



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本鋼構造協会 公開日: 2019-03-04 キーワード (Ja): 落石防護網, 重錘衝撃実験, 有限要素解析 キーワード (En): rockfall protection nets, falling-weight impact loading test, finite element analysis 作成者: 田中, 優貴, 小室, 雅人, 荒木, 恒也, 今野, 久志, 西, 弘明 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009709

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

Numerical study on modeling of diamond-shaped wire net for rockfall protection structures

○田中 優貴* 小室 雅人** 荒木 恒也*** 今野 久志**** 西 弘明*****

Yuuki TANAKA Masato KOMURO Nobuya ARAKI Hisashi KONNO Hiroaki NISHI

ABSTRACT In this paper, to properly evaluate the dynamic response behavior of diamond-shaped wire net used for rock protection structures, three dimensional elasto-plastic impact response analyses were performed. Here, two types of modeling for wire net were employed: simple membrane model and detailed beam model. 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 applying both models; 2) although the tension forces of vertical wire-ropes were tend to be overestimated, the horizontal ones may be properly estimated by using proposed method; and 3) the anisotropic deformation behavior of wire net can be properly estimated by applying beam model.

Keywords : 落石防護網, 重錘衝撃実験, 有限要素解析
rockfall protection nets, falling-weight impact loading test, finite element analysis

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、吊りロープや支柱、金網、ワイヤ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設置されている。現在、ポケット式落石防護網の設計は、落石対策便覧¹⁾を参考に構成部材の吸収可能エネルギーを累積することによって行われているが、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²⁾。

ポケット式落石防護網は、金網やワイヤロープ等の構成部材が大きく変形し、落石荷重を受け止める柔構造であることから、現行設計法の妥当性を検討するためには、構成部材の吸収可能エネルギーを適切に推定・評価することが重要となる。しかしながら、これらの値を実験的な検討^{3), 4)}のみで評価することは非常に困難であり、有限要素法等による数値解析的^{5), 6)}な検討が不可欠である。

このような背景のもと、本論文では、ポケット式落石防護網に広く用いられているひし形金網を対象にその耐衝撃挙動を適切に推定・評価することを目的に三次元衝撃応答解析を実施した。ここでは、ひし形金網を1枚の膜として簡易にモデル化する場合と、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、別途実施した衝撃荷重載荷実験結果⁷⁾との比較によって、解析モデルの妥当性を検討した。なお、本解析にはLS-DYNA⁸⁾を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図1には、ひし形金網の形状寸法および重錘落下位置を示している。ひし形金網の形状寸法は、縦横3mの正方形とし、金網の素線径を3種類(φ3.2, 4.0, 5.0)に変化させている。金網は、図1に示すようにその端部をワイヤロープ(φ18)と結合している。写真1(a)には、試験体の設置状況

* 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)

**博(工) 室蘭工業大学 大学院工学研究科 准教授 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) 第2種正会員

*** (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)

****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)

*****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)

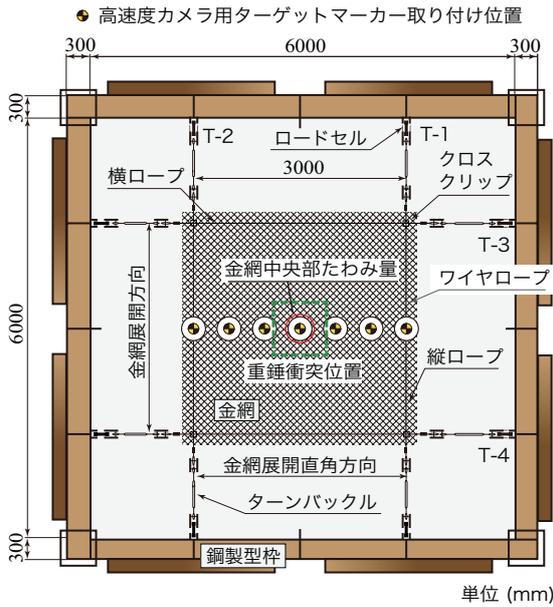
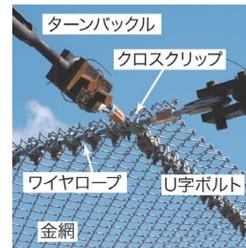


