

崩落土の衝撃力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT DUE TO FREE FALL SAND

中 堤 治 朗*・谷 敬**

By Jiro NAKATSUTSUMI and Kei TANI

1. 序 論

道路工学の分野における防災対策工法の中で、崩落土砂を対象とした防護工については、崩落土による衝撃力を静荷重として取り扱う評価手法が確立していないため、実際の設計においては、これを経験的に評価処理している。

崩落土の衝撃力が最も大きく働くのは、自由落下した場合である。このときは崩落土重量の数倍から数十倍の衝撃力が考えられる³⁾。しかし衝撃力を感覚的に決定するにはあまりにも大胆な仮定をする必要がある。

落石による衝撃力については、その運動形態が比較的に明確であることから、いくつかの研究がなされている^{4)~9)}。これに対して崩落土については、自由落下する場合でも、土砂の拡散状態とか礫の混入状態等その形態を明確に捕えることが困難である。各種実験を行うにしても、この運動形態をどのように表現するか、また衝撃力をどのようにして測定するか等の問題点が多く存在する。

今回の研究は、自由落下する崩落土による衝撃力を静荷重として、どの程度評価するかについて、衝撃力測定実験を行ったもので、衝撃力の評価についてある程度の傾向が把握できたので、ここに発表するものである。衝撃力の測定にはひずみ計とか痕圧計またはセンサー等が過去において用いられているが、崩落土についてこれらによる測定結果があまり精度的に期待できないこと、測定後の解析に手数がかかることから、今回は感圧発色シートによる発色の濃淡測定を行った。感圧発色シートは精機学会等の分野においてはかなり使用されているが^{10), 11)}、土木の分野においてはあまり¹²⁾使用されていない。これは感圧発色シートが温度、湿度の影響を受け、

発色状態が変化することと、限られた範囲の平均濃さのみ測定可能であるため、使用範囲が限定されているのが障害であったと考えられる。今回の実験は温度・湿度の影響を予備試験を行いつつ同一条件における発色状態に対する補正を行うことにより、それらの影響を解消した。また限られた範囲の平均濃さになるように、衝撃力を局部的に作用させる受圧装置を使用して測定を行った。

2. 感圧発色シート

感圧発色シートは2種類のシートを重ね合わせて使用するもので、Aシートにはマイクロカプセルに封入された発色剤がフィルムに塗布されており、もう一方のCシートには着色剤が同様にフィルム上に塗布されている。この2枚のシートを重ね合わせておき、それに圧力を加えると、Aシートのマイクロカプセルが破壊しカプセルに内蔵された発色剤が放出されCシートの着色剤と化学反応を起こして赤色に発色するものである。圧力の大きさにより発色する濃淡に差が生じることから、これを計器で測定することにより圧力の大きさおよび圧力分布を知ることができるものである。

発色剤層を構成しているマイクロカプセルを人工的に作り出す方法は、1940年代にBarrett Greenが発案したもので、現在においては記録材料、医薬品、接着剤、化粧品、農薬、人工臓器などに広範に利用されている。マイクロカプセルの強度は、材料力学における薄肉球殻のモデルで説明することができ、たとえば内圧 P がカプセルに作用した場合の円周応力 σ_t の関係は式(1)で表わすことができ、 σ_t が極限に達するとカプセルは破壊される。

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{r}{t} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 σ_t : 円周応力、 P : カプセル内の内圧、 r : 球の

* 正会員 建設省関東地方建設局環境審査官

** 正会員 構造物コンサルタント(株)専務取締役

内側半径, t : 球殻の膜厚

また弾性体である球を力 F で平面 (載荷面と平行) に押し付けたときに生じる接触圧力 P_0 は式 (2) となる。

$$P_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{d^2 \pi / 4} \dots \dots \dots (2)^{13)}$$

ここに, P_0 : 接触圧力, F : 載荷荷重, d : 接触面の直径

すなわちマイクロカプセルの破壊強度は

- ① マイクロカプセルの大きさに反比例する。
- ② マイクロカプセルの膜厚に比例する。
- ③ マイクロカプセルを形成する膜剤の強度に比例する。

したがって, マイクロカプセルの製造過程において, これら諸条件を精密に制御すればよいわけである。感圧シートはこのようにして大きさおよび強度の異なるマイクロカプセルを数十種類使用することにより精度の高い圧力値および圧力分布を得ることが可能となる。次にマイクロカプセルが圧力を受け破壊した場合, カプセルから放出された発色剤の拡散速度である。この拡散速度はカプセル膜を一樣な媒質とみなすと, 拡散に関する Fick の法則により表現できるもので数式的に次のように表される。

$$\frac{dm}{dt} = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \dots \dots \dots (3)$$

ここに, dm/dt : 放出速度, D : 膜の拡散係数, A : マイクロカプセルの全表面積, dc/dx : マイクロカプセル内外の濃度勾配

そこで膜の拡散係数とマイクロカプセルの寸法を制御することにより短時間において色濃度を安定化させることができる。しかし加圧条件が瞬間的な衝撃力については多少の誤差が生じるものであるがそれは $\pm 5\%$ 以内とされている。なお感圧シートの模式構造を図-1 に示す。

