

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560440

研究課題名（和文）エネルギー吸収型落石防護柵の性能実証試験法と設計法の確立
に関する研究研究課題名（英文）Study on the performance-proof-test method of an energy absorption
type rockfall guard fence and its design method

研究代表者

前川 幸次 (MAEGAWA KOJI)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：00124024

研究成果の概要（和文）：エネルギー吸収型落石防護柵の性能は、メーカー独自の実験と評価およびその実験値を根拠とした吸収可能なエネルギーの累加則による設計法に依存している。本研究ではシミュレーション技術の向上を図り、同じエネルギーでも落石の特性、すなわち質量、形状、速度等が性能に影響すること、ならびに累加則の適用が不適切であることを実験および解析から明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The performance of a high energy type rock-fence is now depending on the design method based on the cumulative and absorbable energies which have been evaluated from a manufacturer's original experimental method and its experimental value. Improvement in a simulation technique of a high energy type rock-fence was aimed in this study. It has been made clear from experiments and analyses that the rockfall characteristics, i.e., mass, configuration and velocity, etc. influence the performance of a rock-fence even if the rockfall energy is same, and that the cumulative rule is unsuitable for evaluating a performance of a high energy type rock-fence.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：落石、落石防護柵、性能認証、シミュレーション解析、LS-DYNA

1. 研究開始当初の背景

わが国の一般公共事業費は、平成10年度の14兆円から平成18年度は7.1兆円にまで減少し、自然災害・防災関連事業についてもコスト縮減が強く求められている。例えば、わが国の山間部では雪崩・落石の危険から通行車両や住居を守るためにスノーシェッド・ロックシェッド、防護柵、防護壁等が多数設

置されてきたが、近年コストパフォーマンスの優れている“エネルギー吸収型の雪崩・落石防護柵”が採用されており、とりわけネット式落石防護柵が多くなっている。

エネルギー吸収型落石防護柵は、実験用防護柵が落石を捕捉できるかどうかという視点で、各メーカーが独自に行った性能実証試験の限られた結果を根拠として、対応できる落石規模、すなわちエネルギー吸収型落石防護

柵の性能が決められている。また、性能実証試験では落石の衝突エネルギーを再現するための衝突条件である“落石の質量と衝突速度”が実験環境や設備の制約で決められており、一般に自然現象よりも質量を大きくして落下高、すなわち衝突速度を小さくせざるを得ないのが現状である。

エネルギー吸収型落石防護柵のように複数の構成部材によるエネルギー吸収を期待するシステムでは、衝突エネルギーが同じであっても衝突条件、例えば、小質量の高速衝突、または重質量の低速衝突によっては防護柵の性能評価に差異が出ると考えられる。

以上のことから、事が起こったときに“想定外の落石”として片付けられることのないように、エネルギー吸収型落石防護柵の性能実証試験の実態を調査するとともに設計法の問題点を明らかにし、設計方法の改善を目指すべきという着想に至った。

2. 研究の目的

限られた性能評価試験において性能が確認されると、設計においては防護柵の個々の構成部材の終局強度（吸収エネルギー）の予測値を累加則に当てはめて、適用可能な落石規模の範囲が拡張されている。累加則では個々の構成部材が独立しているものとしてその耐衝撃特性を考慮しており、構成部材の寸法や耐衝撃特性および落石の衝突速度や質量などの衝突条件が異なれば、エネルギー吸収型落石防護柵全体としての所定の性能を確保できる保証はなく、結果の信頼性には問題がある。特に、ネット式落石防護柵の設計はロープ式落石防護柵に比べて明確でない。

本研究では、上記の問題を解明するとともに高エネルギー吸収型落石防護柵の性能照査において衝撃解析汎用コード LS-DYNA によるシミュレーション解析を援用するための知見を得ることを目指した。

3. 研究の方法

落石防護柵の先進地であるスイスおよび欧州では、すでに性能認証制度が導入されている。一方、わが国における落石防護柵の性能実証試験はメーカー独自で行っている上に、その詳細について公表されているものはほとんど無い。そこで、本研究では、わが国のメーカーおよび協会を対象として性能実証試験の方法と設計の考え方についてアンケート調査を行った。

また、既存の実験データを基に、高エネルギー吸収型落石防護柵のシミュレーション技術の確立を行った。次に、わが国の性能実証試験では考慮していない“衝突条件の影響”や“性能累加則の問題”について、そのシミュ

