



重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の衝撃応答解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 土木学会 公開日: 2020-07-20 キーワード (Ja): キーワード (En): rockfall protection fence, elasto-plastic FE analysis, falling-weight impact loading, impact resistant behavior 作成者: 小室, 雅人, 服部, 桃加, 今野, 久志, 荒木, 恒也 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010246

重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の 衝撃応答解析

小室 雅人¹・服部 桃加²・今野 久志³・荒木 恒也⁴

¹正会員 博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 くらし環境系領域 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)
E-mail: komuro@mmm.muroran-it.ac.jp

²学生員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

³正会員 博(工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

⁴非会員 国土交通省北海道開発局 小樽開発建設部 小樽道路事務所 (〒 047-0036 北海道小樽市長橋 4 丁目 14-34)

本論文では, 従来型落石防護柵模型の耐衝撃挙動や保有性能を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的に, 柵の金網を梁要素, ワイヤロープを固体要素を用いて詳細にモデル化した三次元弾塑性衝撃応答解析手法を提案し, 重錘質量や載荷点位置を種々変化した重錘落下衝撃荷重載荷実験結果と比較する形でその妥当性に関する検討を行った. 検討の結果, 1) 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こと, 2) 重錘の捕捉やロープ間のすり抜け現象もほぼ適切に再現可能であること, が明らかとなった.

Key Words: rockfall protection fence, elasto-plastic FE analysis, falling-weight impact loading, impact resistant behavior

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. その一つに図-1に示すような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, 金網, ワイヤロープおよび支柱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¹⁾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場合が多い. 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(図-2参照)等, 設計では想定していない事例も確認されている^{2),3)}. 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^{4),5)}. 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の検討も必要不可欠である.

このような金網と鋼部材から構成される鋼製防護柵あるいは防護網に関する数値解析に関しては, 有限要素法に代表される連続体解析手法を用いた研究^{6),7)}や個別要



図-1 従来型落石防護柵



図-2 損傷事例

素法(DEM)やSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法などの不連続体解析手法を用いた研究が報告されている^{8),9),10)}.

前川ら⁶⁾は緩衝装置を有するポケット式落石防護網を対象に, また著者ら⁷⁾は従来型ポケット落石防護網を対象に有限要素法を用いた弾塑性衝撃応答解析を実施し, 解析手法の妥当性を実験結果と比較することで検証し



しかしながら、これらの研究は実規模に近い実験条件で実施し、主に防護網あるいは防護柵の全体挙動に着目して検討を行っているため、重錘がワイヤロープ間に直接作用するような局所的な挙動性状に関する検



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¹¹⁾を対象に、金網を梁要素、かつワイヤロープを固体要素を用いて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共に、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) ¹²⁾を使用した。

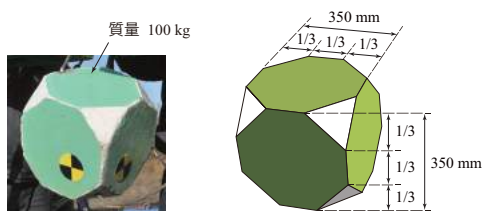
2. 実験概要

図-3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3mの従来型落石防護柵を模擬し、ワイヤロープを300mm間隔に7本配置した後、素線径3.2mmの金網を設置した。金網（目合い50mm）は、図-4に示すように、山形に折り曲げられた素線を互いに交差させたものであり、編み込みの方向により剛性が異なる異方性を有する。本実験では、金網の展開方向を実構造物と同じくワイヤロープの軸方向として設置した。また、落石がワイヤロープ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5kN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-5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。

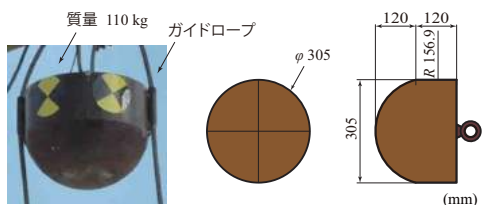
図-6には、従来型落石防護柵模型の重錘落下衝撃実験状況を示している。実験には、図-7に示すようなコンクリート製と鋼製の2種類の重錘を用いた。コンクリート製重錘は、スイスのSAFEL¹³⁾のガイドラインに準拠し、ワイヤロープ間隔(300mm)よりも大きく、外寸が350mmで質量100kgのものを使用した。一方、鋼



図-6 実験状況



(a) コンクリート製重錘



(b) 鋼製重錘

図-7 重錘の形状寸法

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
S-H10/15/20	鋼製	10, 15, 20	中央
S-H2.5/5	(質量: 110 kg)	2.5, 5.0	端

製重錘に関しては、ワイヤロープ間隔とほぼ等しい直径 ($\phi = 305$ mm) を有し、その質量はコンクリート製重錘とほぼ等しい 110 kg とした。なお、その先端は球形状である。

