

# 重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の耐衝撃挙動に関する 数値シミュレーション

Numerical simulation of dynamic behavior of conventional rockfall protection fence under impact loading

小室雅人<sup>\*</sup>, 瓦井智貴<sup>\*\*</sup>, 今野久志<sup>\*\*\*</sup>, 服部桃加<sup>\*\*\*\*</sup>, 荒木恒也<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Masato Komuro, Tomoki Kawarai, Hisashi Konno, Momoka Hattori, Nobuya Araki

<sup>\*</sup>博(工), 室蘭工業大学教授, 大学院工学研究科もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

<sup>\*\*</sup>博(工), 室蘭工業大学助教, 大学院工学研究科もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

<sup>\*\*\*</sup>博(工), (国研)土木研究所寒地土木研究所統括主任研究員(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

<sup>\*\*\*\*</sup>修(工), (株)大林組(〒108-8502 東京都港区港南 2 丁目 15 番 2 号)

<sup>\*\*\*\*\*</sup> 国土交通省北海道開発局(〒060-8511 札幌市北区北 8 条西 2 丁目)

キーワード：落石防護柵, 耐衝撃挙動, 有限要素法

Keywords: rockfall protection fence, impact-resistant behavior, finite element method

## 1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには、落石災害から道路交通の安全を守るために種々の落石防護工が設置されている。その一つに H 形鋼支柱、ワイヤロープ、ひし形金網(以後、単に金網)および間隔保持材から構成される従来型落石防護柵がある。同防護柵は支柱、ワイヤロープおよび金網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<sup>1)</sup>に基づき、構成部材ごと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、比較的小規模な落石を対象として設置される。しかしながら、実防護柵の損傷状況は、支柱基部の局部座屈や金網の貫通等、設計では想定していない事例も確認されている<sup>2), 3)</sup>。

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合理的な設計法の確立を最終目的とした種々の実験を実施している<sup>4), 5)</sup>。しかしながら、同構造物は各構成部材の弾塑性変形により落石エネルギーを吸収することから、より詳細な検討を行うためには実験的検討のみならず数値解析的検討も必要不可欠である。

このような背景より、本論文では、重錘がワイヤロープ間の金網に直接作用する場合を想定し実施した重錘落下衝撃実験<sup>6)</sup>を対象に、金網をはり要素、かつワイヤロープを固体要素でモデル化した三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、実験結果と数値解

析結果を比較することにより、解析結果の妥当性を確認するとともに、その耐衝撃挙動を数値解析的に検討した。なお、本解析には LS-DYNA(Ver. R9)<sup>7)</sup>を使用した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図 - 1 には、本研究で用いた試験体および試験体設置用の鋼製型枠架台の形状寸法を示している。試験体は、支柱間隔が 3 m の従来型落石防護柵を模擬し、ワイヤロープを 300 mm 間隔に 7 本配置した後、索線径 3.2 mm の金網を設置した。また、落石がワイヤロー

