

(36) 三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす裏面材料の影響

開発土木研究所
室蘭工業大学
室蘭工業大学
三菱油化パーディッシュ (株) ○遠藤 紘

中野 修
岸 徳光
松岡 健一

1. はじめに

落石覆道の頂版部には、落石衝撃力を緩和する目的で一般的に砂が敷かれているが、砂には緩衝効果に限界があり、荷重の分散がそれほど期待できないこと、死荷重が大きく覆道本体がトップヘビーになるため、地震時の安全性確保のために下部工が大がかりになること等、問題点の多いことが知られている。このため筆者らは、発泡スチロール (EPS) 材が高い衝撃吸収能力を持ち、軽量であることに着目し、これを緩衝材の一部に使用した三層緩衝構造実用化のための実験研究を平成2年度より実施してきており^{1),2)}、平成3年度には一般国道336号広尾町的美幌覆道において実証実験を行い、砂より優れた緩衝性能を有することを確認した³⁾。

三層緩衝構造の基本概念は、緩衝材+分散材+緩衝材の組み合わせであり、表材の敷砂で、ある程度弱められた衝撃力を芯材のRC版で広く分散させ (分散材)、さらに分散された衝撃力を裏材のEPS材で強度的、時間的に緩和するというものである。

三層緩衝構造の構成材料については、死荷重の低減目的もあり当初の実験で表裏層材ともにEPS材を用いた場合についても各層厚の問題を含めて検討したが⁴⁾、十分な緩衝効果を得るためには表材EPS材厚を非常に厚くしなければならないこと、裏材EPS材厚は50cm程度で十分であること等が分かった。荷重分散材としてのRC版についても平成4年度にコンクリート強度、鉄筋比等を変化させて実験を行い、その影響についての検討を行っており、これまでの実験研究から現在の砂+RC版+EPS材の三層緩衝構造についての基本構造をほぼ確立することができた。

三層緩衝構造の基本概念より推察すると、表裏材は弾性係数が小さく、衝撃吸収性能に優れた材料であることが条件である。表材に関しては、上記実験結果より敷砂を用いることが妥当であることが明らかになっている。裏材に関しては、EPS材の他に敷砂もその構成材料の1つとして条件を満足しているものと考えられる。

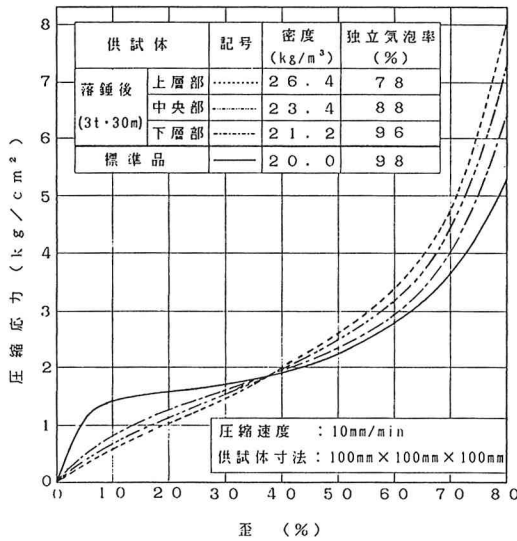
本論文では、三層緩衝構造の裏材に着目し、裏材としてEPS材と敷砂を取り上げ、野外大型実験を行って両者の緩衝性能に関する比較を行った。実験は、表材に50cm厚の敷砂、芯材として20cm厚のRC版を用い、裏材として50cm厚の敷砂およびEPS材を用いた場合について行っている。

2. EPS (発泡スチロール) の特性

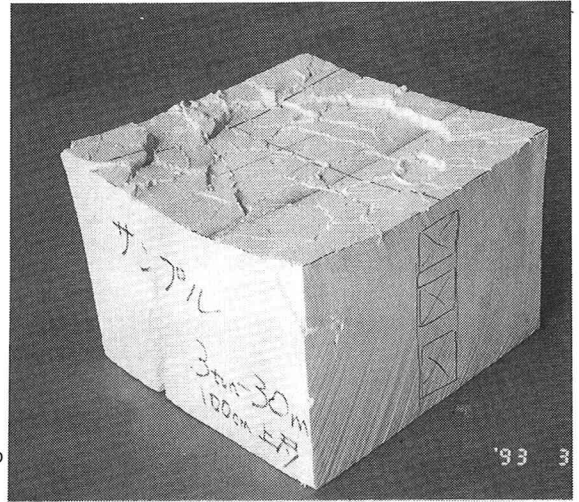
EPS (Expanded Poly-Styrol:発泡スチロール) は、スチレンモノマーを重合したビーズ状ポリスチレン樹脂にブタン等の発泡剤を含浸したものを加熱して軟化させ、発泡剤を気化させて発泡体としたものである。

