

落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について

A DATA BASE OF ROCK FALLING TESTS AND AN ESTIMATION OF
IMPULSIVE LOADS BY ROCK FALLS

吉田 博* 榊谷 浩** 佐藤 真*** 井原 朋美****

By Hiroshi YOSHIDA, Hiroshi MASUYA, Makoto SATOU and Tomomi IHARA

Design load of rock-sheds for rock falls on them has not yet been rationally established. Therefore the data base of rock falling tests have been made based on many experimental data, which are assembled and investigated by authors. In this study, firstly, general methods of rock falling tests and the contents of the data base are explained and the method of estimation of impulsive loads using measured earth pressures are showed. Secondnaly, for three kinds of sand cushion, properties of impulsive load by rock falls are investigated. Then impulsive load is modeled using a mass of rock and a falling height. Finally, for the sand cushion which has a good capacity to absorb impulsive load, design load of rock-sheds for rock falls has been proposed.

1. まえがき

落石対策は、落石の発生を予防する発生源対策と、落石が生じた場合に道路に被害を与えないように、あるいは万一落石が道路に達した場合に被害を最小にするために斜面途中や道路上で成される防護対策の二つに大きく分類される。後者の対策の一つに、斜面下の道路を全面的に覆ってしまい、落石が道路に直接落下するのを防ぐ落石覆工がある¹⁾。これは一種のトンネル構造であり、ロックシェッドとも呼ばれ、種類によっては洞門工とも呼ばれる。落石覆工は、現在までに、鉄筋コンクリート製のもの、プレストレストコンクリート製のものそして鋼製のものが建設されており、通常、比較的剛性の大きい桁を有する屋根部と、それを支える柱より構成されている。また、道路の山側では、柱の代りに擁壁で支える場合が多いようである。

落石問題には、落石の発生を始めとして不明な問題が多いが、そのなかでも、落石が落石覆工に落下した場合の衝撃力の合理的な推定法は、まだ十分には確立されていない。落石覆工に作用する落石による衝撃力に関し、我国で最初に行なわれた鋼材倶楽部の実験²⁾以来、断片的ではあるが各種の実験が行なわれ、報告書にまとめられ発表されてきた^{3~20)}。昭和57年からは、金沢大学において、本格的な落石実験が集中的に行なわれるに至り、サンドクッションの種類や落石防護工の構造はある範囲に限られてはいるが、衝撃特性や落石防護工における衝撃係数の考え方が明らかにされてきている^{12~15)}。しかし、サンドクッションに

* 工博	金沢大学教授	工学部土木建設工学科	(☎920	金沢市小立野2丁目40-20)
** 工修	金沢大学助手	工学部土木建設工学科	(☎920	金沢市小立野2丁目40-20)
*** 工修	鹿島建設株式会社情報システム部		(☎107	東京都港区元赤坂1丁目2-7)
****	金沢大学技官	工学部土木建設工学科	(☎920	金沢市小立野2丁目40-20)

関しては、標準砂層厚を90cmとし、れきの使用には注意が必要であると落石対策便覧¹⁾に記述されているのみであり、サンドクッションの種類により衝撃力特性がどのように異なるか、またサンドクッションとしてどのような砂を用いたらよいか等は、まだ明らかにされていない。

そこで、著者らは、著者らが行なってきた落石実験のデータを蓄積し、また、過去に行なわれた実験の数値データの収集も行ない、データベース化を行なってきた。ここでは、このようにして作成された落石の衝撃力に関するデータベースの内容について報告するとともに、各種の落石実験結果が収められている落石実験データベースの中で、著者らが行なった3種のサンドクッションを用いた実験結果を用いて、衝撃力の評価について検討してみた。

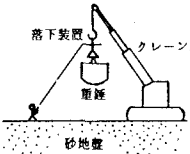
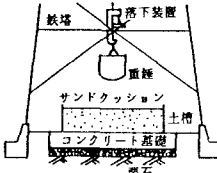
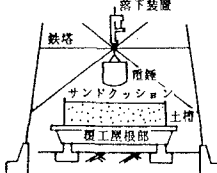
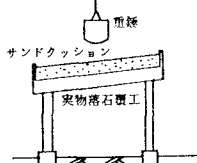
2. 落石実験および衝撃力算定法の概要

過去に行なわれた落石実験は、表-1に示すように4つの形式に分類できる。形式Aは自然砂層地盤を用いて、重錘衝突時の重錘の加速度の測定を行なったものであり、形式Bはさらにコンクリート基礎上に土槽を設置し、サンドクッション底での土圧分布の測定を行なったものである。形式Cは落石覆工の屋根部を水平に支持し、その上に土槽を設置し、重錘の加速度、サンドクッション底での土圧以外に、衝撃時の落石覆工屋根部の挙動を測定したものである。また形式Dは実物の落石覆工を用いて、構造の挙動を中心に測定したものである。ここでは、落石による衝撃力を算定する場合に重要である、サンドクッション底での土圧の測定を行なっている著者らによる落石実験を例に、落石実験の概要を述べる^{3,4)}。

図-1は実験の計測システムの概略を示したものである。実験はコンクリート基礎上に土槽を設け、その中に各種の砂を各種の厚さに敷きならしてサンドクッション材とした。そして、高さ24mの鉄塔上部に取り付けた電気ホイストクレーンによって、各種の重錘を各種の高さまで吊り上げ、自由落下させた。重錘質量は300, 1000, 3000 kgの3種とし、300, 1000 kgの重錘については、重錘底の形状を球形、円錐形、平面形の3種を、3000 kgのものについては、球形を使用した。

サンドクッション材に関しては、密度、含水比および静的貫入試験によるコーン値が測定されている。重錘落下時には、重錘に取り付けた加速度計による3方向の衝撃加速度および土槽中心より15~30cm間隔に配置された土圧計

