

I-41

敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型実験

開発局開発土木研究所	正員	佐藤	昌志
開発局開発土木研究所	正員	西	弘明
開発局開発土木研究所	正員	佐藤	京
室蘭工業大学	正員	松岡	健一

1.はじめに

海岸部や山岳部の落石等の災害の恐れがある急峻な地域を通過する道路網には、落石防護工等の対策が行われ、安全で安定した交通サービスの確保や落石等の災害から人命の損失を防いでいる。この対策を行う場合、落石規模が大きいと予想される場合は、落石覆工を設けていることが多いようである。落石覆工の屋根部には、落石等の衝撃力が直接構造物に加わらないように緩衝材として、一般に敷砂を設けている。この敷砂の緩衝効果については、過去より様々な研究機関により研究が行われてきており^{2)~6)}、設計時に用いる衝撃力の算定の基礎資料となっている。しかしながら、この緩衝材に用いられる敷砂の物理的特性は使用する砂ごとに異なり同じ砂においても常に一定ではなく含水比や締固め度により大きく異なってくる。これら砂の特性の違いにより緩衝性能も異なってくると考えられるが、現行設計においては、落石対策便覧¹⁾に緩衝工としての砂の土質規定がなされていないため、実設計で用いられている砂等の緩衝性能が明確には把握できない。したがって、砂の土質特性と衝撃力の関係を明らかにすることが今後の合理的な落石覆工の設計に必要なものと考えられる。

そこで本論文では、敷砂緩衝材について、実際の施工を想定し粗粒率や含水比、また、締固め度を変化させた場合の実規模屋外実験を行い、これらが敷砂材の緩衝性能に及ぼす影響について検討した。

2.実験の概要

2.1.実験方法

実験施設の概要を図-1に示す。実験は約7m四方の鉄筋コンクリート剛基礎上に敷厚90cmの緩衝砂を設置し、その中心部に重量3tfの重錘（直径100cm、高さ97cmで底部は球状である。）を所定の高さから自由落下させて行っている。なお、重錘落下時に側壁から生じるであろう衝撃拘束を解消するために弾塑性体のEPS(Expanded Poly-Styrol)材を側壁として約4m四方に設置している。

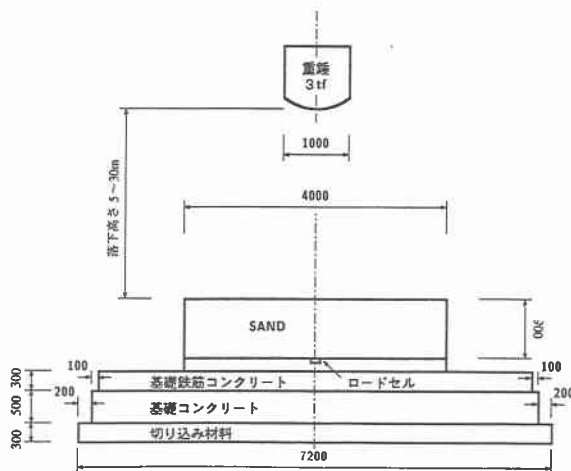


図-1 実験施設

重錘には容量200G~500Gのひずみゲージ型加速度計を取り付け、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、敷砂底部の衝撃応力を測定するために中心線に沿って、10cm間隔で衝撃応力測定用のロードセルを設置している。

Impact Test with Absorbring Effect of Sand Cushion

by Masashi SATOH, Hiroaki NISHI, Takashi SATOH, Ken-ichi MATSUOKA

2.2.実験ケース

本実験では、栗丘産と山口樽川産の産地の異なる2種類の砂を敷砂緩衝材として用いている。栗丘産は平均粒径および粗粒率が大きいので粗砂とし、山口樽川産を細砂としている。表－1に各砂の物性値を、図－2に粒度分布を示す。

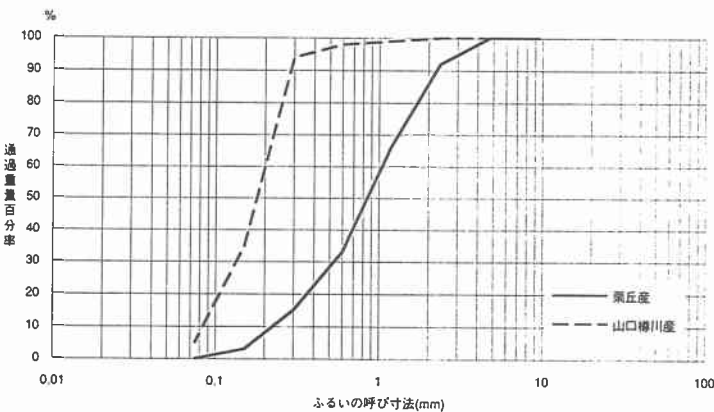
本実験は、敷砂の土質特性の違いによる緩衝効果を比較検討するために敷砂の粗粒率や締固め度、含水比を変化させた場合について行っている。