EPSの力学特性はEPSの発泡倍率、言い換えると単位体積重量によって変化するが我々の一連の実験では単位体積重量 20kgf/m^3 のものを用いている。図-1に示すように、EPSが弾性的挙動を示す領域は、圧縮歪で1%程度以下ときわめて狭い。また、ポアソン比は歪が3~4%を越えると0.05以下と極めて小さい値となり、鉛直荷重に対して殆ど側圧が発生しないことが確認されている⁵⁾。

EPSは細かい独立気泡 (セル) の集合体であり、衝撃を受けるとそのセル壁が変形、破壊することによって衝撃を緩和するが、変形と破壊の程度は衝撃の強さに応じて異なる。実際に、三層緩衝構造の裏



図一 1 EPSの特性に及ぼす重錘衝撃の影響



写真一 1 落錘実験後のEPSブロック

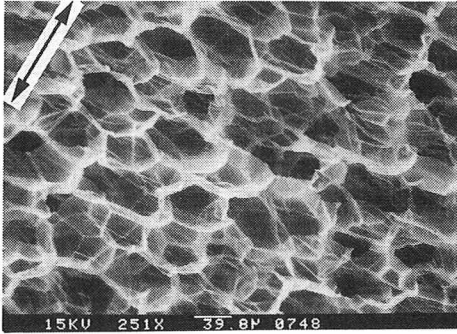
面材にEPS材を使用した場合に、実験後のEPS材のセル構造がどのような状態になっているかを調べる為に、美幌覆道における実証実験の中からサンプルを回収した。下部EPS材厚を100cm (50cm@2層)にした三層緩衝構造に重量3tの重錘を30mの高さから落下させた実験では⁶⁾、落下点直下の上層EPS材は、実験時に押しつぶされてからある程度回復し、RC版撤去後には最終的に初期の厚みより130mm押しつぶされた370mmとなった(写真一1)。

上記EPS材の上層40mm、下層10mmを除いた残りの部分の上、中、下の3カ所から100mm角の供試体を切り出して圧縮応力を測定した結果を、密度、独立気泡率と共に図一1に示す。ここで、独立気泡率とは、試料の表面へ連通しているセルが占める部分以外の容積分率であり、その測定には、ベックマン社製のエアークンパソピクノメーターを用いた。また、独立気泡の測定と次に示すセルの電子顕微鏡写真(写真二2)の撮影には、切り出した残りの部分を用いた。尚、写真中の矢印は実験時のEPS材の上下方向を示している。

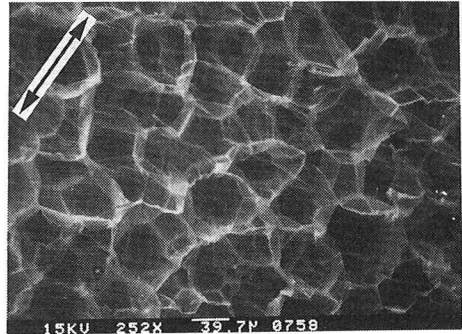
重錘落下に伴う変形は塑性領域の大変形であるため、EPS材は回復不能な変形によりその厚みを減じ、図一1中の表に示すように、密度が増加していることが分かる。また、セルの破壊に伴う独立気泡率の減少も認められるが、局所圧縮であるため衝撃力はEPS内部で分散緩和されており、密度の増加と独立気泡率の減少の程度は下層部ほどその影響が少なくなっていることが分かる。セルの変形も、標準品との比較から明かなように、同じ理由により、下層部ほど影響が少なくなっており、変形量が少ないことが分かる(写真二2参照)。

このような、衝撃によるセル構造の変化を反映して、落錘後のEPS材の圧縮応力データでは、図一1に示すように初期弾性率は低下しているが、残留変位を無視しても、その応力-歪曲線は標準品とほぼ同様な傾向を示しており、このことは一回の衝撃によって衝撃吸収能力が消滅するものではないことを示している。

