

緩衝金具を有する落石防護工の解析手法の簡易化に関する研究

建設構造研究室 飯島翔弘

指導教官 岩崎英治

はじめに

我が国では、地震や気候および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。その一種である落石防護網（以下、防護網）は、落石エネルギーの吸収性能が高いだけでなく、施工性・補修性の高い防護工である。しかし、施工までに斜面環境の事前調査や、防護網の性能評価実験が必要であり、調査に要する期間の長さが課題となっていた。その課題に対して、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。今後、落石防護網を設計する際の指標となる設計式を導くためにも、更なる解析が必要とされており、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、膨大な解析時間を要する動的応答解析の簡易化を図るため、静的応答解析により性能評価実験の再現を行う。

研究方法

緩衝金具の性能評価および落石防護網の設計指標を特定するため、以下のような手順で研究を進めた。なお、緩衝金具の性能評価試験に関しては、岩崎、加規、向笠^[4]が既往の研究で得たデータを用いることとする。

はじめに、静的引張試験により緩衝金具の締め付け条件と発生する張力との関係を明らかにした。また、後に行った重錘落下試験では、試験体に貼り付けたひずみゲージから張力を算出する必要があるため、試験体に貼り付けたひずみゲージの値から算出した張力と引張試験機により入力した引張力を比較し校正を行った。

次に、一本のワイヤロープに一個の緩衝金具を

配した試験体への重錘落下試験を行い、緩衝金具単体でのエネルギー吸収能力を確認し、後の解析工程に必要な各種データを採取した。

最後に、実際の規模で組立てた落石防護網への重錘落下試験を行い、防護網の挙動と、エネルギー吸収能力を確認し、後の解析工程に必要な各種データを採取した。

その後、行った実験の落石防護網の設置条件や、重錘落下条件といった解析諸元を検討し、動的応答解析によるシミュレーションを行う。

次に、動的応答解析から落石防護網を設置するために必要な、ワイヤの滑り量と最大たわみを簡略的に求められるように、エネルギー的に等価な静的解析に解析手法を変更し、静的応答解析の解析解の再現性を確認する。

ワイヤの性能評価

ワイヤの性能評価に当たり過去に行った実験の概要と結果を示す。

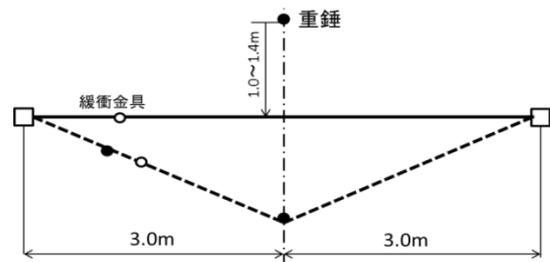


図-1 重錘落下試験の概要図

表-1 実験結果と解析結果の比較

	動的応答解析						重錘落下試験		
	固定支持			弾性支持					
落下高さ(m)	1.0	1.2	1.4	1.0	1.2	1.4	1.0	1.2	1.4
滑り量(m)	0.354	0.400	0.445	0.341	0.384	0.430	0.366	0.377	0.443
重錘エネルギー(kJ)	20.8	23.6	26.2	20.7	23.3	26.1	19.7	22.0	25.2
吸収エネルギー(kJ)	19.5	22.0	24.5	18.7	21.1	23.7	19.9	21.6	23.7
吸収Eg/重錘Eg	0.936	0.934	0.935	0.908	0.904	0.908	1.01	0.98	0.94

動的解析 (ワイヤ)

