

重錘衝突を受ける敷砂・砕石緩衝材の密度変化

Deformation behavior of sand and gravel cushion against falling mass impact

名古屋工業大学大学院

名古屋工業大学

土木研究所寒地土木研究所

土木研究所寒地土木研究所

克蘭工業大学

○学生会員

正会員

正会員

正会員

正会員

内藤直人 (Naoto Naito)

前田健一 (Kenichi Maeda)

山口悟 (Satoru Yamaguchi)

西弘明 (Hiroaki Nishi)

栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期を中心に整備されてきた土木構造物の長寿命化が重要課題の一つである。これは、落石防護工においても例外ではなく、劣化などにより構造物自体の安全性の低下に加えて、近年の気象変動に伴う集中豪雨の増加などによる斜面の経年劣化に伴う落石規模の拡大により、落石防護工としての安全余裕度の低下が大きな問題となっている。

落石防護工の一つには、敷砂緩衝材を設置したロックシェッドがある。敷砂緩衝材は、落石衝撃力の緩衝効果に優れるだけでなく、低コストで設置ができ、腐食や劣化が生じ難いことから材料としての安定性に優れている。しかし、その緩衝効果は未だ十分に把握されておらず、既設ロックシェッドを合理的に維持管理するために、敷砂緩衝材の性能評価を可能にすることが急務である。また、現在のロックシェッドの設計は許容応力度設計法により行われており、終局状態を踏まえた性能照査型設計に移行するためにも、敷砂緩衝材の緩衝効果を適切に評価する必要がある¹⁾⁻³⁾。

そこで、本研究では、敷砂緩衝材を設置した実規模 RC 製ロックシェッドに対する重錘落下衝撃実験と大型緩衝材実験装置を用いた大型敷砂緩衝材衝撃実験を実施し(図-1)、シンウォールチューブ、衝撃加速度計、RI 測定器を用いた 3 種類の地盤密度測定法により、重錘落下による緩衝材の変形挙動の把握を試みた。さらに、現象を高速度カメラで撮影することで、従来見逃されていた瞬間的な挙動を観察した。

なお、本研究では、我が国で普及している敷砂緩衝材に加えて、欧米諸国においてロックシェッドの緩衝材として用いられる砕石についても実験を実施したので、併せて報告する。



図-1 供試体；(左側)：実規模 RC 製ロックシェッド，
(右側)：大型緩衝材実験装置

2. 実験概要

地盤密度測定では、3 種類の地盤密度試験を実施した。シンウォールチューブでは、φ75mm で高さ 150mm の真鍮製円筒(図-2(a))を用いて、定体積条件で地盤採取することで密度を測定した。衝撃加速度計には、土木研究所寒地土木研究所が開発した装置を用いて、地盤表層の貫入抵抗力(硬さ)を計測した(図-2(b))。RI 測定器には、ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社の ANDES を用いて、ANDES 直下約 200mm の深さの平均密度を測定した。

それぞれの試験法で計測する領域を図-3 に示す。衝撃加速度計では、地盤の最も表層に近い部分を点で測定し、シンウォールチューブでは、地盤浅層を点で測定する。RI 測定器では、表層から 200～300mm の地盤内部を領域的に計測することができる。奥村ら⁴⁾は、模型実験により重錘直下の密度変化は様に密になるわけで

