

落石防護を目的とした補強土擁壁の耐衝撃性に関する実験について

IMPACT-PROOF PERFORMANCE TESTS ON REINFORCED SOIL WALLS FOR ROCKFALL PROTECTION

井上昭一*, 藤井智弘**, 久保哲也***, 横田善弘****, 山崎敦*****, 永吉哲哉*****

Shoichi INOUE, Tomohiro FUJII, Tetsuya KUBO, Yoshihiro YOKOTA,

Atsushi YAMASAKI and Tetsuya NAGAYOSHI

*工修 (株) プロテックエンジニアリング 技術開発部長 (〒950-0971 新潟市近江 155 番地 5)

**工博 (株) エイ・シイ・デイ 代表取締役 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸 3903 番地)

***工修 前田工織 (株) 営業本部 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋 3 丁目 4-10)

**** 前田工織 (株) 工法開発部長 (〒919-0422 福井県坂井郡春江町沖布目)

***** 日本道路公団 関西支社大阪技術事務所技術調査課 (〒565-0805 大阪府吹田市清水 15-1)

***** 日本道路公団 関西支社大阪技術事務所技術調査課長 (〒565-0805 大阪府吹田市清水 15-1)

キーワード：補強土壁，落石，衝撃，エネルギー吸収能

(reinforced soil walls, rock fall, impact, energy absorption capacity)

1 はじめに

わが国における落石防護工は，従来工法として，落石防護柵，落石防護擁壁，落石洞門工など剛性の高い構造物が主流である．しかし，近年では，大きな衝撃力が生じる剛な構造から，衝撃吸収に優れる柔な構造に移行する傾向にある．これまでに，後者の一工法として，補強土を用いた落石防護擁壁が国内外の研究グループで実験され報告されている^{1) 2)}．ここで落石防護補強土擁壁は，衝撃吸収性に優れ，経済性および景観性についても既往の対策工法に比較して十分に期待できる工法であると報告している．

今回の研究では，平成 10 年に行った実物実験の結果などの報告をもとに，これまで明確にできなかった構造体の衝撃吸収メカニズムを明らかにするとともに，設計手法の確立，施工性，経済性，景観性などの検討を総合的に行うものである．

ここでは，基本的特性を確認するために行った模型実験について述べる．

2 実験内容

(1) 目的

実験は，補強土擁壁が衝撃を受ける場合の，衝撃荷重特性や破壊モードなどの動的挙動を，定量的に

評価することを目的とした．

(2) 実験方法

実験方法は，重錘を所定の高さから落下させ，衝突できるように再現性を重視するものとした．実験状況を写真-1 に示す．また，実験場所は，主材料の土の物性を安定させるため室内とした．以上のことから，実験装置として鋼製架台を設置し，図-1 に示すように，まずワイヤで繋がれた重錘を持ち上げ，所定の高さで振り子式に落下させる．落下した重錘は，供試体の寸前でワイヤから切り離され，放物線

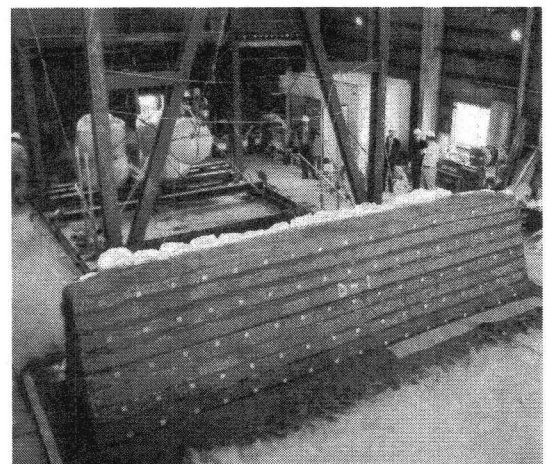


写真-1 実験状況

を描いて供試体に衝突するようにした。実験装置の能力は、室内実験の制限により 150kJ(30kN・5m)を最大エネルギーとした。重錘は、直径が 900mm で球形の鋼にコンクリートで充填したもの(9kN)と積層鋼プレートを球形に加工したもの(30kN)の 2 つを用意した。

