

発泡スチロールを設置した落石防護柵の重錘落下実験

FALLING WEIGHT TESTS ON ROCK FENCE WITH EXPANDED-POLYSTYRENE

松尾 修*, 佐々木 哲也**, 音田 奨***, 上條 明洋****

Osamu MATSUO, Tetsuya SASAKI, Susumu ONDA and Akihiro KAMIJO

*建設省土木研究所動土質研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

**建設省土木研究所動土質研究室 研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

***日本サミコン (株) 技術部 (〒950-0925 新潟市弁天橋通1-8-23)

****日本サミコン (株) 北陸支店 (〒921-8002 金沢市玉鉾5-1-2)

キーワード: 重錘落下, 落石防護柵, 発泡スチロール

(Falling Weight, Rock Fence, Expanded-Polystyrene)

1. はじめに

落石防護柵はワイヤロープ金網式とH鋼式に大別される。ここでは、H鋼式の防護柵の背面に緩衝材として発泡スチロール材 (以下、EPSと称す) を積み重ねることにより落石の運動エネルギーを低減させる工法を考案し (図-1参照)、重錘落下模型実験を行い、設計方法を検討した。以下にその概要を述べる。

2. 実験概要

実験に用いた落石防護柵は実物の約1/2~1/3の大きさで、鋼製の支柱・横梁・ワイヤロープおよびEPSで構成されている。なお、今回行った各種試験・実験に用いたEPSの単位体積質量は、15 kg/m³である。

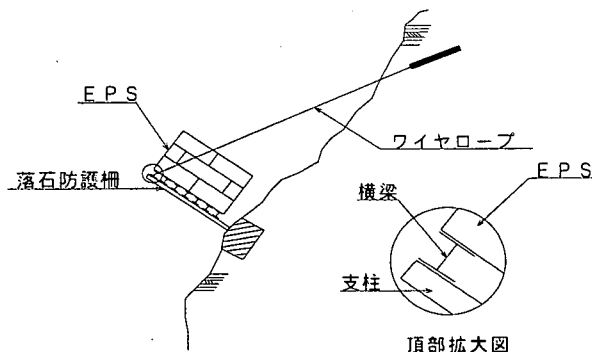


図-1 EPSを設置した落石防護柵

実験は、コンクリート製の土間上に設置したEPSに重錘を衝突させる実験と、図-2に示すEPSを設置した落石防護柵に重錘を衝突させる実験を行った。

また、防護柵を構成する各部材のエネルギー吸収量を明らかにすることを目的として、各部材の塑性域までの載荷試験も行った。

2.1 各部材の載荷試験

各部材の載荷試験は、表-1に示すように、EPS、支柱、横梁およびワイヤロープについて合計5種類行った。支柱、横梁およびワイヤロープは、EPSを設置した落石防護柵の衝突実験装置に用いた各部材と、形状寸法および材質ともに同一のものを使用した。

(1) EPSの静的一軸圧縮試験

試験は、JIS K7220に準拠して行った。載荷装置には圧縮試験機 (アムスラー) を使用した。

(2) EPSの動的一軸圧縮試験

試験は、図-3に示す小型衝撃試験装置を用いて行った。

重錘を自由落下させることによりEPSの立方体 (100×100×100mm) に衝突させ、レーザー変位計によりEPSの変位量 (圧縮による変形量) を測定し、ロードセルにより衝撃力を測定した。重錘のリバウ

