

敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験

Large-scale falling-weight impact test of sand cushion with various conditions

山口 悟*, 今野 久志**, 西 弘明***, 小室 雅人****, 岸 徳光*****

Satoru Yamaguchi, Hisashi Konno, Hiroaki Nishi, Masato Komuro, and Norimitsu Kishi

*寒地土木研究所研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

**博 (工), 寒地土木研究所総括主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

***博 (工), 寒地土木研究所上席研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

****博 (工), 室蘭工業大学大学院 講師, 社会基盤ユニット くらし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*****工博, 釧路工業高等専門学校 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西 2 丁目 32-1)

In order to gain a basic knowledge for formulating material constitutive model of the sand cushion, a large-scale falling-weight impact test was conducted varying thickness of the sand cushion and falling height as variables. Here, special apparatus was made to accurately measure the transmitted impact force, and high-speed motion camera was also used to capture the movement of the weight. The results obtained from this study were as follows: 1) In the case of a thin sand layer, both impact force and transmitted impact forces are similarly behave and these maximum impact forces are almost equal to each other; and 2) the thicker the sand layer thickness, the larger the maximum transmitted impact force than that of the weight impact force is.

Key Words : Sand cushion, falling-weight impact test, high-speed motion camera

キーワード : 敷砂緩衝材, 重錘落下衝撃実験, ハイスピードカメラ

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本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、がけ崩れ等の土砂災害が、過去 10 年間 (平成 14～23 年) の年平均で、約 1,000 件以上発生¹⁾しており、多大な被害を与えている。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。

北海道の道路は急峻な地形や海岸線に沿って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 (写真-1) が発生している。このため、落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。その落石防護構造物の一つに、RC 製ロックシェッド (以後、ロックシェッド) が挙げられる。

ロックシェッドは、我が国では主に「落石対策便覧」²⁾に基づき、許容応力度法に基づいて設計が行われている。しかしながら、近年、様々な土木構造物の



写真-1 落石による道路災害例 (2008)

設計法が仕様規定型設計法から性能照査型設計法に移行しており、ロックシェッドにおいても、より合理的な設計を可能とする性能照査型設計法の確立が望まれている。

この様な状況下において、著者らはロックシェッド

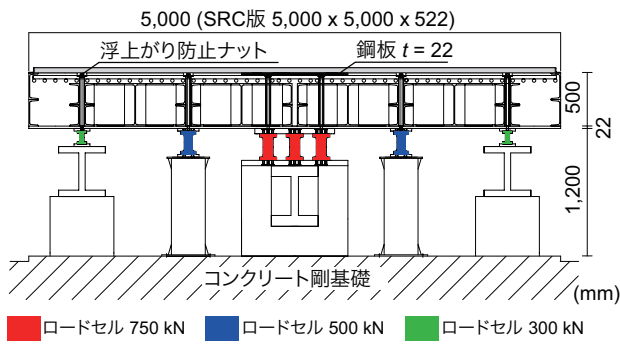


図-1 実験装置概要 (側面図)

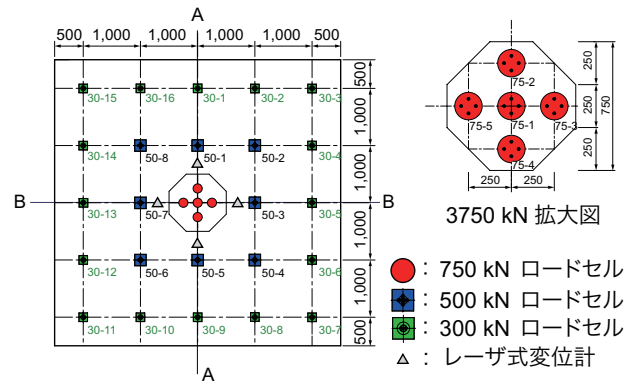


図-2 伝達衝撃力測定用ロードセル配置図 (平面図)

に対する性能照査型設計法確立のための基礎的な取り組みとして、RC 梁や版、骨組構造物等の部材や小型模型、さらには実 RC アーチ構造や RC ロックシェットの縮尺模型に対する重錘落下衝撃実験を実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動の把握に関する検討を行ってきた^{3)~6)}。また、これら実験結果を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析も実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の開発に関する検討を行っている^{7), 8)}。その結果、敷砂緩衝材など緩衝材を介さず直接衝撃荷重を作用させた場合の数値解析結果は、単一あるいは繰返し等の载荷条件にかかわらず精度よく実験結果を評価可能となっている。

一方、敷砂緩衝材を設置して実施した衝撃载荷実験を対象とした数値解析に際しては、敷砂緩衝材の数値解析用材料構成則モデルが必要となる。そこで、著者らは、入力エネルギーが 1,000 kJ 程度までの敷砂緩衝材に対する重錘落下衝撃実験結果を用い、伝達衝撃力を大略評価可能な材料構成則モデルを構築して、数値解析を実施してきた。これまでの数値解析結果によれば、対象とする衝撃载荷実験の入力エネルギーが材料構成則設定の際に対象とした実験条件に近い場合には、大略実験結果を再現可能であることが明らかになっている^{9), 10)}。しかしながら、敷砂厚が落石径の半分程度と小さい場合や両者が同程度の場合においても、落石による入力エネルギーが非常に大きい場合には、実験結果を十分な精度で再現することができない状況にある。

現在、ロックシェット上には、標準的に 90 cm 厚の敷砂緩衝材が設置されている。しかしながら、性能照査型設計法の確立に向けて終局時近傍までの耐衝撃挙動を数値解析的に検討するためには、より厳しい落石条件下に対しても精度の高い解析結果を与える敷砂に関する材料構成則モデルの構築が必要である。

このような観点から、本研究では、各種条件下における敷砂緩衝材の数値解析用材料構成則モデルの設定手法を構築するための基礎的研究として、敷砂緩衝材の緩衝特性把握に関する室内実験¹¹⁾に続いて、大型重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では、敷砂緩衝材