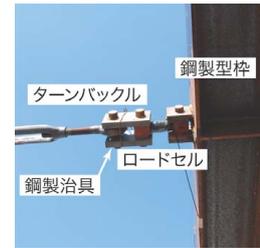
図1 試験体の形状寸法および設置状況



(a) 全景



(b) クロスクリップ



(c) ロードセル

写真1 試験体の設置状況

(全景) を示している。各ロープと金網の結合には、写真1(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、各ロープの交点はクロスクリップで固定している。各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1(c)に示すように鋼製型枠とピン接合されている。

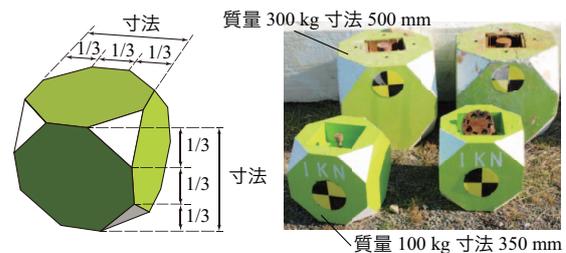


図2 多面体重錘 (SAEFL⁹⁾)

2.2 実験方法

実験は、図2に示すような多面体重錘⁹⁾ (質量 100, 300 kg) 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。また、表1には、本数値解析で対象とした実験ケース一覧を示している。ここでは、金網の素線径 $\phi 5.0$ の場合に着目して検討を行うこととした。実験ケースは同一の重錘 (質量 300 kg) で落下高さ H を変化させた場合および重錘質量を 100 kg に変化させて等価な入力エネルギーとした場合の全5ケースである。ケース名の W , H および付随する数字は重錘質量および重錘の落下高さを示している。

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の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の鉛直変位 (以後、たわみ) である。

図3に示すようにひし形金網は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

表1 実験ケース一覧

実験ケース名	重錘質量 W (kg)	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)
W3H10	300	10	29.4
W3H15		15	44.1
W3H20		20	58.8
W3H25		25	73.5
W1H30	100	30	29.4

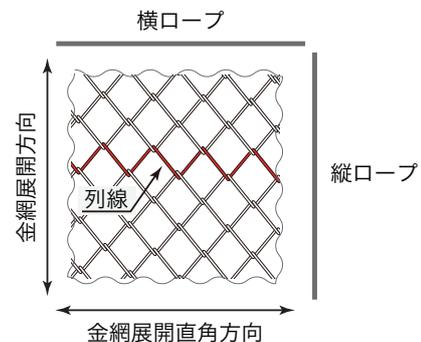


図3 ひし形金網の形状と配置方向

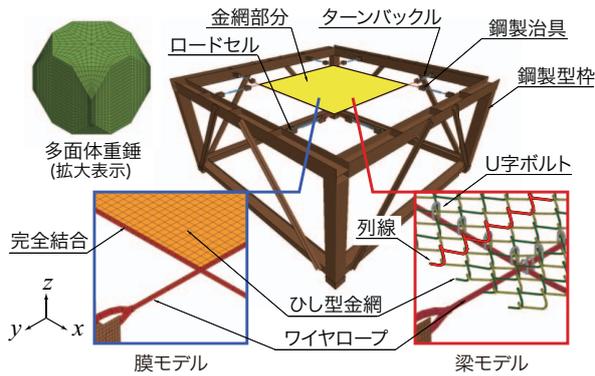


図4 数値解析モデル

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、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宜的に縦ロープと横ロープに区別して整理している(図1参照)。なお、実験の詳細に関しては文献⁷⁾を参照されたい。

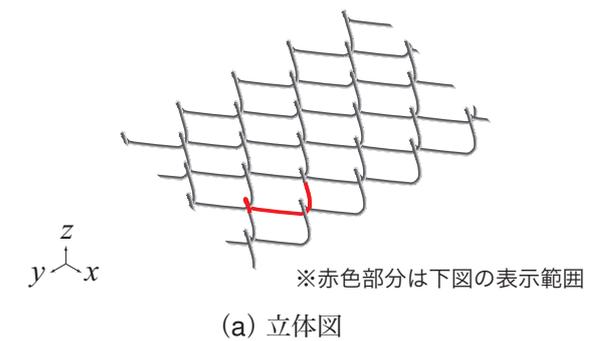
3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

