

砂を対象とした重錘落下衝突実験の再現解析(その2)

東電設計(株) 正会員 ○落合 祐介

東電設計(株) 正会員 山川 大貴

伊藤忠テクノソリューションズ(株) 正会員 松澤 遼

防衛大学校 正会員 別府 万寿博

1. 背景および目的

地中構造物に対して飛来物等の衝突による安全性を解析的に評価する際、飛来物による外力は覆土を介して構造物に作用するため、飛来物の衝突に伴う地盤への貫入現象や、地盤中の伝達衝撃力を精度良く解くことが求められる。

著者らの既往の研究では、地盤材料への貫入現象や応力伝播のメカニズム解明のため、砂を対象とした重錘落下衝突実験¹⁾およびその再現解析²⁾を実施した。

本研究では、さらなる解析手法の高度化を目的とし、砂の材料モデルや解析モデルについて再検討した上で、異なる落下高さの実験についても再現解析を実施した。

解析モデル図を図-3に示す。砂はSPHでモデル化し、飛翔体、砂箱、基礎構造(コンクリート版+ゴムダンパ)は固体要素でモデル化した。また、計算時間短縮のため、軸対称モデルとしている。重錘には各落下高さ(h=5、10、20m)からの自由落下による速度を初速度として与えた。



図-3 解析モデル図

2. 砂の重錘落下実験の概要¹⁾

衝突解析の再現対象とした砂の重錘落下実験の概要を表-1に示す。図-1に重錘先端部の概略図、図-2に実験装置概略図を示す。重錘の挙動は高速カメラにより計測し、伝達衝撃力は砂箱底面に設置した圧力センサにより計測した。

表-1 実験概要

重錘(飛翔体)	質量: 210.2kg, 先端形状: 半球形
砂(衝突体)	鋼製の箱に緩衝材を投入
緩衝材料	乾燥珪砂5号, 相対密度50%に調整
再現対象ケース	落下高さ: 5m, 10m, 20m, 緩衝材層厚: 70cm

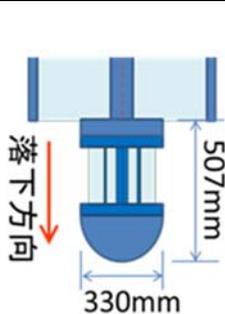


図-1 重錘先端部概略図

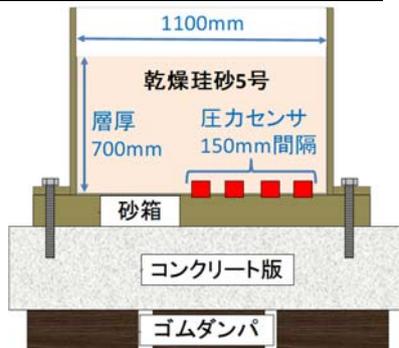


図-2 実験装置概略図(断面図)

3. 数値解析条件

3.1 解析モデル

再現解析は、衝撃解析コードAUTODYNを用いた。

3.2 砂の材料モデル

砂の材料モデルは、砂の圧力-密度状態を表す状態方程式と降伏関数で設定した。まず、砂の状態方程式は、室内試験で取得された圧力-密度関係で設定した(図-4参照)。次に、降伏関数にはDrucker-Prager構成則を用い、三軸圧縮試験より得られた内部摩擦角 $\phi=38.71^\circ$ より降伏応力-圧力関係を設定した。砂と重錘および砂箱間の動摩擦係数は $\mu_d=0.05$ とした。

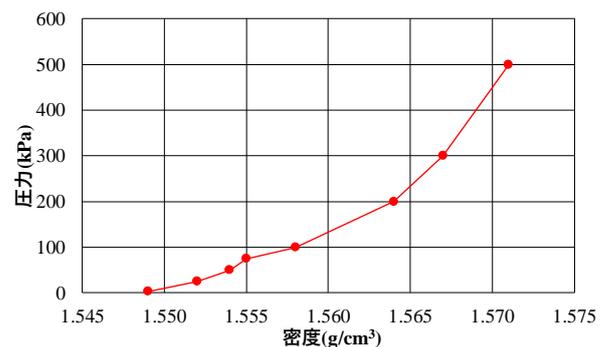


図-4 砂の状態方程式

4. 解析結果および実験結果との比較

4.1 重錘貫入量および重錘速度

重錘挙動の再現性を確認するため、実験および再現解析での重錘の貫入量と速度の時刻歴を比較した。図-5に各落下高さの重錘の貫入量と速度の時刻歴を示す。

キーワード 中速度衝突、重錘落下衝撃実験、緩衝材

連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 東電設計株式会社 E-mail yusuke-ochiai@tepsco.co.jp

まず、重錘の速度時刻歴に着目すると、実験では重錘の減速勾配が0~25msec付近と25msec以降で2段階に生じていることが確認できる。再現解析結果と比較すると、0~15msec付近までは全ケースにおいて、実験での重錘の速度変化の再現性は良いが、15msec以降では挙動が異なっている。解析でも2段階の減速傾向に似た挙動が見られるが、その発生時刻が早く、また継続時間も短い。一方で重錘が静止する時刻については全ケースで90~100msecとなり、実験結果と概ね一致している。

次に、重錘の貫入量の時刻歴に着目すると、最終的な貫入量は、落下高さ $h=10\text{m}$ および $h=20\text{m}$ のケースでは実験とほぼ一致しているが、 $h=5\text{m}$ のケースでは解析の方が10%程度小さい結果となった。