の敷砂厚をパラメータとし、重錘衝撃力および伝達衝撃力、重錘貫入量等の耐衝撃挙動データを精度よく計測するために、実規模落石を想定した大型の緩衝材用衝撃実験装置を製作し実施したので報告する。

2. 実験概要

2.1 実験装置の概要

図-1、写真-2には、製作した大型緩衝材用実験装置の側面図を示している。大型緩衝材用実験装置は緩衝材を設置するための剛基礎として鋼・コンクリートからなる鉄骨コンクリート版(以後、SRC版)を製作した。緩衝材を介して構造物に作用する衝撃力(以後、伝達衝撃力)を精度よく計測するために、図-2に示す衝撃用ロードセルを配置している。

これまでの敷砂緩衝材の緩衝特性に関する研究では、伝達衝撃力は剛基礎上に衝撃応力測定用ロードセルを基礎面と面一になるように直線上に埋め込み、かつ伝達衝撃応力が点対称に分布するものと仮定し、台形則により合算して評価してきた。しかしながら、野外での実規模実験では重錘落下の精度に限界があり、必ずしも設定した対称点に重錘を落下させることができないため、自ずと伝達衝撃力評価に誤差が生じる。このことから、本研究では緩衝材を介した伝達衝撃力を的確に計測することを目的に、敷砂を設置する剛基礎としての SRC 版全体をロードセルで支持し、それを計測することとした。

SRC 版は各辺 5 m の正方形で、版厚 0.5 m である。底版には $t = 22$ mm 鋼板を使用し、写真-3 に示すように H 形鋼や溝形鋼を用いて井桁状に主構造を組み、溶接によるひずみが入らないように計測を行いながら製作を行った。版上面には D32 の異径鉄筋を 100 mm 間隔で格子状に配置している。重錘による SRC 版の载荷点部における局所的な損傷を防ぐため、版中央部には 1 m 四方の $t = 22$ mm 鋼板を設置している。ま

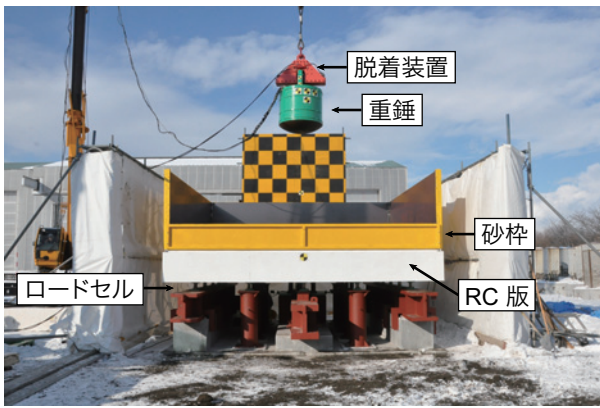


写真-2 実験装置と重錘 (実験状況)

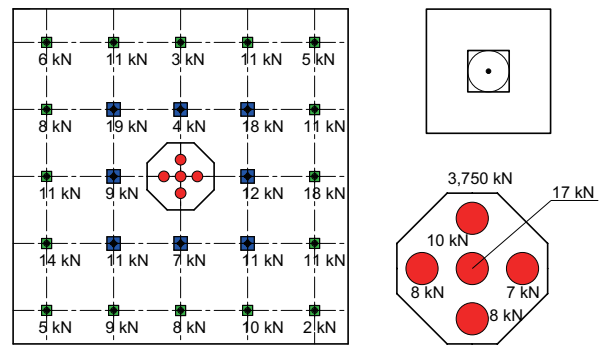


図-3 各ロードセルの荷重分担状況 (中央載荷時)



写真-3 実験装置 (SRC版) の製作状況



写真-4 衝撃実験状況 (S30-H5.0)

た、各ロードセルの上面に設置した鋼板と貫通ボルトを通じて実験時のSRC版の浮き上がり防止を行っている。各ロードセルの下面には鋼板を配置し、剛基礎との固定を行っている。

敷砂緩衝材の砂枠は、SRC版に等辺山形鋼を溶接して設置したため、4.9 m × 4.9 mの平面形状となっている。

衝撃実験の前に、ロードセルの性能を評価するために、約270 kNの重錘を用いてSRC版の中央点、左右、前後に偏心させて載荷する静載荷実験を実施した。図-3には中央点載荷時における各ロードセルの荷重分担結果を示している。各ロードセルの値は完全には点対称状に分布していないが、反力の合計値は283 kNとなり5%の誤差であった。その他、偏心載荷時における各ロードセルの合計値は、載荷荷重に対して2~11%の誤差であった。

2.2 衝撃実験概要

写真-2、写真-4には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験は、敷砂緩衝材を30~70 cmの厚さで設置し、質量5 tonの鋼製重錘をトラッククレーンにより1.0~15.0 mの高さまで吊り上げ、脱着装置により実験装置の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1.0 m、高さが97 cmで、底部より高さ17.5 cmの範囲が半径80 cmの球状

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	敷砂厚 (cm)	落下高さ (m)	入力エネルギー (kJ)
S70-H2.5	70	2.5	122.6
S70-H5.0		5.0	245.2
S70-H7.5		7.5	367.7
S70-H10.0		10.0	490.3
S70-H12.5		12.5	612.9
S70-H15.0		15.0	735.5
S50-H2.5	50	2.5	122.6
S50-H5.0		5.0	245.2
S50-H7.5		7.5	367.7
S50-H10.0		10.0	490.3
S50-H12.5		12.5	612.9
S30-H1.0	30	1.0	49.0
S30-H2.0		2.0	98.1
S30-H3.0		3.0	147.1
S30-H4.0		4.0	196.1
S30-H5.0		5.0	245.2