レーション技術を利用した数値実験により明らかにした。

4. 研究成果

(1) 落石防護柵の性能実証試験の現状調査

在来型の落石防護柵（落石対策便覧の設計例であるワイヤーロープ金網式）にはないワイヤーロープの保護・緩衝機構や異なる形式の落石防護柵を扱っているメーカーおよび協会に対して、実証試験の概要および設計手法についてアンケートをお願いした。表1は回答のあった製品名（A～Mの13タイプ16件）ごとに質問項目の1)～17)の結果を示す。なお、製品タイプ13は実証試験の実施年の順に並んでいる。

① 質問項目1)性能と10)衝撃度の関係

欧州製品 H, I, L および A, C では、性能認証指針(2001年)あるいはその思想のため、製品性能が実証試験の衝撃度になっている。一方、日本製品 B, D, E, F, J の性能は実証試験の衝撃度よりも大きなレベルまで設定されている。これは、実証試験を基にした数値解析や落石対策便覧を拠り所とした設計手法に基づいてグレードアップされた落石防護柵が設置されていることを意味する。なお、日本製品 G, K, M の性能は衝撃度にはほぼ一致しているが、繊維性ネットを主体としている製品 G, M では性能のグレードアップを設計手法により行うことが簡単ではない等の理由と思われる。

② 質問項目5)衝突体（重錘）形状

欧州製品では、2001年以降は性能認証指針に定められた重錘形状（表1の備考：SAEFL型、EOTA型）が使用され、それ以前は自然岩石が使用されている。日本製品では、衝突面が球状の重錘から近年はSAEFL型またはEOTA型の重錘に移ってきている。

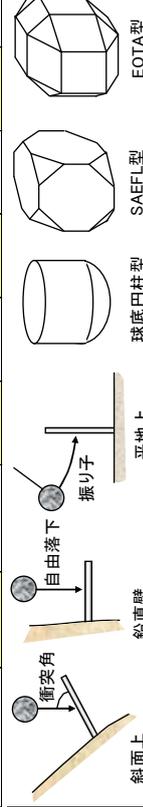
③ 質問項目9)衝突速度

欧州製品では性能認証指針の衝突速度規定（25 m/s 以上）が確保されている。日本製品での衝突速度は13.8～23.8 m/s であり、同じ衝撃度で衝突速度を25 m/s とする場合に比べると、重錘質量を約3.3～1.1倍、および衝突投影面積を約2.2～1.07倍で行っていることになる。なお、製品Dは重錘を鉄球にすることで比較的遅い衝突速度でも所定の衝撃度を確保している。

実証試験は落石防護柵にとって厳しい衝突条件（大径落石の低速衝突よりも小径落石の高速衝突の方が厳しいと思われる）で行うべきであり、性能保証と公正な競争のためにも、欧州の性能認証指針の衝突速度(25 m/s 以上)の適否も含めて試験方法についての指針、さらには数値解析や吸収可能エネルギーの累加

