

(39) DEM・FEM結合法によるロックシェットの衝撃応答解析について

ANALYSIS ON IMPACT BEHAVIOR OF ROCK-SHED BY COMBINATION OF DEM AND FEM

森北一光\*, 中田吉彦\*\*, 榎谷浩\*\*\*, 梶川康男\*\*\*\*

Kazuteru MORIKITA, Kiyohiko NAKATA, Hiroshi MASUYA and Yasuo KAJIKAWA

\* 金沢大学大学院 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

\*\* 工修 小松市役所 都市整備部 (〒923 小松市小馬出町91)

\*\*\* 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

\*\*\*\* 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2-40-20)

キーワード: 落石, 土圧衝撃力, エネルギー伝達率  
(falling rocks, impact of earth pressure, a rate of energy transmission)

1. まえがき

落石などによる衝撃荷重をうけるロックシェットなどのコンクリート構造物の挙動の解明と設計法の確立が求められている。落石の場合、衝撃を受ける部分には砂などの緩衝層が設置されており、緩衝層だけの破壊が生じ、構造物に損傷がない程度の衝撃に対しては、緩衝層の耐衝撃性と衝撃力伝達機構を解明することにより、設計荷重の評価が可能である。しかし、衝撃の規模が大きく、構造部材に損傷を与える場合には、飛来物、緩衝層、そして構造物が相互に連成しその挙動は一般に非常に複雑なものとなる。

本研究では、複合構造物であるロックシェットに対して、緩衝材として用いられている砂などの離散体の解析に適している個別要素法 (DEM) と覆工などの連続体の解析に適している有限要素法 (FEM) を結合させて、衝撃を受ける構造物の解析を行い、衝撃力や覆工へ伝達されるエネルギーについて検討する。

2. 解析概要<sup>1)</sup>

図-1に示すように、重錘とクッション材を個別要素で覆工を有限要素でモデル化した。有限要素と個別要素の接触判定を厳密に行なうとき、有限要素の種類によりその変形状は異なっている。しかし、一般に有限要素は曲線によって表現されているため、この有限要素と時々刻々とその位置が変化する個別要素との接触を判定する場合には、各計算ステップ

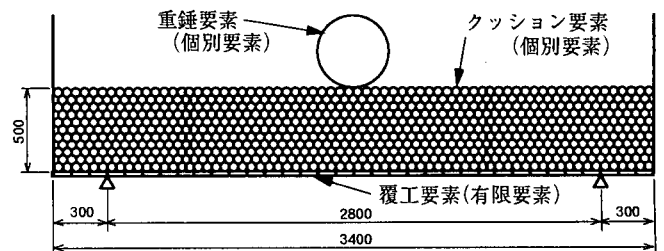


図-1 解析モデル

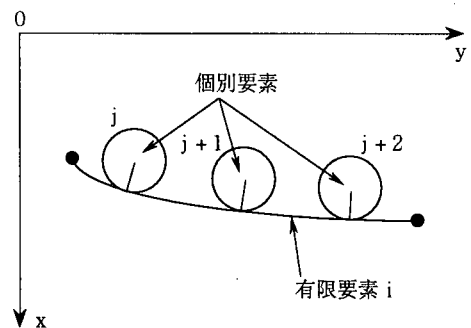


図-2 有限要素と個別要素の厳密な接触

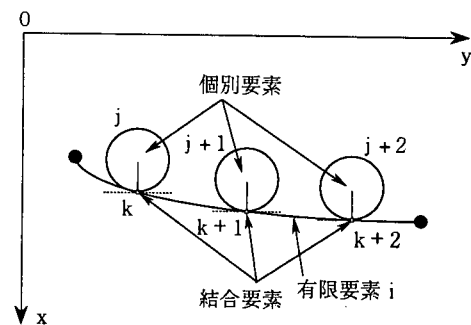


図-3 有限要素と個別要素の接触判定

ごとにその曲線に対して個別要素の中心から法線を引き、個別要素の半径と法線の長さとの比較により、接触を判定しなければならない(図-2)。このため、厳密に接触を判定するためにはかなり煩雑な処理を要求される。