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。また、コンクリート製重錘では、重錘角部の三角形面 (図-7 参照) が金網と平行になるように落下させた。表-1 には実験ケースの一覧を示している。実験は、重錘形状、落下位置および落下高さを変化させた全 10 ケースについて実施した。実験ケース名の第 1 項目は、重錘の種類 (C: コンクリート製, S: 鋼製)、第 2 項目

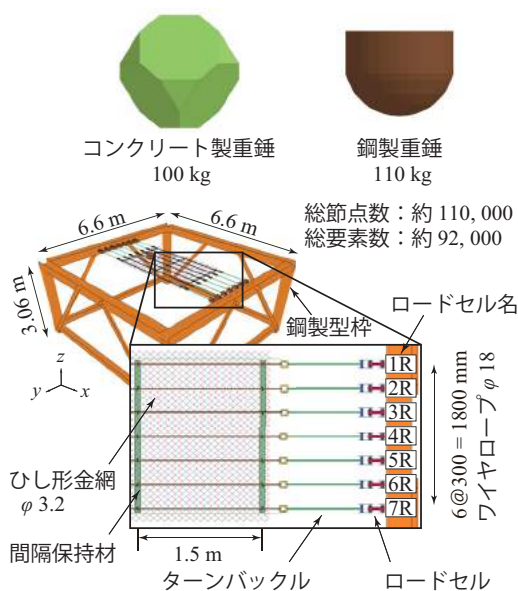


図-8 有限要素モデル

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载荷点変位、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

(1) 解析モデル

図-8 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 節点梁要素、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 節点梁要素は 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。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には、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梁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には、完全結合とし剥離やすべりは考慮していない。

なお、このような実験を対象に数値解析的検討を行う場合には、個別要素法等に代表される不連続体解析手法の適用も考えられる。しかしながら、全ての実験データを適切に再現できるパラメータの設定は困難であることから、本論文では設定パラメータが比較的少ない連続体解析手法を用いることとした。

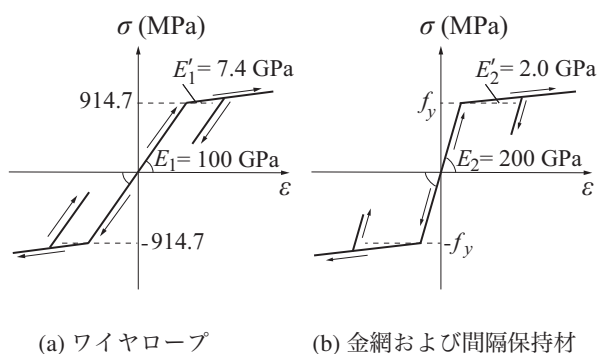


図-9 応力-ひずみ関係

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。なお、接触解析には、ペナルティ法を採用している。また、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(後述)や既往の文献¹⁴⁾を参考に摩擦係数は0.4と設定した。

(2) 材料構成則

図-9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¹⁾を参考に決定しており、バ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 $E_1 = 100$ GPa, $E'_1 = 7.4$ GPa, $f_y = 914.7$ 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 $E_2 = 200$ GPa, 2次弾性係数 $E'_2 = 2$ 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。本研究では、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 $f_y = 245$ 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 $f_y = 385$ 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 ρ_s 、ポアソン比 ν_s には公称値を用いることとし、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³, $\nu_s = 0.3$ 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 ρ_s 、弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s にはそれぞれ公称値($\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³, $E_s = 200$ GPa, $\nu_s = 0.3$)を用いた。また、各重錘も同様に弾性体と仮定し、単位体積質量は重錘質



図-10 ビデオカメラ撮影による重錘の姿勢の一例

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) 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 ($v = \sqrt{2gH}$) を重錘の全節点に付加させることで実施した。従って、重錘の落下現象については解いていない。

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-3参照)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-10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。

また、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

(1) 摩擦係数の影響

本解析では、金網の素線間や金網とロープ間に接触面を定義している。ここでは、接触面における摩擦係数 f を影響を検討するために、摩擦係数を $f = 0, 0.4, 1.0$ と3種類に変化させた場合について数値解析を実施し、実験結果との比較によって適切な摩擦係数の同定を試みた。

図-11には、コンクリート製および鋼製重錘を用いたC-H25/S-H15における載荷点変位について、解析結果と実験結果を比較して示している。(a) 図より、コンクリート製重錘の場合には、載荷点変位に及ぼす摩擦係数の影響は小さいことが分かる。これは、コンクリート製重錘の場合には、その外寸がロープ間隔よりも大きいことから、重錘とロープの法線方向衝突成分が卓越するためと推察される。一方、(b) 図に示す鋼製重錘の

