

## (29) スイス産氷河砂利をクッション材として用いた落石衝撃実験

○金 沢 大 学 樹 谷 浩  
スイス連邦工科大学 F. Descoedres  
スイス連邦工科大学 C.-A. Schmidhalter

### 1. まえがき

アルプス山脈の中央に位置するスイスは、国土の大部分が山岳地帯であるため、雪崩や落石に関して厳しい環境である。そのため、日本と同様に様々な防護対策がなされてきている。しかし、設計の基準となる示方書は特になく、スイス運輸エネルギー省の道路局から出された落石対策に関するレポート<sup>1)</sup>があるだけで、実際は全て各設計者の判断に委ねられているのが現状である。落石と雪崩対策についての明確な指針の確立が望まれており、設計のためのハンドブック作成のためにスイス高速道路局を中心にワーキンググループ (Arbeitsgruppe 'Bemessung von Schutzgegen auf Steinschlaginwirkungen') が1991年11月に設立された。その活動の一つとして著者らは衝撃力の算定に関する実験を現在行っている。本論文はスイスの典型的な砂利を用いた実験結果の一部について報告するものである。

### 2. 実験方法

実験は スイス連邦工科大学 (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) の土木工学科の土質、岩盤および基礎研究室の実験室で行った (Photo 1)。Fig.1は実験施設の概略を示したものである。実験は、実験室に掘られた深さ 8 m のホールの底部にロックシェットの屋根部のモデルである鉄筋コンクリート板 (縦横 3.4 m, 厚さ 20 cm) を 4 点支持で設置した。なおコンクリートの圧縮強度は 32.2 MN/m<sup>2</sup>, 縦弾性係数は 29700 MN/m<sup>2</sup> である。

この鉄筋コンクリート板上にクッション材としてスイス中央部のベルナーアルプスおよびスイス南部のパレーアルプスを源とするローヌ川河口とローヌ川が流れ込んでいるレマン湖内で浚渫された砂利をクッション材として用いた。なお、コンクリート板の上には圧力測定のために 10 cm の厚さで細骨材 (砂) を敷き、その上にこの砂利を 90 cm 厚で敷いた。Fig.2にその粒径加積曲線を示す。砂利やれきをクッション材として用いる場合、一般的な砂に比

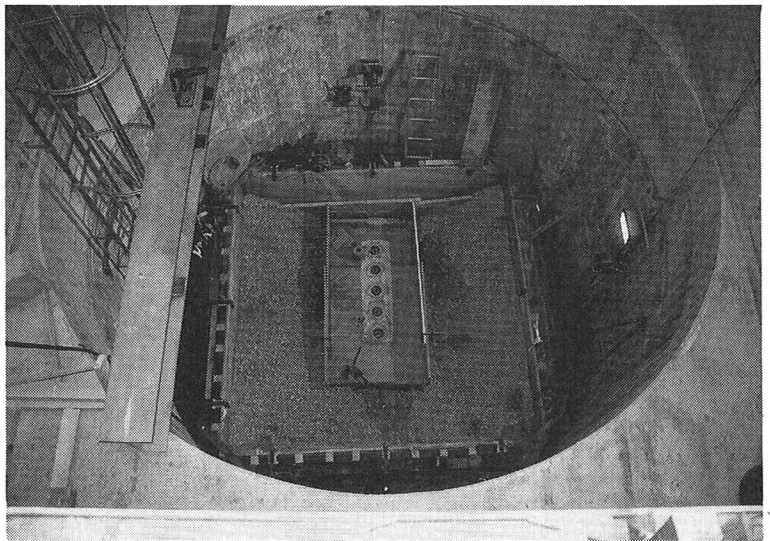


Photo 1 The hole of the laboratory for the impact test

べ大きな衝撃力が生ずることが予想されるが、具体的な衝撃力はいままでに明らかにされていない。この種の砂利はスイスでは各地で入手できる代表的な材料であるため、第1番目の材料として選ばれた。

落石としてはFig. 3に示すの鋼殻にコンクリートを充填した質量100kgの重錘を用い、2.5m、5m、7.5m、9.84mの高さから落下させて実験を行った。落石衝突実験では、落石の加速度、コンクリート板上での圧力、コンクリート板の変位、支点での反力を測定した (Fig. 4)。加速度は2KHzでその他のデータは1200kHzの速度で測定した。なお、クッション材をのせた状態でのコンクリート板の1次固有周期は0.0492sであった。

