

落石防護柵に用いられるひし形金網の挙動と特性について

On the mechanical performance of diamond-shaped wire net used for rockfall protection fence

松嶋秀士^{a)*}, 井良沢道也^{a)}

Shushi MATSUSHIMA and Michiya IRASAWA

Abstract

In this study, the behavior of diamond-shaped wire net, which is a main component of the blocking surface of a rockfall protection fence, was investigated in terms of wire diameter, material and shape. Three kinds of experiments, in-plane static test, out-of-plane static test and out-of-plane dynamic test, were conducted to evaluate the behavior. From the experimental results, the characteristics of the different materials and shapes were clarified.

Key words : Diamond-shaped wire net, Rockfall protection fence, Static test, Dynamic test, Absorbed energy

和文要旨

本研究では落石防護柵の阻止面を構成する主要部材であるひし形金網について線径、材質及び形状の違いにおける挙動を把握することを目的に、面内静的試験、面外静的試験、面外動的試験の3種類の試験にて評価を行った。その実験結果より材料や形状の違いについての特性が明らかとなった。

キーワード：ひし形金網、落石防護柵、静的試験、動的試験、吸収エネルギー

1. はじめに

落石対策に関する技術基準としては落石対策便覧（日本道路協会）があげられ¹⁾、従来型落石防護柵については、支柱をH形鋼としワイヤロープとひし形金網にて落石に対する阻止面を構成し、金網の吸収エネルギーは計算では算出できない為、一律25kJ¹⁾となっている。

また、落石対策便覧（p.193）では従来型落石防護柵の構造細目について、金網は落石の荷重に応じて適切な線径の金網を用いると記載されているが、その判断基準や比較検討する資料はない。

筆者が過去5年間にわたり富山県、長野県、岐阜県、高知県など被災した防護柵28件を調査すると、6件で金網の損傷が見られた（写真－1）。

金網は落石の阻止面として重要な構成部材であるが、

その特性を把握するために行われた実験は、小室、荒木らのワイヤロープ等複合構成で行った報告がある²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。また、金網単体での試験では、村石らの静的な試験を行った実験⁶⁾や動的な試験を行った実験⁷⁾がある。しかしながら面内方向（金網伸長方向）へ伸長する試験や材質や形状を変えた実験の報告はない。

さらに、近年では落石防護柵の新工法が数多く開発されてきているが、使用されている金網は網目の大きさ・線径・厚みや材質など多様化してきており²⁾⁶⁾金網の特性を十分把握して使用する必要があると考えられる。

本研究では金網を同一条件にて実験を行い、線径や材質及び形状の違いによる金網の特性を明らかにすることにより、落石防護柵に使用される金網の選定の目安を示すことを目的とした。

2. 実験内容と供試体について

実験に使用するひし形金網の材料は、軟鋼線SWMGS-4, SWMGH-4 硬鋼線SWGF1, 軟鋼線の素材成分である炭素量を増加し引張強さを高めた特殊材の4種類で行うこととした。

比較検討するひし形金網の線径は、落石防護柵に一般的に使用されているφ3.2に加えφ2.6, 4.0, 5.0の4種類を用いた。

ひし形金網の網目寸法は、落石防護柵に一般的に使用されている標準形状50mm（図－1左）と異形状である46mm（図－1右）の2種類を用いて以下の比較試験を行った。また、ひし形金網の形状及び名称について図－2に示す。

以上の材料、線径及び形状の違いについて比較検討するために、以下の(1)～(3)の検討項目について実験を行った。



写真－1 落石が金網を突き抜けた事例
（調査日2016年3月6日）
Photo 1 Example of a falling rock
penetrating a wire net
（survey date March 6 2016）

* 連絡著者／corresponding author

a) 岩手大学大学院連合農学研究科

The united Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University
〒020-8550 岩手県盛岡市上田3丁目18-8
3-18-8 Ueda, Morioka-city, Iwate

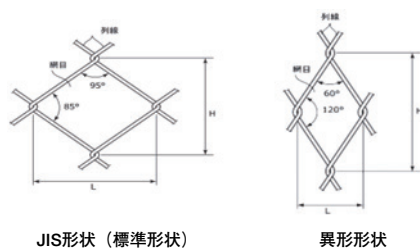


図-1 ひし形金網の形状について

Fig. 1 About the shape of diamond-shaped wire net

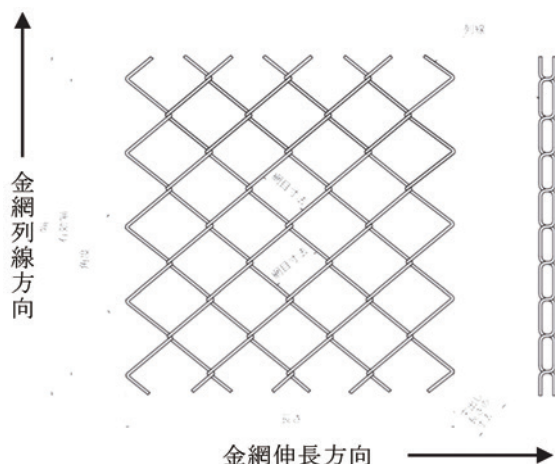


図-2 ひし形金網の形状及び各種名称 (JIS G 3552より)

Fig. 2 Shape and various names of diamond-shaped wire net (from JIS G 3552)

(1) 線径の違い

材質SWMGS-4を使用し線径 $\phi 3.2\text{mm}$, $\phi 4.0\text{mm}$, $\phi 5.0\text{mm}$ にて行う (Case-1, Case-2, Case-3)。