4.2 伝達衝撃力

図-6 に砂箱底面の伝達衝撃力の時刻歴を示す。ここでは、各圧力センサから得られた圧力分布より、砂箱底面全体にかかる伝達衝撃力を示している。実験では、1波目の最大衝撃力が13~18msec付近で生じ、その後60~75msec付近で小さな2波目の衝撃力が緩やかに生じている。解析では、1波目の最大衝撃力については、継続時間は短いものの、全てのケースで実験を概ね再現できた。しかし、その後の20msec以降は、実験では見られない、周期の短い2波目、3波目の衝撃力が現れる結果となった。これは、図-5の重錘の速度減少が複数回出現するタイミングと対応している。

4.3 応力の伝播状況

図-7 に落下高さ $h=10\text{m}$ の砂の平均応力カウンター図を各時刻で示す。砂の平均応力が0.20MPa以上となる範囲(赤色)に着目すると、5~15msecでは重錘直下において高压となる領域が分布しており、応力伝播の分散角は概ね45度となった。20msecでは重錘直下の応力がほとんど生じていないが、これは、この時間帯において砂が抵抗力を喪失したことにより重錘の速度減少がなくなり、速度が一定となった現象と考えられる。このことは図-5の重錘速度挙動とも対応している。

5. まとめ

本研究では、砂を対象とした重錘落下衝突実験に対し、異なる落下高さで再現解析を実施し、重錘の挙動および砂箱底面での伝達衝撃力について比較を行った。以下にその成果を要約する。

・重錘の貫入量と衝突速度は、細部の減速挙動の再現性には課題が残されたが、最終的な貫入量は実験結果と

概ね一致しており、全体的な挙動は再現できた。

・重錘衝突による砂箱底面の伝達衝撃力は、継続時間や2波目以降の応答がやや異なるものの、衝突直後の1波目の最大値については実験を概ね再現できた。

今後は、引き続き砂の材料パラメータ、動摩擦係数、砂の軟化特性を考慮した構成則等の設定について検討し、さらなる解析精度の向上を目指す。

参考文献

- 1) 山川大貴, 別府万寿博 他: 砂を対象とした重錘落下衝突実験, 土木学会, 第72回年次学術講演会, I-413, 2017
- 2) 山川大貴, 別府万寿博, 松澤遼 他: 砂を対象とした重錘落下衝突実験の再現解析, 第73回年次学術講演会, I-230, 2018

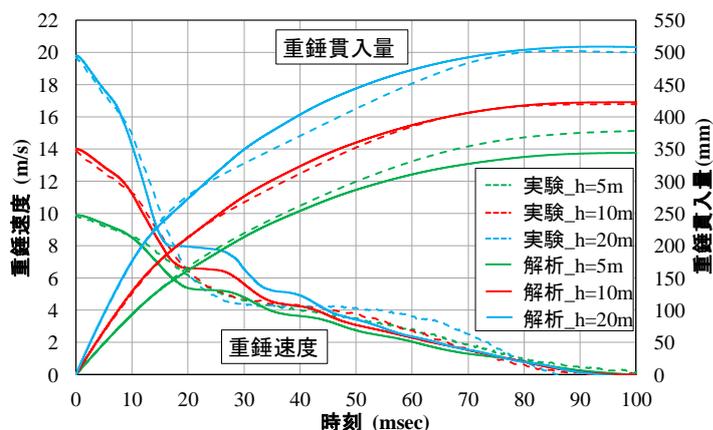


図-5 重錘の貫入量および速度時刻歴

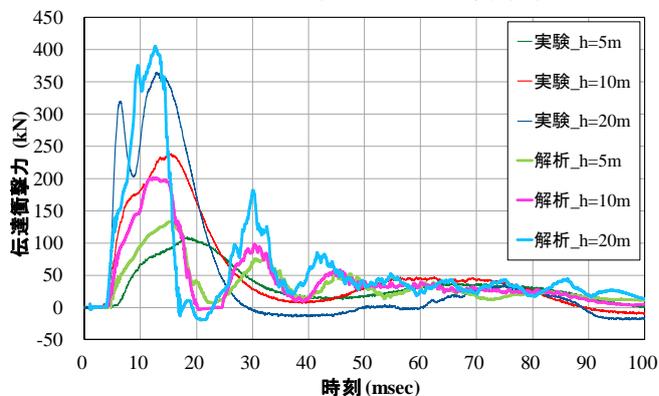


図-6 砂箱底面の伝達衝撃力時刻歴

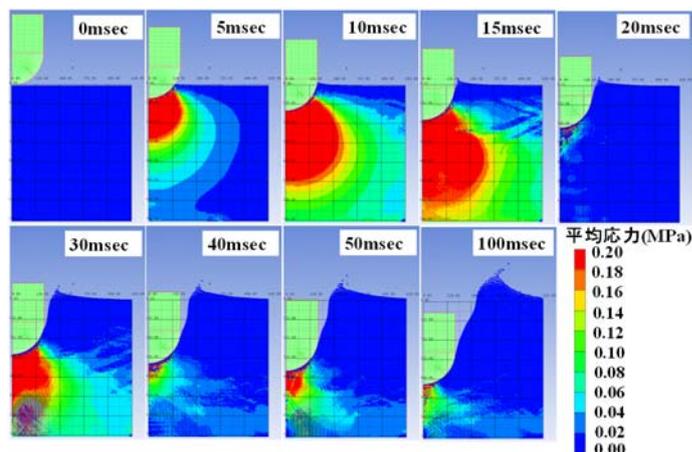


図-7 砂の平均応力カウンター図(落下高さ $h=10\text{m}$)