

飛来物衝突時の地盤挙動に関する遠心模型実験とその評価

丸 山 憲 治*¹ 平 田 昌 史*¹
 大 塚 悠 大*¹ 石 黒 健*¹
 天 野 慎 一*²

要 旨

近年の国際情勢を鑑み、他国のミサイルへの対策や、ウクライナでは地下シェルターに市民が避難することで身を守っている現状等を踏まえると、避難先である地下構造物に対する地盤工学的な研究課題、すなわち飛来物に対する緩衝材としての地盤に関する研究課題も多いと考えられる。遠心模型実験では、原地盤の有効応力状態に加え、比較的大きな物体の衝突を再現することが可能と思われることから、衝突解析とも連携しながら、地盤の緩衝効果に関する現行設計法の検証や、衝撃荷重に対する効率的かつ効果的な地盤系対策工の検討などに繋げられればと考える。

そこで本研究では、飛来物を模擬した衝撃荷重の再現を試み、衝撃荷重が地盤挙動に及ぼす影響を遠心模型実験で調べた。そして、実験結果の一例及び考察を示すとともに、運動エネルギーベースの評価を導入することで、地盤内の土圧値や地盤への飛来物の貫入量のみでは把握しきれない地盤の衝撃吸収特性を定量的に評価できることを示唆した。

キーワード 遠心模型実験／衝撃荷重／地盤挙動／運動エネルギー／衝撃吸収特性

目 次

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1. はじめに | 4. 地盤のエネルギー吸収特性に関する考察 |
| 2. 鉄球を用いた遠心模型実験 | 5. 遠心載荷実験の技術的課題と展望 |
| 3. 砲弾型模型を用いた遠心模型実験 | 6. おわりに |

CENTRIFUGAL MODEL EXPERIMENT ON THE GROUND BEHAVIOR DURING COLLISION OF PROJECTILE AND ITS EVALUATION

Kenji MARUYAMA Masafumi HIRATA
 Yudai OHTSUKA Takeshi ISHIGURO
 Shinichi AMANO

Synopsis:

Considering the recent international situation, the measures against missiles from other countries, and the current situation where citizens in Ukraine are taking refuge in underground shelters to protect themselves, it can be assumed that there are many geotechnical research issues related to underground shelter. In this study, it was considered that large collision can be reproduced in centrifugal model experiments. And with the help of collision analysis, centrifuge model test was also considered to be able to verify the accuracy of current design methods as well as to examine the effective and efficient countermeasures against collision loads. In this study, results of centrifuge model test experiment to reproduce the collision load and ground behavior simulated by an incoming object were examined. This report presents an overview of the centrifugal model experiments, along with their results and its consideration with the quantitative evaluation of the ground's shock absorption characteristics from the perspective of kinetic energy.

* 1 本店 ICI 総合センター ICI テクノロジーセンター 地盤グループ * 2 株式会社 JSOL

1. はじめに

近年の国際情勢を鑑みると、他国から日本近海へミサイルが繰返し発射され、台湾近海では中国による軍事活動が活発化、ウクライナではロシアによる侵攻に伴う攻撃によって地下シェルターに市民が避難することで身を守っている。このような背景を踏まえると、わが国でも緊急処理事態に対して、避難施設やシェルター等の国民を保護する施設が不可欠と考えられる。世界的には、各国の安全保障環境にもよるが、武力攻撃や緊急処理事態に対して、アメリカ、イギリスなど欧米諸国の避難施設整備率（国民数に対する避難施設の全収容人数の割合）は約 70%以上とされているが、日本ではそれらの事態に対するハード対策である避難施設の整備を行っていないのが現状である²⁾。このような避難施設やシェルターは地下に整備されることが多く、この場合、地盤は飛来物に対する緩衝材としての役割を果たすことになる。一方、ミサイル等の飛来物による荷重が地盤に加わった際の挙動には未解明な部分が多く、地下シェルターにおける地盤工学的な研究課題は多いと考えられる。例えば地下シェルター等の地下構造物の場合、作用外力として衝突と爆発が主に挙げられるが、実スケールでの飛来物衝突や爆破に関する実験は、多大なコストと時間を要するだけでなく、安全性や環境負荷の観点から実施が困難である。地盤研究室では現在、遠心載荷装置の新たな適用方法、適用課題を模索しており、遠心模型実験では実地盤の有効応力状態とミサイル等の大きな衝撃荷重の組み合わせを再現することが可能であると考えた。また、遠心載荷実験により実地盤相当の実測データを取得することができれば、衝撃系の数値解析と連携して、衝撃荷重に対する現行設計法の検証や、効率的かつ効果的な地盤系対策工の検討などに繋がれると考える。

そこで本研究では、飛来物を模擬した衝撃荷重の再現を試み、衝撃荷重が地盤挙動に及ぼす影響を遠心模型実験で調べた。そして、その結果及び考察を示すとともに、エネルギーベースでの評価を導入することで、地盤内の土圧値や地盤への飛来物の貫入量のみでは把握しきれない地盤の衝撃吸収特性を、定量的に評価することも検討した。

2. 鉄球を用いた遠心模型実験

2.1 遠心模型実験の概要（鉄球の場合）

衝撃荷重を再現するため、鉄球を地盤地表面に落下させる遠心模型実験を行った³⁾。図-1 に模型地盤の概略図を示す。幅 50cm の剛性土槽内に、地盤材料に豊浦砂を用いて相対密度 89% の地盤を作製した。この際、模型地盤の左側半分は何も設置しない無改良地盤とし、右側半分には浅部にジオテキスタイルを模擬した図-2 に示す市販の網戸（交点が結合されているもの）を 10mm ピッチで 3 層敷設した。模型地盤内には、土圧計を鉄球の落下

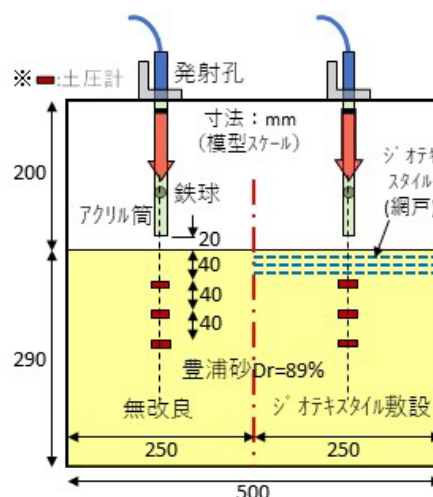


図-1 模型地盤の概略図（鉄球の場合）

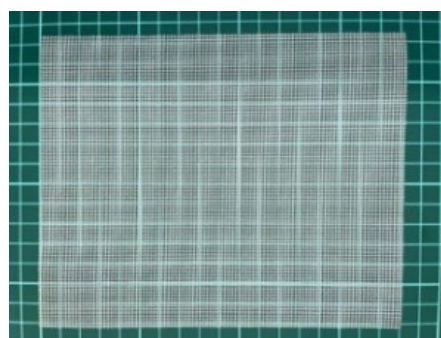


図-2 ジオテキスタイル模型（市販の網戸）

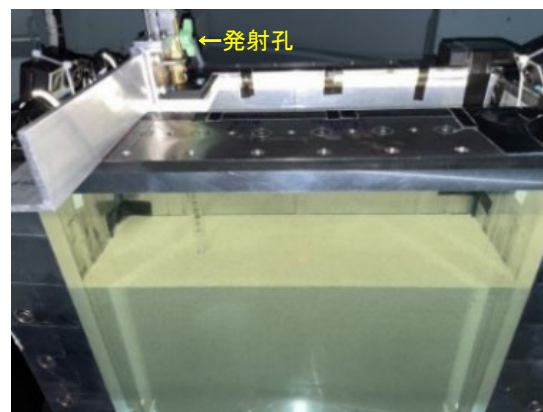


図-3 模型地盤状況

位置直下に深度 40mm 間隔で 3 か所設置している。深度 40mm では落下位置直下の奥行方向前後 20mm 離れた位置にも土圧計を設置した。土圧計には東京測器製の超小型圧力センサーPDA-PB を使用している（容量 200kPa 又は 500kPa で、応答周波数は約 2kHz 又は 3kHz）。実験は遠心加速度 50G 場とした。鉄球にはパチンコ玉を用いており、直径φ11mm、重さ 5.46g（実物スケールでφ55cm、重さ 682.5kg 相当）である。