(2) 材質の違い

同一線径 $\phi 3.2\text{mm}$ にて材質をSWMGS-4, SWGF-1, 特殊材にて行う (Case-1, Case-4, Case-5)。

(3) 形状の違い

JIS規格のひし形の形状 (標準形状) を変えた異形形状ものと (図-1 右), $\phi 2.6$ の線材を3本より合わせたワイヤひし形金網 (写真-2) とした。(Case-6, Case-7)。

また, 各実験Caseに使用するひし形金網の材料特性と網目寸法を表-1にまとめた。

3. 実験方法

ひし形金網の試験方法はJIS等には規定がなく, 過去に行われた実験⁹⁾を参考に試験装置を作成し評価を行った。

静的試験では金網を1枚の面材として考え, 引張強度を調べるために金網の面内方向 (金網伸長方向) への引張試験 (ここでは面内静的試験と記載) と落石衝突方向に対しての引張強度を調べる面外方向 (金網面に直角方向) への引張試験 (ここでは面外静的試験と記載) を行った。落石に近い衝撃力を受けた時の挙動を調べる試験として, 水平に張った金網面に対して吊り上げたおもり (重

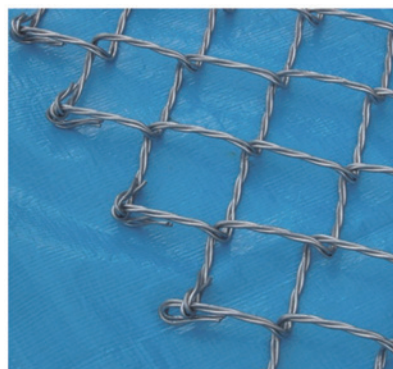


写真-2 ワイヤひし形金網

Photo 2 Diamond-shaped wire mesh with wire strands

表-1 実験に使用する金網の材料特性と実験ケース

Table 1 Material properties and experimental cases of wire mesh used in experiments

実験Case	材質	線径(mm)	引張強さ (N/mm ²)	断面積 (mm ²)	耐力(kN)	伸び%	網目寸法 (mm)
Case-1	SWMGS-4	3.2	428	8.04	3.44	25.0	50.0
Case-2		4.0	430	12.57	5.40	24.0	
Case-3		5.0	421	19.63	8.27	25.0	
Case-4	SWGF-1	3.2	1190	8.04	9.57	5.0	46.0
Case-5	特殊材	3.2	870	8.04	7.00	7.5	
Case-6		3.2	870	8.04	7.00	7.5	
Case-7	SWMGH-4	2.6×3	746	15.93	11.88	8.0	50.0

* 1 表記載の引張強さ, 伸びの値は材料検査成績書の値を記載

錘) を自由落下させ金網が破壊するまでの落下高さを求める衝撃試験 (ここでは面外動的試験と記載) を行った。

各材料の面内及び面外静的試験による荷重と変位の関係及び面外動的試験による重錘補足時の衝撃力とたわみ量の違いと金網が破壊するまでの落下高さ (入力エネルギー) を評価することとした。

3.1 面内静的試験

面内引張試験には写真-3及び図-3に示すように, 1000mm×1000mmの範囲を支持点として, 4辺のうち6本の鋼棒 (金網拘束金具) で対向する2辺を固定することにより横方向変位を拘束し (写真-3の左右), 他の対向する2辺を7本の鋼棒で油圧ジャッキを用いて一様に引張荷重を作用させる (写真-3の上下方向) 装置を用い, いずれかの素線が破断するまで载荷しロードセル (荷重計) による荷重と変位計による金網の変位量を計測