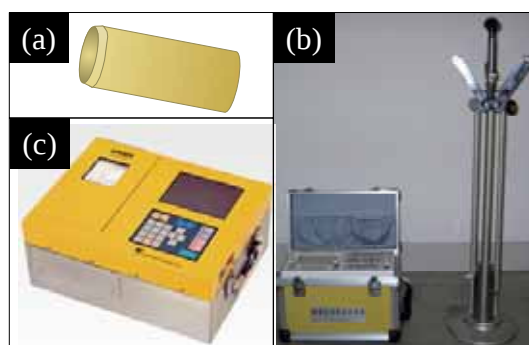


図-2 地盤密度測定機器；(a)シンウォールチューブ，
(b)衝撃加速度計，(c)ANDES

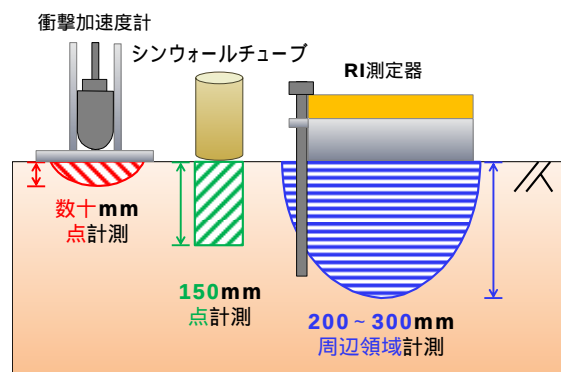


図-3 地盤密度測定器による測定範囲の模式図

表 - 1 衝撃実験ケース一覧

実規模RC製ロックシェッド衝撃実験											
実験 No.	実験名	落体 質量(t)	落下 高さ(m)	入力E (kJ)	緩衝材	シンウォール-Dc(%)		衝撃加速度計(G)		RI-Dc(%)	
						実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後
1	S-L5-E20	2	1	20	砂	94.30	93.00	25.22	20.30	92.0	90.4
2	S-L8-E40	2	2	39	砂	94.30	94.10	25.22	32.60	92.0	90.1
3	S-L2-E40	2	2	39	砂	94.30	93.60	25.22	32.90	92.0	77.2
4	S-L5-E40	2	2	39	砂	94.30	95.20	25.22	22.40	92.0	76.6
5	S-L6-E40	2	2	39	砂	94.30	91.91	25.22	21.70	92.0	90.4
6	S-L9-E40	2	2	39	砂	94.30	91.01	25.22	19.30	92.0	75.1
7	S-L3-E40	2	2	39	砂	94.30	94.20	25.22	-	92.0	78.8
8	G-L9-E20	2	1	20	砕石	-	-	101.01	98.30	84.9	79.2
9	G-L6-E20	2	1	20	砕石	-	-	101.01	119.40	84.9	74.1
10	G-L3-E40	2	2	39	砕石	-	-	101.01	72.10	84.9	79.5
11	G-L6-E40	2	2	39	砕石	-	-	101.01	114.00	84.9	77.6
12	G-L5-E40	2	2	39	砕石	-	-	101.01	117.50	84.9	78.8
13	G-L8-E40	2	2	39	砕石	-	-	101.01	102.30	84.9	76.4
14	G-L2-E40	2	2	39	砕石	-	-	101.01	90.50	84.9	78.7
15	G-L7-E40	2	2	39	砕石	-	-	101.01	62.80	84.9	76.3
16	G-L4-E250	5	5	245	砕石	-	-	101.01	-	84.9	77.6
19	S-L6-E250	5	5	245	砂	95.00	102.68	28.82	-	94.0	-
20	S-L5-E1500	10	15	1470	砂	95.45	103.58	28.82	32.50	94.0	103.3
21	G-L5-E1500	10	15	1470	砕石	-	-	101.01	93.70	89.3	85.9
22	G-L6-E1500	10	15	1470	砕石	-	-	101.01	97.00	89.3	87.1
23	G-L4-E3000	10	30	2940	砕石	-	-	101.01	92.60	89.3	78.0
大型緩衝材衝撃実験											
実験 No.	実験名	落体 質量(t)	落下 高さ(m)	入力E (kJ)	緩衝材	シンウォール-Dc(%)		衝撃加速度計(G)		RI-Dc(%)	
						実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後
1	G-m5-h5	5	5	245	砕石	-	-	95.86	88.60	89.2	90.6
2	S-m5-h5	5	5	245	砂	89.81	91.41	22.34	17.00	85.8	88.0
3	S-m10-h10	10	10	980	砂	93.60	112.36	33.10	32.30	88.2	-
4	S-m10-h20	10	20	1960	砂	92.10	110.19	28.20	67.90	88.2	-
5	G-m10-h10	10	10	980	砕石	-	-	101.94	95.68	85.0	85.0
6	S-m2-h2	2	2	39	砂	94.80	95.30	25.77	17.10	89.1	85.4
7	G-m2-h2	2	2	39	砕石	-	-	101.66	97.50	89.3	86.5
8	G-m2-h20	2	20	392	砕石	-	-	-	96.60	92.0	89.8
9	G-m2-h31.25	2	31	613	砕石	-	-	97.21	83.80	84.9	90.7
10	S-m5-h5-R	5	5	245	砂	99.19	98.79	33.12	42.50	95.8	94.3
11	S-m10-h10-R	10	10	980	砂	96.20	105.18	30.08	-	94.9	92.7