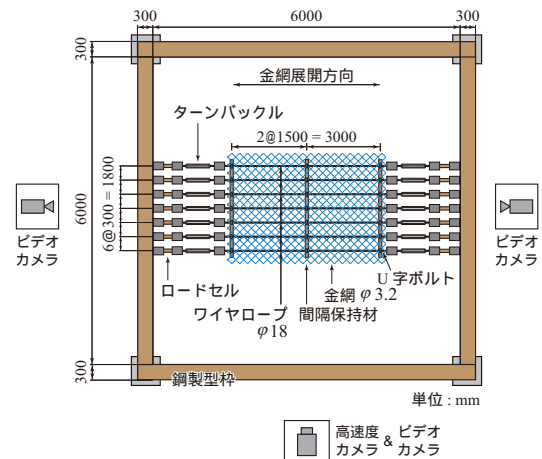


図 - 1 試験体の形状寸法

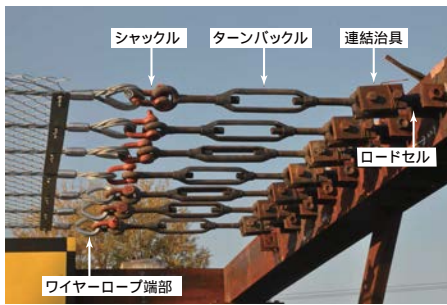


図 - 2 ワイヤロープ端部の固定状況

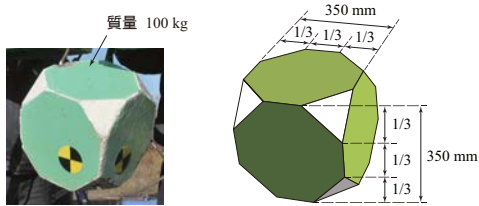


図 - 3 重錘の形状寸法



図 - 4 実験状況

ブを押し開き金網をすり抜けることを抑制するために設置されている間隔保持材は、ワイヤロープおよび金網を介して U 字ボルトで固定されている。ワイヤロープには、1 本あたり 5 kN 程度の初期張力を導入している。また、ワイヤロープの両端部は、図 - 2 に示すように、シャックル、ターンバックル、連結治具およびロードセルを介して鋼製型枠に接続されている。

## 2.2 実験方法および実験ケース

実験は、重錘をトラッククレーンにより所定の高さまで吊り上げ、所定の位置に精度よく落下するようにガイドロープを介して自由落下させることにより行った。図 - 3 には、実験に使用したコンクリート製重錘を示している。重錘は、スイスの SAFEL<sup>8)</sup> のガイドラインに準拠し、ワイヤロープ間隔 (300 mm) よりも大きく、外寸が 350 mm で質量 100 kg のものを使用した。また、重錘角部の三角形面(図 - 3 参照)が金網と平行になるように落下させた。図 - 4 には、重錘落下衝撃実験状況を示している。

表 - 1 には実験ケースの一覧を示している。実験

表 - 1 実験ケース一覧

実験ケース	重錘の種類	落下高さ $H$ (m)	衝突位置
C-H25/30	コンクリート製	25, 30	中央
C-H5/7.5/10	(質量: 100 kg)	5, 7.5, 10	端

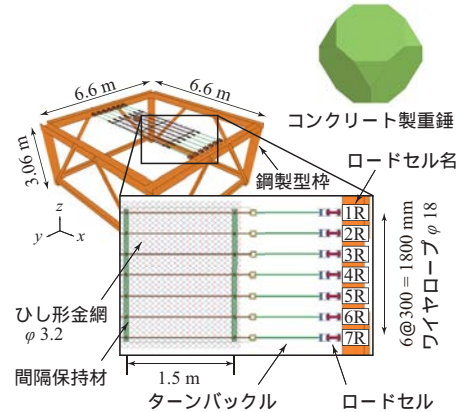


図 - 5 有限要素モデル

は、落下位置および落下高さを変化させた全 5 ケースについて実施した。実験ケース名の第 1 項目はコンクリート重錘を、第 2 項目は重錘の落下高さを示し、 $H$  に付随する数字は落下高さ  $H$  を示している。測定項目は、1) 重錘上面に設置したひずみゲージ型加速度計による加速度、2) 高速度カメラから得られる載荷点変位、および 3) ワイヤロープ両端のロードセルによるロープ張力である。

## 3. 数値解析概要

### 3.1 解析モデル

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。鋼製型枠および間隔保持材には 4 節点シェル要素、金網およびターンバックルには 2 節点はり要素、それ以外については全て 8 節点固体要素を用いた。また、各要素の積分点数は、8 節点固体要素は 1 点積分、4 節点シェル要素は断面内板厚方向に 3 点積分、2 節点はり要素は 4 点積分とした。

境界条件は、実験条件と同一となるように鋼製型枠支柱底部を完全固定とした。実験では、連結治具とロードセル間およびロードセルと鋼製型枠間はボルトを用いてピン結合されていることより、本解析モデルにおいてもボルトをはり要素でモデル化することで、それぞれをピン結合としている。なお、シャックルとターンバックル間およびターンバックルと連結治具間は、完全結合とし剥離やすべりは考慮していない。

また、金網の素線間に線と線の接触を、金網とワイヤロープあるいは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。接触解析にはペナ