以上述べたようなメカニズムを利用して製品化された感圧発色シートの特徴は次のとおりである。

- ① マイクロカプセル化された発色剤を塗布した A シートと, 着色剤を塗布した C シートの両面を接するように重ね合わせ使用する。
- ② マイクロカプセルが圧力により破壊され, 中の染料が着色剤に吸着され化学反応により発色 (赤色) する。このため感圧発色シートは単なる力学的・物理的な圧力測定法でなく, 化学反応をも含めた測定法であり, したがって圧力対色濃度の関係は温度・湿

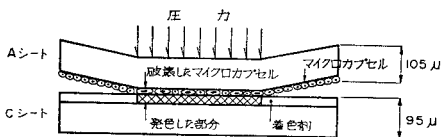


図-1 感圧発色シートの模式構造図

度の影響を大きく受ける。

- ③ 大きいカプセルは小さい圧力で破壊し, 小さいカプセルは大きな圧力でしか破壊しない。シートに含まれるカプセルの大きさの頻度分布は, 約 $5 \mu \sim 25 \mu$ の範囲でほぼ正規分布している。
- ④ カプセルの大きさとその割合, あるいは膜の厚さなどを適当に制御することによって, 圧力に比例した色濃度を得ることができる。
- ⑤ 圧力分布は目視により判別できるが, 光学的に色濃度を測定することによって, 定量的に求めることができる。

いずれにしても他の測定方法と比べて圧力の測定が非常に簡単であり, 衝撃力のように計測が困難な圧力の測定に対しては, 比較的簡単に数多くの定量的なデータが得られることから今回の実験に使用したものである。感圧発色シートの諸元を表-1 に示す。今回使用したものは低圧用シートである。

表-1 感圧発色シートの諸元

種類	測定範囲
超低圧用	5~25 kgf/cm ²
低圧用	10~100 kgf/cm ²
中圧用	70~250 kgf/cm ²
高圧用	200~700 kgf/cm ²

シートの厚さ	A=105 μ C=95 μ
使用温度範囲	5~35 $^{\circ}$ C
使用湿度範囲	20~90% RH

(RH: 相対湿度)

3. 装置・荷重および濃淡測定法

本研究は崩落土による衝撃力を推定するためのもので, 崩落土の形態を模型実験としてどのように表現するかが問題である。模型実験で最も重要視されることは, 相似則であり測定結果が実際の崩落土による衝撃力とどのような相関関係にあるかである。なおこれらを考慮して実験装置はなるべく簡単なものとし, 衝撃エネルギーの損失を少なくするとともに, 荷重に対しても比較的安定した衝撃力が得られることができるものとし, 種々の予備的な実験も合わせ行なった。

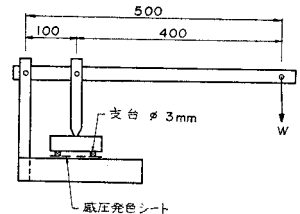
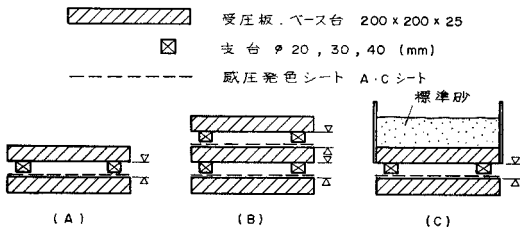


図-2 予備試験装置

(1) 試験および実験装置

予備試験は感圧発



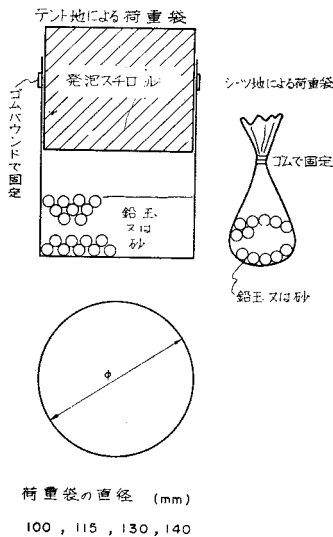
図—3 衝撃実験装置

色シートの特性を把握する目的で行ったもので図—2 のような加圧装置を用いた。この装置では 10~120 kgf/cm² の範囲の応力度を与えることが可能である。図に示した支台の直径を φ3 mm とした理由は、濃淡（以後濃度と書く）を測定する測定器が直径 3 mm の円内平均濃度を電氣的に測定することからこれを定めたものである。

衝撃実験装置は図—3 に示すとおりで、装置 A は今回の衝撃力測定に使用したもので、装置 B は装置 A が衝撃力を受けたときのエネルギーの損失を予測するためのものである。また装置 C は衝撃力を緩和するためにクッション材を使用した場合の衝撃力を測定するために使用した。なおクッション材には豊浦標準砂を使用した。支台の数は常時 4 個使用し、その直径は衝撃力の大きさによりこれを変えて測定しやすい圧力になるようにして使用した。

(2) 荷 重

崩落土による衝撃力を測定するには、砂を自由落下させればよいわけであるが、落下時の土粒子の拡散等により安定した衝撃力を与えることがほとんど不可能なため、布製の荷重袋に荷重粒子を入れて落下させることにした（図—4）。荷重袋は自由落下初期から受圧版に衝撃力を与えるまでできる限り円筒型の形状が保てるようにテント地によりこれを作成し、さらに発泡スチロールのふたを荷重粒子の上に固定させ荷重袋が原形に保たれることを期待した。シート地を使用した目



