

# 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

Numerical simulation of impact resistant behavior of diamond-shaped wire-net under falling-weight impact

小室雅人<sup>†</sup>, 西弘明<sup>\*</sup>, 今野久志<sup>\*</sup>, 荒木恒也<sup>\*\*</sup>, 田中優真<sup>\*\*\*</sup>

Masato Komuro, Hiroaki Nishi, Hisashi Konno, Nobuya Araki, Yuki Tanaka

<sup>†</sup>博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒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 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34)

<sup>\*\*</sup>(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)

<sup>\*\*\*</sup>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)

In this paper, to properly evaluate the dynamic response behavior of diamond-shaped wire-net under falling-weight impact, 3D elasto-plastic impact response analyses were performed taking the diameter of the wire and the mass of weight as variables. Here, wire-net and wire-rope were modeled by using beam element and cable element, respectively. An applicability of the proposed analysis methods was confirmed comparing with the experimental results. From this study, following results were obtained: 1) the central deflection of wire-net can be appropriately estimated by using the proposed method; 2) although the tension forces of vertical wire-ropes were tending to be overestimated, the horizontal ones may be properly estimated; 3) the deflection of the wire-net may not be affected by the falling angle of the weight.

*Key Words: diamond-shaped wire net, impact resistant behavior, numerical simulation, wire diameter*

キーワード：ひし形金網, 耐衝撃挙動, 数値シミュレーション, 素線径

## 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, 写真-1に示すようなポケット式落石防護網が建設されている。落石防護網は, 写真に示すように防護網の上部を支柱で吊り上げることににより, 上部に落石の入り口を設け, 衝突する落石の運動エネルギーを吸収し, 下方へ誘導する構造である。また, H形鋼製支柱, ひし形金網およびワイヤロープ等の汎用性の高い材料から構成されるため, 経済性や施工性に優れており, 我が国において数多く設置されているものの, その適用可能な落石エネルギーは50~150 kJ程度と小さい。

そのため, 近年では, 上述の従来型ポケット式落石防護網とは異なり, ワイヤロープ端部に緩衝装置を取り付けることによって, より大きな落石エネルギーに対して適用可能な, いわゆる高エネルギー吸収型の落石防護網が研究・実用化されている<sup>1)~4)</sup>。また, このような高エネルギー吸収型の落石防護網に関する数値解析も実施

されており, 実験結果との比較によって解析手法の妥当性の検討がなされている<sup>5)~8)</sup>。

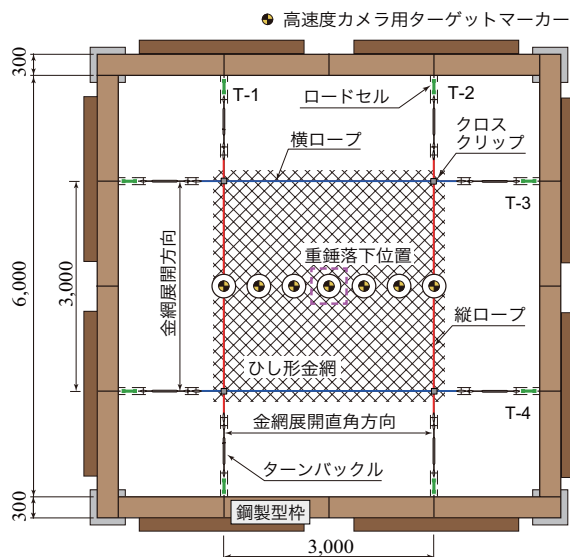
ポケット式落石防護網の設計は, 道路土工のり面工・斜面安定工指針<sup>9)</sup>(以後, 安定工指針)および落石対策便覧<sup>10)</sup>(以降, 便覧)に基づき, 各構成部材の吸収エネルギーと落石衝突前後におけるエネルギー差の和からなる可能吸収エネルギーが落石エネルギーを上回るように設計し, ワイヤロープの破断荷重に耐えられるようにアンカーの安全性を検討することとされている。しかしな



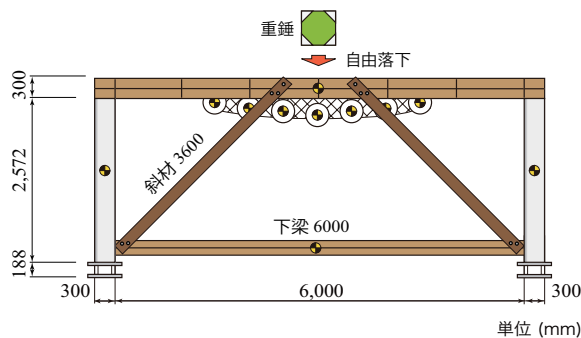
写真-1 ポケット式落石防護網

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: komuro@news3.ce.muroran-it.ac.jp



(a) 平面図

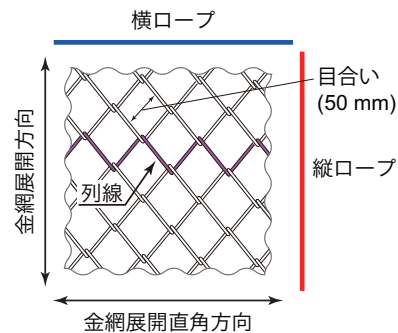


(b) 正面図

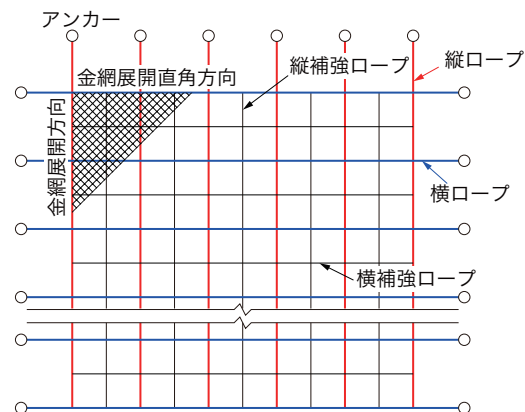
図－１ 試験体の形状寸法および設置状況

がら、構成部材の吸収エネルギーに関しては、必ずしも十分な検証がなされてはならず、いくつかの問題点も指摘されている<sup>11)</sup>。

さらに、高エネルギー吸収型の落石防護網の場合には、緩衝装置や各部材の吸収エネルギーのみで落石エネルギーを吸収するものが開発されるなど、設計にエネルギー差を取り込むことは不適切である可能性が第三者委員会により指摘され、平成 21 年 6 月に改訂された道路土工一切土工・斜面安定工指針<sup>12)</sup> (以後、新安定工指針) では、ポケット式落石防護網の設計における可能吸収エネルギーの算定にエネルギー差を加算しないことと改訂されている。一方、便覧では、他の項目の改訂作業の関係もあり、現時点では新安定工指針のような改訂はなされていないものの、従来型のポケット式落石防護網の場合には、便覧式のエネルギー差についてその適用範囲を規定し、設計に取り込むことを認めている<sup>13)</sup>。なお、高エネルギー吸収型落石防護網の場合には便覧式の適用を認めないこととしている。