表-1 過去の落石実験の概要

実験形式	実験の内容
A. 砂地盤上での落石実験 	海岸の海砂や堆積場の山砂等の自然砂地盤上に重錘を落下させ落下時の加速度を測定している。この加速度より、比較的容易に衝撃力を求めている(文献 7)
B. 土槽内のサンドクッション上への落石実験 	サンドクッションの衝撃力伝播吸収能を調べるために、コンクリート基礎上に土槽を設け、土槽内のサンドクッション上に重錘を落下させ、重錘の加速度およびサンドクッション底での土圧の測定を行なっている。(文献 1, 3, 4, 5, 6, 10, 11)
C. 落石覆工屋根上への落石実験 	落石覆工の屋根部にサンドクッションを敷き、重錘を落下させ重錘の加速度、サンドクッション底での土圧、覆工屋根部の各所での変位およびひずみ等の測定を行なっている。(文献 2, 8, 12, 13, 14, 15)
D. 実物落石覆工上への落石実験 	実物落石覆工上への落石実験を行ない、重錘の加速度、落石覆工の各所での変位およびひずみの測定を行なっている。(文献 9, 16, 17)

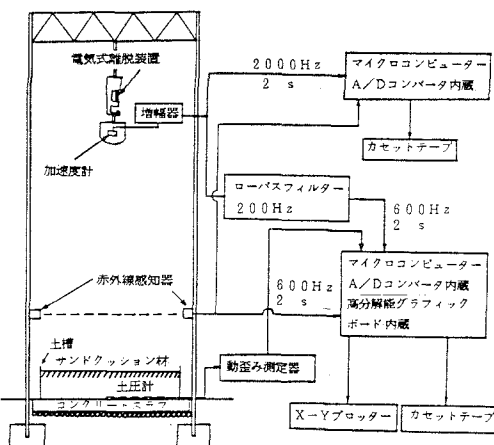


図-1 実験計測システム

によるサンドクッション底の各位置における衝撃土圧の測定が行なわれている。また、土槽が落石覆工屋根上に設置されている場合には、屋根部の各位置におけるたわみおよびひずみが測定されている。動的な測定データは動ひずみ計あるいは増幅器を介して、パーソナルコンピュータ（TEAC社製 PS-85, PS-80）によりA/D変換され、デジタルデータとしてカセットテープに記録されている。なお、重錘加速度については、A/D変換時に、2種類のサンプリング周波数（1kHz以上のものと1kHz以下のもの）が用いられている^{3,4}。

落石覆構造物に作用する衝撃力は、各時刻に作用する土圧を、その作用域について積分すれば得られる。すなわち、構造物に作用する時刻 t の土圧による衝撃力 $P(t)$ は、土圧分布を軸対称と仮定すると、

$$P(t) = 2\pi \int_0^{\infty} r p(r, t) dr \quad (1)$$

と表される。ここに、 $p(r, t)$ は重錘の落下点中心からの距離 r における時刻 t での土圧である。図-2は、3.

(3)および4. (1)で後述される3種のTYPEのサンドクッション（屈厚120cm）に対し、質量3000kgの球底の重錘が高さ10mより落下した場合について、任意の時間におけるサンドクッション底の各測定点での測定土圧をスプライン関数で補間し、連続な土圧分布として示したものである。また、図-3は、その場合の測定土圧より、式(1)を用いて求めた衝撃力の時間的変化を示したものである。ただし、ここでは衝撃力が生じるまでの時間を無視している。

衝撃力波形は、重錘質量、落下高さおよびサンドクッションの材質、状態により多種多様な波形パターンを示す。しかし、すべての波形が、図-4に示すように、(i)立ち上がってから、その上昇を終了するまでの上昇部分、(ii)上昇終了後の平衡部分、(iii)下降を始めてから零になるまでの減衰部分と大きく3つの部分に分けられると仮定すると^{12,13}、 $T = t_1 + t_2 + t_3$ は衝撃力の作用時間となる。なお、上述のように求まる土圧による衝撃力波形の最大値ならびに形状が、図-5に示すように、重錘の測定加速度に重錘質量を乗じて求まる衝撃力波形とは一般に異なることが明らかにされている^{3,4}。

3. 落石実験データベースの作成

(1) データベースの概要

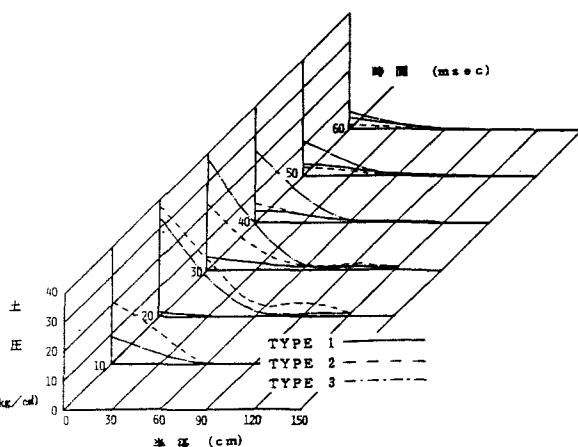


図-2 土圧分布の時間的変化
(球底3000kg 落下高さ10m)

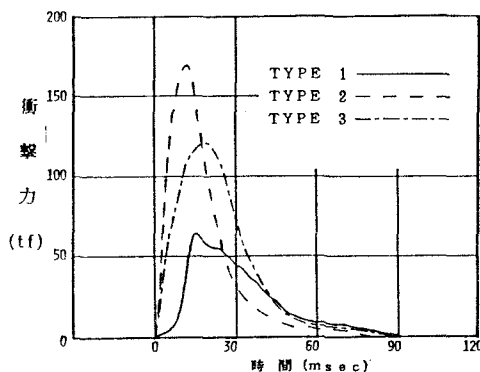


図-3 衝撃力の時間的変化
(球底3000kg 落下高さ10m)