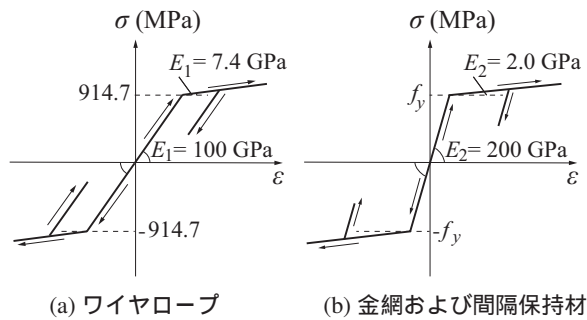


図 - 6 応力 - ひずみ関係

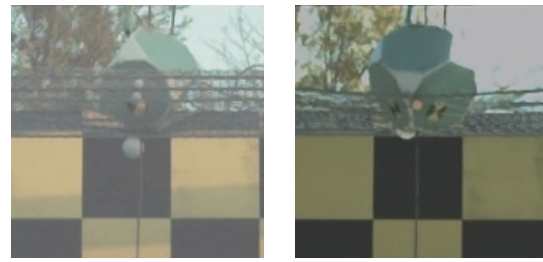


図 - 7 カメラ撮影による重錘姿勢の一例

ルティ法を採用した。なお、いずれの接触面においても剥離およびすべりを考慮し、予備解析を参考に摩擦係数は 0.4 と設定した。

### 3.2 材料構成則

図 - 6 には、ワイヤロープ、金網および間隔保持材の応力 - ひずみ関係を示している。

(a) 図に示すワイヤロープの応力 - ひずみ関係は落石対策便覧<sup>1)</sup>を参考に設定し、パイリニア型の等方硬化則を適用した。ここで、1 次弾性係数  $E_1$ 、2 次弾性係数  $E_1'$  および降伏応力  $f_y$  は、それぞれ  $E_1 = 100 \text{ GPa}$ 、 $E_1' = 7.4 \text{ GPa}$ 、 $f_y = 914.7 \text{ MPa}$  と設定した。

(b) 図に示す金網および間隔保持材についてもワイヤロープと同様の構成則を採用し、1 次弾性係数  $E_2 = 200 \text{ GPa}$ 、2 次弾性係数  $E_2' = 2 \text{ GPa}$  とした。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が、ここでは使用した金網の鋼材検査証明書(ミルシート)を参考に、その引張強さが 396 MPa であることから SS400 材相当と判断し、降伏応力  $f_y$  を  $f_y = 245 \text{ MPa}$  と設定した。

間隔保持材の降伏応力に関しては、ミルシートを参考に降伏応力  $f_y = 385 \text{ MPa}$  とした。降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。なお、ワイヤロープ、金網および間隔保持材の単位体積質量  $\rho_s$ 、ポアソン比  $\nu_s$  には公称値を用いることとし、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$  とした。

鋼製型枠、ロードセル、ターンバックルおよびシャックルに関しては、実験時に塑性化が確認されていないことより、弾性体と仮定し、単位体積質量  $\rho_s$ 、弾性係数  $E_s$ 、ポアソン比  $\nu_s$  にはそれぞれ公称値  $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$  を用いた。また、重錘も同様に弾性体と仮定し、単位体積質量は重錘質量と等価となるように解析モデルの体積で除した値を入力している。

### 3.3 数値解析手法

解析は、重錘の自由落下時における抵抗がないものと仮定し、落下高さ  $H$  から算出された衝突速度を重

錘の全節点に付加させることで実施した。

重錘の落下姿勢および衝突位置は、試験体正面に設置した高速度カメラおよび試験体の正面、左右に設置した 3 台のビデオカメラ(図 - 1 参照)映像を詳細に分析し、可能な限り解析条件に反映させることとした。図 - 7 には、高速度カメラより撮影した重錘衝突時の落下姿勢として、C-H25/C-H5 の例を示している。

解析では、このように決定した落下姿勢を保持した状態で、実験時と同じ位置で金網に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。なお、数値解析時間は 200 ms とし、ワイヤロープの初期張力、減衰および重力については考慮していない。

## 4. 数値解析結果

### 4.1 重錘の落下姿勢や衝突位置の影響

図 - 8 には、落下姿勢や衝突位置が動的応答特性に及ぼす影響を検討するために、それらを反映させた場合と重錘を水平に理想化させた状態でロープ間の中央に衝突させた場合の各種応答波形を比較して示している。ここでは、その一例として C-H25 の結果を示す。

