

緩衝金具を有する落石防護網の静的解析法に関する研究

建設構造研究室 山本順也
指導教官 岩崎英治

1. はじめに

我が国では、地震、気候や地形などの条件から多くの落石災害が発生している。そのため、数多くの落石対策工が施されている。その一種である緩衝金具を有する落石防護網は、落石エネルギーの吸収性能が高い防護工である。しかし、緩衝金具内の滑動ワイヤの余裕長の設定に注意が必要である。これに対して、既往の研究により、動的応答解析で性能評価実験の結果が再現可能であることが示された。しかし、動的応答解析は膨大な解析時間を要する。落石防護網を設計する際の設計式を導くためには、膨大な解析時間が必要となり、解析手法の簡易化が課題となっていた。

そこで、本研究では、解析時間を要する動的応答解析の簡易化を図るため、静的解析により滑り量を再現するための手法を提案する。

2. 解析方法

落石防護網の設計では、ワイヤの余裕長が必要になる。そこで、動的応答解析による緩衝金具内の滑動ワイヤの滑り量を、静的解析により得るための考え方を、図-1 のようなワイヤの一端に緩衝金具を有し、ワイヤの中央に重錘が落下するモデルにより示す。

図-1 (a) のような重錘が落下してワイヤに衝突する動的な応答でのエネルギーの収支を考える。重錘がワイヤに衝突して静止した瞬間のエネルギーを考えると、次式のようになる。

$$mg(h+v) = F_r \delta + E_d \quad (1)$$

ここで、 m は重錘の質量、 g は重力加速度、 h は重錘からワイヤまでの落下高さ、 v はワイヤに重錘が衝突して静止した瞬間の重錘の沈下量(たわみ)、 F_r は緩衝金具とワイヤの摩擦抵抗力、 δ は緩衝金具内のワイヤの滑り量である。また、 E_d はその他のエネルギーであり、構造減衰により失われるエネルギーなどにより表される。

次に、図-1 (b) のような緩衝金具を有するワイヤに静的な鉛直荷重 P が作用した時のエネルギーの収支を考える。荷重 P は緩衝金具を有するワイヤの静的平衡方程式の解として、たわみ v の関数として得られる。これより、エネルギーのつり合いは次式のようになる。