鉄球の発射機構としては、土槽天端の支持治具上に、鉄球より少し小さな孔を開けたゴム板を設置し、その上

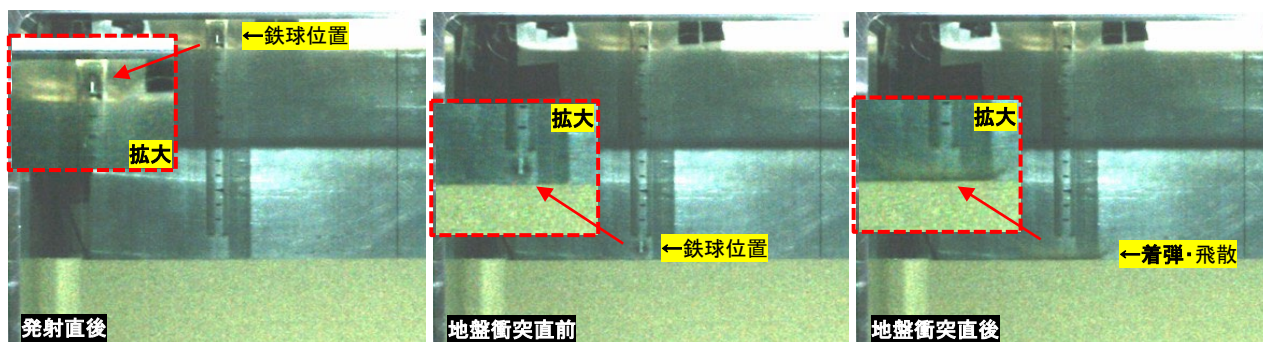


図-4 鉄球の落下状況

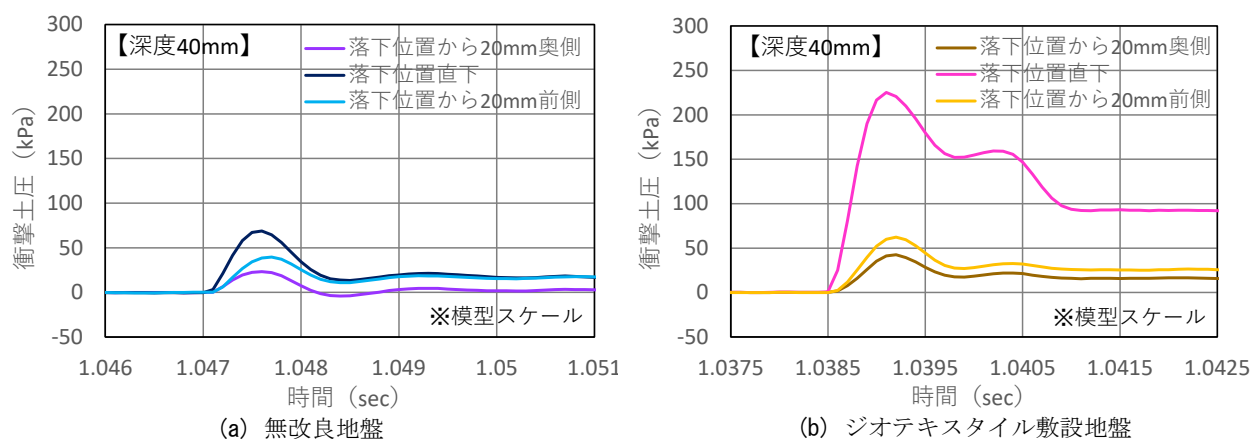


図-5 鉄球落下による衝撃土圧

に鉄球を置き配管バルブで蓋をして、電磁弁を介して一気に 600kPa の空気圧を加え、鉄球を発射している。ここで、発射の際の鉄球落下によるコリオリ力の影響を低減するため、発射孔にアクリル筒を取付けている。実験はまず無改良地盤に鉄球の発射を行った後、一旦遠心装置を止め発射機構を付け替え、再度装置を回して、ジオテキスタイル敷設地盤に鉄球の発射を行った。計測はサンプリング間隔 10000Hz としている。

2.2 実験結果（鉄球の場合）

図-4 に高速度カメラで撮影した鉄球落下時の写真を示す。鉄球を落下させると地表面の砂が飛散する様が見て取れる。発射孔に取り付けたアクリルパイプには目盛りを付けており、高速度カメラの映像から 15cm 落下する際の写真枚数を求め、鉄球の平均的な落下速度を求めると 12m/sec 程度であった。

図-5 に深度 40mm（実物スケールで 2.0m）における鉄球落下による土圧の増分値を示す。（a）に無改良地盤、（b）にジオテキスタイル敷設地盤の場合を示しており、どちらも落下位置直下の奥行方向前後 20mm 離れた位置の土圧計の値も示している。（a）の無改良地盤の場合を見ると、落下位置直下で瞬間的に土圧が 70kPa 程度急増していることがわかる。奥行方向に前後 20mm 離れると土圧は小さくなっている。（b）のジオテキスタイル敷設地盤の場合を見ると、落下位置直下で瞬間的に 225kPa とかなり大きく生じており、奥行方向に前後 20mm 離れると土圧

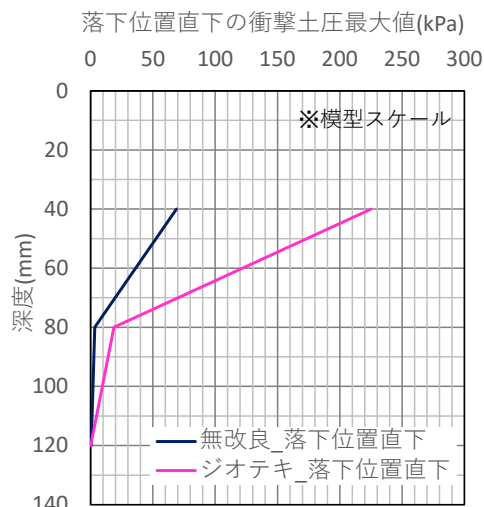


図-6 衝撃土圧の深度分布

は、無改良の場合と同様に小さい。

図-6 に落下位置直下における無改良地盤とジオテキスタイル敷設地盤の衝撃土圧のピーク値の深度分布を示す。深度 40mm（実物スケールで 2.0m）を見ると、ジオテキスタイル模型を敷設した方が、無改良地盤より 3 倍以上大きな土圧が瞬間的に生じている。深度 80mm（実物スケールで 4.0m）を見ると、どちらも大幅に土圧が小さくなっており、無改良地盤ではほとんど生じていない。深度 120mm（実物スケールで 6.0m）ではどちらも鉄球落下による土圧増分は見られない。

これらのことから、無改良地盤では、砂粒子の飛散及

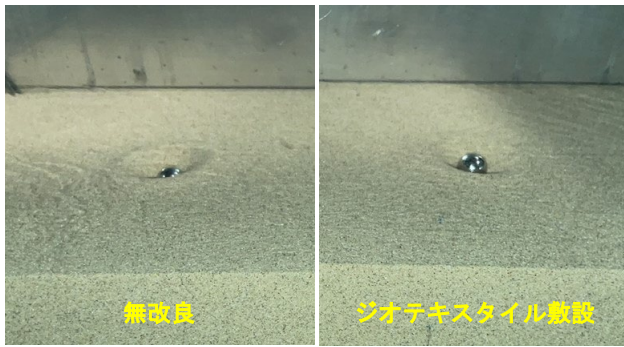


図-7 実験後の鉄球落下状況

び変形が生じ、衝撃荷重が分散しやすいことが考えられる。ジオテキスタイル敷設地盤では、補強材の拘束効果により鉄球による衝撃荷重を盤として受ける形となり、無改良地盤より衝撃土圧が大きくなったと考えられる。このため、例えば地下構造物に対して飛来物による衝撃荷重の対策工を検討する際は、地下構造物より浅い部分を単に剛とするのではなく、設計思想に基づき、地下構造物への影響を考慮した検討が必要と考えられる。

