飛来物衝突および地中爆発荷重作用時の地盤内応力変動に関する遠心模型実験

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

要　　旨

近年の国際情勢を鑑みると，他国からのミサイル攻撃への対策や，飛来時に市民が安全に避難可能な堅牢なシェルターの建設が急務となっている．内閣官房では，有事の際に地下施設を緊急避難施設と想定しており，著者らは防衛大学校とも連携しながら，不明な点の多い飛来物衝突時の地下構造物の耐衝撃性能について検討を進めている．既報では，遠心模型実験装置を用いて飛来物衝突時の地盤内応力変動や地中構造物へ加わる衝撃荷重を計測し，地盤のエネルギー吸収性能の検討やDEMによる再現解析も加え，耐衝撃性能に関する基礎的データを取得した．本論文では引き続き，飛来物衝突速度の違いの影響，液状化性地盤への衝突時や飛来物貫入後の地中爆発時の地盤内応力変動に着目した実験結果を報告する．これらの実験により，衝突速度の増加に伴い地盤内応力が線形的に増加すること，液状化性地盤では地盤内が一部液状化に近い状態に至ること，爆土圧の地盤内伝搬が主として水平方向に生ずることなど，地下構造物の耐衝撃設計に関する幾つかの貴重な工学的知見を得た．

キーワード　遠心模型実験／衝撃荷重／地中爆発／液状化／地盤挙動／DEM解析

目　　次

1．はじめに
2．飛来物衝突時の追加遠心模型実験
3．個別要素法（DEM）による試解析
4．地中爆発時の地盤内応力変動
5．おわりに

CENTRIFUGAL MODEL EXPERIMENT ON THE STRESS FLUCTUATIONS WITHIN THE GROUND SUBJECTED TO COLLISION OF PROJECTILE AND ITS UNDERGROUND EXPLOSION

Takeshi　ISHIGURO　　**Kenji　MARUYAMA**
Masafumi　HIRATA　　**Yudai　OHTSUKA**
Shinichi　AMANO

Synopsis:
Considering the recent international situation,there is an urgent need to implement countermeasures against missile attacks from other nations and to construct robust shelters where citizens can safely take refuge during an incoming attack. The Cabinet Secretariat envisions the use of underground facilities as emergency shelters in times of crisis; accordingly, the authors are collaborating with the National Defense Academy to investigate the uncertain impact resistance of underground structures against incoming projectiles. Several experiments focusing on the effects of impact velocities,impact within liquefied soil and underground explosion following projectile penetration were executed. The results showed several valuable insights for the design of underground structures, on the effect of impact velocity; liquefaction phenomenon,and explosion within the ground.

＊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，他国からのミサイル攻撃への対策や，飛来時に市民が安全に避難可能な堅牢なシェルターの建設が急務となっている[1]．内閣官房では，有事の際に地下施設を緊急避難施設と想定しており，著者らは防衛大学校とも連携しながら，未だ不明な点の多い飛来物衝突時の地下構造物の耐衝撃性能[2]について検討を進めている．既報[3]では，遠心模型実験装置を用いて飛来物衝突時の地盤内応力変動や地中構造物へ加わる衝撃荷重を計測し，砲弾型飛来物模型の試行，加速度センサーデータの分析方法の検証，液状化性地盤での衝突実験の試行等，遠心場での飛来物衝突の再現や実験・解析手法の模索と検証を行った．さらに，ジオテキスタイル敷設効果や液状化性地盤への衝突時の地盤挙動の把握に加え，自動車等の衝突実験結果の分析手法を援用した地盤材料のエネルギー吸収性能の確認や個別要素法（DEM）による衝突時現象の再現解析など，実験結果に対して幾つかの評価手法の適用を試みた．

一方，遠心模型実験装置では再現可能な飛来物模型の衝突速度に限界があること，液状化性地盤衝突時の地盤浅部（衝突地点近傍）を含めた全体挙動の把握，飛来物貫入後の地中爆発時の地盤内応力変動の計測等が今後の検討課題として残された．本論文は，これら残課題に関する追加実験およびその考察結果を報告するものである．

2. 飛来物衝突時の追加遠心模型実験

2.1 遠心模型実験の概要

図-1 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．模型地盤は，幅 500mm の剛性土槽内に，アクリル製の剛な地下構造物模型（幅 110mm×高さ 210mm）を設置し，豊浦砂を用い地下構造物天端の深さまで相対密度約 90%の密地盤を作製した．地下構造物より浅い部分では，**表-1** 中の各実験ケース毎に，深さ 80mm の地盤を作製した．CaseA1～A3 では，密地盤（相対密度約 90%）×乾燥状態で土槽天端に櫓を組み，飛来物模型の落下高さ（衝突速度）を変化させた．地下構造物天端には飛来物模型の落下位置直下と，その前後 20mm 離した位置に土圧計を設置した．CaseC2 は緩地盤（相対密度約 50%）×飽和状態で，地表面に地下水位を設定し，**図-1** の配置で間隙水圧計を追加した（飛来物直撃による計器破損を回避する目的で，衝突点から 20mm 以上，水平方向にずらした）．CaseC2 の間隙流体には粘性 50 倍の粘性流体を使用した．実験は遠心加速度 50G のもと，空気圧 600kPa で**図-2** の発射機構で飛来物模型を射出し，地盤地表面に衝突させた[4]．飛来物模型は先端が半球状（アルミ製）で，加速度計を取り付けた．CaseA3 のみ，加速度計の容量の問題で加速度計を設置していない．飛来物模型は直径 11mm，長さ 60mm，重さは約 17.5g（実スケールで直径 0.55m，長さ 3.0m，重さ約 2189kg）である．発射から衝突までのコリオリ力の影響を低減するため，発射孔には半割のアクリル筒を取付けた．