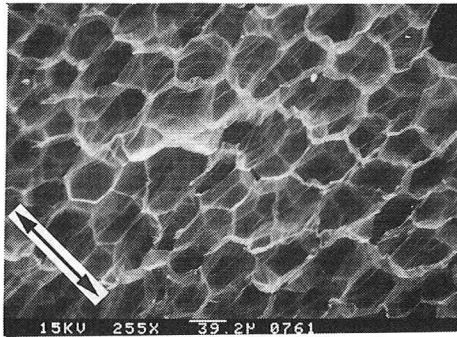
以上のように、EPS材が独立気泡よりなる構造体であり、変形を起こし易く、また、衝撃による変形、破壊が上部より連続的に進行し、応力を分散することや、繰り返し载荷にも緩衝機能が消滅しない等の特性を持つことが敷砂と大きく異なる点であり、EPS材が緩衝材として優れている理由と思われる。



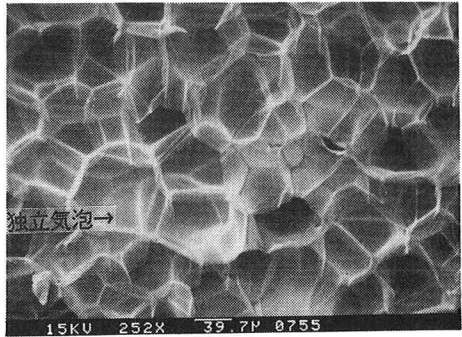
(1)上層部



(3)下層部



(2)中央部



(4)標準品

注) 写真中の矢印は実験時のEPS材の上下方向を示す。

写真-2 EPS材のセル断面写真

3. 実験概要

3.1. 実験方法

実験は、図-2に示すような剛基礎上の、L形擁壁に囲まれた4m四方の実験施設内に三層緩衝構造を設置し、その中央部に重量3tfの重錘（直径100cm、高さ97cm、R=80cmの球底）を所定の高さより自由落下させることによって行っている。重錘内部には、容量200Gおよび500Gの加速度計を各2台取付けており、重錘の加速度波形を測定できるようにしている。また、剛基礎上には容量 100kgf/cm^2 （受圧面の直径32mm）の衝撃用ロードセル 39台を10cm間隔で1列に設置し、緩衝材底部に伝達される衝撃応力を測定した。尚、実験ケースは表-1に示すとおりであり、三層緩衝構造の層厚は、全ケースとも上部よりそれぞれ50cm、20cm、50cmである。

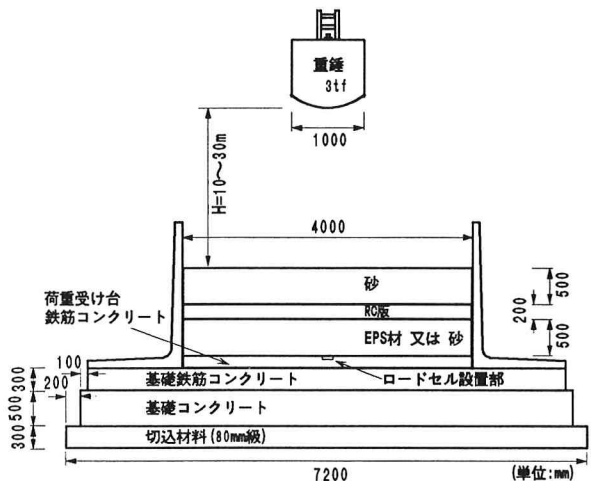


図-2 衝撃実験の概要

3.2. 使用材料

三層緩衝構造に使用した敷砂材は、単位体積重量 1.609gf/cm^3 、絶乾比重2.59、均等係数 $U_c=5.72$ 、曲率係数 $U'_c=0.86$ の栗丘産砂である。敷砂材は20cm毎に平均的に踏み固めを行い、所定の厚さとしている。また、実験時の含水比および相対密度は平均でそれぞれ5.3%、54.3%であった。

荷重分散材として使用したRC版は、寸法395cm×395cm×20cm、鉄筋比1% (D13@80mm) の複鉄筋RC版である。実験時のコンクリート強度は平均で225kgf/cm²であった。