図－２ ひし形金網の形状と配置方向



図－３ ポケット式落石防護網設置状況

従来型ポケット式落石防護網に関する数値解析的検討としては、個別要素法を用いた研究が報告されている。原木ら<sup>14)</sup>は 25 cm 間隔で  $\phi 8$  mm のワイヤを格子状に組んだ内部にひし形金網 ( $\phi 2.6 \times 25 \times 25$ ) を設置したものを対象に、三次元個別要素法による解析手法を提案し、準実物大衝撃実験結果との比較によってその妥当性を検討している。また、高橋ら<sup>15)</sup>は、1 m 間隔で  $\phi 14$  mm のワイヤを格子状に組んだ内部にひし形金網 ( $\phi 5.0 \times 50 \times 50$ ) を設置したものを対象に、質量 1 ton のコンクリート製重錘を斜面から落下させることにより、落石の回転を考慮した数値解析を実施し、実規模実験結果の再現解析と共に落石の回転による影響を検討している。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されていることより、防護網の全体挙動に着目したものであり、ひし形金網単体の挙動特性については、十分な検討がなされていないものと考えられる。なお、ひし形金網のモデル化に関しては、前述のように個別要素法でモデル化<sup>14), 15)</sup>する場合の他、1 枚の膜要素<sup>8), 20)</sup>やトラス要素とケーブル要素を組み合わせることによってモデル化<sup>5)</sup>する場合等が報告されているものの、ひし形金網の形状を忠実に再現した検討はほとんどないものと考えられる。

このような背景のもと、著者らは従来型の落石防護網も含めた落石防護工に関する性能照査技術の確立に向け

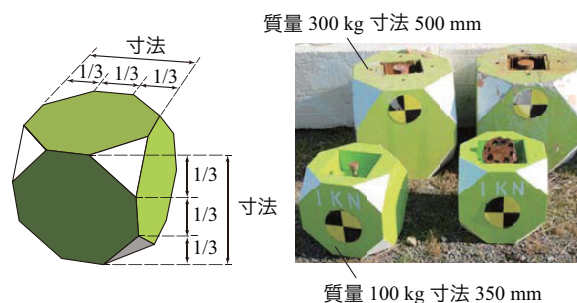
表－１ 実験ケース一覧

実験 ケース名	素線径 $\phi$ (mm)	重錘質量 $M$ (kg)	落下高さ $H$ (m)	入力エネルギー $E$ (kJ)	設計エネルギー差 $E_L$ (kJ)	金網初期たわみ $\delta_i$ (mm)
D3M1H30	3.2	100	30	29.4	7.9	201
D3M3H10 <sup>#1</sup>		300	10		3.2	203
D4M1H30	4.0	100	30		9.8	176
D4M3H10		300	10		4.2	178
D5M1H30	5.0	100	30		12.1	206
D5M3H10		300	10		5.5	183

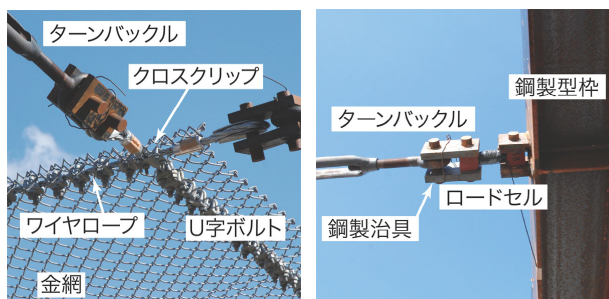
<sup>#1</sup>金網の素線 1 本が破断



(a) 全景



図－４ 多面体重錘の形状寸法



(b) ワイヤロープ交点部

(c) ロードセル

写真－２ 試験体の設置状況

た種々の検討を行っている<sup>16)～22)</sup>。本論文では、それらの一連の研究において、落石防護網の構成部材であるひし形金網に着目し、その耐衝撃挙動を適切に推定・評価するための解析手法を検討するために、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。ここでは、既往の研究成果<sup>22)</sup>を踏まえ、ひし形金網の素線を梁要素で忠実にモデル化する場合について数値解析を実施し、別途実施したひし形金網の重錘落下衝撃荷重実験結果<sup>21)</sup>との比較によって、解析モデルの妥当性を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図－１には、本論文で対象としたひし形金網の形状寸法および設置状況を示している。ひし形金網の形状寸法は、縦横 3 m の正方形とし、金網の素線径を 3 種類

( $\phi 3.2, 4.0, 5.0$ ) に変化させている。なお、目合いは 50 mm であり、素線径によらず同一である。金網はワイヤロープ ( $\phi 18$ ) 4 本によって囲まれる形で設置した。

ひし形金網は、図－２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、平行四辺形の網目を形成したものであり、編み込みの向きにより剛性が異なる異方性を有する。実際のポケット式落石防護網では、図－３に示すように金網展開方向が鉛直方向、金網展開直角方向が水平方向となる。本論文では実際の設置方向と対応するようにワイヤロープを便覧<sup>10)</sup>に基づき、縦ロープと横ロープに区別して整理している（図－１参照）。

写真－２(a)には、試験体の設置状況（全景）を示している。各ワイヤロープとひし形金網の結合には、写真－２(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、ワイヤロープの交点についてはクロスクリップによって固定している。各ワイヤ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－２(c)に示すように鋼製型枠とピン接合されている。なお、試験体はひし形金網を各ワイヤロープと結合した後、ワイヤロープ 1 本に対して約 10 kN の初期張力を導入することにより、所定の位置に設置した。

### 2.2 実験方法

実験に使用した重錘は、SAEFL<sup>23)</sup>のガイドラインに規定される形状寸法を採用して製作したコンクリート製の多面体重錘であり、質量の異なる 2 種類 (100 kg, 300





写真-3 実験終了後のひし形金網の破網状況  
(D3M3H10 の場合)

kg)である(図-4 参照)。実験は、重錘をトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ自由落下させることにより実施した。実験は素線径、重錘質量および落下高さを変化させて実施している<sup>21)</sup>が、本論文では、それらの中から表-1 に示す実験ケースを対象に数値解析を実施することとした。すなわち、素線径は3種類とし、重錘質量と落下高さを変化させることによって入力(落石)エネルギーが等価な全6ケースである。ケース名のD, M, H に付随する数字は素線径、重錘質量および重錘の落下高さを示している。なお、表には参考として次式で示されるエネルギー差  $E_L^{10)}$  を示している。

$$E_L = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot E_w \quad (1)$$

ここで、 $m_1$ ：落石質量、 $m_2$ ：落石防護網質量、 $E_w$ ：落石持ち込み(入力)エネルギーである。なお、ここでは、落石防護網質量  $m_2$  として  $3 \times 3$  m で囲まれる領域の金網およびロープ質量の総和を用いてエネルギー差  $E_L$  を算出した。