$$\int_0^v P(v) dv = F_r \delta + E_s \quad (2)$$

ここで、 E_s はワイヤの弾性ひずみエネルギーを表しているが、緩衝金具による吸収エネルギーに比べて小さいことから省略すると、次式が近似的に成立する。

$$\int_0^v P(v) dv = mg(h+v) - E_d \quad (3)$$

E_d は、動的応答解析の結果から、重錘による作用エネルギーの数%から 10 数%程度の値であるので、上式を次のように表す。

$$\int_0^v P(v) dv = \kappa mg(h+v) \quad (4)$$

ここで、 κ は 0.9 前後の値である。

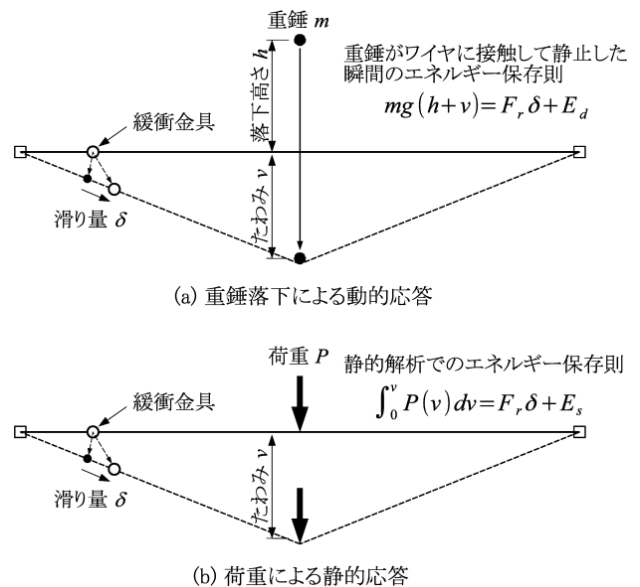


図-1 動的と静的解析でのエネルギーの収支

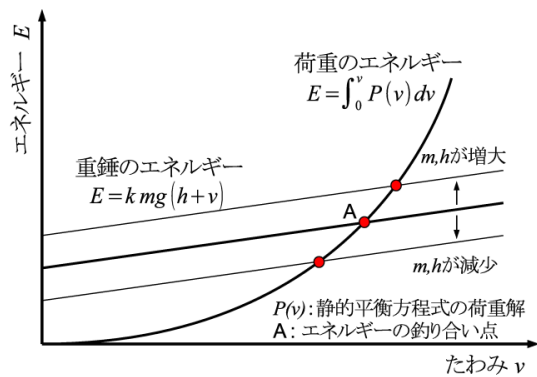


図-2 エネルギー的に等価な解

図-2に、静的平衡方程式の解として得られる荷重 $P(v)$ によるエネルギーと重錘のエネルギーの曲線を示す。これらの曲線の交点Aが動的応答解とエネルギー的に等価な静的解析による解を表す。

構造系が同じであれば、重錘の重量 mg や落下高さ h が異なっても静的な平衡方程式によるエネルギー曲線は変化しない。一方、式(4)の解は、 mg や h が異なると変化する。そこで、一つの構造系について予め静的なエネルギー曲線を求めておくと、種々の重錘質量 m や落下高さ h のときの動的応答解と等価な静的解は、交点として容易に得られる。ただし、重錘の衝突位置が異なると静的なエネルギー曲線は変化する。

3. 静的解析法の妥当性の確認

動的応答解析とエネルギー的に等価な静的解析により、図-3のような縦横4本のワイヤの両端に合計16個の緩衝金具が配置された落石防護網の中央に重錘が落下したときの各緩衝金具内のワイヤの滑り量と防護網中央のたわみ、および、作用エネルギー、吸収エネルギーを求めて、本研究で提案する解析手法の妥当性を示す。

表-1に落石防護網の動的解析結果および静的解析結果を示す。上下左右対称なため、緩衝金具U1とU2の滑り量のみ示している。滑り量は概ね動的応答解析と静的解析で同様の値が得られており、このために吸収エネルギーも概ね一致している。一方、たわみは静的解析の方が動的応答解析に比べて大きめの値が得られている。

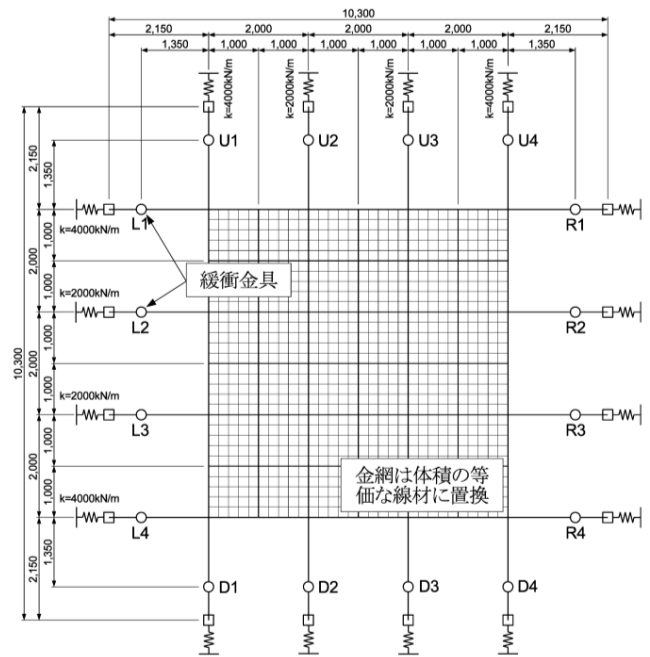


図-3 重錘落下を受ける落石防護網の解析モデル

表-1 解析結果

	静的解析			動的応答解析		
	5	10	15	5	10	15
落下高さ(m)	5	10	15	5	10	15
たわみ(m)	2.490	3.165	3.685	2.170	2.857	3.385
U1滑り量(m)	0.098	0.211	0.333	0.102	0.219	0.346
U2滑り量(m)	0.368	0.639	0.889	0.363	0.632	0.882
合計滑り量(m)	3.722	6.801	9.777	3.733	6.822	9.832
作用エネルギー(kJ)	227.4	399.7	567.3	242.1	434.2	620.9
吸収エネルギー(kJ)	204.7	374.1	537.7	205.3	375.2	540.8

