

腐食劣化した従来型落石防護柵構成部材の各種載荷試験結果について

Various loading test results on elements of corroded conventional rockfall protection fences

今野久志*, 葛西 聡**, 橋口寛史***, 堀 謙吾****, 松嶋秀士*****

Hisashi Konno, Satoshi Kasai, Hiroshi Hashiguchi, Kengo Hori, Syushi Matsushima

*博(工), (国研)土木研究所寒地土木研究所総括主任研究員(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

** (国研)土木研究所寒地土木研究所上席研究員(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

***東京製綱(株)エンジニアリング事業部マネージャー(〒103-8306 東京都中央区日本橋3丁目6-2)

****日鉄建材(株)土木開発技術部シニアマネージャー(〒101-0021 東京都千代田区外神田4丁目14-1)

***** (株)ピーセーフ代表取締役(〒939-1518 富山県南砺市松原220-6)

Key Words: conventional rockfall protection fence, loading test, wire net, wire rope

キーワード: 従来型落石防護柵, 載荷試験, 金網, ワイヤロープ

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには様々な落石防護施設が建設されている。この中でロックシェッドに関しては5年に1度の頻度を目安とする定期点検¹⁾が義務化され、近接目視による点検と診断が行われている。

一方、落石防護施設の一つである従来型落石防護柵はワイヤロープ、ひし形金網、H形鋼支柱等の比較的入手しやすい材料から構成される構造物であることから、これまでに数多く設置されてきており、高エネルギー吸収型の落石防護柵等を含め、さらに設置件数は増加するものと考えられる。このことから、これらの落石防護施設に関しても今後維持管理が重要な課題となるものと想定されることから、筆者らは維持管理に係る技術資料の策定に向けた検討を開始している。定期点検では、近接目視が基本であり、目視による劣化度判定が行われるが、劣化度と部材強度の関係については調査データが少ないのが現状である。

そこで筆者らは、落石防護柵等の合理的な維持管理手法の検討に資するためのデータ取得を目的に、廃道区間より採取したひし形金網およびワイヤロープの各種載荷試験を実施したのでその結果について報告する。

2. 試験材料採取箇所

各種載荷試験に使用した材料は、北海道内の2箇所の廃道区間より採取したものである。ひし形金網(φ3.2mm)は写真-1に示す従来型落石防護柵より採取し



写真-1 試験材料採取箇所(落石防護柵)



写真-2 試験材料採取箇所(ケーブル型防護柵)

た1種類(以後、劣化材)であり、ワイヤロープ(3×7G/O18φ)については、写真-1の従来型落石防護柵および写真-2のケーブル型防護柵より採取した2種類(以後、それぞれ劣化材Aおよび劣化材B)である。いずれの採取箇所も海岸線近傍に位置しており厳しい腐食環境下にあるが、構造物が設置されてからの経過年数は不明である。

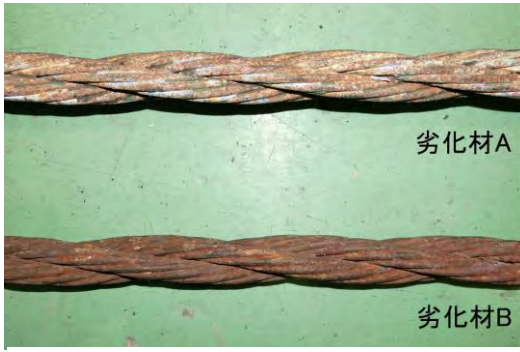
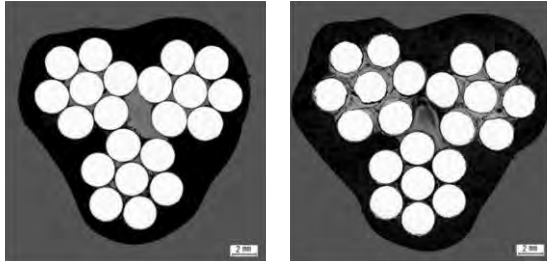