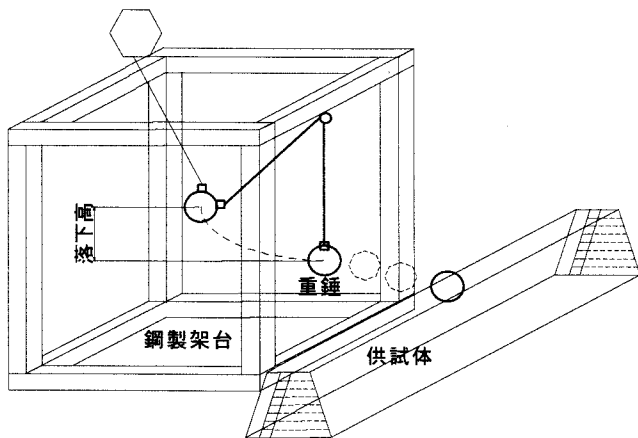


図-1 実験概要図

(3) 実験供試体

供試体タイプは、各部の効果を確認するために、4タイプ用意した。供試体の仕様を表-1 に示す。ここで、落石防護補強土擁壁の構造体は、これまでに開発された受撃体、伝達体および抵抗体の構成を

基本にしている。形状図を図-2 に示す。供試体寸法は、実験装置の制限により原型の 1/2.5 モデルで設定した。ここで、供試体延長は、Type A・B は 4.8m、Type C・D は 7.2m である。

(4) 使用材料

使用材料を表-2 に示す。使用材料として、土材料は実物と同様なものを用い、土以外の材料は可能な限り形状、強度など 1/2.5 とした。

(5) 土の物性試験

実験に使用した土の物性試験は、密度試験、含水比試験および粒度試験の物理的性質試験と、締固め試験および三軸圧縮試験の力学試験を実験前に行う。供試体の土の物性は、含水比および密度を R I 試験により測定し、先の物性試験の密度-含水比のグラフにプロットすることにより物理的性質を確認する。図-3 には今回の実験の試験結果を示す。

(6) 载荷ケース

载荷ケースは、①使用状態、②終局状態、③破壊状態および④大崩壊状態の 4 ケースを想定した。また、破壊規模が推定できるように、①使用状態ではエネルギーを漸増して繰返し载荷とする。土構造の場合、破壊の定義は非常に困難である。したがって、载荷ケースで想定した状態は、あくまで目安と