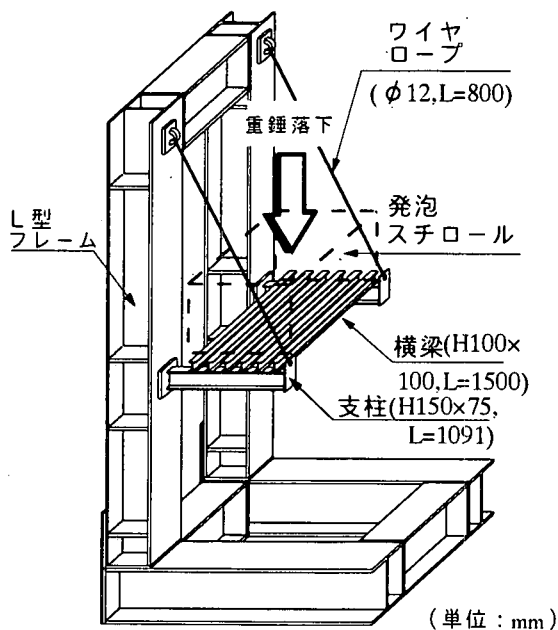


図-2 落石防護柵衝突実験装置

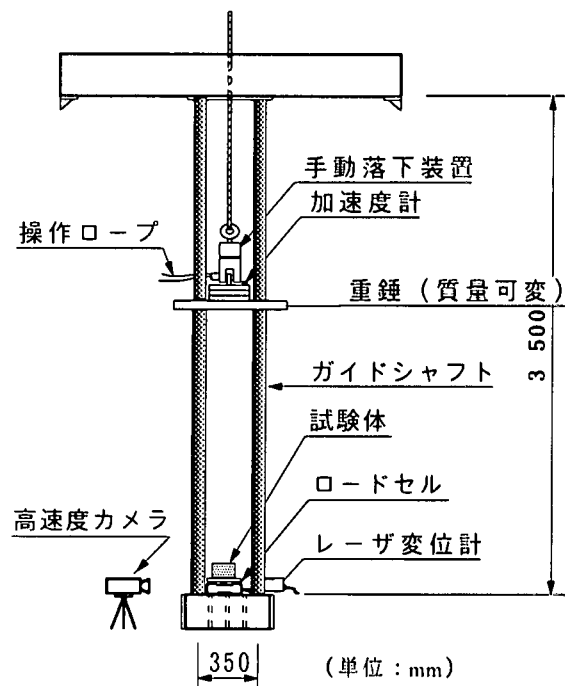


図-3 小型衝撃試験装置

ンド量は、高速度カメラを用いて測定した。

重錘の質量は30, 50, 70kgの3種類、重錘の落下高さは10, 30, 50, 90, 150, 200cm (衝突速度はそれぞれ、1.4, 2.4, 3.1, 4.2, 5.4, 6.3m/secである) の6種類とし、合計14ケースの試験を行った。

(3) 支柱、横梁の静的曲げ試験およびワイヤロープの引張試験

支柱および横梁の静的曲げ試験は、塑性域まで油圧ジャッキを用いて載荷し、ロードセルとレーザー変位計を用いて荷重とたわみ量(変位量)を測定した。

ワイヤロープの引張試験は、門型クレーンを用いてワイヤロープ(φ12, L=800mm)の一端を吊り上げるにより破断するまで載荷し、ロードセルとワイヤ式変位計を用いてワイヤロープに作用する張力と伸び量を測定した。

2.2 EPSへの重錘落下実験

EPSが分担するエネルギー吸収量を明らかにすることを目的として、発泡スチロールへの重錘落下実験を行った。

実験装置は、図-4に示すようにEPSの形状が100×200×50cmの直方体で、コンクリート製土間の上に直接設置して実験を行った。なお、EPSを設置した落石防護柵の場合と同様な拘束条件となるようEPSの側面の一面のみコンクリート製擁壁で拘束した。重錘がEPSへ衝突する位置は、擁壁から727mmの地点とした。実験には、質量が300kg, 500kg, 1000kgの3種類のコンクリート製重錘を使用した。なお、それらの重錘の比重は2.6で、直径はそれぞれ600, 700, 900mmである。

実験には、重錘に取り付けた加速度計、コンクリートスラブに9個埋設したロードセル、コンクリート擁壁に3個埋設したロードセルおよび高速度カメラ

表-1 各部材の載荷試験

部材名称	載荷方法	載荷速度	試験体形状
(1)EPS	静的一軸圧縮	10mm/min	50 * 50 * 50mm
(2)EPS	動的一軸圧縮	1.4-6.3m/sec	100 * 100 * 100mm
(3)支柱	静的曲げ	24-84mm/min	H150 * 75, L=1091mm
(4)横梁	静的曲げ	10-90mm/min	H100 * 100, L=1500mm
(5)ワイヤロープ	静的引張	30mm/min	φ12, L=800mm