写真-3 劣化材の外観



(a) 劣化材A (b) 劣化材B
写真-4 劣化材A, Bの断面OM写真

3. ワイヤロープ

3.1 材料調査

ワイヤロープの材料調査として酸洗減量測定および断面OM観察（光学顕微鏡観察）を実施した。劣化材の外観を写真-3に示す。劣化材Aは全体的に白色の腐食生成物が多く、劣化材Bは全面赤色の腐食生成物となっていた。

(1) 酸洗減量測定

酸洗減量測定については、100mm程度に切断した試験材料を1本ずつにばらし、酸洗液にはインヒビター添加の塩酸水を使用し、溶液中でめっきおよび錆を除去した。酸洗前後でマイクロメーターにより線径を測定した。

表-1には、酸洗前後の線径測定結果を示す。全体的に赤色の腐食生成物が発生していた劣化材Bは、劣化材Aよりも線径が細くなっていた。

(2) 断面OM観察

断面OM観察については、観察対象箇所をエポキシ樹脂で埋め込み所定の長さに切断し、湿式研磨で仕上げた後、観察を行った。

写真-4には、断面OM写真を示す。劣化材Aは、3本の本より線の形状がほぼ均一であり素線断面もほぼ円形である。一方、劣化材Bは、素線間に腐食生成物が多く発生しており素線同士の間隔が広がっているととも素線断面も所々腐食により減肉状態であった。

3.2 静的引張試験³⁾

(1) 引張試験概要

試験体は、両端に円錐台の亜鉛合金端末を取付けたものであり、端末間のワイヤロープ長は900mmである。

表-1 酸洗前後の線径測定結果

調査材		線径 (mm)		
		酸洗前	酸洗後	減少量
劣化材A	A-1	3.030	2.811	0.219
	A-2	2.993	2.795	0.198
	A-3	3.000	2.809	0.191
劣化材B	B-1	2.955	2.766	0.189
	B-2	3.005	2.743	0.262
	B-3	3.019	2.778	0.240

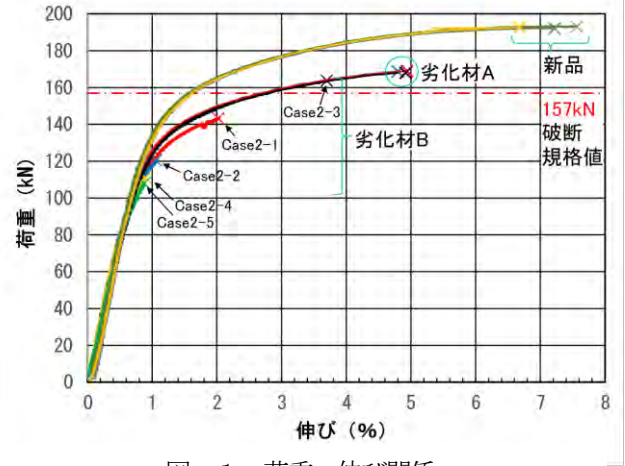


図-1 荷重-伸び関係

試験は、素線もしくはストランドが破断し荷重が増加しなくなった時点で終了とした。劣化材Aについては、試験結果のばらつきが小さかったことから3体、劣化材Bについては試験結果にばらつきが見られたことから5体に対して引張試験を実施した。計測項目は、載荷荷重とワイヤロープの伸びであるが、伸びは定点カメラで計測し、試験体中央の500mm標点間距離に対する%表示とした。

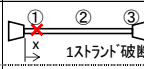
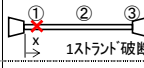
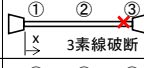
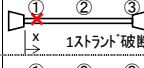
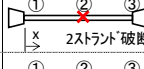
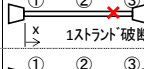
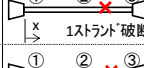
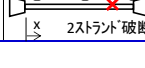
(2) 引張試験結果

図-1には、劣化材AおよびBと比較のため同一規格で現在使用されている新品ワイヤロープ（以後、新品材）の荷重-伸び関係を示している。

劣化材Aの荷重-伸び関係についてみると、3体の試験結果にばらつきはなくほぼ同一の曲線が得られており、破断荷重はいずれの試験体も約170kNであり、落石対策便覧²⁾に示されている破断荷重の規格値157kNを上回っている。破断伸びに関しては、いずれの試験体も5%程度であった。以上より、劣化材Aは外観からは錆や汚れが見られるものの、錆による素線の不均一な腐食がなく、見た目に反して劣化があまり進行していないものと推察される。