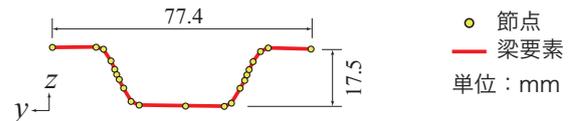
図4には、数値解析モデルの要素分割状況を示している。ここでは、金網を1枚の膜として簡単にモデル化する場合(以後、膜モデル)および金網の素線を梁要素で忠実にモデル化する場合(以後、梁モデル)の2種類について解析を行った。その他の構成部材に関しては両モデルで同一とし、鋼製型枠を構成しているH形鋼および溝形鋼は4節点シェル要素、ターンバックルは2節点梁要素、ワイヤロープは圧縮力を伝達しない2節点ケーブル要素、重錘およびロードセルは8節点固体要素を用いた。

膜モデルの場合には重錘一金網間に、面と面の接触および剥離・すべりを伴う接触面を定義した。なお、実験では金網とワイヤロープの接続にはU字ボルトを用いているが、ここでは、両者を完全結合としている。

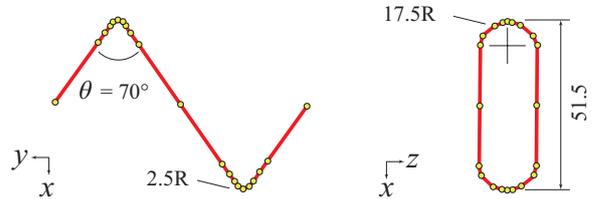
図5には、金網を梁要素を用いてモデル化した場合の要素分割状況を示している。本解析では、素線の一山を原寸に基づいて忠実に作成し、それらを連続的に組み合わせることで金網全体をモデル化した。梁モデルの場合には金網の素線同士および金網-U字ボルト間に、梁要素同士の接触



(a) 立体図



(b) 側面図



(c) 上面図

(d) 正面図

図5 梁要素を用いた金網のモデル化

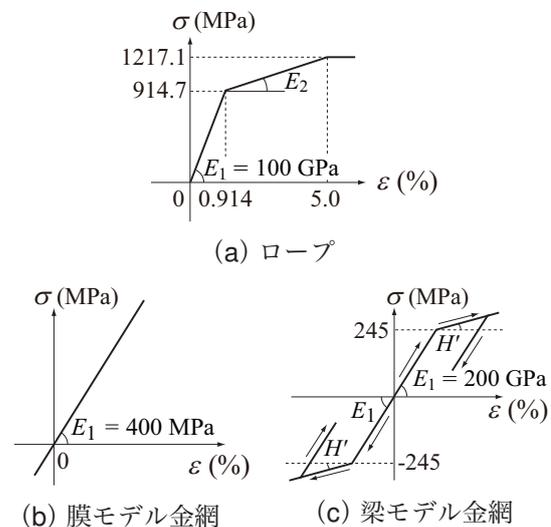


図6 応力-ひずみ関係

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。重錘一金網素線間には、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。なお、本数値解析で使用した接触

