従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃性能に関する 数値シミュレーション

Numerical simulation of impact resistant performance of full scale pocket-type rockfall protection nets

室蘭工業大学	〇正員	小室邪	售人 (Masato Komuro)	土木研究所	正員	西	弘明 (Hiroaki Nishi)
土木研究所	正員	山口	悟 (Satoru Yamaguchi)	土木研究所	正員	今野	[;] 久志 (Hisashi Konno)
室蘭工業大学大学院	学生員	平田健	赴朗 (Takero Hirata)	土木研究所	正員	佐々	木哲也 (Tetsuya Sasaki)

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 するための種々の落石対策工が数多く建設されている. これらの落石対策工の一つに、吊りロープや支柱、金 網、ワイヤー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.従来型のポケット式落石防護網の設 計は、落石対策便覧(以後,便覧¹⁾)に基づき、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.しかしながら、落石衝突に対する応答メカニ ズムやエネルギー収支の解明という観点から行われた 検討事例²はごく限られている.

このような背景のもと,著者らは従来型のポケット式 落石防護網も含めて,落石対策工として求められる機能 の明確化と性能照査技術の確立に向けた検討を行って いる.ポケット式落石防護網は,落石荷重の作用時にお いて金網やワイヤーロープ等の構成部材に大きな変形 を伴う柔構造であることから,これらの検討を効率よく 遂行するためには,数値解析的な検討は不可欠であり, それらを援用して落石荷重作用時の構造部材の挙動を 正確に把握することが必要となる.

本論文では,著者らによって実施されたポケット式落 石防護網の実規模衝突実験³⁾を対象に,その耐衝撃性能を 適切に評価可能な解析手法を確立することを目的に,三 次元弾塑性衝撃解析を実施した.得られた解析結果を実 験結果と比較することにより,解析手法の妥当性を検証 した後に,エネルギー吸収機構等についても検討を行っ ている.なお、本解析にはLS-DYNA⁴⁾を使用している.

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図1には本実験で対象とした試験体の正面図および側 面図を,表1には試験体の設計条件を示している.落石 防護網を構成する各部材の諸元は,表に示すように便覧 の設計法を参考に落石の衝突前後のエネルギー差*EL*を 考慮し決定した.試験体の形状寸法は,従来型のポケッ ト式落石防護網とし,標準的な支柱間隔3mを基本とし て,金網全幅を5スパン分の15mとし,実験施設規模か ら金網高さを10m,支柱高さを3.5mに設定している. 金網は幅3.3mのものを重ね代0.3mでラップさせて設 置している.吊りロープ及び縦・横ロープにはφ18mm を,アンカーボルトにはD32(M30)×1000を用いている. なお,縦ロープの間隔は1.5m,横ロープの間隔は5.0m を基本に考えたが,重錘衝突の設定位置と重錘滑落装置 の高さの関係から,横ロープは図に示すように変則的な 配置としている.

2.2 実験方法

実験は、図1に示すように実験施設内の傾斜角度約 45°の法面に固定された重錘滑落装置を用いて、所定の 高さに設置した重錘を滑落させて試験体に衝突させる ことにより実施した.写真1には試験体の設置状況を 示している.

便覧における設計上の落石の作用位置は、上端横ロー



図 1 ポケット式落石防護網試験体の正面図及び側面図

写真1 試験体の設置状況

諸元 (kJ)落石持込エネルギー Ew 150.10 W = 1 t, H = 17 m, $\theta = 45^{\circ}$ 151.26 $E_N + E_R + E_P + E_{ER} + E_L$ 吸収可能エネルギー ET (a) 菱形金網*E*_N 61.49 5.0 $\phi \times 50 \times 50$ mm (b) 横 ロ ー プ *E*_R 14.78 $18\phi 3 \times 7$ G/O, L = 27 m (c) 支柱(ピン構造) E_P 0.00 H100 \times 100 \times 6 \times 8, L = 3.5m (d) 吊りロープ E_{ER} 0.71 $18\phi 3 \times 7$ G/O, L = 8 m (e)縦ロープ $18\phi 3 \times 7$ G/O, L = 10 m (f)エネルギー差 EL 74 28

D32 (M30)×1000

表1 試験体の設計条件

 $E_T > E_W$ となるように設計

横ロープ端部アンカ-

主っ	宝殿ケー	7

私 2 天阪ノ ス					
ケース名	落下高さ	入力エネルギー(kJ)			
	$H(\mathbf{m})$	設計時	実験時 [*]		
		E_{wd}	E_{we}		
1-1	6	53	50		
1-2	12	106	95		
1-3	6	53	49		
2-1	6	53	45		
2-2	18	159	142		
*台は南よりこととの河谷市は南よう然山					

高速度カメラによる実測衝突速度から算出

プと2段目の横ロープの中央,縦ロープ方向については 支柱間隔中央とされている.しかしながら、本実験にお いては、重錘滑落装置との位置関係から前述のように2 段目と3段目横ロープの中央位置に重錘を衝突させてい る. 重錘の質量は 1.0 ton, 形状は幅 80 cm × 高さ 75 cm × 長さ95 cm であり、衝突部が球面形状となっている(写 **真**2a図参照).

