

重錘落下衝撃を受ける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 dynamic behavior of diamond-shaped wire net under impact loading

小室雅人*, 西 弘明**, 今野久志***, 田中優貴****

Masato Komuro, Hiroaki Nishi, Hisashi Konno, Yuuki Tanaka

*博(工), 室蘭工業大学大学院准教授, もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**博(工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所グループ長(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

***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)

****修(工), 三井住友建設(株)(〒104-0051 東京都中央区佃 2 丁目 1 番 6 号)

Key Words: diamond-shaped wire net, dynamic behavior, numerical analysis, finite element method

キーワード: ひし形金網, 動的応答, 数値解析, 有限要素法

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(写真-1 参照)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おらず, 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



写真-1 ポケット式落石防護網

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はり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 試験体の概要

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, その素線径は $\phi 5.0$ である。金網は, 図-1 に示すようにその端部をワイヤロープ($\phi 18$)と結合している。写真-2 には, 試験体の設置状況を示している。各ロープと金網の結合には, 素線の一山ごとに U 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, ロードセルは写真に示すように鋼製型枠とピン接合されている。

2.2 実験方法

実験は, 写真-3 に示すような多面体重錘⁹⁾(質量 $m = 100, 300 \text{ kg}$) 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

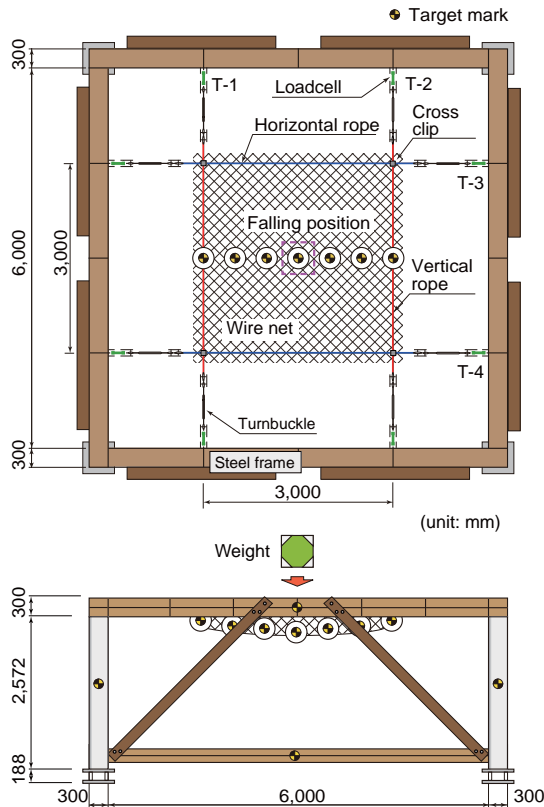


図-1 試験体の形状寸法

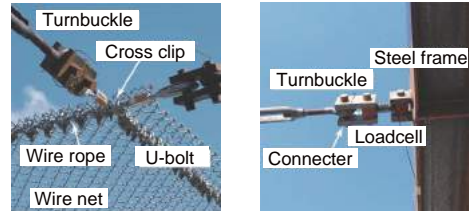


写真-2 試験体の詳細

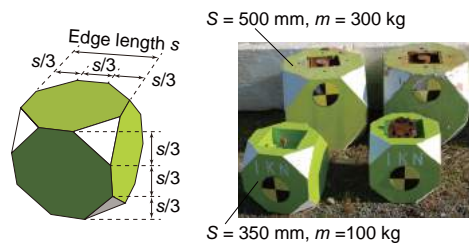


写真-3 コンクリート重錘⁹⁾

表-1 実験ケース一覧

ケース名	重錘質量 m (kg)	落下高さ H (m)
M3H10	300	10
M3H15		15
M3H20		20
M3H25		25
M1H30	100	30

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。実験ケースは、同一の重錘(質量 $m = 300$ kg)で落下高さ H を変化させた場合、および重錘質量を $m = 100$ 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 M, H に付随する数字は、それぞれ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られ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(1,000 fps)による金網中央部の鉛直変位(以後、たわみ)である。