一方、劣化材Bの荷重-伸び関係についてみると、5体の試験結果は大きくばらついていることが分かる。これは外観状態からも分かるように、錆が全体的に発生していることに加えて素線上に不均一に発生しており、劣化の程度にばらつきがあることによるものと推察される。破断荷重に関してはCase2-3のみが規格値を若干上回っているものの、残りの4体についてはいずれも規格

表-2 ワイヤロープの試験結果一覧

ワイヤロープ (3×7G/O 18φ 規格破断荷重 157kN ²⁾)						
種別	Case	ロープ径 (mm)	試験値		X=破断箇所までの距離(mm)	破断箇所 (×で示す) (左:FIX, 右:MOVE)
			破断荷重 (kN)	破断伸び (%)		
劣化材A	1-1	19.65	168.75	4.80	x=90mm	
	1-2	19.82	169.00	4.94	x=80mm	
	1-3	19.84	168.00	4.92	x=840mm	
劣化材B	2-1	21.09	143.25	2.02	x=90mm	
	2-2	20.56	120.50	1.06	x=450mm	
	2-3	20.61	163.75	3.70	x=760mm	
	2-4	21.14	111.00	0.90	x=680mm	
	2-5	20.97	108.00	0.88	x=750mm	

値を下回っており、Case2-4 および Case2-5 では規格値破断荷重の70%程度まで大きく低下している。また、破断伸びに関しても破断荷重の低下に対応して小さく示されており Case2-4 および Case2-5 では1%以下となっている。

新品材の荷重-伸び関係に関しては、3体の試験結果にばらつきはほとんどなく、破断荷重は平均で192.6kN、破断伸びは7.15%である。

(3) ロープ径および破断箇所

表-2には、ロープ径の測定結果、破断荷重および破断伸びの試験値、破断箇所等の試験結果一覧を示している。また、試験後の試験体状況の一例を写真-5、6に示す。

ロープ径に着目すると、試験結果にばらつきが無くいずれも規格値破断荷重を上回った劣化材Aでは、いずれも20mm弱の値となっている。一方、試験結果のばらつきが大きく大半が破断荷重の規格値を下回った劣化材Bでは、ロープ径は21mm前後の値を示していることが分かる。これは後者の試験体の方が素線に対する腐食生成物の付着量が多く、ロープ径の増加に反映されたものと推察される。このことは現地でワイヤロープ径を測定することが劣化度を判定するための一指標になりうる可能性を示唆するものである。

次に、破断箇所に着目すると、劣化材Aでは、新品材の破断箇所と同様に、試験体両端の亜鉛合金端末近傍で破断している。一方、劣化材Bでは、Case2-1を除き試験体中央部や端末よりやや離れた位置で破断していることが分かる。新品材の引張試験では、載荷途中において素線の破断音は無く、試験終了時に大きな音とともにストランドが破断するが、劣化材Bでは、載荷途中で素線の破断音が時々発生していた。これは錆が素線上に不



写真-5 試験後の状況 (Case1-3)



写真-6 試験後の状況 (Case2-5)

均一に発生していたためと推察され、このような外観を有するワイヤロープでは破断荷重が低下する場合があります。劣化度を判定するための一指標になりうる可能性を示唆するものである。