そこで、接触判定に関して次のような仮定を行なった。図-3に示すように個別要素と有限要素の接触は、個別要素の最下点においてのみ接触するとし、その点を大きさや質量を持たない要素(結合要素)として設定した。この、結合要素とクッション要素の間に働く作用力を各時間ステップで求めその作用力に基づき覆工を有限要素法で解析する。

図-4にフローチャートを示す。

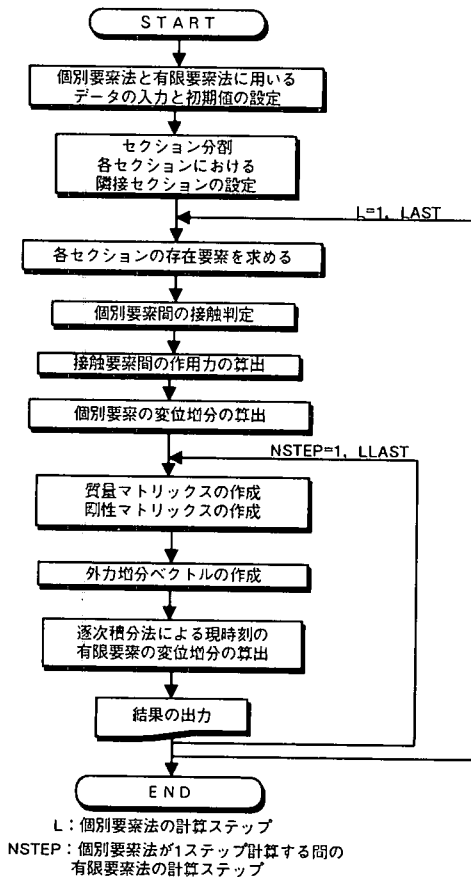


図-4 解析のフローチャート

### 3. 解析結果

#### (1) 実験値との比較

実験<sup>2)</sup>は、スイス連邦工科大学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なわれた。実験は、図-5に示す落石覆工の屋根部のモデルである鉄筋コンクリート板(縦横3.4m、厚さ20cm)を4点支持で設置し、その上にサンドクッションを敷き、鉄筋コンクリートを充填した重錘を自由落下させ実験を行った。コンクリートの圧縮強度は32.2MN/m<sup>2</sup>、

弾性係数は29.7GN/m<sup>2</sup>である。クッション厚dは0.5mとした。落石として用いた重錘は、質量が100kg、500kgそして1000kgのいずれも底面形状が球形のものである。

図-6~図-8に重錘重量m=0.1tf、落下高さH=5.0mのときの、それぞれ土圧衝撃力、たわみ、支点反力の時間的変化を示す。たわみの立ち上がりが実験に比べやや遅れるが、土圧衝撃力、たわみ、支点反力に関して、解析値は実験値を比較的良好にとらえているといえる。