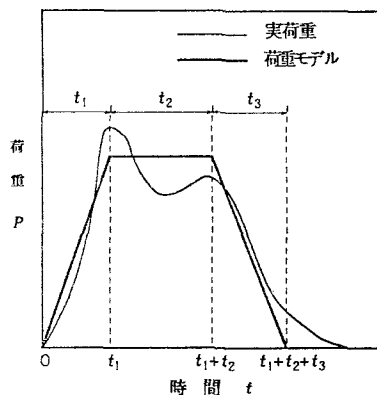


図-4 衝撃力のモデル化

落石実験データベース（R F D B : Rock-Fall Data Base）は、著者らが行った落石実験結果を中心に、その他、実験報告書より得られた実験結果^{2~20)}も含め、作成されたもので、現在、約2400件のレコードから成っている。本データベースは文献情報データベースと比較すると以下のような特徴を有している。

a) 落石実験データの特長

落石の衝撃力に関する研究は比較的歴史が浅く、与えられた諸条件に対する衝撃力の算定方法や規格化された試験方法もなく、構造物に与える衝撃力を実験的に算定するのに重要であると考えられる、サンドクッション底での土圧分布等の項目も、最近になりようやく明らかにされてきた段階である。現在までに行なわれてきた落石実験は、実験条件も測定項目も多種多様である。よってデータを一定の書式に従って整理する場合には専門家による工学的判断が必要となる。

b) データ分析・加工の必要性

落石実験データの原データは、通常多量の動的データよりなるが、それらのデータをすべてデータベース内に収めることは、データベースの容量を膨大なものにするのみならず、データの検索や利用にあたっては、処理を著しく複雑にするため、実用的とはいえない。そのため、データベースにデータを登録する前に、逐一動的実験データの分析・加工による特性値の抽出作業が必要とされる。

c) 拡張性のあるデータベースの作成

本データベースでは、文献データベースと同様に創成、参照、更新、追加および拡張といった処理が必要となるが、数値データベースであるため、その他にも、データの分析、比較、加工が容易にできるような拡張性のあるデータベースであることが必要である。

以上の点を考慮して、落石実験データベースは作成されている。データベースの利用以外のソフトウェアは、P L / I で作成されており、図-6にデータの登録とデータ処理の概要を示したが、本データベースの構築から利用に至るまでの流れは、大きく分けると

- i) データの収集と整理
 - ii) データベースへの登録
 - iii) データベースの利用
- の3段階に分けることができる。

(2) データの収集と整理

本データベースの内容は、主として著者らによる落石実験に基づいているため、他の実験報告書等より得

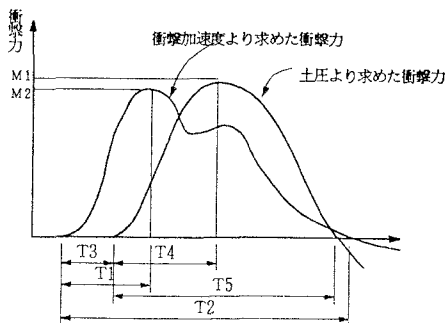


図-5 衝撃力波形

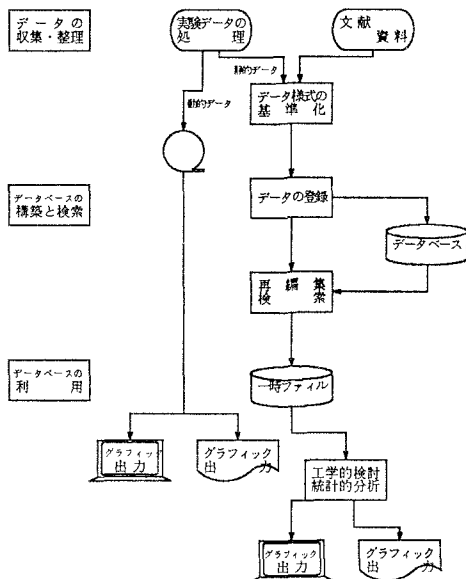


図-6 データの登録とデータ処理の概要

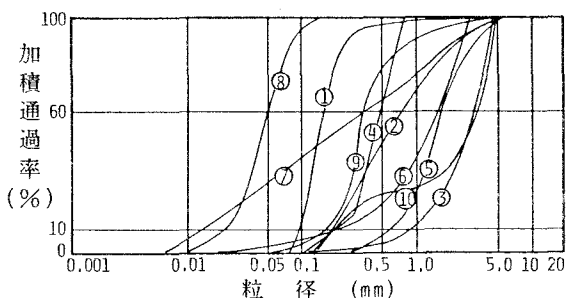


図-7 サンドクッションの粒径加積曲線

られる項目は、本データベースの項目をすべて満たしてはいないが、できる限り実験担当者に問合せる等して該当する項目を埋めるよう努力した。

本データベースの内容の詳細は付録に示す通りであり、内容は、i) 実験条件や測定条件を表す測定基礎データ、ii) 重錘の加速度に関するデータ、iii) 重錘の落下位置および発生土圧に関するデータ、iv) サンドクッション材の状態に関するデータ、v) 土圧より得られる衝撃力に関するデータに分けられる。主要な項目は以下の通りである。

- ①実験番号：用いた重錘重量・形状、サンドクッション材の種類・厚さ、落下高さ等がわかるように付けられている。
- ②実験日時：実験を行なった日付けと時刻。
- ③天候：天気、温度および湿度。
- ④実験種別：土槽が設置されている基礎の状態。（例えば、コンクリートスラブ上、PC桁上等）
- ⑤サンプリング・データ：高周波数（1kHz 以上）でサンプリングしたか、低周波数（1kHz 以下）でサンプリングしたか、それらの周波数、チャンネル数、データ数等、および、ローパスフィルターの使用の有無。

- ⑥高速サンプリング：高速サンプリング（周波数 1kHz 以上）の際の 3 方向の加速度成分および合成加速度の最大値
- ⑦低速サンプリング：低速サンプリング（周波数 1kHz 以下）の際の 3 方向の加速度成分および合成加速度の最大値および波形の諸特性値。
- ⑧落下位置：重錘の沈下量、落石位置の座標等。
- ⑨土圧：土圧計数、土圧計の種類、測定値の信頼性。
- ⑩サンドクッション材：サンドクッション材の含水比、密度およびその測定深さ等。
- ⑪コーン値：サンドクッション材の締め固めの程度を表すものとして、重錘落下前後での静的貫入試験より得られたコーン支持力の測定値およびその測定深さ。