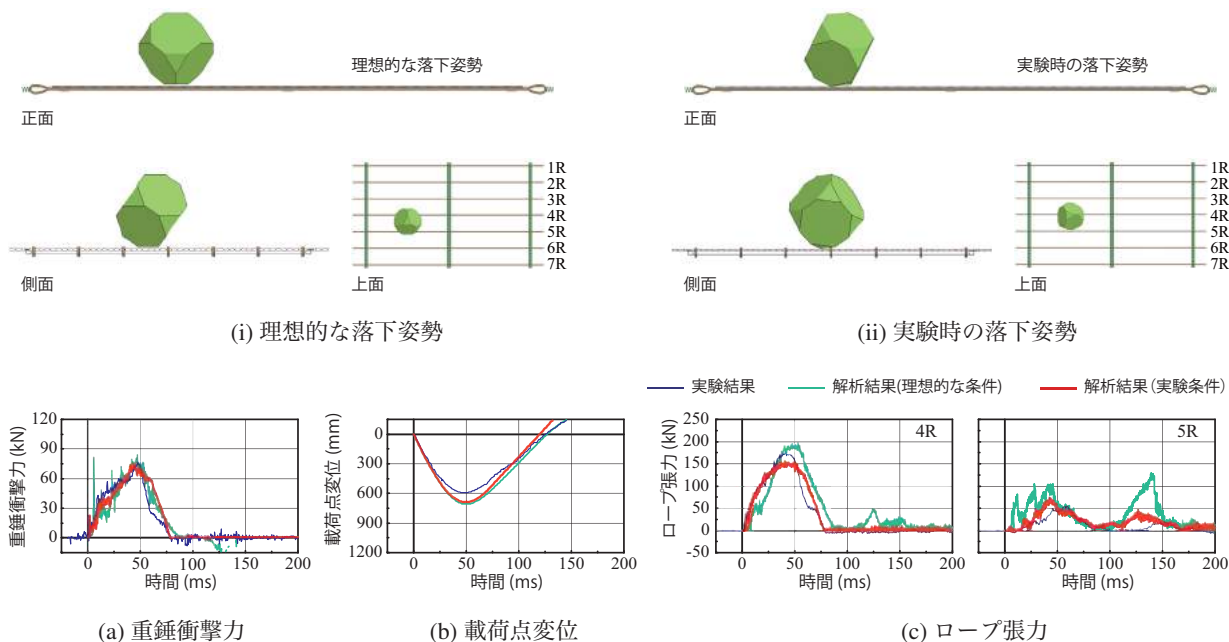


図-12 重錘の落下姿勢による影響の一例 (C-H25)

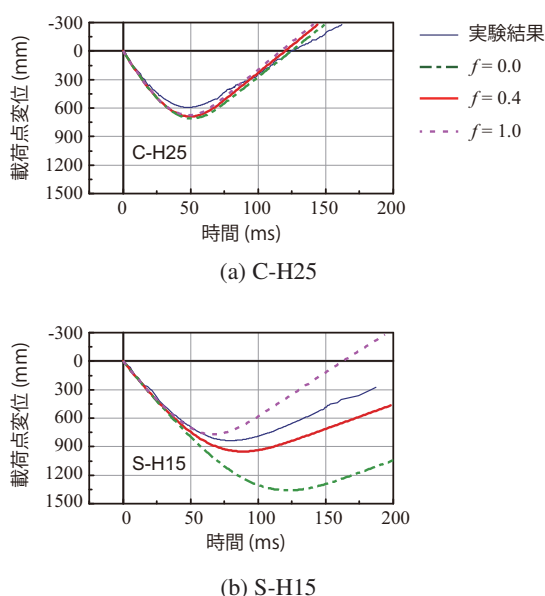


図-11 载荷点変位に及ぼす摩擦係数の影響

場合には、摩擦係数によって载荷点変位は大きく異なり、金網で重錘を捕捉する傾向を示し、ロープおよび金網との摩擦が卓越するためと推察される。なお、摩擦を考慮しない $f = 0$ の場合には、金網の最大変位やその到達時刻が実験結果よりも大きく、摩擦係数 $f = 1.0$ の場合には、反対に実験結果よりも小さいことが分かる。一方、摩擦係数 $f = 0.4$ の場合には、実験結果を若干過大に評価する傾向が見られるものの、リバウンド時の傾きなどは実験結果とよく対応していること、および既往の文献¹⁴⁾を参考に、本研究では摩擦係数を 0.4 と設定することとした。

(2) 重錘の落下姿勢や衝突位置の影響

図-12 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、実験時の落下姿勢や衝突位置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) 図に示す载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されているのに対し、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。