なお、ロックシェッド屋根部の静的変形特性を調べるために静的荷重試験も行った。また、クッション材の基本的特性値を得るために試験として平板荷重試験を行った。

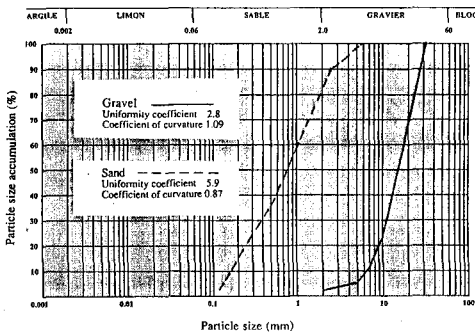


Fig.2 Particle size accumulation curves

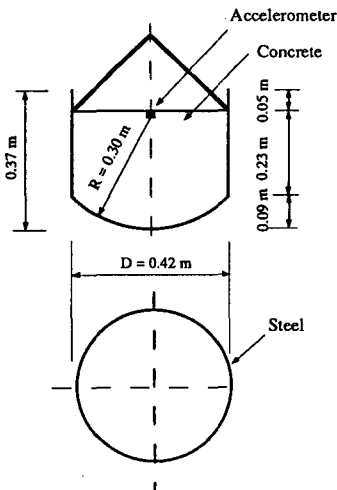
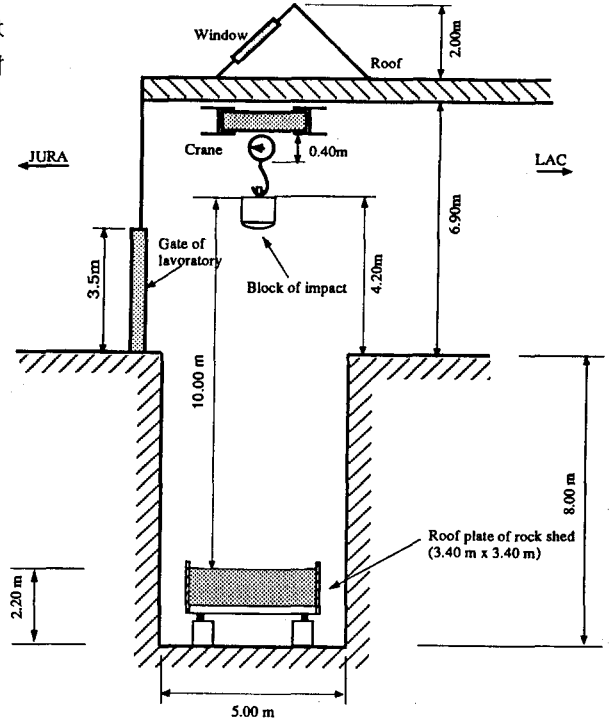


Fig.3 Shape of the impact block



Elevation plan of the test

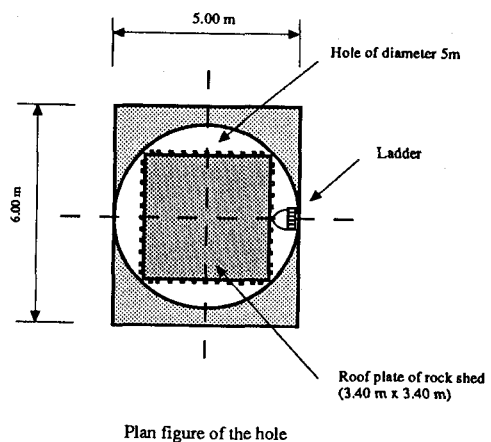


Fig.1 Set-up for the impact test

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 静的実験

Fig. 5に荷重50kNでの静的試験結果より得られた。鉄筋コンクリート板の変形状態を示す。図中にはクッション材を敷かない状態での結果とクッション材を敷いた状態の結果を示している。砂利をクッション材として用いた場合には、荷重状態が異なるもの、結果として見かけの剛性が非常に大きくなっている。これは、砂利の噛み合わせの影響と考えられ、このようなクッション材を用いる場合、衝撃時にはそれ自体の質量の効果以外に剛性の増加の影響も大きいことが推定できる。