表－2 落石実験データの種類および実験条件

実験 No.	重錘 重量 (tf)	重錘形状	落下 高さ (m)	ク ッ シ ョ ン 材	砂 層 厚 (cm)	土 圧 の 測 定	基 礎 支 持 条 件	文 献 番 号
1	0.3~3.0	球底, 椎底, 平底	5~20	1	90, 120	有	コンクリート基礎	3, 4
2	0.3~3.0	球底, 平底	5~20	2	70, 90, 120	有	コンクリート基礎	5, 6
3	0.3~3.0	球底, 平底	5~20	3	70, 90, 120	有	コンクリート基礎	5, 6
4	0.3~3.0	球底	3~13	7	-	無	堆積上の山砂上	7
5	0.3~3.0	球底	3~14	8	-	無	海岸の海砂上	7
6	0.3~3.0	球底	0.3~14	6	30~150	無	プレキャストPC落石覆工屋根部	8
7	1.0	球底	2~12	6	90	無	PC落石覆工	9
8	0.5	球底	2~13	-	90	無	PC落石覆工	20
9	0.1~0.3	球底, 椎底, 平底	2~8	9	30~90	有	コンクリート基礎 鋼床版 コンクリート床版	1, 11
10	0.3	球底	3	4	30~70	無	H鋼を並べた版	2
11	0.1~0.7	球底	1~7	4	30~110	無	合成版 (フランジシートとコンクリート)	2
12	0.3~1.0	球底	1~10	4	30~90	無	合成版 (H形鋼とコンクリート)	2
13	0.5~1.0	球底	3~15	5	50	無	鋼製ロックシェッド	2
14	0.3~3.0	球底, 平底	5~20	1	90, 120	有	PC落石覆工屋根部	12, 13
15	0.3~3.0	球底, 平底	5~20	1	90, 120	有	プレキャストPC落石覆工屋根部	14, 15
16	1.17	椎底	1.5~7.8	10	90	無	コンクリート製イ型落石覆工	16
17	0.5	球底	2~12	11	90	無	プレキャストPC落石覆工	17
18	0.3, 1.0	球底	15~20	2	60	無	鋼製落石防護壁屋根部	18
19	0.007	球底	0.1~3	12	30~60	有	コンクリート基礎上	19

表－3 サンドクッション材の特性値

クッション材	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	均等係数	曲率係数
TYPE 1	0.180	0.130	0.150	0.530	1.130
TYPE 2	0.180	0.330	0.780	4.330	0.780
TYPE 3	0.620	1.900	3.300	5.320	1.760
TYPE 4	0.190	0.350	0.460	2.400	1.400
TYPE 5	0.590	1.100	1.740	2.950	1.200
TYPE 6	0.190	0.710	1.570	8.300	1.690
TYPE 7	0.013	0.049	0.330	24.500	0.560
TYPE 8	0.022	0.035	0.052	2.400	1.050
TYPE 9	0.150	0.280	0.330	2.200	1.580
TYPE 10	0.200	1.300	3.000	15.500	2.800

⑫衝撃力：サンドクッション底での土圧データより得られる
衝撃力および最大値の生じた時間等。

⑬モデル衝撃力：衝撃力波形をモデル化（図－４）した時の
最大値、各種の時間等。

表－２は本データベースに現在収められている落石実験デ
ータの種類および実験条件を示したものである。また、図－
７および表－３は各実験に用いられたサンドクッション材の
粒径加積曲線と特性値を示したものである。

（３）データベースの構築と検索

本データベースは、インデックスファイルとデータファイ
ルの２つのファイルから成るファイル構成上の特徴を有して
いる。インデックスファイルには、レコードを検索する上で
のキーとなるデータが納められており、データファイルには、
実際に登録したデータが納め

られている。この方式により
データファイルに対して３通
りのアクセス方法が可能とな
っている。第１のアクセス方
法は、先頭レコードより順に
以後のレコードをアクセスす
るシーケンシャル・アクセス
方法、第２に、インデックス
ファイル中のキーを指定する
ことによってデータファイ
ル中の特定のレコードをアク
セスするランダム・アクセス
方法、そして第３に、インデ
ックスファイル中のキーを指定し、キーの示す特定のレコードから以後のレコードをシーケンシャル・アク
セスする方法である。

データの構成は、実験における１回の重錘落下で得られるデータ群を１レコードとし、１レコードを600
バイトとした。また、本データベースのモデルとしては、階層的データモデル（階層構造）を用いている
（付録参照）。この階層データモデルを使うことによるプログラミング上の有用性は多数あるが、データベ
ース構築や検索の際に、個々の項目の関連が適切に理解されるという特徴がある。このため、プログラム作
成には、階層構造の表現が可能なPL／I言語を使用した。

本データベースのデータモデル構成上の特徴として、測定データを処理することによって得られる個々の
登録項目に対して、その項目の内容の信頼性を表すコードを項目ごとに細かく設けた点が上げられる。項目
の信頼性を表すコードは、重錘衝撃加速度に対しては、鉛直および水平の２方向加速度成分と合成加速度の
４つの項目について、それぞれにこの信頼性を表す信頼性コードを設けた。同様に土圧については、各測定
点ごとに、コーン支持力、含水比、密度については、資料を採取した各深さごとにこのコードを設けた。こ
の方法によれば、１回の重錘落下によって得られる登録項目中に明らかに測定器の故障等に起因する信頼性
のない項目があったとしても、他の項目を正常なデータとして使用し得ることとなる。欠値についても同様
な方法を採用している。項目の信頼性には、「信頼できる」、「信頼できない」の２段階とした。このコー

表－４ 重錘とサンドクッション条件

サンドク ッション 材の種類	層 厚 (cm)	重錘質量 300kg		重錘質量 1000kg		重錘質量 3000kg
		球底	平底	球底	平底	球底
TYPE1	90	136	26	91	29	—
	120	—	—	—	—	20
TYPE2	50	12	—	10	7	—
	70	12	—	7	9	6
	90	14	—	13	12	8
	120	—	—	—	—	12
TYPE3	50	11	—	5	5	5
	70	11	—	10	11	—
	90	12	—	6	9	8
	120	—	—	—	—	10
数字はデータ数を示す						

表－５ 重錘落下条件と衝撃力

重錘落下条件		最大衝撃力								
		TYPE1			TYPE2			TYPE3		
		データ数	平均 (t f)	変動係数	データ数	平均 (t f)	変動係数	データ数	平均 (t f)	変動係数
300kg	5	37	11.2	0.394	4	10.4	0.356	3	9.2	0.043
	10	36	19.0	0.363	3	21.6	0.393	3	15.2	0.105
	15	34	25.2	0.290	4	29.8	0.317	3	29.3	0.149
	20	29	30.1	0.292	3	49.3	0.141	3	35.7	0.069
1000kg	5	27	17.9	0.210	4	35.4	0.440	2	51.4	0.067
	10	28	30.7	0.262	3	66.6	0.181	3	80.4	0.005
	15	27	53.5	0.318	3	120.2	0.157	—	—	—
	20	9	71.9	0.207	3	187.9	0.075	1	137.9	—
3000kg	5	7	51.0	0.323	3	99.3	0.070	3	61.6	0.100
	10	6	70.3	0.065	2	175.4	0.027	3	109.5	0.123
	15	7	84.4	0.351	3	226.0	0.144	3	145.3	0.150
	20	—	—	—	3	265.0	0.073	1	244.3	—

