概ね再現しているものと考えられる。

4.2 金網たわみ量

図-7には、金網中央部および最大変位点におけるたわみ量の時刻歴波形を実験結果と解析結果を比較して示している。なお、黒の破線は過去に報告されている落下高さ $H = 20 \text{ m}$ から回転を加えずに自由落下させた場合の実験結果³⁾である。また、時間軸は重錘が金網に衝突した時刻を零としている。

実験結果に着目すると回転エネルギーの有無によって金網のたわみ波形に明確な差は生じていないことが確認できる。

次に解析結果に着目するとCase2を除き解析結果は実

表-1 重錘落下位置および落下角

実験 ケース名	金網展開直角方向 δ_x (mm)	金網展開方向 δ_y (mm)	正面落下角 α (°)	側面落下角 β (°)	角速度 ω (rad/s)	速度エネルギー E_v (kJ)	回転エネルギー E_r (kJ)	全エネルギー E_t (kJ)
Case1	417	34	160.5	79.1	27.225	49.6	7.4 (0.13)	57.0
Case2	371	0	103.4	69.4	31.414	48.4	9.9 (0.17)	58.3
Case3	115	58	75.2	111.4	23.319	43.6	8.6 (0.17)	52.2

括弧内の数値は全体エネルギーに対する回転エネルギーの割合を表している。

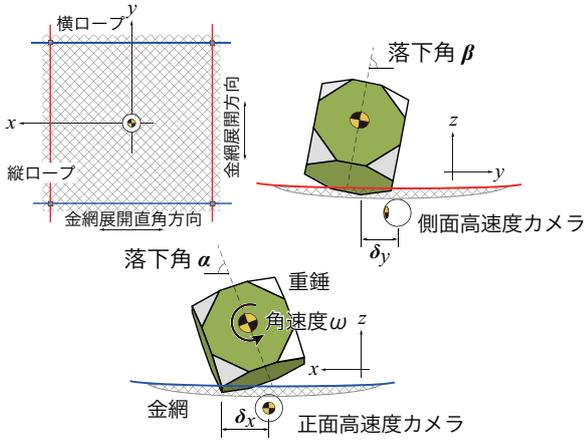


図-5 重錘落下位置および落下角の定義

実験結果と比較して最大たわみ量を若干小さく評価していることが分かる。この解析結果と実験結果における最大たわみ量の差は、解析において金網の初期たわみを考慮していないことによる重錘衝突面の形状やそれに起因する接触面積の差異によるものと推察される。

一方、波形の立ち上がり勾配および除荷勾配に関しては、解析結果と実験結果は概ね一致していることが分かる。

なお、Case2に関しては、解析結果に着目すると、実験結果における最大変位点のたわみ量を過小評価していることが分かる。これは、実験において重錘衝突後約100msでT-4ロープが破断したことにより、金網に局所的な変形が生じたことが要因と推察される。

4.3 ワイヤロープ張力

図-8および図-9には、縦および横ロープ張力の時刻歴波形を実験結果と解析結果を比較して示している。

図-8に示す縦ロープ張力の実験結果に着目すると、Case2を除き回転エネルギーの有無による明確な差は生じていないことが確認できる。Case2に関しては、回転エネルギー無と比べて波形の立ち上がり時刻が遅く作用継続時間も長くなっており、他のケースとは異なる挙動を示している。これは前述のT-4ロープ破断による影響と考えられる。

次に解析結果に着目すると、立ち上がり時刻に若干の差はあるものの立ち上がり勾配および最大値をほぼ適切に再現できていることが分かる。一方、作用継続時間に関しては、実験結果より長くなる傾向にあることが分かる。これは、解析においてロープ初期張力および減衰を考慮していないためと考えている。