図—4 荷重袋概略図

的は実際の崩落土によって生ずる衝撃力を予測するためで、この場合は補正係数を求めるためである。

使用した荷重粒子は散弾用の鉛玉と豊浦標準砂で鉛玉の直径は表—2 のとおりである。模型実験の場合、相似則を考えると実際の土砂に比べて比重の大きい鉛玉を使用することは逆効果と考えられるが、鉛玉を使用した場合比較的安定した実験値が得られることからこれを使用したものであり、砂との比較をすることを予想して標準砂を使用した。

表—2 鉛玉の寸法

記号	直径 (mm)	今回使用	記号	直径 (mm)	今回使用
12号	1.25	○	B	4.25	
11 "	1.50		BB	4.50	
10 "	1.75		3B	4.75	
9 "	2.00		A	5.00	
8 "	2.25		AA	5.25	
7 "	2.50		3A	5.50	
6 "	2.75		SG	5.75	
5 "	3.00		2SG	6.00	○
4 "	3.25	○	3SG	7.75	○
3 "	3.50		X	8.75	
2 "	3.75		OX	9.50	○
1 "	4.00				

(3) 濃度測定法

4 個の支台を感圧発色シートの上に点対称に配置し、その上に受圧版を重ね、衝撃力を加える場合に、支台が配置されている中央に正確に荷重袋を落下させることは非常に難しく、4 個の支台による圧力値にはばらつきが生じてくる。そこで 4 個の支台による圧力値の最大値と最小値の比が 3 倍以上の場合はこれを棄却し、3 倍以下の場合のみを測定値として採用することにした。また 1 個の支台の発色濃度も等分布荷重として加圧される場合は少なく、ほとんどが偏心荷重を受けた状態となっているため偏心方向に円を 2 分する線で区画し、濃度計で所定の位置の濃度を測定し全圧力を算出した。算式は次のとおりである。

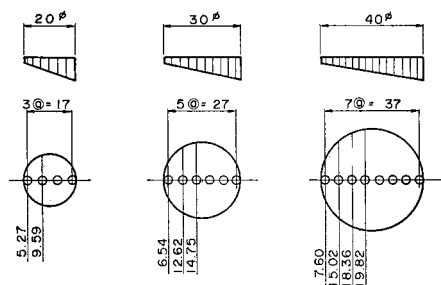
$$P = \sigma_{av} (\text{平均応力度}) \cdot A (\text{支台の面積}) \dots (4)$$

$$\sigma_{av} = \alpha \frac{\sum P_i l_i}{\sum l_i} \dots (5)$$

ここに、P: 圧力値、α: 補正係数、P_i: i 点の濃度、l_i: i 点の幅

また各支台における測定点の数と諸数値は図—5 のとおりである。

濃度計は 45° の角度から光を当て、その反射を鉛直方向のホトダイオード（光を電気に変える素子）で受け、この電気を増幅させてメーターで読み取るものである。光源は 6 ボルト 1.25 W の小型白熱電球 2 個でシートとの距離は 13 mm、またシートとホトダイオードとの距離は 21 mm である。この濃度計の精度はメーターの読み



図—5 測定点および諸数値（単位：mm）

で ± 0.02 となっている。

4. 各試験・実験の目的と方法

(1) 予備試験

予備試験は感圧発色シートの特性を把握するために行ったもので、土木の分野においての使用例が少ないことから、少なくとも今回行う衝撃実験に必要なデータを得ることとしたものであり、試験項目は次のとおりである。

- a) 温度湿度条件に対する濃度と応力度の関係
- b) 加圧条件による濃度の変化
- c) 発色濃度の時間的変化
- a) 温度湿度条件に対する濃度と応力度の関係

感圧発色シートは物理的・化学的条件により発色濃度が異なる。特に温度湿度の影響を受けやすい。そのため衝撃実験を行うつど温度湿度の補正値を得るために予備試験を行ったものである。試験は予備試験装置を使用し、応力度が $10\sim 120 \text{ kgf/cm}^2$ までの範囲で濃度と応力度の相関を求め、衝撃実験時の濃度測定値を応力度に変換する補正係数を求めた。

- b) 加圧条件による濃度の変化

本研究は衝撃力を測定することを目的としているが、衝撃荷重は載荷開始後最大荷重に到達する時間および最大荷重継続時間とも瞬間的である。そこで実験における加圧条件と濃度変化の関係を知る必要から次のような試験を行ったものである。試験は予備試験の装置を使用し、最大荷重到達時間を3秒、5秒とし、応力度を20, 40, 100 kgf/cm^2 についてそれぞれ載荷継続時間を3秒～5分について実験し、瞬間圧に対する濃度変化を測定することにした。

- c) 発色濃度の時間的変化

感圧発色シートが荷重撤去後濃度測定まで発色濃度の時間的変化を知り、衝撃実験において加圧後どの程度の時間で濃度を測定すべきかを定める目的で行った予備試験である。この試験は応力度 $50, 100 \text{ kgf/cm}^2$ につい