(a) 図に示す重錘衝撃力に着目すると、波形の立ち上がりや波形形状は両解析結果でほぼ等しく、かつ実験結果ともよく対応していることが分かる。また、(b) 図に示す載荷点変位に関しても、両解析結果は実験結果と比較して最大変位を若干過大に評価するものの、波形の立ち上がりは実験結果とよく対応している。一方、(c) 図に示すロープ張力を見ると、両解析結果に大きな差異が見られる。これは、理想的な条件下では (i) 図に示すようにロープ間の中央に重錘が落下すると仮定しているのに対し、実験時には (ii) 図に示すように 4R 側に偏心して落下し、かつ重錘の姿勢も理想条件とは若干異なることが要因と考えられる。また、5R のロープ張力を見ると、理想条件で落下させた場合では衝突初期に張力が複数回励起しているのに対し、実験条件で落下させた場合にはそのような現象は見られず実験結果とよく対応していることが分かる。

これより、落下姿勢や衝突位置が数値解析結果に大

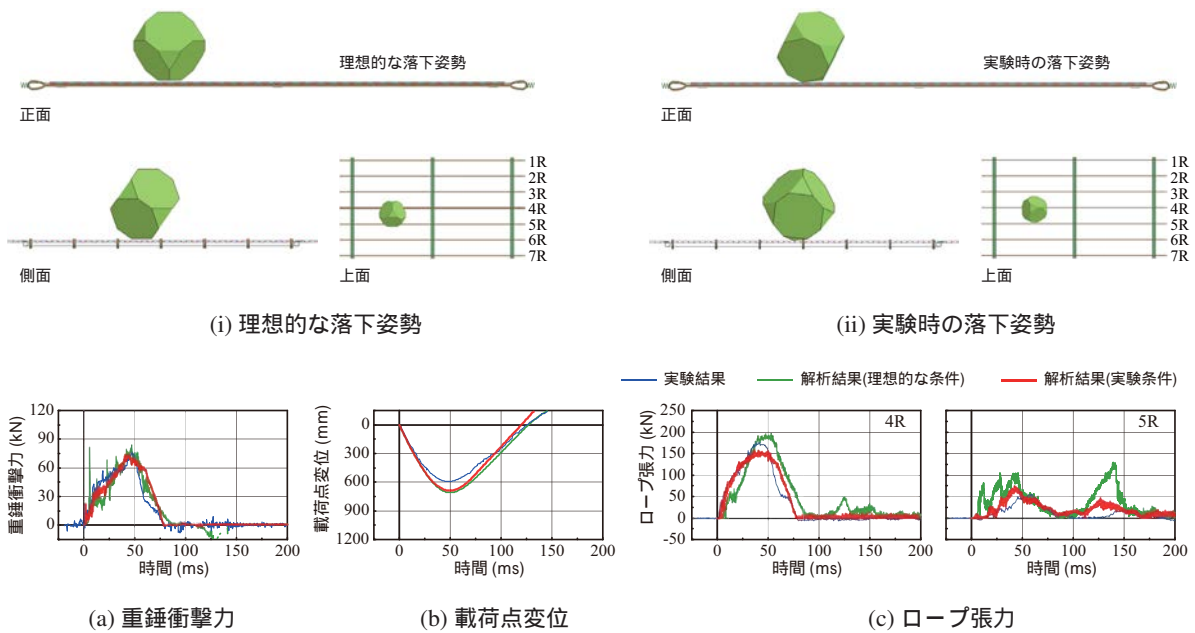


図 - 8 重錘の落下姿勢による影響の一例(C-H25)

大きく影響することから、以降の検討では、全て実験条件を可能な限り正確に反映させた数値解析結果を用いて行うこととする。

#### 4.2 各種応答波形

図 - 9 には、全てのケースに関する重錘衝撃力、载荷点変位およびロープ張力の時刻歴応答波形について実験結果と解析結果を比較して示している。時間軸は重錘が金網に衝突した時刻を基準にしている。なお、ロープ張力は、ロープ両端のロードセルにて測定したが、いずれのケースにおいても左右でほぼ同等の波形性状を示していることから、ここでは片側の測定結果(1R~7R)のみを示している。また、ロープ張力は衝突位置近傍の2本のロープが大きく、衝突位置から離れるに従って小さくなることから、ここでは衝突位置近傍の2本の応答波形のみを示した。なお、C-H30およびC-H10に関しては、重錘が金網に衝突後、加速度計のケーブルが破断したためデータが最後まで記録されていない。