図-9に示す横ロープ張力の実験結果に着目すると、最大値は全てのケースでほぼ等しく回転エネルギーの有無による明確な差は生じていないことが分かる。

次に解析結果に着目すると、実験結果の立ち上がり勾配

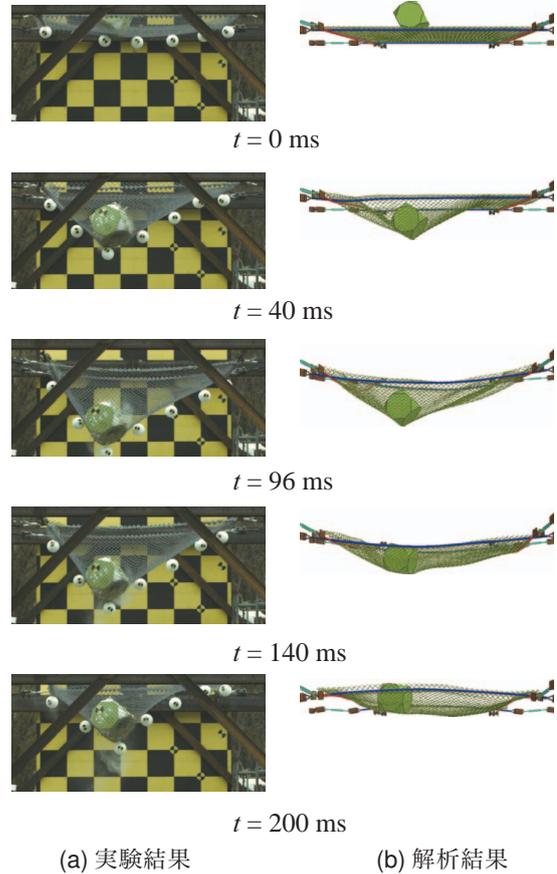


図-6 変形状況 (Case1)

および最大値と概ね一致していることが確認できる。なお、作用継続時間に関しては縦ロープ同様に実験結果より解析結果は長くなる傾向にあることが確認できる。今後、解析精度をより向上させるためには、金網の初期たわみおよびロープ初期張力を考慮して検討する必要があると思われる。

4.4 各種最大応答

図-10には、全3ケースにおける金網たわみ量および各ワイヤロープ張力の最大値を、実験結果を横軸に解析結果を縦軸に取って整理したものであり、図の45°の直線は解析結果と実験結果が等しいことを意味する。また、黄色の網掛け部分は、誤差が20%以内の領域を示している。

(a) 図のたわみに着目すると、金網中央部に関しては、解析結果は実験結果を高い精度で再現できていることが分かる。一方、最大変位点は、解析結果はいずれのケースにおいても実験結果を若干小さく評価する傾向にあるものの、ロープが破断したケースを除き解析結果は実験結果を20%程度の精度で再現可能である。