また、D3M3H10 において、実験時にひし形金網の素線1本が破断し、重錘のリバウンドによって実験終了後には写真-3 に示すように大きく破網している。しかしながら、後述の図-12(a) に示すように、処女落下時には重錘がリバウンドをしていることから、金網素線1本の破断が金網の全体挙動に与える影響は小さいものと判断される。

実験における測定項目は、1) ワイヤロープの端部に取り付けた専用ロードセルによるワイヤロープ張力および2) 高速度カメラ撮影による金網中央部に取り付けたターゲットマーカーから得られる鉛直変位(以後、たわみ)である。また、実験では重力の影響によって金網に初期たわみが生じる。表-1 には実験開始前の金網の初期たわみ量を示している。なお、実験におけるたわみ量の計測には、初期たわみ分を除いて評価している。なお、実験の詳細に関しては文献<sup>21)</sup>を参照されたい。

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 解析モデル

図-5 には、数値解析モデルの要素分割状況を示している。本解析では、ひし形金網の素線の一山を原寸に基

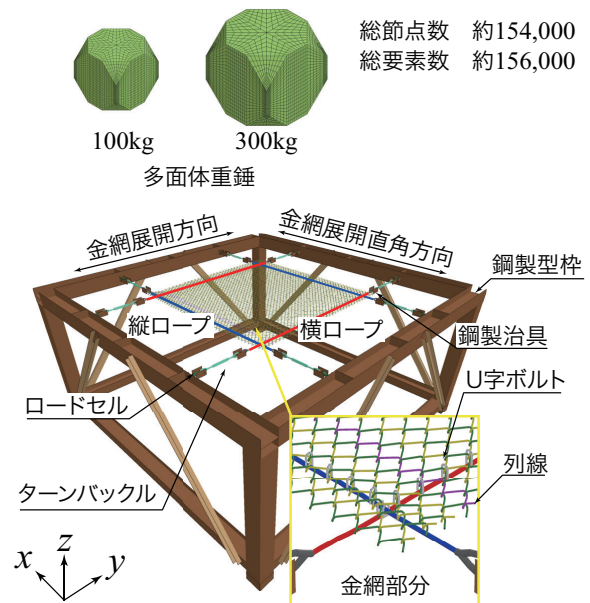


図-5 数値解析モデル

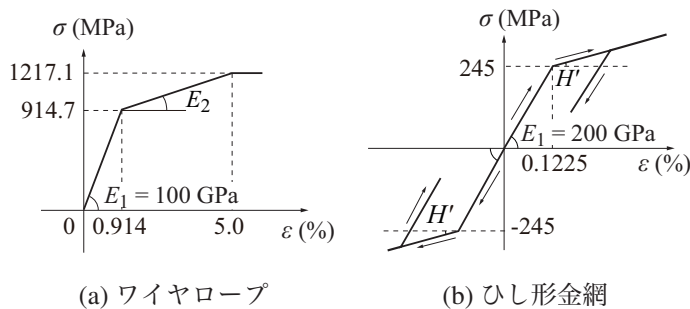
づいて忠実に梁要素で作成し、それらを連続的に組み合わせることにより、金網全体をモデル化した。なお、金網には Hughes-Lui 梁要素を適用し、軸方向および断面方向の積分点は、それぞれ1点、4点(Gauss積分  $2 \times 2$ )とした。その他の構成部材に関しては、鋼製型枠を構成しているH形鋼および溝形鋼は4節点シェル要素、ターンバックルは2節点梁要素、ワイヤロープは圧縮力を伝達しない2節点ケーブル要素、重錘およびロードセルは8節点固体要素を用いた。なお、数値解析には衝撃・構造解析ソフトウェアLS-DYNA<sup>24)</sup>を使用した。

ひし形金網の素線同士および金網-U字ボルト間には、梁要素同士の接触および剥離・すべりを伴う接触面を定義した。なお、U字ボルトの締め付けトルクについては考慮せず、U字ボルトと金網を密着させることで接続している。また、ワイヤロープとU字ボルトは完全結合としている。重錘-金網素線間には、面と線(梁要素)の接触および剥離・すべりを伴う接触面を定義した。また、金属間の接触面には摩擦を考慮し、静摩擦および動摩擦係数を共に0.4と設定した。境界条件は実際の実験条件と同様に鋼製型枠の柱基部を完全固定としている。

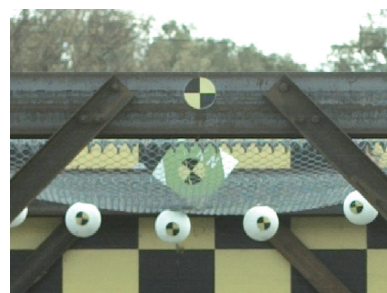
#### 3.2 材料構成則

図-6(a) には、ワイヤロープに用いた応力-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、ワイヤ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)は便覧<sup>10)</sup>を参考に決定し、破断強度に到達するひずみを5%と仮定し、その後はひずみが増大するように設定した。

(b) 図には、ひし形金網の応力-ひずみ関係を示して



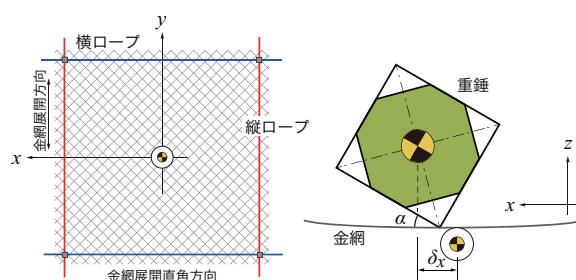
図－6 応力－ひずみ関係



写真－4 重錘衝突時における高速度カメラの画像例 (D3M1H30 の場合)

表－2 重錘の落下位置および角度

実験 ケース名	金網展開方向 $\delta_x$ (mm)	落下角度 $\alpha$ (°)
D3M1H30	109.2	36.4
D3M3H10	-18.9	17.8
D4M1H30	-15.0	37.9
D4M3H10	-11.9	-9.7
D5M1H30	-46.7	34.4
D5M3H10	-84.9	17.3



図－7 重錘の落下位置および角度

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便化則を適用している。なお、ひし形金網の 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。ここでは、使用した 3 種類のひし形金網の引張強さが 400 ～ 411 MPa (ミルシートによる) であることから、SS400 材相当と判断し、図に示すような応力－ひずみ曲線を設定した。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、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 (弾性係数  $E_s = 200$  GPa, ポアソン比  $\nu_s = 0.3$ ) と仮定した。また、コンクリート重錘に関しても実験では損傷が確認されていないことから弾性体 (弾性係数  $E_c = 20$  GPa, ポアソン比  $\nu_c = 0.167$ ) と仮定し、所定の質量となるように単位体積質量を換算している。