行った重錘落下実験と同条件で解析を行い、その結果を示す。

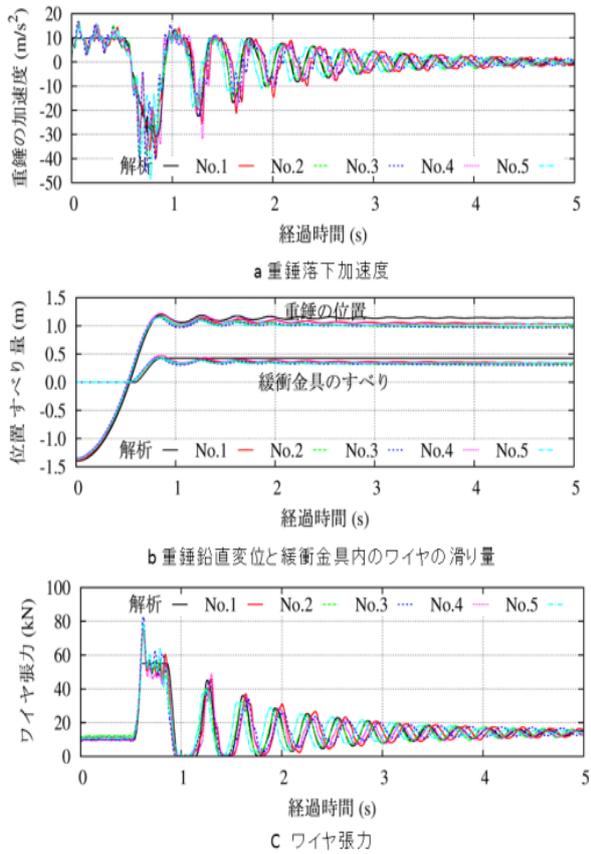


図-2 解析結果と実験結果の比較 (弾性支持)

解析結果と実験結果を比較すると、緩衝金具内のワイヤの滑動時の摩擦力を一定値として扱うなどの単純化を行っているため、実験結果のような短時間での応答の乱れは少ないが、全体の挙動は再現できていると考えられる。

表に、各落下高さでのたわみとワイヤの滑り量、および重錘重量と (落下高さ+たわみ) の積により算出される重錘のエネルギーと緩衝金具の摩擦力と滑り量の積により算出される緩衝金具の吸収エネルギーを示す。また、緩衝金具の吸収エネルギーと重錘のエネルギーの比も示す。緩衝金具だけでなく、ワイヤや載荷架台の構造減衰により、数%から数10%程度のエネルギーが吸収されている。

これらの結果と実験結果を比較すると、動的応答解析による結果は概ね実験結果を再現できていることが分かる。また、ワイヤ支点の弾性支持と固定支持の結果を比較すると、弾性支持の方が実験結果をよく表しているが、時刻毎の応答には違いが見られるが、緩衝金具内のワイヤの最終滑り量、重錘の作用エネルギー、緩衝金具の吸収エネルギーの違いは少ないことがわかる。

落石防護網の性能評価

動的解析の結果と、実験の結果を比較する図を示す。

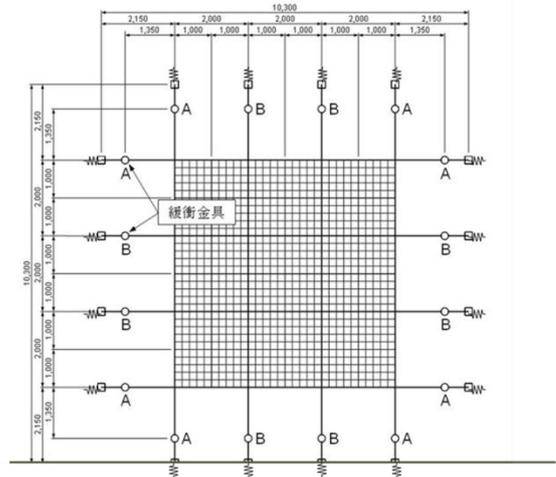


図-3 解析に用いた防護網の概略

表-2 落石防護網の解析結果と実験結果

	動的応答解析						実験結果		
	固定支持			弾性支持			弾性支持(金網省略)		
落下高さ(m)	5.0	10.0	15.0	5.0	10.0	15.0	5.0	10.0	15.0
U1滑り量(m)	0.114	0.231	0.357	0.106	0.223	0.348	0.103	0.221	0.347
U2滑り量(m)	0.375	0.644	0.893	0.362	0.630	0.88	0.364	0.633	0.882
合計滑り量(m)	3.906	6.996	10.002	3.736	6.820	9.824	3.736	6.824	9.832
重錘エネルギー(kJ)	243.1	434.6	620.9	241.5	433.3	619.8	242.1	434.2	620.8
吸収エネルギー(kJ)	214.9	384.8	550.2	205.5	375.0	540.8	205.3	375.2	540.8
吸収Eg/重錘Eg	0.884	0.885	0.886	0.851	0.865	0.871	0.8489	0.864	0.871