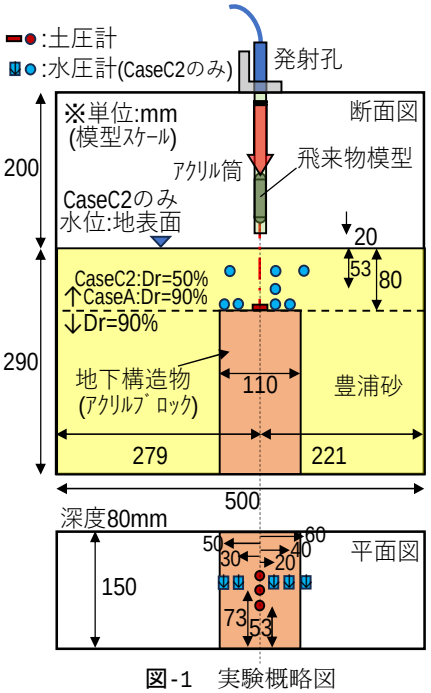


図-1 実験概略図

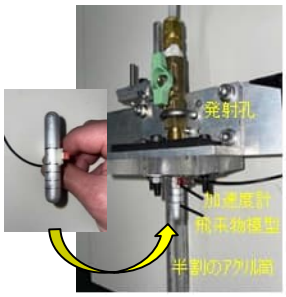


図-2 飛来物模型と発射機構

表-1 実験ケース

ケース名	上部地盤状態	落下高さ
CaseA1	密・乾燥	15.5cm
CaseA2	密・乾燥	35.5cm
CaseA3	密・乾燥	95.5cm
CaseC2	緩・水浸	15.5cm

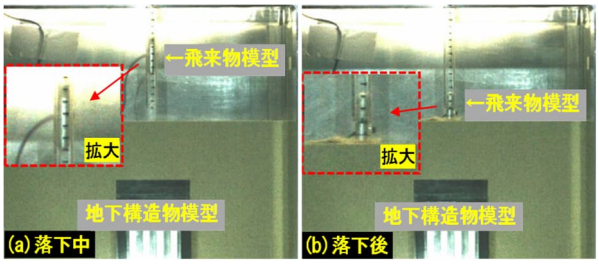


図-3 飛来物模型の落下状況（例 CaseA1）

2.2 実験結果（衝突速度の違いの影響）

図-3 に CaseA1 の高速度カメラで撮影した飛来物模型の落下状況を示す．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．各ケースでは飛来物模型の加速度分布を一階積分して速度分布を，二階積分して地盤貫入量を算出した[4]．CaseA3 では，高速度カメラ映像から地盤衝突速度，最終地盤貫入量を求めた．

図-4 に CaseA1～A3 で得られた飛来物模型の地盤衝突時の衝突速度と最終地盤貫入量の関係を示す．衝突速度が大きくなると，地盤貫入が停止した際の最終地盤貫入