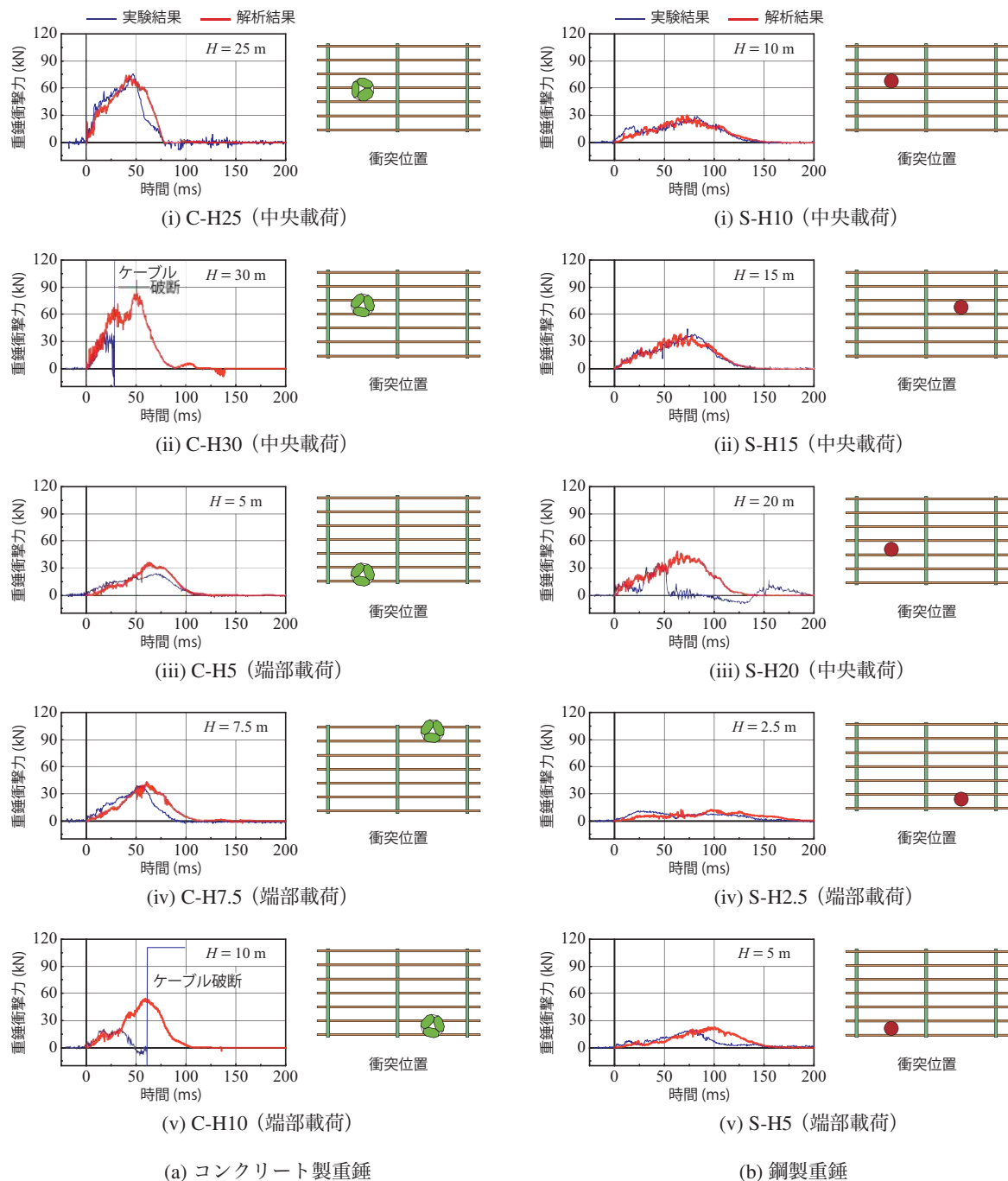


図-13 重錘衝撃力波形

(3) 重錘衝撃力

図-13には、全てのケースについて重錘衝撃力波形の実験結果を解析結果と比較して示している。青線は実験結果を、赤線は解析結果を示している。なお、実験結果の重錘衝撃力は、重錘上面に取り付けた加速度計より得られる加速度波形に重錘質量を乗じることで評価し、数値解析結果の重錘衝撃力は、重錘と金網の接触反力の総和として算出した。時間軸は重錘が金網に衝突した時刻を基準にしている。また、それぞれのケースにおける重錘衝突位置が分かるように、試験体の見下げ図を示している。なお、コンクリート製重錘を使

用した 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。また、鋼製重錘を使用した S-H20 に関しては、図-14(a)に示すように重錘の端部に取り付けたガイドロープ用の鋼管に金網が食い込み素線1本が破断したことで、(b)図に示すように金網が大きく開放され、重錘が地面に衝突したことから適切な結果が得られていない。

図より、実験結果に着目すると重錘の種類にかかわらず落下高さ 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。また、同一条件下におけるコン



(a) 鋼製重錘 (b) 試験体の破網

図-14 S-H20 における実験終了後の状況



(a) C-H10 (b) S-H5

図-16 実験終了後の試験体状況

クリート製重錘と鋼製重錘の最大衝撃力 (C/S-H5) を比較すると、前者の方が後者よりも大きい値を示している。これは、前述の通り重錘の形状が影響し、鋼製重錘が金網に衝突することで衝撃力がより緩和されたことによるものと推察される。