(a) 図より、重錘衝撃力波形の実験結果に着目すると、落下高さ  $H$  が高いほど最大重錘衝撃力が大きくなる傾向が見られる。一方、数値解析結果に着目すると、計測に不備があった2ケース(C-H30/10)を除き、実験結果の立ち上がり勾配、荷重継続時間および最大衝撃力をほぼ適切に再現されていることが分かる。

(b) 図より、载荷点変位波形における実験結果を見ると、金網を貫通したC-H30の場合を除き、重錘は最大変位到達後、リバウンド状態に至ることが分かる。しかしながら、端部载荷のC-H10の場合に関しては、最大値到達後リバウンドが生じていない。これは、図 - 10 に示すように重錘がワイヤロープを押し

開きすり抜けるものの、重錘のガイドロープが金網やワイヤロープに引っかかり、重錘が宙吊りになったことによるものである。なお、ガイドロープによる拘束がない場合には、重錘は地面に衝突していたものと推察される。また、最大载荷点変位は、落下高さ  $H$  が高いほど大きくなる傾向が見られる。一方、数値解析結果に着目すると、金網の貫通やガイドロープによる拘束があった実験ケースを除き、波形の立ち上がりから最大変位に至るまで実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。

(c) 図より、ロープ張力波形における実験結果に着目すると、ロープ張力は一つの主波動からなることが分かる。実験ケースC-H30/10では、重錘が1)ロープ間をすり抜ける、あるいは2)金網を貫通したため、張力が急激に減少している。また、実験ケースC-H30/5を除き衝突位置近傍のロープで張力の大きさに差が見られることが分かる。これは、前述と同様に重錘の落下姿勢や衝突位置が影響しているものと推察される。一方、数値解析結果に着目すると、金網を貫通したC-H30の場合や端部载荷のC-H10の場合を除き、実験結果のワイヤロープ張力をほぼ適切に再現可能であることが分かる。

#### 4.3 試験体の変形状況

図 - 11 には、最大変位発生時刻を含む所定の時刻における試験体の変形状況の一例として、C-H25の場合について実験結果と解析結果を比較して示している。図より、C-H25の場合には重錘がロープ上に落下しており、重錘はロープと金網によって捕捉されていること、および解析結果は実験結果の金網やロープの変形状況をほぼ適切に再現していることが分かる。