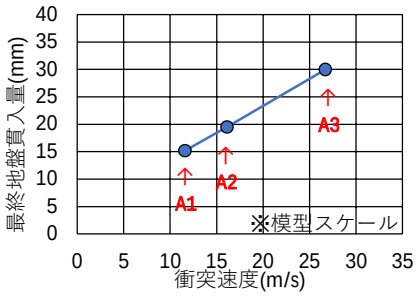


図-4　衝突速度と最終地盤貫入量

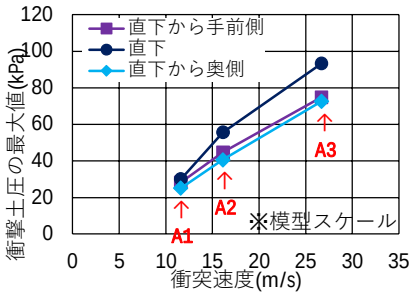


図-5　衝突速度と衝撃土圧の最大値

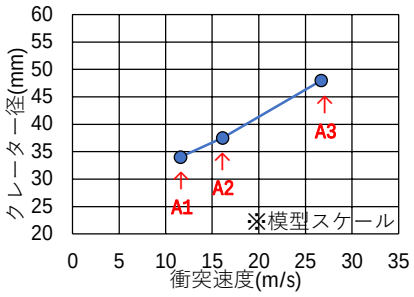


図-6　衝突速度とクレーター径

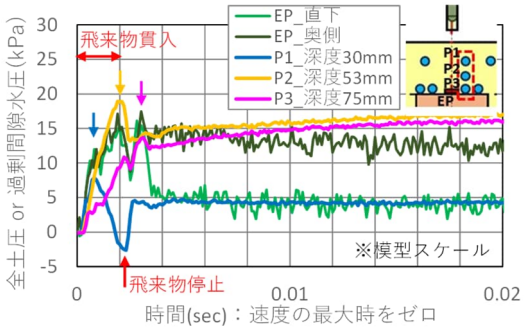


図-7 落下位置直近の圧力の時刻歴（深度分布）

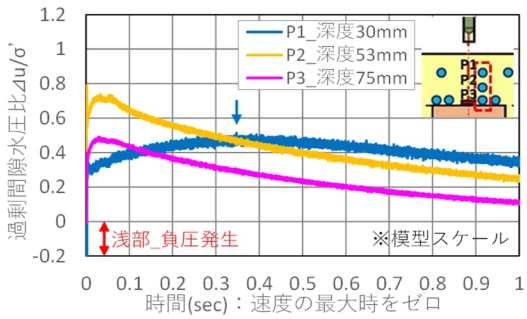


図-8 落下位置直近の⊿u/σ'（深度分布）

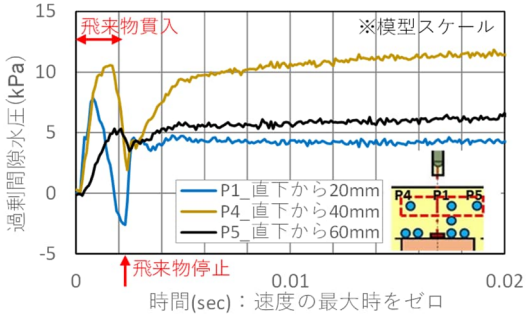


図-9 落下位置直近の圧力の時刻歴（浅部水平分布）

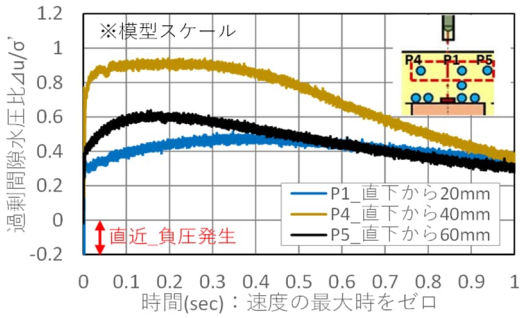


図-10 落下位置直近の⊿u/σ'（浅部水平分布）

量もほぼ線形的に増加した．ただし衝突速度については，例えば一般的な飛来物の初速度は遅いものでも 76.2m/s 程度[2]であり，遠心実験の速度相似比が 1 であるために，実験で再現可能な衝突速度については一定の限界がある．

図-5 には CaseA1～A3 で得られた衝突速度と地下構造物上面（実スケールで深度 4m）での衝撃土圧の最大値の関係を示す．衝撃土圧の最大値はいずれの衝突速度においても落下位置直下で最も大きく，衝突速度が大きくなるとほぼ線形的に増加した．図-6 の飛来物模型の落下によって生じたクレーターの径もまた，衝突速度に対しほぼ線形的に増加した．

図-4 を見ると，CaseA1 と CaseA3 における飛来物模型の地盤衝突速度の比は 2.3 倍である．本実験では飛来物模型の質量，投影面積および先端形状が同一であるため，衝突時の運動エネルギー比は速度比の 2 乗となる約 5.3 倍である．一方，粒状材料への低速度衝突に関する既往研究では，クレーター径 Dc は衝突エネルギーE の 1/4 乗に比例する関係 $Dc \propto E^{\wedge(1/4)}$ が報告されている[5), 6)]．本実験では飛来物模型の質量が一定であるため $E \propto v^2$ であり，既往研究の関係は衝突速度 v に対して $Dc \propto v^{\wedge(1/2)}$ と表される．

図-6 に示す CaseA1～A3 の実験結果を $Dc=Cv^{\wedge n}$ のべき乗式で回帰すると，指数 n は約 0.42 となり，既往研究から導かれる指数 0.5 に比較的近い値を示した．このことから，本実験で得られたクレーター径の衝突速度依存性は，既往研究で報告された衝突エネルギーの 1/4 乗則と整合的な傾向を示していると考えられる．ただし，本実験のデータは 3 点であり，既往研究とは重力場，地盤密度，飛来物形状および貫入条件等が異なることから，本実験結果のみをもって 1/4 乗則の成立を断定するものではない．

また，クレーターを円錐形と仮定し，クレーター深さに代えて最終地盤貫入量を代表長さとして用いると，排除土体積に相当する指標は，最終地盤貫入量とクレーター径の 2 乗との積に比例する．この指標による CaseA3 と CaseA1 の比は約 3.9 倍となり，図-5 に示す地下構造物上面における最大衝撃土圧の比は約 3.1 倍となった．なお，最終地盤貫入量は実際のクレーター深さとは異なるため，この値は厳密なクレーター体積比ではなく，飛来物模型の貫入とクレーター形成を併せた排除土体積の相対的な指標である．また，運動エネルギー，排除土体積に相当する指標および最大衝撃土圧は異なる物理量であり，これらを直接的なエネルギー減衰過程として対応付けることはできない．

ただし，衝突時の運動エネルギーが，飛来物模型の貫入，クレーター形成を伴う地盤の塑性変形，土粒子の移動・飛散，粒子間摩擦および地盤内部への荷重伝達等に分配されることで，排除土体積に相当する指標および地盤深部の最大衝撃土圧の増加率が，運動エネルギーの増加率より小さくなった可能性が考えられる