### 3.3 数値解析方法

数値解析は、落下高さ  $H$  から算出された衝突速度を重錘の鉛直方向に初速度として付加することで行った。重錘の落下位置および姿勢については、写真－4 に示すように、衝突直前の高速度カメラの撮影映像を詳細に分析し、可能な限り正確に解析条件に反映させている。ただし、本実験では高速度カメラは 1 方向のみの撮影であることから、奥行き ( $y$ ) 方向の落下位置については、金網中央部に取付けたターゲットマーカを基準とし

て、衝突前後の重錘挙動を確認した結果、明確なずれが確認できないことより、全ての解析ケースで零 ( $\delta_y = 0$  mm) として計算をしている。

表－2 には、高速度カメラ映像から得られた重錘落下位置および落下角度を一覧にして示している。図－7 には、表－2 に示す落下位置のずれ量  $\delta_x$  および落下角度  $\alpha$  の定義を示している。表より、本実験ケースの場合には、重錘のずれは最大で約 100 mm であり、ほぼ金網中央部に落下していることが分かる。一方、重錘の落下角度は実験ケースによって異なり、最大 36° 程度となっている。

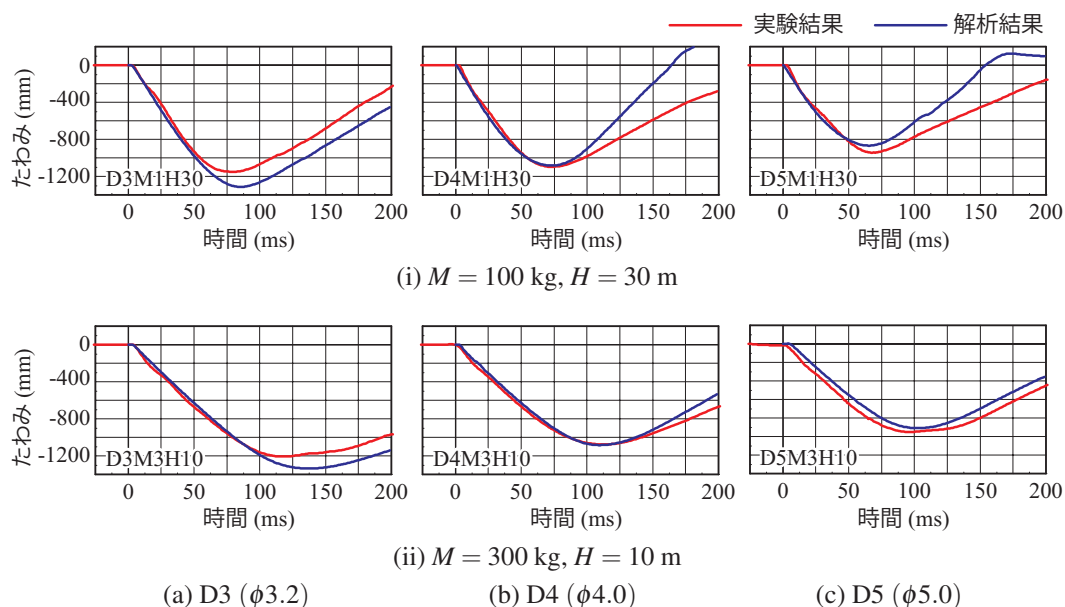
なお、解析時間は 200 ms とし、本数値解析では減衰および重力を考慮していない。また、実験では金網設置時に初期たわみが生じているが、本解析では初期たわみは考慮していない。

## 4. 数値解析結果および考察

### 4.1 金網中央部たわみ

図－8 には、金網中央部におけるたわみの時刻歴波形について実験結果と数値解析結果を比較して示している。なお、時間軸は重錘が金網に衝突した時刻を零としている。

図より、実験結果に着目すると、同一入力条件であれば、素線径  $\phi$  が大きいほど最大たわみ量は小さくなる傾向が確認される。ただし、D3M1H30 の最大たわみ量は D4M1H30 の場合とほぼ等しい。これは、前述の表－2 に示すように D3M1H30 の場合には、重錘が金網



図－8 金網中央部たわみ

中央部から 100 mm 程度ずれて落下している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、重錘衝突後のたわみの増加勾配は実験結果と非常によく対応しているものの、最大たわみ量に関しては実験結果と若干の差異が確認される。また、その傾向は素線径  $\phi$  によって異なり、素線径が小さい D3 の場合には実験結果よりも過大に、素線径が大きい D5 の場合には過小評価となっている。また、最大たわみ到達後のリバウンド挙動に着目すると、解析結果は重錘質量が小さく落下高さの高い場合 (i 図) において、D3M1H30 を除き、実験結果よりも重錘のリバウンド速度が大きい傾向が確認される。これは、本解析において重力の影響を考慮していないことが一つの要因であるものと考えられる。なお、同一入力エネルギーの場合には素線径  $\phi$  が小さいほど最大たわみ量は大きくなる傾向は実験結果と一致している。

## 4.2 縦ワイヤロープ張力

図－9 には、2 本の縦ロープ (T1, T2) に関する張力の時刻歴波形について実験結果と数値解析結果を比較して示している。

図より、実験結果に着目すると、同一荷重条件下では素線径  $\phi$  の大きさにかかわらず最大張力はほぼ一定値を示していることが確認される。また、重錘質量が小さく落下高さの大きい場合 (i 図) と落下高さの小さい場合 (ii 図) を比較すると、後者の方が最大張力は若干大きくなっている。なお、最大張力に到達するまでの時刻を見ると前者の方が後者よりも短い。これは金網に衝突する重錘の衝突速度の違いに起因しているものと考えられる。

一方、数値解析結果に着目すると、重錘質量が小さく

落下高さの大きい場合 (i 図) の最大張力は、実験結果と比較して過大に評価する傾向がみられ、またその到達時刻も短くなっている。それに対して、落下高さの小さい場合 (ii 図) には、張力の立ち上がりは実験結果と比較して若干遅れて励起される傾向にあるものの、最大張力はほぼ一致している。

これより、縦ロープ張力に関しては、重錘の衝突速度が速い (落下高さが大きい) 場合において数値解析結果の精度が低下する傾向にあることが推察される。これは、実験では重錘衝突後に U 字ボルトとクロスクリップの滑りが確認されているのに対し、本解析では両者の滑りを考慮せず完全結合と仮定していることが一つの要因と考えられる。この点については、今後より詳細な検討が必要である。

なお、クロスクリップの滑りに関しては、実験前後の計測結果より 1) 重錘衝突速度が速い (落下高さが大きい) ほど、また 2) 素線径  $\phi$  が大きいほど滑り量が大きくなる傾向にあることを確認している。