図-7 に実験後の鉄球の落下状況を示す。図中左側が無改良地盤、右側がジオテキスタイル敷設地盤である。どちらも鉄球着弾時にクレータができており、ジオテキスタイル敷設より無改良の方が多少深く地盤に貫入している。鉄球の着弾深さ（地表面から鉄球下端までの深さ）は、無改良で 12.5mm、ジオテキスタイル敷設で 9.5mm であった。

3. 砲弾型模型を用いた遠心模型実験

3.1 遠心模型実験の概要（砲弾型模型の場合）

砲弾等の飛来物衝突時に対してより現実的な検討を行うため、図-8 に示す砲弾型の模型を作製した。砲弾型模型には、加速度計を取り付けている。砲弾型模型の仕様としては、アルミ製で先端を半球状としており、直径 11mm、長さ 60mm、重さは加速度計込みで約 17.5g（実物スケールで直径 0.55m、長さ 3.0m、重さ約 2189kg）となっている。この砲弾型模型を鉄球に置き換えて、同様に発射孔より密な砂地盤へ落下させた⁴⁾。

図-9 に実験に用いた模型の概略図を、表-1 に実験ケースを示す。模型地盤としては、幅 500mm の剛性土槽内に、アクリル製の地下構造物模型（幅 110mm×高さ 210mm）を設置し、地盤材料に豊浦珪砂を用いて地下構造物模型の天端の深さまで相対密度約 91% の密地盤を作製した。地下構造物模型より浅い部分では、表-1 の各実験ケースに従い、深さ 80mm の地盤を作製した。CaseA は密地盤（相対密度約 91%）・乾燥状態、CaseB は緩地盤（相対密度約 56%）・乾燥状態である。地下構造物模型の天端には、砲弾型模型の落下位置直下と、落下位置直下の奥行方向へ前後 20mm 離れた位置に土圧計（鉄球の場合と同じもの）を設置した。CaseC は緩地盤（相対密度約

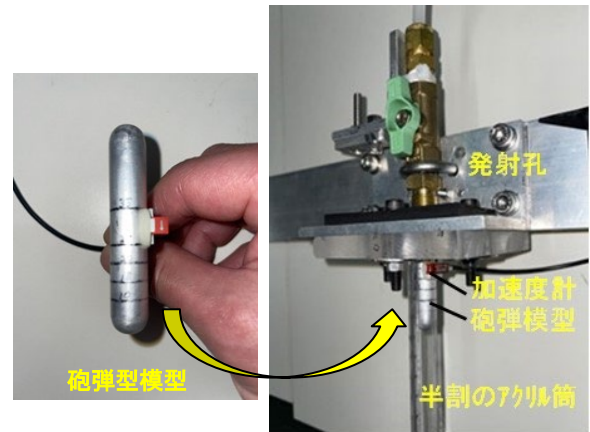


図-8 砲弾型模型と発射孔

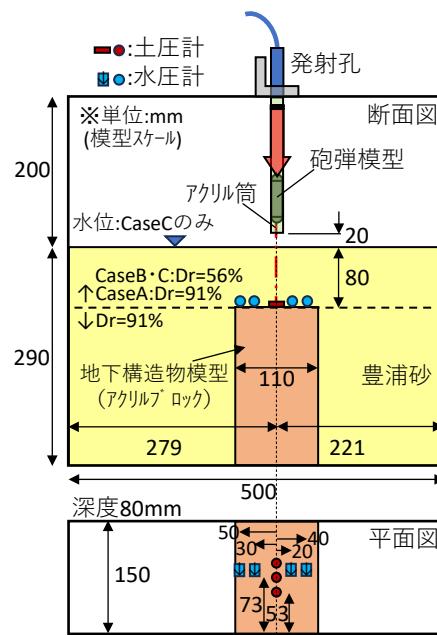


図-9 砲弾型模型を用いた実験概略図

表-1 実験ケース

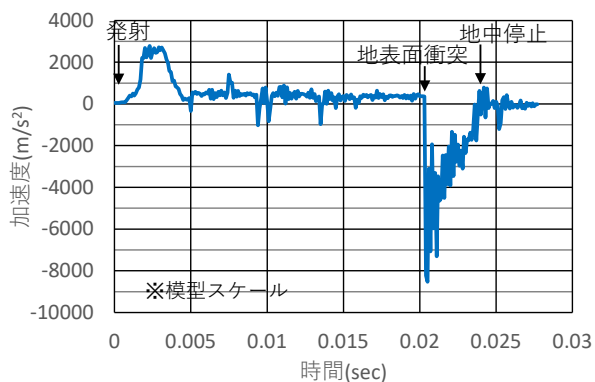
ケース名	上部地盤状態	相対密度	乾燥密度 ρ_d
CaseA	密・乾燥	90.8%	1.620 g/cm ³
CaseB	緩・乾燥	56.5%	1.518 g/cm ³
CaseC	緩・水浸	55.4%	1.515 g/cm ³

56%)・水浸状態で地下水位を地表面とし、図-9 の配置で間隙水圧計（SSK 社製 P306AV-2、固有振動数 15kHz）も設置している。CaseC の間隙流体には粘性を 50 倍に調整した粘性流体を使用している。

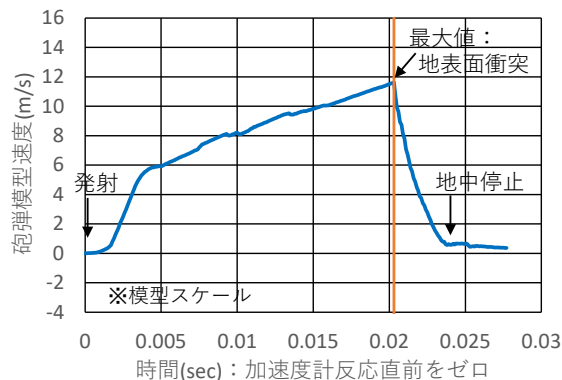
実験は遠心加速度 50G のもと、鉄球の場合と同様に、砲弾型模型を空気圧による発射機構によって射出し、地表面に衝突させている。

3.2 計測値による速度及び地盤貫入量の算出例

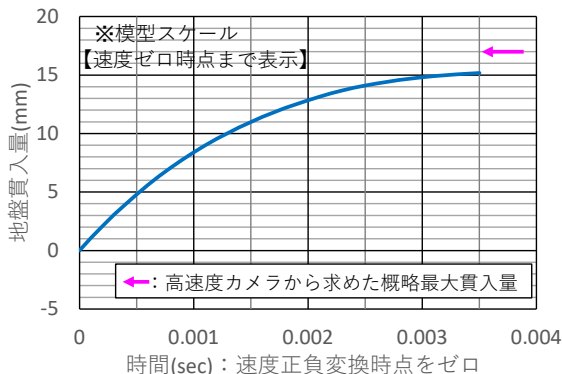
計測された加速度分布による速度及び地盤貫入量の算出例を以下に示す。計測された砲弾型模型の加速度分布の



(a) 計測された砲弾模型の加速度



(b) 砲弾模型の速度



(c) 砲弾模型の地盤貫入量

図-10 計測された砲弾模型の加速度による速度及び地盤貫入量の算出例

一例を図-10(a)に示す。初期のプラス側に凸の部分が発射時の加速度で、後半のマイナス側への凸の部分が地盤に衝突した際の加速度である。同図(b)には計測した加速度を1階積分して算出した砲弾模型の速度分布を示している。砲弾模型の速度は発射に伴い増加し最大11.6m/sとなり、地盤への貫入に伴い減少している。この速度の正負変換時(最大値)の時点で地盤に衝突したことが推察できる。また速度を再度積分して変位量を算出した。地盤に衝突したと考えられる速度の最大値の時点をもとにした地盤貫入量を同図(c)に示す。地盤貫入量は時間経過に伴いその増分量が小さくなり、この場合、最終的に15.2mm(実物スケールで0.76m)貫入していた。なお、高速度カメラから求めた実測貫入量は17mmと、加速度の積分による値と良く対応した。