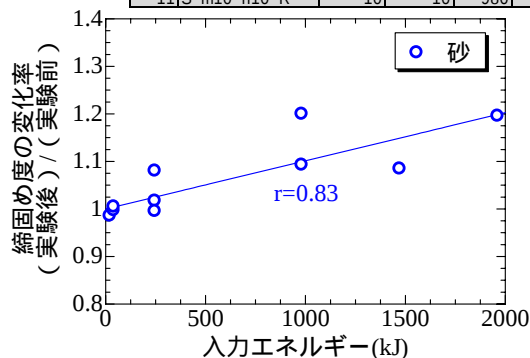


図 - 3 入力エネルギーと締固め度の変化率の関係 (シンウォールチューブ)

はなく、表層に局所的な圧縮領域が集中することを明らかにしている。本論文では、この3種類の地盤密度試験結果から、実規模の敷砂緩衝材の密度変化について詳細に検討を行う。しかしながら、重錘落下前後の密度をここまで詳細に計測した例はほとんどなく、計測データは本実験ケース内の少ないデータ数ではあるものの、その中でできる限りの整理を試みた。

実験ケース一覧および結果を表 - 1 に示す。なお、本論文中に示す、締固め度と衝撃加速度の計測位置については、実験前は、何処もほぼ同じ値なので全計測点の平均値を、実験後は、重錘直下中央付近で計測した値を用いた。

実験工程の都合上、実規模実験の砂の No.1 ~ No.7 の実験前の値は、全て No.1 実施前にまとめて計測している。そのため、特に、No.2 で入力エネルギーを 40kJ に上げた後の No.3 以降の実験ケースについては、実験前に計測した値と異なった締固め度で実験を実施している可能性がある（事前に他の載荷点で受けた衝撃で砂が緩

んでいる可能性があるため）。そこで、以下に示すグラフでは、入力エネルギー 40kJ の実験結果は最初の 1 回目の実験である No.2 のみを使用し、No.3 ~ No.7 の結果は除いている。また、No.9 ~ No.15 の砕石においても同様の手順で実験を実施しているため、No.11 ~ No.15 の結果は以下に示すグラフから除いている。

3. 地盤密度測定結果及び考察

3.1 シンウォールチューブによる浅層の密度測定結果

シンウォールチューブは、φ 75mm × 高さ 150mm であるため、計測箇所の緩衝材表層の密度を集中的に測ることができる。採取した砂の質量をシンウォールチューブ内の体積で除すことで乾燥密度を求め、締固め度に変換する。なお、砕石緩衝材の場合は、シンウォールチューブを埋め込むことができないため、敷砂緩衝材のみの計測結果を示す。

図 - 3 には、入力エネルギーに対する実験前後の締固め度の変化率（（実験後）/（実験前））を示している。これによると、8 割以上のケースで実験前後の比が 1 を上回っており、重錘落下後に硬くなったことがわかる。逆に、実験前後の比が 1 を下回る、つまり実験前より実験後の方が、砂が緩くなっているケースは、入力エネルギーが小さい 1 ケース（計測した 8 ケース中）であることがわかる。今回の実験では、実験前の初期状態で $D_c=95\%$ 程度と、比較的硬く締まっている条件であるため、入力エネルギーが小さい場合には、密な状態が乱されて砂が緩んだ状態になり得ることがわかった。

