

(46) 敷砂緩衝性能への重錘径の影響

EFFECTS OF WEIGHT DIAMETER ON SHOCK ABSORBING CAPACITY OF SAND CUSHION

佐藤昌志*, 西弘明**, 岸徳光***, 音田奨****

Masashi SATO, Hiroaki NISHI, Norimitsu KISHI and Susumu ONDA

*北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室(〒062 札幌市豊平区平岸1-3)

**工修 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室(〒062 札幌市豊平区平岸1-3)

***工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科(〒050 室蘭市水元町27-1)

****北海道PC防災技術協会(事務局:〒004 札幌市厚別区大谷地西1-10-1日本サミコン(株内))

キーワード: 緩衝性能, 重錘径, 敷砂, 密度

(shock absorbing capacity, weight diameter, sand, density)

1. はじめに

現在, さまざまな研究機関において, 落石による衝撃問題に関する研究が行われている。そのアプローチの手順は通常, 第1段階が落石の衝撃力, 第2段階は緩衝材(砂や三層構造, EPS等を用いる)を介して構造物へ伝達する衝撃力(以降, 伝達衝撃力と称す)である。最後の段階において, この伝達衝撃力が作用する構造物の応答・挙動が問題となる。この伝達衝撃力を正確に把握できなければ, その構造物に対して過大設計や過小設計を行ってしまうこととなる。しかし, 現段階ではこの伝達衝撃力を簡易な方法で推定することが困難であるため, 落石の衝撃力から構造物を設計することとなる。この落石の衝撃力は, 通常敷砂を緩衝材として用いる場合には「落石対策便覧(日本道路協会発行)」に記載されている推定式(以下, 便覧式と称す)に則って算出している。この便覧式は, 落石が球形でその比重を2.6と仮定しているものである。

本研究では敷砂を緩衝材として用いる場合に対して重錘(落石)の単位体積重量を変化させて実験を行い, 敷砂の緩衝性能とその挙動について検討を行った。

2. 実験概要

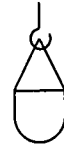
2.1 実験方法

図-1に実験の概略図を示す。本実験に用いた基礎は, 剛基礎と見なせるよう厚さ1mのコンクリート製とした。その寸法は縦横が6.8m×6.8mである。基礎上には4m×4mの敷砂槽を設置し, 重錘を所定の高さまでトラッククレーンで吊り上げた後自由落下により敷砂へ衝突させることにより実験を行った。重錘はいずれも鋼製で, 図-2に示すようにG3-AからG5-Bの4種類用いた。重量の調整は重錘内部にコンクリートや鉛塊を充填することにより行っている。表-1に重錘の特性を示す。

実験に用いた敷砂は, 比重2.53, 吸水率2.45%の石狩当別産で, 均等係数は表-2に示すように $U_c=4.11$ であった。敷砂は20cmごとに足踏みによって締め固めを行い, 所定の高さに整地している。

測定項目は, 重錘加速度とコンクリート基礎面に埋設したロードセルから得られる伝達衝撃応力および重錘の敷砂への最終貫入量である。

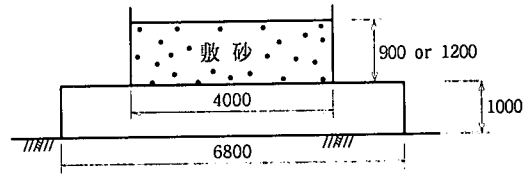
実験は、表-3に示しているように4種類の重錘について、敷砂厚を $h=90\text{cm}$, 120cm , 落下高さを $H=5\text{m}$ から 30m の間で変化させた合計38ケースについて行っている。



2. 2 重錘加速度計およびロードセル

本実験では、重錘加速度を得るために重錘中心底部にひずみゲージ式加速度計を2個取り付けられている。

本研究では、この重錘加速度に重錘質量を乗じたものを重錘衝撃力としている。また、基礎上への伝達衝撃力を算出するために、コンクリート基礎上にコンクリート表面と受圧面の高さが水平になるようにロードセルを埋設している。このロードセルは最小間隔を 10cm として一列に合計25個設置している。これらのロードセルから得られた応力を重錘の落下中心を軸として積分した結果を伝達衝撃力としている。



単位(mm)