ドの付加はコンピュータ端末から日本語メニュー方式によって行なわれる。

(4) データベースの利用

本データベースに登録されたデータは、その利用にあたり、図-6に示すような再編集を経て、一時的なファイル（一時ファイル）に出力される。本データベースのデータの利用は、この一時ファイルのデータを利用する形式をとっている。この際、信頼性コード欄に「信頼できない」のコードが入っている場合は、再編集時に欠値として処理される。

一時ファイル中のデータの処理は、統計計算や図形処理に偉力を発揮するSAS(Stastical Analysis System)等のアプリケーションツールの利用によって、コンピュータによる作表・作図および単純統計から多変量解析までが即座に、且つ、容易に計算することが可能である。

4. 衝撃力の評価

(1) 実験条件

落石による衝撃力に関する重要な因子として、落石重量、落下高さ、サンドクッションの種類・状態が重要であることが、過去の研究より明らかにされているが、ここでは、サンドクッション底での土圧の測定データを有し、土圧からの衝撃力算定が可能である著者らの実験（表-2の実験番号1, 2および3）について検討してみることにする。

実験に用いたサンドクッション材の主な特性は、番号1, 2および3として表-3に、粒径加積曲線は図-7に示されているものである。以後、これらのサンドクッションを、それぞれ、TYPE 1, TYPE 2およびTYPE 3と呼ぶことにする。TYPE 1は、一般に現場で採取しやすいと考えられる山砂であり、本実験で用いたものでは、細粒分を含んだものである。TYPE 2は、手取川産（石川県石川北町）の川砂に内灘産（石川県内灘町）の浜砂を混ぜたものであり、一般コンクリート用細骨材として用いられているものである。TYPE 3は砕砂である。均等係数は、TYPE 1が小さく、TYPE 2およびTYPE 3ではそれに比べ2倍以上の大きな値である。表-4は、実験における重錘の種類と各サンドクッションにおける層厚の対応を示したものである。なお、TYPE 3の砂は、砕砂であり粒径が大きく排水が非常によいため、含水比の測定は行っていない。

(2) 衝撃力波形

前に示した図-3では、衝撃力の最大値は、TYPE 2

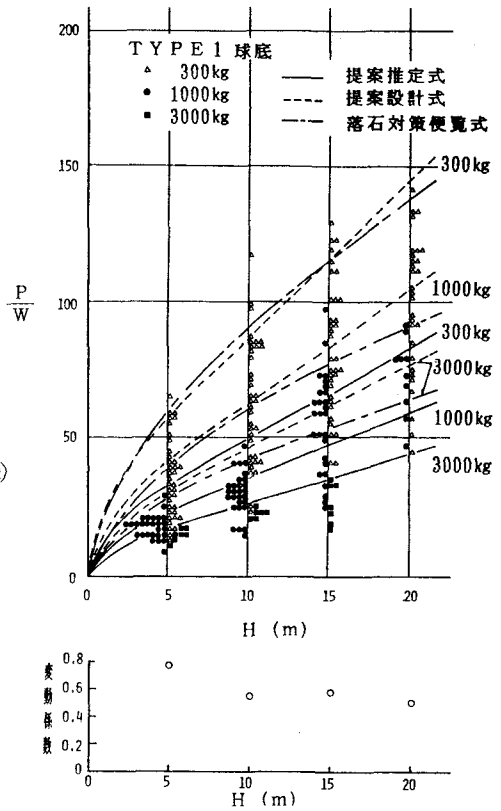


図-8 落下高さと衝撃力 (TYPE1)

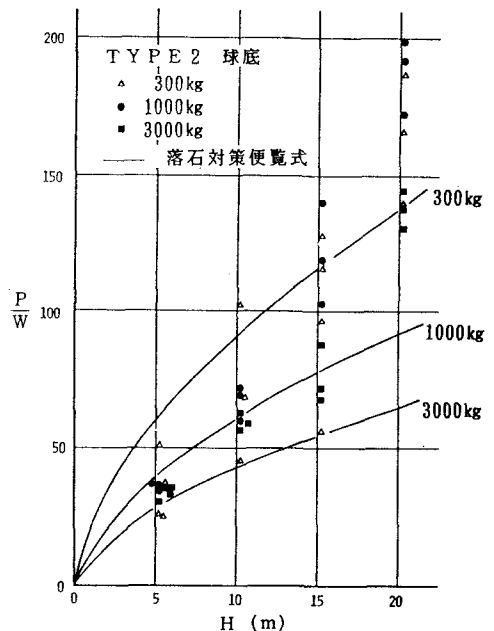


図-9 落下高さと衝撃力 (TYPE2)

が一番大きく、TYPE 3、TYPE 1と小さくなっている。特にTYPE 1は、他の2つのTYPEに比べはるかに小さいことがわかる。また、TYPE 1は、衝撃力の作用時間、すなわち衝撃力が発生してから零になるまでの時間が他の2つのTYPEに比べ長く、緩やかに減少していることがわかる。このように、TYPE 1は他の2つのTYPEに比べ、衝撃力の作用時間が長く、最大衝撃力が小さいので、緩衝効果のよいサンドクッションと推定される。

(3) 最大衝撃力と落下高さ

2. で述べた方法により、実験結果すべてについて衝撃力波形、最大衝撃力を求めた。表-5は、サンドクッションの種類および重錘落下条件別に、最大衝撃力の平均値および変動係数を示したものである。最大衝撃力は重錘質量および落下高さの増加に従い、単調に増加している。また、どのTYPEのサンドクッションにおいても、変動係数に有意な傾向は認められないが、それらは比較的大きな値であることがわかる。