て5秒～24時間の範囲について濃度変化を測定した。

(2) 予備衝撃実験

本研究の目的が崩落土による衝撃力を推定することであり、実験で測定された衝撃力が実際の崩落土の衝撃力とどのような関係にあるかを把握する必要がある。今回予備的に行った一連の衝撃実験は、この関連を明確にするためのものとなっている。予備衝撃実験の項目は次のとおりである。

- a) 鉛玉の粒径が衝撃力に与える影響
- b) 荷重の単位体積重量が衝撃力に与える影響
- c) 容積比が衝撃力に与える影響
- d) 荷重袋が衝撃力に与える影響
- e) 荷重袋の寸法が衝撃力に与える影響
- f) 衝撃装置によるクッション効果
- g) クッション材が衝撃力に与える影響
- h) 衝撃後の鉛玉の拡散状態
- a) 鉛玉の粒径が衝撃力に与える影響

荷重袋に鉛玉を入れて自由落下させると、鉛玉の下層は衝撃後上方向に反発し、後続する鉛玉に対して一種のクッション効果を示すことが考えられる。このような鉛玉の挙動が衝撃力に対してどのような影響を与えるかを明確にするための実験である。

実験装置 タイプ-A

荷 重 1.0 kgf

鉛玉の直径 OX 9.50 mm
 3 SG 7.75 mm
 2 SG 6.00 mm
 4号 3.25 mm
 12号 1.25 mm

荷 重 袋 $R=10 \text{ cm}$

自由落下高さ $H=0.3, 0.9, 1.5 \text{ m}$

- b) 荷重の単位体積重量が衝撃力に与える影響

同一荷重でも単位体積重量の変化によりどの程度衝撃力に与える影響が異なるかを知るために行った実験である。

実験装置 タイプ-A

荷 重 1.0 kgf

単位体積重量 標準砂 1.43 tf/m^3
 標準砂+OX 2.50 tf/m^3
 OX 6.57 tf/m^3
 OX+12号 8.16 tf/m^3

注) 混合荷重は 0.5 kg ずつとした。

荷 重 袋 $R=10 \text{ cm}$

自由落下高さ $H=1.2 \text{ m}$

- c) 容積比が衝撃力に与える影響

容積比、すなわち落下時または衝撃後の鉛玉の拡散自

由度による衝撃力に与える影響を知るために行った実験である。

実験装置 タイプ-A
荷重 0.5 kgf
鉛玉 OX $\phi 9.50$
鉛玉 4号 $\phi 3.25$
豊浦標準砂

荷重袋 $R=10$ cm
自由落下高さ $H=1.2$ m
荷重の容積比 1, 2, 3, 4 倍

注) 荷重の容積比が1倍は、荷重袋に荷重を入れてから発泡スチロールで固定させたもので、2倍は荷重の高さの2倍の位置で発泡スチロールを固定したものである。

d) 荷重袋が衝撃力に与える影響

荷重袋としてテント地を使用して衝撃実験を行っているが、テント地の場合実際の崩落土を表現することができず、むしろシート地のような柔らかい布地の方が近似していることから行った実験である。

実験装置 タイプ-A
荷重 $W=1, 3, 5$ kgf (OX)
荷重袋 テント地 ($R=10$ cm) シート地
自由落下高さ $H=1.2$ m

e) 荷重袋の寸法が衝撃力に与える影響

同一荷重においても荷重袋の円筒断面積が異なれば、荷重の円筒内の高さが異なり、これが衝撃力にどのように影響を与えるかを知るための実験である。

実験装置 タイプ-A
荷重 1.0 kgf (OX)
荷重袋 $R=10, 11.5, 13, 14$ cm テント地
自由落下高さ $H=1.2$ m

f) 衝撃装置のクッション効果

衝撃装置タイプ-Aは感圧発色シートの上に支台を配置してその上に受圧版を重ねたもので、衝撃力を受けたとき装置が単純な重ね合わせのため衝撃エネルギーの損失が考えられる。その程度を知る目的で行った実験であり、クッション効果 α は次式で示すとおりである。

$$\alpha = 100 \cdot \frac{P_d}{P_u} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 α :クッション効果、 P_d :下層の濃度、 P_u :上層の濃度

すなわち $\alpha=100$ の場合がエネルギー損失がなかったことを意味し、 $\alpha=90$ はエネルギー損失が10%であったことを示すものである。

実験装置 タイプ-B
荷重 3.0 kgf (OX)
荷重袋 $R=10$ cm

自由落下高さ $H=0.6, 0.9, 1.2$ m

g) クッション材が衝撃力に与える影響

この実験はクッション材を使用した場合の効果を知るためのもので、崩落土を対象とした防災工のうち、コンクリート構造とか鋼構造の屋根に使用するクッション材の設置効果を予測するためのものである。

実験装置 タイプ-C
荷重 5.0 kgf (OX)
荷重袋 $R=10$ cm
自由落下高さ $H=1.2$ m
クッション材 標準砂 1, 3, 5 cm 厚

h) 衝撃後の鉛玉の拡散状態

荷重袋に入れた鉛玉が受圧版に落下した後どのように拡散するかについて測定したものである。まず鉛直方向に対しては鉛玉 OX ($\phi 9.5$ mm) を荷重袋の底面に1層に配置し、鉛玉の上面1 cm, 2 cmの各位置まで発泡スチロールを挿入し、発泡スチロールの下面に感圧発色シートを張り付け、鉛玉が受圧版に落下した後どの程度鉛直方向に跳ね返るかを測定した。また水平方向に対しては、荷重袋の内側に高さ10 cmまで感圧発色シートを張り付けたものと、鉛玉上面から4 cmの高さに発泡スチロールを挿入してその下面に感圧発色シートを張り付け、衝撃後の鉛玉の拡散状況を調べたものである。