図-1 実験装置

2. 3 計測システム

実験で用いられた計測システムのフローチャートを図-3に示す。加速度計などのセンサーから得られる信号は、応答周波数が $\text{DC} \sim 50\text{kHz}$ のシグナルコンディショナーを介して応答周波数が $\text{DC} \sim 40\text{kHz}$ のデータレコーダに一括収録している。各波形の再生は重錘加速度の1波形を共通のトリガーとして使用して時間軸を固定し、サンプリング間隔を $100\mu\text{sec}$ で A/D 変換を行った後ワークステーションを用いて各種のデータ処理を行っている。

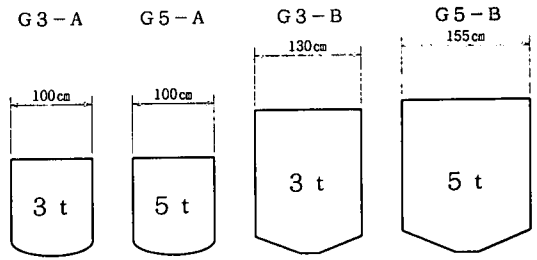


図-2 重錘

3. 実験結果および考察

表-3に実験結果の一覧を示す。ここには、各ケースごとの重錘衝撃力、伝達衝撃力および両者の比や重錘衝撃力継続時間、伝達衝撃力継続時間および両者の比などがまとめられている。重錘衝撃力と伝達衝撃力はそれぞれの最大値を示してある。重錘衝撃力波形は図-6に示されたとおりであるが、G3-B、G5-Bタイプの重錘衝撃力波形には顕著な"二こぶ"波形が見られる場合がある。このような場合には、"二こぶ"それぞれの大小関係や時間的関係などについても検討をしなくてはならないと考えられるが、现阶段では"二こぶ"に確実に分離する方法が見いだせなかった。これより両者の最大値を用いることとした。

3. 1 重錘の単位体積重量と衝撃力との関係

図-4に実験から得られた重錘衝撃力(図中Wで示す)と伝達衝撃力(図中Tで示す)および便覧式のラーメの定数を変化させて算出した最大衝撃力(図中入で示す)

表-1 重錘の特性

重錘タイプ	質量 $M(\text{t})$	比重	単位面積当たり質量 (t/m^2)	直径 $D(\text{m})$
G3-A	3	5.73	5.73	1.0
G5-A	5	9.55	9.55	1.0
G3-B	3	2.60	2.26	1.3
G5-B	5	2.60	2.65	1.55

表-2 敷砂材の粒度試験結果

10%粒径 $D_{10}(\text{mm})$	30%粒径 $D_{30}(\text{mm})$	60%粒径 $D_{60}(\text{mm})$	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'
0.28	0.60	1.15	4.11	1.12

を示す。横軸は $\sqrt{2gH}$ で求められる重錘の衝突速度とした。便覧式は式(1)に示すとおりであるが、この式の最初の定数項2.455は、球状の落石の単位体積重量を2.6 tf/m³仮定した場合に定まる値である。

これらの図から、実験で得られた重錘衝撃力は、上記便覧式のラーメの定数がほぼ50~250tf/m²の場合に相当し、同じく伝達衝撃力は180~900tf/m²の範囲にあることが明らかとなる。

ここで、重錘の相違による比較を行ってみることとする。同条件のG3-Aタイプの重錘衝撃力をG3-Bタイプの重錘衝撃力で除した値の単純平均値(以下、WF_s値と称す)

を計算すると0.76になる。同様に、同条件のG5-Aタイプの重錘衝撃力をG5-Bタイプの重錘衝撃力で除した値の単純平均値(以下、WF_s値と称す)を計算すると0.60になる。すなわちBタイプの重錘による衝撃力の方がAタイプの重錘による衝撃力より31%~67%ほど大きいことがわかる。

同様に、伝達衝撃力について算出すると、同条件のG3-Aタイプの重錘の伝達衝撃力をG3-Bタイプの伝達衝撃力で除した値の単純平均値(以下、TF_s値と称す)を計算すると1.18になる。同じく、G5-A、G5-Bの場合ではTF_s=0.72となった。すなわち、伝達衝撃力の場合のTF_s値は、重錘の重量が3tfと5tfとで大小関係が逆転した。

一方、便覧式の落石の単位体積重量を表-1で示されているG3-AとG5-Aの比重から導き直すと、それぞれ式(2)、(3)のようになる。両式の定数項2.329、2.250は、それぞれ式(1)の定数項2.455の95%、92%である。

$$P = 2.445 \cdot W^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (1)$$

$$P_{3A} = 2.329 \cdot W^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (2)$$

$$P_{5A} = 2.250 \cdot W^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (3)$$

