

落石に対するDEM・FEM結合法による衝撃力とエネルギー伝達について

金沢大学大学院

森北一光

小松市

正会員 中田吉彦

金沢大学工学部

正会員 榎谷 浩

金沢大学工学部

正会員 梶川康男

1. まえがき

落石などによる衝撃荷重をうける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。ロックシェッドには、一般に衝撃を受ける部分には砂などの緩衝材が設置されており、緩衝材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、緩衝材の耐衝撃性と衝撃力伝達機構を解明することにより、設計荷重の評価は可能である。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、緩衝材、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ドに対して、緩衝材として用いられている砂など変形や流動の大きい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

図-1のように、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。個別要素と有限要素の接触点は質量を持たない特別な要素（結合要素）として設定し、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。

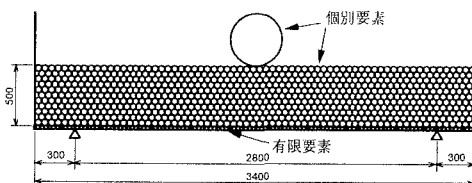


図-1 解析モデル

3. 解析結果

(1) 実験値との比較 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われた実験を対象とした。図-2～図-4に重錘重量 $m=0.1\text{tf}$ 、落下高さ $H=5.0\text{m}$ 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-5は土圧衝撃力最大値と落下高さの関係を示す。なお、図中には(1)式で示される落石対策便覧式を示している。

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

ここに、 λ はクッション材のラメ定数($=1000\text{tf/m}^3$)であり、

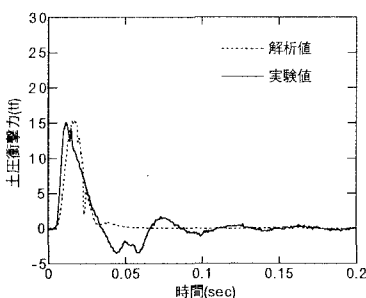


図-2 土圧衝撃力の時間的変化

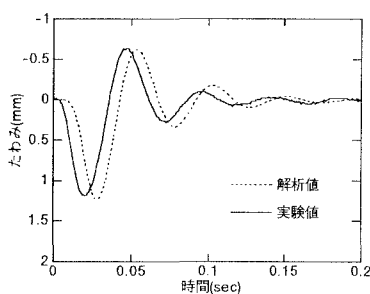


図-3 たわみの時間的変化

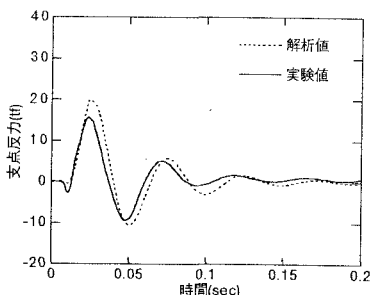


図-4 支点反力の時間的変化

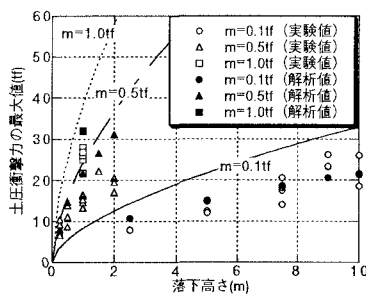


図-5 落下高さと土圧衝撃力

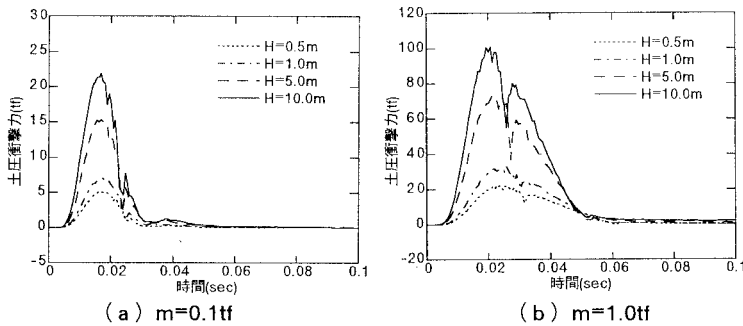


図-6 土圧衝撃力の時間的変化

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とらえているといえる。

(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-6に重錘質量 $m=0.1tf$, $1.0tf$ のときの各落下高さにおける土圧衝撃力の時間的変化を示す。落下高さが大きくなるにしたがい、土圧衝撃力の最大値は大きくなるが、土圧衝撃力の作用時間は重錘重量が等しければ、落下高さによらずほぼ一定であるといえる。図-7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、重錘落下位置に依存することが分かる。次に、覆工の重量、曲げ剛性や重錘落下位置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-8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-9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きや、重錘落下位置が中心より離れるときにエネルギー伝達率が小さくなるのがわかる。図-10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式として用いることが可能である。

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

4. 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良好に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、落下位置に依存する。(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) 覆工への伝達エネルギーを推定するための評価式を示した。

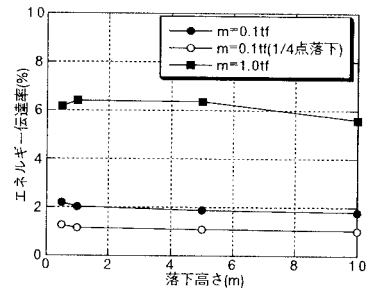
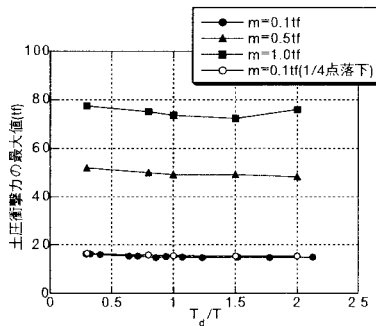
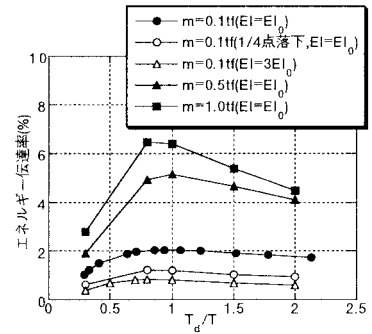
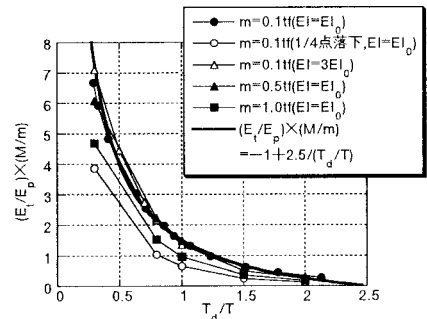


図-7 落下高さとエネルギー伝達率

図-8 T_d/T と土圧衝撃力最大値図-9 T_d/T とエネルギー伝達率図-10 T_d/T によるエネルギー伝達立評価