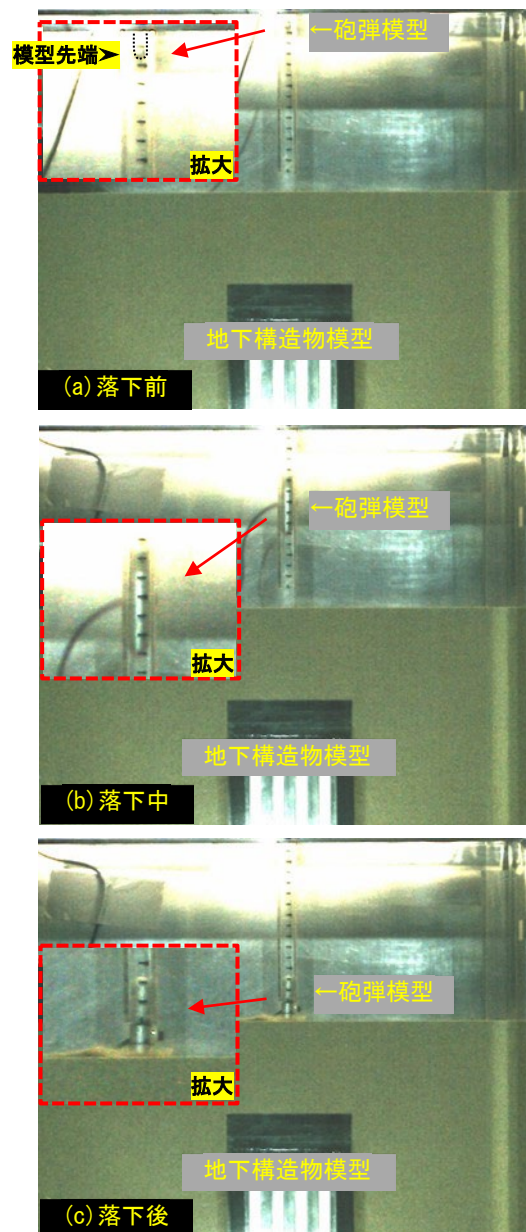
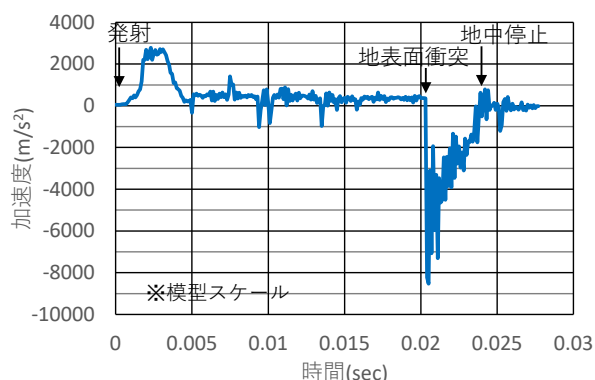


図-11 砲弾模型の落下状況

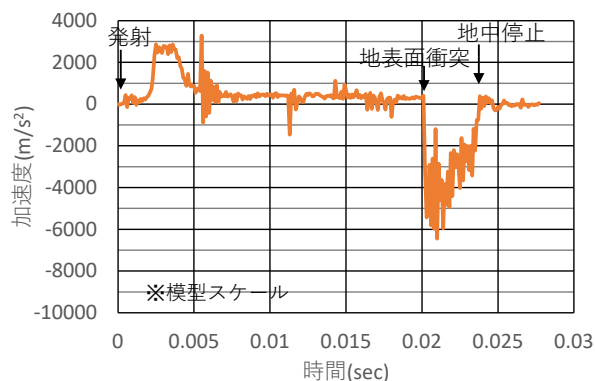
3.3 実験結果(砲弾型模型の場合)

図-11にCaseAの高速度カメラで撮影した砲弾模型の落下状況例を示す。砲弾模型を落下させると、模型が地盤に突き立つ様子が見て取れる。

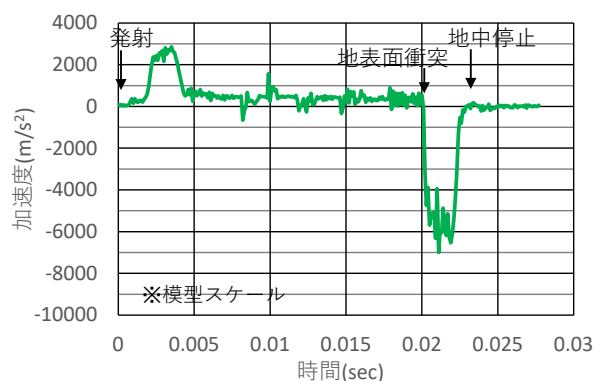
図-12に各ケースで計測された砲弾模型の加速度分布を示す。初期のプラス側に凸の部分が発射時の加速度で、後半のマイナス側への凸の部分が地盤に衝突した際の加速度である。地盤に衝突した際(マイナス側への凸部分)の加速度の値を見ると、上部が密地盤のCaseAでは最大値が -8500m/s^2 とかなり大きくなっている。上部が緩地盤であるCaseBおよびCaseCの場合では、CaseBで -6500m/s^2 、CaseCで -7000m/s^2 程度と、加速度の最大値がCaseAと比較して小さい。またCaseCでは地盤を水浸させることで、加速度がゼロになる時点が早まっていることがわかる。各ケースでは図-10の算出例に倣い、計測した加速度を



(a) CaseA：密地盤



(b) CaseB：緩地盤

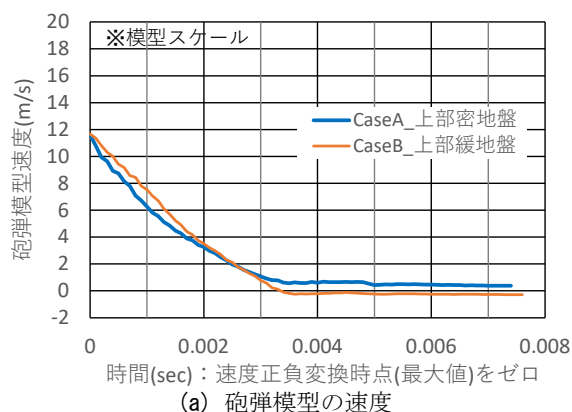


(c) CaseC：緩地盤（水浸）

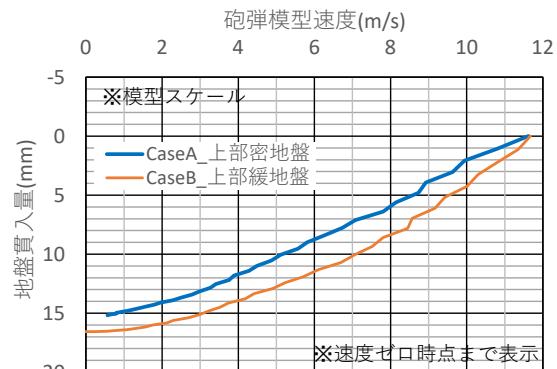
図-12 砲弾模型の加速度分布

1 階積分して速度分布を，2 階積分して地盤貫入量を算出した。

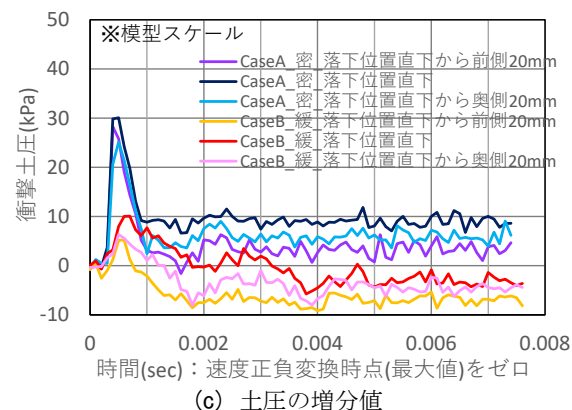
図-13 に CaseA の密地盤と CaseB の緩地盤においてそれぞれの速度および貫入量を比較した結果を示す。(a) の地盤に衝突したと考えられる速度の最大値の時点をとった砲弾模型の速度の時刻歴より，CaseB よりも CaseA の速度が初期において速く減少していることがわかる。(b) の砲弾模型の速度と地盤貫入量の関係を見ると，いずれも地盤貫入量が大きくなるほど速度は減少し，同速度に対する地盤貫入量は CaseB の方が大きい。最終的に砲弾模型の速度がほぼゼロにおける地盤貫入量は，CaseA で 15.2mm，CaseB で 16.6mm であった。(c) には砲弾模型の落下による深度 80mm（実物スケールで 4.0m）の地下構造物模型天端における土圧の増分値を示している。落下位置直下の土圧計の最大値は，CaseA では 30.1kPa まで瞬