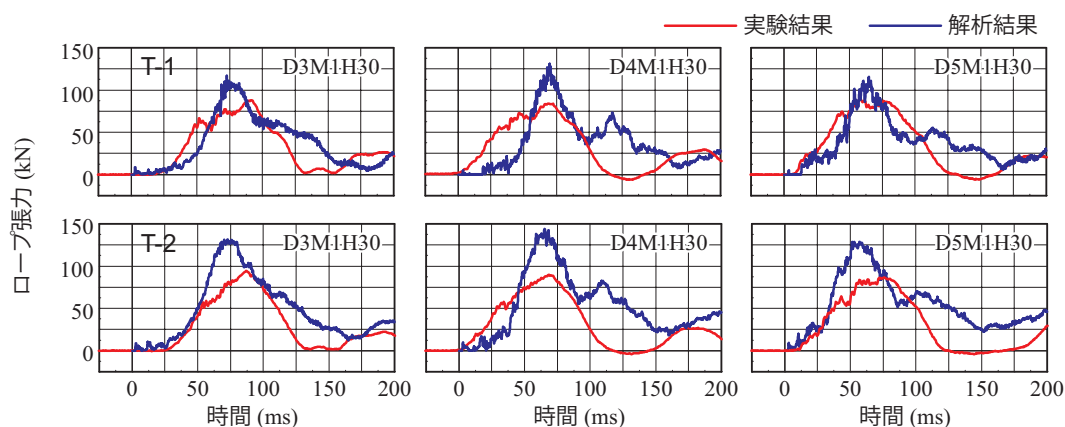
## 4.3 横ワイヤロープ張力

図－10 には、2 本の横ロープ (T3, T4) に関する張力の時刻歴波形について実験結果と数値解析結果を比較して示している。

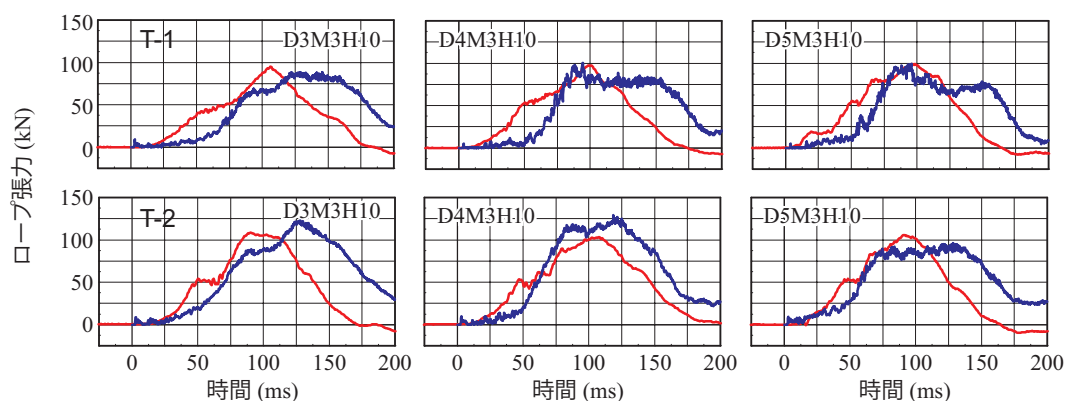
図より、実験結果に着目すると、2 本の最大張力に若干の差異が確認される。この点は縦ロープの場合と異なる傾向を示しているものの、それ以外に関しては、縦ロープの場合とほぼ同様な傾向を示している。

次に、重錘質量が小さく落下高さの大きい場合 (i 図) の数値解析結果に着目すると、波形の立ち上がりは実験結果をほぼ適切に再現しているものの、最大張力は実験





(i)  $M = 100 \text{ kg}, H = 30 \text{ m}$



(ii)  $M = 300 \text{ kg}, H = 10 \text{ m}$

(a) D3 ( $\phi 3.2$ )

(b) D4 ( $\phi 4.0$ )

(c) D5 ( $\phi 5.0$ )

図-9 縦ワイヤロープ (上段: T1, 下段: T2)

結果より過大に評価している。特に D5M1H30 の場合にはその差が顕著になっている。

一方、落下高さの小さい場合(ii 図)には、波形の立ち上がりは実験結果と必ずしも一致していないものの、最大張力に関しては両者ほぼ一致している。これらの傾向は縦ロープの場合と類似している。解析の精度をより向上させるためには、前述のように U 字ボルトおよびクロスクリップの滑りを考慮する必要があるものと考えられる。

#### 4.4 最大応答値の比較

表-3 には、全解析結果から得られた最大たわみ量、各ロープの最大張力について一覧にして示している。また、図-11 は、それらの解析結果を縦軸に実験結果を横軸に取って整理したものであり、図中の  $45^\circ$  の直線は両者が等しいことを意味する。また、黄色の網掛け部分は、誤差が 10 % もしくは 20 % 以内の領域を示している。

(a) 図に示す最大たわみ量を見ると、素線径  $\phi$  にかかわらずいずれの場合も実験結果を 10 % 程度の誤差範囲内で推定できることが分かる。一方、縦および横ロープ張力 (b, c 図) に関しては、実験結果と比較して解析結果が過大に評価する傾向にあることが分かる。なお、縦