4. 傾きを考慮した静的解析法

前章で重錘落下を受ける落石防護工のたわみおよび滑り量を静的解析によって算出が可能であることが示された。しかし、解析モデルは水平に設置された状態であり、実斜面における落石防護工は斜面に沿って設置される。また、落石は地面から跳ね返るため、斜め方向から防護工に衝突する。そこで本章では、実斜面を想定した傾きを有するワイヤのモデルを作成し、解析を行う。傾きを有するワイヤの概要を図-4に示す。ワイヤの水平からの傾きを β 、重錘の衝突方向の鉛直からの角度を α と表している。ワイヤに傾きを設けたとき、重錘がワイヤ上に静止せず、滑り落ちる

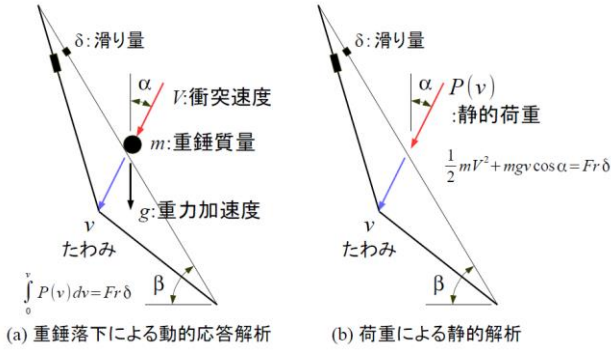


図-4 動的解析と静的解析でのエネルギーの収支

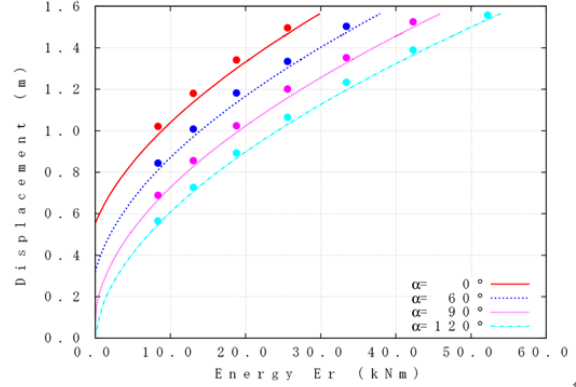
場合があるため、滑り量の増加が停止した瞬間における動的なエネルギーと静的なエネルギーの保存について考える。図中の2式が等価であると考へ、式を変形すると次のように表される。

$$\int_0^v P(v)dv = \kappa \left(\frac{1}{2} mV^2 + mgv \cos \alpha \right) \quad (5)$$

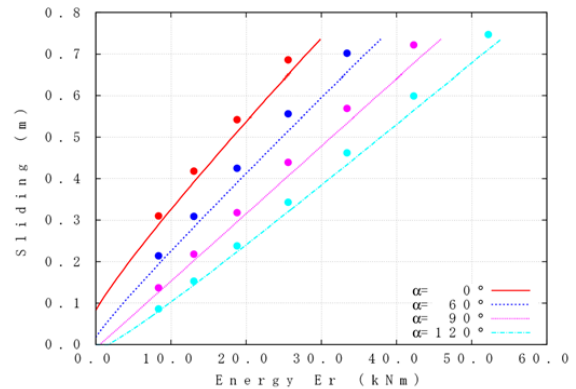
ここで m は重錘の質量、 g は重力加速度、 h は重錘の落下高さ、 v は重錘が衝突する方向の変位、 F_r は緩衝金具とワイヤの摩擦抵抗力、 δ は緩衝金具内のワイヤの滑り量、 E_d は構造減衰等のその他の運動エネルギー、 E_s はワイヤの弾性ひずみエネルギー、 κ は0.9とする。