最大衝撃力 P は重錘の重量 W と比例関係にあることが予想されるので、まず衝撃力をそれらの比 P/W をパラメータにとって調べてみることにする。図-8、図-9および図-10は、それぞれ、TYPE 1、TYPE 2、およびTYPE 3に対して、落下高さ H と重錘重量に対する最大衝撃力の比、 P/W の関係を示したものである。ここで、質量300kgと1000kgの重錘ではサンドクッションの層厚が90cmであり、質量3000kgの重錘では層厚が120cmである。また、データ数の多いTYPE 1については各落下高さにおける変動係数も示してある。なお、図中には次式で表される落石対策便覧式¹⁾が示されている。

$$P = 2.46 \lambda \sqrt{\frac{2}{5}} W^{\frac{2}{3}} H^{\frac{3}{5}} \quad (2)$$

ここに、 λ はサンドクッション材のラーメの定数であり、非常に軟らかい土で $100\text{tf}/\text{m}^2$ 、軟らかいもので $300 \sim 500\text{tf}/\text{m}^2$ 、固いもので $\lambda = 1000\text{tf}/\text{m}^2$ とされており、ここでは、設計でよく用いられている $\lambda = 100\text{tf}/\text{m}^2$ を用いた。また、 W は落石重量(tf)、 H は落下高さ(m)である。

TYPE 1の場合、どの落下高さにおいても、重錘重量が大きい程、 P/W が小さくなっており、最大衝撃力が重錘質量に単純に比例しないことがわかる。TYPE 2の場合、重錘質量300kgおよび1000kgでは、どの落下高さにおいても P/W に大きな違いは認められないが、質量3000kgの重錘では、質量1000kgと300kgの重錘に比べ、 P/W が小さいことがわかる。また、TYPE 2では、どの落下高さ、どの重錘質量においても、 P/W は、TYPE 1に比べ大きいことがわかる。特に、落下高さが大きく、重錘質量が

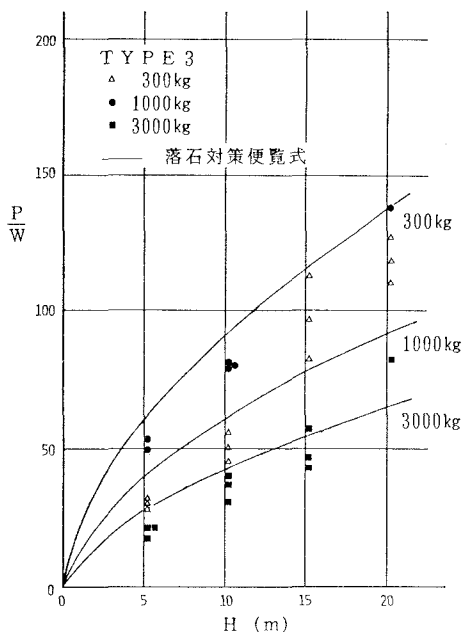


図-10 落下高さと衝撃力 (TYPE3)

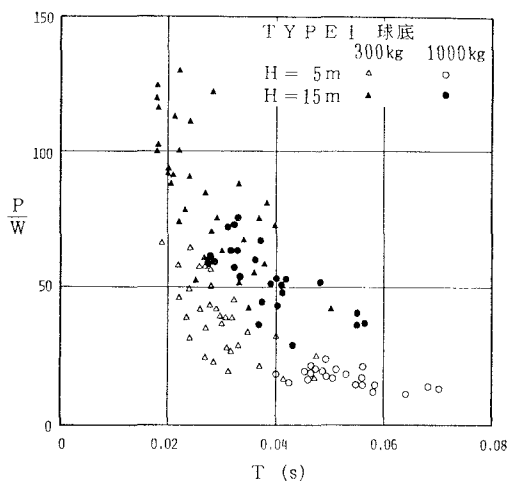


図-11 衝撃力と作用時間

大きい程、TYPE 1との違いが大きいようである。TYPE 3においても、TYPE 2と同様な傾向が認められる。

(4) 衝撃力と衝撃力の作用時間

落石の質量および衝突速度が同一であっても、サンドクッション底で発生する衝撃力による力積は、サンドクッション材の種類およびその状態により一般に異なる。しかし、同一のサンドクッション材を用いた場合、衝撃力の最大値は、衝撃力の作用する時間と密接に関係していることが予想される。

図-11は、TYPE 2のサンドクッションに対し、衝撃力の作用時間 T と重錘重量 W に対する最大衝撃力 P の比、 P/W の関係を質量300kgと1000kgの重錘を用い、落下高さが5mと15mの場合について示したものである。これより、質量および落下高さが同じであっても、 P/W および衝撃力の作用時間には、各々ばらつきが認められるが、 P/W が大きい場合は作用時間が小さいことがわかる。また、質量が同じであっても、落下高さが大きい程、すなわち、最大衝撃力が大きい程、わずかではあるが作用時間が短いことがわかる。さらに、落下高さが同じであっても、重錘質量が大きくなると、作用時間が長くなることがわかる。

落石落下条件が同じであっても、衝撃力が大きい程作用時間が短くなること、および重錘質量が大きい程作用時間が長くなることを考慮し、モデル波形の作用時間 T を P/W に乗じた PT/W 、すなわち、見かけ上の力積に相当するものと落下高さの関係を各サンドクッションについて示したものが、図-12、図-13、図-14である。TYPE 1の場合、図-8において認められていた重錘質量の違いによる衝撃力の違いが小さくなっていることがわかり、変動係数もかなり小さくなっていることがわかる。TYPE 2では、作用時間 T を考慮しても、図-9に比べ、それ程大きな変化は認められないが、TYPE 3では、重錘質量による違いが小さくなっていることがわかる。

(5) 衝撃力の作用時間のモデル化

前節では、衝撃力の作用時間を考慮し、 PT/W という形で評価すると、重錘質量が異なってもほぼ同じように衝撃力を評価できることがわかった。そこで、ここでは、緩衝効果がよく、測定データ数が多いTYPE 1のサンドクッションについて、衝撃力のモデル化を行なってみる。

図-15は、TYPE 1のサンドクッションについて、落下高さ H と衝撃力の作用時間 T の関係を、重錘質量別に示したものである。データにはかなりばらつきが認められ