表-1 落石防護柵の実験概要に関するアンケート結果

製品名(整理名)	A-1 ~1000	A-2 ~1500	A-3 ~3000	B ~1500	C-1 ~1500	C-2 ~2000	D 200~1000	E ~500	F ~1000	G 200	H ~3000	I ~100	J ~500	K ~600	L 250~3000	M ~150	
(1) 製品性能(kJ)	3.0	3.9	6.0	3.0	4.1	5.3	7.0	3.1	3.0	1.6	9.6	0.32	1.46	2.0	3.2	0.9	
(2) 実験実施年	1983	1997	2000	2001	2001	2002	2002	2001	2001	2002	2002	2005	2006	2007	2007	2008	
(3) 実験実施主体	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	自社	
(4) 衝突体重量(kJ)	3.0	3.9	6.0	3.0	4.1	5.3	7.0	3.1	3.0	1.6	9.6	0.32	1.46	2.0	3.2	0.9	
(5) 衝突体形状	自然岩石	自然岩石 (楕球形)	球体	球体 鉄球 φ1.2m	球体 鉄球 φ1.2m	球体 鉄球 φ1.2m	球体 鉄球 φ1.2m	球体 鉄球 φ1.3m	球体 鉄球 φ1.3m	球体 鉄球 φ1.3m	球体 鉄球 φ1.3m	球体 鉄球 φ1.6m	球体 鉄球 φ1.6m	球体 鉄球 φ1.6m	球体 鉄球 φ1.6m	球体 鉄球 φ1.6m	球体 鉄球 φ1.6m
(6) 衝突方法	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱	索道から懸脱
(7) 衝突角度(度)	90?	90?	90?	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
(8) 鉛直落下高(m)	—	—	—	17.0	—	—	10.0	13.0	12.0	12.5	—	—	15.0	29.0	32.0	16.6	16.6
(9) 衝突速度(m/s)	26.2	28.6	31.8	18.3	27.0	26.5	13.8	16.0	15.3	15.3	25.0	25.0	18.0	23.8	25.0	18.0	18.0
(10) 衝突速度(kJ)	1017	1599	3018	510	1500	2040	700	395	400	196	3000	100	215	568(625)	例:1000	150	150
(11) 速度計測	センサー 高速カメラ	センサー 高速カメラ	センサー 高速カメラ	理論値	センサー 高速カメラ	センサー 高速カメラ	センサー	理論値 加速度計	理論値	高速カメラ	加速度計 高速カメラ	加速度計 高速カメラ	理論値 加速度計	理論値 加速度計	理論値 加速度計	理論値 加速度計	理論値 加速度計
(12) 実験形態	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物	実物
(13) スパン数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
(14) 設置場所	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上	斜面上
(15) 衝突部位	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン	中央スパン
(16) 性能評価基準	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)
(17) 設計手法・思想	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)	技術導入先の方法(実験を参照)



則に基づく設計手法の妥当性,あるいは性能認証制度についての議論が必要である。

(2) シミュレーション解析方法の検討

本研究では, 衝撃解析コードLS-DYNAを用いたシミュレーション解析を行うために, 落石防護柵の既存の実験データをキャリブレーション値としてモデル作成方法の検討を行った。LS-DYNA 固有の情報になるところもあるが, 紙面の都合上, エネルギー吸収型落石防護柵のシミュレーション解析に有用と思われる事項のみを示す。

- ① ポリエチレンネット製落石防護柵のモデル
写真1は落石防護柵の実験(表1の製品G)



写真1 ポリエチレンネット製落石防護柵

のケースの一つである。落石を模した1.6 tonの重錘は振り子運動によりポリエチレンネット(以下, PE ネットという)面に垂直に衝突

する。下端がヒンジ支持され、上端が控えロープ3本で支持されたH形鋼柱の間に張設されたワイヤーロープが PE ネット縁の折り返し部の中を貫通・支持している。

PE ネットを構成する網糸は破断ひずみを設定できる truss 要素と引張力にのみ抵抗する cable 要素を交互に直列することによりその力学的特性を表した。また、PE ネット縁がワイヤーロープに沿って移動できる条件を表現するために、図1のようにPE ネット縁に剛なリングを形成し、ワイヤーロープとの間にLS-DYNA の接触条件 (Contact Automatic General, 摩擦係数 0.1) を適用した。

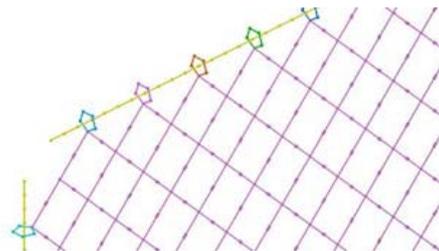


図1 PE ネットのモデル化

ワイヤーロープは、鋼柱に1本ずつ定着され、写真2のようにスパン中央部において余長を持たせてワイヤークリップ4個で連結してあるため、張力が大きくなると張力は大きく変動しながら連結部に滑りを生じる。ワイヤークリップの締め付け力を調整することによりその平均滑り張力のある程度制御することも可能である。また、控えロープについても一端をUボルトに定着した鋼板2枚で挟んであり、ワイヤークリップの場合と同様な挙動をする。このような機構 (以下、緩衝装置という) は、衝撃的張力によるロープの破断を防ぐだけでなく、摩擦エネルギーとして落石のエネルギーを吸収することができる。



写真2 緩衝装置(上:クリップ型, 下:金具型)