式(5)から作用エネルギー E_r に対するたわみと滑り量の関係を求めると図-5のように表される。 E_r は重錘が防護工に作用するエネルギーを表し、落下高さ h から重錘が落下するときには、 $E_r = mgh$ で表され、防護工に衝突するときの重錘の速度 V で表すと、 $E_r = mV^2/2$ で表される。

図中の点は動的応答解析から得たたわみおよび滑り量であり、曲線は静的解析から得ている。解析ではたわみが最大となるケースについて検討するため、重錘がワイヤと垂直に衝突するように傾きの条件を $\alpha = \beta$ とし、 α を0度、60度、90度、120度の4通りとしている。たわみ、滑り量ともに多少のズレが見られる部分もあるが、概ね一致しており、動的応答解析の結果を再現できている。



(a) たわみと作用エネルギーの関係



(b) 滑り量と作用エネルギーの関係

図-5 傾きを有するワイヤのたわみと滑り量

5. 落石防護工の規模の影響

規模の大きな図-6のようなワイヤ端部に緩衝金具が配置された落石防護網を対象に、落石を受けた際のたわみと各緩衝金具内のワイヤの滑り量を、本研究で提案する静的解析法により求めることで本手法の有効性を示す。なお、ここでの解析パラメータは前述のモデルと同じとする。

この図の位置Aで落石を受けた時のたわみと緩衝金具内のワイヤの滑り量を示す。防護工を設計して設置する際に、落石の位置を予想して行われるが、そこには自然の複雑な要因が影響して、落下位置や落石の大きさ、落下速度にはばらつきが含まれる。そこで、次に、領域Bの種々の位置で落石を受けた場合の最大たわみと緩衝金具内の最大滑り量を示す。防護網工の端のワイヤから1mの領域を除いているのは、この領域で落石を受けた場合には、緩衝金具内のワイヤが滑ると落石が防護網工の外側に移動して、受け止められ

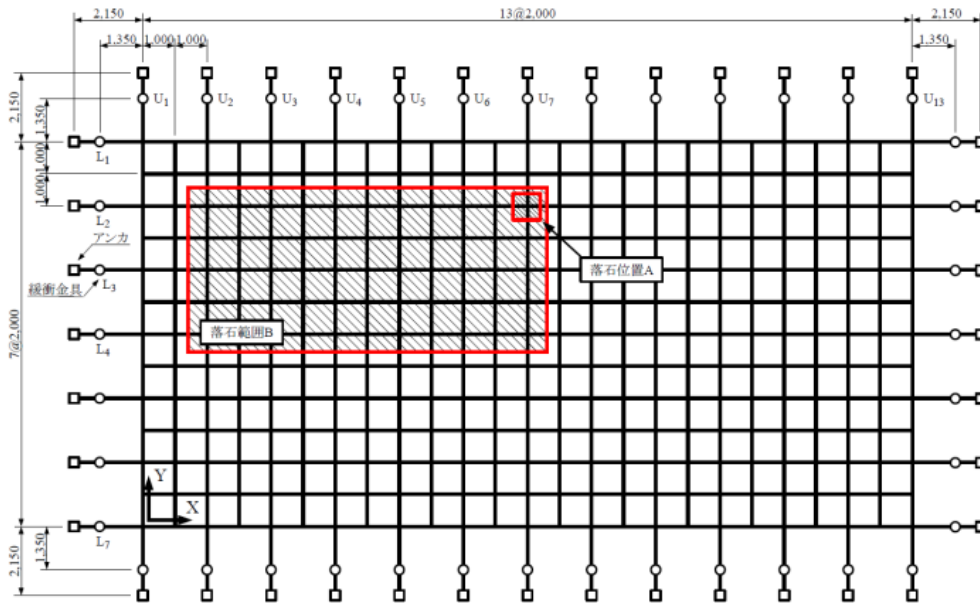
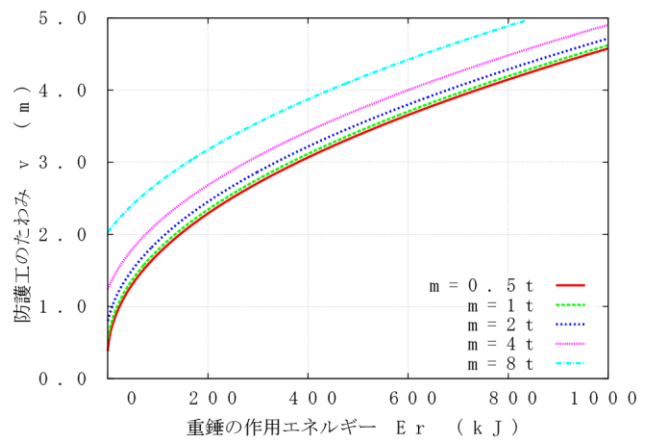