2.3 実験結果（液状化性地盤への衝突実験）

CaseC2 では液状化性地盤に飛来物模型を落下させた．地下構造物上面には衝撃による土水圧が瞬間的に作用した．その際（衝突直後の短期的挙動）の圧力計の経時変化を**図-7** に示す．落下位置直下から水平方向に 20mm 離れた位置の地盤浅部の間隙水圧計(P1：深度 30mm)では，飛来物模型の貫入初期で過剰間隙水圧(静水圧からの間隙水圧増分量)が急激に増加したが，途中から反転，急減し模型停止時には負圧(初期静水圧よりもマイナス側)に転じた．地盤深部(P3：深度 75mm)では正圧側のみに上昇し，中間深度の(P2：深度 53mm)では両者の中間的なマイナス側への挙動を示した．過剰間隙水圧のピーク値発生時刻（図中の矢印）は地表面からの鉛直方向の離隔（＝衝突荷重の伝達距離）が大となる地盤深部ほど遅延し，また前述のように間隙水圧がマイナス側に転ずる挙動は，衝突面に近い地盤浅部ほど顕著であった．地下構造物直上の土圧計 EP(直下：全土圧)は上記間隙水圧の影響を受けて貫入後にマイナス側に大きく低下した．衝突位置から水平方向にやや離れた EP(奥側)ではその影響が見られず，全土圧上昇後はほぼ一定値を示すなど，地下構造物上面に働く全土圧の値もまた，衝突位置からの離隔に応じて不均一な分布を呈することが示唆された．前述のマイナス側への間隙水圧減少については，液状化地盤で実施した初めての高速衝突実験であり，その考察は今後の検討課題と考える（クレーター発生による計器上の土被り圧減少の影響や，高速・急速載荷時に特異な間隙水圧応答の可能性などが考えられる）．

図-8 は，衝突直後（**図-7**）ではなく，飛来物の地中貫入停止以降のやや長期的な間隙水圧の消散過程を，過剰間隙水圧比（以降，水圧比と略称．間隙水圧計設置深度における過剰間隙水圧／初期有効土被り圧の比率.この値が 1.0 になると地盤は有効応力を完全に喪失し，液状化に至る）で整理した．衝突直後の水圧比のピーク値は地盤浅部(P1)では小さく（前述のマイナス側挙動の影響），中間深度(P2)が最も大，地盤深部(P3)がこれよりも小さい（衝突点からの離隔に対応）というやや複雑な挙動を示した．衝突終了後は，地盤浅部(P1)では時間経過に伴い水圧比が徐々に増加し（下層や周辺地盤からの過剰間隙水圧伝搬＝マイグレージョンによるものと推察），0.35sec 以降にピークを迎えた後，消散に転じた．中間深度(P2)と地盤深部(P3)ではピーク以降水圧比は徐々に減少（水圧消散）し，1 秒経過後の水圧比は地盤浅部ほど大（深部ほど小）となった．このように，飛来物衝突時およびその後の飽和地盤内の間隙水圧挙動は，衝突点からの離隔やマイナス側挙動の大小，地盤内マイグレーションと定常状態への移行など，複雑な地盤内間隙水圧応答を示しているものと考えられる．

図-9 は，地盤浅部（深度 30㎜）における間隙水圧挙動を，落下位置からの水平方向の離れ毎に整理した．計測点が衝突位置から水平方向に離れているため，**図-7** の衝突点直下に比べ過剰間隙水圧の値自体は小さい．落下位置直下から 20mm 離れた位置(P1)では前述のように初期でマイナス（かつ負圧）側に転じており，40mm 離れた位置(P4)でも負圧には至らないもののマイナス側挙動は良く似ていた．一方 60mm 離れた(P5)では，マイナス側挙動の影響は小さかった．液状化地盤ではクレーター径を明瞭に確認することはできなかったが，**図-6** を見ると離れ 60 ㎜はクレーターの外側に位置しており，前述したクレーター発生による土被り圧減少の影響が，水平方向に離れるほど小さくなることの影響とも考えられる．**図-10** は**図-8** にならい，衝突終了後のやや長期的な間隙水圧挙動を水圧比で整理した．水圧比は 40mm 離れた位置(P4)で 0.9 と液状化状態に近く，60mm 離れ(P5)でも 0.6 程度の比較的大きな値を示した．

以上のように，飛来物衝突時およびその後の飽和地盤内の過剰間隙水圧の発生と消散は，衝突点からの鉛直・

表-2 実験と DEM 解析の粒子数，高さ，乾燥密度

	実験	スケール7	スケール5	スケール3
粒子数	43,418,572	93,348	339,312	1,585,451
乾燥密度 (g/mm^3)	1.618	1.389	1.337	1.349