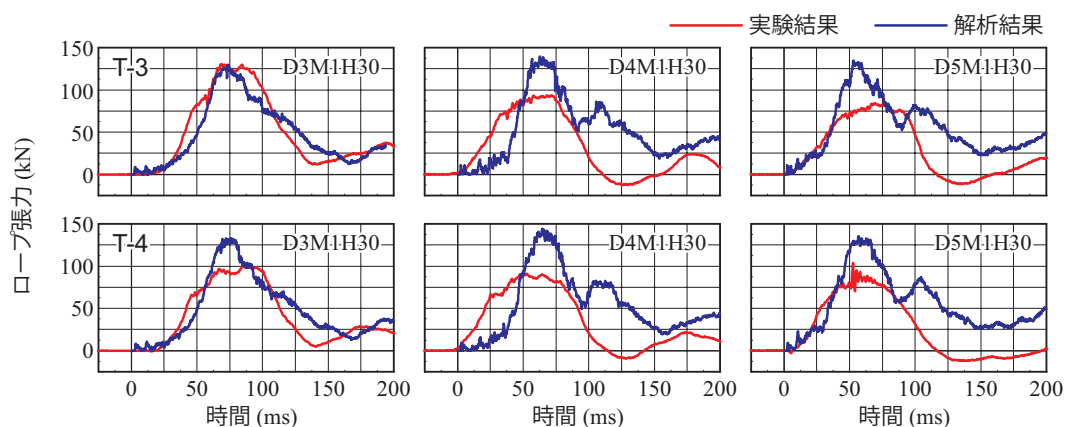
ロープ張力と横ロープ張力を比較すると後者の方が誤差が若干小さいことが分かる。

#### 4.5 金網変形状況および応力分布

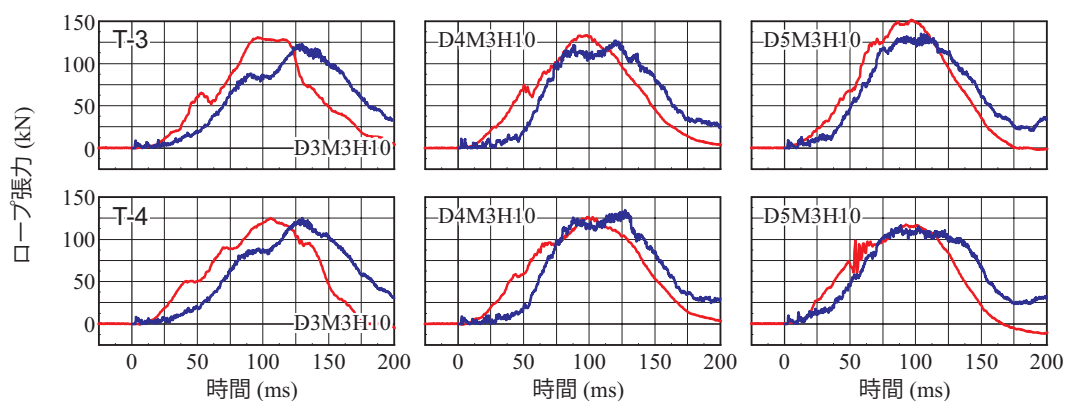
図-12 には、重錘衝突後の金網変形状況の一例として D3M3H10 における実験結果と解析結果から得られる Mises 応力分布を時系列的に比較して示している。

(a) および (b) 図に示す金網変形状況に着目すると、解析結果は重力を考慮していないことより、実験結果と重錘衝突時刻における金網の形状が異なり、直接的な比較は難しいものの、全体的な挙動は概ね一致しているものと考えられる。

一方、Mises 応力分布 (b, c 図) に関しては、重錘衝突後  $t = 40 \text{ ms}$  の時刻から载荷位置近傍において金網の一部が降伏応力を超える応力が発生しており、塑性化していることが分かる。その後、 $t = 80 \text{ ms}$  の時刻においては、金網の塑性化範囲が全体へと拡大していることが確認できる。また、最大たわみ発生時刻 ( $t = 119 \text{ ms}$ ) では、载荷位置近傍において金網の一部が破断強度を超える応力が発生しており、実験結果に見られた素線の破断の可能性を示している。その後、重錘のリバウンドと共



(i)  $M = 100 \text{ kg}$ ,  $H = 30 \text{ m}$



(ii)  $M = 300 \text{ kg}$ ,  $H = 10 \text{ m}$

(a) D3 ( $\phi 3.2$ )

(b) D4 ( $\phi 4.0$ )

(c) D5 ( $\phi 5.0$ )

図-10 横ワイヤロープ (上段: T3, 下段: T4)

表-3 各種最大応答値の比較

実験 ケース 名	実験結果					数値解析結果				
	最大たわみ (mm)	縦ロープ張力		横ロープ張力		最大たわみ (mm)	縦ロープ張力		横ロープ張力	
		T1 (kN)	T2 (kN)	T3 (kN)	T4 (kN)		T1 (kN)	T2 (kN)	T3 (kN)	T4 (kN)
D3M1H30	1151	88.1	94.4	130.6	100.6	1314 (1.14)	116.7 (1.32)	131.8 (1.40)	129.3 (0.99)	132.8 (1.32)
D3M3H10	1208	94.9	108.7	130.9	125.2	1337 (1.11)	88.7 (0.93)	122.7 (1.13)	123.1 (0.94)	125.3 (1.00)
D4M1H30	1097	83.5	89.8	93.2	91.1	1083 (0.99)	130.8 (1.57)	144.0 (1.60)	139.5 (1.50)	143.9 (1.58)
D4M3H10	1077	97.4	103.1	133.4	126.6	1084 (1.01)	100.5 (1.03)	129.1 (1.25)	127.1 (0.95)	134.6 (1.06)
D5M1H30	949	89.1	86.9	84.5	104.1	868 (0.91)	115.4 (1.30)	128.8 (1.48)	134.6 (1.59)	135.3 (1.30)
D5M3H10	951	99.3	105.9	152.1	117.3	910 (0.96)	99.2 (1.00)	96.0 (0.91)	135.1 (0.89)	116.5 (0.99)