図-6 実規模を想定した防護網(ケース N13M7)

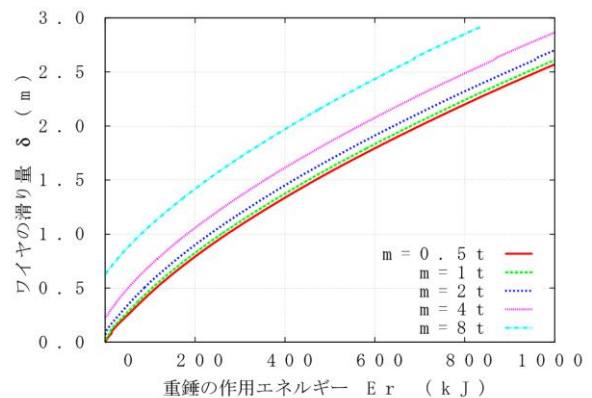
ない可能性があることから、実際には、落石が想定される領域の外側に、余裕をもって防護網工が施工されることを考慮したものである。

解析結果を図-7に示す。図には、落石位置Aに重錘質量 $m = 0.5t$ から $8t$ の重錘作用エネルギー E_r を受けたときのたわみ、緩衝金具U7の滑り量の関係を示している。この図の結果は、非線形平衡方程式を1度だけ解いた結果を用いて求めていることに留意されたい。このように、本論文で提案した静的解析による方法では、種々の質量と重錘作用エネルギーに対する解を容易に得ることができる。

また、実際には落石の位置を事前に正確に把握することは難しいことから、落石範囲のバラツキを考慮して、緩衝金具内のワイヤの滑り量や、防護工のたわみを評価する必要がある。そこで、図-6内の落石範囲Bの種々の位置で落石を受けた場合の緩衝金具の滑り量を計算して、その最大値を図-8に示す。この図は、重錘質量が $m = 4t$ の場合の結果である。重錘の作用エネルギー E_r が大きくなると、緩衝金具の滑り量は大きくなるが、防護工の端に位置する緩衝金具U1とL1以外の緩衝金具の最大滑り量は、ほぼ同じ大きさになっていることが分かる。

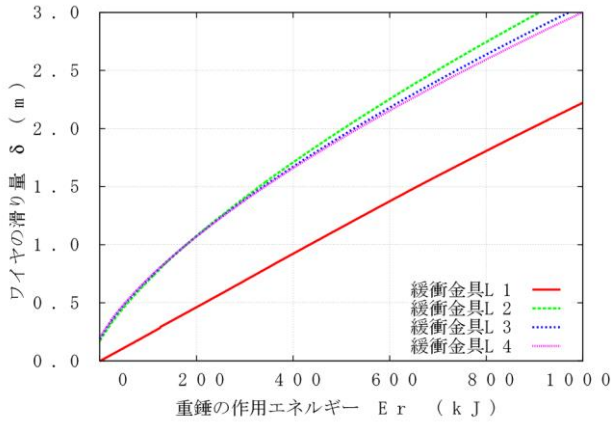


(a) 作用エネルギーとたわみ(N13M7)

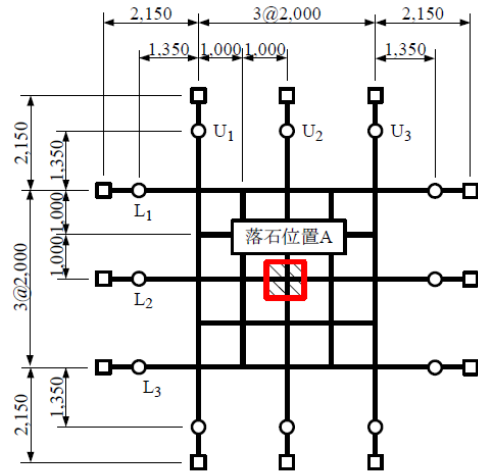


(a) 作用エネルギーと滑り量(N13M7)