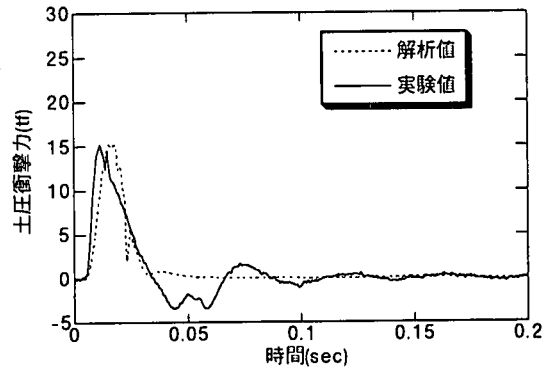


図-6 土圧衝撃力の時間的変化

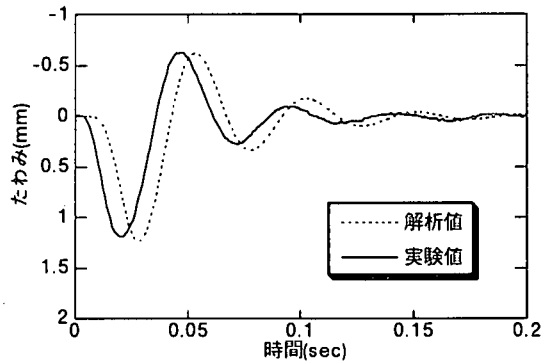


図-7 たわみの時間的変化

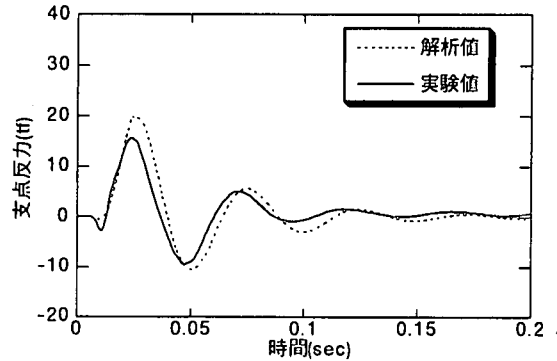


図-8 支点反力の時間的変化

図-9~図-11に土圧衝撃力、たわみ、支点反力と落下高さの関係を示す。なお、図中には次式で示される落石対策便覧式を示している。

$$P=2.455 \lambda^{2/5} W^{2/5} H^{3/5} \quad (1)$$

ここに、 $\lambda$ はクッション材のラメ定数(=1000tf/m<sup>2</sup>)であり、 $W$ は落石重量(tf)、 $H$ は落下高さ(m)である。

これより、種々の落石条件においても解析は実験を比較的良好にシミュレートしているといえる。

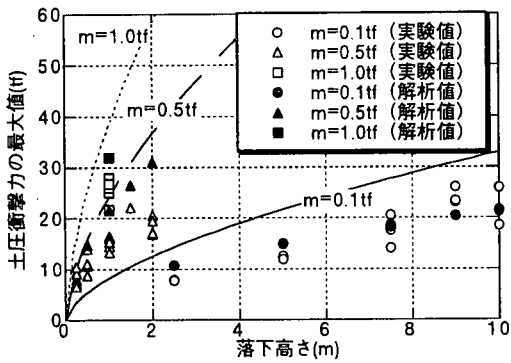


図-9 落下高さと土圧衝撃力

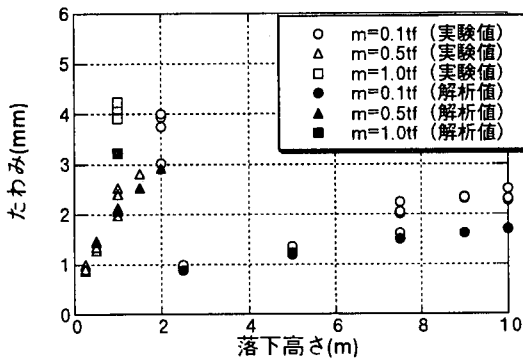


図-10 落下高さとたわみ

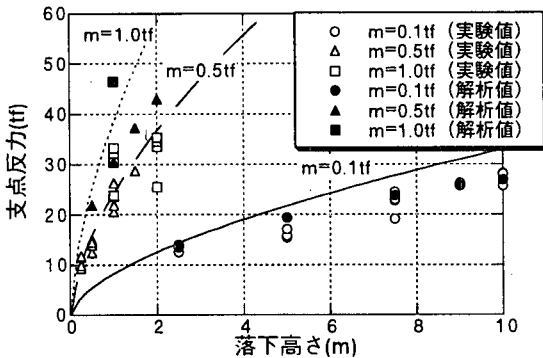
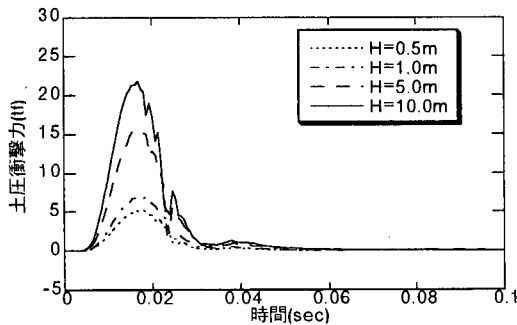


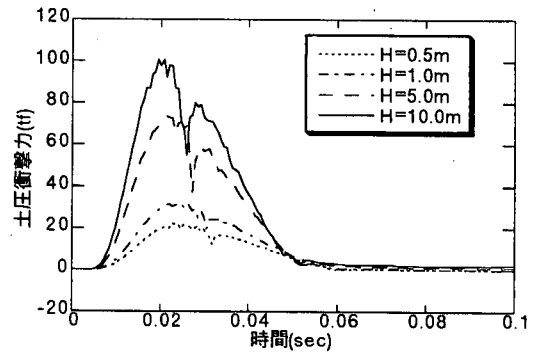
図-11 落下高さと支点反力

## (2) 衝撃力特性とエネルギー伝達率

ここでは、種々の落石条件を与え解析を行い衝撃力特性や覆工へ伝達されるエネルギーについて検討する。図-12に重錘重量 $m=0.1tf$ 、 $1.0tf$ のときの各



