

豊浦砂の緩衝効果に関するまさ土との比較

松江工業高等専門学校 学生会員 ○齊藤 直人
松江工業高等専門学校 正会員 河原 荘一郎

1. はじめに

日本は平野が国土の約 1/4 ほどしかなく、多くの山間部を持つ。そのために崖などに隣接した道路等が多く存在し、落石災害を被る危険性がある。それを防ぐために落石覆工という設備があり、その上部の敷砂緩衝砂により衝撃を吸収する。

一般に緩衝材として使われているのは、まさ土である。しかし、本研究では供試砂に豊浦標準砂を使用し、落下衝撃応答にどのような変化が見られるかを調査した。そこから、既往のまさ土の結果¹⁾と比較することで豊浦標準砂の敷砂緩衝材としての有用性について考察することを目的とする。

そのため、落石を重錘に見立てた重錘の落下衝撃の室内実験を行った。緩衝砂の密度を変化させて、衝撃加速度波形、底面土圧波形、重錘貫入量を測定し、落下衝撃応答に及ぼす緩衝材の影響を比較した。

2. 実験方法

(1) 供試砂

供試砂は粒径 75 μ m～2mm の豊浦標準砂を使用し、含水比は最適含水比 w_{opt} である、12%に調整した。また、まさ土は粒径を 2mm 以下に調整し含水比 w を最適含水比 w_{opt} である 11.9%に調整した。表 1 に二つの供試砂の土質性状を、図 1 に粒径加積曲線を示す。二つの土は土粒子の密度 ρ_s や最適含水比 w_{opt} は、ほぼ等しい値となっている。粒径加積曲線の粒径の幅の違い、均等係数 U_c と曲率係数 U_c' より、豊浦標準砂はまさ土よりも粒度分布は悪い。

(2) 実験装置

実験装置(図 2)¹⁾は、ガイド・重錘(ランマー)・モールドで構成されている。半球の载荷盤(直径 5cm, 厚さ 30mm)の上面中央に、圧電式加速度計(定格容量 5000G)を内蔵し、モールド底面中央部に土圧計(受圧面直径 27mm, 定格容量 196kPa)を装備する。

(3) 実験方法

- ①鋼製モールド(内径 20cm, 高さ 10cm, 容量 3142cm³)内の初期密度を均一にするために、バット(容量 395cm³)に満たした供試砂 3 杯分を鋼製モールド内に入れる。
- ②円盤型の重錘(質量 3.75kg, 载荷盤底面直径 17.6cm, 接地圧 0.183Pa)を 30cm の高さから決められた回数 N_{B0} (1～3)分だけ落下させ、締固めを行う。
- ③カラーを装着後、モールドが一杯になるまで①～②を繰り返す行う。
- ④カラーを取り外した後、モールドから出ている余分な土をストレートエッジですりきるように取り除き、初期供試体とする。乾燥密度 ρ_{d0} を算定のために初期供試体の質量を計測する。

表 1 供試砂の土質性状¹⁾²⁾

土質性状		まさ土	豊浦砂
土粒子の密度 ρ_s	(g/cm ³)	2.693	2.630
均等係数 U_c		90.9	1.6
曲率係数 U_c'		16.40	0.95
平均粒径 D_{50}	(mm)	0.77	0.20
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	(g/cm ³)*	1.529	1.640
最小乾燥密度 ρ_{dmin}	(g/cm ³)*	1.240	1.345
最適含水比 w_{opt}	(%)	11.9	12.0
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	(g/cm ³)**	1.922	1.571

*砂の最大密度・最小密度試験方法(JGS T161-1990)