実験装置 タイプ-A
荷重 約 0.5, 5.5 kgf (OX)
荷重袋 $R=10$ cm
自由落下高さ $H=1.5, 2.5$ m

(3) 衝撃実験

いくつかの予備実験で得られた結果を用い、この実験によって得られた式から実際の崩落土による衝撃力を推定するための、いわば主となる実験である。実験装置タイプ-Aを使用し、荷重は荷重袋に入れた鉛玉を用いている。

実験装置 タイプ-A
荷重 1.0, 3.0, 5.0 kgf
荷重袋 $R=10$ cm
自由落下高さ $H=0.3 \sim 2.1$ m ピッチ 0.3 m

5. 結果と考察

(1) 予備試験

a) 温度湿度条件に対する濃度と応力度の関係

測定結果の一例を図-6に示す。発色濃度は湿度が上昇するにつれて高くなる傾向を示し、また別の試験で確かめた結果から温度についても温度が上昇するにつれて

発色濃度が高くなる傾向を示している。このため衝撃実験を行う時点で必要に応じてこの予備試験を行いその影響を相殺することにした。図-6 から応力度が 10 kgf/cm²

以下および 100 kgf/cm² 以上においては曲線の信頼性が少ないことから、衝撃実験において 10~100 kgf/cm² の範囲を超えた応力度が生じるものについては測定結果を棄却した。

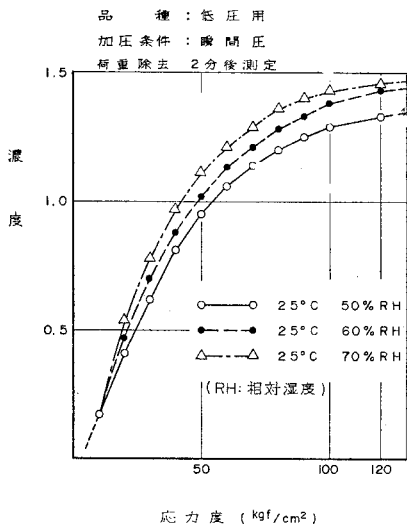


図-6 温湿度条件による濃度

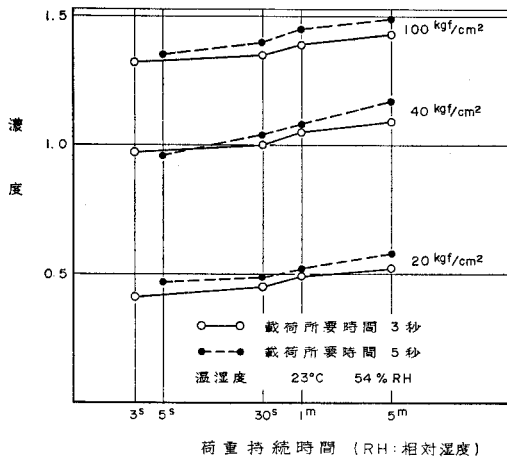


図-7 加圧条件による濃度変化

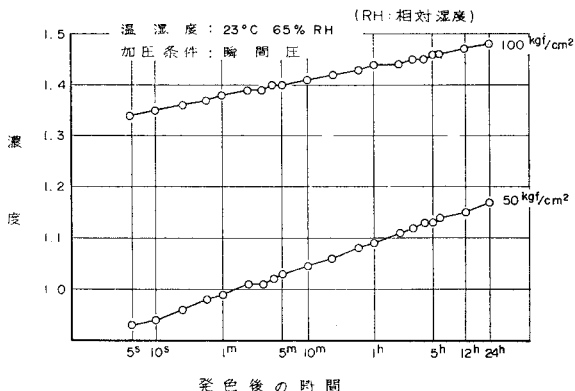


図-8 濃度の経時変化

b) 加圧条件による濃度の変化 (図-7)

図-7 をみると、横軸に時間を対数目盛りでとったとき、载荷持続時間に対する発色濃度がほぼ直線的に変化し、式 (7) で示すことができる。

$$P_u = P_0 + 0.055 \log t \dots\dots\dots (7)$$

c) 発色の時間的变化 (図-8)

発色濃度の時間的变化は図-8 から考えて各応力レベルではほぼ指数関数的に変化することがわかる。図-6 の温湿度条件による濃度と応力度の関係は载荷荷重除去 2 分後の測定であり、衝撃実験においては装置の関係から少なくとも 30 分程度に設定する必要がある。図-8 において応力レベルの大小により直線の勾配が異なっているが、図-6 の濃度と応力度の関係から考えると、各応力レベルで大きな差がないことがわかる。すなわち、図-8 の直線で 100 kgf/cm² の 2 分後の濃度が 1.390 で 30 分後が 1.425 であり図-6 の湿度 70% (図-8 の測定は 23°C 65% であるが大差ないため 25°C 70% を使用する) の曲線上で応力度を求めるとそれぞれ 90, 100 kgf/cm² となりその差は約 10% となる。これに対して 50 kgf/cm² の 2 分後の濃度が 1.010 で 3 分後の濃度が 1.075 で、それぞれの応力度は 43, 48 kgf/cm² で約 10% の差となる。このことから衝撃実験の測定は荷重除去後 30 分とし測定値を 10% 補正することにした。

