

敷砂あるいは碎石を設置した大型 RC スラブに関する衝撃載荷実験

Falling-weight impact test of RC slab with sand cushion or gravel cushion

寒地土木研究所	○正員	山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
寒地土木研究所	正員	今野 久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所	正員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	正員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

日本は国土の約7割が山地・丘陵地であり地形が急峻なうえ、地質・土質が複雑で地震の発生頻度が高く、台風や降雨、降雪など厳しい環境下にある。このような中、自然災害から国民の生命・財産を守ることは最も基礎的な課題となっている。近年、集中豪雨や地震などに伴う土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が、過去10年間（平成11～20年）の年平均で約1,000件以上発生しており、多大な被害を与えている¹⁾。また、自然災害による犠牲者のうち、土砂災害によるものが大きな割合を占めている。

このような中、北海道の道路は急峻な地形や海岸線などを通過し築造されている場合も少なくなく、大規模な岩盤崩壊や落石を始めとする道路災害が続き、道路防災水準を向上させるための研究開発が急務となっている。

そのため、特に道路防災構造物（落石覆道や落石防護擁壁など）を対象とし、道路防災水準の高度化が可能となるように、落石覆道（以後、ロックシェッド）の終局に至る時点の最大入力エネルギー量あるいは動的終局耐力を適切に把握することが喫急の課題となっている。著者らは、これまで落石による衝撃力を直接受けるRC製ロックシェッドの頂版部に着目し、RC梁、RCスラブ等に対して室内や屋外にて衝撃実験を実施すると共に、弾塑性衝撃応答解析を適用し、その解析手法の妥当性を検証してきた^{2)~5)}。また、同一供試体に対する繰り返し衝撃実験を実施し、斬増する衝撃力による部材のひび割れ性状と増加する塑性変形の実験結果をとりまとめた。更にその斬増するひび割れ性状と塑性変形の結果を再現できる解析手法として、衝撃実験毎に弾塑性衝撃応答解析を行い、その結果を累積させることにより、繰り返し衝撃実験による損傷、破壊形状を反映することのできる解析手法を提案している⁶⁾。今後、ロックシェッド等の耐衝撃用途構造物に関する設計法が限界状態設計法や性能照査型設計法に移行するような場合においては、各種限界状態の定義も含め、終局入力エネルギー量あるいは動的終局耐力評価法を確立することが肝要であるものと判断される。

このような観点から、著者らは耐衝撃用途RC構造物の限界状態設計法あるいは性能照査型設計法の確立に向けた基礎資料を得ることを目的に、現在設置されているRC製ロックシェッドを対象に、2/5スケールのロックシェッド模型を製作し、入力エネルギーを変化させた衝撃載荷実験を実施し、終局限界近傍までのロックシェッドの弾塑性衝撃挙動に関する実験を行っている。実験は、緩衝材の影響

を受けない状態でのロックシェッドの耐衝撃挙動の把握および現行設計法を考慮して敷砂緩衝材を設置した状態での耐衝撃挙動把握を目的に2体の縮尺模型に対して行っている。その結果、ロックシェッドが終局状態に至る場合の損傷は、頂版部に集中的に発生することが明らかとなった。

そこで、本研究ではロックシェッドの頂版部のみに着目し、緩衝材の影響を受けない状態および緩衝材を設置した状態でのRCスラブの終局までの耐衝撃挙動データを取得することを目的として、2辺支持大型RCスラブの重錘落下衝撃実験を実施した。また、緩衝材としては従来から使用されている敷砂の他に、ヨーロッパ（スイス）等で同種の構造物上に使用されている碎石についても実験を行った。本論文では、上記実験ケースの中から緩衝材として敷砂および碎石を設置して実施した重錘落下衝撃実験結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に供した大型RCスラブ試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、筆者らが別途実施した2/5スケールの覆道模型実験試験体の頂版部を参考に、厚さおよび配筋を決定している。すなわち、長辺が5m、短辺4m、純スパン長4m、版厚0.4mである。配筋は、下面および上面の軸方向鉄筋としてD19を125mm間隔（主鉄筋比0.67%）、配力筋についても軸方向鉄筋と同様に下面、上面共にD19を125mm間隔で配置している。また、スターラップとしてD13を千鳥配置してい