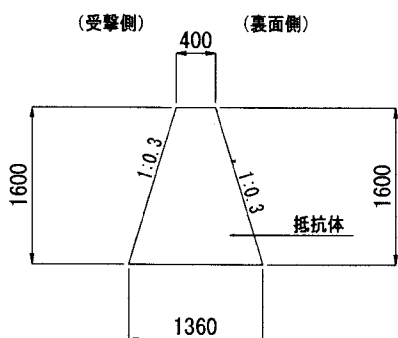


図-2.1 供試体形状図 Type A

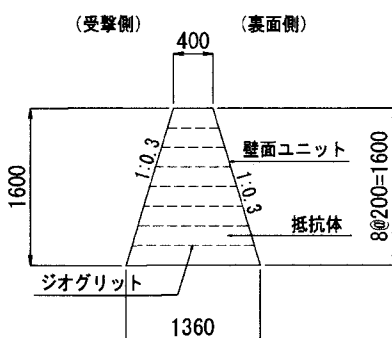


図-2.2 供試体形状図 Type B

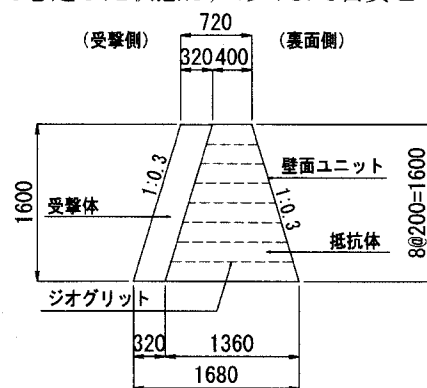


図-2.3 供試体形状図 Type C

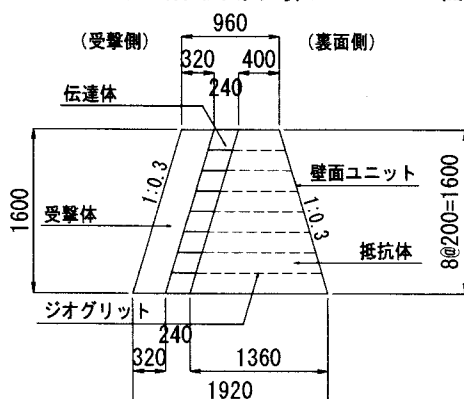


図-2.4 供試体形状図 Type D

表-1 供試体の仕様

Type	内容	目的
TYPE A	無補強盛土堤体	土材料の衝撃特性を確認
TYPE B	補強盛土堤体	補強材の効果を確認
TYPE C	受撃体+補強盛土堤体	受撃体の効果を確認
TYPE D	受撃体+伝達体+補強盛土堤体	伝達体の効果を確認

表-2 使用材料

種別	実物		模型	
	規格	強度／密度	強度／密度	備考
盛土材	砂質土	19kN/m ³	19kN/m ³	同一材料
補強材	ジオグリッド	47kN/m ²	20kN/m ²	
壁面材	エキスパンドメタル	SPHC	SPHC	部材は1/2.5
受撃体袋	ストレッチマット	5880kN	3040kN	
受撃体中詰め材	単粒度砕石7号	17kN/m ³	17kN/m ³	同一材料
伝達体袋	土木シート	160kg/m ³	120kg/m ³	
伝達体結合材	土木シート	160kg/m ³	120kg/m ³	
伝達体中埋め材	砂質土	19kN/m ³	19kN/m ³	同一材料

表-3 载荷条件一覧

重量 (kN)	高さ (m)	供試体タイプ・载荷ケース											
		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D3	D4
9.0	0.25	●											
	0.50	○	●		●								
	1.00			●	○								
	1.50					●		●					
	2.00				○								
	2.50												
	3.00				○		●	○					
	3.50												
30.0	4.00												
	1.00								●		●		
	1.50												
	2.00							○		●	○		
	2.50												
	3.00										○	●	
	3.50												
	4.00												●

したものであり、各タイプの形状変形を目視により概ね一致させるものである。表-3には载荷エネルギーの一覧を示す。ここで、供試体タイプと载荷ケースは、たとえば Type A-Case①-1 回目を A11, Type D-Case③を D3 と表示する。また、●は初期（単）载荷を、○は履歴（繰返）载荷を表す。

（7）測定項目および測定方法

本実験の測定項目は、以下のとおりとする。

- 1) 重錘加速度：重錘内部に埋め込み XYZ 方向の重錘加速度（負値）を測定し、衝撃速度・貫入量を算定する。
- 2) 土中加速度：堤体内に加速度を埋め込み堤体内の XY 方向加速度（正值）を測定し、堤体の変位計算し内部挙動を推定する。
- 3) 高速カメラ：堤体上面・側面・正面・後方から撮影し、衝突時からそれ以降の現象について毎秒 200 コマ程度で記録し、加速度などのデータと照合する。
- 4) 光波測量：衝突後の堤体裏面を測定し残留変位を測定する。
- 5) 荷重計：衝突部断面方向の堤体底面に設置し、衝撃荷重の底面への作用状態を確認する。
- 6) デジタルビデオカメラ：実験状況を全体的に撮影し、以降のデータ整理や解析時および成果の