Fig. 6は荷重50kNにおけるクッション材底部での圧力分布を示したものである。これより載荷点より半径 90cm程度の範囲に荷重分散していることがわかる。載荷板の大きさを無視すると分散角は45度、板の大きさを考慮すると分散角60度程度であることがわかる。

#### 3. 2 衝撃実験

Fig. 7は、一例として高さ5 mから落下させた場合のたわみ波形と衝撃力波形を示したものである。なお、図中のForce under the cushionとは、クッション底での圧力をその作用面積に関して積分して得たものであり、従来より著者が土圧衝撃力と呼んでいるものである。これより、板の変形の時間的変化は単調なもの

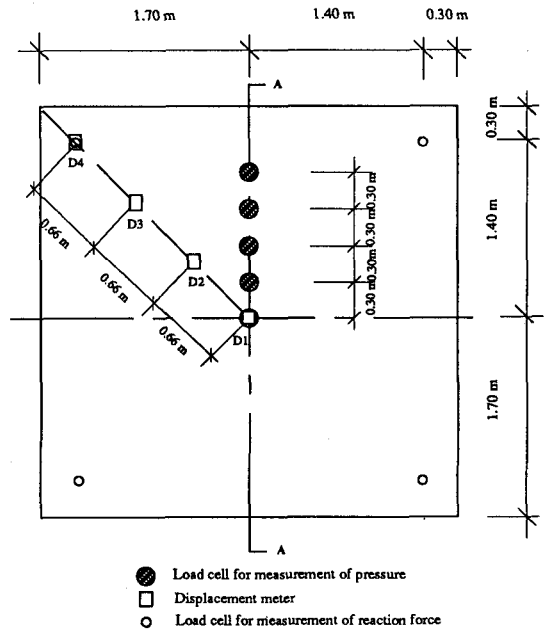


Fig. 4 Measurement items of the plate

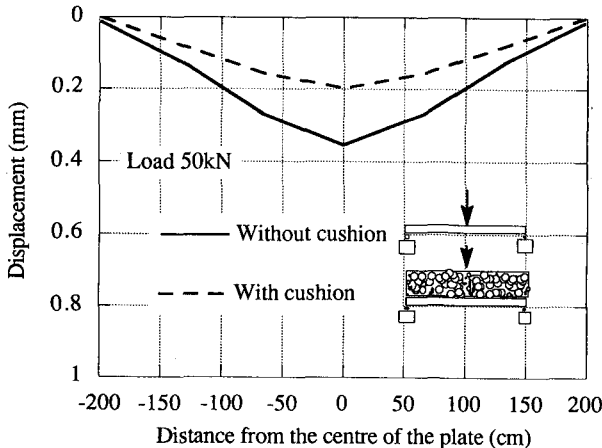


Fig. 5 Deformation of the plate in static test

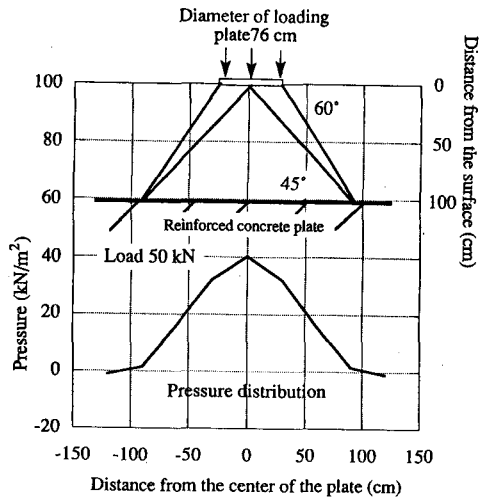


Fig. 6 Pressure distribution under the cushion in static test

で、各変位はほぼ同じ時刻に最大値に達していることがわかる。しかし、クッション底での力が最初に最大値に達したあと、変位、反力の最大値に達している。また、反力の最大値は土圧衝撃力より大きくなっていることがわかる。