括弧内の数値は実験結果と解析結果の比である。

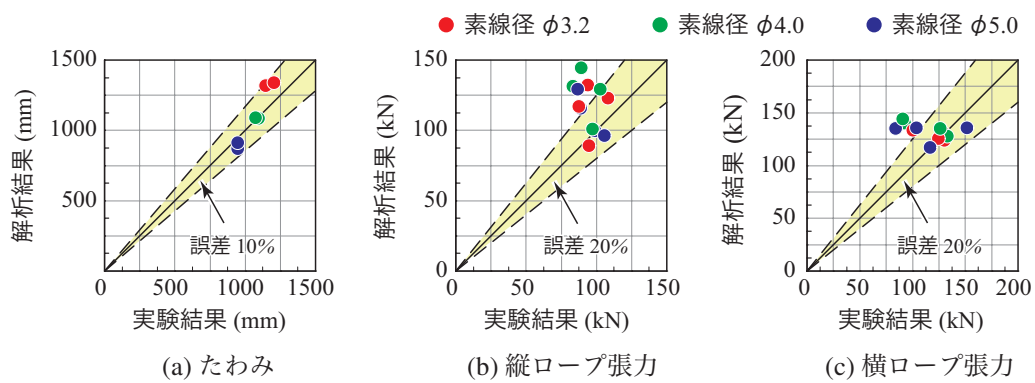
に金網の応力は減少していることが分かる。

#### 4.6 エネルギー経時変化

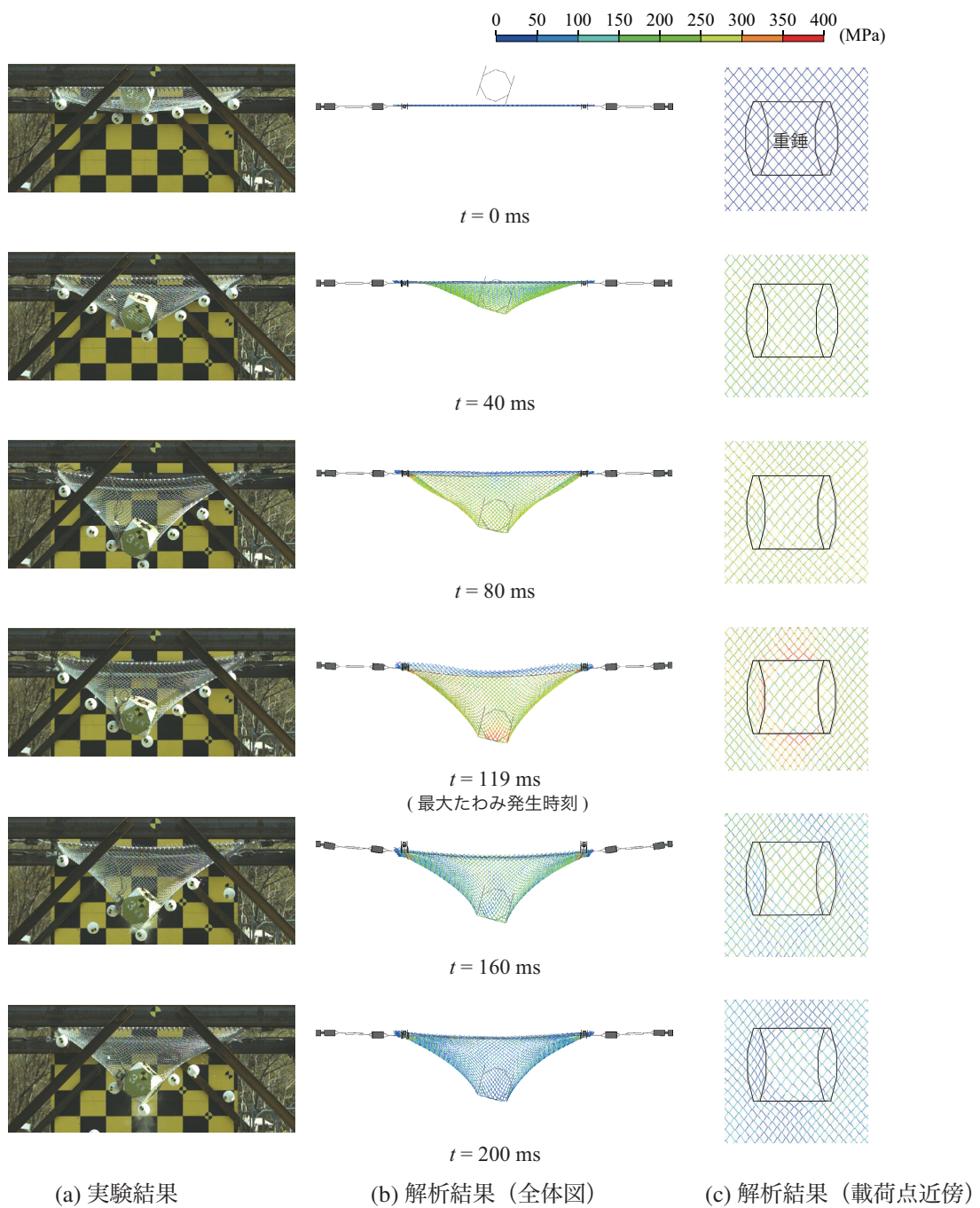
図-13 には、解析結果から得られる主要部材のエネ

ルギー経時変化の一例として素線径  $\phi 3.2$  の2ケースについて示している。また、表-4 には最大たわみ(重錘の運動エネルギーが零)の時刻における主要部材のエネルギー量を一覧にして示している。なお、図中および表

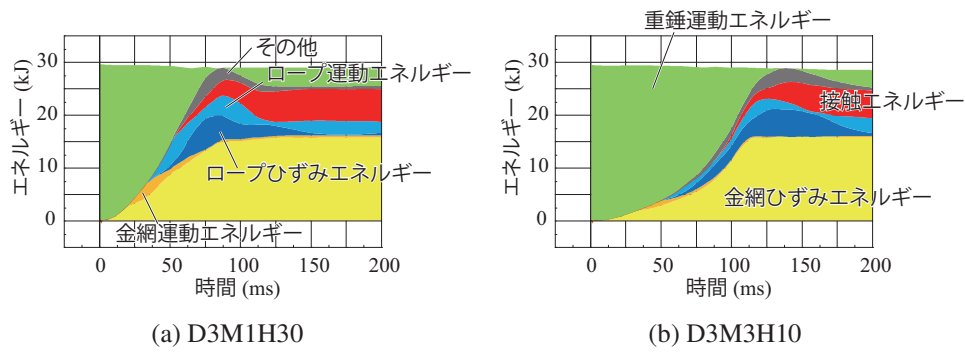




図－11 最大応答値の比較



図－12 金網の変形状況と Mises 応力分布の経時変化の一例 (D3M3H10)

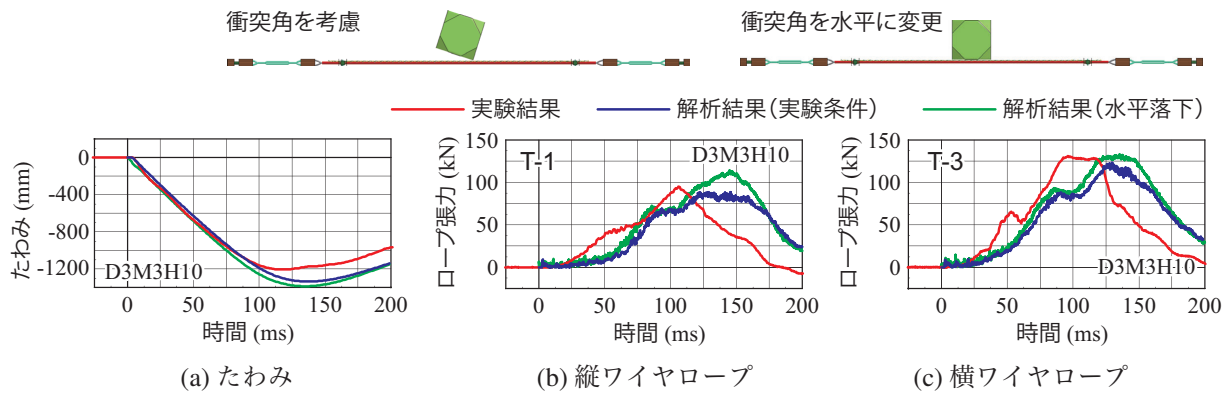


図－13 エネルギー経時変化の一例（素線径  $\phi 3.2$ ）

表－4 最大たわみ発生時における主要部材のエネルギー量

エネルギーの内訳		解析ケース	
		D3M1H30	D3M3H10
金網	運動エネルギー (kJ)	0.3 (0.01)	0.1 (0.00)
	ひずみエネルギー (kJ)	14.8 (0.51)	15.8 (0.55)
ロープ	運動エネルギー (kJ)	3.7 (0.13)	1.4 (0.05)
	ひずみエネルギー (kJ)	4.7 (0.16)	5.2 (0.18)
その他	U 字ボルト (kJ)	0.1 (0.00)	0.0 (0.00)
	ターンバックル (kJ)	0.6 (0.02)	0.7 (0.02)
	鋼製型枠 (kJ)	1.8 (0.06)	1.7 (0.06)
接触エネルギー (kJ)		2.7 (0.10)	3.8 (0.13)