3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

図-2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枚の膜として簡易にモデル化する場合(以後、膜モデル)および金網の素線をはり要素で忠実にモデル化する場合(以後、はりモデル)の2種類について解析を行った。その他の構成部品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節点はり要素、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-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-3には、金網をはり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。はりモデルの場合には金網の素線同士および金網-Uボルト間に、はり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ボルトの締め付けトルクについては考慮せず、U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(はり要素)の接触および剥離・すべりを伴う接触面を定義した。金属間の接触面には摩擦を考慮し、

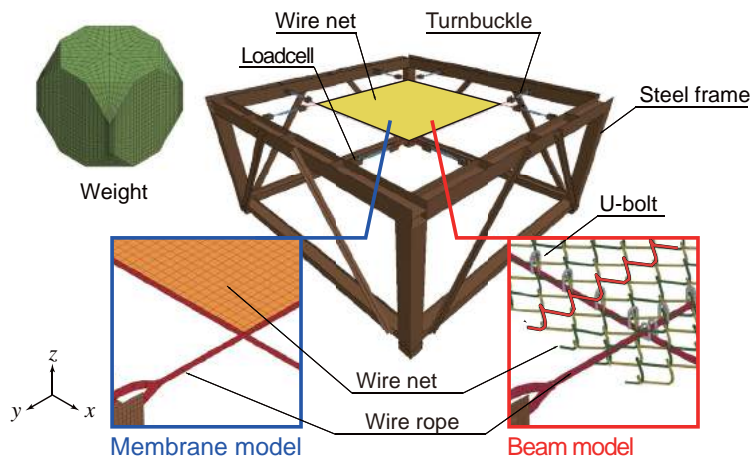


図-2 有限要素モデル

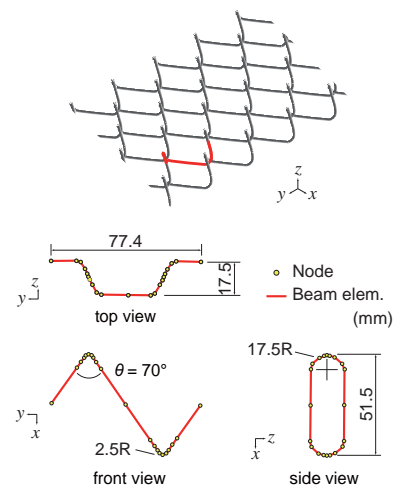
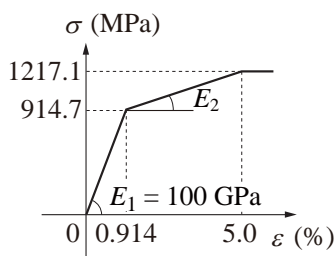
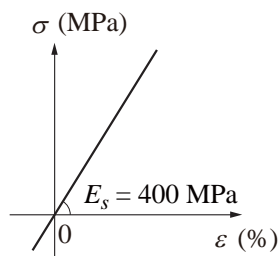


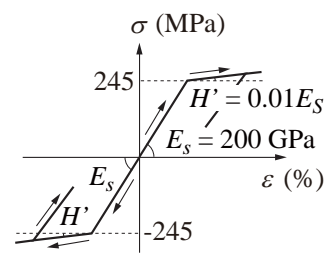
図-3 はり要素を用いた金網の有限要素モデル



(a) ワイヤロープ



(b) 金網(膜モデル)



(c) 金網(はりモデル)

図-4 応力-ひずみ関係

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 V 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、はりモデルによる解析時間は、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-4(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1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 $E_s = 400 \text{ MPa}$ と設定した。

(c) 図には、はり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 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 各種時刻歴応答波形

図-5には、同一入力エネルギー(M3H10 および M1H30)における落下位置のたわみとワイヤ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。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。