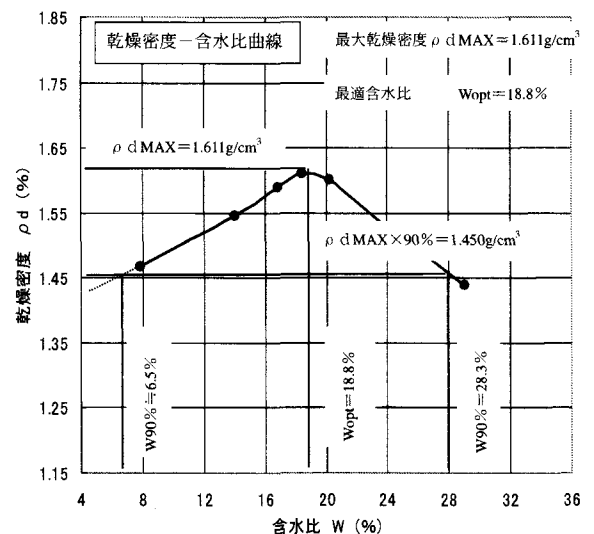
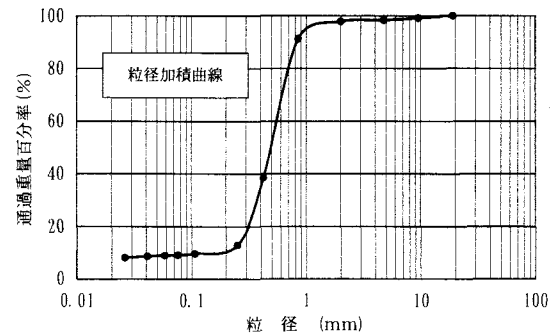


図-3 土の物性試験結果

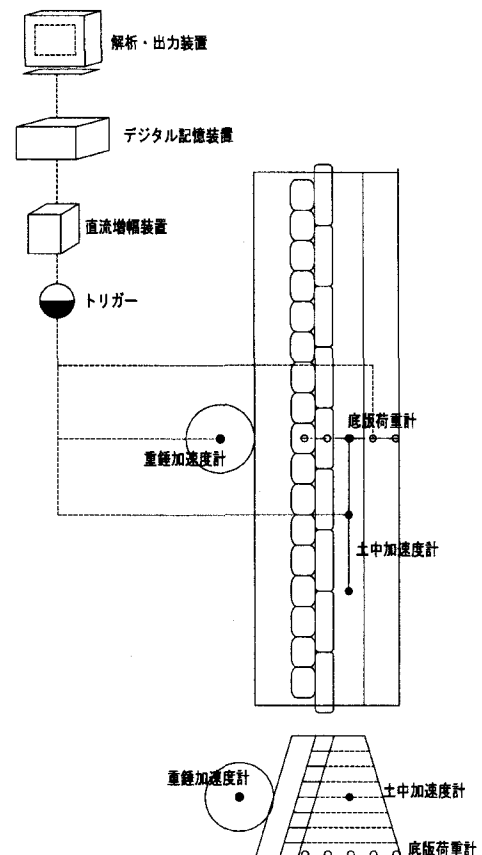


図-4 計測システムの概要

まとめに活用する。

- 7) 内部破壊状況：堤体内部の変形および破壊状況を写真やスケッチなどで記録する。

計測システムの概要を図-4に示す。増幅器およびデジタルレコーダーを使用し、加速度計および荷重計より測定されたアナログ信号を増幅し、0.2msec間隔でデジタル量として記録する。また、データ処理システムは、測定された加速度および衝撃圧を解析し、それらの最大値と発生時間などを表示し、その波形を作画する。

3 実験結果

(1) 重錘加速度

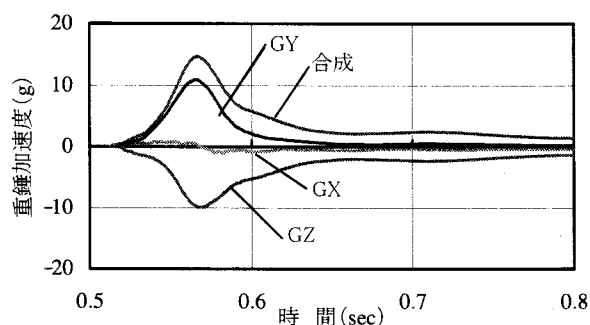


図-5 重錘加速度の経時変化 (D3)