となっている。また、重錘は鋼製円筒の内部に鋼塊とコンクリートを充填して所定の質量に調整している。この重錘形状は落石を球体と考えた場合よりも質量が大きいが、発生している落石が球体とは限らないことから本重錘を使用することとした。なお、個別要素法 (DEM) を用いた解析により、本重錘形状と球体を仮

表-2 敷砂緩衝材の物性値

産地	種類	粗粒率	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数 U_c	50% 粒径 D_{50} (mm)
石狩市知津狩	細砂	1.39	1.52	22.1	4.75	2.37	0.27

定する場合の解析結果は、類似であることを確認している¹²⁾。

表-1には、実験ケースの一覧を示している。実験ケース名は、敷砂緩衝材を示す“S”とその厚さ(cm)、および5 ton 重錘の落下高さを示す“H”とその高さ(m)を用いて、ハイフンで結び示している。

実験に使用した砂はこれまでの敷砂緩衝材実験と同一とし、石狩市厚田の知津狩産の細砂を使用した。表-2には本実験に用いた砂の物性値を示している。

敷砂の締固めは、これまでの敷砂緩衝材に関する実験と同様に、敷砂厚 70 cm の場合には下から 20 cm, 25 cm, 25 cm の 3 層、敷砂厚 50 cm の場合には 25 cm を 2 層、敷砂厚 30 cm の場合には 30 cm 1 層毎に、それぞれ足踏み式により行った。なお、各実験の終了後には、重錘中心部の敷砂 (3×3 m 以上の範囲) をバックホウ (0.8 m³ 級) により取り除き、SRC 版の損傷が無いことを確認して、敷砂緩衝材の再設置を行った。

2.3 デジタルハイスピードカメラによる計測方法

本敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘を用いた重錘落下衝撃実験では、重錘に設置している加速度計と敷砂緩衝材への重錘の貫入量を同期させ、詳細な現象の解明と今後の数値解析に用いる敷砂緩衝材の材料構成則モデルの構築のために、デジタルハイスピードカメラを使用した。

計測に用いたカメラは、航空宇宙産業や自動車衝突実験などで使用されている高性能な機種であること、冬期の屋外で使用できること、重錘落下時の安全対策と大型重機による敷砂緩衝材の設置撤去場を確保するために撮影距離が 20 m 以上で 1 ms 程度の分解能を有することを条件に、IDT 社製の Motion Xtra HG-100 K (動作環境温度：0～50℃) を選定した。

撮影は 1/1,000 s (1,000 コマ/s) で、有効画素数がカラー 1,120×1,120 (白黒 752×1,024) にて収録を行った。また、運動解析ソフト (Glenallan Technology 社製) を使用し、不動点と重錘に設置したターゲットマーカーから動画像ターゲットマーク自動読み取りを行い、データ整理を行った。有効画素数から計測した敷砂緩衝材への重錘貫入量は 0.6～1.7 mm/ms であった。

2.4 計測機器による計測方法

本実験における計測項目は、1) 重錘の頂部表面に



写真-5 衝撃荷重用ロードセルの配置状況

設置したひずみゲージ式高応答小型加速度計 (容量 100, 200, 500 G, 応答周波数 DC 4～5 kHz: 共和電業社製) による重錘衝撃力、2) SRC 版下面に設置した図-2、写真-5 に示す 29 個の衝撃用ロードセル (定格容量: 750 kN 5 個, 500 kN 8 個, 300 kN 16 個) の合計値である伝達衝撃力、3) 非接触型レーザ式変位計 (KEYENCE 社製, 応答周波数約 1 kHz) による SRC 版の変位である。なお、レーザ式変位計は、図-2 に示すように重錘落下点に対して 750 kN と 500 kN ロードセルの中間に配置している。

衝撃実験時の各種応答波形は、いずれもサンプリングタイム 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。なお、デジタルハイスピードカメラとデジタルデータレコーダとの同期に関しては、ハイスピードカメラから出力される 5 V のマーカーをデジタルレコーダにて収録することによって対応した。また、各実験に際してシンウォールサンプリングチューブを用いて、実験前には 3 箇所、実験終了後には重錘落下点直下の 1 箇所、敷砂緩衝材の締固め密度を確認している。

3. 実験結果及び考察

3.1 各時刻歴応答波形

図-4 (a)～(c)には、入力エネルギー $E = 122.6, 245.2, 367.7, 490.3, 612.9, 735.5$ kJ (落下高さ $h = 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0$ m) が同一で、敷砂厚を変化させた場合の重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を重錘衝突時刻を 0 として示している。なお、伝達衝撃力は、前述したとおり図-2 に示した 29 個の衝撃用ロードセルからの応答波形を単純に足し合わせたものである。なお、レーザ式変位計による SRC 版の変位は実験前後とも、0.1