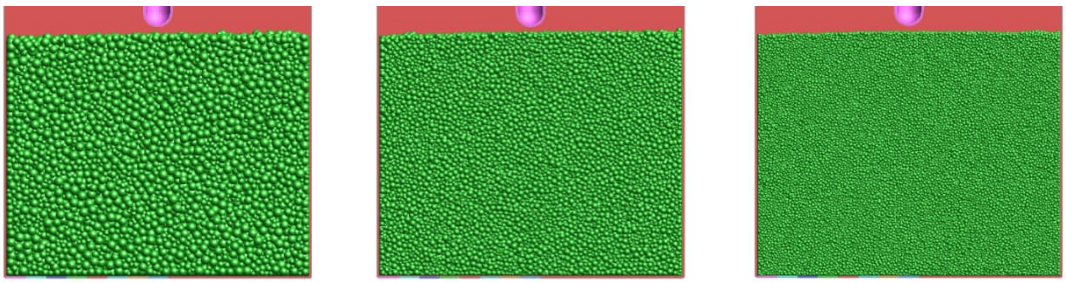


図-11 1.0 秒後の粒子スケール 7，5，3 の粒子配置

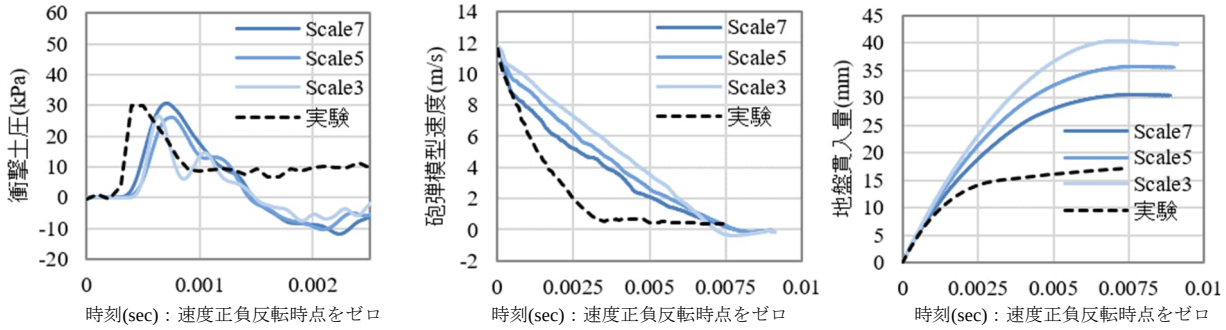


図-12　実験と粒子スケール 7，5，3 ごとの衝撃土圧，砲弾模型速度，地盤貫入量

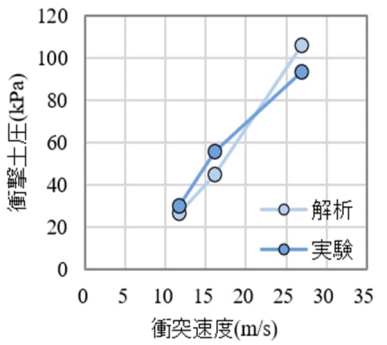


図-13　衝突速度と衝撃土圧の最大値

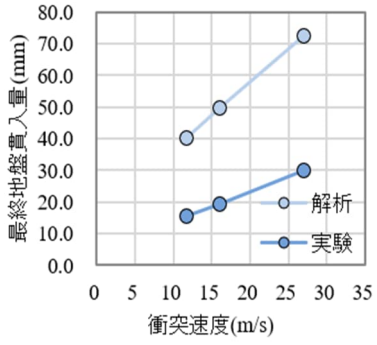


図-14　衝突速度と最終地盤貫入量

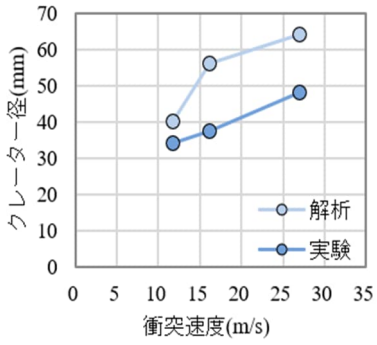


図-15　衝突速度とクレーター径

水平方向の離隔量（衝突エネルギーの伝搬距離に対応すると思われる）に依存した複雑な空間的・経時的挙動を示しており，深部基盤面からの入力・地中伝搬となる地震動作用時とはかなり異なる，特異なものとなっていることが確認された．計測データをより多点的に取得することは実験上難しく，今後は数値解析を併用した地盤内挙動の評価と考察が必要と考えている．

3. 個別要素法（DEM）による試解析

3.1 CaseA1 の再現解析と DEM 粒子径の影響検討

飛来物の衝突速度を変えた遠心模型実験(CaseA1～A3)の再現解析に先立ち，**表-1** 中の CaseA1 を対象として，DEM 解析における粒子径スケールの影響について予備的検討を実施した．解析モデルは，金ら [7]が用いた豊浦砂の粒子径および粒度分布を，それぞれ粒子径スケール 7，5，3 で粒子を，地下構造物模型の上部のみを切り出した範囲に配置した．解析条件は，配置した粒子の乾燥密度を上げるために粒子表面に平板を配置して圧力をかけつつ，筐体を 1.0 秒間左右に 100Hz のサイン波で揺らすことで乾燥密度を実験に近づけた（**図-11**）．**表-2** では実験の平均粒径と見かけの体積，乾燥密度から算出した推定粒子数と各スケールの粒子数および乾燥密度を比較している．スケール 3 でも実験の粒子数に対して 27 倍の差があり，乾燥密度は実験より 0.229～0.281Mg/m^3 ほど下回る条件となった．CaseA1 を対象として粒子径スケール 7，5，3 の条件で実施した DEM 解析結果を**図-12** に示す．衝撃土圧履歴に着目すると，最大値に達するまでの時間は粒子径スケール 3 が実験結果に近い傾向を示した．これは，粒子径が小さくなったことで荷重伝達パスが細分化されて荷重の立ち上がりが早くなったと考えられる．一方で砲弾模型速度と地盤貫入量および最大衝撃土圧についてはスケール 7 がもっとも近い傾向となった．これは実験の結果では最大衝撃土圧発生後の荷重低下においてスケール 7 が最も近い傾向を示していること，そして解析側では荷重がゼロを下回る地点でも実験側では荷重が発生し続けていることなどから，乾燥密度が最も実験に近いことが大きな要因と考えられる．乾燥密度が低いことで砲弾模型の侵入による粒子の平面方向の移動が抑制されず，砲弾模型を押し返すだけの反力が持続的に発生しなかったことが原因と考えられる．