4. ひし形金網

4.1 材料調査

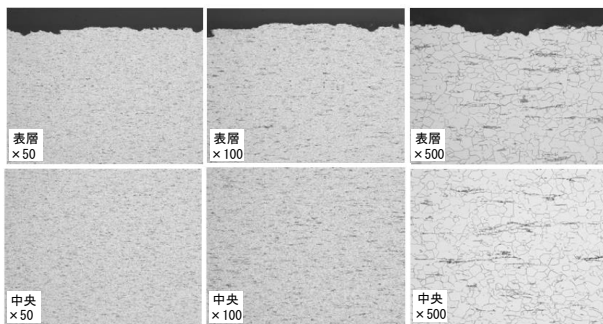
ひし形金網の材料調査として、劣化材および新品材に対して成分分析、かたさ分析、金属組織分析を実施した。成分分析については、C炭素、Si珪素、Mnマンガン、Pリン、S硫黄、Crクロム、Cu銅、Niニッケルの8元素について調査を行った。試料調整については、劣化材は10%硫酸酸洗後、研削にて切粉を採取した。新品材は、10%塩酸酸洗後、研削にて切粉を採取した。分析方法は、CおよびSは、燃焼赤外線吸収法、その他の元素については、ICP発光分光分析法にて成分分析を行った。表-3に成分分析結果を示す。劣化材は新品材に比較してCuが多いものの、そのほかの成分に関しては同程度の値となっていた。

かたさ分析については、素線径の1/4地点を5箇所選定し、ビッカース硬さ試験を実施した。試験の結果、ビッカース硬さは、劣化材が平均155、新品材が平均160でありほぼ同程度の値を示した。

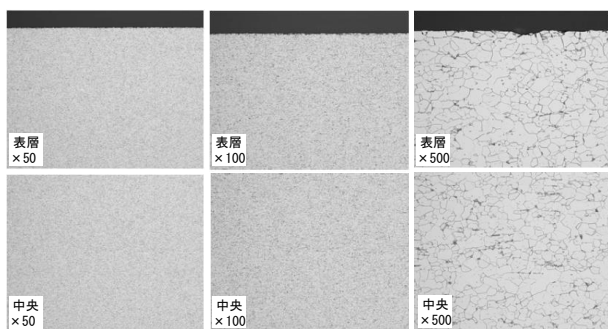
金属組織分析については、表層および中心近傍に観察位置を置き、観察倍率×50、×100、×500にて組織観察を実施した。図-2および図-3に劣化材および新品材の金属組織観察結果を示す。

表－3 金網の成分分析結果

調査材	分析元素名								単位 (%)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	
劣化材	0.069	0.150	0.360	0.011	0.025	0.023	0.024	0.016	
新品材	0.050	0.250	0.510	0.016	0.018	0.024	0.008	0.013	



図－2 金属組成観察結果 (劣化材)



図－3 金属組成観察結果 (新品材)

成分分析, かたさ分析, 金属組織分析の試験結果より劣化材と新品材はほぼ同じ素線性状を有する金網であることが確認できた。

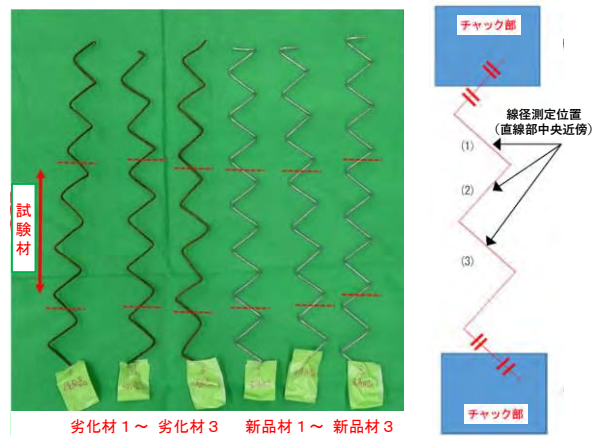
4.2 素線引張試験

(1) 素線引張試験概要

ひし形金網 (φ3.2mm) の素線引張試験は, 劣化材と新品材の2種類に対して実施した。試験材料は金網の素線をばらし, 写真－7の赤線位置で切断した部材を使用した。試験体数は, 劣化材, 新品材ともに3体とした。引張試験の概要を図－4に示す。実験に先立ち図－4に示す3箇所的位置で線径を測定した。線径は, それぞれの測定箇所で行く2つの直径を測定した。引張試験は, 引張試験機により試験材料の両端部をチャッキングした後, 引張速度 30mm/min にて実施した。