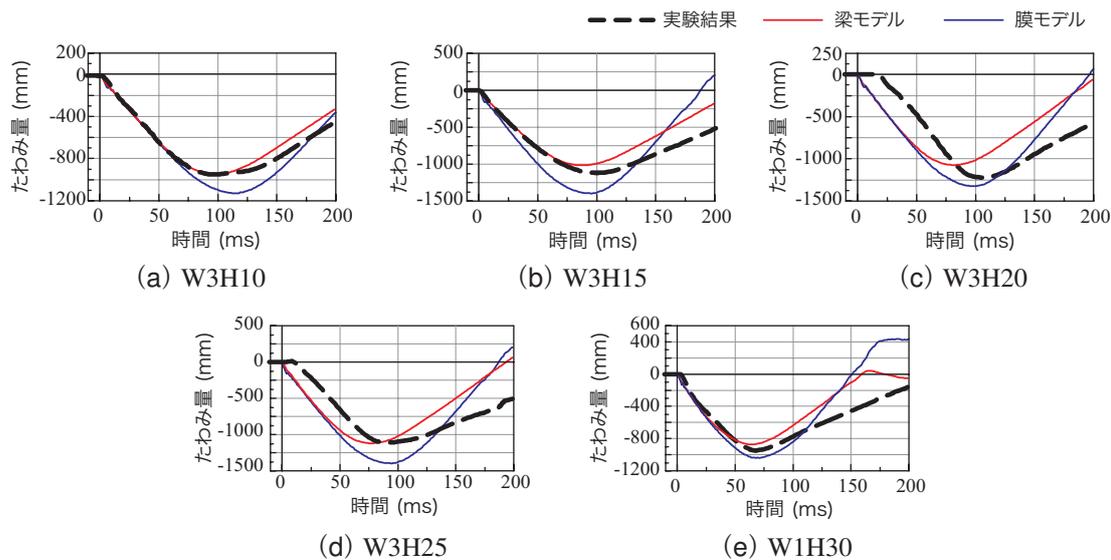


図7 金網中央たわみ量

面は全て LS-DYNA で定義可能である。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それぞれ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。

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。また、重錘は回転することなく水平に、金網中央部に落下するものと仮定した。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。なお、解析時間は、梁モデルを用いる場合が膜モデルを用いる場合の約1.8倍程度である。

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、各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、落石対策便覧¹⁾を参考に決定し、破断ひずみを5%と設定した。

(b)図には、膜モデルで使用した金網の応力-ひずみ関係を示している。金網に関しては、重錘衝突位置近傍において局所的な塑性化が生じる可能性も考えられるが、実験では金網が破網すること無く、重錘を捕捉していることから等方弾性体モデルを適用した。なお、弾性係数は既往の研究成果を参考に $E_1 = 400 \text{ MPa}$ と設定した。

(c)図には、梁モデルで使用した金網の応力-ひずみ関係を示している。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硬化則を適用した。なお、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 $E_c = 20 \text{ GPa}$, 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。

4. 数値解析結果および考察

4.1 金網中央部のたわみ

図7には、金網中央部のたわみの時刻歴波形を実験結果と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、W3H20 および H25 の場合には、実験結果と比較して波形の立ち上がりが遅く示されているものの、たわみの増加傾向はいずれの解析ケースにおいても、実験結果とよく対応していることが分かる。なお、W3H20/H25 における波形の立ち上がりが遅い理由としては、実験時に重錘が金網中央部に落下せず偏心载荷状態となったことによるものと考えられる。

