落石防護網用ひし形金網のモデル化に関する一検討

Numerical study on modeling of the diamond-shaped wire net for a rockfall protection nets

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	今野	久志 (Hisashi Konno)
(国研) 寒地土木研究所	正	員	荒木	恒也 (Nobuya Araki)
(国研) 寒地土木研究所	正	員	西	弘明 (Hiroaki Nishi)

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 するための落石対策工の一つとして,吊りロープや支柱, 金網,ワイヤロープ等の部材を組み合わせたポケット式 落石防護網がある.ポケット式落石防護網の設計は,落石 対策便覧¹⁾を参考に構成部材の吸収可能エネルギーおよ びエネルギー差を用いて行われているが,その設計法に 関しては,必ずしも十分な検証がなされてはおらず,い くつかの問題点も指摘されている²⁾.

ポケット式落石防護網は,金網やワイヤロープ等の構成部材が大きく変形し,落石荷重を受け止める柔構造であることから,現行設計法の妥当性を検討するためには, 構成部材のエネルギー吸収量を適切に推定・評価する必要がある.一方,これらの値を実験的検討^{3~4)}のみで評価 することは不可能であり,数値解析的^{5~6)}な検討が不可欠である.

このような背景のもと、本論文では、従来型のポケット 式落石防護網に用いられているひし形金網を対象にその 耐衝撃挙動に関する三次元衝撃応答解析を実施した.こ こでは、金網を膜要素と梁要素でモデル化した場合につ いて、別途実施した衝撃荷重載荷実験結果との比較によ り、両者の妥当性について検討を行った.なお、本解析 には LS-DYNA⁷⁾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¢)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¢)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 ルトを使用して結合している.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、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実施 した.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 による試験体中央の金網の鉛直変位である.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* =15,20,25mの3ケースについて数値解析を実施している.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.



図-1 試験体概要図









図-2 ひし形金網の形状と配置方向

3. 数值解析概要

3.1 解析モデル

図-3には、本数値解析で用いた2種類の解析モデル を比較して示している.(a)図は金網を膜要素でモデル 化した場合,(b)図は実際の形状を忠実に梁要素でモデル 化した場合の要素分割状況である.なお、その他の構成 部材に関しては両モデルで同一であり、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.膜要素モデルの場合には重錘一 金網間に、梁要素モデルの場合には金網の素線間および 重錘一金網素線間に、面と面の接触および剥離・すべり を伴う接触面を定義した.なお、接触面における摩擦に ついては静摩擦係数および動摩擦係数を0.4と設定した. また、境界条件は実際の実験条件と同様に柱基部を完全 固定としている.

数値解析は、重錘に落下高さ H から算出された衝突速 度を重錘に初速度として付加し、金網中央部に重錘が回転 することなく、水平に落下するものと仮定した.解析時間 は 200 ms とし、本数値解析では減衰を考慮していない.

3.2 材料構成則

図-4 (a)には、ワイヤロープの応力-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、各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、落石 対策便覧を参考に決定し、破断ひずみを5%と設定した. (b) 図には、膜要素モデルで使用した金網の応力-ひずみ 関係を示している.金網に関しては、重錘衝突位置近傍に おいて局所的な塑性化が生じるものと考えられるが、実 験では金網が破網すること無く、重錘を捕捉しているこ とから等方弾性体としてモデル化した.なお、弾性係数 は既往の研究成果を参考に*E*₁ = 400 MPa と設定した.

(c) 図には, 梁要素モデルで使用した金網の応力-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,梁要素モデルの 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,弾性体と仮定した.ま た,コンクリート重錘に関しても弾性体と仮定し,質量 300 kgとなるように単位体積質量を換算している.



ひし型金網 ターンバックル ターンバックル ロードセル メ メ (b) 梁要素モデル

図-3 数値解析モデル







4. 数値解析結果および考察

4.1 各種時刻歴応答波形

図-5には、ロープ張力(T1, T3)および試験体中央の 変位の実験結果と解析結果を比較して示している.なお、 時間軸のゼロは、重錘が金網に衝突した時刻を意味する. (a)および(b)図に示す縦および横ロープ張力に着目す



図-6 最大変位時における金網の変形状況 (H = 15 m)

ると、両モデルの数値解析結果は、実験結果の波形の立 ち上がりおよび最大値をほぼ適切に再現している.なお、 既往の研究⁵⁾では、金網を膜要素を使用してモデル化した 場合には、縦ロープ張力を実験結果と比較して大きく評価 する傾向にあることが報告されており、その要因として、 金網が有する剛性の異方性を考慮していないこと、実験 ではロープと金網の結合に結束コイルを用いているのに 対して数値解析では完全結合と仮定していることが挙げ られている.