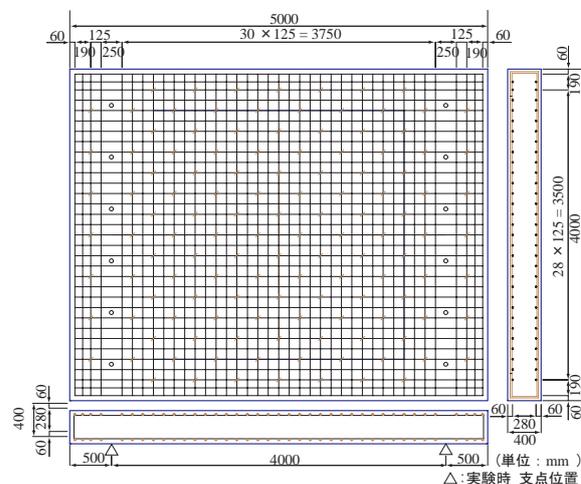


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況



写真-1 実験状況 (G-II-H10.0)

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	緩衝工	重錘質量 M(kg)	荷重方法	落下高さ H(m)	衝突エネルギー E_k (kJ)
S-II-H1.0	砂	5,000	繰り返し	1.0	49
S-II-H5.0				5.0	245
S-II-H7.5				7.5	368
S-II-H10.0				10.0	490
S-IS-H10.0			単一	10.0	490
S-IS-H12.5				12.5	613
G-II-H1.0	碎石	5,000	繰り返し	1.0	49
G-II-H5.0				5.0	245
G-II-H7.5				7.5	368
G-II-H10.0				10.0	490
G-IS-H10.0			単一	10.0	490
G-IS-H12.5				12.5	613

る。鉄筋の材質は全てSD345であり、力学的特性値はD19の降伏強度が393MPa、引張強度が580MPa、D13の降伏強度が382MPa、引張強度が550MPaである。コンクリートのかぶり、鉄筋からの芯かぶり、設計基準強度は24N/mm²であり、実験時圧縮強度は敷砂を使用した実験の試験体が平均32.0N/mm²、碎石を使用した実験の試験体が平均30.9N/mm²である。

2.2 衝撃実験概要

写真-1には、衝撃荷重実験状況を示している。実験は、敷砂あるいは碎石を50cmの厚さで設置したRCスラブ中央部に質量5,000kgの鋼製重錘をトラッククレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、着脱装置によりスラブ中央部に自由落下させることにより行った。使用した鋼製重錘は、直径が1.0m、高さが97cmで底部より高さ17.5cmの範囲が半径80cmの球状となっている。質量は、鋼製円筒の内部に鋼塊とコンクリートを充填して調整している。なお、試験体は支点反力測定用のロードセルを設置した鋼製治具上に設置しており、重錘衝突時の跳ね上がり防止のために、支点治具上より試験体を貫通させた鋼棒により固定されている。また、支点治具はロードセル下部の鋼材位置で回転できる構造となっており、両端ピン支持に近い状態となっている。実験に使用した敷砂は、アスファルト合材用の細目砂であり、表乾密度は2.56g/cm³である。実験に際しては、RCスラブ上に型枠を設置し、厚さ25cmごとに足踏みによって締め固めを行い所定の厚さに整形している。実験時の湿潤密度は平均1.448g/cm³、含水比は平均9.45%である。また、碎石は路盤用切込碎石(30~0mm)であり、表乾密度は2.61g/cm³である。実験に際しては敷砂と同様に厚さ25cmごとに足踏みによって締め固めを行い所定の厚さとしている。なお、敷砂および碎石とも、繰り返し載