括弧内の数値は全体の割合を示す。



図－14 重錘の落下姿勢の影響の一例（D3M3H10）

中のその他に関しては、重錘のひずみエネルギーや接続金具のエネルギー等を意味する。

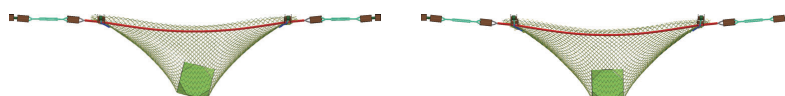
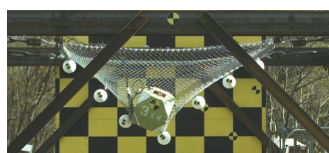
図より、入力エネルギーが等価な場合には、実験条件にかかわらず両者でほぼ類似のエネルギー分担をしていることが分かる。重錘の運動エネルギーは金網に衝突後、徐々に減少すると共に、金網の運動およびひずみエネルギーが増加している。その後、ロープによるエネルギーも増加して行く様子が伺える。なお、表－4 より、最大たわみ時刻における各エネルギーの分担量を見ると、金網が 15 ～ 16 kJ 程度、ロープが 6.5 ～ 8.5 kJ 程度となっていることが分かる。また、金網とロープのひずみエネ

ギーは全体の 70 % 程度であることが分かる。なお、鋼製型枠が負担するエネルギーは全体の 6 % 程度である。

#### 4.7 重錘の落下姿勢の影響

図－14 には、D3M3H10 を例に実験結果から得られた重錘の落下姿勢を適切に反映させる場合と重錘の落下姿勢を水平に理想化させた状態で落下させる場合の各種時系列波形を実験結果と比較して示している。

(a) 図に示すたわみの時刻歴波形に着目すると、重錘衝突後のたわみの増加勾配は、落下姿勢にかかわらず両者でほぼ等しいことが分かる。また、最大たわみ量につ



$t = 119 \text{ ms}$

(a) 実験結果

(b) 解析結果 (実験条件)

(c) 解析結果 (水平落下)

図－15 金網の変形状況比較 (D3M3H10)

いても両者はほぼ等しい。一方、(b) および (c) 図に示す縦および横ワイヤロープの最大張力に関しては、重錘の落下姿勢によって解析結果に若干の差異が生じていることが分かる。

図－15には、落下姿勢の異なる2つの解析結果から得られる最大たわみ発生時刻 ( $t = 119 \text{ ms}$ ) の金網の変形状況について実験結果と比較して示している。図より、落下姿勢によって重錘と接触する金網の局所的な変形状は異なるものの、全体的な変形は両者でほぼ等しいことが分かる。

これより、重錘の落下姿勢は、ロープ張力に影響を及ぼすものの、金網のたわみ量に与える影響は小さいものと考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、落石防護網の構成部材であるひし形金網の耐衝撃挙動を適切に推定・評価するための解析手法の検討を目的に別途実施された重錘落下衝撃荷重実験結果を対象に衝撃・構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用いて三次元弾塑性有限要素解析を実施した。本研究の範囲で得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- 1) 金網の素線径にかかわらず実験結果の金網中央部の最大たわみ量を 10 % 程度以内の誤差で再現可能である。
- 2) 一方、縦および横ワイヤロープ張力に関しては、実験結果の最大張力を過大に評価する傾向にある。この傾向は、重錘寸法 (質量) が小さく衝突速度が速いほど大きい。
- 3) ひし形金網の最大たわみ量に及ぼす落下姿勢の影響は小さい。

なお、本研究では、ひし形金網の初期たわみ量、ロープの初期張力および重力などについては考慮していない。今後は、U 字クリップ間隔が異なる実験<sup>19)</sup>を対象にこれらを考慮した数値解析を実施し、より詳細な検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 澤田直子, 吉田 博, 藤井智弘, 窪田潤平, 前川幸次: 緩衝金具を配置した落石誘導ワイヤネットシス

テムの実規模実験について, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1853-1864, 2000.3

- 2) 窪田潤平, 中村浩喜, 吉田 博: 特殊ひし型金網および緩衝金具を配置した落石防護網の実斜面実験について, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 11-22, 2008.3
- 3) 田島与典, 前川幸次, 岩崎征夫, 河上康太: 実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1088-1100, 2010.3
- 4) 難波正和, 前川幸次, 田島与典, 横田哲也: 実斜面を用いた実規模重錘衝突実験によるポケット式落石防護網の評価, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 1032-1041, 2014.3
- 5) 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, 2011.3
- 6) 岩崎英治, 加規秀二, 向笠正洋: 落石防護工に用いる緩衝金具の開発と性能評価, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 75-85, 2011.3
- 7) 難波正和, 前川幸次, 濱 晃子, 小池拓真: 実斜面を用いた実規模重錘衝突実験による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, 鋼構造論文集, 第22巻 第88号, pp. 23-33, 2015.12
- 8) S. Dhakal, N. P. Bhandary, R. Yatabe, and N. Kinoshita: Numerical and analytical investigation towards performance enhancement of a newly developed rockfall protective cable-net structure, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 12, pp. 1135-1149, 2012.
- 9) (社) 日本道路協会: 道路土工のり面工・斜面安定工指針, 1999.3
- 10) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6
- 11) (公社) 地盤工学会: 落石対策工の設計法と計算例, 2014.12
- 12) (社) 日本道路協会: 道路土工一切土工・斜面安定工指針, 2009.7
- 13) (社) 日本道路協会: ポケット式落石防護網の設計について, 2013.12  
(<http://www.road.or.jp/books/pdf/20131206.pdf>)
- 14) 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, 2009.6
- 15) 高橋利延, 山本圭土, 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, 土木学会, Vol. 60A, pp. 1042-1055, 2014.3
- 16) 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, 2013.11
- 17) 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. 137-143, 2014.11
- 18) 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, pp. 131-136, 2014.11
- 19) 今野久志, 西 弘明, 荒木恒也, 加藤俊二, 小室雅人: 落石防護網に使用するひし形金網の実規模載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, pp. 650-656, 2015.11
- 20) 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. 23, pp. 657-663, 2015.11
- 21) 荒木恒也, 今野久志, 西 弘明, 佐々木哲也, 小室雅人, 田中優貴: 落石防護網に使用するひし形金網の重錘落下衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 72 号, A-45 (CDROM), 2016.1
- 22) 田中優貴, 小室雅人, 荒木恒也, 今野久志, 西 弘明: 落石防護工に使用するひし形金網のモデル化に関する一検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 24, pp. 144-151, 2016.11
- 23) Werner Gerber: Guideline for the approval of rock-fall protection kits, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL), Swiss Federal Research Institute (WSL), 2001.
- 24) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.
- (2016年9月26日受付)  
(2017年2月1日受理)