3.2 CaseA1～A3 の比較検討

3. 1 の検討結果を踏まえると，砲弾模型速度–貫入量–最大衝撃土圧の対応は粒子径スケール 7 が実験結果に近い傾向を示した．一方で，最大衝撃土圧の到達時刻については粒子径スケール 3 が実験結果に近い傾向を示した．さらに，粒子径スケール 3 は粒子数が最も多く計算負荷は増大するものの，計算結果のばらつき低減の観点で有利である。そこで以下では，以降の CaseA1～A3 の比較を同一条件で行うため，粒子径スケール 3 を解析条件として採用した。

図-13～**図-15** に，**2. 2** で示した，砲弾速度を変えた CaseA1：11.7m/s，A2：16.1m/s，A3：26.7m/s における砲弾速度と最大衝撃土圧，最終地盤貫入量およびクレーター径の関係を示す．最大衝撃土圧は，砲弾速度の増加に

伴い単調に増大する傾向を示し，CaseA1 から CaseA3 にかけての増加傾向は遠心模型実験結果と定量的にも良く一致した．ケース間の相対的な大小関係も同様の傾向を示した（**図-13**）．最終地盤貫入量は，砲弾速度の増加に伴い単調に増大する傾向を示し，CaseA1 から CaseA3 にかけての増加傾向は遠心模型実験結果と定性的に一致した（**図-14**．モデル地盤の密度差により，**図-15** を含め絶対値は不整合）．クレーター径についても，砲弾速度が大きいほど拡大する傾向が解析結果からも確認され，実験で観測されたクレーター径の増加傾向と同様の傾向を示した（**図-15**）．以上より，粒子径スケール 3 を用いた DEM 解析により，砲弾速度に対する地盤応答の定性的な変化を傾向を適切に表現できる可能性が示唆された．

4. 地中爆発時の地盤内応力変動

4.1 動的土圧載荷装置と遠心模型実験の概要

2 章，**3** 章では，衝撃荷重が地盤挙動に及ぼす影響について検討したが，貫入した飛来物の地盤内での爆発（地中爆発）に伴い地下構造物に作用する動的な土圧（爆土圧）も重要な検討項目である．爆土圧に関しては火薬類を用いた 1g 場での模型実験[8),9)]が行われているが，原地盤層厚を再現した大規模な地盤モデルでの実験を行うことが（労力やコスト上）困難であることから実施事例は少ない．このため，層厚の相似則により実土被り圧相当のモデルでの結果が得られる遠心模型実験を用いた検討が有効であると考えた．

以下では，遠心載荷装置内で使用可能な圧縮空気を用いた動的土圧載荷装置を試作し，爆土圧の再現を試みた事例について紹介する．なお，遠心模型実験では応力（圧力）の相似比は 1 であるため以下に述べる圧縮空気（文献[8),9)]とオーダー的に近い）を爆圧源として用いた．**写真-1** は，今回試作した動的土圧載荷装置である．圧力タンクに貯めた圧縮空気（今回は 1.5MPa）を電磁弁にて瞬間的に開放（開放時間は約 0.1 秒）してノズル先端の噴射孔から圧縮空気を噴射，地盤へ瞬間的な載荷を行う仕様となっている．ノズルの内径は φ5mm で，先端には φ1.8mm の噴射孔を計 9 か所設けている．また，電磁弁とノズルの間には圧力計を設置しており，噴射時の圧力を計測できるようにしている．**図-16** は，この動的土圧載荷装置を用いた遠心模型実験の概略図である．地下構造物にはこれまで衝突実験[4)]と同じアクリルボックスを使用しており，土被り厚も 80mm と同じにしている．地盤には乾燥状態の豊浦砂を使用し，相対密度≒90%となるように作製した．この土槽に試作した動的土圧載荷装置を設置し，ノズルの先端は地下構造物の直上深度 20mm 位置に設置した．構造物天端には噴射孔直下と 20mm，40mm 離れた位置に土圧計を設置し鉛直土圧を計測するとともに，側面にも上から 20mm 下の位置に水平土圧を計測する土圧計を設置した．また，地盤内も深度 30mm 位置で，水平・鉛直方向に土圧計および加速度計を設置して計測を行っている．**写真-2** に作製した模型地盤を示す．