ラを用いて測定を行った。実験条件を表-2に示す。

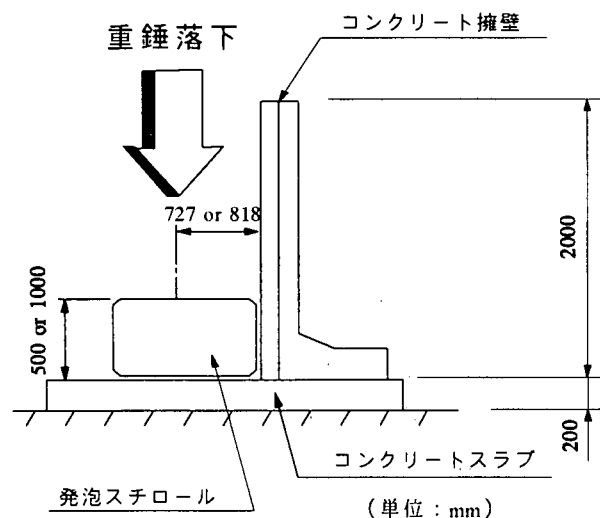


図-4 EPSへの重錘落下実験装置

表-2 EPSへの重錘落下実験条件

重錘 質量 (t)	EPS 厚さ (cm)	重錘 落下高さ(m)			
		5.0	7.5	10	15
0.3	50	F11-05	F11-07	F11-10	---
//	100	F12-05	---	F12-10	F12-15
0.5	50	F21-05	F21-07	F21-10	---
//	100	F22-05	---	F22-10	F22-15
1.0	50	F31-05	F31-07	---	---
//	100	F32-05	---	F32-10	---

注1. 表中のF11-05などは実験番号である。

注2. EPS厚さ100cmは、EPSを2体積み重ねた場合である。

2.3 EPSを設置した落石防護柵の重錘落下実験

EPSを設置した落石防護柵の重錘落下実験は、図-2に示した実験装置を用いて行った。実験装置に使用した支柱、横梁、ワイヤロープの形状寸法は表-1に示したとおりである。

実験装置には、支柱(H150×75,L=1091mm)2本を1500mm間隔で取り付け、その取り付け方法は、支柱の付け根に高力ボルトをそれぞれ4本用いて取り付けた。支柱には普通ボルト4本(片側一端当たり)で横梁(H100×100,L=1500mm)6本を150mm間隔で取り付け、横梁上には、EPSの直方体(1000×2000×500mm)を1体もしくは2体積み重ねて設置した。支柱の先端にはワイヤロープ(φ12mm,A種)を取り付け、L型フレームと結合させた。実験に使用した重錘は、質量が300kg,500kg,1000kgの3種類のコンクリート製重錘である。重錘の落下高さは5mから30mまで5m刻みとした。測定項目は、重錘の加速度1点、支柱先端の加速度2点、ワイヤロープの張力2点、支柱や横梁各点のひずみ16点、EPSから横梁に伝達する圧力11点、高速度カメラによる各横梁の変位や支柱の回転角、重錘の移動量とした。なお、部材に残留変形が生じた場合には、それらの変形量を測定し、その都度新しい部材と交換することとした。実験は、表-3に示すように重錘質量、重錘がEPSへ衝突する位置、EPSの厚さおよびワイヤロープの有無をパラメータとして合計31ケース行った。なお、表中の重錘衝突位置は、支柱の高さに対する割合を示している。