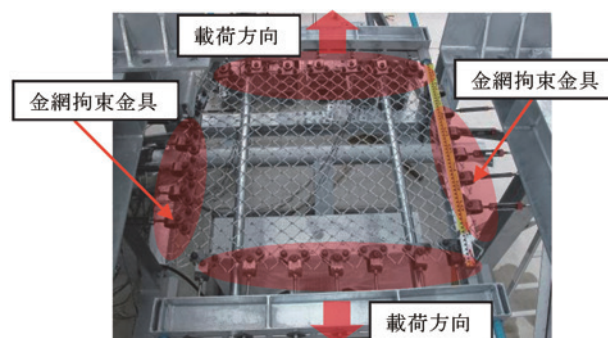


写真-3 面内静的試験状況

Photo 3 In-plane static test status

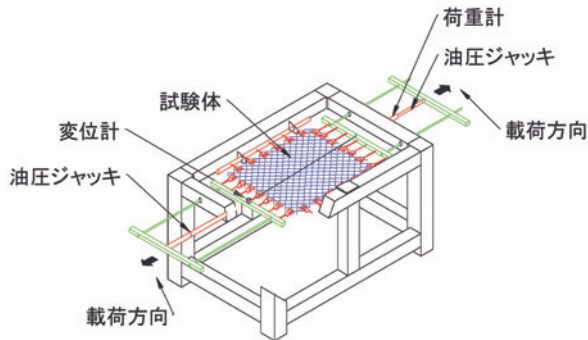


図-3 面内静的試験装置概略図
Fig. 3 In-plane static test equipment diagram

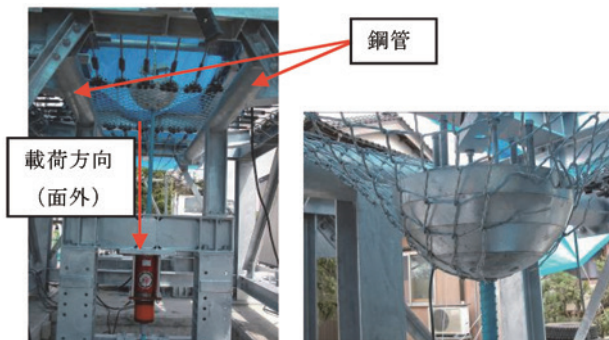


写真-4 面外静的試験状況
Photo 4 Out-plane static test status

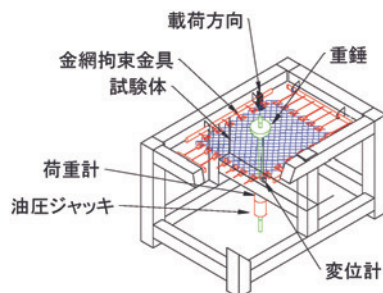


図-4 面外静的試験装置概略図
Fig. 4 Out-plane static test equipment diagram

した。

3.2 面外静的試験

面外静的载荷試験においては面内引張試験と同様の装置を用いたが、横方向は幅1000mmの位置に鋼管を配置し、金網が载荷方向へ弓状に変形しないよう鉛直変位を拘束した(写真-4, 図-4)。

直径400mm, 質量1.53kNの鋼製の半球を金網上に載せ下方より鋼棒を用いて引張り, ロードセルを用いた荷重と変位計より金網の変位量を計測した。

3.3 面外動的試験

面外動的試験では面外静的試験と同様の装置と直径400mm, 質量2.21kNの鋼球をホイスにて吊り上げた後重錘離脱装置を用いて落下させた。鋼球の落下高さを100mmずつ増加させ, その都度新しい金網に交換し金網が破断するまで落下高さを増大して試験を繰り返した(写真-5, 図-5)。重錘には加速度計を設置し衝撃力と

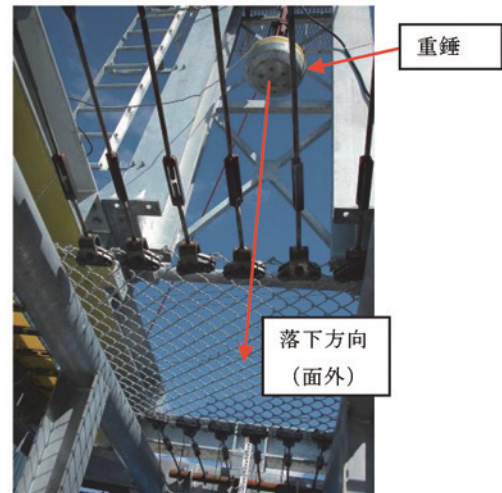


写真-5 面外動的試験状況
Photo 5 Out-plane dynamic test status

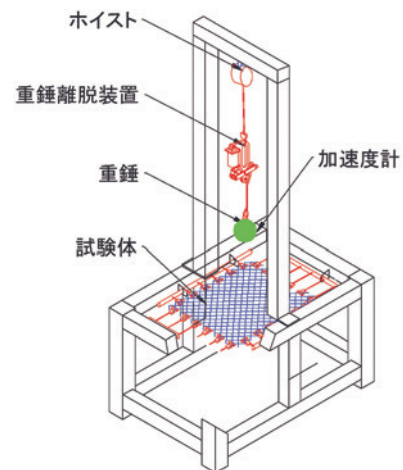


図-5 面外動的試験装置概略図
Fig. 5 Out-plane dynamic test equipment diagram

重錘のたわみ量を計測した。

変形の様子を高速カメラにて撮影し, 実験後のたわみ量をメジャーにて目視計測で行った(写真-6)。

3.4 測定機器

計測に用いる機器を表-2にまとめた。面内静的試験に使用するロードセルは定格容量200kNのCLC-200 KNAを用い, 面外静的試験では定格容量2 MNのKCE-2 MNAとした。面内及び面外静的試験に使用する変位計は, 定格容量1000mmのDP-1000Cを用いた。面外動的試験に使用する加速度計は, 定格容量1000m/s²のARJ-1000Aを用いデータ計測は, データロガーとしてNR-500とひずみ計測ユニットのNR-ST04を用いた。

4. 実験結果

4.1 線径の違いによる挙動について

4.1.1 面内静的試験

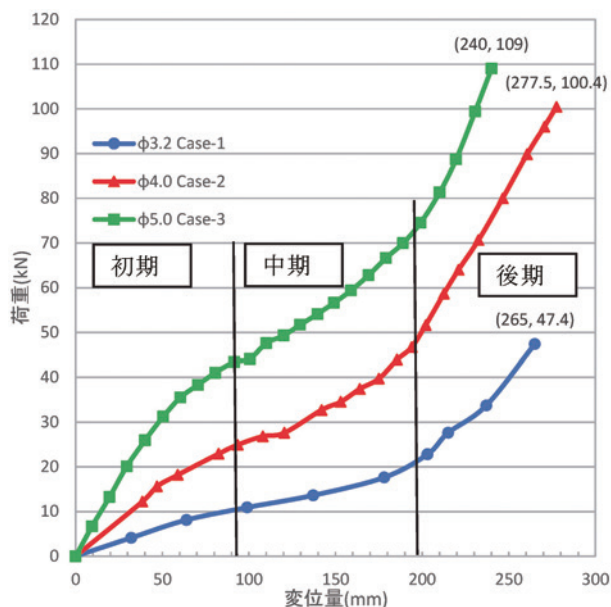
各線径において, 金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量及び荷重の結果を図-6にま