(a) 砲弾模型の速度



(b) 砲弾模型の速度と地盤貫入量の関係



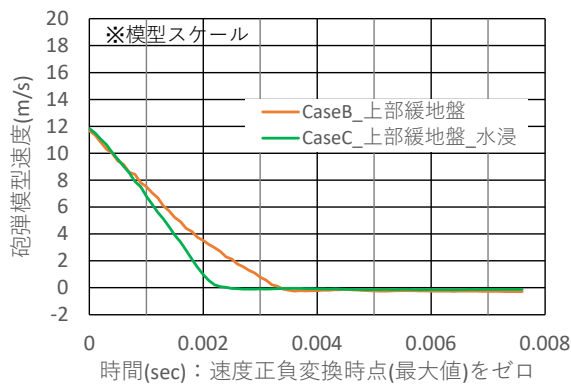
(c) 土圧の増分値

図-13 地盤密度の違いによる比較（CaseA と CaseB）

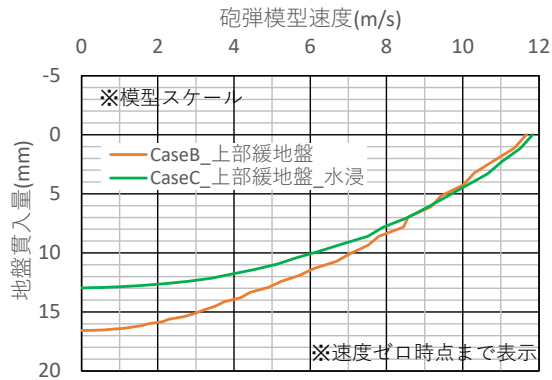
間的に土圧が増加しており，CaseB では 10.1kPa と小さかった。

図-14 に乾燥状態の CaseB と水浸状態の CaseC の速度および貫入量，土圧増分を比較した結果を示す。(a) の速度の最大値の時点をとった砲弾模型の速度の時刻歴から，CaseC では CaseB より時間経過に伴い速度の減少割合が大きくなっていることがわかる。(b) の砲弾模型の速度と地盤貫入量の比較では，同速度に対する地盤貫入量は徐々に水浸状態の CaseC 方が小さくなっている。(c) の土圧の増分値をみると，落下位置直下の最大値は，CaseB の 10.1kPa に対し，CaseC では全土圧が 14.7kPa と大きくなっている。

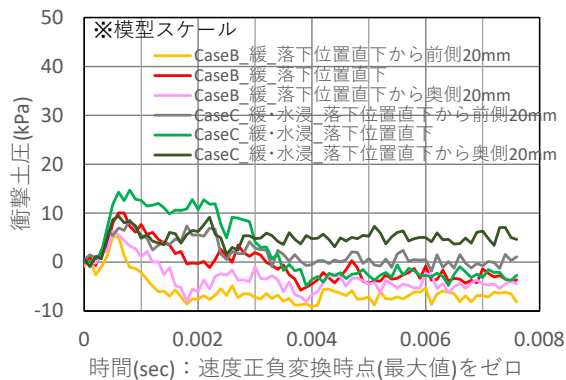
図-15 に CaseC の水浸地盤で計測された土圧計と間隙水圧計データを示す。時間軸のスケールを変え，衝突時近傍での土圧増分と過剰間隙水圧を重ね書きしたものを(a)



(a) 砲弾模型の速度



(b) 砲弾模型の速度と地盤貫入量の関係



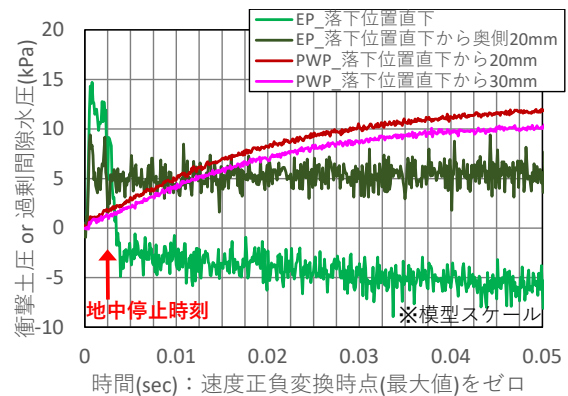
(c) 土圧の増分値

図-14 乾燥・水浸状態の違いによる比較 (CaseB と CaseC)

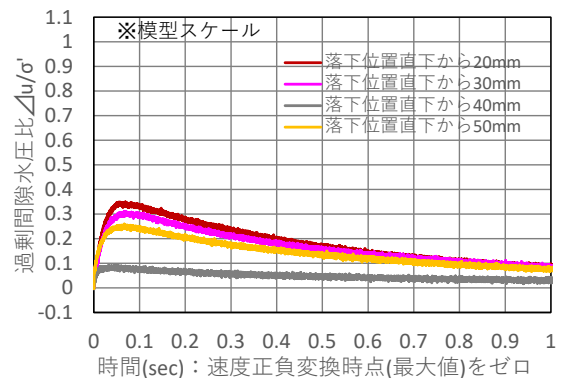
に、(b)には、その後の過剰間隙水圧の消散過程を示した。衝撃土圧発生時の過剰間隙水圧値はわずかであり、衝撃土圧が作用した後、引き続き過剰間隙水圧の上昇が生ずる様子を確認できる。なお、土圧計の地中停止後のドリフトは砲弾の傾斜の影響と考えられる。(b)の過剰間隙水圧比は落下位置直下から 20mm 離れた位置で最大 0.35 となっており、落下位置直下の浅部では地盤が液状化していたことも示唆される。今後、衝突部に近い浅部も含めた地盤挙動の把握が必要と考える。

4. 地盤のエネルギー吸収特性に関する考察

上記の砲弾型模型を用いた実験の結果、例えば密地盤 (CaseA) の場合では砲弾模型が 15.2mm 貫入し、その運動エネルギーの大部分は地盤によって吸収されたが、一



(a) 衝突時近傍での土圧増分と過剰間隙水圧



(b) 過剰間隙水圧の消散過程

図-15 衝撃土圧と過剰間隙水圧の時刻歴

部は地下構造物に伝達され、土圧計による圧力計測により確認された。また、密地盤・緩地盤、および乾燥状態・飽和状態における貫入量と圧力の差を比較することができた。以下では、それぞれの条件における砲弾模型の着弾時に発生する地盤貫入量および構造物上部に設置した土圧計の圧力履歴を基に、砲弾模型・構造物・地盤によるエネルギー吸収特性について考察した結果⁵⁾を示す。

4.1 エネルギーの観点から見た飛来物衝撃の重要性

飛来物が地盤や地下構造物に与える影響を評価するには、その運動エネルギーの特性と伝播メカニズムを正しく理解する必要がある。Feuchtwanger (1982)⁶⁾によると、飛来物の衝撃特性は低速飛翔体 (LVM, Low Velocity Missile) と音速を上回るほどの速度を有する高速飛翔体 (HVM, High Velocity Missile) に分類される。

飛来物のエネルギーEは以下の式[1]で表される。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad [1]$$

ここで、m は質量、v は速度である。速度の 2 乗に比例して運動エネルギーが増加するため、HVM の衝突では地盤の直接的な破壊だけでなく、衝撃波の発生、反射波による荷重増幅、キャビテーション (空洞化現象) などが生じ、影響範囲が拡大する。一方、LVM ではエネルギーの伝播が限定的であり、衝突地点周辺の地盤の