表-3 EPSを設置した落石防護柵の実験条件

重錘 質量(t)	重錘 衝突位置	EPS 厚さ(mm)	重錘落下高さ(m)					
			5	10	15	20	25	30
0.3	2/3	500	L11-05*	L11-10	L11-15	L11-20	L11-25	L11-30
		1000		L12-10				
	3/4	500		L13-10				
		1000		L14-10				
0.5	2/3	500	L21-05*	L21-10	L21-15	L21-20		
		1000	L22-05	L22-10	L22-15			
	3/4	500		L23-10				
		1000		L24-10				
1.0	2/3	500	L31-05*	L31-10	L31-15			
		1000	L32-05	L32-10	L32-15			
		0	L41-05	L41-05				
	3/4	500		L33-10				
1000			L34-10					

注1: 表中の*印のケースでは、ワイヤロープが無い状態でも実験を行った。

注2: 表中のL11-05などは実験番号である。

3. 実験結果および考察

3.1 E P Sの静的・動的一軸圧縮試験結果

図-5に静的および動的一軸圧縮によるE P Sの応力-ひずみ関係を示す。これより、動的一軸圧縮試験において、重錘の落下高さ（衝突速度）を変化させた場合の応力-ひずみ関係は、重錘の落下高さ10cm~200cm（衝突速度で、1.4~6.3m/sec）の範囲内では大きな違いは認められず、静的試験（載荷速度で、0.00017m/sec）と比較すると応力が約2割ほど増加しているのがわかる。

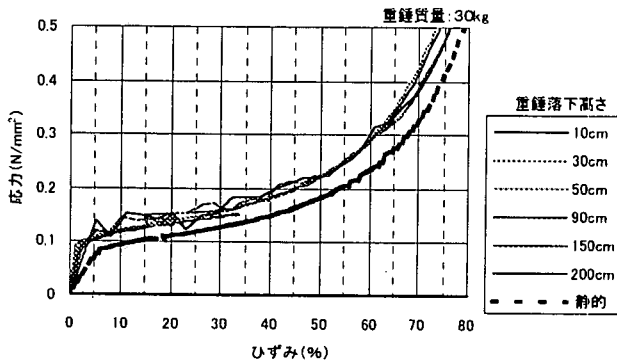


図-5 E P Sの応力-ひずみ関係

3.2 支柱, 横梁, ワイヤロープの静的試験結果

支柱、横梁の静的曲げ試験およびワイヤロープの静的引張試験結果を表-4に示す。なお、ワイヤロープの引張試験では、支柱や横梁の曲げ試験の様な明確な降伏点は現れてこなかった。

表-4 支柱、横梁、ワイヤロープの試験結果

	降伏点モーメント	降伏点回転角	破断荷重
支柱	17.2kN・m	0.43度	---
横梁	58.9kN・m	0.50度	---
ワイヤロープ	---	---	66kN

3.3 E P Sへの重錘落下実験

図-6に重錘質量0.5t、E P S厚50cmにおける重錘衝撃力PとE P Sへの貫入量（m）の関係を示す。この図より、載荷過程においては、重錘質量とE P Sの厚さが同一であれば、E P Sは重錘の落下高さに関係なくほぼ等しい挙動を示していることがわかる。

図-7および図-8には、落下高さ5m、E P S厚50cmにおける重錘衝撃力Pと重錘のE P Sへの貫入量（m）の関係および重錘衝撃力を重錘の断面積で除した応力と重錘のE P Sへの貫入量をE P Sの厚さで除したひずみ量との関係を示す。図-7では、重錘質量0.3tの場合と0.5tの場合が載荷過程に

おいてほぼ同一な挙動を示すのに対し、図-8では、重錘質量0.5tの場合と1.0tの場合がほぼ同一な挙動を示した。これらは、衝突時のE P Sの破壊形状に依存しているものと推測でき、ある程度重錘径が大きくなると、応力-ひずみ関係は同様な傾向を示すものと考えられる。また、E P Sの一軸圧縮試験結果（図-5）と比較すると、重錘質量0.5t, 1.0tについては、載荷初期段階で若干の違いが見られるものの、両者は比較的一致している。