(2) 素線引張試験結果

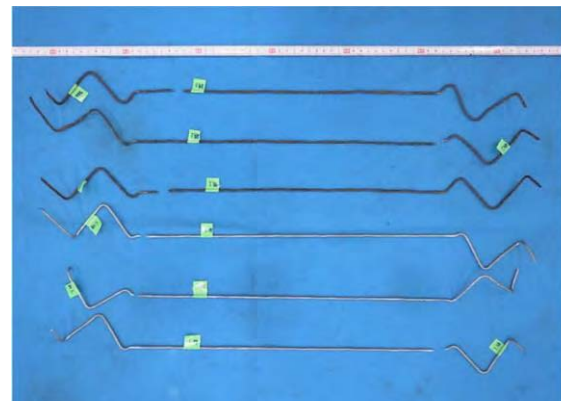
表－4には, 試験材料の線径測定結果を示す。新品材の3体については, いずれの測定箇所においても直行する2つの直径はほぼ同じ値を示し円形断面となっていることが分かる。線径は平均で 3.13~3.16mm である。一方, 劣化材の3体については, いずれの測定箇所においても直行する2つの直径は異なる値を示しており, 腐食生成物の付着の影響がうかがわれる。線径は平均で 3.12~3.24mm である。写真－8には, 引張試験後の試験材



写真－7 試験材料切断位置 図－4 試験概要

表－4 線径測定結果

試験材	(1)		(2)		(3)		平均 (mm)
	1	2	1	2	1	2	
劣化材1	3.25	3.28	3.08	3.32	3.05	3.44	3.24
劣化材2	3.07	2.85	3.13	3.25	3.03	3.39	3.12
劣化材3	3.11	3.33	2.95	3.24	3.11	3.11	3.14
新品材1	3.16	3.16	3.16	3.16	3.15	3.15	3.16
新品材2	3.15	3.13	3.15	3.14	3.13	3.13	3.14
新品材3	3.14	3.12	3.13	3.13	3.13	3.12	3.13



(上部より劣化材3, 2, 1, 新品材3, 2, 1)

写真－8 引張試験後の外観

表－5 素線引張試験結果

試験材	最大引張力 (N)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置
劣化材1	2,296	278	チャック部外側
劣化材2	2,316	303	チャック部近傍
劣化材3	2,226	287	チャック部外側
新品材1	3,224	411	チャック部近傍
新品材2	3,171	410	チャック部近傍
新品材3	3,187	414	チャック部近傍

料の外観を, 表－5には素線引張試験結果を示す。ここで, 引張強さは最大引張力を表－4の平均線径より求めた面積で除した値である。引張強さは劣化材が新品材に対して30%程度低下している結果となった。これは, 破断位置の違いからも推察されるように劣化材の場合には腐食生成物により断面が欠損している箇所に応力が集中するためと考えられる。

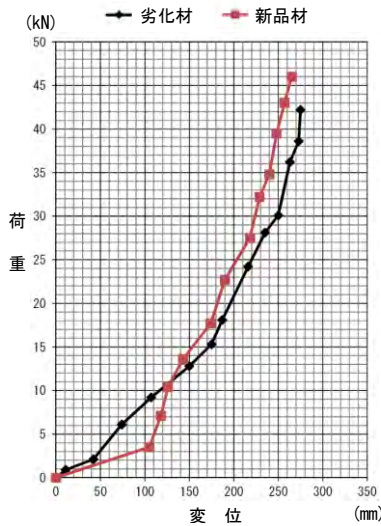


図-5 荷重-変位関係
(展開方向載荷時)

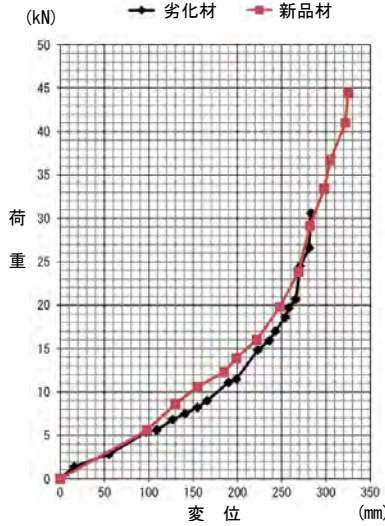


図-6 荷重-変位関係
(展開直角方向載荷時)