また、入力エネルギーと実験前後の締固め度の比には、かなり強い正の相関があることがわかった。よって、入力エネルギーが大きくなるほど、重錘直下の緩衝材の浅

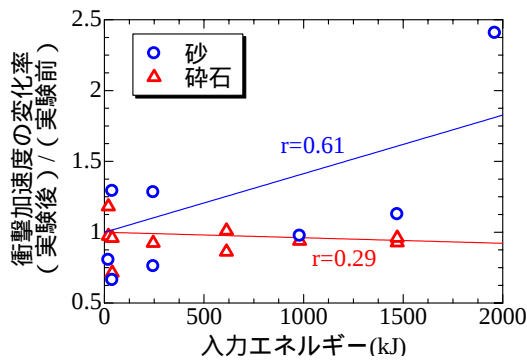


図 - 4 入力エネルギーと衝撃加速度の変化率の関係 (衝撃加速度計)

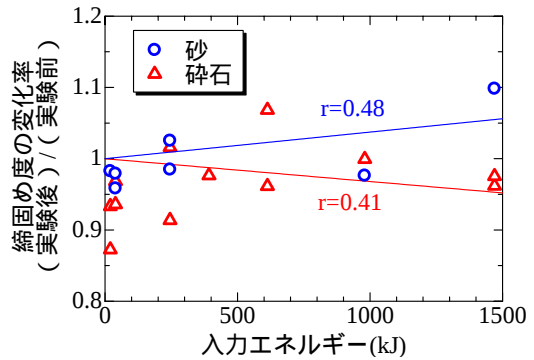


図 - 7 入力エネルギーと締固め度の変化率の関係 (RI 測定器)

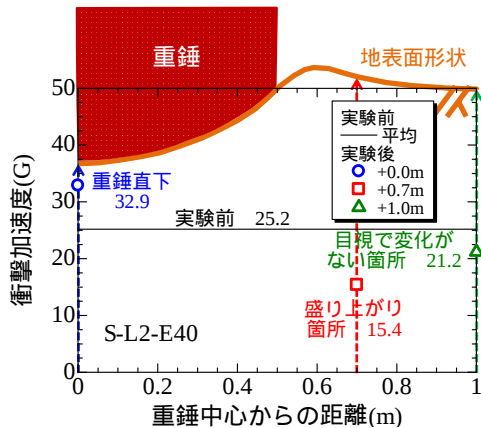


図 - 5 実規模実験 S-L2-E40 の衝撃加速度試験結果

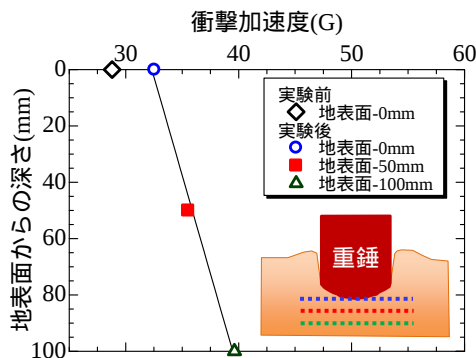


図 - 6 実規模実験 S-L5-E1500 の衝撃加速度試験結果

層部分は硬くなるとえる。

3.2 衝撃加速度試験による表層の衝撃加速度測定結果

衝撃加速度試験では、先端が直径 60mm の半球の落体を高さ 400mm から落下させたときの表層の衝撃加速度 (貫入抵抗力) を落体に取り付けた加速度計で計測する。

図 - 4 には、入力エネルギーに対する実験前後の衝撃加速度 (G) の変化率 ((実験後) / (実験前)) を示している。これより、砂 (青プロット) は実験前後の比が 1 を超える (硬くなる) ケースは、ちょうど 5 割程度であることがわかる。先述したシンウォールサンプリング時より実験後に硬くなるケースが少ない理由には、シンウォール (150mm) よりさらに表層に近い部分 (数十 mm) で計測を実施しているため、バラつきやすい性質を持っている可能性がある。礫 (赤プロット) では、8 割のケースが実験前後の比が 1 を下回り、緩くなってい