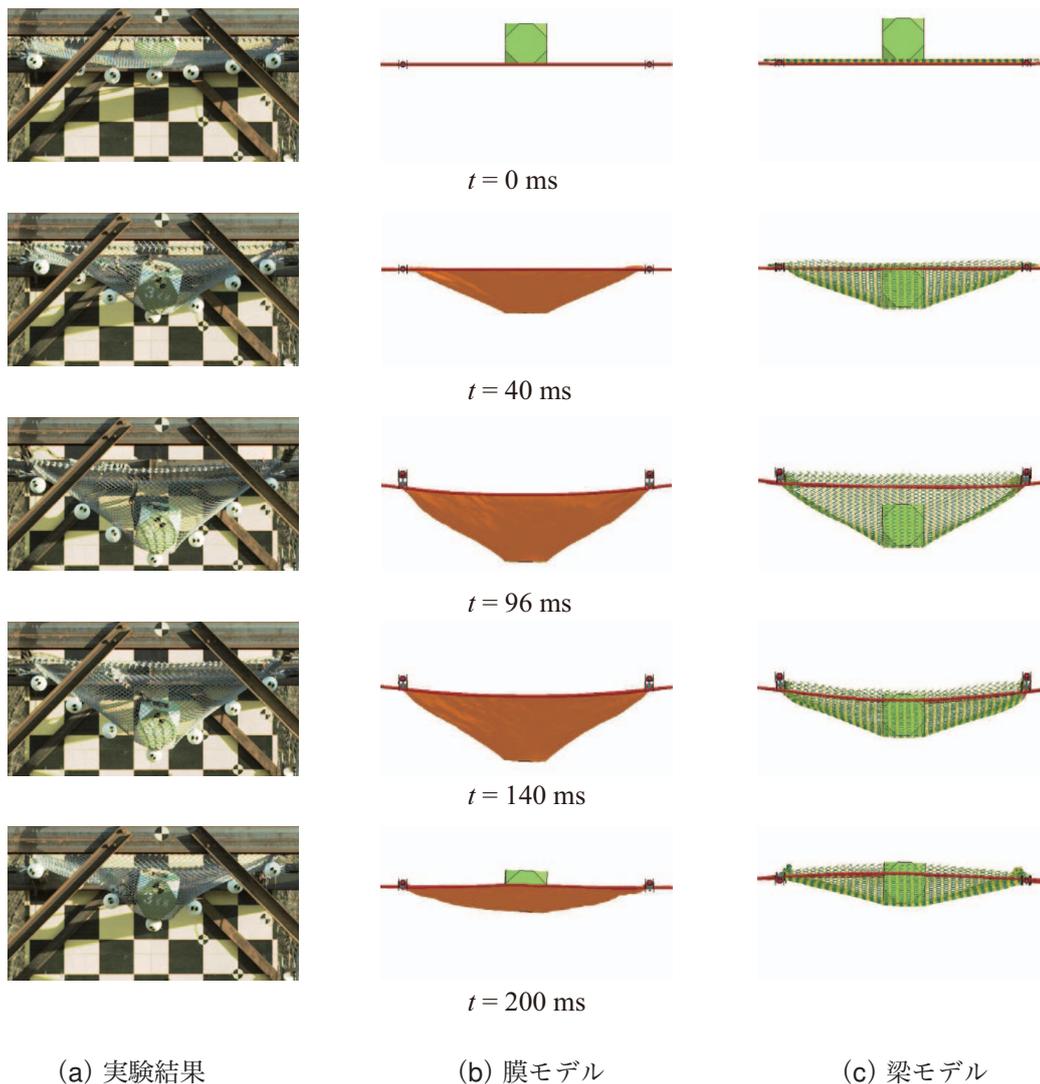


図8 金網変形状況 (W3H10)

次に最大たわみ量に着目すると、実験結果はW3H25を除いて、入力エネルギーが大きいくほど最大たわみ量も大きくなる傾向が確認される。なお、W3H25についてはW3H20よりも最大たわみ量が小さく示されているが、これは後述の図10に示すように縦ロープ(T-3)が破断したことにより、金網が局所的に大きく変形し、中央部のたわみが小さくなったことに起因している。

一方、数値解析結果に着目すると、梁モデルの場合には実験結果をほぼ適切に再現しているのに対し、膜モデルの場合には、いずれのケースにおいても実験結果よりも大きく評価する傾向にあることが分かる。この傾向は落下高さ H が小さいほど顕著になっている。

また、実験結果における最大たわみ到達時刻に着目すると、落下高さ H が大きくなるほど、早くなる傾向を示していることが分かる。なお、この傾向は、両モデルの解析結果でも確認される。

4.2 金網変形状況

図8には、重錘が衝突後の金網の変形状況の一例として、W3H10における実験の連続写真と両モデルで得られた解析結果を時系列的に比較して示している。なお、本解析では重力の影響を無視していることより、金網の初期変形量が実験と比較して小さく示されており、直接的な比較は難しいものの、金網の変形状況はほぼ適切に再現しているものと考えられる。