一般の衝撃現象では、構造系の応答を考える上で静的現象との相違を表す動倍率を使用する 경우가多く、著者らもロックシェッドに対してもそれを確認している<sup>2)</sup>。落石による衝撃力が、ロックシェッドの破壊も含め明かであれば、合理的な設計方法への一つのアプローチと考えられる。一方、落石衝突がクッション材を介した落石からロックシェッドへのエネルギー伝達現象であることと考えるとエネルギー的観点からの設計方法は一つの有望な方法であろう<sup>3,4)</sup>。ただし、動的なエネルギー伝達を直接実験で調べることはロックシェッドへの衝突問題では一般に難しいと考えられ、実際的设计への適用にはある程度の仮定と実験結果が必要であろう。そこで、ここでは力の問題に限って述べることにする。本実験の屋根部の応答量からある仮定のもとにFig. 8に示すように等価衝撃力あるいは等価伝達エネルギーを算定することができるが、ここでは、反力は直接等価衝撃力と考え、コンクリート板の変位からは荷重と変位に静的関係が成り立つと仮定してこれからも等価衝撃力を求めた。

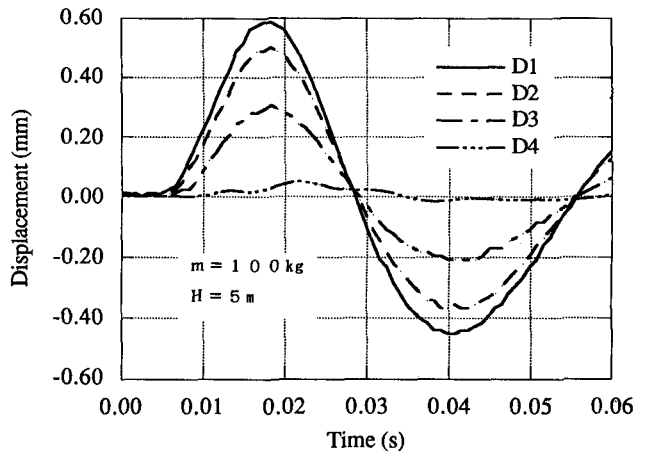
Fig. 9は、落下高さと衝撃力の関係を示したものである。図中には参考のために次式で表される落石対策便覧式を示した<sup>5)</sup>。

$$P = 0.097 \lambda^{2/5} m^{2/3} H^{3/5} \quad (1)$$

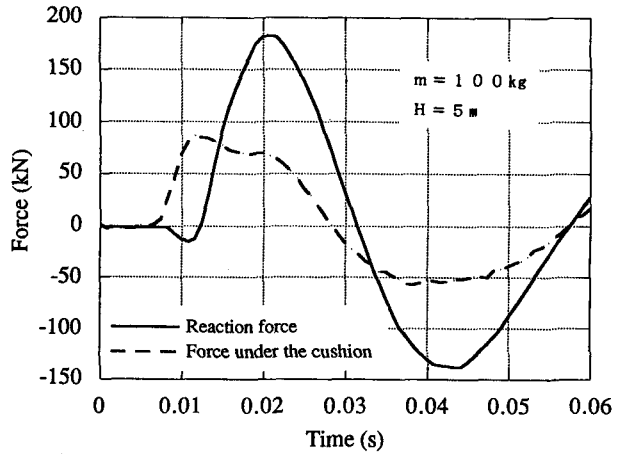
ここに、 $\lambda$ はクッション材のLamé定数 (kN),  $m$ は質量 (kg),  $H$ は落下高さ (m) である。

図中に示されているLamé定数  $\lambda = 1 \text{ MN/m}^2$  は日本で設計によく用いられている値である。本実験で得られた土圧衝撃力は落石対策便覧 ( $\lambda = 1 \text{ MN/m}^2$ ) とほぼ等しいことがわかる。しかし、等価衝撃力は土圧衝撃力より大きいことがわかる。これは、さきに述べた動倍率により表される動的影響である。ロックシェッドの屋根に局所的に作用する力としては土圧衝撃力を、構造全体としては等価衝撃力を設計で考えることが合理的と考えられる。

本論文では、現在一種類のクッション材に対して落石質量100kgの実験結果しか得ていないため、衝撃力評価に関する一般的な提案は行えないが、そのために今後さらに実験を継続する予定である。