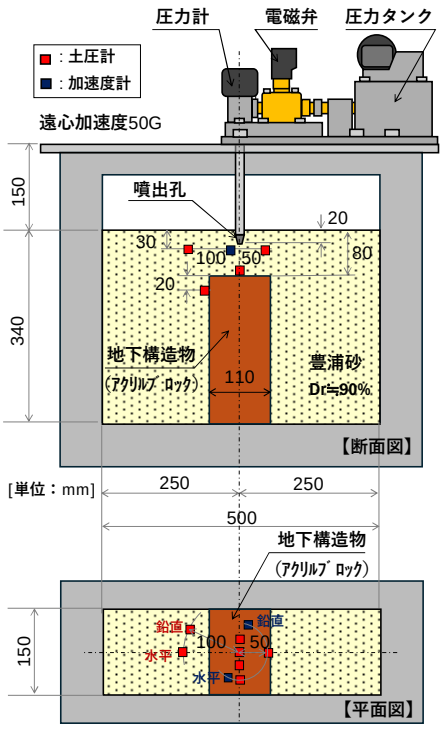


図-16 模型土槽の概略図

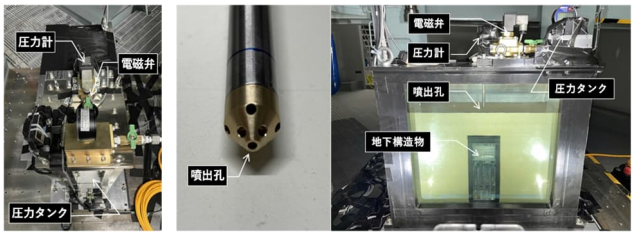


写真-1 動的土圧載荷装置　**写真-2** 模型地盤の状況

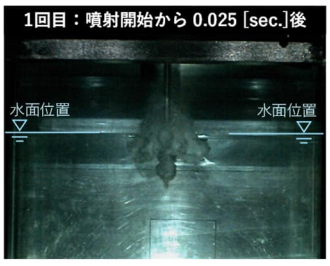


写真-3 水中での噴射状況

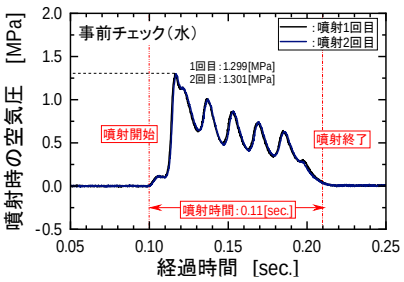


図-17 噴射時の空気圧(水使用)

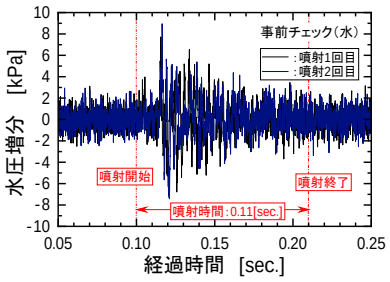


図-18 土槽下端の水圧増分(水使用)

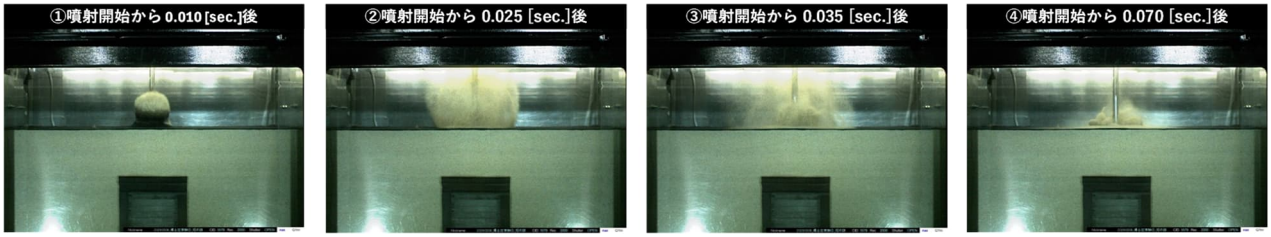


写真-4　噴射時の地盤状況

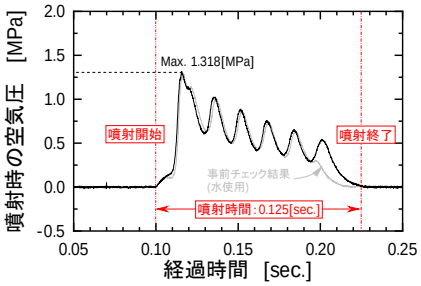


図-19　噴射時の空気圧変化

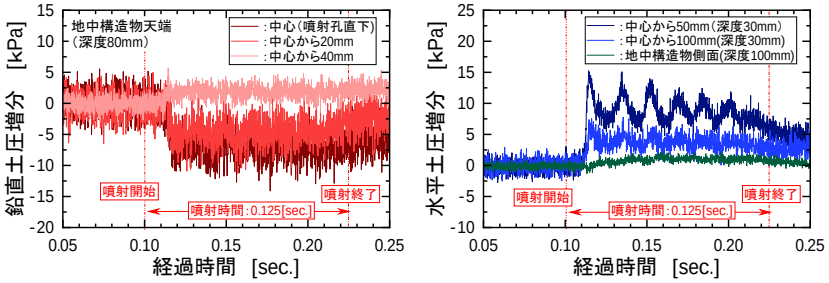


図-20　噴射時の土圧増分変化（鉛直・水平）

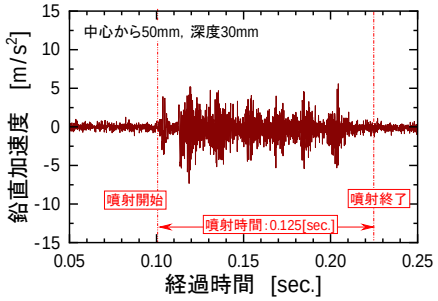


図-21　噴射時の加速度変化（鉛直・水平）

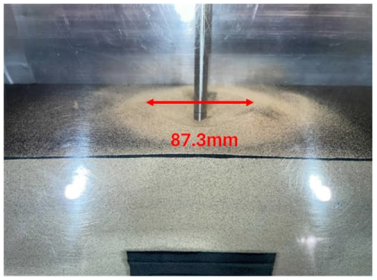


写真-5　土の飛散状況(実験後)