写真－6 面外動的試験状況（たわみ量計測）
Photo 6 Out-plane dynamic test status (deflection measurement)

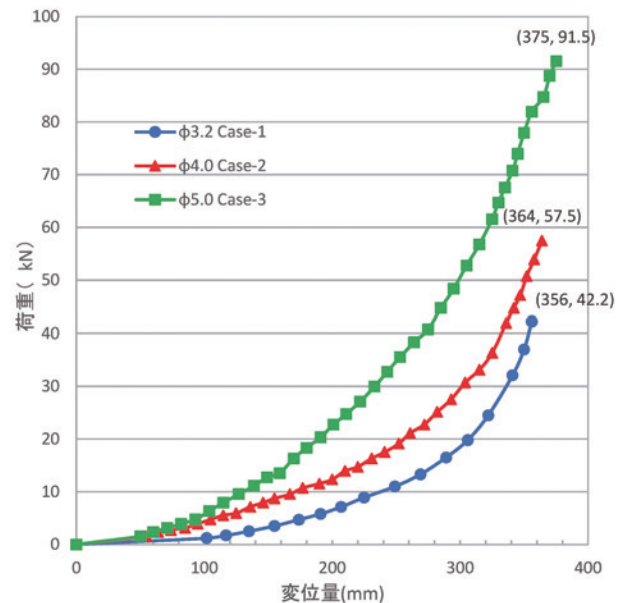
表－2 測定機器
Table 2 measuring equipment

計測項目	測定機器
荷重	ロードセル：東京測器 KCE-2MNA, CLC-200KNA
変位（静的）	変位計：東京測器 DP-1000C
変位（動的）	加速度計，高速度カメラ（480fps），目視計測
衝撃力	加速度計：東京測器 ARJ-1000A
データロガー	キーエンス：NR-500, NR-ST04 サンプリング周期：静的 1s 動的 1ms



図－6 線径の違いによる面内静的試験結果
Fig. 6 In-plane static test results due to differences in wire diameter

とめた。変位量と荷重の関係は一定の勾配で変位せず，初期，中期，後期で傾きが異なることがわかる。経過を観察すると，初期はひし形形状を保持しようとする耐力が影響し，中期はひし形の形状変形が始まり，後期は形状変形が限界に達し素線自体の耐力によるものであると



図－7 線径の違いによる面外静的試験結果
Fig. 7 Out-plane static test results due to differences in wire diameter

考えられる。

線径が大きくなると破断荷重も大きくなるが，最大変位量に大きな違いがないことがわかった。

4.1.2 面外静的試験

各線径において，金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量と荷重の結果を図－7にまとめた。

面内静的試験のような勾配が異なる直線的な傾きではなく2次曲線を描いており，経過観察すると重錘との接触箇所近傍で金網の形状の変形が始まりその後素線が破断した（写真－4右）。

金網の素線の断面積に比例した破断荷重となっているが，面内静的試験同様で最大変位量に大きな違いはなかった。

類似の試験を村石ら⁶⁾が行っているが，線径が変化しても変位量に違いは少ないという類似の傾向が得られている。

4.1.3 面外動的試験

各線径において金網の素線が破断なく重錘を受け止めた時の重錘落下高さ，金網のたわみ量，入力エネルギーの結果を表－3にまとめた。また，その際の衝撃力を図－8に示す。

表－3 線径の違いによる面外動的試験結果
Table 3 Out-plane dynamic test results due to differences in wire diameter

	落下高さ (m)	たわみ量 (mm)	入力エネルギー (kJ)
Case-1	0.8	340	1.9
Case-2	2.4	272	5.8
Case-3	3.5	310	8.4

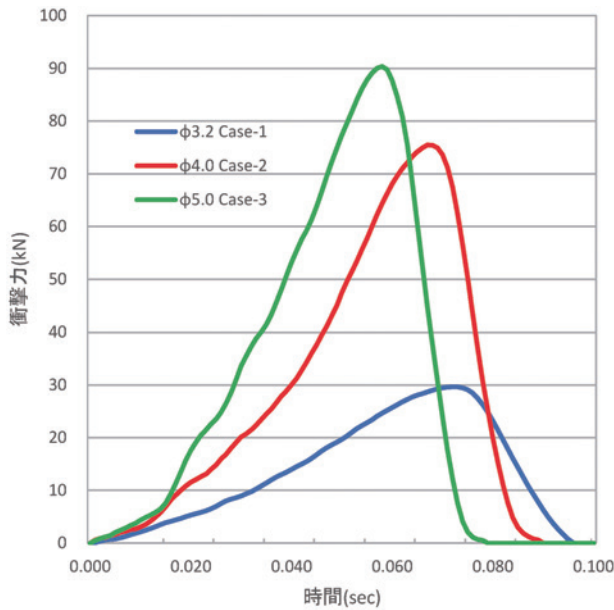


図-8 線径の違いによる面外動的試験結果

Fig. 8 Results of Out-plane dynamic test due to differences in wire diameter

素線の耐力に比例して重錘の落下高さや衝撃力が異なっているが、たわみ量は落下高さや素線の耐力に依存していると考えられ、面外静的試験のような一定の値を示さなかった。

4.2 材質の違いによる挙動について

4.2.1 面内静的試験

各材質において、金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量及び荷重の結果を図-9にまとめた。4.1.1同様に初期・中期・後期でグラフの傾きが異なり材質を変えても似通った曲線を描いている。