本実験における測定項目は、 ロープ端部のターンバッ クルに貼付したひずみゲージによるロープ張力,支柱H 形鋼の基部に貼付したひずみゲージによる軸力、高速度 カメラによる金網の二次元及び三次元変位等である、実 験時のロープ張力等の応答波形は, サンプリングタイム 0.1 ms でデータレコーダにて一括収録を行っている.

表2には、実験ケースの一覧³⁾を示している、実験は、 落下条件は落石持込みエネルギー Ew がエネルギー差 ELを除く可能吸収エネルギーを下回る落下高さH=6m を基準として,整数倍で設定した.

2.3 金網の挙動計測方法

本実験では、金網の挙動を詳細に把握するため、2台 の高速度カメラ(A, B)を用いた三次元挙動計測と、重錘 による入力エネルギーや最大変位量を確認するため1台 の高速度カメラ(C)で側面からの二次元挙動計測を行っ た. 高速度カメラ用のターゲットマーカに関しては図1 に示すように72点設置している. 高速度カメラのフレー ムレートは、カメラAおよびBで250コマ/秒、カメラCで 400コマ/秒である。その他の詳細な条件は文献3)を参照 されたい.

3. 数値解析の概要

3.1 解析モデルおよび解析手法

写真1に示すように、実際の試験体は三次元的に複雑



図 2 要素分割状況



(a) 重錘

写真2 重錘および金網

な形状を示しているが、それらの形状を全て数値解析モ デルに反映させることは煩雑かつ困難であることより, 本数値解析では二次元平面としてモデル化を行った. 図2には、数値解析に用いた要素分割状況を示している。 金網の寸法は縦10m,横15mとし,横ロープの長さは 27 m とした. 金網に関しては4節点シェル要素を, ワイ ヤーロープに関しては圧縮力を伝達しない2節点ケーブ ル要素を用いた。ワイヤーロープ要素の積分点に関して は、計算精度を向上させるために2×2 Gauss 積分を用い ている.なお、金網は複数本の素線を組み合わせた三次 元的な構造(写真 2b参照)であるが、それらを詳細にモ デル化することは、計算時間の観点から現実的ではない. したがって、本論文では金網を便宜的に二次元として考 え、シェル要素を用いて簡略化したモデルを使用した.

境界条件は、図2に示すようにワイヤーロープ端部を ピン支持としている. また, 金網とワイヤーロープは完 全付着と仮定している. 重錘と金網の間には, 面と面と の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義してい る. なお、接触面における摩擦は考慮していない.

数値解析は, 重錘に高速度カメラから算出された衝突 速度を初期速度として与えることにより行っている. 解 析時間は1,000 ms とした. なお, 減衰に関しては考慮し ていない.

3.2 材料構成則

図3には、ワイヤーロープおよび金網の材料構成則を 示している. 図3(a)にはワイヤーロープに用いた応 カーひずみ関係を示している.応力-ひずみ関係は, 表3に示す公称値を基本とし、破断ひずみを5%と仮定 して設定した.

図3(b)には金網に用いた応力-ひずみ関係を示して



表 3 材料物性值						
材料	単位体積	降伏	引張	一次	二次	ポアソ
	質量	応力	強度	弹性係数	弹性係数	ン比
	ρ (t/m ³)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	v
ロープ	7.85	915	1,270	98	7.43	0.3
金網	6.20	-	-	0.4	I	0
重錘	_	_	_	206	_	0.3

表 4 重錘衝突位置における最大水平変位一覧

実験	落下	最大水平変位(出力点:F4)(mm)			
ケース	高さ	解析結果	実験結果	$\delta_{a\max}$	
	<i>H</i> (m)	$\delta_{a\max}$	$\delta_{e \max}$	$/\delta_{e \max}$	
1-1	6	1,748	1,858	0.94	
1-2	12	2,003	1,974	0.98	
2-2	18	2,157	2,206	1.01	

いる.金網に関しては弾性体と仮定し,弾性係数*E*₁に関しては,既往の研究成果を参考に決定した.

なお,重錘に関しては,鋼弾性体と仮定し質量1tと なるように単位体積質量を換算している.表3には,解 析に用いた材料特性値を一覧にして示している.