図2は、緩衝装置で定着したワイヤーロープに重錘を落下衝突させたときのロープ張力の計測例である。シミュレーション解析では、図2のような特性と吸収エネルギーが等価になるようにワイヤーロープの中央部の要素の

材料特性を完全弾塑性モデルで近似した。

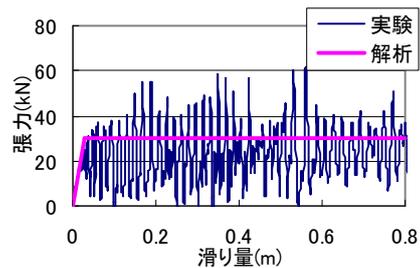


図2 緩衝装置のロープ張力と滑りの関係

② PE ネット製落石防護柵のシミュレーション

解析値と実験値の比較の例として、重錘衝撃力および控えロープ張力の経時変化をそれぞれ図3および図4に示す。重錘衝撃力の0.6秒時の実験値は、重錘が水平運動を停止して着地した状態であり、解析では着地を考慮していないことによる差異がある。控えロープ張力の実験値は、図2と同様に大きく変動しているが、緩衝装置の特性を平均滑り張力に相当する材料モデルにより近似した解析では、違いが生じている。しかし、ワイヤーロープによるPEネットの支持特性のモデル化は図5の変形状から妥当であると言える。

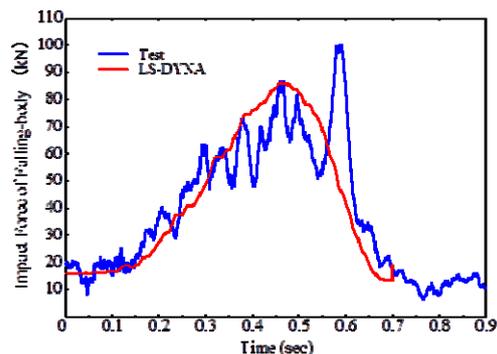


図3 重錘衝撃力の解析値と実験値の比較

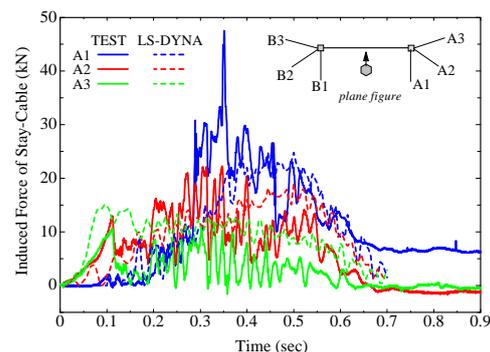


図4 控えロープ張力の解析値と実験値の比較

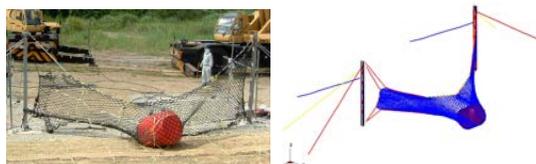


図5 PE ネット製落石防護柵の変形状の比較

(3) 落石衝突条件の影響

落石の衝突エネルギーが同じであっても落石の形状、質量および衝突速度が落石防護柵の性能、すなわち落石を捕捉できるかどうかに影響すると考えられる。落石防護柵の認証制度であるETAG27およびSAEFLでは衝突速度が25 m/s以上に規定されている一方で、わが国の性能実証試験では表1に示すように20 m/sを超えて実施したのは1件だけである。本研究ではシミュレーションにより、まず、衝突速度の影響を検討した。

① 落石防護柵の基準エネルギー E_0

前述のPEネット製落石防護柵について、衝突速度25 m/s前後の落石が衝突したときに捕捉できる最大の落石エネルギーを基準エネルギー E_0 とした。落石はETAG27で規定されている多面体で質量を433 kgに固定し、速度を変数として解析を行った結果、表2を得たので、基準エネルギー E_0 を130 kJとした。

表2 基準エネルギー E_0 の決定

No.	落石(kg)	速度(m/s)	エネルギー(kJ)	捕捉
1)	433	23.5	119.6	○
2)		24.0	124.7	○
3)		24.5	130.0	○
4)		25.0	135.3	×
5)		25.5	140.8	×

② 基準エネルギー E_0 における落石の捕捉

基準エネルギー E_0 を有する落石について、その寸法、すなわち質量と衝突速度を表3の組み合わせで解析を行った。図6は各No.におけるPEネットの最大変位時(a)とその後の落石の状態(b)を表している。