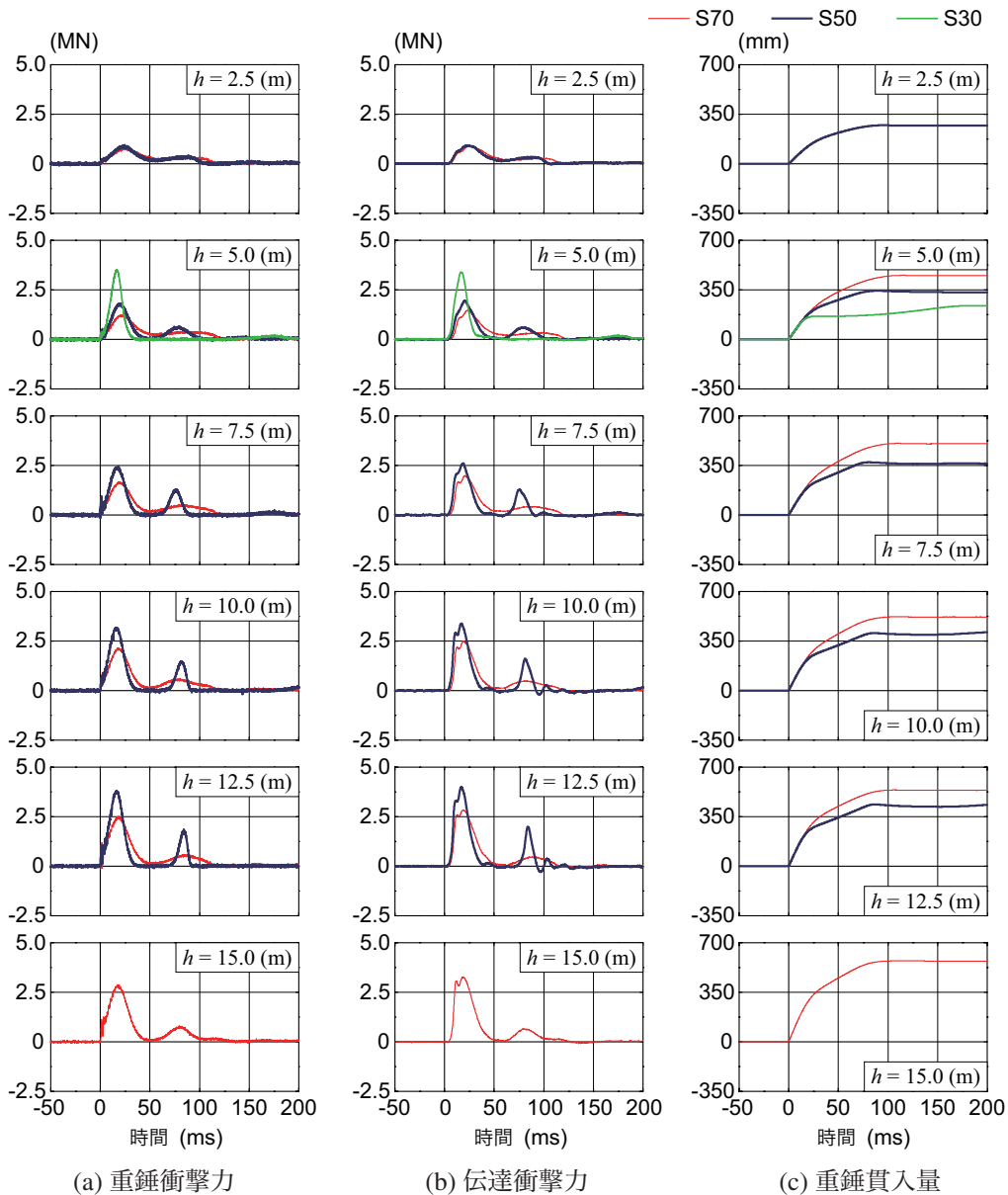


図-4 各時刻歴応答波形 (S70, S50, S30)

mm以下のノイズとして計測されており、表記していない。

(a)～(c)図より、各時刻歴応答波形の最大応答値は敷砂厚にかかわらず、落下高さ h の増加に伴い大きくなっていることが分かる。

敷砂厚毎の比較において、敷砂厚 $t = 70$ cmに着目すると、重錘衝撃力波形(a図)はいずれのケースも重錘衝突初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第1波とその後に続く第2波から構成されている。また、第2波の波形性状についても、第1波に比較して振幅が小さく継続時間も長い。(b)図に示す伝達衝撃力に関しては、重錘衝撃力に対して遅れて励起しており、第1ピーク近傍の性状が若干異なるものの、全体的な波形性状については重錘衝撃力波形とほぼ類似していることが分かる。重錘貫入量波形(c図)に関しては、

後述する敷砂厚 $t = 30, 50$ cmの場合のような変曲点が見られず滑らかな曲線となっている。

敷砂厚 $t = 50$ cmの場合において、重錘衝撃力波形は敷砂厚 $t = 70$ cmの場合と同様に、いずれのケースも重錘衝突初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第1波とその後に続く第2波から構成されている。第1波については、重錘の落下高さ h の増加と共に継続時間が短く、かつ振幅が大きくなる傾向が見られる。さらに、第1波および第2波の継続時間は、敷砂厚が小さいことから敷砂厚 $t = 70$ cmの場合に比較して短くなっていることが分かる。また、第2波目は落下高さ h によらずほぼ同程度の時刻に発生しており、振幅が第1波の1/2程度となっている以外は、波形性状や継続時間は第1波目とほぼ同様である。