EPS材は、単位体積重量20kgf/m³のもので寸法200cm×100cm×50cmのブロックを組み合わせて使用している。

3.3. 計測およびデータ処理システム

実験に用いた計測およびデータ処理システムのフローチャートを図-3に示す。各センサーからの出力はデータレコーダーに一括収録した後、オフラインでデジタルメモリーを用いて設定時間軸に拡大し、A/D変換した後コンピュータ処理を行っている。

表-1 実験ケース一覧

緩衝材構成	落下高
砂+RC版+EPS材	10m
	20m
	30m
砂+RC版+砂	10m
	20m
	30m

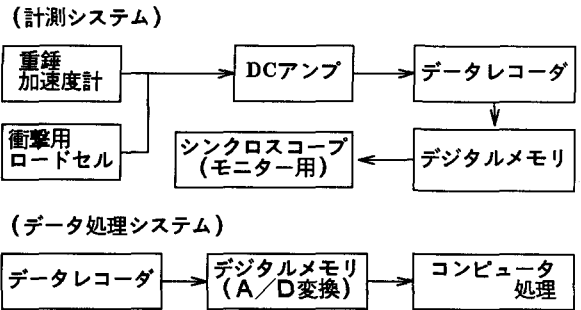


図-3 計測、データ処理のフロー図

4. 実験結果

4.1. 重錘加速度、ロードセル応力の応答波形

各実験ケースの重錘加速度波形と中心部のロードセル応力波形を図-4に示す。

加速度波形について検討を行うと、裏材がEPS材の三層構造では、重錘衝突初期の急激な立ち上がりの後、最大値に達しており、その後最大値の約1/2の加速度がある程度持続し、やがて零に減じている。重錘衝突から最大値が発生するまでの時間は、落下高が高くなるにしたがって多少短くなっており、落下高30mでは約11msecとなっている。また、波動の継続時間は、70msec前後である。

次に、裏材が砂の三層構造についてみると、加速度波形は大きさの多少異なる2つの極値をもつ波形となっている。第1極値の発生時間は、落下高の増加と共に短くなっており落下高30mでは約10msecとなっている。また、波動の継続時間も同様の傾向を示しておりその値は裏材がEPS材の場合の約1/2となっている。

一方、ロードセルの応力波形は、裏材がEPS材の場合には、その波形形状は加速度波形と異なっており、重錘衝突初期に鋭く立ち

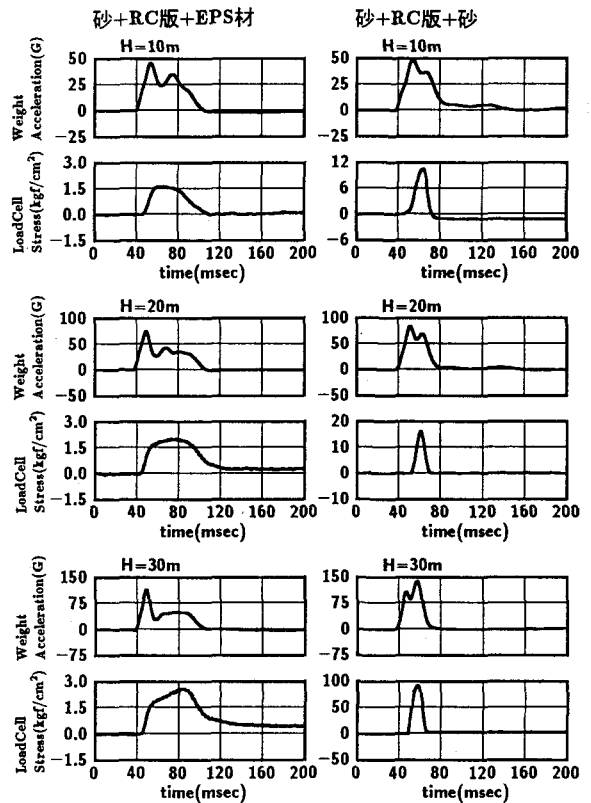


図-4 重錘加速度およびロードセル応力波形分布

上がった後、緩やかにピーク値を迎え、ほぼ台形状の波形分布となっている。また、裏材が砂の場合には、加速度波形に見られた第2の極値がなくなり、重錘衝突後に鋭く立ち上がる正弦半波状の波形となっている。