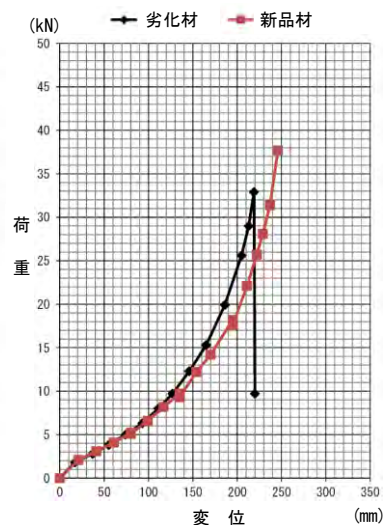


図-7 荷重-変位関係
(面外方向載荷時)



写真-9 金網部材試験装置



(a)劣化材 (b)新品材

写真-10 破網時の状況

表-6 試験条件と試験結果

試験材	落下高さ (m)	エネルギー (kJ)	最大衝撃力 (kN)	試験体の 破断有無
劣化材1	0.8	1.922	31.2	無
劣化材2	0.9	2.162	26.7	有
劣化材3	1.0	2.403	33.6	有
新品材1	0.8	1.922	29.6	無
新品材2	1.0	2.403	32.3	無
新品材3	1.1	2.643	36.1	無
新品材4	1.2	2.884	34.4	有

4.3 部材静的載荷試験

(1) 面内静的引張試験

面内静的引張試験は、劣化材および新品材に対してそれぞれ2方向の試験を実施した。1方向は、金網の展開方向(従来型落石防護柵金網の道路軸方向。以後、展開方向載荷)であり、もう1方向は、金網の展開直角方向(従来型落石防護柵金網の上下方向。以後、展開直角方向載荷)である。試験は、写真-9に示す載荷装置を使用し、1.2m×1.2m程度 of 金網に対して、1.0m×1.0mの位置で金網を拘束し、荷重方向(写真-9の上下方向)に引っ張ることを行っている。荷重直角方向に対してはつみ状に金網が変形しないように、一定の間隔を保持できるように拘束している。

図-5には、展開方向載荷時の荷重-変位関係を示している。多少のばらつきはあるものの劣化材と新品材はほぼ同様の荷重-変位関係を示している。最大荷重は、新品材が46.0kNに対して劣化材が42.2kNとなり、劣化材が8%程度小さな値となっている。図-6には、展開直角方向載荷時の荷重-変位関係を示している。この載

荷方向に関しても両者はほぼ同様の増加曲線を示しており、最大荷重は新品材が44.4kNに対して劣化材が30.6kNとなり30%程度小さい。

(2) 面外静的引張試験

面内静的引張試験における展開直角方向載荷と同一の試験体設置方法において、球面載荷治具(直径40cm)を用いた面外静的引張試験を実施した。図-7には、その荷重-変位関係を、写真-10には破網時の状況を示す。図-7より、荷重10kN程度までは劣化材と新品材は同様の性状を示すものの、それ以降の荷重では劣化材の変位が小さく剛性が大きく評価されている。これは劣化材試験体の列線の交点のかみ合わせや腐食生成物による摩擦の影響などが考えられるが、試験体数が少ないことから更なる検討が必要である。最大荷重は新品材が37.7kN、劣化材が32.9kNとなり13%程度小さくなった。

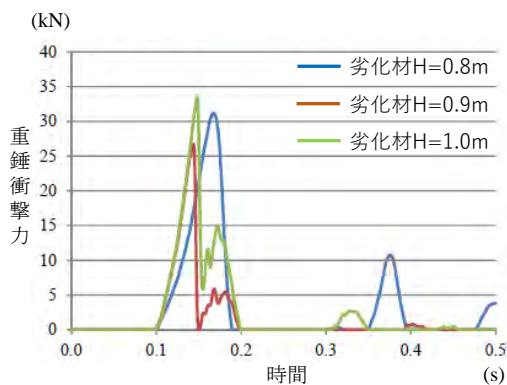


図-8 重錘衝撃力波形 (劣化材)