図-5にはD3の重錘加速度の経時変化を示す。3軸方向の加速度とこれを合成した合成加速度を示す。重錘加速度はすべての実験ケースで図-5と同様に、YおよびZ方向の加速度が卓越した加速度波形を示した。本論文では、重錘加速度として合成加速度を適用することとする。

図-6は、重錘加速度から求めた重錘衝撃力（加速度×質量）－重錘変位（加速度の積分値）の関係を示したものである。ここでは、各タイプで同一のエネルギーを载荷したケースを比較している。AとB（図-6.1）およびCとD（図-6.2）を比較すると、構成する構造体が多くなるにしたがい、衝撃力は大きくなり、変位は小さくなる傾向が確認できる。

(2) 土中加速度

土中加速度計は、抵抗体の中心部（Y1）と中心部から0.8m（Y2）および1.6m（Y3）延長方向に離れた位置に設置した。図-7には、B11とB3の堤体内変位（Y方向）の経時変化を示す。B11のように载荷エネルギーが小さく抵抗力に余裕がある場合は、最大変位発生から最終の残留変位は減少する。一方、B3のように载荷エネルギーが大きく抵抗力に比較的余裕がない場合は、最大変位が最終の残留変位となる。このような挙動は、耐力評価を表す1つのパ

ラメータとなると考えられる。

(3) 破壊状況

破壊の状況を写真-2に示す。Type Aは、盛土材だけで補強材のないもので、重錘が衝突した位置が局部的に崩壊する。今回は盛土が急勾配であったこ

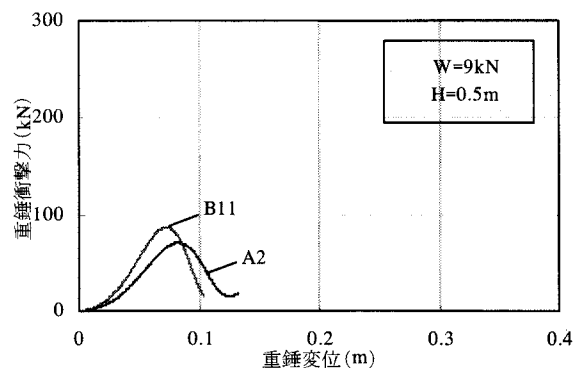


図-6.1 重錘衝撃力・重錘変位関係 (A-B)

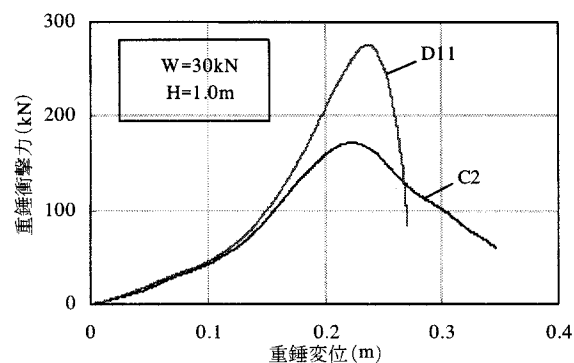


図-6.2 重錘衝撃力・重錘変位関係 (C-D)

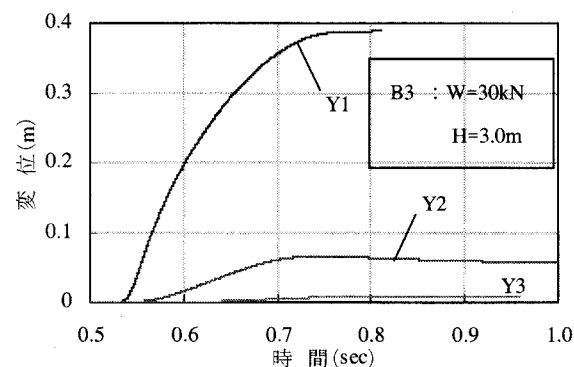
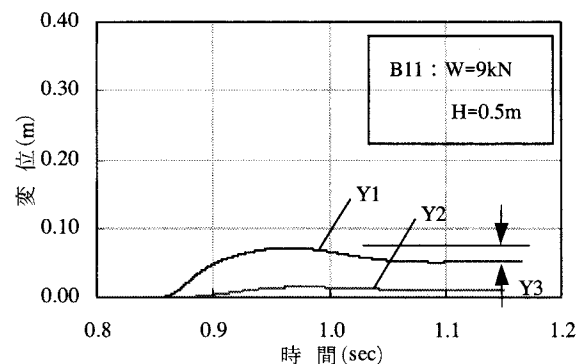