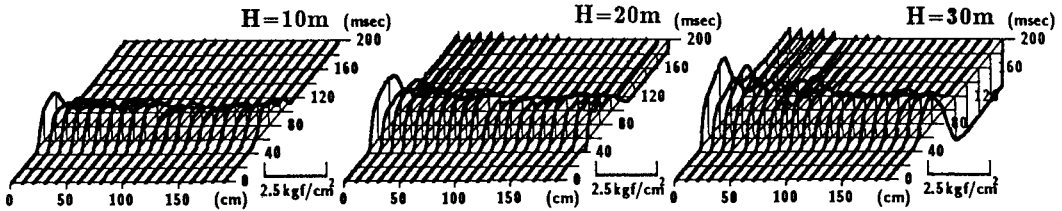
4.2. 伝達応力の分散性状

各実験ケースにおけるロードセルの応力波形を三次元的に表したものを図-5に示す。図中、横軸は重錘落下中心点を原点にとった場合のロードセル位置を、奥行き方向が時間軸を示している。

裏材がEPS材の場合では、落下高の増加と共に重錘落下点近傍の応力が多少大きくなっているが伝達応力はRC版の範囲にほぼ均等に分散されており 2kgf/cm^2 前後の衝撃応力が等分布荷重的に作用していることが分かり、荷重分散材としてのRC版が効果的に作用していることが分かる。

一方、裏材が砂の場合には落下高の増加とともに分散範囲は狭くなる傾向にあり、応力の載荷形状も重錘落下点から離れるに従い指数関数的に減少する集中荷重的な載荷状態となっている。この応力分布は、砂単層の場合とほぼ同じであり裏材を砂にした場合の三層構造ではRC版による荷重分散効果が期待できないことが分かった。

砂+RC版+EPS材



砂+RC版+砂

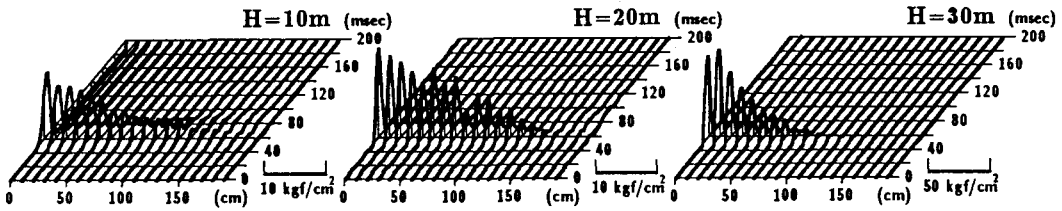


図-5 ロードセル応力分布

4.3. 重錘衝撃力と伝達衝撃力

図-6は、重錘衝撃力(実線)とロードセル応力を用いて算定した伝達衝撃力(破線)の時間的変動を示したものである。重錘衝撃力は重錘加速度(G)に重錘重量を乗じたものであり、伝達衝撃力は基部への伝達応力が軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いて応力を集積したものである。

裏材がEPS材の場合、伝達衝撃力は、重錘衝撃力より10msec程度遅れて立ち上がっており、その形状は台形状の分布となっている。最大値の発生時間は重錘衝撃力の

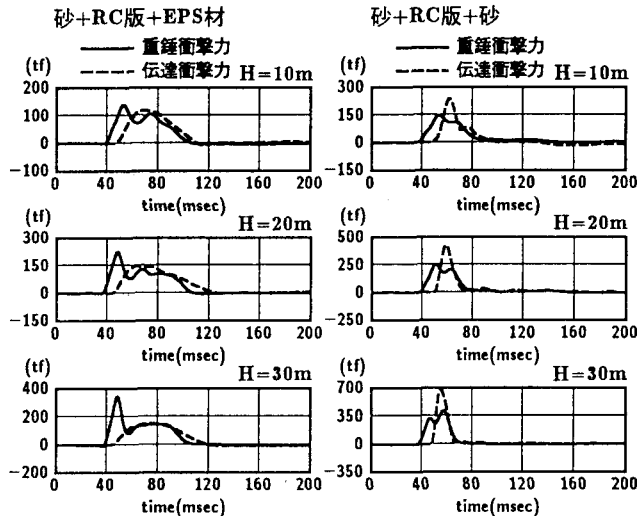


図-6 重錘衝撃力および伝達衝撃力の時間変化

最大値よりも20msec程度遅れて発生しており、またその大きさは重錘衝撃力よりも小さく、その減少率は落下高の増加と共に大きくなっている。これは、落下高が大きくなるとRC版の変形によるエネルギーの吸収量が大きくなるためと思われる。