るという結果が得られた。

また、砂の場合は、入力エネルギーと衝撃加速度の変化率の関係において、やや正の相関がある。入力エネルギーが大きくなるほど、重錘直下の緩衝材の表層部分は締めやすくなることがわかった。

図 - 5 には、実規模実験の S-L2-E40 の結果を示す。ここでは重錘の直下のみならず、重錘周辺でも衝撃加速度試験を実施した結果を示している。実験前の衝撃加速度は 25.2G であるのに対し、重錘直下では衝撃加速度の値は大きくなり砂は硬くなっている。しかし、重錘中心から 1.0m 離れた目視では変化が確認できない箇所でも 21.2G となり、砂が緩くなることがわかった。そして、重錘中心から 0.7m 離れた砂が盛り上がる箇所が、実験前に比べて最も緩んでいることがわかった。このように、重錘直下の砂だけでなく、周辺の砂も緩み、力を横に伝えることが、砂の緩衝効果が優れている理由のひとつであると考えられる。

図 - 6 には、実規模実験の S-L5-E1500 の結果を示す。ここでは重錘の直下の地表面だけでなく、さらにそこから 50mm ずつ掘り下げた箇所でも衝撃加速度試験を実施した結果である。この実験ケースは、実験前の衝撃加速度が 28.8G である。重錘直下の地表面 (青色プロット) では 32.5G と実験前より硬くなっており、さらに 50mm 掘り下げたところ (赤色プロット) では 35.5G とより硬く、さらに 50mm 掘り下げたところ (緑色プロット) では 39.6G と最も硬くなっていることが確認された。入力エネルギーが 1500kJ と非常に大きなエネルギーが作用した場合には、緩衝材の密度変化が底部まで及んでおり、落体からロックシェッド上面に強い力を伝えやすい地盤条件に変化していることがわかった。

3.3 RI 測定器による内部の密度測定結果

RI 測定器では、RI 直下約 200~300mm 程度の領域の平均密度を計測する。そのため、シンウォールチューブサンプリングや衝撃加速度試験では計測しづらい緩衝材内部の密度を計測することができる。

図 - 7 には、入力エネルギーに対する実験前後の締固め度の変化率 ((実験後) / (実験前)) を示している。砂 (青色プロット) は、締固め度の変化率が 1 を超えるケース (硬くなる) は 2 割にも満たない。砕石 (緑色プロット) も、砂と同様に、硬くなるケースは全ケースの

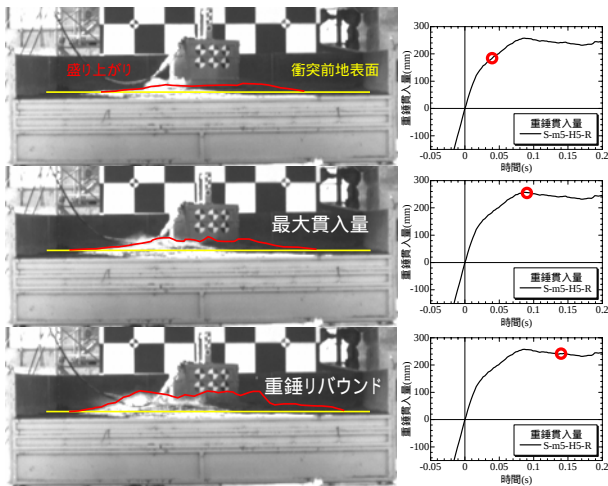


図 - 8 重錘のリバウンドと敷砂の飛散現象

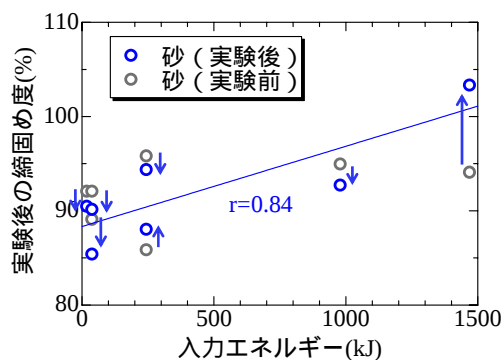


図 - 9 入力エネルギーと実験後の締固め度の関係

内の2割にも満たない。このように、ほとんどのケースで、緩衝材の内部の領域において、実験前に比べて相対的に緩くなることがわかった。その原因を、図-8に示す高速度カメラで撮影した画像を参考に考察する。