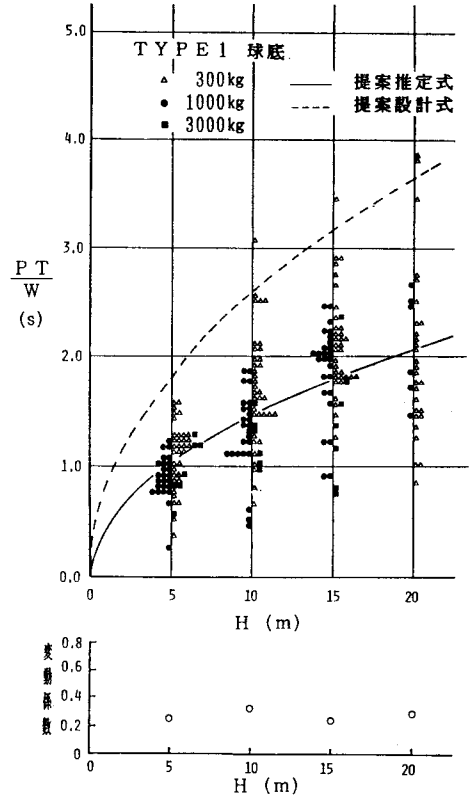


図-12 落下高さと衝撃力 PT/W (TYPE1)

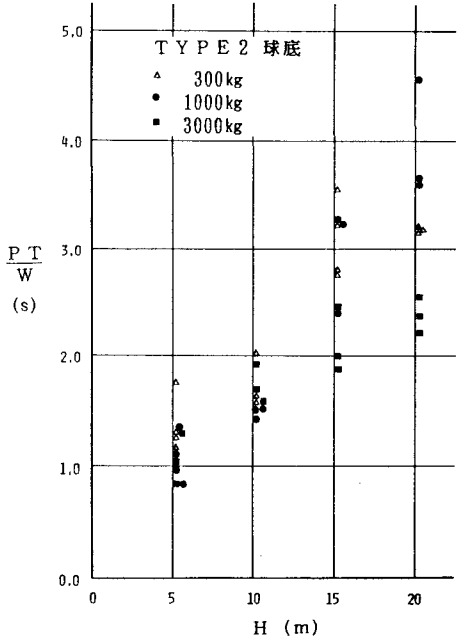


図-13 落下高さと衝撃力 PT/W (TYPE2)

るが、落下高さが増加すると作用時間は単調に減少していることがわかる。図-16は、やはりTYPE1で重錘の落下高さ10mの場合について、重錘重量 W と作用時間 T の関係を示したものである。重錘重量 W が増加すると作用時間 T は増加しているが、重錘重量が大きくなると増加率は低減しているようである。以上より、作用時間 T (s)が、落下高さ H (m)と重錘重量 W (tf)により

$$T = (a + bH)W^c \quad (3)$$

と表されると仮定し、最小2乗法により、定数 a 、 b 、 c を求めると $a=0.0481$ 、 $b=-0.000643$ 、 $c=0.270$ が得られた。このように求められた作用時間 T の近似式は図-15および図-16に示されている。

(6) 最大衝撃力の推定

以上の検討により、最大衝撃力は作用時間を考慮すると重錘重量にほぼ比例することが明らかとなっているが、さらに衝突速度にも比例すると仮定すると、最大衝撃力 P (tf)は

$$P = \alpha \frac{W}{g} \frac{\sqrt{2gH}}{T} \quad (4)$$

で表される。ここに、 T は式(3)で与えられる衝撃力の作用時間である。

最小2乗法により、TYPE1について最大衝撃力の推定式(平均値)を求めると

$$P = 1.026 \frac{W}{g} \frac{\sqrt{2gH}}{T} \quad (5)$$

が得られた。また、平均値に2倍の標準偏差を考慮すると

$$P = 1.811 \frac{W}{g} \frac{\sqrt{2gH}}{T} \quad (6)$$

となる。図-8および図-12に、実験値とともに式(5)および式(6)を示してあるが、2倍の標準偏差を考慮した式(6)は、ほぼ実験値の上限を押えていることがわかる。また、これは落石対策便覧¹⁾において $\lambda=100\text{tf}/\text{m}^2$ を用いた場合とほぼ同じであることがわかる。

5. あとがき

著者らは、これまでに行なわれた落石実験のデータの収集、蓄積により、落石実験データベースを作成したが、本研究では、その特徴・構成・利用方法についての概要を報告するとともに、落石実験データベース

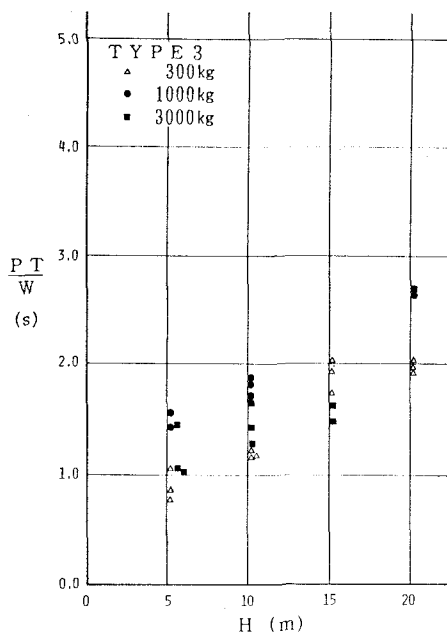


図-14 落下高さと衝撃力 PT/W (TYPE3)

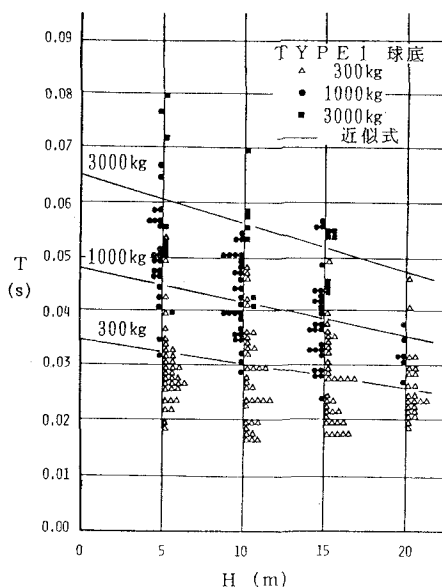


図-15 落下高さと作用時間(TYPE1)