一方、裏材が砂の場合には、伝達衝撃力は重錘衝撃力より10msec程度遅れて立ち上がっており、その形状は重錘衝撃力波形の第2極値が第1極値に吸収された様な正弦半波状の分布となっている。最大値の発生時間は重錘衝撃力の第1極値より10msec程度遅れて生じており、その値は重錘衝撃力よりも60%程度大きくなっている。

4.4. 最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力

全実験ケースの最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力を図-7に示す。

最大重錘衝撃力に着目すると、二種類の三層緩衝構造は共に落下高の増加に比例して大きくなっており、振動便覧式のラーメ定数を $\lambda=200tf/m^2$ として算出した衝撃力に近い値を示している。これは二種類の三層緩衝構造の表材が共に砂であり最大重錘衝撃力が重錘衝突初期の砂への貫入抵抗によって発生するためと思われる。ここで、裏材がEPS材の場合の最大重錘衝撃力が砂の場合に比較し多少小さくなっているのは、裏材のEPS材の変形量が砂より大きいためによるものと思われる。

次に、最大伝達衝撃力に着目すると、裏材が砂の場合には、落下高の増加と共に直線的に増加しており、最大重錘衝撃力の約1.6倍の大きさとなっている。

一方、裏材がEPS材の場合には、落下高10mで最大重錘衝撃力とほぼ同じ値であるがそれ以降は落下高の増加による最大伝達衝撃力の変化はほとんど見られない。

表-2は、実験終了後のRC版とRC版撤去後のEPS材表面の最大沈下量を示している

が、裏材がEPS材の場合のRC版変形量は、砂の場合の変形量に比較し非常に大きくなっているがEPS材のひずみ量は1.8%~33.7%であり、前述のEPS材の応力-ひずみ曲線からも分かるように応力があまり変化しない範囲にあることが伝達衝撃力が変化しない理由の一つであると思われる。

4.5. RC版の破壊性状

写真-3は、二種類の緩衝材の落下高30mの実験後のRC版の破壊状況である。裏材がEPS材の場合には重錘貫入による押し抜きによりRC版表面に直径1m程度のくぼみができ放射状のひび割れが多数見られる。また、裏面は直径1.8mほどの円形状にコンクリートが押し出され放射状のひび割れが多数発生している。

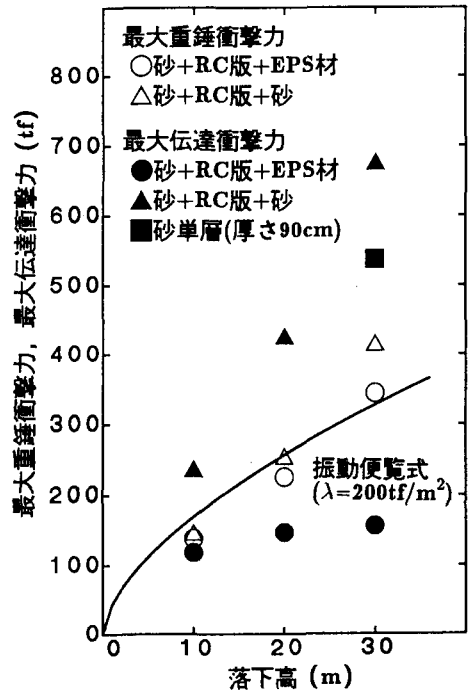


図-7 最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力
表-2 実験後のRC版とEPS材の変形量

緩衝材構成	落下高	RC版の変形量	EPS材の変形量
砂+RC版+EPS材	10m	1.40cm	0.90cm(1.8%)
	20m	11.90cm	8.90cm(17.8%)
	30m	23.05cm	16.86cm(33.7%)
砂+RC版+砂	10m	1.30cm	
	20m	2.85cm	
	30m	5.45cm	

一方、裏材が砂の場合では、RC版表面は同心円状のひび割れが多少入る程度であり、押し抜きによる陥没は見られない。また裏面についても放射状のひび割れが多数発生しているものの、コンクリートの押し出し等は生じていない。これは、砂がEPS材に比較し剛性が大きく局所的な変形を起こしにくいためと思われる。