(a)  $m=0.1tf$



(b)  $m=1.0tf$

図-12 土圧衝撃力の時間的变化

落下高さにおける土圧衝撃力の時間的变化を示す。落下高さが高くなるにつれて土圧衝撃力は大きくなるが、重錘質量が一定なら落下高さによらず土圧衝撃力の作用時間はほぼ一定であるといえる。

図-13に覆工へのエネルギー伝達率と落下高さとの関係を示す。ここでエネルギー伝達率とは覆工へ伝達されるエネルギーの最大値 $E_t$ と重錘が初期に持っているエネルギー $E_p$ の比のことである。覆工へのエネルギー伝達率は落下高さには依存せず、重錘重量に依存することが分かる。次に、覆工の重量や曲げ剛性を変化させ解析を行い、土圧衝撃力の作用時間 $T_d$ と覆工の1次固有周期 $T$ との比 $T_d/T$ が及ぼす影響について検討する。図-14に土圧衝撃力の最大値と $T_d/T$ との関係を示す。土圧衝撃力の最大値は $T_d/T$ の影響をあまり受けないこといえる。図-15にエネルギー伝達率と $T_d/T$ との関係を示す。 $T_d/T$ が0.8~1.0程度でエネルギー伝達率は最大となっている。また、覆工の曲げ剛性が大きいとエネルギー伝達率が小さくなることがわかる。図-16にエネルギー伝達率 $E_t/E_p$ に覆工と重錘の重量比 $M/m$ を乗じたものと $T_d/T$ との関係を示す。これより、次式により示される近似曲線が得られる。この式を覆工へ伝達されるエネルギーの評価も可能と思われる。