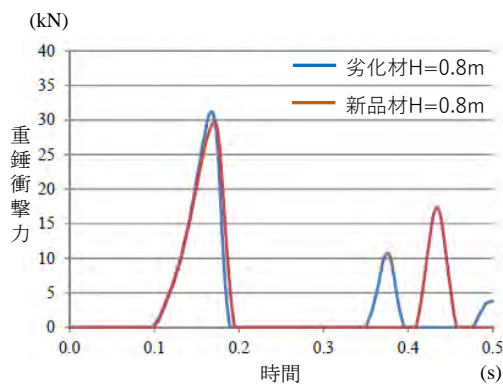


図-9 重錘衝撃力波形 (H=0.8m)

4.4 部材衝撃载荷試験

劣化材と新品材の衝撃载荷時の耐衝撃性状を比較するために重錘落下衝撃実験を実施した。試験体数の制約から劣化材は3体、新品材は4体に対して、面外静的引張試験と同一の試験体設置方法で試験を行った。使用した鋼製重錘の質量は245kg、直径は40cmの球体であり、落下高さは劣化材が0.8m、0.9m、1.0m、新品材が0.8m、1.0m、1.1m、1.2mとした。

表-6には、試験条件と試験結果の一覧を示している。新品材は落下高さ1.2mで破網したのに対して劣化材の場合には落下高さ0.9mで破網しており、破網に至る重錘の衝突エネルギーは、劣化材が新品材に比べて25%程度小さくなっている。

図-8には、劣化材を用いた試験の重錘衝撃力波形を示している。破網が発生しなかった落下高さ0.8mでは、継続時間が100ms程度の正弦半波状の主波動が励起されているが、破網が発生した落下高さ0.9mおよび1.0mでは、破網時に一旦除荷され、その後振幅の小さな波形が励起する波形性状となっている。波形継続時間は同じく100ms程度である。

図-9には、落下高さが0.8mと同一の劣化材および新品材の重錘衝撃力波形を示している。第1波目の主波動に関しては両者とも波形性状、最大値共にほぼ同じであるが、リバウンドによると思われる第2波の発生時刻は劣化材の方が早く励起されている。これは静的面外载荷試験の荷重-変位関係のとおり、荷重の大きな範囲では劣化材が新品材に比較して剛性が大きく評価されていることに対応しているものと推察される。

5. まとめ

本論文では、落石防護柵等の合理的な維持管理手法の検討に資するためのデータ取得を目的に、廃道区間より採取したひし形金網およびワイヤロープの各種载荷試験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

1) ワイヤロープ素線上への不均一な錆の発生により破断荷重の規格値を大きく下回る場合があることが分かった。

- 2) ワイヤロープの腐食による破断荷重の低下に対応して、破断伸びも著しく低下する場合がある。
- 3) ワイヤロープの劣化度の判定指標として、外観目視による錆の発生状況のほかにロープ径の測定も有効である可能性があることを示した。
- 4) 金網の材料調査結果より、劣化材と新品材はほぼ同じ素線性状を有する金網であることが確認できた。
- 5) 金網の素線引張試験より、引張強さは劣化材が新品材に対して30%程度低下している結果となった。
- 6) 金網の部材静的载荷試験より、最大荷重に関しては劣化材が新品材に対して小さく示されるものの、耐荷性状に関しては顕著な違いは見られなかった。
- 7) 金網の部材衝撃载荷試験より、破網に至る重錘の衝突エネルギーは、劣化材が新品材に比べて25%程度小さく示された。

今後はさらに劣化度の異なる各種部材の载荷試験データの蓄積を行い、落石防護柵等の合理的な維持管理手法確立のための検討を進めていきたいと考えている。

謝辞

本試験は、寒地土木研究所の公募共同研究「落石防護柵・柵の性能評価および補修・補強技術に関する研究(H28.12~H32.3)」の検討課題の一部として実施したものである。ワイヤロープの引張試験に関しては東京製網(株)研究所(土浦工場内)の方々、試験材料の成分分析に関しては日鉄建材(株)の方々、金網の各種载荷試験に関しては(株)ビーセーフの方々にご協力を賜りました。ここに付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：シェッド・大型カルバート等定期点検要領，2014。
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 3) 今野久志，中村拓郎，西弘明，橋口寛史：腐食したワイヤロープの静的引張試験，平成30年度土木学会北海道支部論文報告集，第75号