伝達衝撃力波形(b図)に関しては、重錘衝撃力波

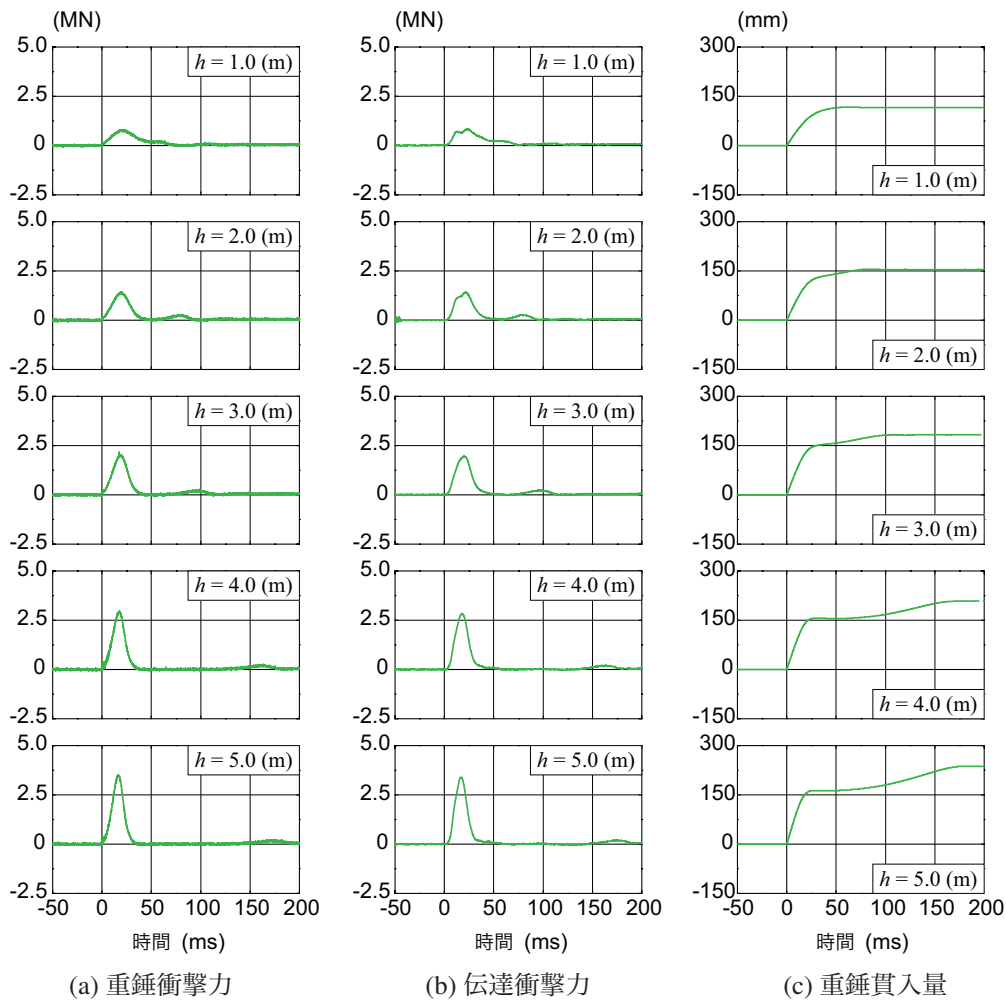


図-5 各時刻歴応答波形 (S30)

形に対して若干遅れて励起しており、第1ピーク近傍の性状が若干異なるものの、全体的な波形性状は重錘衝撃力波形にほぼ類似しており、敷砂厚 70 cm の場合と同様であることが分かる。(c) 図に示す重錘貫入量の応答波形は、落下高さ h の増加に伴い重錘衝突後の貫入速度が大きくなる傾向を示し、その後速度が低減して最大貫入量に達している。最大貫入量に達した後は若干リバウンドしている状況が示されている。また、重錘貫入量波形における勾配の変曲点は、(a) 図に示す重錘衝撃力波形における第1波と第2波の最大応答発生時刻に対応していることが分かる。

敷砂厚 $t = 30$ cm の場合において、重錘衝撃力波形は敷砂厚 $t = 70, 50$ cm の場合よりも重錘衝突初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第1波となっており、第2波目は励起せずその振幅はほぼ零の状態である。

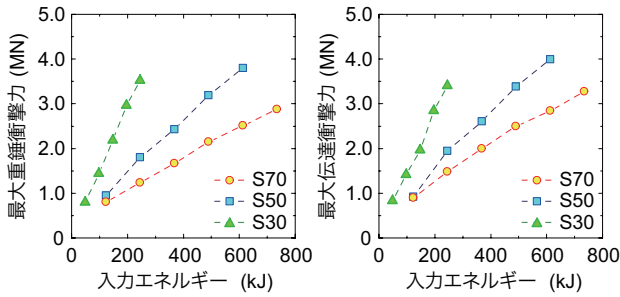
同一入力エネルギー $E = 245.2$ kJ (落下高さ $h = 5.0$ m) における敷砂厚毎の比較を行うと、重錘衝撃力、伝達衝撃力共に敷砂厚 t の減少に対応して増加する傾向を示している。重錘貫入量に関する比較では、敷砂厚 t の減少に対応して重錘貫入量も減少の傾向を示し、かつ貫入速度が急激に低下する多折れ線分布状態とな

る。また、その第1の折れ点時刻も敷砂厚 t の減少と共に早期になる傾向を示している。

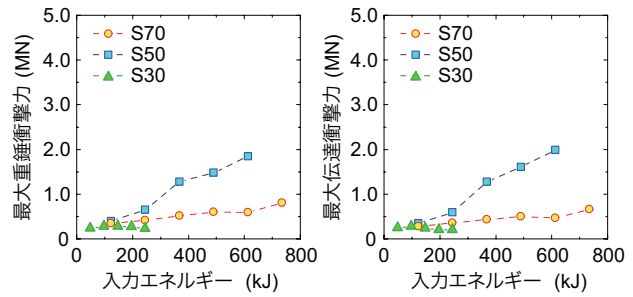
次に敷砂厚が同一の場合について、全体の波形性状から比較を行うと、最大重錘衝撃力と伝達衝撃力は、入力エネルギーの増加に伴い両者も増加する傾向を示している。重錘貫入量に関しては、入力エネルギーの増加に伴い貫入量は増大するものの、ある一定量以上には貫入していないことが分かる。また、S50のように重錘衝撃力波形や伝達衝撃力波形の第2波目が明確に現れる場合には、重錘貫入量の時間的な分布における折れ点が明確に現れている。

この正弦半波状の鋭い重錘衝撃力波形や2波が分布する波形性状は、これまでの敷砂緩衝材を用いた衝撃実験¹³⁾では一部しか得られていない。本研究では、重錘貫入量の時刻歴を衝撃力波形と同期させて計測したことによって、貫入量の時間的な折れ点を特定することが可能となった。すなわち、第1折れ点は重錘衝撃力の最大値発生時刻とほぼ対応しており、第2折れ点も重錘衝撃力波形の第2波目の最大値発生時刻とほぼ等しいことが明らかになった。