粗粒率の相異は産地で区別し、締固め度や含水比は、過去の実験で用いられている栗丘産の粗砂を用いて変化させ、その影響を検討した。含水比は、基本となるケースS90で約5%であり、

散水を行ったS90Wは約3%の増加で約8%となっている。なお、含水比は他のケースでも実験直前に1ケース当たり3点で、ポン抜きを行い、算出している。敷砂材の締固めは、足踏み及びタンパーを用いて行っている。S90Tのケースがタンパーを用いたもので、道路土工要綱にある路床の締固め方法に従い、1層の仕上がり厚が20cm以下となるように、均質に締固めを行っている。その他のケースでは、砂厚20cm毎に平均的に足踏みによって締固めを行っている。表－2に実験ケースを示す。ケースの記号は、S90が敷砂厚を表わし、fが山口樽川産の細砂を、Wが含水比を高めたもので、Tがタンパーによる締固めを行ったものを示している。なお、敷砂緩衝材の厚さは全てのケースで90cmで、重錘の落下高さは5m間隔で最大30mまで行っている。

表－1 敷砂材の試験結果

産地	呼び名	絶乾比重	吸水率 %	均等係数	平均粒径 D ₅₀ mm	曲率係数 U _c	粗粒率 U _c '
栗丘	粗砂	2.55	1.64	4.85	0.85	0.87	2.91
山口樽川	細砂	2.46	3.42	2.38	0.18	1.01	0.74



図－2 粒度分布図

表－2 実験ケース

実験ケース名	敷砂産地	敷厚 (cm)	重錘重量 (tf)	落下高さ (m)	実験時の平均含水比(%)	平均相対密度 (kg/cm ³)	備考
S90	栗丘	90	3	5～30	5.4	49.4	粗砂
S90f	山口樽川	90	3	5～30	22.5	63.9	細砂
S90T	栗丘	90	3	5～30	5.4	66.8	タンパー使用
S90W	栗丘	90	3	5～30	8.2	52.4	散水

3.実験結果および考察

3.1.伝達衝撃応力の分布性状

図-3は、上記で示した各実験ケースに対して剛基礎上に設置しているロードセルより得られる伝達衝撃応力の3次元分布波形を示している。横軸に載荷点中心部からの距離を、奥行き方向に時間を、縦軸に応力をとっている。なお、ここには落下高さ30mの結果のみ示している。

各ケースについて、それぞれ検討すると、まず粗砂であるS90の分布は、載荷点より30～40cmまで大きな値を示しているが、それより離れると急激に応力が減少している。大きな応力が見られる範囲は、ほぼ重錘の半径と等しくなっている。落下高さ30mのときの最大伝達衝撃応力は約88.6kgf/cm²である。

次に含水比を大きくしたS90Wについて考察すると、応力の発生傾向や載荷点近傍で発生している応力もほぼS90と同じであり、応力の分布についても載荷点より30～40cmまでは大きな値を示すなど同じ傾向にある。したがって、含水比を高くしたものは、基本ケースとほぼ同じ分散性能であると考えられる。このときの伝達衝撃応力の最大値は、約83.4kgf/cm²であった。

細砂であるS90fの応力の発生状況や分布についても、基本ケースとしているS90およびS90Wと同様な傾向を示しており、載荷点より30～40cm程度に大きな応力が発生している。しかし、載荷点近傍で発生している最大応力は前2ケースと異なり、かなり低いものとなっている。すなわちS90とS90Wが85kgf/cm²前後の値を示しているのに対し、細砂の場合には、46.7kgf/cm²と大きく低下している。このことから、細砂は応力分布の傾向は基本ケースと同じであるが落下高さが大きくなっても載荷点に発生する応力が急激に増加せず緩衝効果が大きいと考えられる。

ケースS90Tのタンパーを用いて締め固めを行ったものも、載荷点部に応力が集中していることや、載荷点から30～40cmより離れた地点では応力が急激に減少するという傾向は同じである。また、落下高さ30mのときの最大応力も84.6kgf/cm²とS90やS90Wと同じような値であった。