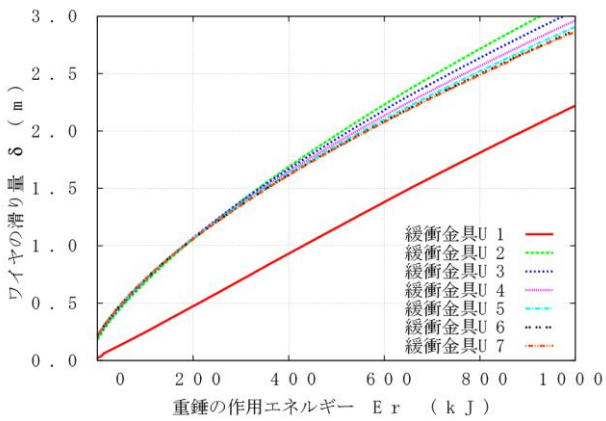
図-7 位置Aに重錘が落下したときの滑り量とたわみ



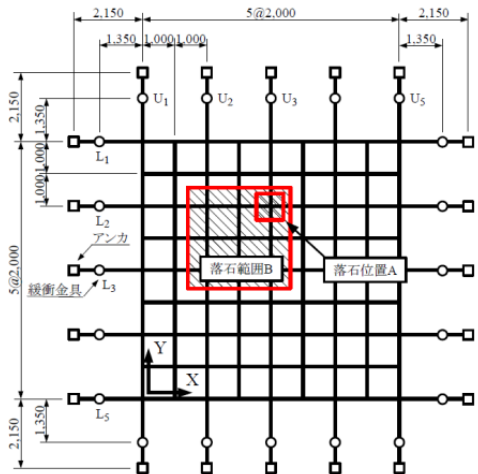
(a) 緩衝金具 L1 から L4 の最大滑り量 (N13M7)



(a) ケース : N3M3



(b) 緩衝金具 U1 から U7 の最大滑り量 (N13M7)

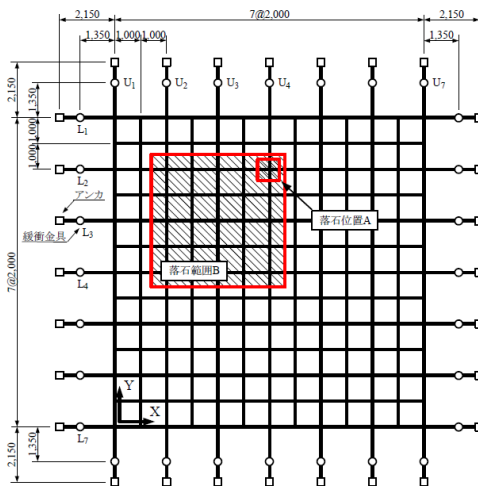


(b) ケース : N5M5

図-8 範囲 B に重錘が落下したときの滑り量

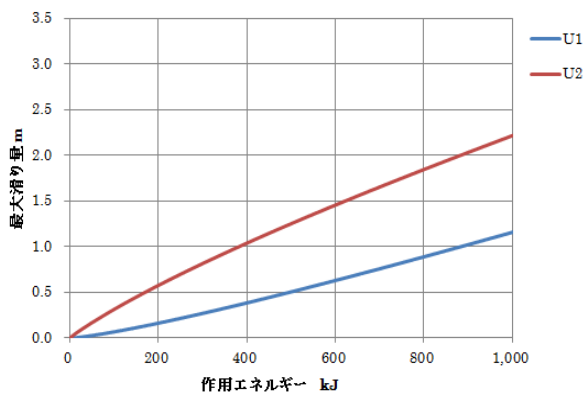
異なる規模の防護工における最大滑り量を比較するため、防護工を構成する縦ワイヤと横ワイヤの本数が、それぞれ 3 本のケース(図-9 (a)), 5 本のケース(図-9 (b)), 7 本のケース(図-9 (c))について解析を行う。落石範囲 B の種々の位置で落石を受けた場合の緩衝金具内の最大滑り量を図-10 に示す。