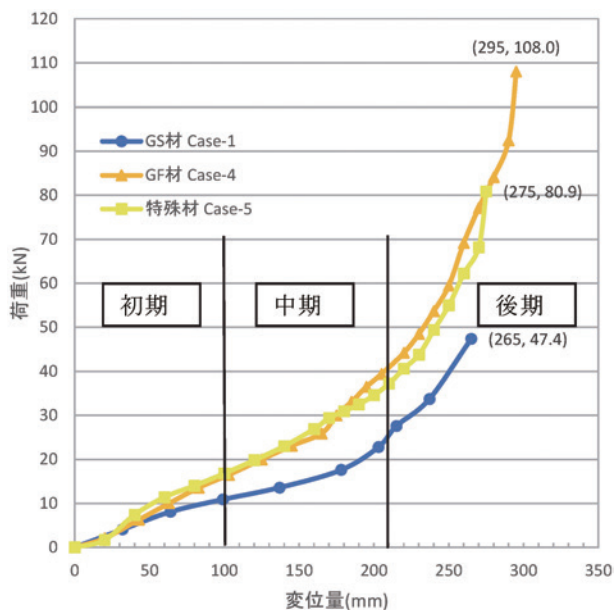


図-9 材質の違いによる面内静的試験結果

Fig. 9 In-plane static test results due to material differences

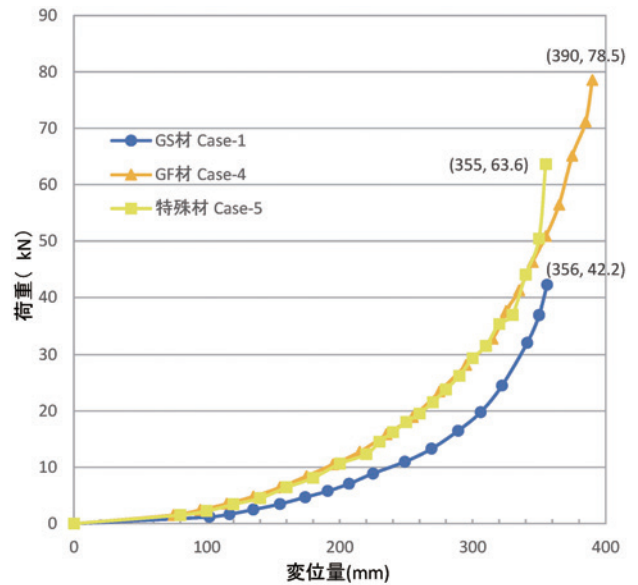


図-10 材質の違いによる面外静的試験結果

Fig. 10 Out-plane static test results due to material differences

CASE-4とCASE-5を比較すると初期・中期では同じ挙動を示しているが、後期では破断荷重に違いがあり各材質の引張強さに比例した結果となっている。

線径の違い同様に材質が異なる場合でも最大変位量に違いがなかったことから、線径及び材質に関係なくひし形金網の形状で最大変位量が決まると考えられる。

4.2.2 面外静的試験

各材質において、金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量と荷重の結果を図-10にまとめた。4.1.2の線径の違い(図-7)と同様に2次曲線を描いており最大荷重は引張強さに比例しているが、最大変位量には違いが見られない。この結果においても4.2.1の面内静的試験と同様に、ひし形金網の形状で最大変位量が決まると考えられる。

4.2.3 面外動的試験

各材質において、金網の素線が破断なく重錘を受け止めた時の重錘落下高さ、金網のたわみ量及び入力エネルギーの結果を表-4にまとめた。また、その際の衝撃力を図-11に示す。

素線の引張強さに比例して落下高さ及び衝撃力が異なっているが、たわみ量は4.1.3に示した線径の違い同様に落下高さや素線の耐力に依存していると考えられる。

破損状況であるが、特殊材及びSWGF-1において素

表-4 面外動的試験結果
Table 4 Out-plane dynamic test results

	落下高さ (m)	たわみ量 (mm)	入力エネルギー (kJ)
Case-1	0.8	340	1.9
Case-4	2.9	318	7.0
Case-5	2.5	350	6.0

