落石防護柵の数値解析に用いる金網モデルの簡素化に関する一考察

A study of simplification about modeling wire-net for analyzing rock fence

(株)ライテク	〇正 員	久保 弦 (Yuzuru Kubo)
(株)ライテク		濱 晃子 (Akiko Hama)
(株)ライテク	正員	北島幹士 (Mikio Kitajima)

1. はじめに

平成29年12月に改訂がなされた落石対策便覧¹⁾では、 近年開発が進められている様々な形式の落石防護柵の導 入に対応するために、性能の検証法として統一的な実験 的検証法が示された。

しかし、落石防護柵の設置条件は多様であり、現地に 設置される落石防護柵が検証実験で使用する標準供試体 の形状寸法であること、および想定される落石の作用条 件等が実験条件と同じであることは望めないことから、 検証実験とは異なる条件における性能検討に当たっては、 部分的な実験や数値解析的手法等を用いて補完すること ができるとされる。

そのうち解析的手法については、先行研究²⁾により、 ひし形金網の素線を梁要素で忠実にモデル化し、別途実 施した重錘落下衝撃荷重載荷実験結果との比較により解 析モデルの妥当性を検討した事例が報告されている。こ れら金網の構造を忠実にモデル化する手法は、重錘衝突 時の挙動を少ない誤差で再現可能である一方、モデルの 構築等に手間を要し、多種多様な条件が存在する設計で の適用には実用的ではないという課題がある。

このような背景のもと、今回の報告では実設計への導 入を容易とすべく、金網の交点を剛結合とした梁要素で 再現した簡易的なモデルを用いて解析を試みた。落石エ ネルギー100kJ 程度の比較的小規模なエネルギー領域に おいて、実物実験時と同じ条件下における落石衝突時の 阻止面突出量に着目して解析を行い、考察を行った。

2. 検証概要

2.1 検証条件

検証条件を表-1 に、および実験供試体の外観寸法を 写真-1 に示す。構造条件は、柵高 4.0m、延長 30m(10m×3 スパン)とした。解析のために作成したモデ ルの外観寸法も実験供試体と同一とした。解析モデルの 外観寸法を図-1 に示す。重錘衝突位置は、中央スパン の中央部・柵高の 1/2 位置とした。落下高さは 32m と し、阻止面への衝突速度は25m/sとした。解析において は、柵面の 50cm 上方から初速度 24.86m/s を与えて自由 落下させ、阻止面衝突時の速度が 25m/s となるように設 定して実験条件との整合を取った。重錘の寸法及び質量 は実験条件と同一とした。

2.2 実物実験概要

実物実験は、実験供試体上にクレーンにて重錘を落下 目標位置にセットした後、所定の落下高まで引き上げ、

表-1 検証条件

		項目		条件
	構造条件	柵高	4. Om	
			延長	30m(10m×3スパン)
			支柱径	φ165.2
		金網		高強度金網3.2φ×50×50
検証条件	重錘		質量	0.35t
		舌鈺	一辺の寸法	0.580m
		里뽀	体積	0.138m3
		単位体積重量	2.536t/m3	
	衝突速度		25m/sec	
	衝突位置		スパン中央, 柵高1/2位置	
	落下高さ		32m	
		入力エネルギー		109kJ



写真-1 実験供試体外観寸法







合図とともにエアー式離脱装置を作動させる「鉛直落下 方式」を採用して実験供試体に衝突させた。実験供試体 は、重錘補足時の阻止面の回転を考慮し、水平面に対し 15°上方に傾けて設置した。

実験供試体の構造を図-2 に示す。支柱には図-3 に 示す ϕ 165.2 のモルタル充填鋼管を用いた。金網には高 強度金網 3.2 ϕ ×50×50 を使用した。金網上下の横方向 に 3×7- ϕ 16 のワイヤロープを横ロープとして取り付け た。また、横ロープの間に 6×24- ϕ 10 のワイヤロープ を支間で X 字となるように取付けクロスロープとした。 さらに 2 本の端末支柱には 6×24- ϕ 12 のワイヤロープ を縦方向に取り付けて縦ロープとした。各ワイヤロープ は結合コイルで金網と接続し、テークアップ(U ボルト+ ストッパー)やワイヤクリップ、シャックル等で支柱と 接続した。

ワイヤロープ張力を測定するために、柵面の横ロープ 及びクロスロープに接続したシャックルのひずみからワ イヤロープ張力を求めた。図-4 に計測箇所位置図を示 す。重錘加速度は、重錘中心部の空間に圧電型3軸加速 度センサーと記録計を設置し、センサーからの出力を 0.5ms 間隔で計測した。

2.3 数值解析概要

モデルを簡素化するために金網は各交点を剛結させた 梁要素平面モデルとした。本来、金網は写真-2 に示す ように、素線を編み込むことにより構造体を成している が、モデル上では交角 90°で交点ごとに剛結した梁要 素として構造体を再現した(格子間隔 50mm)。その際、 本来金網が有する素線間の自由な挙動が拘束されるとい