ここに、W：落石重量(tf)

λ：ラーメの定数(tf/m²)

H：落下高さ(m)

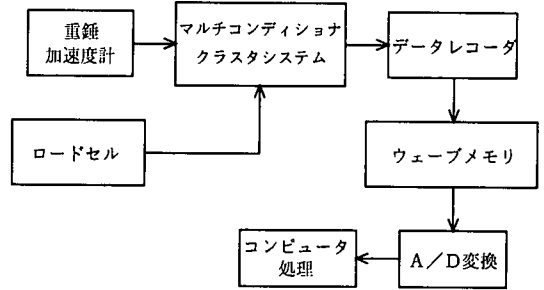


図-3 計測システム

以上より、今回の実験の範囲内においては、重錘衝撃力の実験値も便覧式による計算結果も、落石の単位体積重量が大きくなるにつれ落石衝撃力は小さくなる傾向のあることがわかった。

伝達衝撃力については、前述のようにTF_s値の大小関係が逆転したこともあり、明確な傾向は見いだせなかった。

3. 2 重錘の単位体積重量と伝達衝撃力との関係

図-5に伝達衝撃力(T)を重錘衝撃力(W)で除した値(以下、T/Wと称す)と重錘の衝突速度との関係を重錘の形式ごとにまとめたグラフを示す。G3-A、G5-AタイプのT/Wは単純平均で2.00であり、G3-B、G5-BタイプのT/Wは同じく1.36であった。この様に両者のT/Wが大きく異なることがわかったが、伝達衝撃力そのものには大きな違いはなく、同条件の値で比較するとG3-B、G5-Bタイプ伝達衝撃力の方が15%ほど大きいことがわかった。また、特に図では示さないが、単位体積重量がより小さいG3-B、G5-Bタイプの重錘による衝撃土圧の分布範囲がG3-A、G5-Aタイプのものより広いことも確認された。

これまでT/Wに関していくつかの報告がなされている。三層緩衝構造の場合は1以下であるが、敷砂を緩衝材とした場合はおよそ1~2の間であるとされている^{1)~3)}が、本実験の結果もこれらと合致することがわかった。