(a) Displacement



(b) Impact force

Fig.7 Displacement and impact force of the impact test

#### 4. あとがき

本研究では、落石による衝撃荷重算定のために行ったスイス産の代表的な砂利をクッション材として用いた落石衝撃実験結果の一部について報告した。この結果、この砂利を用いた場合、屋根部の剛性に大きく寄与し増加させること、得られた衝撃力は落石対策便覧 ( $\lambda=1\text{MN/m}^2$ ) に比べ大きいこと、屋根部の挙動より仮定した等価衝撃力は本実験内では土圧衝撃力より大きいことが明らかになった。現在、衝撃力評価の一般化のために実験を継続中であることを付記する。

#### 謝辞

この研究は、スイス国の落石および雪崩対策のための委員会の活動の一つとして行ったものであり、関係者各位に感謝する。なお、著者の一人は日本学術振興会の特定国派遣の機会によりこの研究を行ったものであり、日本学術振興会ならびにお世話頂いたスイス工科大学のProf. M. Hirtに深く謝意を表す。

#### 文献

- 1) Heierli A., Merk A., Temperli A. : Schutz gegen Steinschlag (2.Auflage), Eidgenössisches Verkehrs-und Energiewirtschaftsdepartement Bundesamt für Strassenbau, 1985-11.
- 2) 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.
- 3) 園田佳巨, 佐藤紘志, 石川信隆: エネルギー基準による落石覆工上のサンドクッション厚の算定法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1617-1625, 1991-3.
- 4) 園田恵一郎: 限界状態設計法とロックシェットの設計, 北陸道路研究会35年記念シンポジウム論文集, pp. 22-34, 1988-10.
- 5) 日本道路協会: 落石対策便覧, 日本道路協会, 1983-7.

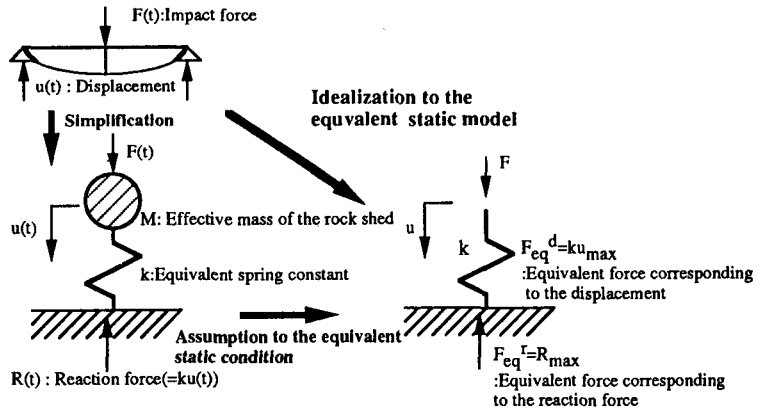


Fig.8 Equivalent impact force

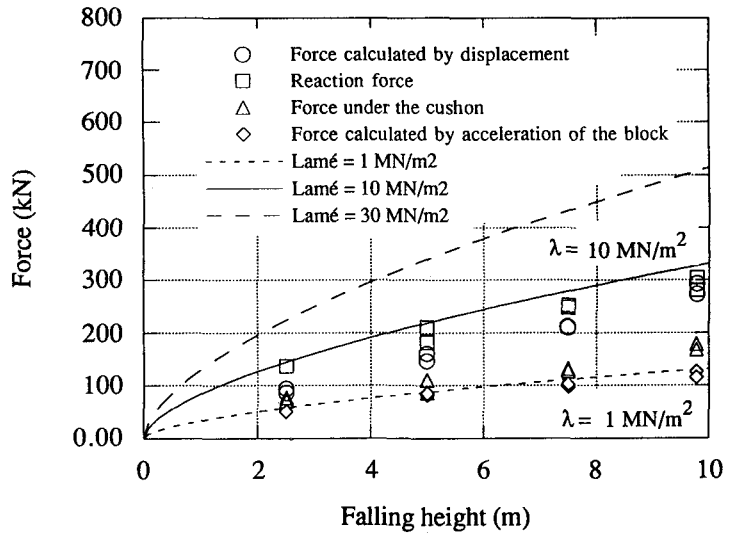


Fig.9 Relationship between falling height and impact force