$$(E_t/E_p) \times (M/m) = -1 + 2.5 / (T_d/T) \quad (2)$$

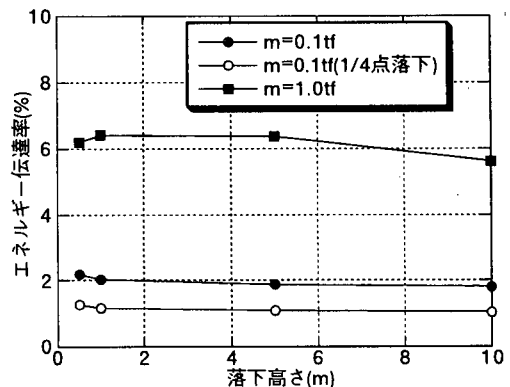


図-13 落下高さとエネルギー伝達率

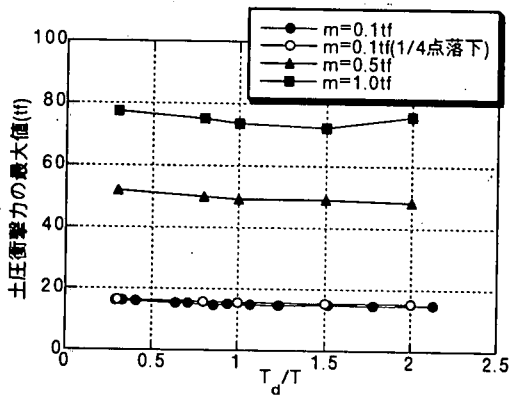


図-14  $T_d/T$ と土圧衝撃力最大値

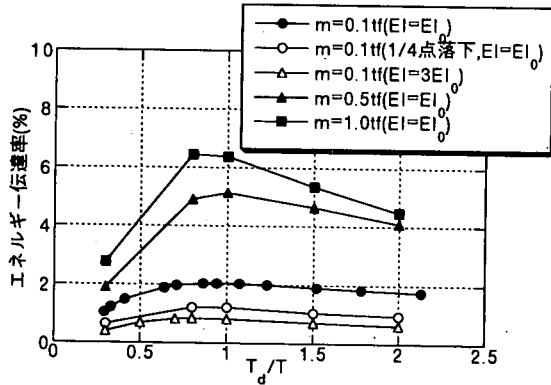


図-15  $T_d/T$ とエネルギー伝達率

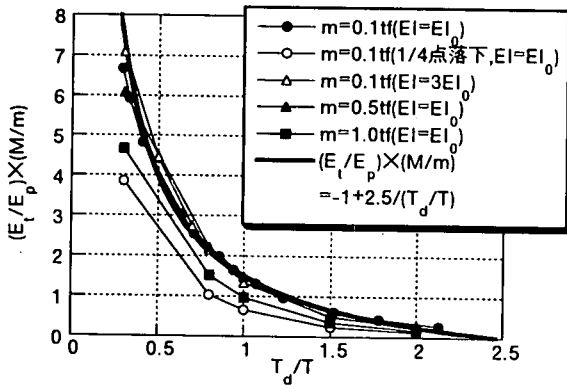


図-16  $T_d/T$ によるエネルギー伝達率評価

図-17に示すように、覆工に傾斜を設けた解析モデルを示す。

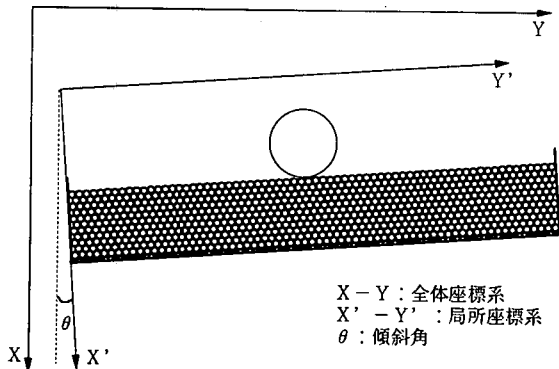


図-17 座標系の概要

図-18, 図-19に、覆工の傾斜角度を、0, 10, 20度と変化させたものを示す。土圧衝撃力、エネルギー伝達率ともに、傾斜角度が増すにつれて小さくなっている。

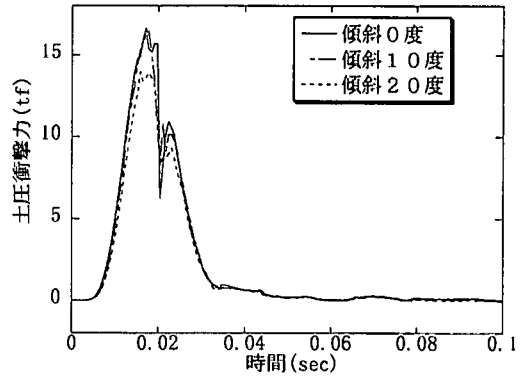


図-18 土圧衝撃力の傾斜角度の影響

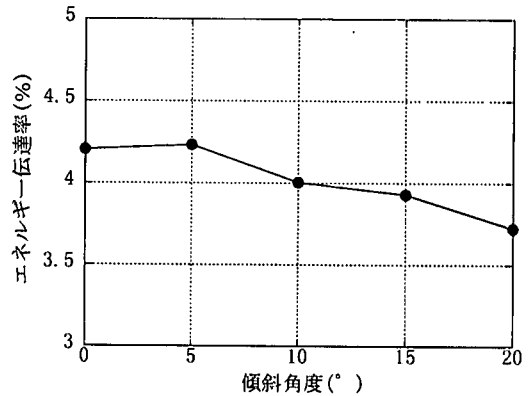


図-19 エネルギー伝達率と傾斜角度

#### まとめ

- (1) 本結合法を用いて、落石実験により得られる衝撃力特性を比較的よくシミュレートできた。
- (2) 土圧衝撃力の作用時間およびエネルギー伝達率は、重錘の落下高さには依存せず、重錘重量に依存する。
- (3) エネルギー伝達率は $T_d/T$ が0.8~1.0程度で最大となる。
- (4) 伝達エネルギーを推定するための評価式を示した。
- (5) 覆工に傾斜を与えるると土圧衝撃力、エネルギー伝達率が小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 岡田卓馬, 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男: 落石衝突に対するDEM・FEM結合シミュレーションについて, 土木学会第51回年次学術講演会概要集, pp.302~303, 1996.
- 2) 榎谷浩, フランテキョドラ: 敷砂上への落石衝突による荷重の評価に関する一考察, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.275~278, 1996.