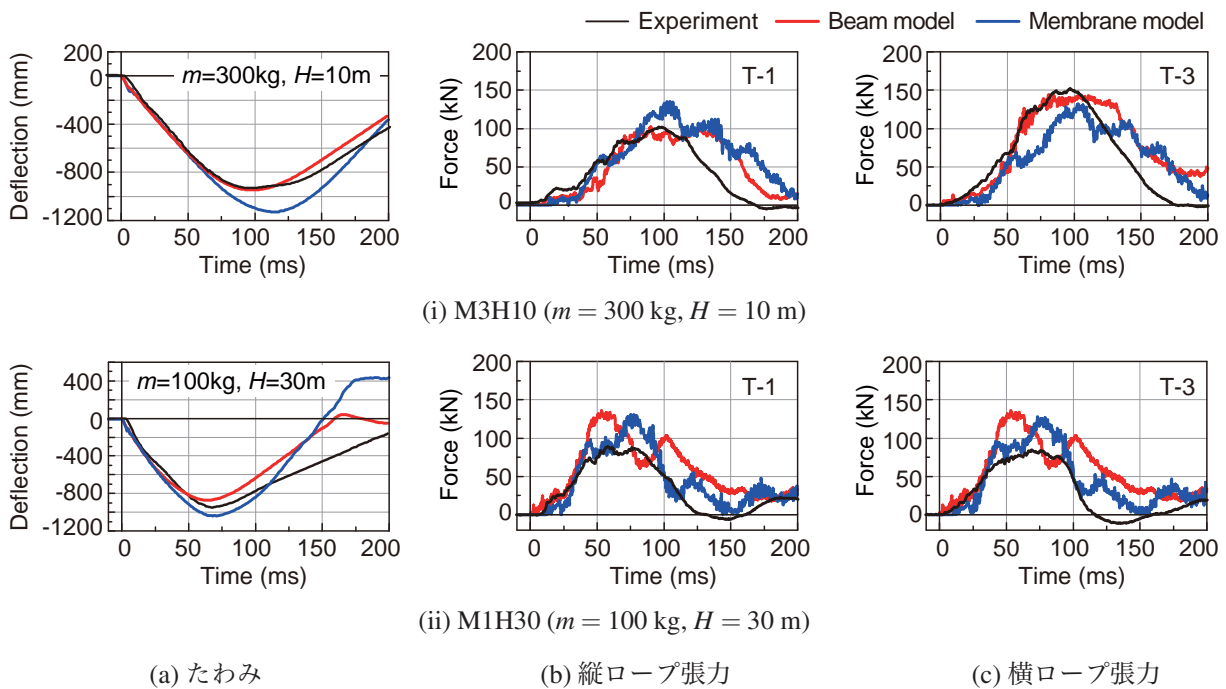


図-5 同一入力エネルギーにおける各種時刻歴応答波形 (M3H10 および M1H30)

(a) 図に示すたわみに着目すると、いずれの解析結果においても波形の立ち上がりは、実験結果と概ね一致していることが分かる。しかしながら、最大たわみを見ると、膜モデルを適用する場合には、実験結果を過大評価する傾向にあるのに対し、はりモデルを適用する場合には、実験結果をほぼ適切に再現可能であることが分かる。

(b) および (c) 図のワイヤロープ張力を見ると、重錘の衝突速度が遅く、質量が大きい M3H10 の場合には、実験結果における縦および横ワイヤロープの最大引張力は、はりモデルを適用することで適切に推定できることが分かる。一方、重錘の衝突速度が速く、質量が小さい M1H30 の場合には、解析モデルにかかわらず、いずれの場合も最大張力を過大に評価する傾向が確認される。これは、実験では重錘の衝突速度が速いほど、U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。

4.2 金網変形状況

図-6には、重錘が衝突後の金網の変形状況の一例として、M3H10における実験時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-7には、入力エネルギーが最大である M3H25 を例に最大たわみ発生時刻における金網の応力分布を

膜モデルとはりモデルで比較して示している。なお、膜モデルは Mises 応力、はり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、はりモデルの場合には、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。