以上より、伝達衝撃応力の分布はいずれのケースも載荷点中心部に集中し、その分散幅は重錘の半径である50cm程度と考えられる。また、応力の最大値は細砂を用いたものが最も小さく緩衝効果がより優れているということがいえる。

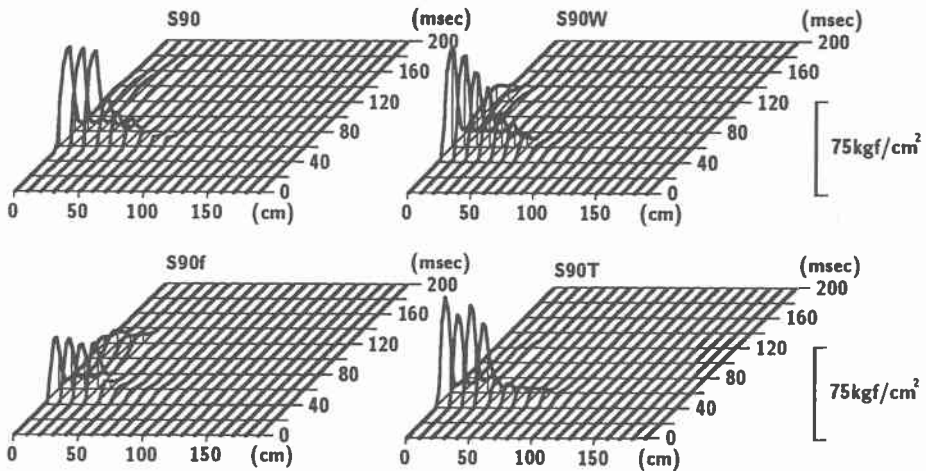


図-3 伝達応力の3次元分布波形

3.2.重錘衝撃力および伝達衝撃力の経時変化

図-4には、各ケースについて落下時の重錘に生じる加速度から算定した重錘衝撃力と剛基礎に発生している伝達衝撃応力の総和として与えられる伝達衝撃力の経時変化を示した。なお、ここでも落下高

さ30mの結果のみ示している。

S90では、重錘衝撃力波形は衝突とともに立ち上がり、その後、約10msecでわずかな初期のピークを示している。しかし、その後、底面からの反射を受けて衝撃力はさらに大きくなり、約20msecで最大値を示している。さらにその後は急激に減少し、継続時間約50msecで終了している。これに対し、伝達衝撃力波形は重錘衝撃力波形から約10msec程度遅れて立ち上がり、急激に増加し、重錘衝撃力と同時に最大値に達し、その後は重錘衝撃力波形と同様に減少している。継続時間は立ち上がりの遅れた分だけ短いようである。この場合、最大値で比較すると伝達衝撃力は重錘衝撃力の約1.3倍程度大きな値となっている。

次に含水比を大きくしたS90Wについてみると、基本ケースのS90と同様の傾向を示していることが分かるが、両波形とも立ち上がりと減衰がS90と比べ、急激になっているようである。また、最大値で比較すると重錘衝撃力はS90より小さいが伝達衝撃力はS90よりかなり大きい。この場合、伝達衝撃力の最大値は重錘衝撃力の約1.7倍程を示している。

これに対し、S90fは伝達衝撃力がやや遅れて立ち上がるものの両波形ともほぼ同様の傾向を示している。すなわち、重錘衝撃力波形はS90、S90Wのようにはっきりした初期のピークを示さず、急激に立ち上がり、約20msec後に最大値を示している。その後、急激に減衰し零となった後、さらに小さな第2ピークを示し、全体の継続時間約100msecで終了している。伝達衝撃力波形も同様である。また、この場合、それぞれの最大値もほぼ同じ値となっている。

図-3に示した伝達衝撃応力では、載荷点中央の最大値は、S90fの方がS90の約1/2とかなり小さな値を示していたが、伝達衝撃力で比較しても約2/3の値となっている。伝達衝撃応力と伝達衝撃力の最大値がともに粗砂より細砂が小さいことは、細砂の方が緩衝性能に優れていることを示していると考えられる。

伝達衝撃応力で大きな値を示したS90Tについて検討すると、このケースも伝達衝撃力がやや遅れて立ち上がるものの両波形はほぼ同時刻にピークを示している。また、重錘衝撃力の最大値を他のケースと