の中で、サンドクッション底における土圧の測定データが存在する著者らが行なった3種のサンドクッション材を用いた落石実験結果について、衝撃力の評価を中心に検討を行なったが、それは、以下のようにまとめられる。

(1) 土圧により得られる衝撃力波形は、比較的均等係数が小さいTYPE 1では、TYPE 2およびTYPE 3に比べ、作用時間が長く、最大衝撃力も小さいため、TYPE 1は緩衝効果のよい砂といえる。

(2) 最大衝撃力は、重錘の重量および衝突速度が大きい程大きいですが、一般に重錘の重量には単純に比例しない。特に衝撃効果の大きいTYPE 1のサンドクッションでその傾向が認められた。

(3) 同一の落下条件では、サンドクッションの状態に依存すると考えられるが、衝撃力が大きい程、衝撃力の作用時間が短い。

(4) 衝撃力の作用時間は、TYPE 1では落下高さが大きい程短く、重錘重量が大きい程長い。

(5) 最大衝撃力の推定は、TYPE 1では衝撃力の作用時

間を考慮した式(5)により推定でき、2倍の標準偏差を考慮した式(6)によりほぼその上限を押えることができる。

本研究では、衝撃力の作用時間に着目し、均等係数が小さく緩衝効果が3種のサンドクッション中では一番よいTYPE 1についての衝撃力推定式を提案した。またTYPE 2およびTYPE 3の実験データより、サンドクッションの均等係数が衝撃力の最大値に大きく関係していることが推定されるが、このような砂種の影響や層厚の影響の解明には、さらに多くの実験データの蓄積は勿論、サンドクッションのせん断破壊、土塊の移動、土圧の発生機構についての理論的研究が必要であると考えられる。

謝 辞

末尾ではあるが、実験に多大な労力をいとわず御協力いただいた方々(当時金沢大学学生)に対して深く感謝の意を表す。

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，研究報告書，1973-4。
- 3) 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室：防護覆い上への落石による衝撃力の推定に関する研究，落石実験報告書，1984-1。
- 4) 吉田博・榎谷浩・鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 352，pp. 61～70，1984-12。
- 5) 吉田博・榎谷浩・佐藤真：落石実験データベースの作成について，第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp. 58～63，1986-7。
- 6) 榎谷浩・吉田博・佐藤真：落石実験データベースに基づく衝撃力の評価，第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp. 64～70，1986-7。
- 7) 吉田博・石塚賢吉・細川豊：落石によるロックシェッド上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，pp. 38～43，1978-2。

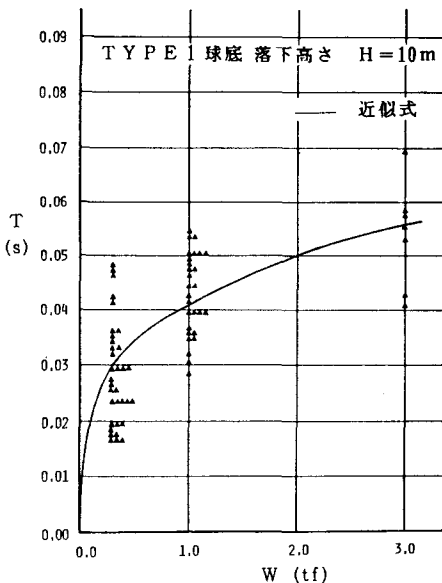


図-16 重錘質量と作用時間(TYPE1)

- 石塚賢吉：ロックシェッド上の落石による衝撃力の推定に関する実験，道路，pp. 35～41, 1976-10.

- 日本サミコン(株): P C ロックシェッドの静的および衝撃荷重載荷試験について, 研究報告書, 1979-12.

- 0) 建設省土木研究所動土質研究室：敷砂上の落石による衝撃力の推定に関する実験報告書，土木研究資料，1822号，1982-3

- 1) 佐々木康・古賀泰之：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 340， pp. 127～137，1983-12

- 2) 金沢大学工学部土木工学科
構造力学研究室：落石覆の設
計荷重に関する研究，試験研
究(2) 研究成果報告書，1985
- 3

- 3) 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，No. 362，pp. 461~470，1985-10。

- 金沢大学工学部土木工学科
構造力学研究室：プレキャスト
ＰＣおよび版の静的および
動的挙動に及ぼす横締力の影
響に関する研究，一般研究（C）
研究成果報告書，1986-3。

- 藤井智弘：横締されたプレキャストコンクリート部材の挙動について，土木学会中部支部，pp. 40～41, 1986-3.

- 小柳 洽・六郷 恵哲・井上 肇・
岩瀬 宏之・大泉 雄一；コンク

付録 落石実験データベースのファイルの構成

[illegible][illegible][illegible]

土庄計 ④					土庄計 ⑤					土庄計 ⑥									
ビラまでの時刻	位 置		農大土庄	立ち上り時刻	ビラまでの時刻	位 置	農大土庄	立ち上り時刻	ビラまでの時刻	位 置	農大土庄	立ち上り時刻	ビラまでの時刻						
	X座標	Y座標																X座標	Y座標
							</												

全社55：配分											
区分	経理	仕入	倉庫	製造	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
配分	22%	23%	23%	23%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
比率	22%	23%	23%	23%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%

[illegible]

測定①		測定②		測定③		測定④		測定⑤		
コーン値	表面からの高さ	コーン値	表面からの高さ	コーン値	表面からの高さ	コーン値	表面からの高さ	コーン値	表面からの高さ	
下	下	下	下	下	下	下	下	下	下	400
約	約	約	約	約	約	約	約	約	約	
150		150		150		150		150		400
500		500		500		500		500		500

[illegible]

リート製イ型シェッドの実物載荷試験について，第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp. 36～45, 1986-7.

17) ドービー建設工業(株)：ロックシェッドの実物大静的及び動的（落石）試験報告書，1984-2.

18) 佐野常昭・松井清・吉田博・榎谷浩・清水公：鋼製防護上への落石実験について，第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp. 1～8, 1986-7.

19) 山口柏樹・鶴飼恵三：落体衝撃力に対する地盤応答，第8回土質工学研究発表会講演概要集，pp. 589～592, 1973-6.

20) 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室・ピー・エス・コンクリート(株)：実物落石覆工の落石実験について，実験報告書，1979.

(1986年10月17日受付)