4.2 動的土圧載荷実験の結果

模型地盤の遠心模型実験を行う前に，試作した動的土圧載荷装置の動作チェックを実施した．ここでは，**図-16** に示した地盤（豊浦砂およびアクリルボックス）の代わりに，同じく高さ 340mm まで水を入れ，遠心加速度 50G で噴射試験を実施した．**写真-3** は，ノズル先端から圧縮空気が噴射された際の画像である．水中に圧縮空気の泡が広がるとともに，水面に水柱が立ち上がる様子が伺える．**図-17** は，電磁弁とノズルの間の圧力計の測定結果である．圧力タンク内が 1.5MPa であるのに対して，ノズルからは 1.3MPa 程度の圧力で噴射されたと考えられる．この動作チェックを 2 回実施しているが，噴射時の圧力の再現率は高く，装置には問題ないと判断している．なお，**図-18** に土槽下端に設置した水圧計の値を示しているが，若干ノイズが大きく見難いものの，2 回の実験結果は概ね一致している．

以上の動作チェックを経て，**図-16** に示す遠心模型実験を行った．遠心加速度は 50G である．**写真-4** は，圧縮空気噴射時の地盤画像である．圧縮空気を噴射することにより，地表面では球状に地盤が吹き飛んでいる様子が伺える．**図-19** は，電磁弁とノズルの間の圧力計の測定結果であるが，水を用いた事前チェックとほぼ同じ挙動を示している．**図-20** は，地下構造物の天端に設置した鉛直土圧計の計測結果である．ノイズが大きく見難いが，ノズル直下では平均 7～8kPa 程度土圧が低下している．中心から 20mm 離れた位置では平均 5～6kPa の低下，40mm 離れた位置では逆に平均 2～3kPa の土圧の増加が見られる．これは，**写真-5** に示した土の飛散により，土被りが増減した影響であると考えられる．一方，水平土圧の結果を見ると，**図-19** に示す載荷時の圧力の波がそのまま土圧に表れており，水平方向に土圧が伝播していることがわかる．**図-21** は，深度 30mm 位置に設置した加速度計の結果である．これらの結果を見ると，**図-19** に示す載荷時の圧力の波がそのまま加速度波形に表れており，載荷による加速度伝播を測定できていると考えられる．なお，鉛直方向と水平方向を比較すると，水平方向の振幅の方が大きいことがわかる．土圧増分も水平方向の方が大きいため，衝撃荷重とはやや異なり，爆土圧は深度方向には伝播し難く，むしろ水平方向の伝搬が支配的と考えられる．

5. 結論

本研究では，飛来物の衝突と地中爆発の再現を遠心模型実験で試みた結果及び考察を示した．得られた主な知見を以下に示す．

1) 飛来物の衝突速度を変えた遠心模型実験では，衝突速度の増加に伴い，飛来物の地盤貫入量，地中構造物に作用する衝撃土圧，および地表面クレー

ター径が線形的に増加することを確認した．

2) 液状化地盤への飛来物衝突実験では，衝突直後の瞬間的な過剰間隙水圧の減少（マイナス側への反転），地盤内部での過剰間隙水圧のマイグレーション，その後の消散過程における定常状態への移行など，一般的な地震動入力時とは異なる特異かつ複雑な地盤内間隙水圧応答が計測された．

3) 個別要素法（DEM）を用いた飛来物衝突時の再現解析に先立ち，用いるDEM要素の粒子径を変えた試解析を実施し，解析モデルの最適化を試みた．

4) 3)の結果を反映させた解析モデルを用いて，飛来物の衝突速度を変えたDEM解析を実施した．衝撃土圧については定量的にも高い再現性を，また地盤貫入量やクレーター径については，衝突速度の増加に伴う線形的な増加傾向を定性的に再現することができた．

5) 試作した動的土圧載荷装置を模型土槽に設置し，水張り試験により載荷装置の動作や計器の計測精度を確認した．引き続き実施した土中爆発実験では，噴射圧力波形に対応した土圧および加速度波形が計測され，また，これらの地中伝搬は鉛直方向よりも水平方向が卓越していることが確認された．

今回の実験により，液状化性地盤への飛来物貫入，および地中爆発時の特異な地盤挙動が確認された．今後，両者の交絡，すなわち液状化性地盤中での地中爆発時の地盤挙動の確認や，爆発深度を変えた際の地盤挙動の違いなどに着目したい．飛来物の衝突と貫入停止後の地中爆発は連続的に発生する．遠心模型実験によりこれを再現することは困難と思われるため，個別要素法（DEM）等による連続的現象再現の試行なども，今後必要と考えられる。これらの実験的，解析的知見は，地中構造物（地下シェルター）の外力評価と設計法の確立に向けて貴重な工学的知見を与えるものと思われ，今後も引き続き検討を進めていく所存である．

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たものである．

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，平田昌史，大塚悠大，石黒健，天野慎一：飛来物衝突および地中爆発荷重作用時の地盤内挙動に関する遠心載荷模型実験とその評価，前田建設技術報告集，VOL.60，2025．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載荷実験(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) Uehara, J. S., Ambroso, M. A., Ojha, R. P. and Durian, D. J.: Low-Speed Impact Craters in Loose Granular Media, Physical Review Letters, Vol.90, 194301, 2003.
5) Walsh, A. M., Holloway, K. E., Habdas, P. and de Bruyn, J. R.: Morphology and Scaling of Impact Craters in Granular Media, Physical Review Letters, Vol.91, 104301, 2003.
6) 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.
7) 市野宏嘉，大野友則，別府万寿博，蓮江和夫:地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響とその評価式の提案， 構造工学論文集，Vol.53A，2007.
8) 市野宏嘉，大野友則，別府万寿博，蓮江和夫:爆土圧を受ける地中埋設構造部材の変形と損傷に関する実験的研究， 構造工学論文集，Vol.55A，2009.