図-8の1枚目の重錘貫入直後から、重錘周辺の敷砂は盛り上がり始め、流動を開始する。2枚目の画像で重錘は最大貫入量に達し、その後、3枚目でリバウンドに転じる。そのとき、重錘周辺の敷砂は斜め上方向へ激しく流動、飛散している様子が見える。このように重錘衝突後、敷砂は激しく飛散するときのみならず、重錘がリバウンドするときにも緩む可能性がある。実際のロックシェッドの場合には、ロックシェッド頂版の応答も影響して、重錘落下前より緩んだ領域が形成される可能性がある。

また、入力エネルギーと実験前後の締固め度の変化率の関係については、砂、碎石ともにほとんど相関がみられない。これは、入力エネルギーの大きさだけでは緩衝材の内部領域の密度変化（密になるか緩くなるか）は決まらないことを意味する。

そこで、図-9に入力エネルギーと砂の実験後の締固め度（青色プロット）の関係をプロットし、それに対して近似曲線を描くと、かなり強い正の相関があることがわかった。その上で、実験前の締固め度（灰色プロット）をプロットすると、実験前の締固め度（灰色プロット）が近似曲線に向かうように締固め度が変化していることがわかった。つまり、実験後の緩衝材内部の密度は、

実験前の締固め度の大きさによらず、入力エネルギーの大きさでほぼ一義的に決まっていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、重錘衝突時の緩衝材の変形挙動および密度変化を観察した。本研究で得られた主な知見は以下の通りである。

1) シンウォールチューブを用いた密度測定により、砂は、地表面から15cmの集中的な浅い領域では、入力エネルギーの増大に伴って緩衝材がより硬くなることがわかった。

2) 衝撃加速度試験により、砂の場合、シンウォールチューブで採取する領域よりさらに表層の領域でも、入力エネルギーの増大に伴って緩衝材が硬くなることがわかった。

3) 重錘直下が硬くなるケースでも、重錘の周辺には緩む領域が大きく存在することがわかった。

4) 少なくとも、入力エネルギーが1500kJを超える場合、重錘直下の密度変化は底部まで達しており、ロックシェッドに非常に強い力を伝達できる地盤状態になっていることがわかった。

5) RI試験により、砂の場合、入力エネルギーと実験前の締固め度の条件によっては、重錘直下でも内部には緩み領域が形成されることがわかった。実験後の緩衝材内部の密度は、実験前の締固め度の大きさによらず、入力エネルギーの大きさでほぼ一義的に決まると考えられる。

本研究により、これまで感覚的にしか把握されてこなかった土が硬くなる、軟らかくなるといった密度変化を数値として計測することができた。特に、重錘直下でも内部には緩み領域が形成されるなどの新たな知見を得た。

今後は、相関がほとんどなかった碎石について、さらに実験データおよび数値解析も併用しながらケース数を増やして検討を進める。また、今回の限られた実験ケースの中では、最も決定係数が高い近似曲線が線形近似であったものの、砂についても碎石と同様にデータの蓄積を進めて近似曲線の選定についても見直していく予定である。

参考文献

- 1) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能: 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1587-1597, 1993.03.
- 2) 西弘明, 岸徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 川瀬良司: 敷砂緩衝材を設置した1/2縮尺RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1173-1180, 2011.03.
- 3) 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落体の貫入挙動に着目した敷砂の衝撃緩衝メカニズム, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.2, pp.361-370, 2013.
- 4) 奥村勇太, 内藤直人, 前田健一: 落体衝突を受ける敷砂緩衝材の密度変化, 平成25年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集 (掲載中), 2013.03.