3. 2 重錘の単位体積重量と伝達衝撃力との関係

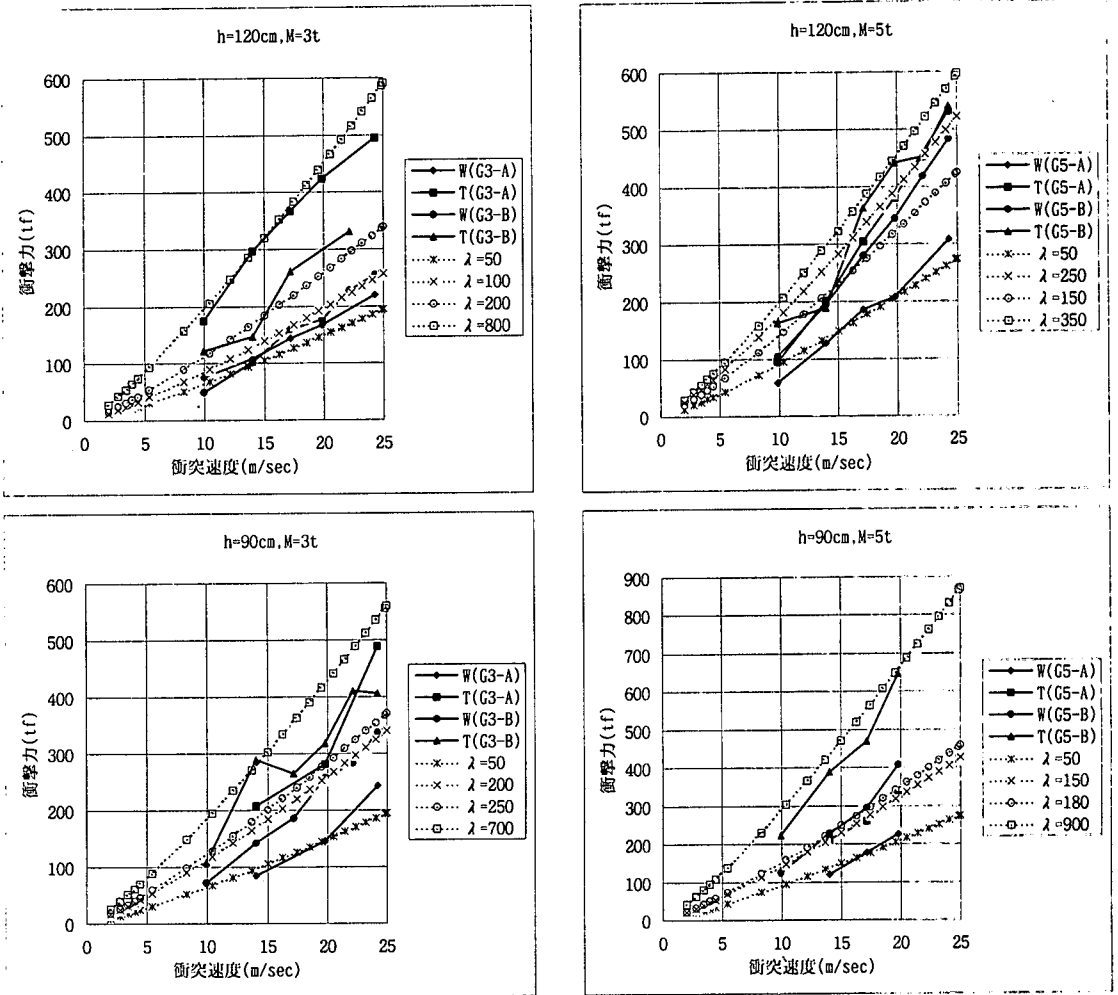


図-4 重錘の単位体積重量と衝撃力との関係

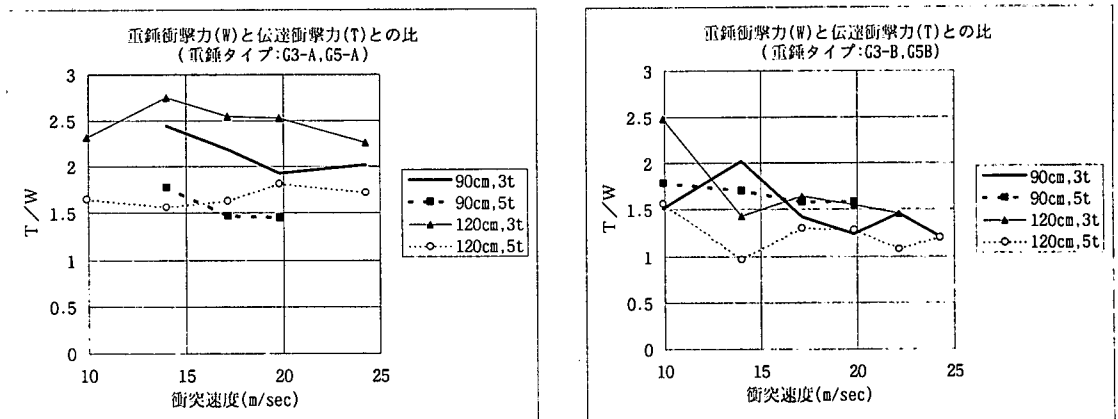


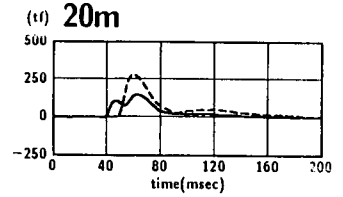
図-5 重錘衝撃力と伝達衝撃力との比

表-3 実験結果一覧表

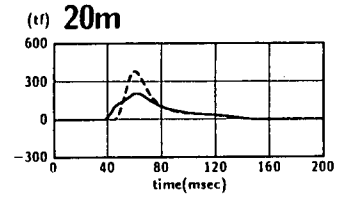
実験 ケース 番号	重錘 の タイプ	敷砂 厚 (cm)	落下 高さ (m)	最大 重錘 衝撃力 ①(tf)	最大 伝達 衝撃力 ②(tf)	② — ①	重錘衝 撃力継 続時間 ③	伝達衝 撃力継 続時間 ④	④ — ③
1	G3-A	90	10	84.42	207.10	2.45	155.60	132.70	0.85
2	"	"	20	146.30	282.02	1.93	138.20	151.60	1.10
3	"	"	30	242.62	489.68	2.02	123.50	113.00	0.91
4	G3-B	90	5	72.49	109.67	1.51	129.60	54.00	0.42
5	"	"	10	142.71	288.48	2.02	119.40	87.20	0.73
6	"	"	15	186.18	264.08	1.42	134.70	90.40	0.67
7	"	"	20	256.21	318.38	1.24	111.00	78.70	0.71
8	"	"	25	281.96	411.33	1.46	105.90	88.70	0.84
9	"	"	30	336.75	406.29	1.21	104.20	90.60	0.87
10	G5-A	90	10	118.79	211.05	1.78	156.00	128.20	0.82
11	"	"	15	176.45	260.97	1.48	150.20	117.00	0.78
12	"	"	20	225.20	327.85	1.46	137.60	93.80	0.68
13	G5-B	90	5	124.45	222.79	1.79	125.60	109.00	0.87
14	"	"	10	227.83	389.71	1.71	122.60	98.20	0.80
15	"	"	15	294.87	469.42	1.59	108.80	97.40	0.90
16	"	"	20	407.02	647.42	1.59	121.20	94.00	0.78
17	G3-A	120	5	75.43	175.06	2.32	109.20	151.60	1.39
18	"	"	10	107.70	296.29	2.75	113.60	173.40	1.53
19	"	"	15	143.97	366.45	2.55	139.60	133.60	0.96
20	"	"	20	167.58	423.26	2.53	114.40	166.40	1.45