**突固めによる土の締固め試験方法(JIS A1210-1990A 法)

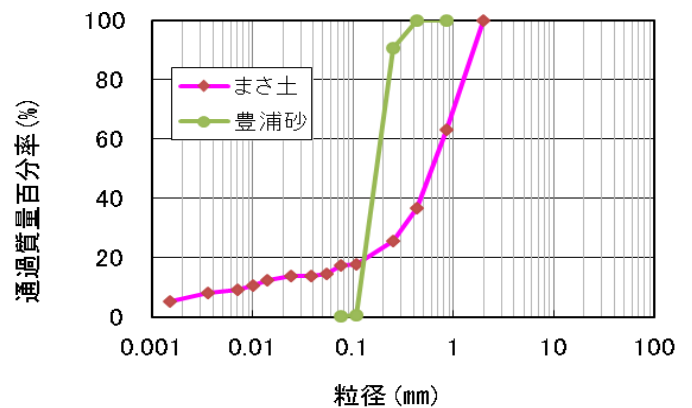


図 1 粒径加積曲線

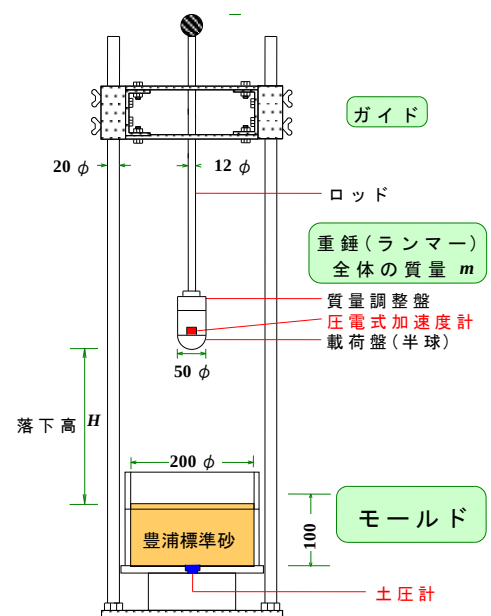


図 2 重錘衝撃応答装置¹⁾

- ⑤落下実験用である底面を半球体の重錘に取り替える。重錘を所定の落下高 H 、重錘質量 m に調節する。総組合せ数は 16 通り。(表 2 参照)

表 2 落下高 H と重錘質量 m の組合せ

重錘質量 $m(\text{kg})$	落下高 $H(\text{cm})$	組合せ 数
3.02	15.7 17.5 21.1	7
	24.2 30.0 39.4	
	46.3	
3.98	30.0 46.3	2
5.05	24.2 30.0	2
5.93	21.1 30.0	2
6.98	15.7 17.5 30.0	3

- ⑥重錘を供試体の中央部分に落下させる。
 ⑦重錘の衝撃加速度 a およびモールド底面土圧 σ をサンプリング間隔 $50\mu\text{s}$ にてデジタルデータレコーダで測定する。
 ⑧重錘貫入量 S をストレートエッジとデプスゲージで平均を出すために 4 箇所測定する。
 ⑨モールドから供試砂をきれいに取り除く。
 ⑩使用した供試砂はスコップなどで崩し、土が入っているバケツの中へ戻す。
 ⑪同一実験条件で①～⑩を 2 回繰り返す。

3. 実験結果および考察

(1) 貫入量

図 3(以降、左:まさ土,右:豊浦標準砂)に重錘の貫入量 S と打撃エネルギー mgH の関係について示す。その結果、貫入量 S と打撃エネルギー mgH には強い相関性があり、その増加とともに大きくなった。そして、乾燥密度 ρ_{d0} が上昇するにつれて貫入量 S は減少していく。

供試砂を比較すると、豊浦標準砂の方が貫入量 S は大きい。豊浦標準砂の方が大きいのは、間隙比 e の違いから、貫入量 S に差ができたと考えられる。表 3 に二つの供試砂の間隙比 e を示す。

(2) 重錘の衝撃加速度波形

重錘の衝撃加速度 a と時間 t の関係を落下高 $H=30\text{cm}$ に一定にして、重錘質量 m の影響を調べ、その関係を図 4 に示す。ここで、衝撃加速度 a が自由落下時の負($=-1\text{G}$)より土表面に衝突して 0 になった時刻を $t=0$ とする。どちらの供試砂も重錘質量 m が増えるほど衝撃加速度 a の最大値が低下し、その代わりに衝撃継続時間 t_a は長くなった。特にまさ土はその変化が顕著である。これは、運動量保存則より衝撃加速度 a を $t=0$ から衝撃持続時間 t_a ($t=0$ から a が再び 0 になるまでの時間)までで時間積分すると衝突速度