金網全体の変形状況に着目すると、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であるのに対し、はり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。この変形状況は実験終了後の金網の変形状況とほぼ一致していることを確認している。

4.3 各種最大応答値の比較

図-8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) 図の最大たわみに着目すると、膜モデルは実験結果を若干大きく、逆にはり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

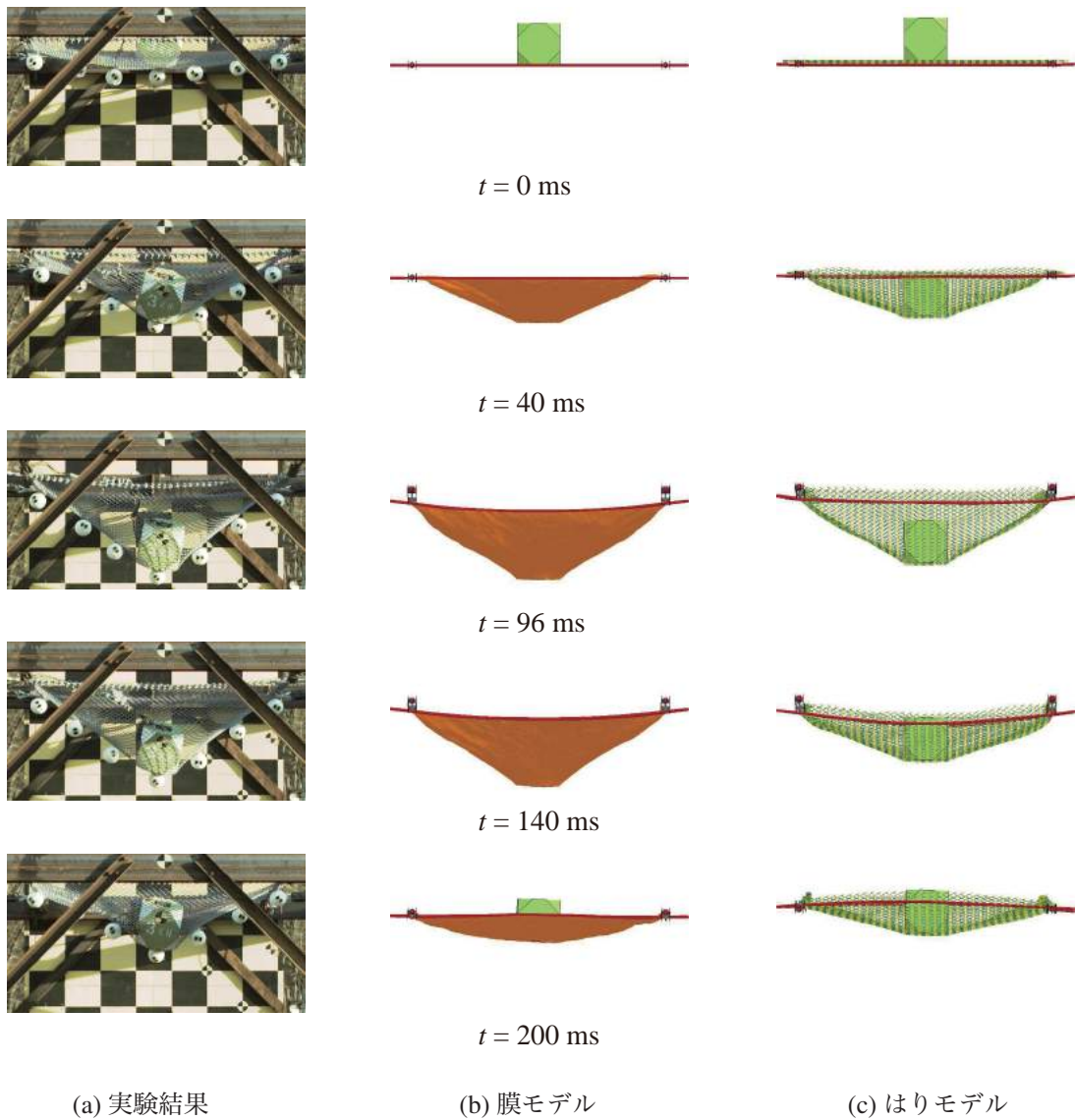


図-6 金網の変形状況 (M3H10)