21	"	"	30	218.86	495.56	2.26	146.20	160.20	1.10
22	G3-B	120	5	49.58	122.75	2.48	136.60	74.70	0.55
23	"	"	10	102.71	146.82	1.43	133.30	80.90	0.61
24	"	"	15	159.23	261.45	1.64	109.00	81.60	0.75
25	"	"	20	176.52	---	---	124.60	---	---
26	"	"	25	226.73	331.05	1.46	117.60	82.30	0.70
27	"	"	30	254.54	---	---	110.30	---	---
28	G5-A	120	5	57.78	95.93	1.66	140.80	129.60	0.92
29	"	"	10	127.96	201.47	1.57	173.80	113.40	0.65
30	"	"	15	186.42	305.36	1.64	126.20	109.40	0.87
31	"	"	20	208.28	380.39	1.83	110.60	96.20	0.87
32	"	"	30	307.04	530.78	1.73	110.40	100.00	0.91
33	G5-B	120	5	103.91	163.17	1.57	109.80	64.20	0.58
34	"	"	10	195.26	189.53	0.97	123.40	86.80	0.70
35	"	"	15	279.48	362.44	1.30	134.20	99.00	0.74
36	"	"	20	345.03	441.84	1.28	127.00	100.40	0.79
37	"	"	25	418.91	452.10	1.08	133.40	93.20	0.70
38	"	"	30	482.89	540.61	1.12	119.40	102.40	0.86

(注) : 重錘衝撃力継続時間と伝達衝撃力継続時間の単位は(msec)

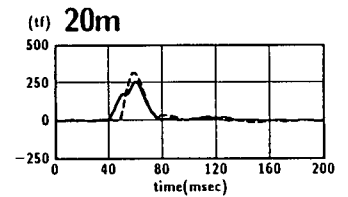
敷砂厚90cm, 重錘タイプG3-A



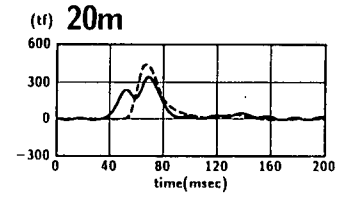
敷砂厚120cm, 重錘タイプG5-A



敷砂厚90cm, 重錘タイプG3-B



敷砂厚120cm, 重錘タイプG5-B



— 重錘衝撃力
- - - 伝達衝撃力

図-6 衝撃力の径時変化

3. 3 重錘衝撃力および伝達衝撃力の経時変化

図-6には実験条件が、敷砂厚90cm, 120cm, 重錘重量5tf, 3tf, 重錘タイプG3-A, G3-B, G5-A, G5-Bとして落下高さが20mの場合に得られた重錘衝撃力と伝達衝撃力の径時変化を示した。ここでは他の落下高さの条件時における波形を示してはいないが、すべての落下高さの条件において、下記のような5つの点が明らかになった。