一方、数値解析結果に着目すると、計測に不備があった3ケース (C-H30/10, S-H20) 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。

(4) 載荷点変位

図-15には、載荷点位置における金網の鉛直変位波形を実験結果と数値解析結果を比較して示している。なお、金網の鉛直変位に関しては高速度カメラの映像をもとに算出した。また、C-H30の場合には実験時に重錘が金網を貫通しており、またS-H20の場合には前述のように重錘に取り付けた鋼管と金網の局所的な食い込みにより破網したことから、その直前までの結果を示している。

図より、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、端部載荷のC-H10およびS-H5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-16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

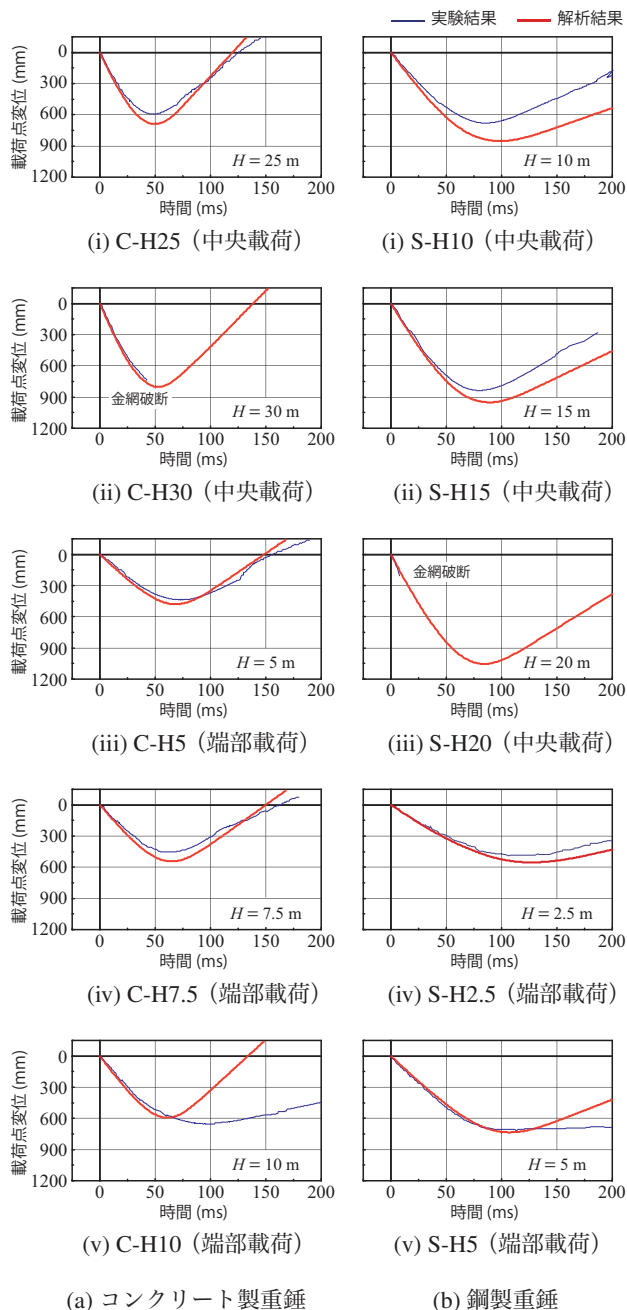


図-15 載荷点変位波形

宙ぶらりん状態になったことによるものである。なお、いずれの場合も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、最大載荷点変位は、重錘の種類にかかわらず、落下高さ H が高いほど大きくなる傾向が見られる。なお、同一の落下高さであるコンクリート製および鋼製重錘 (C/S-H5) を比較すると、後者の方が大きく変形している。これは、前述のように鋼製重錘の直径が305mmとワイヤロープ間隔 (300mm) と同程度であることから、ワイヤロープ間をすり抜け易いことが理由の一つであるものと推察される。