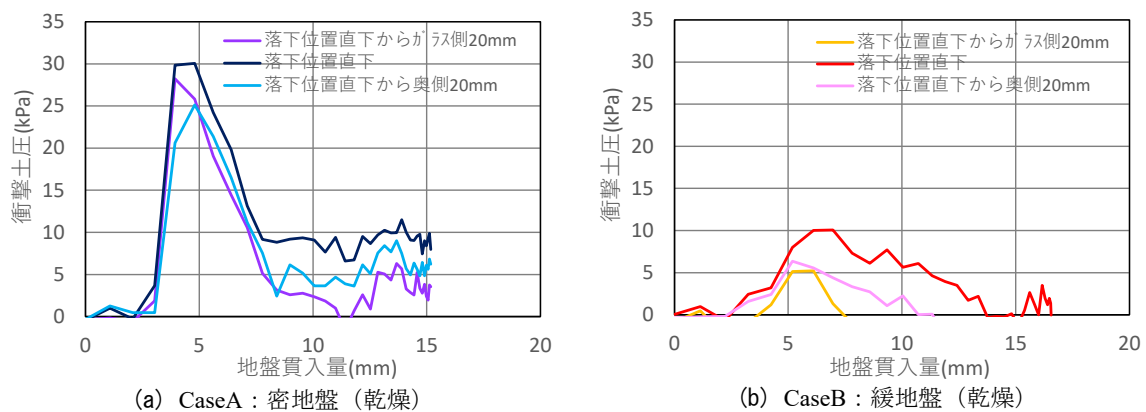


図-16 衝撃土圧と地盤貫入量

表-2 CaseA：密地盤（乾燥）の衝撃エネルギーと直下に対する比率

項目	土圧計位置		
	落下位置直下からガラス(前)側20mm	落下位置直下	落下位置直下から奥側20mm
衝撃エネルギー(mJ)	5.187	8.487	6.088
直下に対する比率	0.611	1.000 (基準)	0.717



(a) CaseA：密地盤（乾燥）



(b) CaseB：緩地盤（乾燥）

図-17 砲弾模型落下後のクレーターの状況

応答が主な影響となる．そのため、LVM の衝撃特性を詳細に分析することで、地盤の衝撃吸収性能や地下構造物に発生する荷重分布を正確に評価できる可能性がある．

4.2 砲弾模型の運動エネルギーと地下構造物に加わるエネルギーの導出

今回の砲弾模型スケールにおける運動エネルギーを算出すると、質量 17.5 g、速度 11,620.0mm/sec の条件より、衝撃時の運動エネルギーは 1,181.5mJ となる．これに対し、地下構造物に発生したエネルギーを衝撃土圧と地盤貫入量から導出する．まず、それぞれの時刻歴グラフを図-16 に示すように衝撃土圧－地盤貫入量グラフに変換し、土圧計の半径 4.0mm から算出される面積 50.3mm² を用いて荷重－地盤貫入量グラフへと変換する．その後、衝撃エネルギーを求めるために台形則による積分を行った結果、8.5mJ の衝撃エネルギーが導出された．この値は砲弾模型の衝撃時のエネルギーと比較すると著しく低く、本実験における地下構造物の深度 80.0mm

（実物スケールで 4.0m）は、砲弾模型の運動エネルギーに対して十分な衝撃吸収性能を有していると考えられる．

次に、落下位置から前後 20.0mm に配置した土圧計の荷重データを基に、圧力の伝播特性を検討する．深度 80.0mm において、前後 20.0mm に設置した土圧計の位置は、落下地点を基準とすると $\tan^{-1}(20/80) = 14.0^\circ$ の角度に相当し、落下地点からの直線距離は 82.5mm と算出される．20.0mm 地点における荷重割合は、荷重の減衰関係に基づき算出すると、表-2 に示すように、砲弾模型直下と比較して 0.611 倍のエネルギーが発生していると考えられる．対して、実験における落下位置直下と奥側 20.0mm 地点のエネルギー比率は 0.717 となった．これらの結果から、圧力の伝播は概ね放射線状に広がる傾向を示していることが確認された．

また、砲弾模型の衝撃後に形成されたクレータ径を比較すると、密地盤では 約 34mm、緩地盤では 約 31mm となり、密地盤の方が、クレータ径が大きくなった（図-17）．これは、土圧計の荷重履歴からも確認で

きるように、密地盤では荷重の伝播速度が速く、砲弾模型の先端付近にある土粒子が飛散しやすいと考えられる。特に、密地盤では衝撃時に局所的な応力集中が生じやすく、土粒子が周囲に押し出されることでクレーターの拡大が促進されたと推察される。一方で、緩地盤では粒子間接触の相互作用がより分散し、荷重伝播が緩やかに進行するため、飛散する土粒子の量が抑えられ、結果としてクレーター径が小さくなったと考えられる。

4.3 密地盤と緩地盤のエネルギーと最大貫入量に関する考察

密地盤と緩地盤における衝撃吸収特性を比較すると、密地盤の最大貫入量は 15.2mm、緩地盤では 16.6mm となり、土圧計のピーク圧を比較すると、密地盤では 30.1kPa、緩地盤では 10.1 kPa と 3 倍 の差が見られた。一方で、導出した衝撃エネルギーは密地盤で 8.5mJ、緩地盤では 3.4mJ であり、緩地盤のエネルギー吸収量は密地盤の約 2.5 倍 であった。これは、図-16 で示したように緩地盤では圧力の立ち上がりおよび低下がともに緩やかであることから、衝撃エネルギーの分散が促進された結果と考えられる。一方で、最大貫入量は緩地盤の方が大きいため、深度によっては地下構造物への接触も考えなければならない。

4.4 飛来物衝突時を再現した DEM 解析の事例

遠心模型実験のみで実機相当の高速域や衝突・爆発の複合作用を安全かつ一體的に再現することは容易ではないため、本研究では実験結果（第 2～3 章）と整合をとりつつ、個別要素法（DEM）による再現解析を試みた。

地盤材料に用いた豊浦砂のモデル化では、金ら(2015)⁷⁾の論文より粒度分布、粒子スケール 7 倍を参照して DEM 要素を生成し、上部地盤の相対密度を CaseA（密：乾燥密度 1.389g/cm³）、CaseB（緩：乾燥密度 1.321g/cm³）として模型スケールで構築した。飛来物には実験と同一の砲弾模型（直径 11mm、長さ 60mm、質量約 17.5g〔加速度計込み〕）を用い、遠心 50G 場における衝突初速度を衝突距離から計算し、約 11,620mm/sec とした。荷重の空間伝播を把握するため、落下位置直下および前後 20.0mm 位置に相当する測点反力・圧力の時刻歴を取得した。DEM 解析モデルの初期密度は、遠心载荷実験のそれよりも小さい。DEM 解析では 80 mm 層厚のモデル地盤を 1 層での DEM 要素の空中落下で作製（CaseB）し、これに若干の振動を試行的に加えて密実化した（CaseA）。このため、空中落下の高さを自在に変更可能な遠心実験のモデル地盤と同程度の高密度、および密度差を再現することが困難であった。地盤密度の違いの影響については、今後の課題と考えている。