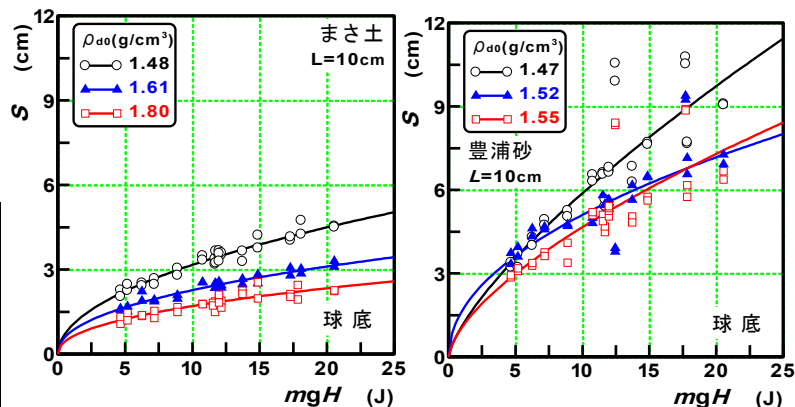


図 3 貫入量 S と打撃エネルギー mgH の関係

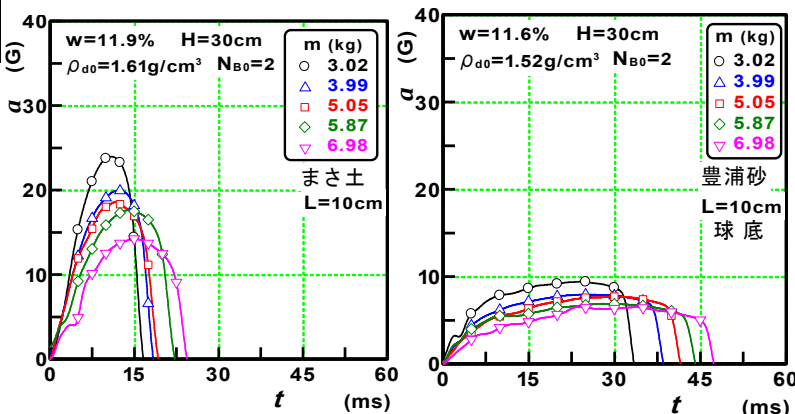


図 4 重錘の衝撃加速度 a と時間 t の関係
(重錘質量 m について)

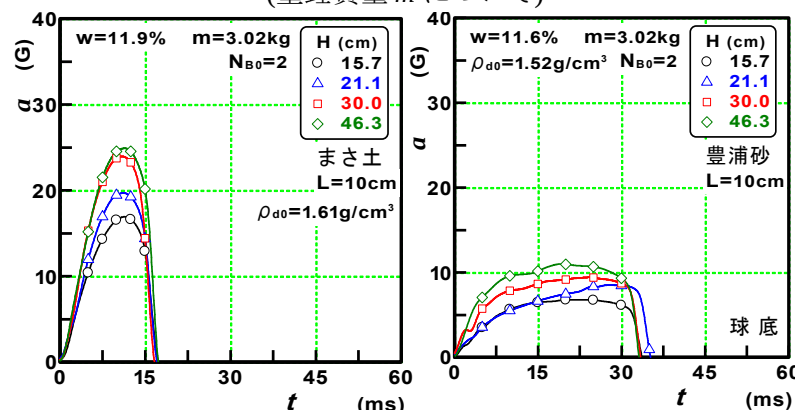


図 5 重錘の衝撃加速度 a と時間 t の関係
(落下高 H について)

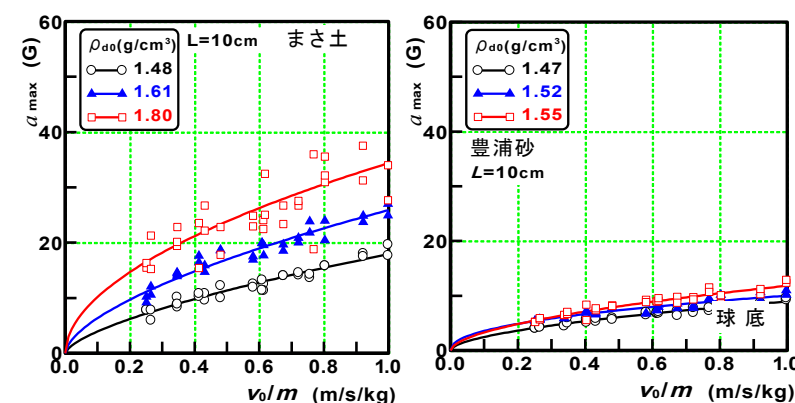


図 6 重錘最大衝撃加速度 $a_{\max}$ と v_0/m の関係

$v_0(=\sqrt{2gH})$ に等しく、またエネルギー保存則より衝突速度 v_0 は重錘質量 m に依存せず落下高 H の平方根に比例する。そのため、図4は落下高 H が一定なためグラフと横軸で囲われた面積は等しい。