一方、数値解析結果に着目すると、金網の貫通やガ

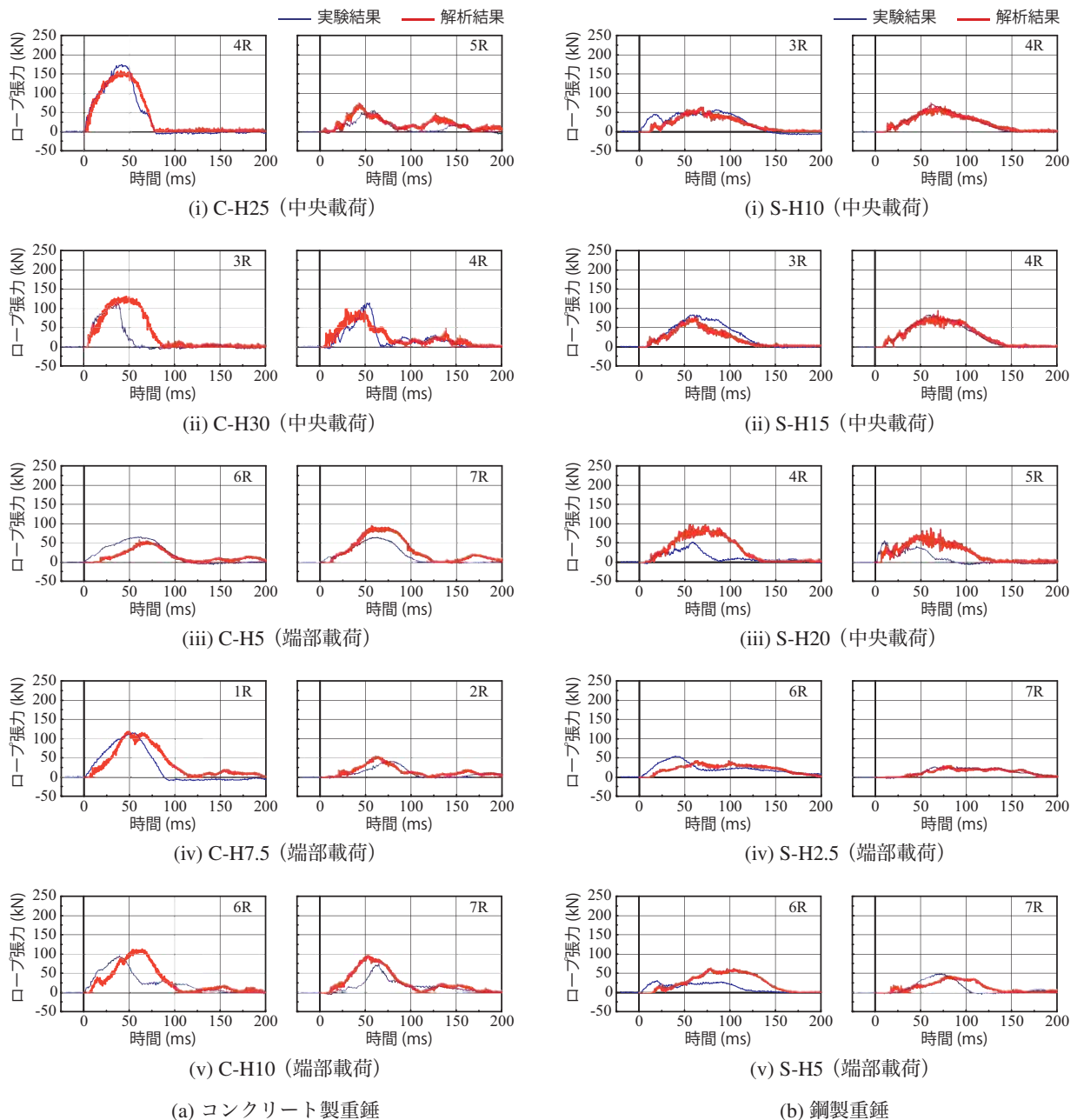


図-17 ロープ張力波形

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。なお、重錘の差異による影響を比較すると、コンクリート製重錘を用いる場合には最大値をほぼ適切に再現できているのに対して、鋼製重錘を用いる場合には実験結果よりも大きく示される傾向が見受けられる。これは、前述のようにコンクリート製重錘は、金網と共にワイヤロープに接触しリバウンド状態に至るものの、鋼製重錘の場合にはワイヤロープをすり抜け金網のみによって重錘を捕捉していることから、金網の局所的な変形による影響を大きく受けるためと推察される。

(5) ロープ張力

図-17には、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たものである。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ている。

図より、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およびS-H20/5では、重錘が1)ロープ間をすり抜ける、