DEM 解析により得られた落下位置直下における反力（衝撃土圧）の時刻歴を比較した結果を図-19 に示す。

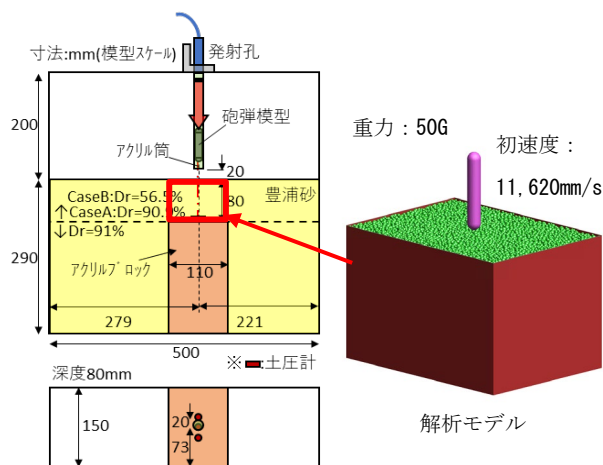
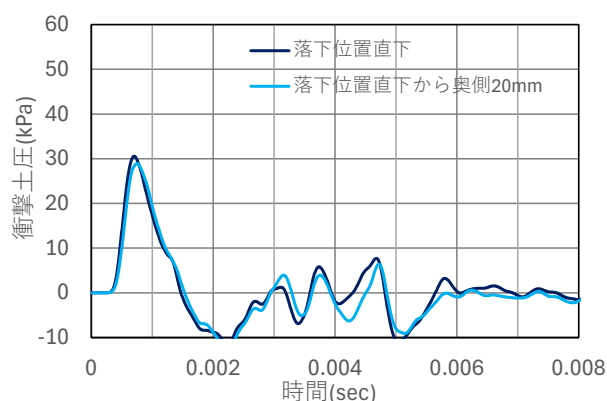
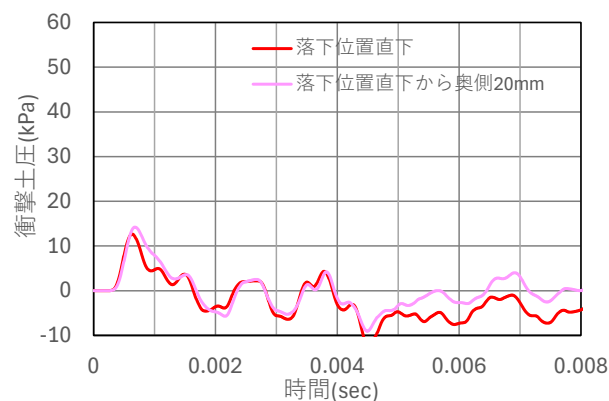


図-18 砲弾模型スケールの DEM 解析モデルと条件



(a) Case A：密地盤（乾燥）

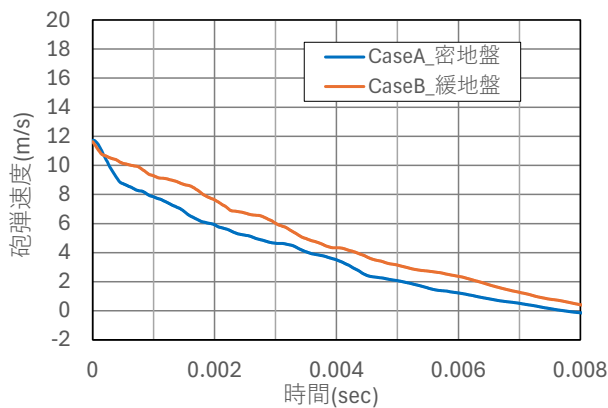


(b) Case B：緩地盤（乾燥）

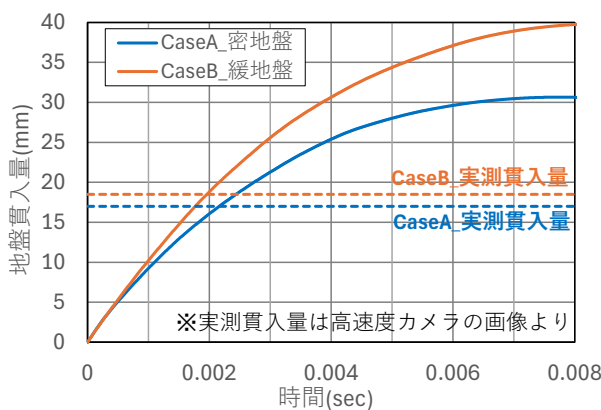
図-19 DEM 解析における衝撃土圧

密地盤（CaseA）は反力（衝撃土圧）の立ち上がりが速くピーク反力が大きい一方で、緩地盤（CaseB）は立ち上がりが緩やかでピーク反力が小さい傾向を示した。すなわち、地盤の剛性・密度が高いほど衝撃初期に荷重が集中しやすく、地下構造物上に作用する瞬間的な入力が増大する。これに対し、緩地盤ではエネルギーが地盤内で分散・減衰しやすく、構造物側に伝達されるピーク入力が低減する結果となった。

速度－貫入量関係で整理すると（図-20）、いずれの地盤条件においても貫入量の増大に伴い速度は単調に低下



(a) 砲弾模型の速度



(b) 砲弾模型の地盤貫入量の関係

図-20 DEM 解析における地盤密度の違いによる比較

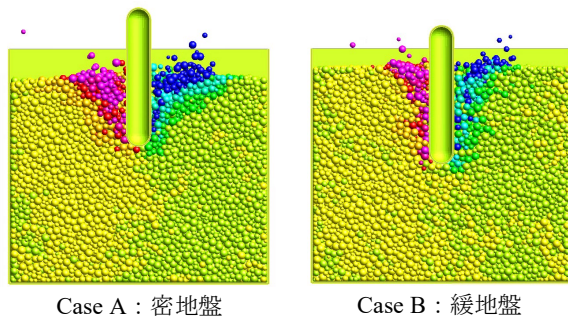


図-21 密地盤と緩地盤の左右方向移動量コンター図

するが、同一速度に対する貫入量は CaseB の方が大きい。すなわち、緩い地盤条件では砲弾がより深く侵入しやすい一方で、密な地盤条件では初期段階での減速が卓越し、貫入は早期に抑制されることがわかる。

図-20 (b) には高速度カメラから求めた各ケースの最終実測貫入量も併記している。実測データとの整合性の観点では、DEM 解析は「Case A で減速度が大、CaseB で貫入が大」という基本傾向を再現している。一方で、解析では停止時刻が実験より遅く評価され、最終貫入量もやや大きめとなる場合がある。この差異は、代表粒径のスケールに伴う荷重分散・減衰特性の差、前述した実験と解析でのモデル地盤の初期乾燥密度の相違、および有限領域・境界条件に起因する反射応力波の影響等によ

表-3 遠心载荷実験の主な相似比

項目	相似比 (実物/模型)
長さ (寸法)	λ
密度	1
ひずみ	1
速度	1
加速度	$1/\lambda$
時間 (慣性力)	λ
応力	1
透水係数 ^{※1}	1

※1) 間隙に粘性流体を使用した場合

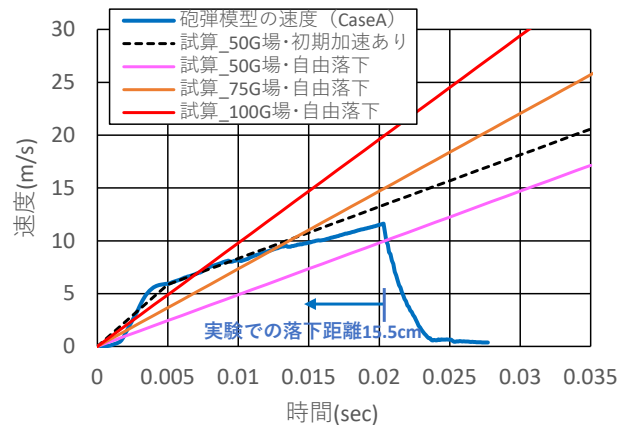


図-22 遠心载荷実験における落下速度の試算結果

るものと考えられる。これらについては、粒子径スケールと密度の校正、モデル領域の拡張、境界条件の改良により、速度の立ち下がりや停止時刻、最終貫入量の一致度を高められる見込みである。

最後に DEM 解析による砲弾模型の衝撃後に形成されたクレーター径の比較として、DEM 粒子の左右方向移動量コンター図を図-21 に示す。実験では密地盤では約 34mm、緩地盤では約 31mm となり、密地盤の方がクレーター径が大きくなる傾向を示しており、DEM 解析結果も同様の傾向を示していることが確認できた。

本節の DEM 解析により、「密地盤では短期に強い衝撃荷重が集中しやすく、緩地盤では貫入量は増えるが地下構造物への入力エネルギーは小さい」という実測データの本質的傾向を、圧力履歴・速度変位履歴・クレーター幅について説明することができた。一方で、停止時刻・最終貫入量など時間スケールの差は、粒子スケールや密度設定、境界条件の改良余地として明確化された。

5. 遠心载荷実験の技術的課題と展望

5.1 衝撃速度の相似則と遠心载荷実験の限界

遠心载荷実験の主な相似比⁸⁾を表-3 に示す。速度の相似比を考えると、速度は加速度と時間の積のため相似比は 1 になる。ここで例えば、代表的な米国及び旧ソビエト連邦の戦術ロケット・ミサイルの初速度は 76.2～