- (1) 敷砂厚120cm, 重錘タイプG5-Bの条件の場合と敷砂厚90cm, 重錘タイプG3-Aの条件の場合における重錘衝撃力の波形は、ピークが2つある”二こぶ”状を呈しており、その最大値は2番目のピークの方が大きい。その他の場合は”二こぶ”が不明瞭で、ピークが2つあるとは断言できない。
- (2) 重錘衝撃力波形の第2ピークもしくは第2ピークと考えられる付近に伝達衝撃力のピークが現れる。
- (3) 敷砂厚120cmの条件において、G5-Bの伝達衝撃力波形の立ち上がりはG5-Aのそれより遅れて立ち上がる。

- (4) 落下高さが増加するにつれて、重錘衝撃力波形の立ち上がり時刻に対する伝達衝撃力波形の立ち上がり時刻の遅延時間が小さくなる傾向が確認される。
- (5) 重錘衝撃力の継続時間は重錘タイプの相違による影響は受けないが、伝達衝撃力継続時間はG3-A、G5-Aタイプの重錘による場合の方が25%ほど長く、130msec(単純平均値)程度であった。

4. まとめ

敷砂緩衝性能への重錘径すなわち重錘の単位体積重量の影響について若干の考察を行った。本研究より、実験の範囲内で得られた結果を整理すると、

- ① 重錘衝撃力および便覧式による最大衝撃力は、その減少率は異なるが、ともに重錘(落石)の単位体積重量が大きくなると衝撃力は小さくなる。
- ② 重錘衝撃力を便覧式に当てはめると、ラーメの定数はおよそ50~250tf/m²であり、同様に伝達衝撃力のラーメの定数は180~900tf/m²の範囲に分布している。
- ③ 重錘の単位体積重量が大きい方(G3-A、G5-A)のT/Wは2.00であり、小さい方(G3-B、G5-B)のT/Wは1.36であったが、伝達衝撃力そのものには大きな差はない。しかし、伝達衝撃応力の分布範囲は重錘タイプ G3-B、G5-Bによる場合の方が大きい。
- ④ 敷砂厚が120cmで重錘タイプがG3-Bの条件では重錘波形に"二こぶ"が現れるが、それ以外では不明瞭である。また、その第2ピーク付近に伝達衝撃力のピークが現れる。
- ⑤ 敷砂厚120cmの条件において、G5-Bの伝達衝撃力波形の立ち上がりはG5-Aのそれより遅れて立ち上がる。また、落下高さが増加するにつれて、重錘衝撃力波形の立ち上がり時刻に対する伝達衝撃力波形の立ち上がり時刻の遅延時間は小さくなる。

以上のように、重錘の単位体積重量をパラメータとして比較することによって、いくつかの点が明らかになって来ると同時に不明確な点もわかってきたように思われる。同様の研究はこれまでもいくつかなされているが^{4)~6)}、本研究も含めて、重錘衝突速度、重錘重量、重錘単位体積重量、重錘底面形状、緩衝材厚、緩衝材特性、緩衝材の構造、敷砂材槽の広さおよび基礎や地盤の剛性(もしくは構造物の剛性)など影響のありそうな各要因を網羅的に研究し報告された例は未だなされていない。

重錘や緩衝材および構造物の挙動・応答を明らかにするには、この様な網羅的な研究が必要と思われるので、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 中野修, 岸徳光, 菅田紀之, 三上隆, 安藤智啓: 緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討, 第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム 講演論文集, pp.13-16, 1993
- 2) 中野修, 西弘明, 松岡健一, 小山靖史: 三層緩衝構造の芯材RCスラブの剛性が緩衝性能に与える影響。第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム 講演論文集, pp.188-191, 1993
- 3) 米田義弘, 鷺田修三, 古賀泰之, 松葉美晴, 佐藤彰: 落石覆工に作用する落石衝撃力に関する重錘落下実験, 第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム 講演論文集, pp.161-166, 1993
- 4) 佐藤昌志, 西弘明, 佐藤京, 松岡健一: 敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型実験, 土木学会北海道支部 論文報告集, pp.198-203, 1995
- 5) 建設省土木研究所動土質研究室, 日本サミコン(株): 平成3年度落石衝撃力に関する重錘落下実験業務 報告書, pp.105-110, 1992
- 6) 福本彦吉, 大島昭彦, 高田直俊: 重錘落下による打撃応力波形と底部土圧波形, 土木学会第49回年次学術講演会 概要集, pp.1436-1437, 1994