(2) 予備衝撃実験

a) 鉛玉の粒径が衝撃力に与える影響 (図-9)

鉛玉の直径を 1.25~9.5 mm まで変えて行ったものであるが、図-9 からは有意差は認められないので以後の実験は比較的安定した衝撃力が得られる 9.5 mm OX を使用することにした。

b) 荷重の単位体積重量が衝撃力に与える影響 (図-10)

単位体積重量が大きくなるほどに衝撃力が大きくなる傾向を示している。図-10 において単位体積重量が 2.5 および 8.16 tf/m³ の場合、衝撃力のばらつきが大きいのは、砂と OX または OX+12 号の混合によるため直径の大きい OX の分散による影響が作用したためと思われる。今回の衝撃実験が OX (6.57 tf/m³) を使用しているのに対し、実際の崩落土の単位体積重量が 1.6~2.0 tf/m³ であるため図-10 から OX で求めた衝撃力を約 65% 程度割り引いた評価をする必要がある。また崩落土が礫を含んでいる場合には多少大きめの衝撃力が作用する

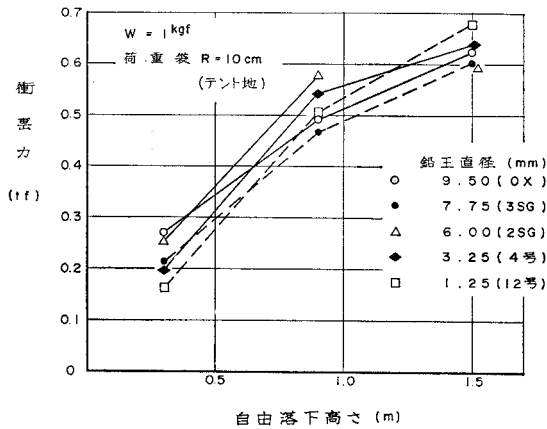


図-9 鉛玉の粒径が衝撃力に与える影響

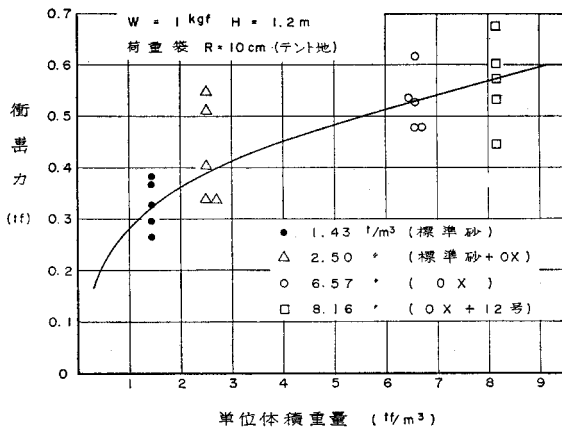


図-10 荷重の単位体積重量が衝撃力に与える影響

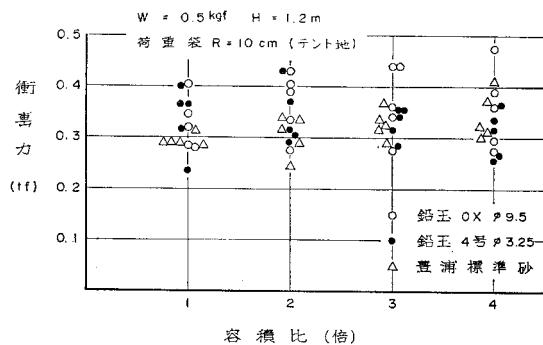


図-11 容積比が衝撃力に与える影響

ことが予想される。

e) 容積比が衝撃力に与える影響 (図-11)

容積比は砂または鉛玉が衝撃を与えた後に拡散可能な容積と鉛玉等の容積の比で一種の拡散自由度を意味するものであるが、測定の結果からは図-11に示すようにほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

d) 荷重袋が衝撃力に与える影響 (図-12)