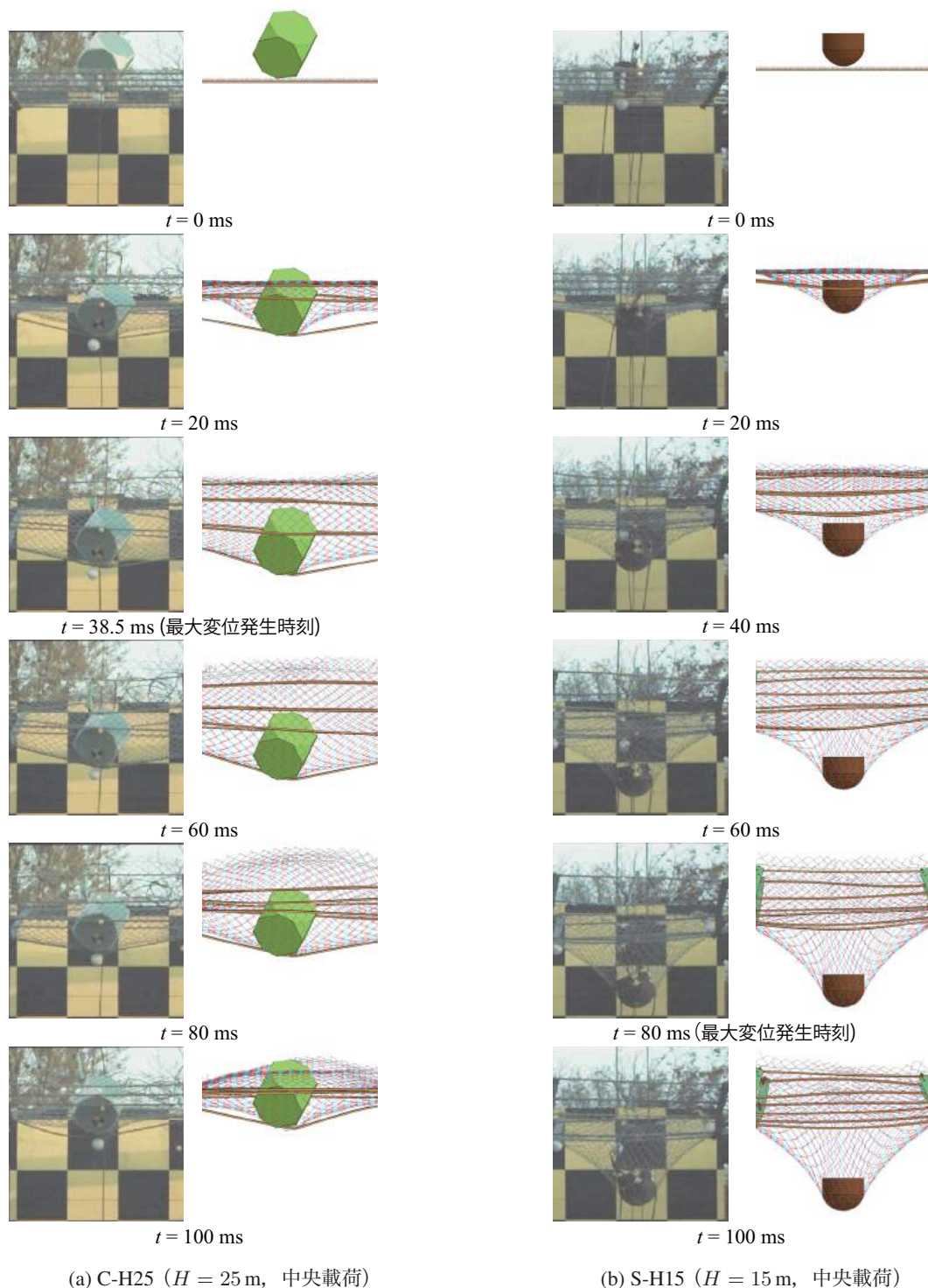
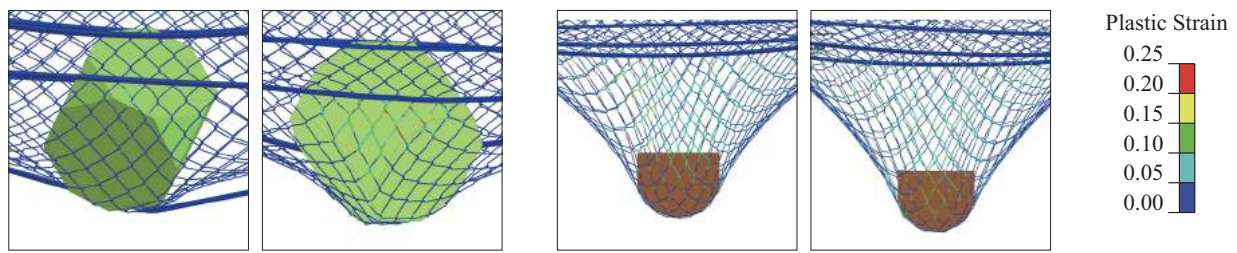


図-18 試験体の変形状況

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。コンクリート製重錘の場合には、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のに対し、鋼製重錘の場合では両ロープでほぼ同等の値を示していることが分かる。これは、前述と同様に重錘の寸法や衝突位置が影響しているものと推察される。すなわち、コンクリート製重錘は多面体であることから、ロープと衝突する重錘の落下姿

勢（角部や面部）が異なることで生じる張力に差が生じるものと考えられる。一方、鋼製重錘の場合では、先端が球形状かつ外寸もほぼロープ間隔と等しいことから、金網が大きく変形し、2本のロープでほぼ同等の張力が発生すると考えられる。

一方、数値解析結果に着目すると、金網を貫通した C-H30 と S-H20 の場合や端部載荷の C-H10 と S-H5 の場合を除き、実験結果のワイヤロープ張力をほぼ適切