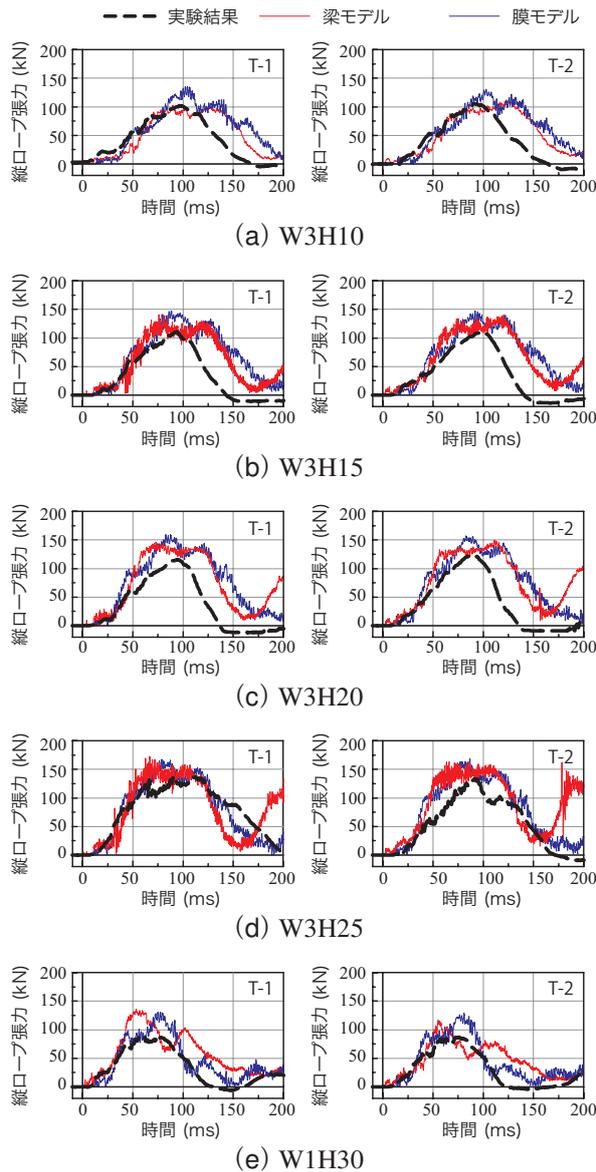


図9 縦ワイヤロープ張力

4.3 ワイヤロープ張力

図9および図10には、縦および横ワイヤロープ張力の時刻歴波形を実験結果と解析結果を比較して示している。

図9に示す縦ロープ張力に着目すると、解析結果は実験結果の波形の立ち上がり勾配をほぼ適切に再現していることが分かる。一方、最大張力に関しては、膜および梁モデルを用いた解析結果は、ともに実験結果を大きく評価する傾向が見られる。また、最大張力は入力エネルギーが大きいほど大きくなることが分かる。