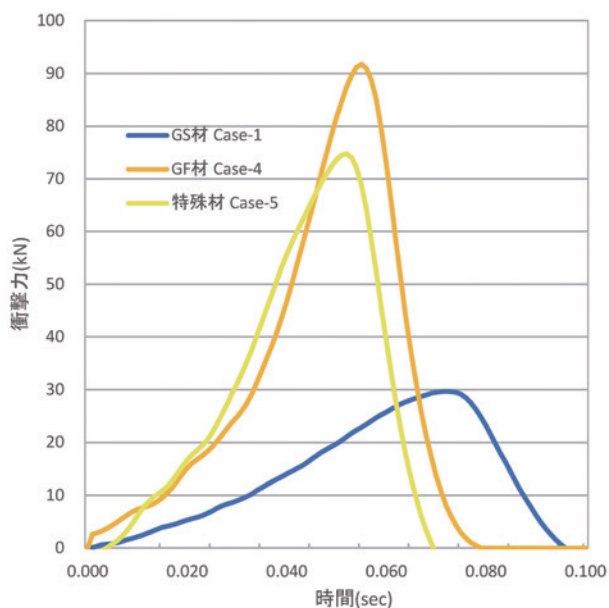


図-11 材質の違いによる面外動的試験結果

Fig. 11 Out-plane dynamic test results due to material differences

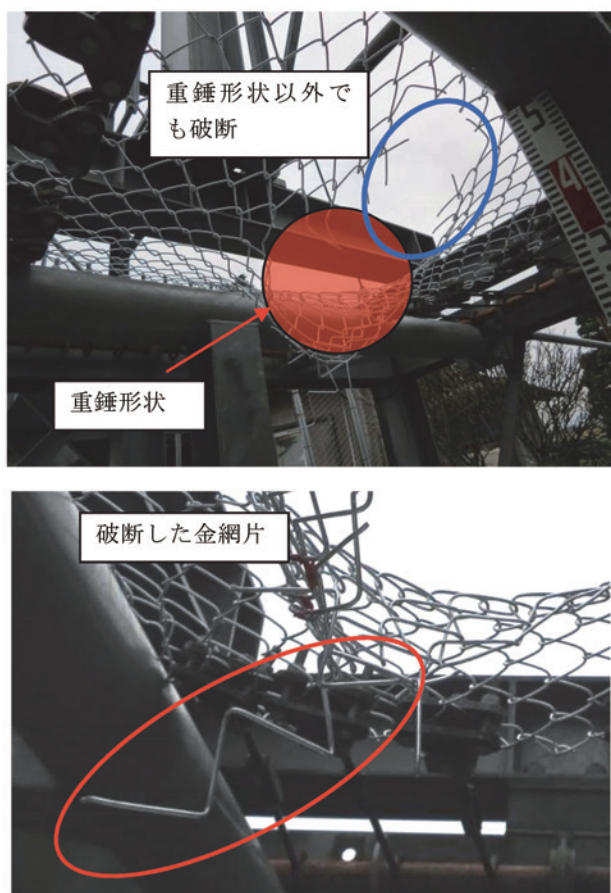


写真-7 SWGF-1における面外動的試験状況

Photo 7 Out-plane dynamic test phenomena at SWGF-1

線がせん断破壊を起こし重錘径以上の破網が見られた (写真-7)。

軟鋼線であるSWMGS-4では、重錘形状内で数本破断しており破断の様子に違いが見られた (写真-8

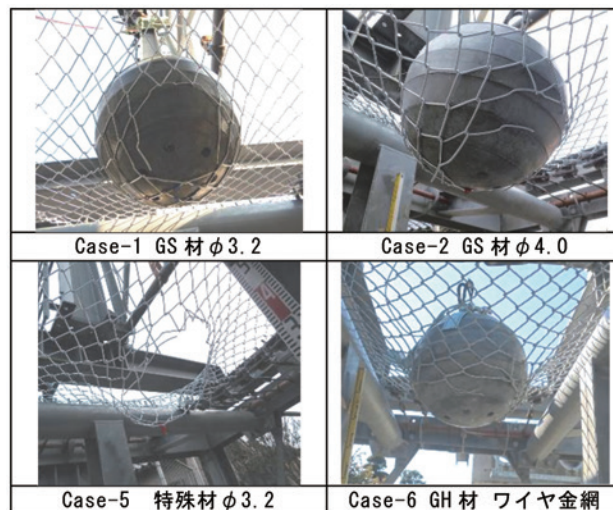


写真-8 各Caseにおける面外動的試験破断状況

Photo 8 Out-plane dynamic test break phenomena in each case

Case-1)。

硬鋼線であるSWGF-1は、軟鋼線と比べ引張強さはあるが伸びがなく (表-1) 一定以上の力が加わると破断し易いためこのような破壊が起きたと考えられる。

他の材料では素線が破断しても重錘を受け止めるか重錘の球形状の形がわかるような貫通が見られる (写真-8)。

4.3 形状の違いによる挙動について

4.3.1 面内静的試験

標準形状 (図-1左) とは異なり、ひし形の角度 (図-1右) や素線の形状の違い (写真-2) について今までの試験方法と同様なひし形金網の幅方向 (金網の列線方向) に加え、長さ方向 (金網伸長方向) の2方向 (図-2) で引張試験の比較を行った。

特殊材の標準形状 (図-1左) の結果 (Case-5) をベンチマークとして比較し、その結果を図-12, 13に示す。

Case-5とCase-6は同じ材質であるが、形状の違いにより、Case-6の変位量は幅方向では小さく、長さ方向で大きく明確な違いがあった。Case-6では幅方向である鋭角側に荷重をかけた場合、初期からひし形の形状を保持したまま荷重が上昇し形状の変化があまり見られないまま後期へと移り素線が破断した。長さ方向である鈍角側に荷重をかけた場合、中期においてひし形の形状変形が変位量110mmから380mmまで続いた。また破断までの変位量は幅方向の鋭角側に比べ3倍の伸びの違いが見られた。

Case-7のワイヤ金網ではCASE-5特殊材 (標準) と比較すると荷重及び変位量とも両方向において1.3~1.5倍の値を示している。4.1.1や4.2.1では線径や材質を変更しても変位量に大きな違いが無かったが、Case-7のワイヤ金網は標準形状と同じ網目寸法であるが約100mm変位量が大きかった。