荷実験では、各実験ケース終了後に重錘落下位置、貫入量を調査した後、緩衝材を掘り返し、RCスラブ上面のひび割れ状況を確認した後、所定の厚さに再設置している。

表-1には、実験ケースの一覧を示している、実験は、敷砂および碎石それぞれに対して、繰り返し荷重実験1体、単一荷重実験2体の合計6体に対して実施した。繰り返し荷重実験では弾性範囲内の実験ケースとして落下高さ1.0m、その後H=5.0mから2.5mピッチで落下高さを漸増させ、試験体の裏面コンクリートが剥落するような状況程度まで実施している。単一荷重実験については、繰り返し荷重実験の最終落下高さであるH=10.0m、およびH=12.5mで実施した。実験ケース名は、第1文字目に緩衝材の種類を示す記号(敷砂:S、碎石:G)、第2文字目には荷重方法(II(impact iterative):繰り返し荷重実験、IS(impact single):単一荷重実験)、第3文字目にはHの後ろに重錘の落下高さ(m)を付し、それらをハイフンで結んで示している。

2.3 計測方法

本実験における計測項目は、1)重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ式加速度計(容量200G、応答周波数DC~3.5kHz)による重錘衝撃力、2)支点治具上に設置した起歪柱型ロードセルによる支点反力、3)非接触式レーザ変位計(測定範囲±100mm、応答周波数約1kHz)による試験体変位である。

衝撃実験時の各種応答波形は、重錘衝撃力および支点反力についてはサンプリングタイム0.05msで、支点反力および変位についてはそれぞれ0.1msおよび1msでデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。また、各実験終了後には、試験体のひび割れ状況をスケッチしている。

3. 実験結果

3.1 各種応答波形

図-2には、敷砂および碎石を設置した単一荷重実験ケースに関する重錘衝撃力波形、合支点反力(以後、単に支点反力)波形および荷重点変位波形を示している。また、波形はいずれも重錘衝突時刻を零として整理している。

(a)図より、敷砂を設置したS-IS-H10.0およびS-IS-H12.5の重錘衝撃力波形は、ピーク値および周期が同程度の正弦半波が3波連なった波形性状を示している。このような波形性状は過去に実施した同種の実験では得られておらず、敷砂が50cmと薄いことや、RCスラブの剛性および固有周期等が影響し、重錘、敷砂、RCスラブの相互作用によって生じたものと推察される。第1波のピーク値および波形全体の継続時間は落下高さの増加と共に増加している。一方、碎石を設置したG-IS-H10.0およびG-IS-H12.5の重錘衝撃力波形は、重錘衝突初期の正弦半波とそれに続く周期が長く振幅の小さい半波が合成された波形性状を示している。重錘衝撃力波形の立ち上がりには敷砂を用いた場合よりも高周波成分が卓越している。第1波のピーク値は落下高さの増加と共に増加しているものの、波形継続時間は敷砂の場合とほぼ同程度の約80msとなっている。

(b)図より、支点反力波形についてみると、いずれの実験ケースにおいても重錘衝撃力波形より若干遅れて励起している。敷砂を設置した場合には重錘衝撃力波形に対応して3波が合成された波形性状を示しており、落下高さの大