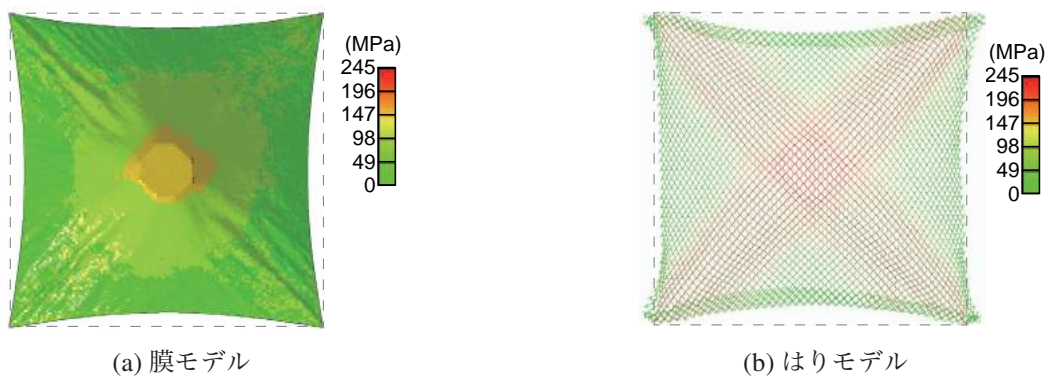
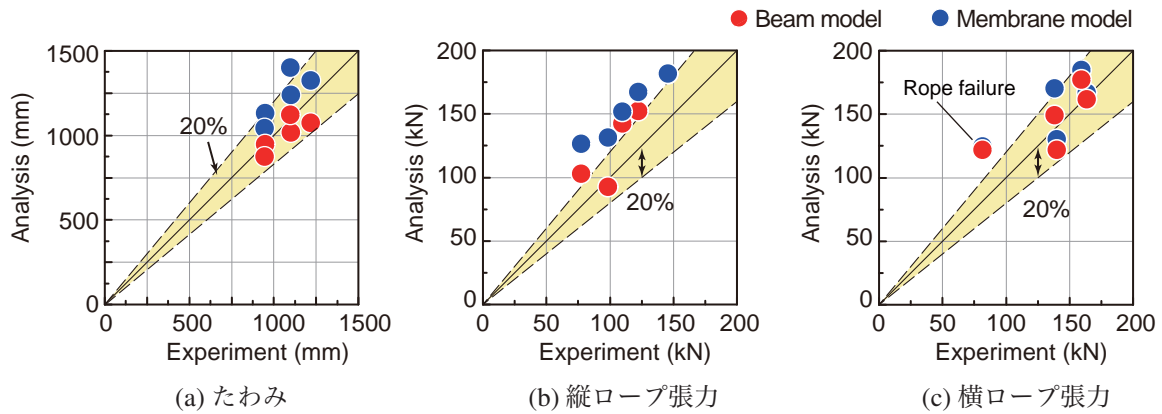


図-7 金網の応力分布 (M3H25)

とが分かる。

(b) 図に示す縦ロープ張力に着目すると、膜およびはり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、はりモ

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。(c) 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 M3H25 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



図－8 各種最大応答値の比較

きる。また、両モデルを比較するとはりモデルの方が若干精度が高いことが分かる。

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はり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ようになる。

- 1) 金網中央部の最大たわみ量に関しては、膜およびはり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) ひし形金網をはり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。

参考文献

- 1) (公社)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) 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.
- 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, Vol. 72, A-45(CD-ROM), 2016.
- 8) Hallquist, J. O.: LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2017.
- 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.