(b) 図および(c) 図に示す縦・横ロープ張力に着目する

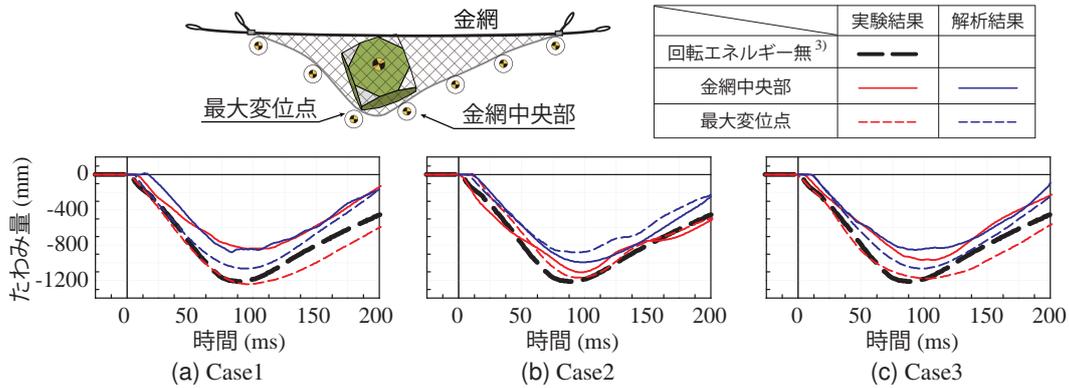


図-7 たわみ量

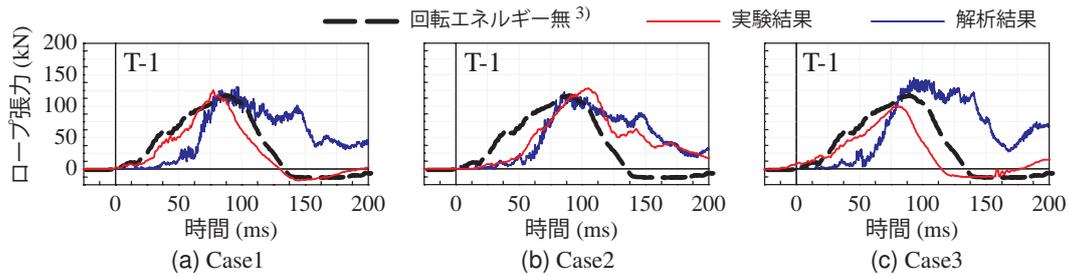


図-8 縦ワイヤロープ張力

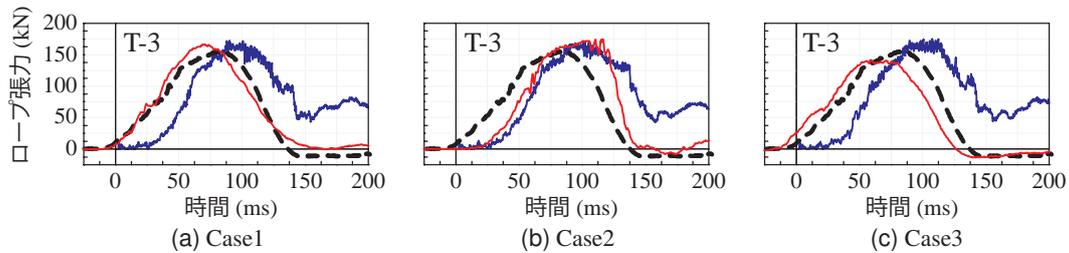


図-9 横ワイヤロープ張力

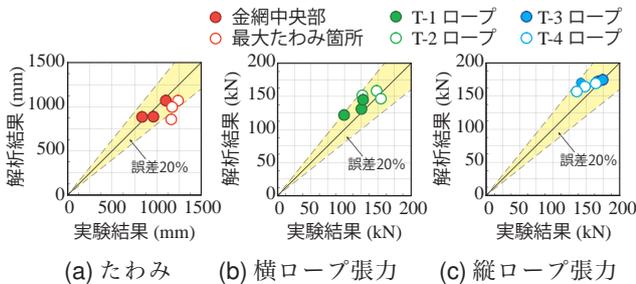


図-10 各種最大応答

と、解析結果は実験結果を若干大きく評価する傾向にあるものの、いずれのケースにおいても実験結果を20%程度の誤差範囲内で推定できることが分かる。

5. まとめ

本論文では、落石防護工に使用するひし形金網を対象に三次元衝撃応答解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると以下ようになる。

- 1) 提案の材料構成則および解析手法を用いることで重錘が回転エネルギーを有する場合においても金網のたわみ量および各ロープ張力の立ち上がり勾配および最大値をほぼ適切に再現可能である。

- 2) 金網のたわみ量および各ロープ張力に与える重錘の回転エネルギーの影響は、実験結果と同様に数値解析においても小さいことを確認した。

今後はロープ初期張力および金網の初期たわみを考慮して解析の精度をさらに向上させる予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) (公社)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例，2014。
- 3) 荒木恒也，今野久志，西弘明，佐々木哲也，小室雅人，田中優貴：落石防護網に使用するひし形金網の重錘落下衝撃実験，土木学会北海道支部論文報告集，第72号，A-45(CD-ROM)，2016。
- 4) 今野久志，西弘明，山澤文雄，加藤俊二，内藤直人，小室雅人：ポケット式落石防護網の落石衝突時における回転エネルギーの影響に関する実験的研究，土木学会北海道支部論文報告集，第72号，A-43(CD-ROM)，2016。
- 5) 小室雅人，西弘明，今野久志，荒木恒也，佐々木哲也：水平に設置された落石防護網の耐衝撃挙動に関する衝撃応答解析，鋼構造年次論文報告集，Vol. 23，657-663，2015。
- 6) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.