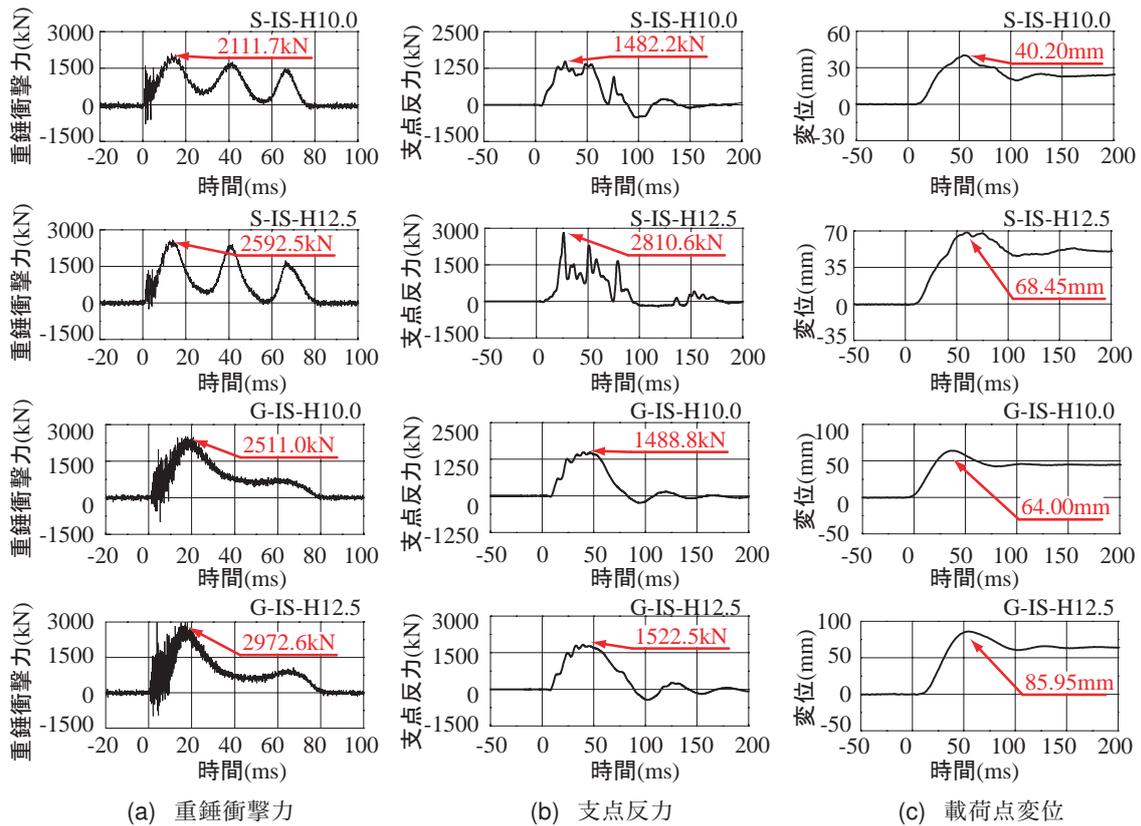


図-2 各種応答波形

きい S-IS-H12.5 においてその傾向が顕著に示されている。碎石を設置した実験ケースでは、重錘衝撃力波形と同様に比較的滑らかな正弦半波波形が励起しているが、波形の立ち上がりには重錘衝撃力波形と同様に高周波成分が示されている。最大支点反力は、敷砂および碎石の両ケースともに落下高さの増加と共に大きくなっているが、敷砂を用いた場合の方がその増加割合が大きい。また、波形の継続時間はいずれの実験ケースも重錘衝撃力波形と同程度であり約 80 ms である。

(c) 図より、載荷点変位波形についてみると、いずれの実験ケースにおいても重錘衝突によって励起される第 1 波目の主波動とその後続く減衰自由振動波形よりなっている。碎石を用いた場合の主波動は波形の立ち上がりからピークに至るまで非常に滑らかな性状を示しているが、敷砂を用いた場合には重錘衝撃力の影響からか、ピーク値近傍に若干周波数の高い波形が現れている。最大変位は、敷砂および碎石の両ケースともに落下高さの増加と共に増加する傾向を示している。両者で比較すると、碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きい。

3.2 各種応答値と衝突エネルギーの関係

図-3 には、敷砂および碎石を用いた場合の全実験ケースにおける最大重錘衝撃力、最大変位、残留変位の各種応答値と衝突エネルギーの関係を示している。

(a) 図 には、最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係を示している。敷砂を設置した場合には、いずれの実験ケースにおいても、最大重錘衝撃力は衝突エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加している。一方、碎石を設置した繰り返し載荷実験では、衝突エネルギーが大きくなるに従って最大重錘衝撃力の増加割合が減少する傾向が見られ

る。これは、敷砂を用いた場合よりも同一衝突エネルギーにおける最大変位および残留変位が大きくスラブの剛性低下が大きいためと推察される。また、同一落下高さにおける最大重錘衝撃力は、敷砂を設置した場合よりも碎石を設置した場合の方が大きい。