図-7 堤体内変位の経時変化

とから、重錘が衝突する振動で崩壊が見られた。補強土の Type B は、Type A に比較して堤体の崩壊状況が飛躍的に改善され、自立状態が保持できるようになる。Type C になると、重錘の衝撃が受撃体を介することにより緩和され、Type D ではさらに衝撃力が、堤体に伝達されて、局所的な破壊が飛躍的に改善される状態を確認することができる。補強土を用いた Type B・C・D の裏面の状態は、補強材（ジオグリッド）の敷設層（施工目地）が段差となって変形している。これは、断面のせん断方向に連続性がないため弱部となっていることと考えられる。また、延長方向の変形状態に着目すると、伝達体により荷重が分散するが、補強材（ジオグリッド）の目地部（1.2mピッチ）で連続性が失われ荷重による供試体の変形範囲が小さくなっているものと思われる。したがって、本構造物は連続性を強化すればより高いエネルギー吸収性能を得ることが可能であると、破壊状況から判断できる。

4 考察

重錘加速度から求めた供試体の吸収エネルギーと重錘変位の関係を図-8 に示す。ここで、吸収エネルギーは、重錘が供試体に衝突してから停止するまでの衝撃力と変位の積分値である。いずれのタイプも

载荷エネルギーが増加するにしたがい、吸収エネルギー・変位曲線が急勾配から緩勾配に移行する傾向を示した。曲線が急勾配の範囲は、供試体の最大耐力の範囲内で抵抗しているひずみ硬化状態を表す。一方、曲線が緩勾配となる状態は、供試体の耐力を超え内部破壊にいたり、ひずみ軟化状態に移行したことを表す。すなわち、ひずみ硬化の状態からひずみ軟化の状態に移行した変化点が、供試体の破壊状態と定義できるものと考ええる。一般に破壊の判断では、構造部材の変形量や応力状態などで定義することが多いが、今回のように土構造の場合は、変形量や応力状態での定量的な判断は困難である。ここでは、各供試体の抵抗力的変化が顕著に見ることができた、重錘の吸収エネルギーと変位の関係から判断するものとした。