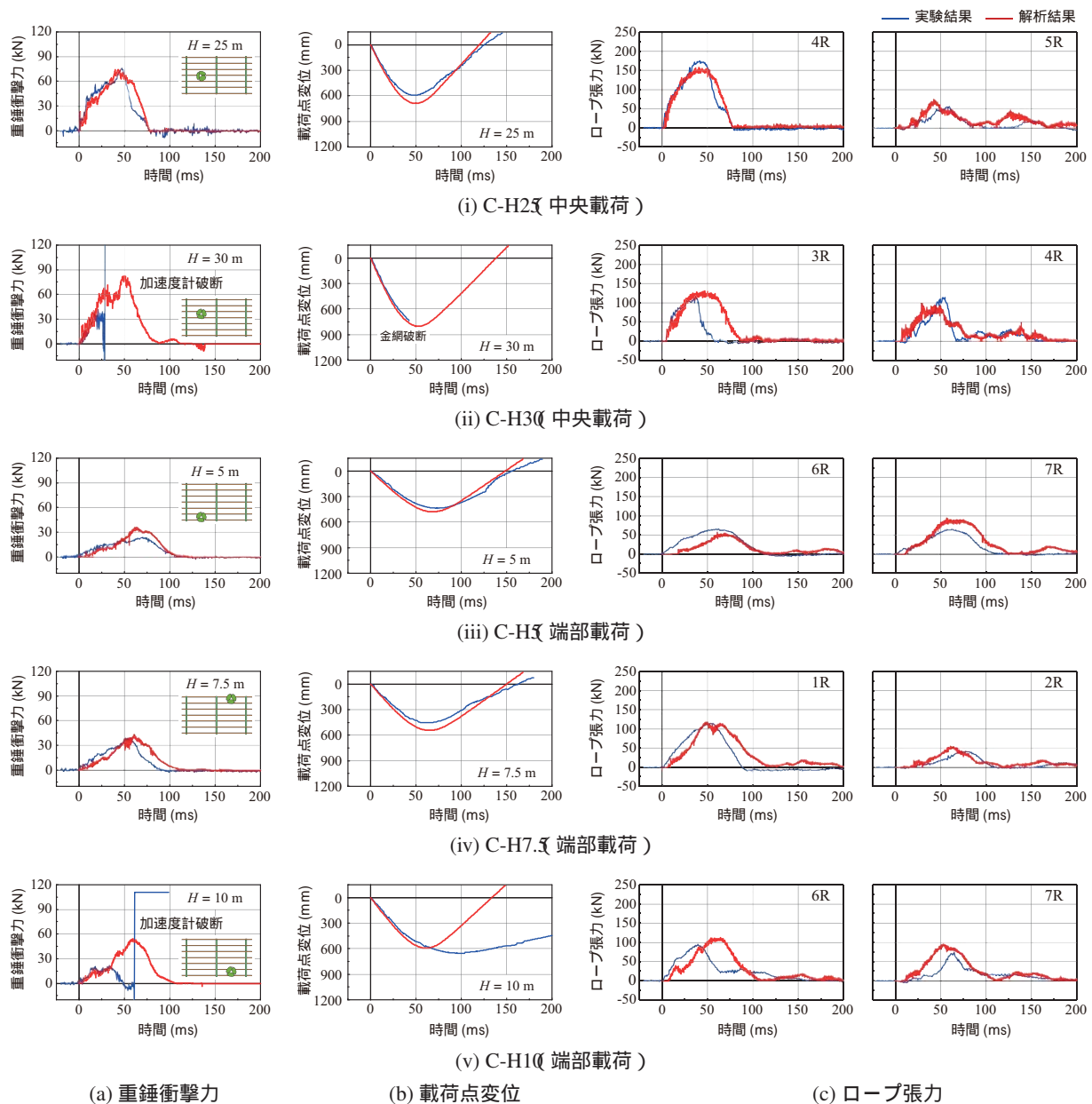


図 - 9 各種応答波形



図 - 10 実験終了後の試験体状況(C-H10)

#### 4.4 金網およびワイヤロープのひずみ分布

図 - 12 には、最大変位発生時刻における重錘衝突位置近傍の金網およびワイヤロープの塑性ひずみ分布の一例を示している。ここでは、落下高さ  $H$  が大きい C-H25/30 の結果を示している。

実験結果において破網が確認されていない C-H25 の場合における結果(a 図参照)を見ると、金網および

ワイヤロープには大きな塑性ひずみは生じていない。一方、実験時に破網した C-H30 の場合 b 図参照 には、重錘の角部近傍で局所的に 20% を超える塑性ひずみが発生していることが分かる。これより、金網の構成則モデルに適切な破断ひずみを設定することで、金網の破網を再現できる可能性があるものと推察される。

#### 4.5 最大応答値の比較

図 - 13 には、最大応答値について解析結果と実験結果を比較して示している。なお、ロープ張力に関しては、落下位置近傍の 2 本の結果である。また、金網の貫通があったケースは除いている。

(a) 図に示す重錘衝撃力を見ると、加速度計のケーブルが破断した 2 ケースを除くと、数値解析結果は 20% の誤差内で再現可能であることが分かる。また、

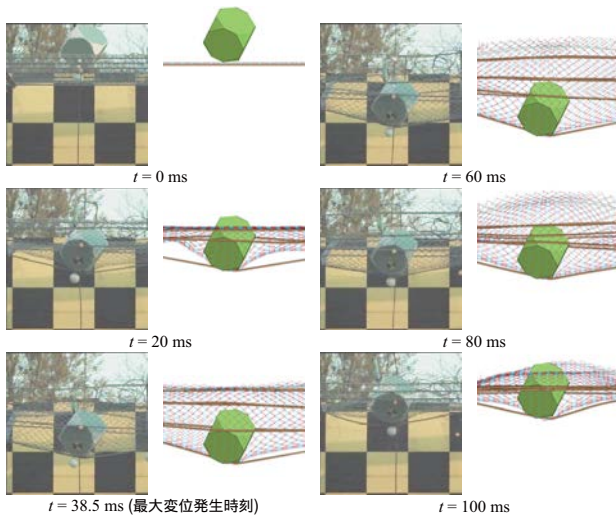


図 - 11 試験体の変形状況(C-H25)