波形の形状を見てみるとまさ土は重錘質量 m が軽い時、グラフは勾配が急な放物線を描き、重錘質量 m が重くなると勾配が緩やかな放物線となる。豊浦標準砂は重錘質量 m が変化しても波形は似た形状で、山の部分が平坦い形状をしている。そして、衝撃持続時間 t_a の終わりになって衝撃加速度 a が急激に減少し、0になる。

次に、重錘の衝撃加速度 a と時間 t の関係

を重錘質量 $m=3.02\text{kg}$ で一定にし、落下高 H の影響を調べ、その関係を図5に示す。その結果、落下高 H が増加するとともに衝撃加速度 a は増加することがわかる。衝撃継続時間 t_a はどの高さでもまさ土、豊浦標準砂どちらもほとんど変化していない。

波形については、まさ土は衝撃加速度 a の最大値は変化しても放物線の勾配は変化していない。豊浦標準砂は図4と波形に変化はみられない。

図4と図5の重錘質量 m 、落下高 H どちらもまさ土の方が衝撃継続時間 t_a が短く、最大加速度 $a_{\max}$ は約2倍の差があった。

(3)重錘の最大衝撃加速度

図6に最大加速度 $a_{\max}$ と v_0/m の関係を示す。どちらも乾燥密度 ρ_{d0} が上昇するに連れて最大加速度 $a_{\max}$ も上昇していく。この傾向は、まさ土の方が豊浦標準砂よりも高い。これは、前述したように、貫入量 S が豊浦標準砂よりも少ないため、短時間で重錘が停止し、最大加速度 $a_{\max}$ が大きくなったためである。

(4)重錘の衝撃持続時間

衝撃持続時間 t_a と重錘質量 m の関係を図

7に示す。3つの密度を比較すると、密度が大きくなるにつれて衝撃持続時間 t_a が短くなり、重錘衝撃加速度 a が大きくなる。密度が大きいほど供試砂が締まっているため、重錘を落下させると貫入量 S が減少し、貫入してから止まるまでに時間が減るため、短時間で減速停止しなければならないからである。

(5)モールド底面土圧

まず、モールド底面土圧 σ と時間 t の関係を落下高 $H=30\text{cm}$ に一定にして、重錘質量 m の影響を調べ、その関係を図8に示す。まさ土、豊浦標準砂のどちらも、重錘質量 m が増加するにつれ全体的にモールド底面土圧 σ は大きくなり衝撃継続時間 t_a も増えている。ただ、重錘質量 $m=3.02\text{kg}$ から 6.98kg までの土圧の増加量は、まさ土が約 25kPa なのに対して豊浦標準砂はその倍以上の約 70kPa も増加している。

波形について見てみると、豊浦標準砂は衝撃持続時間 t_a の後ろの部分にピークが現れる。まさ土は一見軸対

表3 供試砂の間隙比 e

	まさ土 $\rho_s=2.693\text{g/cm}^3$			豊浦砂 $\rho_s=2.630\text{g/cm}^3$		
乾燥密度 $\rho_{d0}(\text{g/cm}^3)$	1.48	1.61	1.80	1.47	1.52	1.55
間隙比 e	0.820	0.673	0.496	0.789	0.730	0.697