荷重袋としてテント地を使用した衝撃実験は、比較的

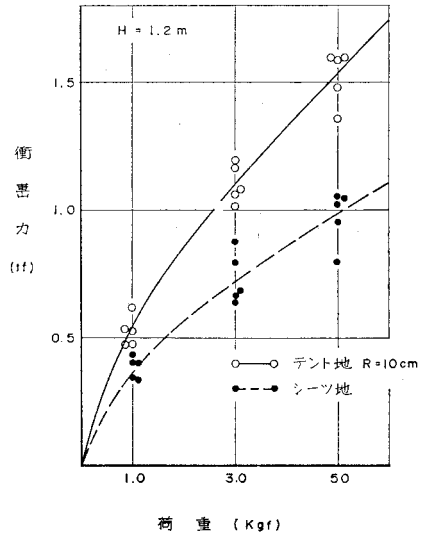


図-12 荷重袋が衝撃力に与える影響

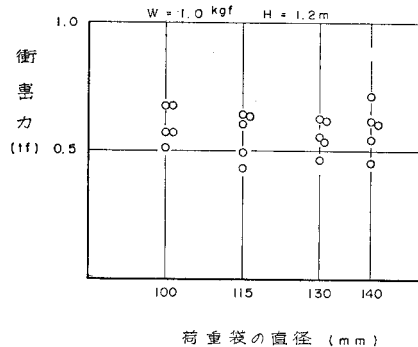


図-13 荷重袋の寸法が衝撃力に与える影響

安定した実験結果が得られているが、実際の崩落土ではこのような荷重袋がなく、側方への拡散が自由であり、実験で得られた数値を実務的に適用するためには荷重袋の制約条件を評価する実験をしなければならない。図-12のシート地の荷重袋の方がむしろ実際の崩落土に近いと考えられる。シート地による荷重袋とテント地による衝撃力を比較すると約1.5分の1となっている。この影響は提案式において修正する必要がある。

e) 荷重袋の寸法が衝撃力に与える影響 (図-13)

図-13から荷重袋の寸法が衝撃力に与える影響はないと判断ができるので、以後直径100mmの円筒型荷重袋を使用することにした。

f) 衝撃装置によるクッション効果 (図-14)

実験装置は簡単であるが、受圧版で受けた衝撃力が感圧発色シートに伝達されるまでに吸収されるエネルギーの損失を知るための試験であり、測定の結果は衝撃力の大きさに関係なく6~8%程度のエネルギーの損失があることが図-14から知ることができる。

g) クッション材が衝撃力に与える影響 (図-15)

衝撃力はクッション材によりかなりのエネルギー損失と衝撃力の減少効果があると指摘されており、今回の実験においてもクッション材厚 5cm で、クッション材なしに比較して衝撃力が約 3 分の 1 に減少していることから、クッション材の効果が示されている。

h) 衝撃後の鉛玉の拡散状態 (図-16)

鉛玉 OX を荷重袋に 1 層 (個数 111) に敷き自由落下

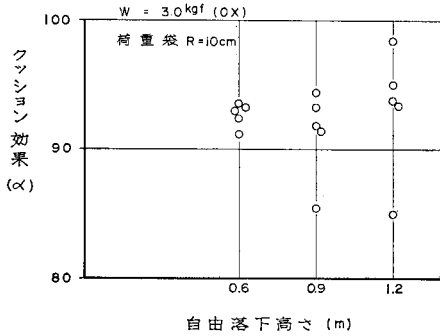


図-14 衝撃装置によるクッション効果

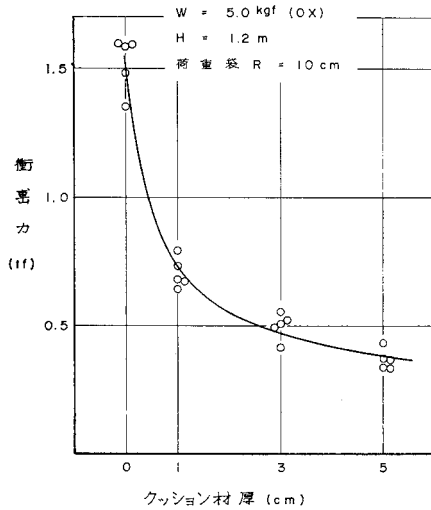


図-15 クッション材が衝撃力に与える影響

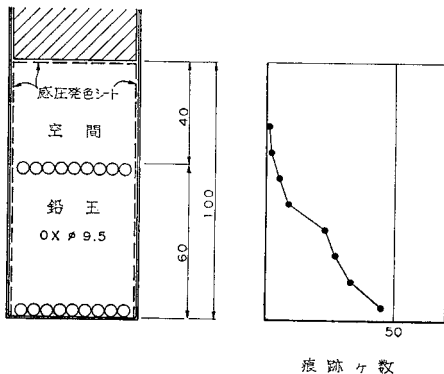


図-16 衝撃後の鉛玉の拡散状態

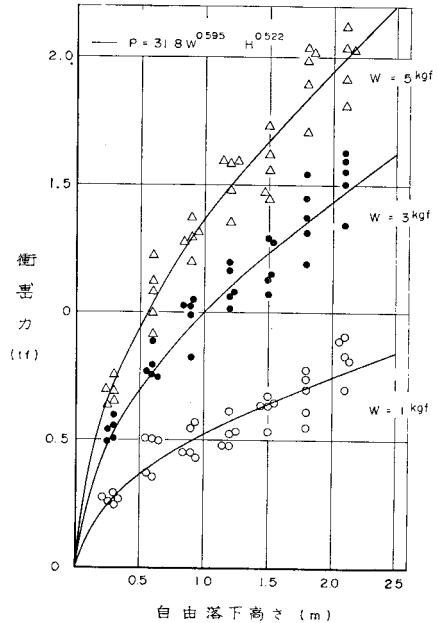


図-17 衝撃力測定値

させた場合、衝撃後鉛玉は鉛直方向に約 1/3 が 2 cm の高さまで跳ね上がっている。これは荷重袋に発泡スチロールの筒を挿入しその先端に感圧発色シートを張り付け、自由落下後跳ね上がった鉛玉の痕跡から判断したもので鉛直方向の拡散が比較的少ないことがうかがえる。また水平方向の拡散状態は図-16 に示したように下層部の方が上層部に比較して水平方向に拡散していることがわかる。この場合鉛玉を入れた状態すなわち静荷重のみではほとんど発色しない。