以上の破壊の定義をもとに、各供試体の補強効果を構造体ごと算出する。

盛土材の効果 (Type A) = 8kJ

補強材の効果 (Type B-Type A) = 14kJ

受撃体の効果 (Type C-Type B) = 34kJ

伝達体の効果 (Type D-Type C) = 42kJ

このことから、本構造物は、伝達体と受撃体で概ね 8 割の補強効果を示すことがわかる。

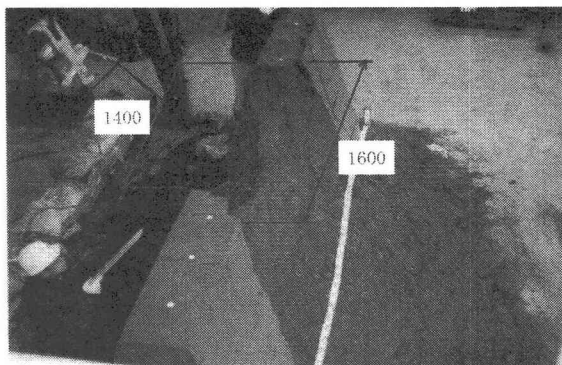


写真-2.1 破壊状況 A3

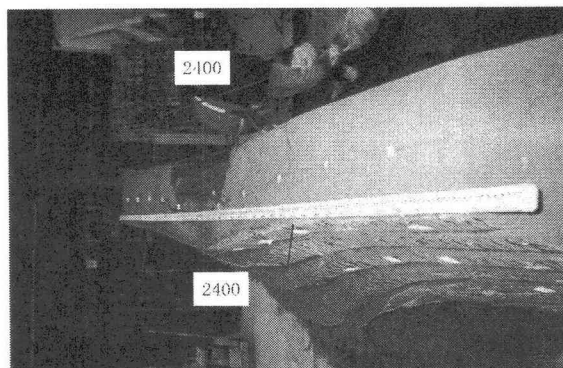


写真-2.2 破壊状況 B3

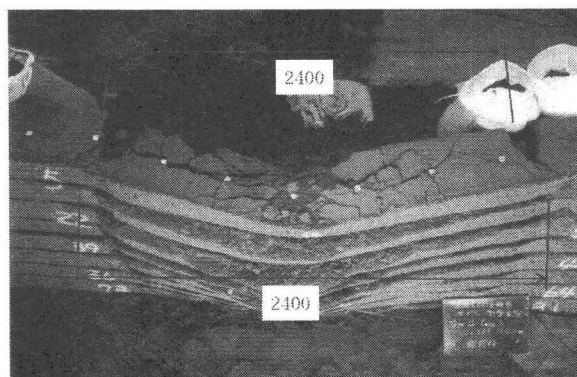


写真-2.3 破壊状況 C3

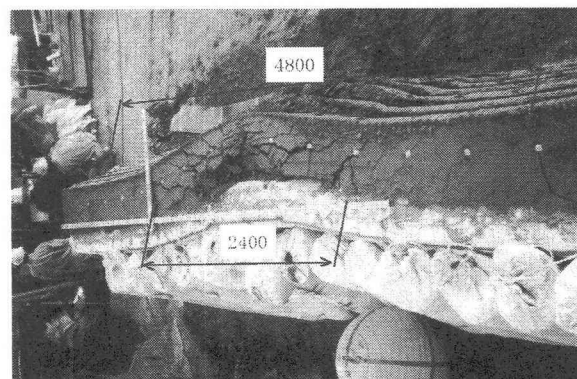


写真-2.4 破壊状況 D3

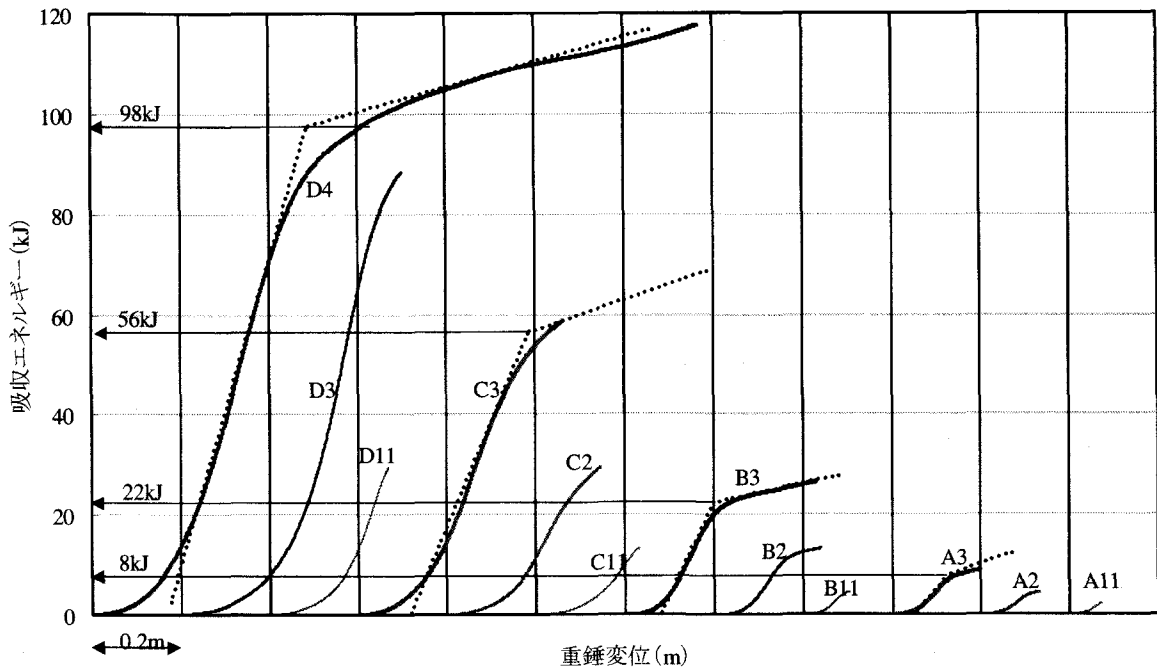


図-8 吸収エネルギー・重錘変位関係

衝撃荷重の分散は、写真-2 に示すように天端クラックおよび変形などの外観状況から、その範囲を判断することができる。構成する構造体が多くなるほど広がりを見せるが、いずれのタイプも変形範囲は補強材（ジオグリッド）の目地で、ここが弱部となっていることがわかる。