一方,本論文では,前述のとおり各ロープと金網の接 合に素線の一山ごとにU字ボルトを使用して結合してい ることから,金網の異方性の影響が小さく,結果として 両モデルにおける解析結果に大きな差が生じていないも のと推察される.

なお、ロープ張力の作用継続時間は、落下高さが大きく なるほど長くなる傾向にある.また、解析結果は H = 25 mを除き,各ケースの実験結果より作用時間が長くなっている.なお, H=20,25mにおける実験結果の波形の 立ち上がり時刻が遅れている原因は,重錘が傾いた状態 で金網に衝突すること,および重錘が金網中央部に落下 していないことなどによるものと判断している.

(c) 図に示す金網のたわみ量に着目すると, 膜要素モデ ルも梁要素モデルにおいても, 波形の立ち上がり勾配(初 期勾配)は, 実験結果とほぼ一致している.一方で最大変 位量を見ると膜要素の場合には, 実験結果よりも大きく かつ除荷時の勾配も急であるのに対し, 梁要素の場合に は, 最大値および除荷勾配ともに実験結果とよく一致し ている.

4.2 変形状況

図-6には, *H*=15mにおける最大変位時刻の金網の変 形状況を比較して示している.

(a) 図に示す実験結果を着目すると、重錘が左側に回転



(a) 膜要素モデル



図-7 金網応力分布 (H = 25 m)

し,かつ金網中央点に落下しておらず,金網は非対称な 変形状況となっていることが分かる.一方,(b)図に示す 膜要素モデルの場合には,重錘端部からほぼ直線状に金 網が変形している.また,梁要素の場合には,膜要素と 比較して金網が曲線状に変形していることが分かる.

4.3 金網の応力分布

図-7には,落下高さH=25mにおける両モデルの最 大変位発生時刻における金網の応力分布を比較して示し てる.なお,膜要素はMises応力,梁要素は梁軸方向に発 生する応力である.

図より, 膜要素モデルに関しては, 重錘衝突位置から 同心円状に応力が分布していることが分かる.また, 金 網の端部の変形も縦・横で対称であることが分かる.

一方,梁要素モデルの場合には,応力が金網端部に向 かって分布しており,かつ重錘衝突位置に降伏応力を超 える応力が発生している.さらに金網端部の変形を見る と横ロープの方が縦ロープの方よりも大きく変形してい ることが分かる.これより梁要素を用いることによって 金網の異方性を再現可能であることが分かる.なお,解 析時間のコストに関しては,梁要素モデルは膜要素モデ ルの約1.8 倍程度である.

5. まとめ

本論文では、従来型のポケット式落石防護網に用いら れてい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により、縦・横ロープ張力および載荷点中央変位の作用時間に若干の差異が見られるものの波形の立ち上がり勾配および最大値について実験結果を適切に評価可能である。
- 2) 梁要素モデルについては、中央変位の除荷勾配および実験の金網の最大変位時の金網の変形状況を再現可能である。
- 金網の実際の形状を忠実にモデル化することで、金網の異方性を再現可能である。

今後は、素線径の異なる金網やロープと金網の結合条件 の異なる実験を対象に数値解析を行い、解析精度の向上 を図る予定である。

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) 山口悟, 今野久志, 西弘明, 加藤俊二, 小室雅人: 落 石防護網の実規模模型実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 22, 131-136, 2014.
- 山口 悟,今野久志,西 弘明,佐々木哲也,小室雅人:従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突 実験,鋼構造年次論文報告集,Vol. 21, 104-110, 2013.
- 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震撃挙動に関 する衝撃応答解析,鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, 657-6630, 2015.
- 平田健朗,小室雅人,西弘明,今野久志,山口悟:従 来型ポケット式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. 22, 137-143, 2014.
- Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.