以上のことから、標準形状では線径や材質を変更して

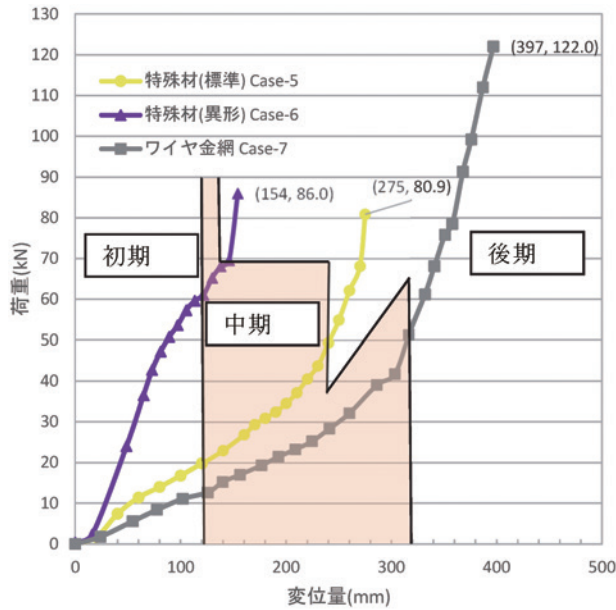


図-12 形状の違いによる面内静的試験 (幅方向)
Fig. 12 In-plane static test (width direction) due to differences in shape

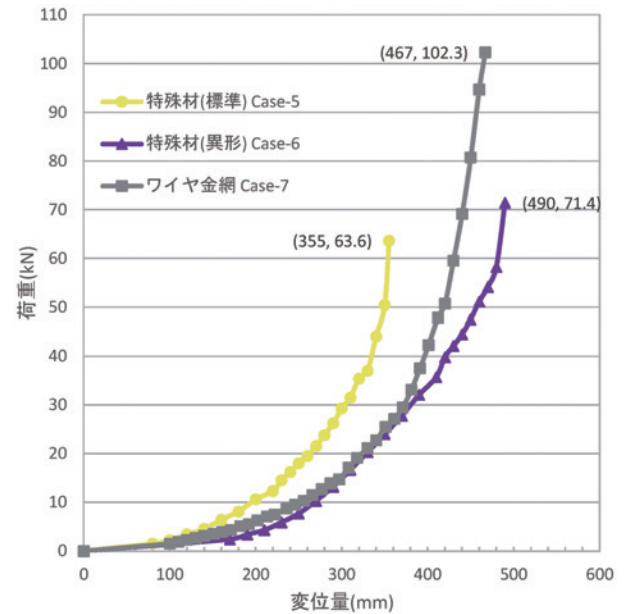


図-14 形状の違いによる面外静的試験結果
Fig. 14 Out-plane static test results due to differences in shape

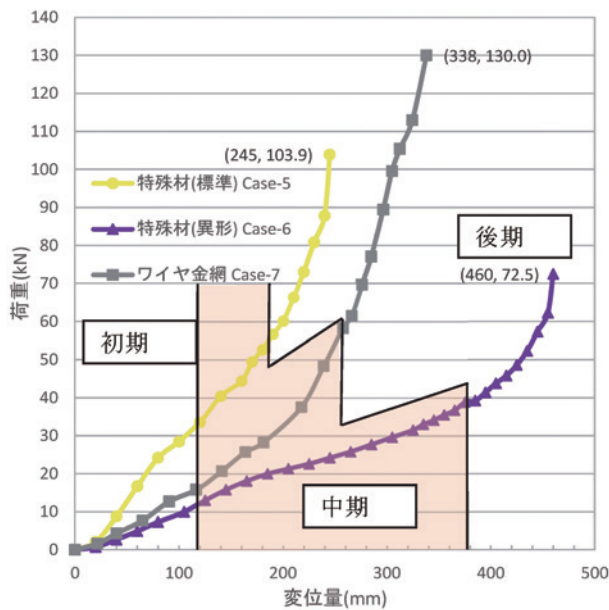


図-13 形状の違いによる面内静的試験 (長さ方向)
Fig. 13 In-plane static test (length direction) due to differences in shape

も耐力に比例した傾向を示していたが、金網の形状を変えることにより標準形状と異なる挙動を示すことがわかった。

4.3.2 面外静的試験

各形状において、金網の素線が破断するまでの変位量と荷重の関係と最大変位量と荷重の結果を図-14にまとめた。

Case-5 の特殊材 (標準) と Case-6 の特殊材 (異形) を比較すると、荷重10kNまでの挙動に違いがあり異形の方が標準より変形量が大きいが、その後は同じような荷重と変位量の関係を示している。Case-6 の経過観察

より、ひし形の形状が徐々に崩れながら変形し、形状が安定すると荷重が上がり始めた。このひし形状の変形がCase-5 よりCase-6 が大きいため、グラフの曲線に違いが生じたと考えられる。

Case-5 とCase-7 のワイヤ金網を比較すると、同様な2次曲線を描くが、荷重で1.6倍、変位量で1.3倍の違いがあった。4.1.2や4.2.2のように線径や材質を変更しても変位量に大きな違いが無かったが、Case-7 のワイヤ金網は標準形状と同じ網目寸法であるが、4.3.1の結果と同様に変位量に違いがあった。

4.3.3 面外動的試験

各材料を比較するため重錘の落下高さを一定とし、その際の金網のたわみ量と入力エネルギーの結果を表-5にまとめた、また、その際の衝撃力を図-15に示す。なお、重錘を受け止めた最大落下高さは特殊材料 (異形) 及びワイヤ金網ともに2.9mであった。