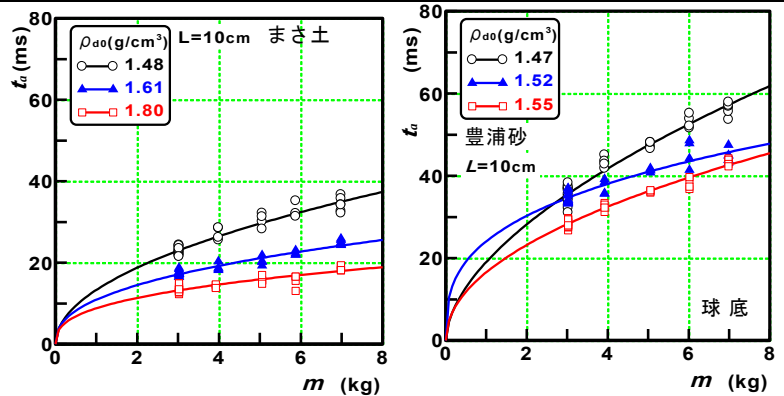


図7 衝撃持続時間 t_a と重錘質量 m の関係

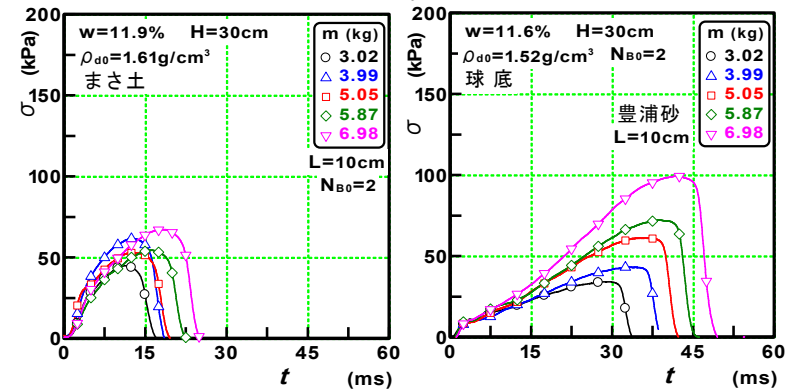


図8 モールド底面土圧 σ と時間 t の関係
(重錘質量 m について)

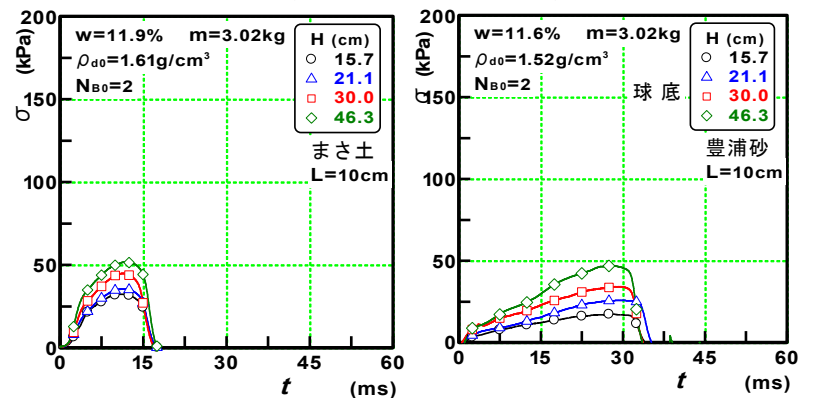


図9 モールド底面土圧 σ と時間 t の関係
(落下高 H について)

称のようだがよく見ると若干後ろにピークが現れていることが分かる。

次に、モールド底面土圧 σ と時間 t の関係を重錘質量 $m=3.02\text{kg}$ で一定にして、落下高 H の影響を調べ、その関係を図9に示す。落下高 H が増加するにつれまさ土のモールド底面土圧 σ は大きくなっている。しかし、重錘質量 m を変化させたときほど増加しておらず、衝撃継続時間 t_a もほとんど差はない。

波形の形状については、図8と同じような波形である。

(6)モールド底面最大土圧

図10にモールド底面土圧 $\sigma_{\max}$ と打撃エネルギー mgH の関係を示す。まさ土のモールド底面土圧 $\sigma_{\max}$ は乾燥密度 ρ_{d0} が増加するにつれて大きくなる。豊浦標準砂は逆に乾燥密度 ρ_{d0} が減少するにつれて大きくなる。粒度分布の違いから、衝撃が底面まで伝わりやすくなったためと思われる。

まさ土と豊浦標準砂の比較をすると、乾燥密度がまさ土 1.48g/cm^3 、豊浦標準砂 1.47g/cm^3 の時(グラフ黒線)は豊浦標準砂の方がモールド底面最大土圧 $\sigma_{\max}$ は大きいといえる。ただし、乾燥密度がまさ土 1.80g/cm^3 、豊浦標準砂 1.55g/cm^3 の時(グラフ赤線)を見ると、おおよそ打撃エネルギー mgH が 25J で逆転し、豊浦標準砂の方が底面土圧は大きくなる。それは乾燥密度がまさ土 1.61g/cm^3 、豊浦標準砂 1.52g/cm^3 の時(グラフ青線)もいえることで、打撃エネルギー mgH が 18J で逆転している。安全を考慮し、打撃エネルギー mgH が大きい状態を想定するならば、豊浦標準砂の方が底面にかかる圧力が大きいといえる。