(b) 図 には、最大変位と衝突エネルギーの関係を示している。敷砂および碎石を設置した場合の繰り返し載荷実験における最大変位は、衝突エネルギー $E_k = 250$ kJ を境にして、衝突エネルギーの増加に対する最大変位の増加割合が大きくなっており、 $E_k = 250$ kJ 以降は衝突エネルギーの増加に対してほぼ線形に最大変位が増加している。また、最大変位は単一載荷実験の場合が繰り返し載荷実験の場合よりも若干小さい値を示している。緩衝材の影響を検討すると、最大変位は碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きくなる傾向を示している。

(c) 図 には、残留変位と衝突エネルギーの関係を示している。敷砂および碎石を設置した場合の繰り返し載荷実験における残留変位は、最大変位の場合と同様に衝突エネルギー $E_k = 250$ kJ を境に増加割合が大きくなっており、 $E_k = 250$ kJ 以降は衝突エネルギーの増加に対してほぼ線形に増加している。また、単一載荷実験の場合には、繰り返し載荷実験の場合よりも若干小さい値を示している。残留変位の大きさは、碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きくなる傾向が示されている。

3.3 ひび割れ発生状況

図-4 には、敷砂および碎石を設置した場合の単一載荷実験終了後のスラブ下面のひび割れ状況を示している。

落下高さ $H = 10.0$ m では、両者とも載荷点を中心に斜め方向のひび割れと支点部に平行な曲げひび割れが多数発生

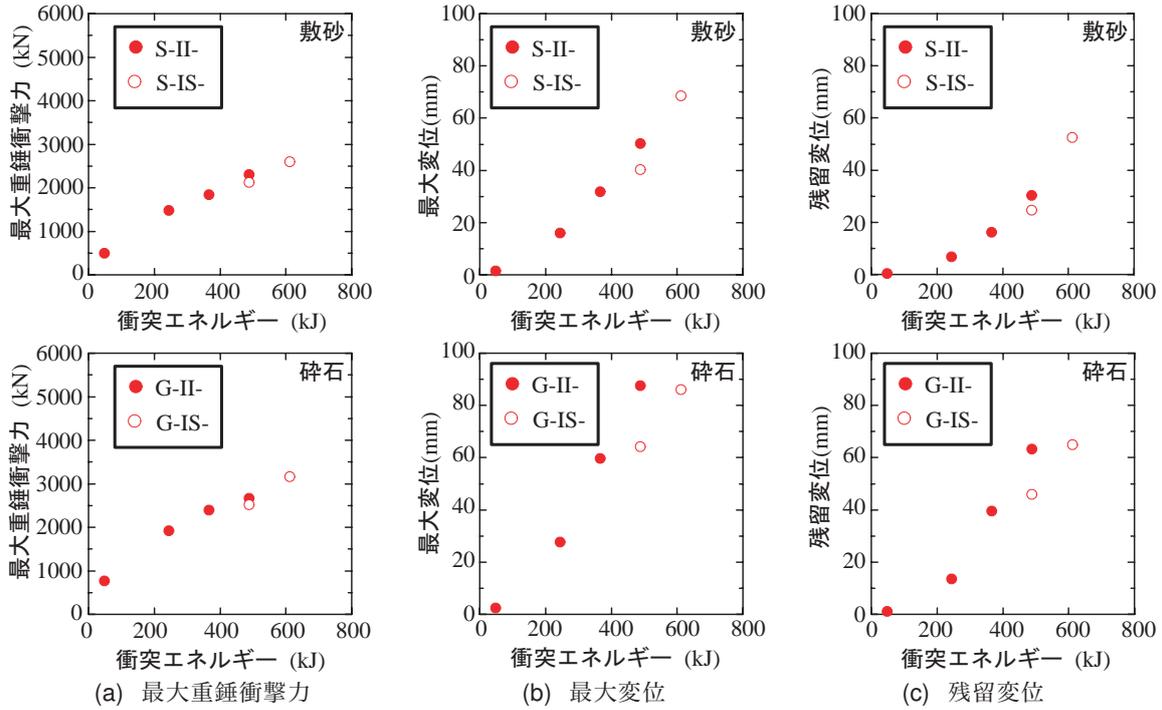


図-3 各種応答波形

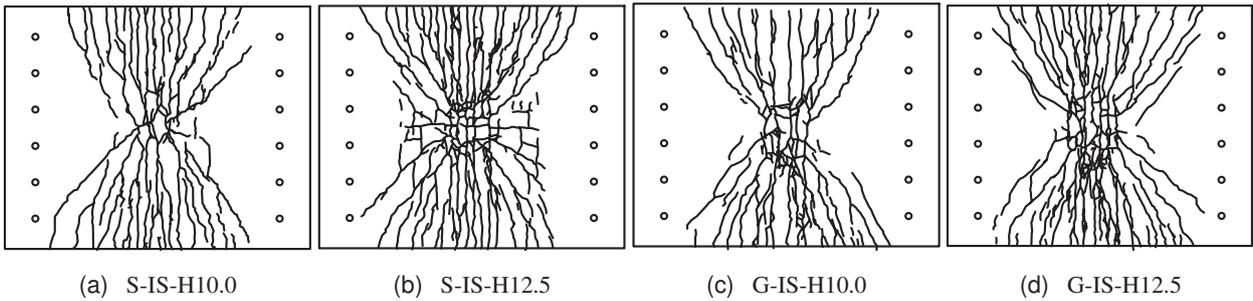


図-4 RCスラブ下面のひび割れ状況

している。曲げひび割れの密度は敷砂を設置した実験ケースの方が大きい。