Case-5 特殊材 (標準) とCase-6 特殊材 (異形) を比較すると衝撃力に違いはないがたわみ量が50mm大きくなった。

Case-5 特殊材 (標準) とCase-7 のワイヤ金網を比較すると、たわみ量に違いはないが、Case-7 のほうが衝撃力は小さくなった。

表-5 面外動的試験結果
Table 5 Out-plane dynamic test results

	落下高さ (m)	たわみ量 (mm)	入力エネルギー (kJ)
Case-5	2.5	350	6.0
Case-6	2.5	400	6.0
Case-7	2.5	350	6.0

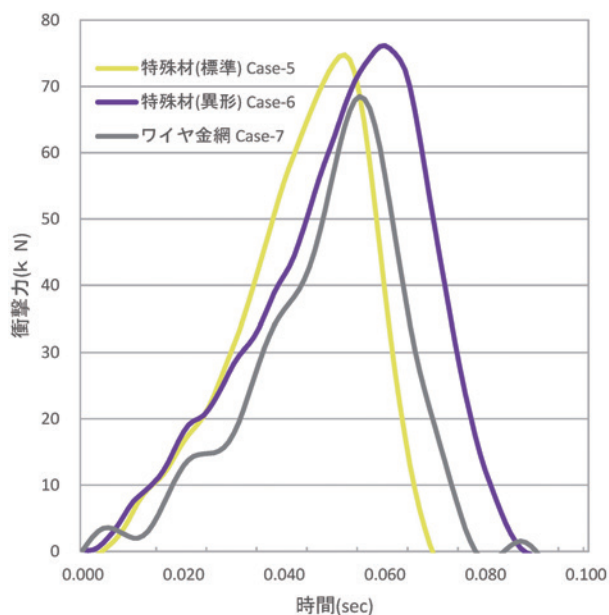


図-15 形状の違いによる面外動的試験結果

Fig. 15 Out-plane dynamic test results due to differences in shape

5. まとめ

本研究では従来型落石防護柵に用いられているひし形金網の特性について線径、材質、形状を変えることによる比較実験を行うことにより挙動を把握した。

線径、材質、形状を変えることによりそれぞれ異なる挙動を示した。

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) 面内静的試験及び面外静的試験において、標準形状のひし形金網は線径や素線の引張強さに比例して金網が破断する荷重は変わるが、変位量に違いは見られない。これは、村石ら⁶⁾や今野ら⁷⁾の報告書と同様な傾向が得られた。

(2) 引張強さの大きい硬鋼線を金網に使用することにより吸収可能エネルギーは大きくなるが、表-1に示す素線自体の伸びが少ないため、局所的な集中荷重を受けるとせん断破壊により破断範囲が広範囲に広がる。このため小さな落石が金網に高速で衝突する場合など落石防護柵へ使用の際は注意が必要である。

(3) ひし形形状の角度を変えると面内静的試験及び面外静的試験では標準形状と違う挙動を示し、幅方向と長さ方向で異なる挙動を示す(図-12, 13, 14)。

落石防護柵では落石衝突時に金網が柵高方向及び柵延長方向とも変形するが、金網の形状を変更することにより落石衝突時の変形を制御できると考えられる。

例えば、落石衝突時に柵高が低くならないように変形

させることが可能になると考えられる。

(4) 素線を3本より合わせたワイヤ金網は、変形性、耐荷重に優れており、エネルギー吸収量を向上することが可能と考えられる。

また、落石衝突時における金網が受け止める衝撃力は、ワイヤロープ及び支柱に伝わることから、衝撃力を低減することにより、ワイヤロープや支柱への負担を軽減できると考えられる。

今回の実験によりひし形金網の異なる線径、材質及び形状の挙動の違いを確認することができたが、今後落石防護柵を開発する上で特殊な金網を用いる場合などには金網の特性を調べる標準試験方法の確立が必要と考えられる。また、使用する金網の特性を把握した上で落石防護柵全体(吸収可能エネルギー、変位量など)の評価及び検討が必要と考えられる。

今後は落石防護柵の実態に合わせ、横ロープを配した場合や、その間隔の違いによる挙動の違いについてさらに実験を行い金網の特性を明らかにするとともに落石防護柵の設計方法を確立する予定である。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、金沢大学名誉教授吉田博博士には、実験装置の提供及び測定方法のご助言を頂いた、(株)日之出金網の真鍋賀行氏には、金網の製作及び実験へのご協力を頂いた、(株)ビーセーフの社員のみなさまには実験準備、試験体の組立や実験計測など多岐にわたってご協力頂いた。記して以上の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) (社)日本道路協会 (2017): 落石対策便覧, 186p.
- (2) (公社)地盤工学会 (2014): 落石対策工の設計法と計算例, pp. 152-158.
- (3) (国研)土木研究所 (2017): 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.
- (4) 小室雅人, 服部桃加, 今野久志, 荒木恒也 (2018): 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, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 74-1, pp. 303-313.
- (5) 荒木恒也, 今野久志, 西弘明, 小室雅人, 田中優貴 (2017): 落石防護柵に使用するひし形金網の重錘落下衝撃試験, 土木学会構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 1074-1083.
- (6) 村石尚, 杉山友康, 佐溝昌彦, 安藤和幸 (2001): 静的荷重下における落石防護ネットの変形特性, 土木学会論文集No. 693 / VI-53, pp. 95-103.
- (7) 今野久志, 西弘明, 荒木恒也, 加藤俊二, 小室雅人 (2015): 落石防護柵に使用するひし形金網の実規模載荷試験, 土木学会鋼構造年次論文報告書, 第23巻, pp. 650-656.

(原稿受付2021年2月3日, 原稿受理2021年5月7日)