等価入力エネルギーの場合 (W3H10/W1H30) に

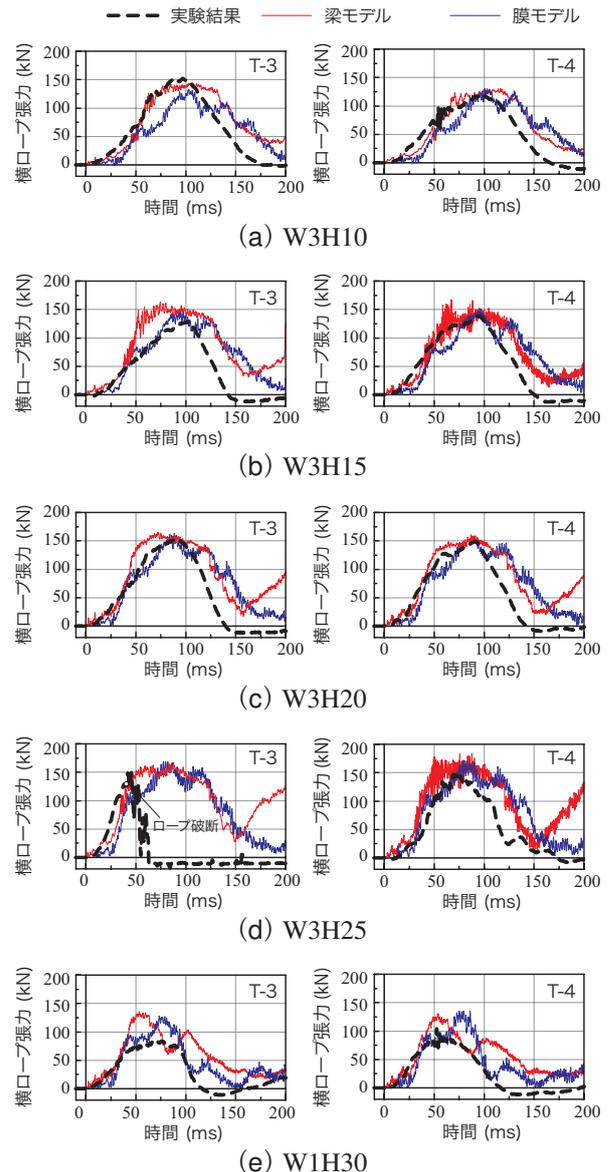


図10 横ワイヤロープ張力

おける最大張力を比較すると、重錘質量の大きいW3H10の方がW1H30より若干大きく示されている。

次に図10に示す横ロープ張力に着目する。重錘質量が300kgの場合には、落下高さHにかかわらず、波形の立ち上がりから最大値に至るまで両解析結果は実験結果と概ね一致していることが分かる。なお、W3H25のT-3ロープに関しては、実験において重錘衝突後約50ms経過時にロープ破断が生じており、最大値の確認はできていない。また、膜モデルと梁モデルの解析結果を比較すると、最大張力発生時刻は後者の方が前者よりも若

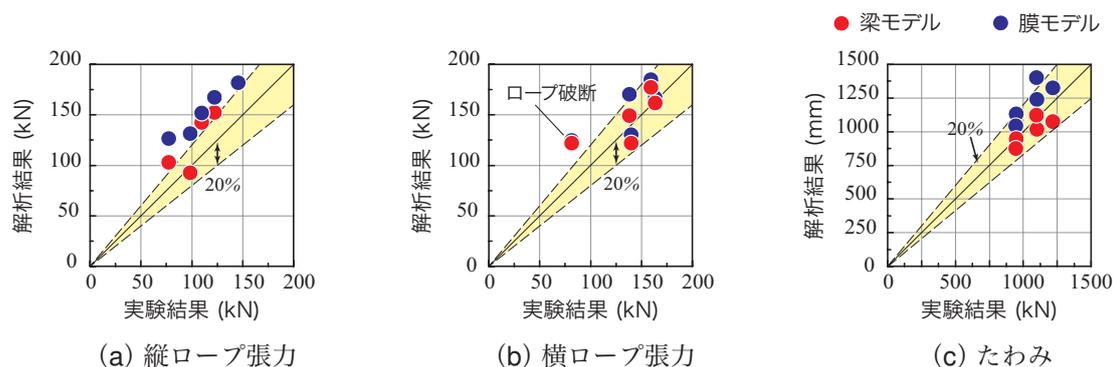


図 11 各種最大応答比較

干早い傾向が見られる。

等価入力エネルギーである W3H10 と W1H30 の実験結果を比較すると、重錘質量の大きい前者が後者よりも最大張力が約 140 kN と 1.5 倍程度大きく示されている。一方、数値解析結果の最大値は両実験ケースでほぼ等しい値を示しており、特に W1H30 の場合において実験結果との差が大きい。これは、重錘質量が小さいほど解析条件（本解析ではロープの初期張力を無視している等）の影響を大きく受ける可能性を示唆しており、今後さらに検討する必要がある。

全体的なロープ張力波形を比較すると、波形の立ち上がり勾配、最大値および除荷勾配に関しては実験結果と解析結果は概ね一致しているものの、波形の継続時間については、解析結果が実験結果よりも長くなっている。これは、本解析では重力やロープの初期張力の他、減衰を考慮していないことが要因と考えられる。

4.4 各種最大応答

図 11 には、全ケースにおける各ワイヤロープ張力および試験体中央のたわみの最大値を、実験結果を横軸に解析結果を縦軸に取って整理したものであり、図の 45° の直線は解析結果と実験結果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 20% 以内の領域を示している。なお、ワイヤロープ張力については、実験における偏心落下の影響を排除するために 2 本のワイヤロープの平均値である。

(a) 図に示す縦ロープ張力に着目すると、膜および梁モデルにかかわらず、実験結果を過大評価する傾向が見られる。なお、両モデルを比較する

と、梁モデルの方が膜モデルよりも誤差が若干小さいことが分かる。

次に (b) 図に示す横ロープ張力に着目すると、T-3 ワイヤロープが破断した W3H25 を除き、両モデルの解析結果は、誤差 20% 以内に収まっていることが確認できる。また、両モデルを比較すると梁モデルの方が若干精度が高いことが分かる。

(c) 図のたわみに着目すると、膜モデルは実験結果を若干大きく、逆に梁モデルは若干小さく評価する傾向が見られるものの、いずれのモデルにおいても実験結果を 20% 程度の誤差範囲内で推定できることが分かる。