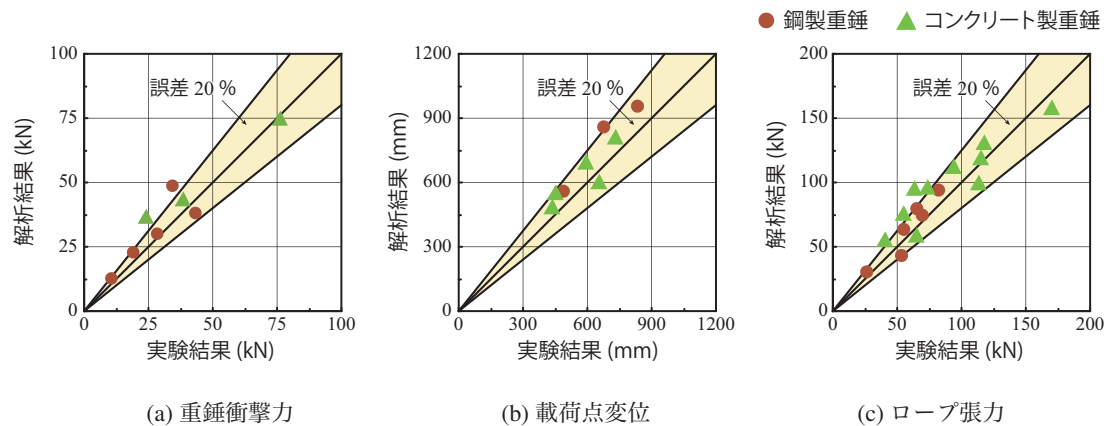
(a) C-H25

(b) C-H30

(c) S-H15

(d) S-H20

図-19 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



(a) 重錘衝撃力

(b) 荷点変位

(c) ロープ張力

図-20 各種最大応答値の比較

に再現可能であることが分かる。

(6) 試験体の変形状況

図-18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、実験ケースがC-H25およびS-H15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が分かる。一方、S-H15の場合には、前述のように重錘径がコンクリート製重錘よりも小さいことから、重錘はロープ間をすり抜けたものの、金網によって捕捉されていることが分かる。したがって、本解析手法を用いることにより、このような重錘がロープ間をすり抜ける現象も適切に再現可能であることが明らかになった。

(7) 金網およびワイヤロープのひずみ分布

図-19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 が大きい実験ケースC-H25/30、S-H15/20の場合における結果を示している。

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。

また、鋼製重錘を用いる場合の結果(c,d図参照)に着目すると、重錘がロープ間をすり抜けていることから、コンクリート製重錘を用いる場合と比較して金網が大きく変形すると共に、塑性ひずみが全体的に分布する傾向を示していることが確認される。なお、S-H15とS-H20の場合におけるひずみ分布を比較すると、後者の場合が前者に比較して全体的に大きなひずみが発生している。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。

(8) 最大応答値の比較

図-20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、金網の貫通やガイドロープによる拘束があったケースは除いている。図中の45度の線は、両者が等しいことを意味している。黄色の網掛けの部分は、誤差が20%以内の領域である。

(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、(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、金網を梁要素、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. 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。
2. また、重錘の捕捉やロープ間のすり抜け現象も概ね再現可能である。

今後は、金網単体の引張載荷実験結果の再現を試みると共に、最終的には金網の破断現象も考慮可能な数値解析モデルを構築し、貫通現象に関してより詳細な検討を行う予定である。

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) 前川幸次，河上康太，田島与典，岩崎征夫：ポケット式落石防護網のシミュレーション解析に関する研究，構造工学論文集，Vol. 57A, pp. 1134-1144, 2011.
- 7) 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, pp. 131-136, 2014.
- 8) 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.
- 9) 高橋利延，山本圭士，香月 智，高森 潔：三次元個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 1042-1055, 2014.
- 10) 園田佳巨，福永一基：実規模実験と数値解析によるワイヤリング落石防護柵の性能照査，構造工学論文集，Vol. 64A, pp. 811-818, 2018.
- 11) 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.
- 12) Hallquist, J. O.: LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.
- 13) 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.
- 14) British Standards Institution, BS 5975: Code of Practice for Falsework, London, 1996.

(2018.6.22 受付)

IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF CONVENTIONAL ROCKFALL PROTECTION FENCE UNDER FALLING-WEIGHT IMPACT LOADING

Masato KOMURO, Momoka HATTORI, Hisashi KONNO and Nobuya ARAKI

In order to establish a numerical analysis method for appropriately evaluating impact resistant behavior of the conventional rockfall protection fence, a 3D elasto-plastic impact response analysis method with precisely modeling steel wire-net and wire-rope using beam and solid element, respectively, was proposed. The applicability was investigated comparing with the experimental results for full-scale model under falling-weight impact loading. The results obtained from this study were as follows: 1) time histories of dynamic responses obtained using the method were similar to those of the experimental results; and 2) dynamic behavior of the fence including trapping of falling rocks may be estimated by using the proposed method.