解析の結果、N13M7 と N7M7 の最大滑り量は同程度の値となったが、N5M5、N3M3 では最大滑り量が小さくなる結果が得られた。ワイヤの本数が 5 本以下のケースのとき、最大滑り量が小さくなったのは、落石位置に近い緩衝金具だけでなく、全体的に緩衝金具に滑りが生じているためだと考えられる。

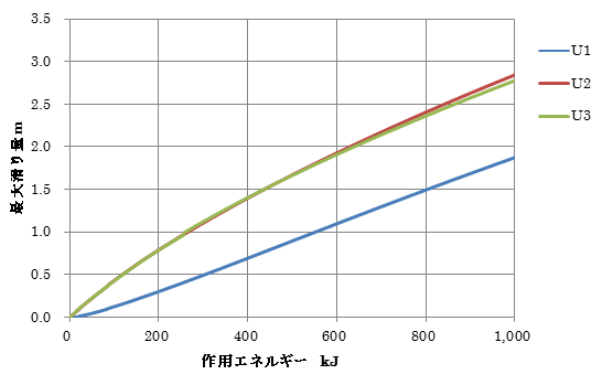


(c) ケース : N7M7

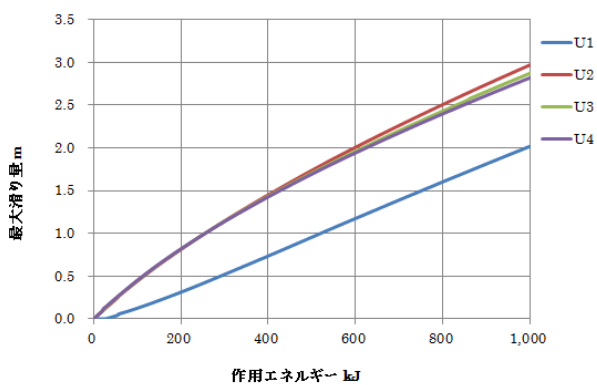
図-9 落石防護網のモデル



(a) ケース:N3M3



(b) ケース:N5M5



(c) ケース:N7M7

図-10 範囲Bに重錘が落下したときの滑り量

6. 結論

動的応答解析によって得た設計時に必要なパラメータであるたわみと滑り量を、水平に設置されたワイヤおよび落石防護網に対してエネルギー的に等価な式を提案し、静的解析法によって再現が可能であることが示された。その結果、大幅な解析時間の短縮が可能となった。また、傾きを

有するワイヤに対しては、エネルギー的に等価な式に修正を加えることにより、たわみと滑り量が再現された。

静的解析法を用いることで、動的応答解析では対応できない規模の落石防護工に対する解析が可能となった。そこで、実規模を想定した落石防護工に対して、落石の位置を変更した場合について解析を行い、たわみと滑り量を求めた。その結果、ワイヤの間隔が2mのとき、ワイヤの本数が7本以上で最大滑り量が概ね同程度となることがわかった。

以上のことから、静的解析法により実設計に近い条件において、落石防護工のたわみ量および滑り量を求めることが可能となり、防護網の規模と重錘の衝突位置が緩衝金具内の滑り量へ及ぼす影響について知見を得た。

参考文献

- [1] 日本道路協会:落石対策便覧,日本道路協会,2000.6.
- [2] 澤田直子,吉田博,藤井智弘,窪田潤平,前川幸次:緩衝金具を配置した落石誘導ワイヤネットシステムの実規模実験について,構造工学論文集,Vol.46A,pp.1853-1864,2000.3.
- [3] 窪田潤平,中村浩喜,吉田博:特殊ひし型金網および緩衝金具を配置した落石防護網の実斜面実験について,構造工学論文集,Vol.54A,pp.11-22,2008.3.
- [4] 岩崎英治,加規秀二,向笠正洋:落石防護工を用いる緩衝金具の開発と性能評価,構造工学論文集 Vol.57A,pp.75-85,2011.3.