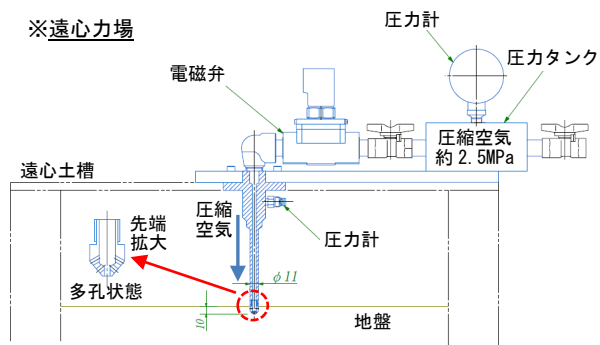


図-23 爆発荷重の再現装置の概要図

402.3m/s 程度²⁾である。実験結果による砲弾模型の地盤衝突時の最大速度は 11.6m/s 程度であり、文献による値は初速度のため単純に比較できないが、実験結果はけっして速いものでないことがわかる。

図-22 に遠心载荷実験における模型の落下速度を等加速度直線運動に基づき試算した結果を示す。同図には、CaseA の実験結果と、遠心加速度 50G 場において実験と同等の初期加速を加えた場合、また各種遠心加速度場において自由落下させた場合の模型の落下速度の試算を示している。まず、実験結果と同等の発射時の初期加速を加えた試算結果（黒点線）を見ると、実験値は 0.01sec 以降、速度の増分割合が試算値より徐々に小さくなっている。これは、実験ではコリオリ力の低減のために半割のアクリルパイプを設置しており、それと砲弾模型が接して落下するため、その摩擦により速度の増分が多少減少したものと考えられる。また、遠心加速度 50G 場で初期加速を加えた試算（黒点線）と、自由落下させた試算（桃色）を比べると、初期加速による落下速度の増分値（両者の差分）は、0.005sec 付近で 3.4m/s 程度と比較的小さいと考えられる。

各種遠心加速度場において自由落下させた場合の試算値を見ると、いずれの試算値も落下時間が長くなる、つまり落下距離が長くなるほど落下速度は増加し、また遠心加速度が大きいほど落下速度は増加している。

これらのことから、遠心载荷実験において砲弾模型の落下速度の増加を図るには、主に落下距離及び遠心加速度の増加が有効的であると考えられる。しかしながら、実際のミサイル等の速度を考慮すると、遠心载荷実験のみでは限界があり、数値解析との連携が必要である。

5.2 爆発荷重の再現

地下シェルター等の地下構造物の場合、ミサイル等の飛来物による作用外力として衝突と爆発が主に挙げられるが、先述したように、実スケールでの飛来物衝突や爆破に関する実験は、多大なコストと時間を要するだけでなく、安全性や環境負荷の観点から実施が困難である。

本研究では、今後、5.1 で述べた砲弾模型の衝突速度

の増加の試みに加え、爆発荷重の再現も試みる予定である。他の研究機関の既往の研究では、遠心载荷装置を使用して少量の火薬で実物大の爆破現象を模擬した実験⁹⁾も実施されているが、一般の研究機関では、安全及び環境上実施は難しい。そこで、爆発荷重の再現を試みるため、圧縮空気の空圧を利用して爆発荷重を再現する装置の製作を検討している。図-23 に空圧を利用した爆発荷重の再現装置の概要図を示す。再現装置は、圧力タンク内に最大 2.5MPa 程度の圧縮空気を保持しておき、遠心場において所定のタイミングで電磁弁を介して、一気に圧縮空気を、あらかじめ地盤に設置しておいた砲弾模型先端（多孔状態）から噴出させるものである。この爆発荷重の再現は、圧力なので速度のような相似比に関連する制限は比較的少ないが、落下速度の場合と同様に、数値解析との連携が必要と考えられる。また実際にミサイルが落下して爆発するといった現象は、衝突⇒爆発の一連の挙動としての評価が必要と考えられ、遠心载荷実験のみでは限界があると考えられる。そのため、実験では衝突・爆発の2つの現象を分離して検討し、解析で整合性を確認することが重要である。

6. おわりに

本研究では、飛来物を模擬した衝撃荷重の再現を遠心模型実験で試み、その結果及び考察を示すとともに、地盤のエネルギー吸収特性に関する検討を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 遠心模型実験において、密地盤と緩地盤を比べると、緩地盤の方が地盤貫入量は大きい、地下構造物に対する衝撃土圧は小さくなった。
- 2) 緩地盤で乾燥・水浸状態で比べると、乾燥状態の方が地盤貫入量は大きく、地下構造物に対する衝撃土圧は小さくなる傾向などがわかった。
- 3) 水浸状態の地盤に飛来物が落下すると、まず衝撃土圧が作用し、その後に、引き続き過剰間隙水圧が上昇、消散する様（液状化現象）が確認できた。
- 4) 以上の結果より、衝撃荷重に関して遠心模型実験による検討の基本的な有効性を確認した。
- 5) 地盤のエネルギー吸収の観点からみると、エネルギーベースでの評価を導入することで、圧力や貫入量のみでは把握しきれなかった地盤の衝撃吸収特性を定量的に評価できることが示された。特に、密地盤と緩地盤におけるエネルギー吸収特性の違いを明確に捉えることができ、緩地盤の方が密地盤に比べて高い衝撃吸収性能を示すことが確認された。
- 6) 本検討によって、地盤特性の違いによる衝撃荷重の緩和効果をより詳細に評価できる可能性が示唆され、地下構造物の設計や防護対策において、エネルギーベースの評価が有効な指標となり得ることが明らかとなった。

- 7) DEM 解析では、解析条件の改良の余地はあるものの、「密地盤では短期に強い衝撃荷重が集中しやすく、緩地盤では貫入量は増えるが地下構造物への入力エネルギーは小さい」という実測データの本質的傾向を、圧力履歴・速度変位履歴・クレーター幅について説明することができた。
- 8) 落下速度及び爆荷重の再現に関する検討状況を報告した。両者あるいは複合挙動の検討には遠心载荷実験のみでは限界があり、数値解析と連携した評価が必要である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、防衛大学校の篠田昌弘教授、市野宏嘉准教授にご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。また、本研究は、「地盤工学会関東支部 既存地下構造物の耐衝撃性評価手法と地盤補強技術に関する検討委員会」（委員長：東畑郁生）の活動の一環として実施しているものである。

参考文献

- 1) 防衛省：防衛白書，pp.19-22，2025.
- 2) 防衛施設学会：避難施設の設計における基礎技術と留意点，pp.1-4，p.12，2023.
- 3) 丸山憲治，石黒健，平田昌史，大塚悠大：飛来物衝突時の地盤挙動に関する遠心载荷実験(その 1)，第 60 回地盤工学研究発表会発表講演集，No.24-3-4-03，2025.
- 4) 大塚悠大，石黒健，平田昌史，丸山憲治：飛来物衝突時の地盤挙動に関する遠心模型実験(その 2)，第 60 回地盤工学研究発表会発表講演集，No.24-3-4-04，2025.
- 5) 天野慎一，石黒健，平田昌史，丸山憲治，大塚悠大，篠田昌弘，市野宏嘉：飛来物衝突時の地盤挙動に関する遠心模型実験(その 3)，第 60 回地盤工学研究発表会発表講演集，No.24-3-4-05，2025.
- 6) Feuchtwanger, M., High velocity missile injuries: A review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 75(12), pp.966-969, 1982.
- 7) 金秉洙，加藤正司，Seong-Wan PARK，竹下祐二，DEM シミュレーションによる一面せん断試験の隙間幅に関する検討，地盤工学ジャーナル Vol.11, No.1, 21-31.
- 8) 高橋英紀，上田恭平：地盤工学における模型実験 第 2 回模型実験の相似則，地盤工学会誌講座，pp.50-57，71(10)，2023.
- 9) 安藤智啓，藤本一男，山口弘，鶴居正行，伊藤孝：遠心载荷装置を用いた爆破実験，構造工学論文集，Vol.41A，pp.1213-1220，1994.