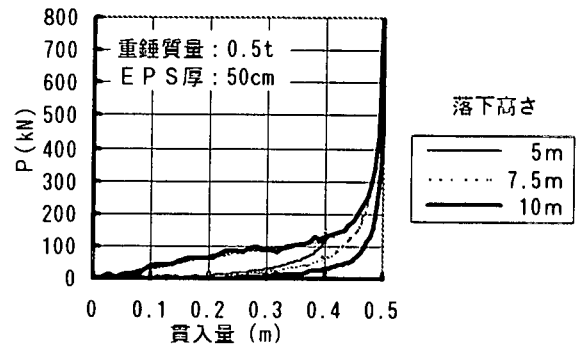


図-6 E P Sの荷重-変位関係

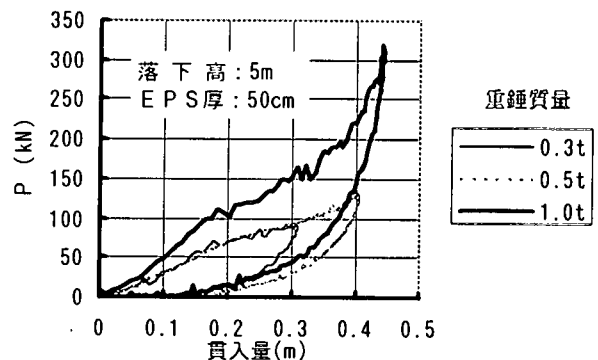


図-7 E P Sの荷重-変位関係

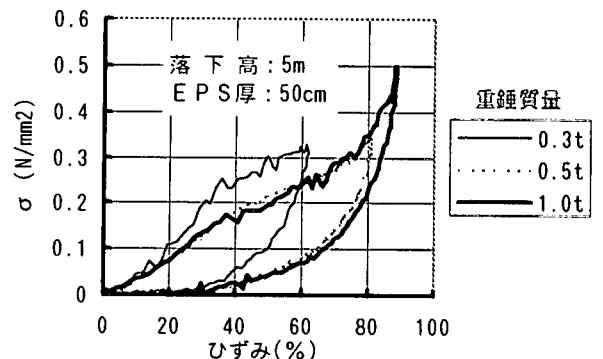


図-8 E P Sの応力-ひずみ関係

3.4 E P Sを設置した落石防護柵の重錘落下実験

実験結果の一例として、図-9に重錘の位置エネルギーがほぼ等しい3つのケース（重錘質量0.3t-落下高さ20m、質量0.5t-高さ10m、質量1.0t-

高さ5m) について、横梁の残留変位と支柱の残留回転角を比較した図を示す。図より、重錘質量(直径)が小さいほど横梁の残留変形が大きくなり、重錘質量(直径)が大きいくほど支柱の残留変形が大きくなる傾向のあることがわかった。これは、重錘径が大きくなるほど、荷重を分担する横梁の本数が増し、横梁1本当たりの荷重が減少することと、横梁のスパン中央付近への荷重の集中度合いが減少することにより、支柱が先に降伏するためである。

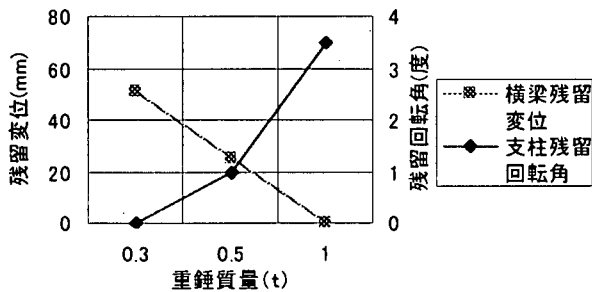


図-9 重錘質量と残留変形の関係

図-10には、表-5に示した重錘の位置エネルギーが等しい実験条件A~Dの4ケースの実験から得られたEPS、横梁、支柱の残留変形量から求めた各部材のエネルギー吸収量と実験条件との関係を示す。なお、各部材のエネルギー吸収量を求める際に、各部材の材料試験から得られた荷重-変位関係を用いた。支柱の残留回転角が15度を越えた場合は、それ以上のエネルギー吸収はしないものとした。