図-4 計測箇所位置図

う課題が生じる。よって、梁モデルの素線の弾性係数を 素線間の自由な挙動も加味した見かけの値とすることで、 上記課題を解決しようと試みた。

弾性係数の推定方法は、実物実験での最大突出量 2.877m に近い値が得られるよう、弾性係数を変数とし て繰り返し解析を行うことで推定した。その結果、今回 使用する金網規格 GF-2 $3.2\phi \times 50 \times 50$ の一般的な弾性 係数 205800N/mm2 に対し、0.15%ほどの値である 300N/mm2 とすることで突出量 2.856m を得たため、こ の値を採用した。最大突出時における変形状況を写真-3 に示す。

各種ワイヤロープは梁要素で再現した。断面積、弾性 係数、降伏応力、破断強度は JIS 規格を参考に決定し、 破断ひずみは 7%と仮定した。ただし、3×7 ワイヤロー プについてはロープの静的引張試験結果を参考とした。 支柱は鋼管とモルタルの複合断面であるが、鋼材単一断 面の梁要素で再現し、支柱の静的曲げ試験の結果から推 定した応力—ひずみ関係を適用した。

実際の落石防護柵は支柱を支持地盤内に根入れするこ とで地盤耐力を得ているが、今回の解析モデルでは根入 れ地盤の影響を考慮せず、支柱は地表面で固定端として いる。

実物構造においては、各種ワイヤロープはシャックル、 ワイヤクリップ、テークアップ等の接続部材を用いて支 柱と接続しているが、解析モデルでは各ワイヤロープを 支柱に取り付けた接続冶具(剛体)にピン結合で取り付け た。解析モデル上における各部材の取付状況を図-5 に 示す。 数値解析には、衝撃・構造解析ソフトウエア LS-DYNA を使用した。



写真-2 落石防護柵に使用されている金網



写真-3 最大突出時変形状況



図-5 各部材取り付け図

3. 検証結果

横ロープ張力の推移について、実験結果を図-6 に、 解析結果を図-7 に示す。各グラフ横軸のゼロ点は、重 錘が柵面に衝突した瞬間としている。実験では張力のピ ークが衝突後 0.15 秒後周辺にみられるのに対し、解析 では衝突後 0.19 秒程度の領域に現れている。どちらの グラフからも、支柱基部に近い測点 L12 および R12 に おいて、高いピーク値を計測しているが、これは柱上端 の横ロープ L1、R1 は支柱の柵面内変位によって張力が 小さく計測されたためだと考えられる。また、全体的に 解析値の方で横ロープ張力が大きい傾向が見られ、L12、 R12 の張力ピーク値の解析値は実験値の 1.56 倍である。 これは、実験では根入れ地盤など、供試体外へ衝撃が伝 達する要因が他に存在したのに対し、解析では支柱を地 表面で固定端としたことで、本来根入れ地盤で吸収され るはずだった衝撃をすべて供試体で吸収した、もしくは、 最大突出量を合わせる目的で、疑似的に金網の弾性係数 を低い値に設定したために、本来の弾性係数を用いた金 網以外の他部材のひずみが高くなったなどの原因が考え られる。





図-7 横ロープ張力(解析値)

また、実験と比べ解析の張力発現のタイミングが遅れ ている。これは、解析モデル中の金網の弾性係数を通常 よりも小さい値を採用したため、重錘を金網面内に保持 している時間が増えたため、ワイヤロープ等周辺部材へ の伝達が遅くなったものと考察される。同様の傾向は重 錘加速度の比較においても見られ、図-8 で示した実験 時に計測した重錘加速度は重錘衝突時から 0.3 秒程度で 収束していることに対し、図-9 で示した解析時の重錘 加速度は 0.38 秒程度まで収束に時間を要している。



図-9 重錘加速度(解析值)

4. まとめ

今回の検証により、以下の知見を得た。

- ・金網の有する素線間の自由な挙動を、梁要素を用いた 簡易的なモデルで再現を試みた結果、素線の弾性係数 を本来の 0.15%程度にまで低減させることで、金網の 最大突出量を再現することができた。
- ・横ロープ張力の解析値は実験値の 1.56 倍程度であった。これは、本来根入れ地盤で吸収されるはずだった 衝撃を供試体のみで吸収したこと、また疑似的に金網の弾性係数に低い値を使っていたが、そのため本来の 弾性係数を用いた金網以外の部材のひずみが高くなってしまったことなどの要因が考えられる。
- ・解析に使用した金網の弾性係数が小さいため、重錘を 金網面内に保持している時間が増え、ワイヤロープ等 周辺部材への伝達が遅くなり、結果、ワイヤロープの 張力発現時間や重錘加速度の収束時間に遅れが見られ た。

5. 今後の展望

今後は本論文で検証した実験ケース以外の各種実験ケ ースと解析の検証および、設計実務の現場における簡素 化した解析モデル適用の実現可能性について検証を進め ていく。

参考文献

- 1)(社)日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.12
- 小室雅人、西弘 明、今野久志、荒木恒也、田中優 貴:ひし形金網の耐衝撃挙動に関する数値シミュレ ーション、構造工学論文集、Vol.63A、pp.1084-1094、 2017.3