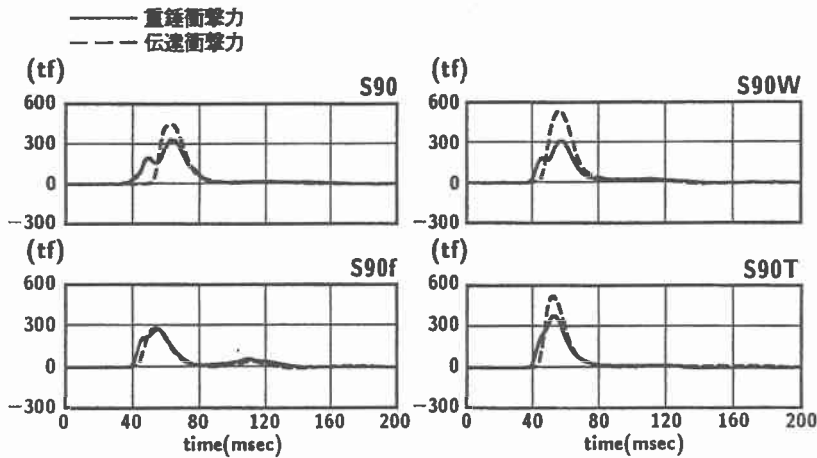


図-4 重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形

比較すると最も大きな値となっている。しかし、伝達衝撃応力の最大値は、S90より大きいもののS90Wと同程度であり、重錘衝撃力に対する伝達衝撃力の倍率は1.3程度である。

この実験範囲ではS90fを緩衝材として用いた場合、他のケースよりも緩衝効果が良好であることを再確認できた。また、S90Tのように締固め度を増すと、覆工本体に加わる伝達衝撃力が他のケースより大

きい値となるとともに載荷点部に発生する応力が大きく、応力集中を起こしやすいことが考えられる。

3.3.最大衝撃力

衝突速度と最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力の関係を図-5に示す。(a)図には重錘衝撃力を示した。各ケースの実験結果を衝突速度毎に示すとともに振動便覧式による衝撃力を $\lambda=100, 200, 500 \text{ tf/m}^2$ に対して算出した値を示した。各ケース毎に実験値を考察すると、S90とS90Wは多少ばらつきはあるものの各衝突速度に対して全体的に同じ傾向を示している。振動便覧式と比較すると衝突速度が小さい範囲では $\lambda=100 \text{ tf/m}^2$ の値に近く、衝突速度が大きい範囲では $\lambda=200 \text{ tf/m}^2$ に近い値を示している。これに対してタンパーで締固めたS90Tと細砂S90fは前者と多少異なる傾向を示している。すなわち、S90Tはいずれの衝突速度に対しても大きな値を示し、振動便覧式と比較すれば、 $\lambda=200 \text{ tf/m}^2$ より大きな値を示している。また、S90fの場合は、衝突速度が小さい範囲では、S90と同程度の衝撃力となっているが、衝突速度の大きな範囲では最も小さい衝撃力を示している。低速度衝突では各ケースの衝撃力の差は大きくはないが高速度衝突時に特徴が示されていることが分かる。ここで用いた粗粒率の小さなものは含水比が大きいことから相対密度は大きい均等係数も小さく、空隙率は大きいことが予想され、緩衝効果が大きいものと考えられる。粗砂を用い、タンパーを使用したものは含水比が小さいものの相対密度が大きく、かなり締固められており、剛性が大きいことから、最も大きな衝撃力を示したものと考えられる。

(b)図は伝達衝撃力を同様に示したものである。伝達衝撃力は重錘衝撃力に比べて変動が大きいと同様の傾向が見られる。まず、S90の場合は重錘衝撃力に比べ、1.3~2.0倍の大きさを示し、振動便覧式の $\lambda=500 \text{ tf/m}^2$ に近い値を示している。含水比の大きなS90Wは20 m/sec以下の低速では、S90よりも小さく高速度では大きな値となっている。振動便覧式と比較すると低速度では $\lambda=200 \text{ tf/m}^2$ の値に、高速度では $\lambda=500 \text{ tf/m}^2$ の値に近い。一方、S90Tでは、伝達衝撃力も最も大きい、重錘衝撃力と比べると約1.3~1.5倍の値となっている。振動便覧式と比較すると $\lambda=500 \text{ tf/m}^2$ より大きな値を示