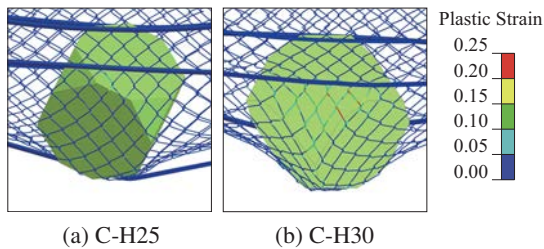


図 - 12 最大変位時刻における金網およびワイヤロープの塑性ひずみ分布の比較

(b) および (c) 図に示す載荷点変位やロープ張力に関しても、実験結果の最大載荷点変位およびロープ張力を 20% 程度の誤差内で再現可能であることが分かる。なお、全体的に見ると、数値解析結果は実験結果よりも大きく示されていることより、安全側の評価となっていることが分かる。

## 5. まとめ

本論文では、重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の耐衝撃挙動を適切に再現することを目的に、金網をはり要素、ワイヤロープを固体要素でモデル化した三次元弾塑性衝撃応答解析手法を提案し、実験結果との比較によってその妥当性を検討した。本研究で得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- 1) 実験結果を適切に再現するためには重錘の落下姿勢や衝突位置を適切に解析モデルに反映させる必要がある。
- 2) 重錘の落下姿勢や衝突位置を適切に解析モデルに反映させることにより、実験結果の重錘衝撃力、載荷点変位およびロープ張力をほぼ適切に再現可能である。
- 3) また、重錘の捕捉現象も概ね再現可能である。

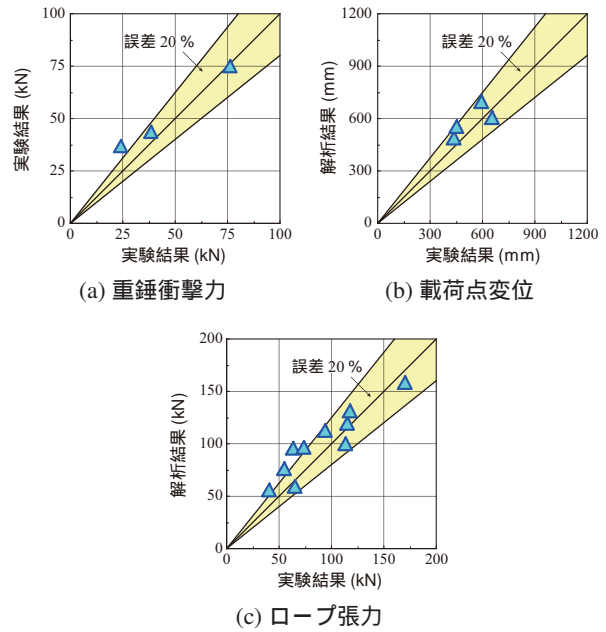


図 - 13 各種最大応答値の比較

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) (公社)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例, 2014.
- 3) (国研)土木研究所：高エネルギー吸収型落石防護工等の性能照査手法に関する研究，共同研究報告書，第 491 号, 2017.
- 4) 今野久志, 小室雅人, 西弘明, 荒木恒也, 岸徳光：従来型落石防護柵に用いられる間隔保持材の設置効果に関する研究，鋼構造年次論文報告集, Vol. 25, pp. 151-158, 2017.
- 5) 荒木恒也, 今野久志, 寺澤貴裕, 小室雅人, 田畑翔大：従来型落石防護柵の実規模重錘衝突実験，平成 29 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 74 (CD-ROM), A-04, 2018.
- 6) 今野久志, 荒木恒也, 寺澤貴裕, 小室雅人, 岸徳光：重錘落下衝撃実験による従来型落石防護柵の落石すり抜けに関する研究，平成 29 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 74 (CD-ROM), A-07, 2018.
- 7) Hallquist, J. O.: LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.
- 8) Werner Gerber: Guideline for the approval of rockfall protection kits, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL), Swiss Federal Research Institute (WSL), 2001.