4.5 金網応力分布

図 12 には、最大入力エネルギーである W3H25 を例に最大たわみ発生時刻における金網の応力分布を膜モデルと梁モデルで比較して示している。なお、膜モデルは Mises 応力、梁モデルは梁軸方向に発生する直応力である。

図より、膜モデルに関しては、重錘衝突位置から同心円状に応力が分布している他、ロープ交点に向かって応力が発生していることが分かる。一方、梁モデルの場合には、膜モデルの場合と同様な分布性状を示しているものの、重錘落下位置近傍では、降伏応力を超える応力が発生しており、一部塑性化していることが分かる。

金網全体の変形状態に着目すると、膜モデルの場合には縦ロープ側と横ロープ側の変形量は同程度にあるのに対し、梁モデルの場合には横ロープ側が縦ロープ側よりも大きく変形している。この変形状態は実験終了後の金網の変形状態とほぼ一致していることを確認している。

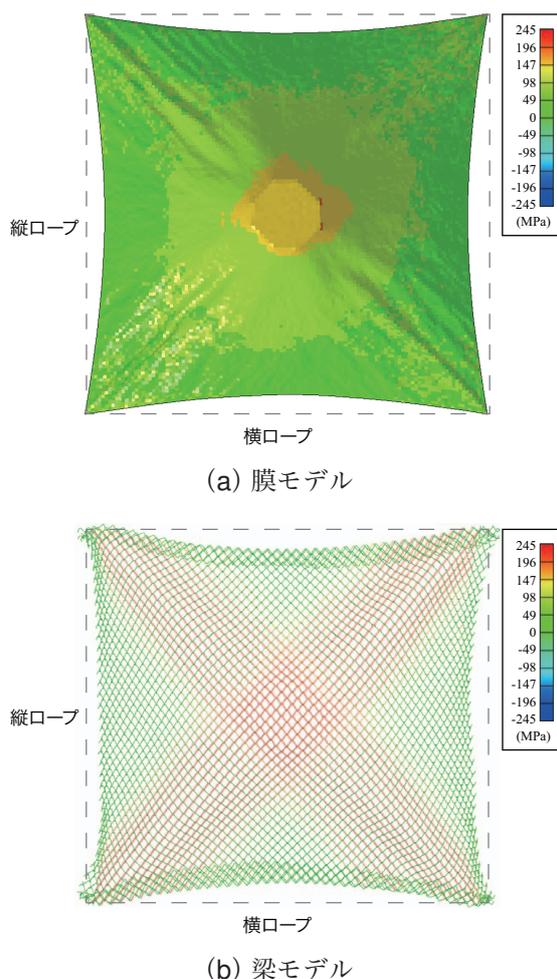


図 12 金網応力分布 (W3H25)

これより、梁モデルを用いることによって金網の異方性による変形性状を適切に再現可能であることが分かる。

5. まとめ

本論文では、落石防護網に用いられるひし形金網を対象に、三次元衝撃応答解析を実施した。ここでは、ひし形金網を1枚の膜として簡易にモデル化する場合と、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検討を行った。本研究で得られた結果を整理すると以下のようなになる。

- 1) 金網中央部の最大たわみ量に関しては、膜および梁モデルのいずれの解析モデルにおいても実験結果をほぼ適切に評価可能である。

- 2) ロープ張力に関しては、いずれの解析モデルにおいても縦ロープ張力は実験結果を過大に評価する傾向がみられるものの、横ロープに関しては、ほぼ適切に評価可能である。
- 3) ひし形金網を梁要素を用いて忠実に再現することにより、ひし形金網の異方性による金網全体の変形性状も再現可能である。

今後は、ロープ初期張力および重力による初期たわみを考慮し、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.
- 2) (公社)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例，2014.
- 3) 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, 131-136, 2014.
- 4) 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, 104-110, 2013.
- 5) 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, 657-6630, 2015.
- 6) 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, 137-143, 2014.
- 7) 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(CD-ROM),2016.
- 8) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.
- 9) Werner Gerber: Guideline for the approval of rock-fall protection kits, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute (WSL), 2001.