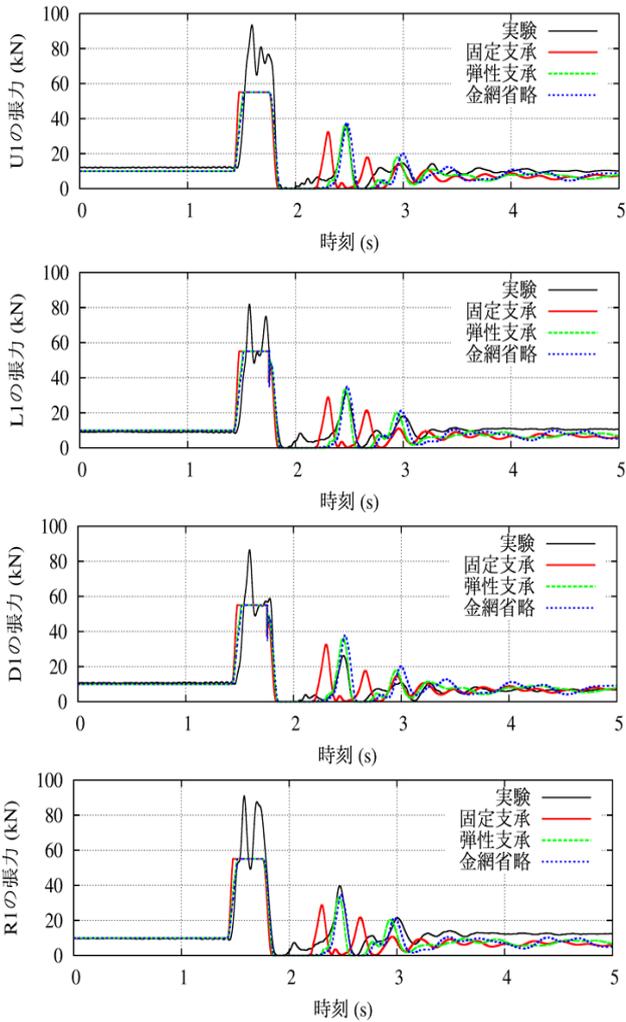


図-3 落石防護網の解析結果と実験結果の比較

実験結果は、対称性が崩れているため、対称な位置にある緩衝金具の値の平均値を示している。作用エネルギーの実験値は、重錘の移動量と重錘重量の積によって得られる。吸収エネルギーは各緩衝金具の平均張力と滑り量の積によって算出しているが、このときの滑り量は最終滑り量 s_f であり、最大滑り量 s_x には、1本のワイヤの端部に緩衝金具を取り付けた実験の結果から、 $s_x \approx 1.2s_f$ の関係があるので、上記の吸収エネルギーの1.2倍の値を記入している。

表より、同一の落下高さの滑り量やエネルギーは、固定支持、弾性支持、金網を省略した弾性支持による結果の違いは少ない。また、滑り量の合計を実験結果と比較すると、1割程度に誤差は小さく

なっている。これより、動的応答解析は、実験結果を概ね再現できていると考えられる。吸収エネルギーと作用エネルギーの比を比べると、10数%程度の構造減衰によるエネルギー吸収が見られる。