次に、落下高さ $H = 12.5\text{m}$ の場合には、 $H = 10.0\text{m}$ の場合よりもひび割れが支点方向に拡大する傾向を示している。また、敷砂を設置した場合の $H = 12.5\text{m}$ では、載荷点近傍においてひび割れが格子状に発生している。両者のひび割れ分布性状を比較すると、敷砂を用いる場合が碎石を用いる場合よりも、作用衝撃力が載荷点部に集中して作用しているように推察される。

4. まとめ

緩衝材として敷砂あるいは碎石を設置した2辺支持大型RCスラブの重錘落下衝撃実験により、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 同一衝突エネルギーにおける最大重錘衝撃力は、碎石を設置する場合が敷砂を設置する場合よりも大きい。
- 2) 同一衝突エネルギーにおける最大変位および残留変位は、碎石を設置した場合が敷砂を設置した場合よりも大きい。

- 3) ひび割れ分布性状の比較により、碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも作用衝撃力が載荷点部に集中して作用している。
- 4) 緩衝材を設置した2辺支持大型RCスラブの最終的な破壊モードは曲げ破壊となる。

参考文献

- 1) 国土交通白書、2009.
- 2) 西 弘明、佐藤昌志、岸 徳光、松岡健一：敷砂緩衝材を用いた実規模PC落石覆工の衝撃挙動、コンクリート工学年次論文集、17(2)、pp.691-696、1995.6.
- 3) 川瀬良司、今野久志、牛渡裕二、岸 徳光：各種緩衝材を設置した場合のトンネル坑口部の落石衝撃挙動解析、コンクリート工学年次論文集、27(2)、pp.871-876、2005.6.
- 4) 川瀬良司、岡田慎哉、鈴木健太郎、岸 徳光：敷砂緩衝工を設置したRC製アーチ構造の耐衝撃挙動に関する実規模重錘落下実験、構造工学論文集、55A、pp.1313-1325、2009.3.
- 5) 岡田慎哉、岸 徳光、西 弘明、今野久志：RCラーメン構造の耐衝撃挙動に関する実験的検討および数値解析手法の妥当性検討、構造工学論文集、55A、pp.1388-1398、2009.3.
- 6) 岸 徳光、今野久志、三上 浩：RC梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション、構造工学論文集、55A、pp.1225-1237、2009.3.