5. まとめ

三層緩衝構造の基本概念より、砂+RC版+砂よりなる三層緩衝構造を考え、従来より提案している砂+RC版+EPS材の三層緩衝構造との緩衝性能を比較するための実験を行った。本実験より得られた結果を要約すると、

・裏材をEPS材にした場合（従来構造）：

- 1) 伝達応力はRC版の大きさと同じ範囲にばらばらに分散され等分布荷重的に載荷される。
- 2) 最大伝達衝撃力は、EPS材の緩衝特性により落下高の増加による変化がほとんどない。

・裏材を砂にした場合：

- 1) 伝達応力の分散範囲は狭く集中荷重的に作用する。
- 2) 最大伝達衝撃力は落下高の増加と共に直線的に増加し、重錘衝撃力の約1.6倍となった。
- 3) RC版の変形量は裏材にEPS材を使用した場合より小さい。

以上の結果から、砂+RC版+砂よりなる三層緩衝構造は、裏材の剛性が大きく評価され、変形性能が小さくなることから砂単層の緩衝特性よりも悪い結果を示し、緩衝材には不向きであることが明らかになった。また、裏材としてEPS材を用いる場合には、EPS材は変形性能に富み、緩衝材として理想的な力学特性を持つことから、砂+RC版+EPS材よりなる三層緩衝構造の優れた緩衝効果に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 中野 修, 今野久志, 松岡健一, 西 弘明: 芯材をRCスラブとした場合の三層緩衝構造の緩衝特性, 土木学会北海道支部論文報告集, 第48号 / I -30
- 2) 中野 修, 岸 徳光, 松岡健一, 後藤雪夫: 衝撃荷重測定用ロードセルの試作, 土木学会論文集, No.453 / VI-17, pp.155~161, 1992.9
- 3) 中野 修, 今野久志, 金子 学, 岸 徳光: 美幌覆道における重錘落下衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第48号 / I -51
- 4) 中野 修, 今野久志, 金子 学, 小野裕二: EPSの落石覆工緩衝材への適用について, 第45回建設省技術研究会, 平成3年11月
- 5) 発泡スチロール土木工法開発機構: 材料マニュアル (第2版), 平成2年12月
- 6) 中野 修, 今野久志, 岸 徳光, 松岡健一: 各種緩衝構造を用いた落石覆工の実証実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第49号 / I -42

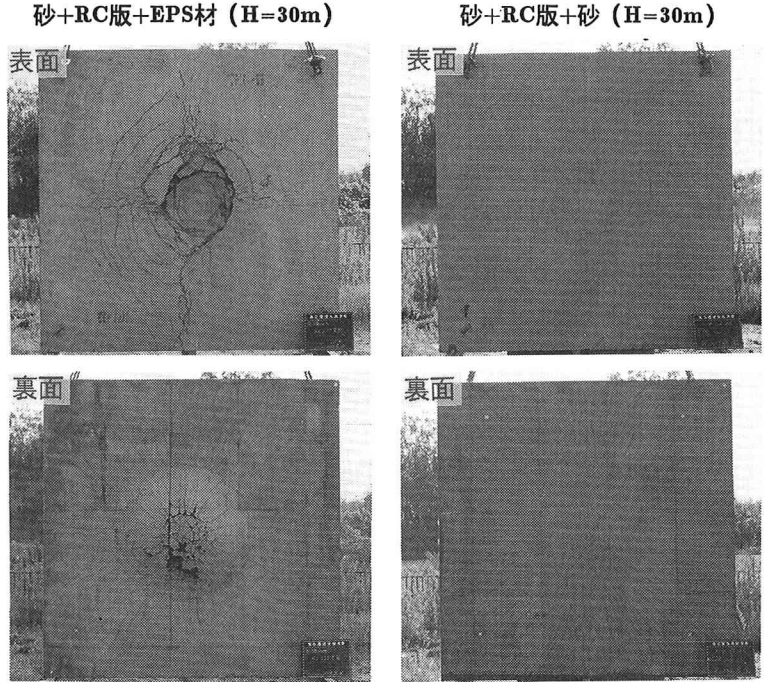


写真-3 RC版の破壊性状