静的解析

解析をより早く、簡単にできるように動的解析から静的解析に手法を変える。その理論を示す

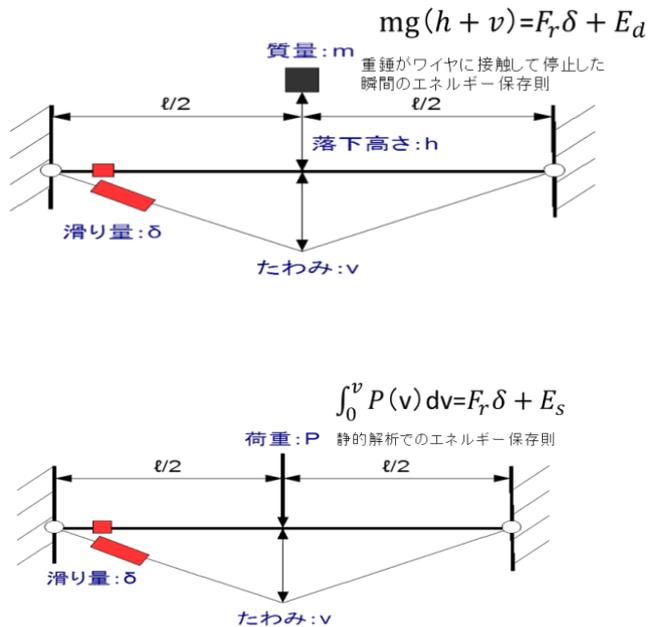


図-4 動的解法のモデル

静的解法のモデル

エネルギー的に等価な解からこれらの式で、 E_s は緩衝金具による吸収エネルギーに比べて小さいと考えられることから、次式が近似的に成立する。

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

E_d は、先の実験と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こととする。

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

ここで、 κ は0.9前後の値である。

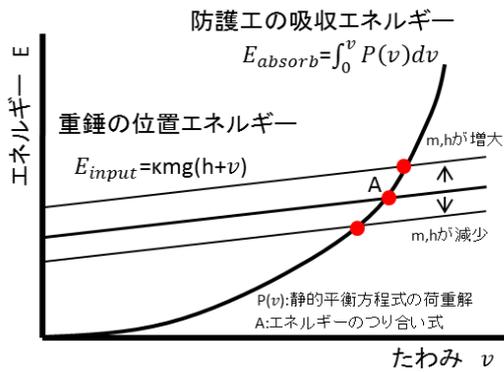


図-4 エネルギー的に等価な解

図に、静的平衡方程式の解としてられる荷重 $P(v)$ 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 が動的応答解析とエネルギー的に等価な静的解析による解を表す。

構造系が同じなら、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、式の解曲線は、 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平衡方程式の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析と等価な静的解は、式の解曲線との交点として容易に得られる。ただし、重錘の落下位置が異なると静的なエネルギー曲線は変化する。

静的解析の結果

表-2 落石防護網の動的解析結果と静的解析結果

落下高さ	動的応答解析			静的解析		
	5	10	15	5	10	15
たわみ(m)	2.170	2.857	3.385	2.49	3.165	3.685
U1滑り量(m)	0.103	0.221	0.347	0.098	0.211	0.333
U2滑り量(m)	0.364	0.633	0.882	0.368	0.639	0.889
合計滑り量(m)	3.736	6.824	9.832	3.728	6.800	9.776
作用エネルギー(kJ)	242.1	434.2	620.8	227.9	401.3	568.3
吸収エネルギー(kJ)	205.3	375.2	540.8	205.0	374.0	537.7

動的解析とでは、作用エネルギーとたわみに大きな差が生じている。この理由として考えられるのは、静的解放では考慮しなかった重錘の跳ね上がりによる再衝突によるエネルギーによるもの

と考えられる。そのため、静的解法のグラフの重錘エネルギーの傾きなどが変化し、たわみの大きさに誤差が生じてしまったものと考えられる。

結論

- ・動的解析から静的解析にすることで、簡易化することができた。
- ・静的解析は動的解析ほどでないものの、必要なパラメータを求めることが出来る。ネットのたわみは誤差が大きいですが、安全側なので使用することは出来る。

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，pp11-22，2008.3.
- [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.