実験条件BとDに着目すると、EPSを設置した実験条件Bのエネルギー吸収量の合計がEPS無しの実験条件Dのそれより約70%大きいことがわかる。これらのケースではいずれも支柱が大きく変形していることから、このエネルギーは可能吸収エネルギーと考えられ、従って、EPSを設置することによりエネルギー吸収能力が高められていることがわかる。

実験条件BとCに着目すると、EPS厚さが100cmの実験条件Cの場合には横梁と支柱が殆ど残留変形を生じていないことから、防護柵全体としての可能なエネルギー吸収量は、支柱もしくは横梁の変形分を加えることにより50%程度は増加するものと考えられる。また、実験条件AとBに着目すると、重錘質量が小さいほど、若干ではあるが全体としてのエネルギー吸収量が小さくなる傾向がある。

表-5 実験条件一覧表

A	重錘質量0.5t	落下高20m	EPS厚50cm
B	// 1.0t	// 10m	// 50cm
C	// 1.0t	// 10m	// 100cm
D	// 1.0t	// 10m	// 0cm

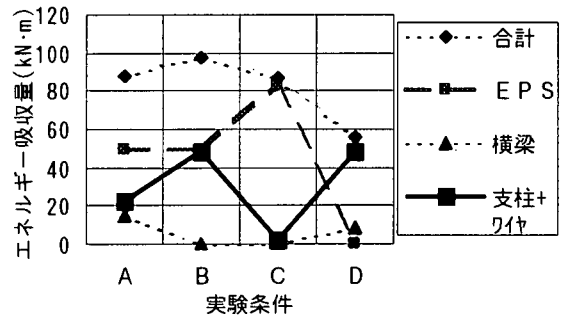


図-10 残留変形量から求めた各部材のエネルギー吸収量

4. EPSを設置した落石防護柵の設計法の検討

EPSを設置した落石防護柵の設計方法(以下、提案式と称す)を以下のように提案する。

- ①. EPSの荷重-変位関係は、参考文献2)に従い、落石径に依存するものとする。また、EPSの許容最大変位(貫入量)は、EPS厚の80%ひずみまでとする。
- ②. 横梁、支柱の荷重-変位関係は、降伏点まではJISに則り、降伏点以降の荷重-変位関係は、部材試験の結果を用いた。支柱の許容最大回転角は、参考文献1)に準じて15度とする。横梁の許容最大変位は、横梁の載荷試験の結果からスパンの10%とする。
- ③. ワイヤロープの荷重-変位関係は、部材試験の結果から物性を決定した。また、支柱が降伏点に達すると同時にワイヤロープは破断するものとする。
- ④. 重錘からEPSを経て横梁に伝達する衝撃力が伝達する横梁の本数は、落石の径に応じて所定の本数を決定し、各横梁中央に集中荷重が作用するものとする。
- ⑤. 横梁の降伏荷重と支柱およびワイヤロープの降伏荷重の大小により、破壊モードを1)横梁が降伏する場合と2)支柱およびワイヤロープが降伏する場合に分ける。
- ⑥. 各部材の荷重-変位関係を重ね合わせて落石防護柵全体の荷重-変位関係を求め、この荷重-変位関係から求まる吸収エネルギーが落石エネルギーと等しくなるまで防護柵が変形するものとする。

図-11～図-12に提案式と実験値を比較した結果を示す。比較に用いた実験条件は、提案式を塑性域において評価するために支柱や横梁に残留変形を示した条件から選んだ。実験条件を表-6に示す。

図-11, 12は、提案式と実験値の横梁の残留変位および支柱の残留回転角について比較した図で、提案式の値は実験条件と等しい重錘エネルギーを吸収する際に生じる横梁、支柱の残留変位を、提案式に基づいて逆算した値である。実験値は、横梁については残留変位を提案式と同じ横梁本数で平均化したもの、支柱については2本の平均値である。