図-5 (a) ~ (c) には、敷砂厚 $t = 30$ cm の場合の入



(a) 第1 最大応答値



(b) 第2 最大応答値

図-6 各最大衝撃力と入力エネルギーの関係

力エネルギー $E = 49.0, 98.1, 147.1, 196.1, 245.2$ kJ (落下高さ $h = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ m) 毎の重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を示している。

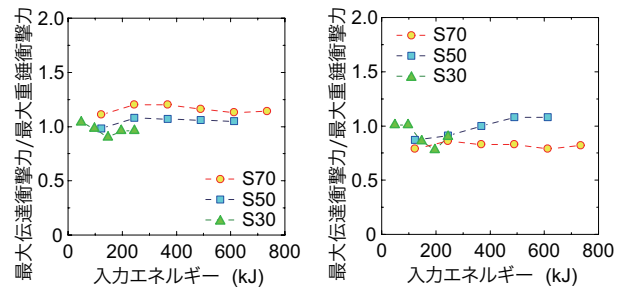
(a), (b) 図より、重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形は共に、重錘衝突初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第1波とその後に続く振幅の小さい第2波から構成されている。第1波については、重錘の落下高さ h の増加とともに継続時間が短くなり振幅が大きくなる状況が示されている。一方、第2波目の発生時刻は落下高さ h の増加とともに遅くなっていることが分かる。第1波および第2波目の最大応答値発生時刻は、重錘貫入量の時刻歴応答波形における折れ点に対応している。すなわち、第1波目の最大応答値は、重錘衝突初期の貫入量が小さい段階において敷砂の抵抗により急激に減速することによって発生する最大減速度発生時であり、第2波目の最大応答値は重錘貫入が完全に阻止される直前に発生している。落下高さ h の増加に伴い、重錘貫入量は多少なりとも増加する傾向を示すことより、対応して第2波目の発生時刻も遅くなるものと推察される。

(c) 図に示す重錘貫入量波形における折れ点は、落下高さ $h = 2.0$ m から明確に確認され、重錘貫入速度が零状態を示した後、落下高さ h の増加に対応して緩やかに貫入する傾向を示している。貫入速度零の状態における貫入量は 150 mm 程度である。これは、貫入速度が零となる状態において、敷砂の物性値に大きな変化が発生していることを暗示している。

3.2 各最大衝撃力と入力エネルギーの関係

図-6 (a) ~ (b) には、敷砂厚の異なる実験ケースの重錘衝撃力および伝達衝撃力に関する第1および第2最大応答値と入力エネルギーの関係を示している。

(a) 図より、敷砂厚 t の異なる場合における各最大重錘衝撃力および伝達衝撃力は、敷砂厚 t および入力エネルギー E にかかわらず、入力エネルギー E の増加に対応してほぼ線形に増加しており、その勾配は敷砂厚 t が小さくなるにしたがって大きくなる傾向を示し



(a) 第1 最大応答値

(b) 第2 最大応答値

図-7 各衝撃力比と入力エネルギーの関係

ている。特に敷砂厚 t の最も小さい S30 の場合には、入力エネルギーが小さいにもかかわらず大きな値を示しており、緩衝性能が低減していることが分かる。

(b) 図より、敷砂厚 t の異なる場合の各第2最大重錘衝撃力および伝達衝撃力は、敷砂厚が小さい S30 を除き、入力エネルギー E の増加に対応して緩やかではあるが、ほぼ線形に増加していることが分かる。第1最大応答値は各敷砂厚で入力エネルギーの増大と比例の傾向を示したのに対し、第2最大応答値は S50 のみが顕著に増加傾向を示している。一方、敷砂厚の最も小さい S30 の場合には、入力エネルギー E に対する増加傾向が見られず、反対に減少傾向にあることが分かる。

3.3 各衝撃力比と入力エネルギーの関係

図-7 (a) ~ (b) には、衝撃力比 (最大重錘衝撃力に対する最大伝達衝撃力の割合) と入力エネルギーの関係を示している。

(a) 図の第1最大応答値に関する衝撃力比より、各衝撃力比は入力エネルギーの小さい範囲および敷砂厚の最も小さい S30 においてデータにばらつきがあるものの、それ以外では敷砂厚の大きい場合が衝撃力比も大きく示されている。大略の傾向としては敷砂厚が大きい場合が衝撃力比も大きく、敷砂厚 S70 の場合に 1.1 ~ 1.2 程度、敷砂厚が小さくなるに従い衝撃力比も低下し 1.0 に漸近する傾向が見られる。これは、

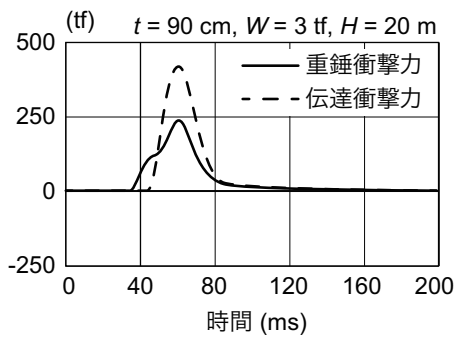


図-8 重錘衝撃力および伝達衝撃力波形¹⁴⁾
(敷砂厚 $t = 90$ cm, 重錘重量 $W = 3$ tf,
落下高さ $H = 20$ m)

伝達衝撃力の第1最大応答値発生時には、一次元棒を伝播する弾性波と同様な重錘衝突に伴って伝播する応力波の影響が含まれている可能性があるためと推察される。

敷砂厚 t と最大重錘衝撃力と伝達衝撃力の関係については、既往の研究^{14,15)}において敷砂厚 $t = 90$ cm の場合には、図-8に示すように最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力の1.8倍程度大きくなること示されている。一方、今回の実験結果ではこのような既往の結果と異なり、重錘径 D と敷砂厚 t との比が小さくなる場合には、最大伝達衝撃力は重錘衝撃力と同程度の値を示す傾向にあることが明らかになった。