図-9 は、振動便覧の推定式による衝撃力と実験における重錘衝撃力について示す。ここでは、被衝突体のラーメの定数を 300, 500, 1000kN/m²と変化させた理論値を曲線で表している。ここで、実験では単位体積重量が異なる 2つの重錘を用いたことから、算出式も単位重量を考慮して算出している。この理論値に対し、実験値はラーメの定数が 300~500 kN/m²に近似することがわかる。一般に、サンドクッションなどに適用するラーメの定数は 1000 kN/m²程度である。このことから今回の供試体は、サンドクッションの一般的評価とは相対的に剛性（抵抗性、拘束性）が小さいことが確認できる。

5 あとがき

今回は、衝撃吸収性能を有する落石防護補強土擁壁の模型衝撃実験を行い、荷重特性および破壊挙動など耐衝撃性を確認した。また、破壊に起因する弱部などが判明し、今後の改良点を知ることができた。ここで得た実験データは、実物大形状への適用拡張のため、今後大いに活用できるものと考えている。

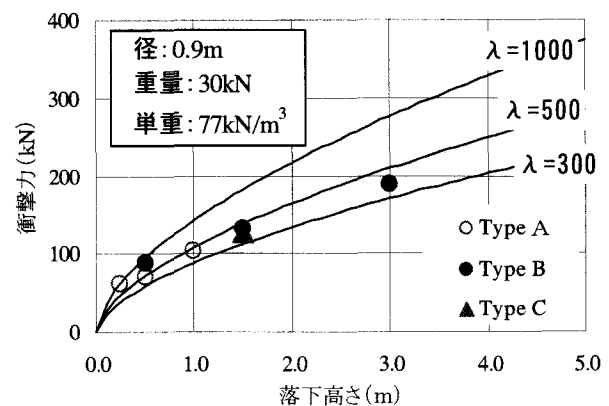
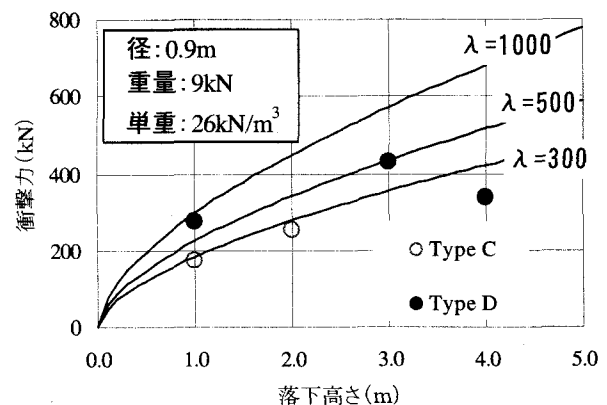


図-9 衝撃力の理論値と実験値

参考文献

- 1) 湊上他(1999), 落石防護補強土擁壁の開発について, 第23回日本道路会議
- 2) D. PEILA(2000), FULL SCALE TESTS ON GEOGRID REINFORCED EMBANKMENTS FOR ROCK FALL PROTECTION