表3 落石衝突条件 (E_0 は130kJに固定) と結果

No.	速度(m/s)	質量(kg)	最大寸法(m)	投影面積(m ²)	結果
1	12.25	1730	0.99	0.86	捕捉(軽損傷)
2	16.33	980	0.82	0.59	捕捉(軽損傷)
3	20.41	620	0.71	0.44	停止・抜け落ち
4	24.50	430	0.63	0.34	捕捉(軽損傷)
5	28.59	320	0.56	0.28	貫通

落石を確実に捕捉して押し戻しているのはNo.1,2および4であり、No.5は貫通している。また、No.3では落石は停止したがPEネットが戻るときに孔をすり抜けて落下した。捕捉したケースにおいても、網糸の損傷により小さな孔が複数生じている。落石が貫通するかしないかは網糸の損傷によって生じる孔の大きさと落石寸法の相対的な関係によるが、No.1~4までは落石を停止させているのに対して、No.5では落石を停止できていないことは、図7に示した落石の水平速度の経時変化からも明らかである。

以上のことから、性能実証試験において捕捉できる落石の衝突エネルギーで評価する場合、落石の弾丸効果(小径物体の高速衝突)を考慮すべきであることが分かった。落石の実斜面落下実験等の報告によれば、落石の衝突速度は30 m/s程度になる可能性もあることから、ETAG27

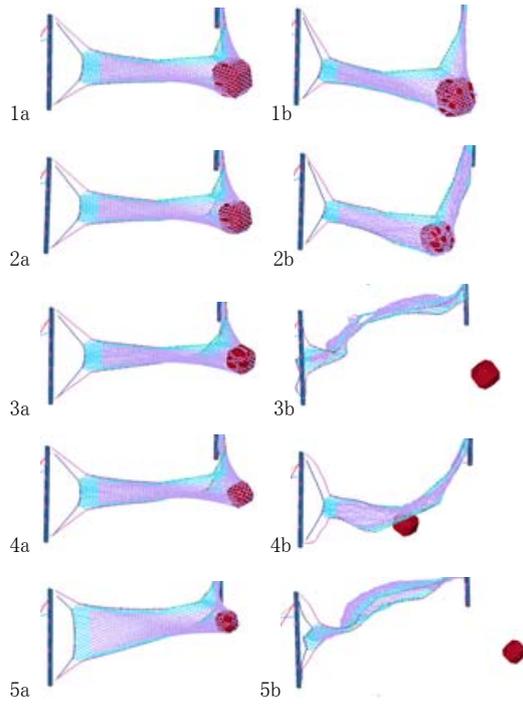


図6 落石衝突条件による捕捉・損傷状況

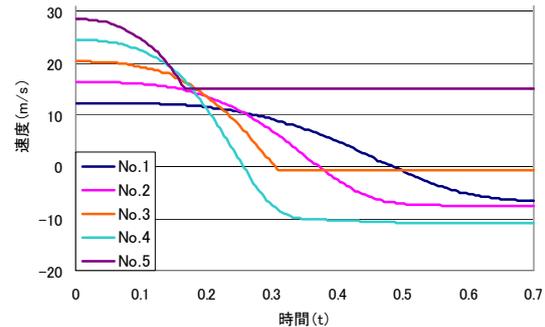


図7 落石の水平速度の経時変化

およびSAEFLの規定(25 m/s以上)は合理的な値と言える。

(4) 設計におけるエネルギー累加則の妥当性

落石防護柵(網)の設計においては個々の構成部材の終局強度(吸収エネルギー)の予測値を累加則に当てはめることが多い。その妥当性について、シミュレーション解析に基づいて検討した。

解析対象は、図8に示す落石エネルギー450 kJに対して落石対策便覧に準じて設計されたポケット式落石防護網の実構造である。構造の詳細については[雑誌論文④]に譲るが、