(3) 衝撃実験

衝撃実験の結果を図-17 に示す。衝撃力を荷重の重量および自由落下高さの関数として式 (8) のように表わす。

$$P = \alpha W^\tau H^\beta \dots\dots\dots (8)$$

ここで係数 α, τ, β を重回帰係数として測定値から最小二乗法により求めると式 (9) を得る。

$$P = 31.8 W^{0.595} H^{0.522} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 P : 衝撃力 (t), W : 荷重 (t), H : 自由落下高さ (m)

式 (9) は左辺と右辺のディメンションが不一致であるが、この種の式で表現する場合このことは避けることができない。そこで式 (8) の α がディメンションを調整するものと考えればよいとする。崩落土による衝撃力を求める場合鉛玉をテント地の荷重袋に入れて求めた衝撃力に換算するため、次の項目につき修正する必要がある。

- ① 単位体積重量 $c_1 = 0.65$ (図-10 参照)

② 荷 重 袋 $c_2=0.65$ (図—12 参照)

③ クッション効果 $c_3=1.05$ (図—14 参照)

以上の3項目について修正すると衝撃力 P_h は式 (10) で、

$$P_h = c_1 c_2 c_3 \alpha W^{\frac{1}{3}} H^{\frac{2}{3}} = 14.1 W^{0.595} H^{0.522} \dots \dots (10)$$

表わすことができる。ここで P_h はあくまで構造物に直接崩落土が衝突した場合で、砂等によるクッション材がある場合はまた衝撃力が少なくなりこれを (図—15 参照) 約 1/3 となるとすればクッション材がある場合の衝撃力 P_s は式 (11) のようになる。

$$P_s = 4.7 W^{0.595} H^{0.522} \dots \dots (11)$$

概略的には式 (12) と考えてよいであろう。

$$P = \alpha W^{0.6} H^{0.5} \dots \dots (12)$$

クッション材がない場合 $\alpha = 14$

クッション材がある場合 $\alpha = 5$

6. 結 論

本研究は崩落土による衝撃力を静荷重として評価し、推定式を求めるために衝撃実験を行ったもので、かなりの予備実験を行ったため、評価できる測定値を得たものと思う。衝撃力を測定する方法として感圧発色シートを使用したのが、これは測定が非常に簡単であり、自由落下による衝撃力のように安定した力が得にくいものに対しては実験の数を多くすることができ、また種々の予備実験を行うことも容易である。衝撃力を与える荷重として鉛玉を円筒型に整形したテント地袋に入れこれを実験装置に自由落下させる方法を用いたが、これは最も安定した衝撃力を得られるからであり、このような装置による実験結果と実際の崩落土による衝撃形態との異なりを補正するため種々の予備衝撃実験を行って実際の衝撃力に近づける修正値を求めたものである。予備衝撃実験において修正を行う必要があると判断された事項について列

挙すると、

(1) 自由落下する荷重の単位体積重量の異なり衝撃力に及ぼす影響 (図—10 参照)

(2) 荷重を入れる荷重袋の材料および材質による影響 (図—12 参照)

(3) 衝撃力を受ける装置によるエネルギーの損失 (図—14 参照)

(4) クッション材の効果 (図—15 参照)

これらの項目について修正を行い、衝撃力の推定式として式 (12) として示したものである。

式 (12) を使うことによって、洞門その他防護柵等安全施設の設計が少しでも合理的なものとなればよいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 北海道開発局：道路防災工調査設計要領，昭和53年3月。
- 2) 建設省北陸地方建設局：洞門工の設計に関する考察，昭和48年9月。
- 3) 中堤治朗：崩落土による衝撃力の静的評価に対する基礎的研究，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集。
- 4) 振動便覧：土木学会，pp. 320～323，昭和41年。
- 5) 吉田 博ら：ロックシェード上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，1978.2。
- 6) 鋼材倶楽部：新しい落石覆の開発に関する研究，昭和48年。
- 7) 水山高久ら：砂防ダムに対する土石流衝撃力実験，土木研究所，土木技術資料，昭和55年11月。
- 8) 和仁達美ら：鉄道土木施工法，山海堂，pp. 263～266。
- 9) 谷 敬：洞門設計時の落石の衝撃力に与えるクッション材の評価について，建設省北陸技報，第2号，1981.2。
- 10) 清水伸二ら：ホログラフィ干渉法による長方形複数ボルト締結体の静的変形特性の考察，昭和54年度精機学会春季大会，昭和54年3月。
- 11) 田中 克ら：感圧発色シートによる加圧粉体層の底圧分布測定，粉体に関する討論会，昭和54年10月。
- 12) 松浦 誠ら：管状砂の圧力分布その1測定結果，その2結果の検討，第16回土質工学研究発表会，pp. 1045～1052。
- 13) 北畠・片山共訳：ティモシェンコ材料力学下巻，コロナ社，p. 109, 242, 1965。

(1981.9.22・受付)