(7)衝撃圧力伝達率

図11に重錘落下による衝撃力がモールド底面に達する割合を示す。衝撃圧力伝達率 $(\sigma/p)_{\max}$ とは、最大モールド底面土圧 $\sigma_{\max}$ を最大衝撃圧力 $p_{\max}$ で割ったもので表される。ここで、最大衝撃圧力 $p_{\max}$ は次式で定義する。

$$p_{\max} = \frac{m \cdot a_{\max}}{A} \dots (1) \quad A: \text{重錘の底面積}[\text{m}^2]$$

衝撃圧力伝達率 $(\sigma/p)_{\max}$ は重錘質量 m に依存しない。また、ここには記載していないが落下高 H にも依存していないが乾燥密度 ρ_{d0} には依存している。また、乾燥密度 ρ_{d0} が大きくなるとともに衝撃圧力伝達率 $(\sigma/p)_{\max}$ は小さくなる。

豊浦標準砂とまさ土を比較すると、衝撃圧力伝達率 $(\sigma/p)_{\max}$ がまさ土の方が低い値になっている。

4. まとめ

モールド底面最大土圧 $\sigma_{\max}$ は、高密度で打撃エネルギー mgH が少なければまさ土の方が大きい。しかし、打撃エネルギーが大きくなると豊浦標準砂の方が底面土圧は大きいので、実際の落石や安全を考慮すると豊浦標準砂の方が大きいとした方がよい。

モールド底面土圧 $\sigma_{\max}$ と衝撃圧力伝達率 $(\sigma/p)_{\max}$ は豊浦標準砂の方が大きい。そのため、豊浦標準砂よりもまさ土を使用した方が落石覆工にかかる衝撃を軽減できることから、緩衝材としてはまさ土の方が優れているといえる。

参考文献

- 1) 河原荘一郎, 平田紗希: 重錘底面形状の落下衝撃応答に及ぼす影響, 土木学会中国支部第58回研究発表会, pp.263-264, 2006.
- 2) 河原荘一郎, 室達朗, 市原一也: 重錘落下による砂質土の一次元締固め密度と衝撃応答に及ぼす重錘質量・落下高の影響, 土木学会論文集 No.652/III-51, pp.21-33, 2000.6

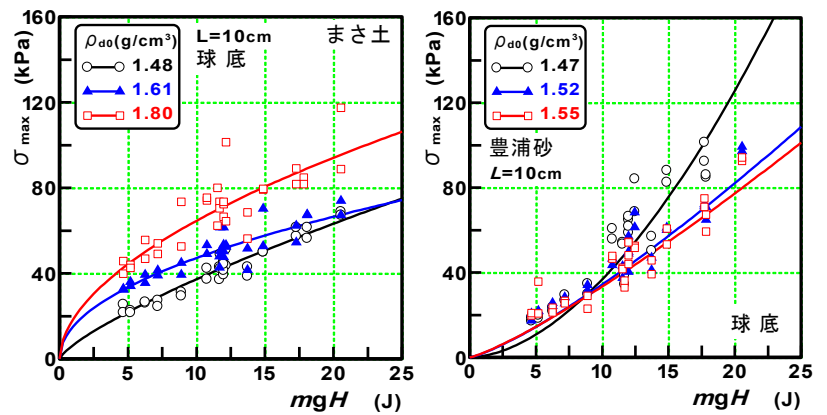


図10 モールド底面最大土圧 $\sigma_{\max}$ と打撃エネルギー mgH の関係

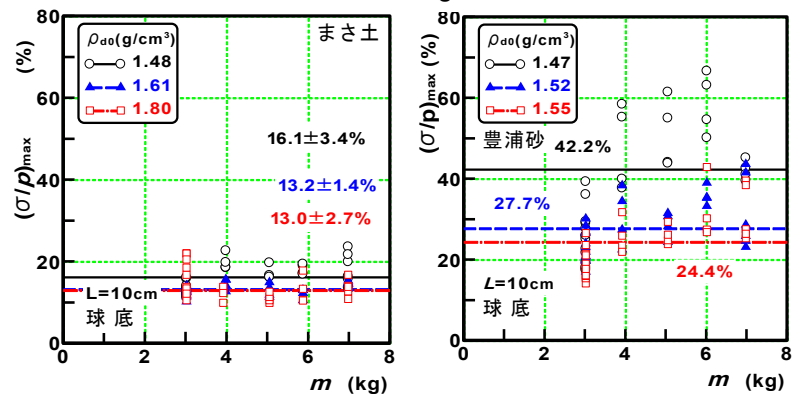


図11 衝撃圧力伝達率 $(\sigma/p)_{\max}$ と重錘質量 m の関係