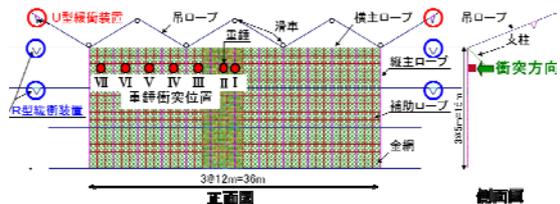


図8 ポケット式落石防護網の概要

図8の青・赤の円は緩衝装置を表す。落石はSAEFLの多面体型落石2.0 tonを速度21.2 m/s, すなわち450 kJで防護網面に垂直に衝突させることとし, 設計における衝突位置Iの外にII~VIIの衝突位置についてもシミュレーション解析を行った。その結果, 衝突位置I~Vでは落石を捕捉して下方へ誘導することができたが, 衝突位置VIとVIIでは落石が貫通した。図9はその一例である。

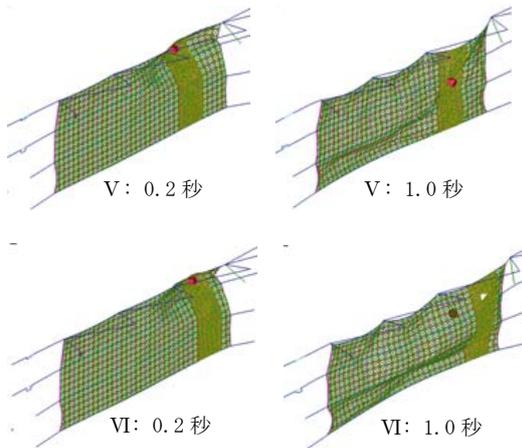


図9 ポケット式落石防護網の解析(衝突位置V, VI)

落石を捕捉できなかった衝突位置VIについて, 緩衝装置のロープ滑り長を表4に示す。設計では緩衝装置の限界滑り長を1 mに設定したエネルギー吸収量を防護網全体のエネルギー吸収量に累加している。衝突位置VIの場合, 限界滑り長の1 mに達していない緩衝装置があり, 余裕があるにも拘わらず落石は防護網に損傷を与えて貫通した。エネルギー吸収量の累加則は, 静的荷重作用の範囲では正しい概念であるが, 衝撃的荷重作用の下では動的応答解析(シミュレーション解析)による評価が必要であることが明らかである。

なお, 緩衝装置の平均滑り張力の大きさを維持するためには, 限界滑り長の制限が必要であるが, 解析ではその制限を設けない場合についても検討を行った結果, 衝突位置VIおよびVIIにおいても落石は防護網を貫通しなかった。緩衝装置は落石エネルギーを吸収すると同時にロープや防護網の負担を軽減するために有効な装置であることもわかった。

今後は緩衝装置のより高度なモデル化を開発することにより, シミュレーション解析をエネルギー吸収型の落石防護柵(網)の性能評価に使用できる。

表4 緩衝装置の滑り長と吸収エネルギー

位置	(吊り)U型緩衝装置		(横1段)R型		(横2段)R型	
	滑り長	Energy	滑り長	Energy	滑り長	Energy
	mm	kJ	mm	kJ	mm	kJ
左	3	0.2	1000	112	737	68.7
右	5		1000		490	

* 平均滑り張力: 22kN(U型), 56kN(R型)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 前川幸次, (他3名), 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(2011), 1134-1144, 査読有
- ② 田島与典, 前川幸次, (他2名), 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(2010), 1088-1100, 査読有
- ③ 河上康太, 前川幸次, (他2名), ポケット式落石防護網の実物大実験へのLS-DYNAの適用, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集 No.10(2010), 257-262, 査読有
- ④ T. Tajima, K. Maegawa, (他3名), Evaluation of Pocket-type Rock Net by Full Scale Tests, Proc. of IABSE Symposium (2009), CD-ROM 8 pages, 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① 河上康太, 田島与典, 前川幸次, ポケット式落石防護網に対する落石衝突位置の影響に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月3日, 北海道大学(北海道)
- ② 前川幸次, 落石防護柵の性能実証試験の現状調査について, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月3日, 北海道大学(北海道)
- ③ 田島与典, 岩崎征夫, 前川幸次, 実物大モデルを用いた重錘衝突載荷実験によるポケット式落石防護網の評価, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009年9月2日, 福岡大学(福岡県)
- ④ 館佑介, 田島与典, 前川幸次, 落石防護柵の衝突シミュレーションに関する研究, 土木学会第63回年次学術講演会, 2008年9月10日, 東北大学(宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 幸次 (MAEGAWA KOJI)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号: 00124024