(b) 図の第2最大応答値に関する衝撃力比より、入力エネルギーの増加に対する傾向は明確ではなく、またその値も1.0程度かそれより小さい傾向を示していることが分かる。

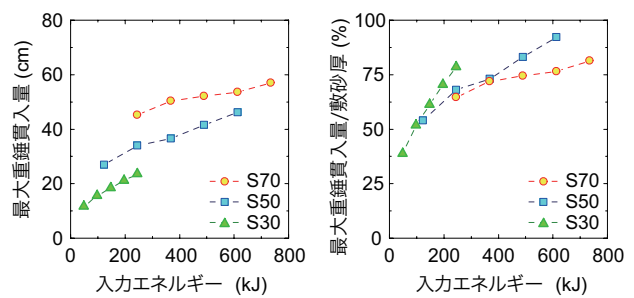
3.4 最大重錘貫入量と入力エネルギーの関係

図-9 (a), (b) には、最大重錘貫入量と入力エネルギーの関係を示している。(a) 図より、最大重錘貫入量は、入力エネルギーの増加に対応して増加しているものの、その増加勾配は敷砂厚の減少に対応して大きくなる傾向を示していることが分かる。

(b) 図には、重錘貫入率（敷砂厚に対する重錘貫入量の割合）と入力エネルギーの関係を示している。図より、重錘貫入率は、入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加しており、その増加勾配は敷砂厚の小さい場合ほど大きくなっている。また、その最大貫入率は0.8以上の値を示していることが分かる。

3.5 実験前後の敷砂緩衝材の関係

図-10には、実験前後に計測した敷砂に関する含水比の結果を示している。実験後の含水比に関しては、重錘直下から採取したデータを採用している。図より、含水比は実験前後において明確な差異がないこ



(a) 最大重錘貫入量

(b) 重錘貫入率

図-9 各重錘貫入量と入力エネルギーの関係

とが分かる。

図-11には、実験前後に計測した敷砂に関する最大乾燥密度の結果を示している。図より、実験後の最大乾燥密度は実験前に比較してほぼ全てのケースで増加していることが分かる。しかしながら、本実験データの範囲では入力エネルギーに対する傾向等は明確ではない。なお、最大乾燥密度の増加割合は平均で1.38倍であった。

図-10と図-11の結果から類推すると、入力エネルギーに関わらず含水比が明確に変化せず、一方で密度は増加傾向にあることより、敷砂は入力エネルギーの増加に対応して砂粒子が急激に圧縮され、より密実になるものと推察される。

3.6 各種衝撃力と入力エネルギーの関係

図-12には、各種最大衝撃力と入力エネルギーの関係を示している。図中の曲線は、衝撃力算定のための振動便覧式²⁾に基づき、敷砂厚 t と重錘径 D の比から決定される割り増し係数を考慮して算出した衝撃力（ラーメの定数： $\lambda = 500 \sim 4,000$ kN/m²，割り増し係数： $\alpha = (D/t)^{1/2} = 1.20 \sim 1.83$ ， $D = 1.0$ m， $t = 70 \sim 30$ cm）を示している。

図より、最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力は共に、敷砂厚 t の増加に対応してラーメの定数 λ が小さく示される傾向にあることが分かる。敷砂厚 $t = 70$ cm の場合には、 $\lambda = 1,000 \sim 2,000$ kN/m² 程度となっている。また、前述のように、敷砂厚 t が厚くなるに従い最大重錘衝撃力よりも最大伝達衝撃力の方が大きな値となっていることが分かる。これに対して敷砂厚が30 cmと薄い場合には、最大重錘衝撃力の方が最大伝達衝撃力よりも大きな値となっている。これは敷砂厚 t が薄いことにより、応力波の入射波と反射波の合成が十分に形成されない状態で現象が終了するためと推察される。

振動便覧式によって評価された衝撃力と実験結果を比較すると、敷砂厚の厚い $t = 70$ cm の場合には $t = 90$ cm 厚の場合と類似して、ラーメの定数が変化しない分布性状を示している。これに対して敷砂厚が $t = 50$