これらの図より、横梁の残留変位については、実験値より提案式の方が大きく評価している。一方、支柱の回転角については提案式による値は実験値とよく一致しており、重錘径の増大に伴い支柱の回転角が大きくなるという実験結果を比較的よく再現できていると言える。

表-6 実験条件一覧表

A	: 重錘質量0.3t、	落下高20m、	EPS厚50cm
B	: // 0.5t、	// 15m、	// 50cm
C	: // 1.0t、	// 15m、	// 50cm

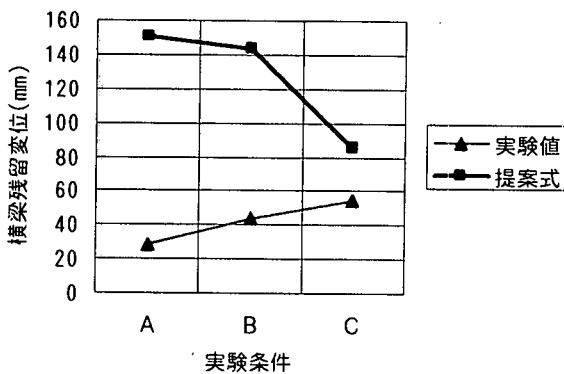


図-11 横梁残留変位に関する比較

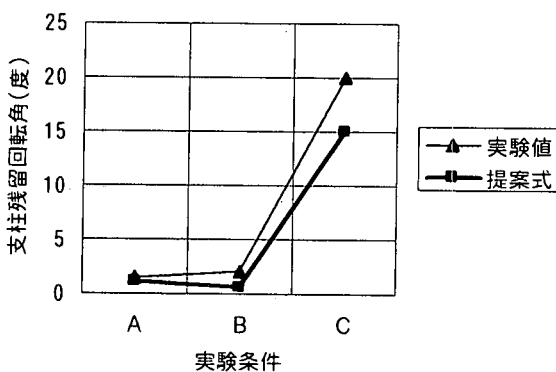


図-12 支柱残留回転角に関する比較

5. まとめ

実験に用いる発泡スチロールの静的一軸圧縮試験および動的一軸圧縮試験を実施し、その基本的な力学特性を調べた。動的圧縮試験において、重錘の落下高さ(衝突速度)を変化させた場合の応力-ひずみ関係は、重錘の落下高さ10cm~200cm(衝突速度で1.4~6.3m/sec想定)の範囲内では大きな違いは見られなかったが、静的試験(0.00017m/sec)と比較すると応力が約2割増加していた。

コンクリート製の土間上に設置した発泡スチロールに対し重錘落下実験を行い、発泡スチロールの衝撃緩衝性能やエネルギー吸収量について検討した。その結果、荷重-変位曲線の載荷過程は、重錘質量とEPSの厚さが等しければ、動的一軸圧縮試験の場合と同じく、EPSは重錘の落下高さに関係なくほぼ同一な非線形バネとして挙動していることがわかった。

また、荷重-変位曲線では、重錘質量0.3tの場合と0.5tの場合がほぼ等しい挙動を示すのに対し、応力-ひずみ曲線の載荷過程が、重錘質量が0.5tの場合と1.0tの場合がほぼ等しい挙動を示した。

発泡スチロールを設置した落石防護柵に対し重錘落下実験を行い、発泡スチロールによる衝撃力緩衝性能やエネルギー吸収量について検討した。その結果、EPSを落石防護柵に設置することにより、エネルギー吸収能力を高められることがわかった。また、重錘径が小さいほど横梁の変形が大きくなり、重錘径が大きいほど支柱が変形しやすい傾向を示すことがわかった。

発泡スチロールを設置した落石防護柵および各構成部材のエネルギー吸収量を基に、エネルギー法に基づく設計法を提案し、その適用性を検討した。その結果、実験で見られたように、重錘径の増大に伴って支柱の残留回転角が大きくなる変形モードに移行する現象を、提案式により比較的よく表現することができた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、1983
- 2) 吉田博、松葉美晴他：発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究、土木学会論文集、第427号/IV-14、pp.143-152、1991