4. 数値解析結果と考察

4.1 変形状況

図4には,解析結果から得られた重錘衝突位置(F4, 図1参照)における水平変位の時刻歴波形を実験結果と 比較して示している.図より,落下高さHにかかわら ず,数値解析結果は,重錘衝突初期から最大変位に至る まで非常によく一致していることが分かる.一方,落下 高さが大きいほど最大変位以降のリバウンド状態にお いて,数値解析結果は実験結果と異なる挙動を示して いる.これは,実験では3段目ロープ取付金具の破断 (H=12m)やアンカーボルトの引き抜け(H=18m)が生 じていることが要因と考えられる.表4には,重錘衝突 位置における最大水平変位について,数値解析結果を実 験結果と比較して示している.表より,数値解析結果と 実験結果の比は5%以内であり,数値解析結果は実験結 果の最大変位を精度よく再現できることが分かる.

4.2 ワイヤーロープ張力

図5には、横ワイヤーロープ張力の時刻歴波形について、実験結果と数値解析結果を落下高さごとに比較して示している。着目した箇所は、重錘衝突位置を中心にその上下に位置する2段目および3段目の横ロープ左側(L-2,L-3)である。



図4 重錘衝突位置における水平変位の時刻歴波形

(a)図に示す落下高さH=6mについて着目する. H=6 mに関しては同一条件で計3回の実験を実施しているこ とより、それらの実験結果を全て記載している.なお、 実験ケース1-1のL-3に関しては、40 kN 程度でレンジオー バーのため張力が頭打ちとなっている。図より、重錘衝 突位置よりも上方に位置するL-2の張力に関しては、数 値解析結果が実験結果を過大に評価していることが分 かる、最大張力を比較すると、実験結果では14kN程度 であるのに対し、数値解析結果は約34kNと約2.8倍大 きい. さらに, 重錘衝突後における張力の増加率におい ても,実験結果と比較して数値解析結果は大きく示され ている.一方,重錘衝突位置よりも下側に位置するL-3 を見ると、数値解析結果は重錘衝突後における張力の増 加傾向など、実験結果を非常に良く再現できている。さ らに, 張力の作用継続時間に関しても, 数値解析結果は 実験結果と比較して若干大きく評価しているものの、除 荷勾配は両者でよく一致していることが分かる.

次に落下高さH = 12 mの結果(b図参照)について考察 する.L-2における張力の時系列波形を見ると,数値解析 結果はH = 6 mの場合と同様に実験結果を過大に評価し ていることが分かる.また,L-3に関しても,H = 6 mの 場合と同様,数値解析結果は取付金具が破断するまでの 実験結果を精度よく再現しているものと考えられる.ま た,(c)図に示すH = 18 mの場合においても,H = 6,12mの場合と同様な傾向を示していることが分かる.ただ し,L-2の張力に関しては,落下高さHが大きくなるほ ど,数値解析結果は実験結果に近づく傾向にある.

なお,L-3の張力に関しては,落下高さHにかかわらず,数値解析結果における張力が118kN程度で横ばい



図 6 エネルギーの経時変化(H=6m)

となっているが,これはワイヤーロープの降伏張力と一 致していることより,数値解析上ではワイヤーロープが 降伏状態にあることを示唆している.

4.3 エネルギーの経時変化

図6には、エネルギーの経時変化の一例としてH=6 mにおける運動,内部および全エネルギーについて示し ている. (a)図より, 重錘の運動エネルギーは金網に衝 突後徐々に減少し、金網が最大変位を示す400 ms 前後 で最小値を示し、その後重錘のリバウンドとともに運動 エネルギーが増加している.また,金網の振動に伴う運 動エネルギーが増加していることが分かる。一方,ワイ ヤーロープの運動エネルギーはそれらに比較して小さ い.次に、(b)図に示す内部エネルギーに着目すると、 ワイヤーロープの内部エネルギーは、400 ms 前後で最大 値を示し、その後減少傾向にあることが分かる.なお、 内部エネルギーが最大値を示す時刻における金網とワ イヤーロープの分担率を比較すると、後者が約2/3程度 となることが確認される. (c)図より,解析時間内にお ける全エネルギーは入力エネルギーである 50 kJ を示し ており、本数値解析におけるエネルギー収支は適切であ ることが確認される.なお、外部仕事に関しては系全体 の重力による仕事を意味する.

5. まとめ

本論文では、ポケット式落石防護網の実規模衝突実験

を対象に、その耐衝撃性能を適切に評価可能な解析手法 を確立することを目的に、LS-DYNAを用いた三次元弾 塑性衝撃解析を実施した.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,重錘衝突を受ける金網の変形性状をほぼ適切 に再現可能である。
- 一方、ワイヤーロープの張力に関しては、衝突位置 より上側横ロープの張力を過大評価する傾向にあ り、実験結果を必ずしも再現できるまでには至らな かった。

今後は,異なる条件下における追加実験を実施するとと もに数値解析を試み,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.
- 原木大輔,香月智,田代元司:円柱形要素を用いた 個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析,土木 学会論文集A, Vol.65, No.2, pp.536-553, 2009.
- 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, pp. 104-110, 2013.
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2012.