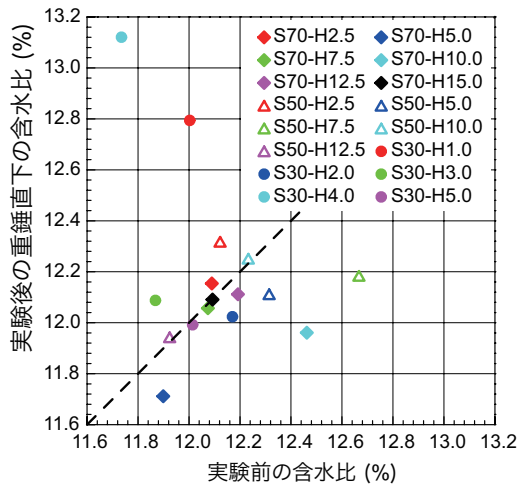


図-10 実験前後の敷砂緩衝材の含水比の関係

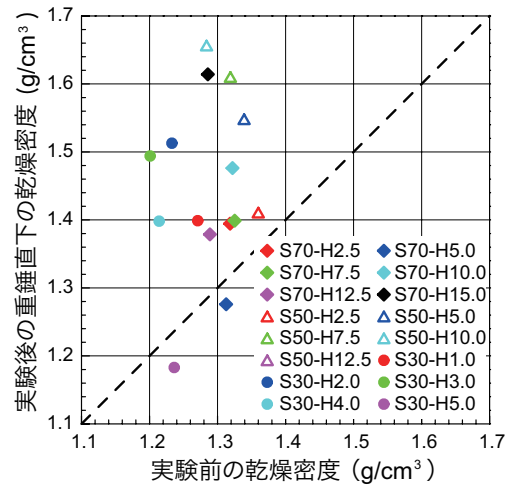


図-11 実験前後の敷砂緩衝材の最大乾燥密度の関係

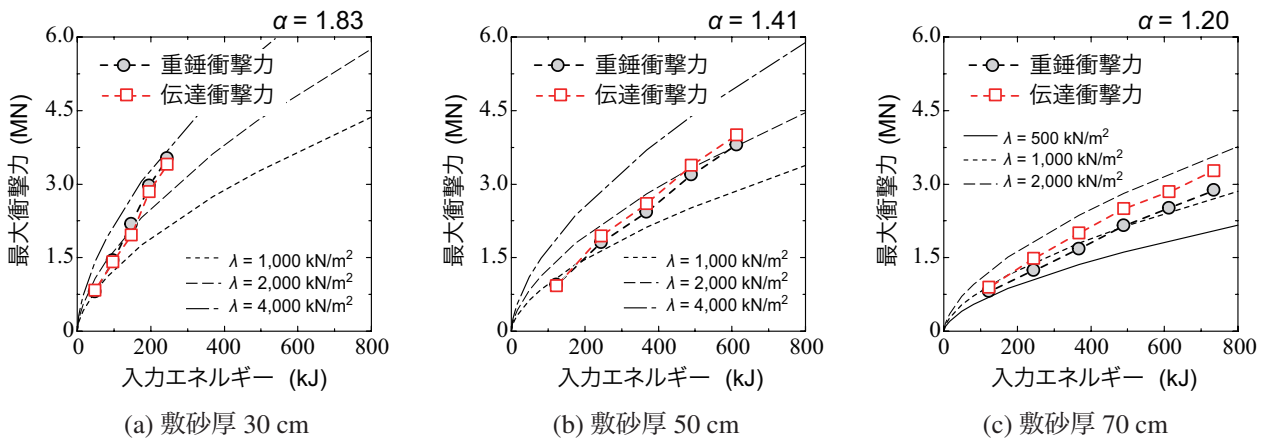


図-12 各種最大衝撃力と入力エネルギーの関係

cm, 30 cm の場合には、入力エネルギーの増加によりラーメの定数が変化するような分布性状を示している。これより、敷砂厚 t が 70 cm よりも小さい場合に対する振動便覧式の適用にあたっては、このような性状を十分認識する必要があるものと判断される。

以上より、敷砂厚が 70 cm 程度よりも小さい場合に対しても精度の高い各種の最大衝撃力を算定するためには、振動便覧式におけるラーメの定数や割り増し係数の適切な算出方法を構築する必要があるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、敷砂緩衝材の数値解析に用いる材料構成則モデルの設定手法を構築するための基礎的研究として、敷砂緩衝材の厚さをパラメータとした 5 ton 重錘を用いた大型重錘落下衝撃実験を実施した。本研究により得られた知見を整理すると、以下の通りである。

- 敷砂厚が薄い場合における重錘衝撃力および伝達衝撃力はほぼ類似の応答波形性状を示し、衝撃荷重初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第 1 波とそれに続く正弦半波状の第 2 波から構成される。
- 敷砂厚が薄い場合における重錘の貫入量の時間分布は折れ線状になり、その折れ点と重錘衝撃力波形の関係を特定することができた。この第 1 折れ点は最大重錘衝撃力発生時と、また第 2 折れ点は第 2 波目の最大応答値発生時とほぼ対応することが明らかになった。
- 敷砂厚が薄い場合における最大伝達衝撃力は、いずれの条件においても重錘衝撃力よりも大きな値を示す。また、最大伝達衝撃力/最大重錘衝撃力の値は、敷砂緩衝材の厚さが $t = 70$ cm の場合で 1.1 ~ 1.2 程度となり、敷砂厚が薄くなるにしたがって小さな値を示す。
- より厳しい落石条件下に対しても精度の高い最大衝撃力の算定するためには、振動便覧式における

ラーメの定数や割り増し係数の適切な算出方法を構築する必要がある。

謝辞

本論文を取り纏めるに当たり、室蘭工業大学大学院木幡行宏教授、栗橋祐介講師をはじめ、構造力学研究室の鹿嶋辰紀氏、また、名古屋工業大学大学院前田健一教授、内藤直人氏、ハイスピードカメラによる計測、解析には IDT ジャパンの安藤幸司氏、山口明博氏に多大なる御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通白書, pp.210, 2012.7
- 2) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6.
- 3) 今野久志, 岸 徳光, 石川博之, 三上 浩: 敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, 2006.7
- 4) 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志, 牛渡裕二, 保木和弘: 2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験: 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1181-1193, 2011.3
- 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, Vol.55A, pp.1388-1398, 2009.3
- 6) 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, 2011.3
- 7) 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, Vol.55A, pp.1225-1237, 2009.3
- 8) 牛渡裕二, 川瀬良司, 吉井康訓, 岡田慎哉, 岸 徳光: 小型 RC 製アーチスラブ模型の弾塑性衝撃応答解析, 第 9 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.37-42, 2008.12
- 9) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 10) 岸 徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 山口 悟, 川瀬良司: 重錘落下衝撃荷重を受ける 1/2 スケール RC 製ロックシェッド模型に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.1029-1040, 2012.3
- 11) 今野久志, 岸 徳光, 西 弘明, 山口 悟, 岡田伸之: 敷砂緩衝材の緩衝特性に関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.1051-1063, 2012.3
- 12) 内藤直人, 前田健一: DEM 解析を用いた落体形状の異なる緩衝砂の衝撃力伝達挙動, 土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会, III -324, 2012.9
- 13) 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志, 牛渡 裕二, 保木 和弘: 2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1181-1193, 2011.3.
- 14) 土木学会: 構造工学シリーズ 8, ロックシェッドの耐衝撃設計, P70, 1998.11
- 15) 羽柴寛文, 前田健一, 内藤直人, 山口 悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石特性の異なる水平堆積層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.443-454, 2012.9.

(2012 年 9 月 28 日受付)