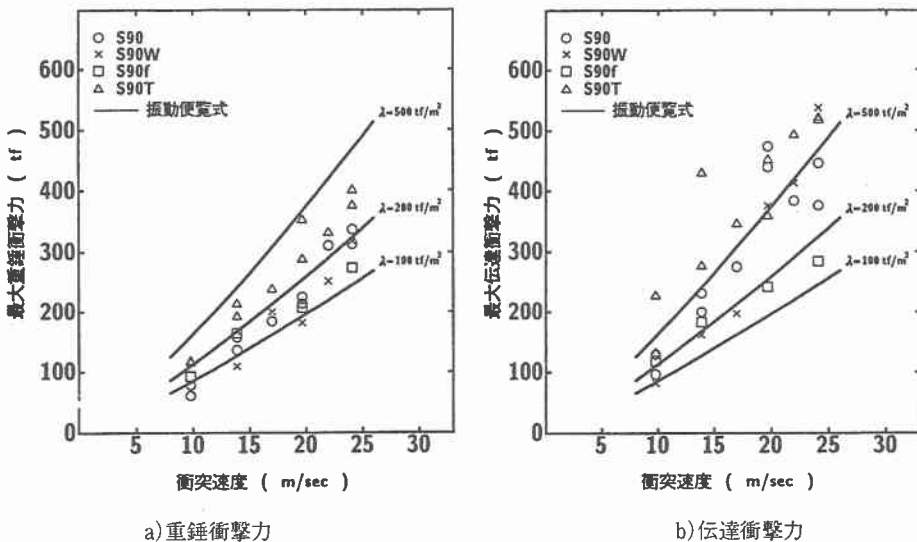


図-5 最大衝撃力と衝突速度の関係

している。また、S90fの場合はやはり全体として最も小さく、振動便覧式の $\lambda=200 \text{ tf/m}^2$ の値に近い値となっている。重錘衝撃力と比較しても1.0~1.3倍程度となり、他のケースより小さな倍率となって

いる。伝達衝撃力の全体的な傾向を概観すれば、S90とS90Wは、ほぼ同程度であり、この程度の含水比の変化でははっきりした傾向は現れないと考えられる。これに対して、S90Tは、S90に比べて2割程度大きく、締固めの影響が現れている。また、S90fはこれらの中では最も小さな伝達衝撃力を示している。このことから、この程度の衝撃力に対しては、粗粒率の小さなものが緩衝効果が大きいことが分かる。

4.まとめ

敷砂の土質特性が緩衝性能に及ぼす影響を検討するために、粗粒率や含水比の異なるもの、また、締固め方法を変えたものを用いて実規模の大型実験を行った。敷砂の物理的特性は、使用する砂ごとに異なると予想されるが、この実験の範囲で分かったことを以下にまとめる。

- 1)全てのケースにおいて、載荷点より30～40cm程度の範囲に大きな伝達衝撃応力が生じている。また、この範囲より離れると急激に応力が減少している。
- 2)全てのケースにおいて、最大重錘衝撃力より最大伝達力の方が大きい値を示している。特に、S90のケースでは、平均して約1.7倍程度と大きな値であった。
- 3)S90とS90Wでは、重錘衝撃力に有意な差は見られなかった。伝達衝撃力でも速度による変化はあるが全体として、はっきりとした差は見られない。
- 4)締固め度が高い場合は、低いものよりも大きな重錘衝撃力および伝達衝撃力が生じている。しかし、粗粒率の低い砂で含水比が高い場合には、締固め度が高くても重錘衝撃力や伝達衝撃力が低下している。
- 5)この実験においては、相対密度の大きな細砂を用いた場合、他のケースよりも良好な緩衝効果が見られた。

参考文献

- 1)日本道路協会；落石対策便覧，1983.7.
- 2)鋼材倶楽部；新しい落石覆いの開発に関する研究，鋼材倶楽部研究報告，1973.4.
- 3)中野 修，松岡健一，岸 徳光，金子 学，尾山靖史；敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力，土木学会北海道支部論文報告集，第48号，PP.161～166,1992.2.
- 4)三上敬司，中野 修，岸 徳光，松岡健一；重錘衝撃を受ける敷砂材のラーメ定数の推定，土木学会北海道支部論文報告集，第49号，PP.205～210,1993.2.
- 5)吉田 博，榎谷 浩，岡 衛；落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について，土木学会論文集，第362号，PP.461～470,1985.10.
- 6)岸 徳光，佐藤昌志，西 弘明，佐竹利治；敷砂緩衝材の緩衝性能に及ぼす均等係数の影響，土木学会北海道支部論文報告集，第50号，PP.78～83,1994.2.