

## 剛飛来物衝突に対する地盤貫入量評価に関する実験研究

Experimental study on soil penetration evaluation against rigid missile impacts

美原 義徳\*, 敦賀 隆史\*\*, 小柳 貴之\*\*, 青山 雄一\*\*, 高橋 誠\*\*,  
古野 雄大\*, 二階堂 雄司\*, 島津 翔太\*\*\*, 別府 万寿博\*\*\*\*Yoshinori Mihara\*, Takashi Tsuruga\*\*, Takayuki Koyanagi\*\*, Yuichi Aoyama\*\*, Makoto Takahashi\*\*,  
Yudai Furuno\*, Yuji Nikaido\*, Shota Shimazu\*\*\*, Masuhiro Beppu\*\*\*\*

\*鹿島建設株式会社 (〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-3-1)

\*\*東京電力ホールディング株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

\*\*\*三菱重工株式会社 (〒100-8332 東京都千代田区丸の内 3-2-3)

\*\*\*\*工博, 防衛大学校教授 (〒239-868 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: Rigid missile impact, Soil penetration depth, Oblique high-speed impact, Simulation analysis

キーワード: 剛飛来物衝突, 地盤貫入量, 斜め高速衝突, シミュレーション解析

## 1. はじめに

日本における土被りのある原子力関連施設の衝撃荷重に対する構造評価では、NEI07-13[Revision 8P]<sup>1)</sup>において地盤に対する評価法の記載がないために、Young, C.W.による経験式<sup>2)</sup>を用いて、剛飛翔体に対する地盤の貫入量を評価しているのが現状である。しかし、それらの経験式のベースとなっている地盤試験における地盤物性及び衝突角度に関する詳細及び影響の程度が明らかにされていない。従って、地盤物性及び衝突角度に加えて衝突速度をパラメータとした、剛飛翔体に対する地盤の貫入試験を実施し、それらのパラメータが損傷モード及び貫入量に与える影響に関して定量的な比較・分析を行ったので、その結果を報告する。併せて、代表的な試験結果に対して、CEL (オイラー、ラグランジェ連成解析) 法を用いたシミュレーション解析を実施し、将来的な実スケールでの数値実験を視野に入れた、数値解析法の妥当性確認のための検討を行う。

## 2. 試験計画

剛飛翔体に対する地盤の貫入試験の実施に際しては、次に示す項目に配慮した試験計画を検討した。

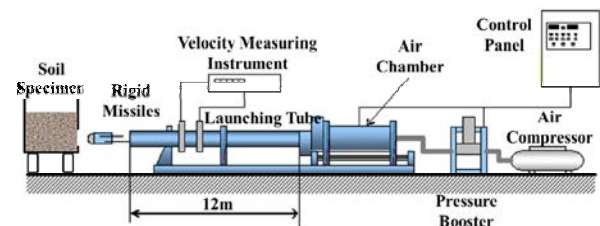
- 2.1 相似則
- 2.2 飛翔体発射装置
- 2.3 地盤試験体
- 2.4 計測計画
- 2.5 試験ケース

## 2.1 相似則

剛飛翔体に対する地盤の貫入試験は、飛翔体発射装置の制約があるため、縮小スケール試験とならざるを得ない。従って、縮小スケール試験の実施に際しては、一般的な波動方程式に基づく相似則に従って、試験計画の検討を行った。弾性振動問題で用いられる相似則には、一般的に Cauchy 則及び Froude 則の2種類がある<sup>3)</sup>。今回の縮小スケール試験では、通常の衝撃貫入試験と同様に、使用する材料物性 (密度比) が相似比で1となる Cauchy 則を採用するものとし、その際の長さ比は約 1/50 を想定する。

## 2.2 飛翔体発射装置

斜め衝突実験の実績等を勘案し、飛翔体の発射には防衛大学校所有の高圧空気式飛翔体発射装置を使用する。試験装置は発射管、エアチェンバー、エアコンプレッサー、増圧器で構成される。高圧空気式飛翔体発射装置の概要を図一1に示す。また、高圧空気式飛翔体発射装置に使用する剛飛翔体を想定した飛翔体は、先端を鋼製の球状とし、軸部は径 25~30 mm、長さ 90 mm で、合計質量が 100g になるよう調整した。



図一1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

## 2.3 地盤試験体

剛飛翔体に衝突させる地盤試験体は、製作、モデル化及び諸元設定が容易な乾燥した均質な細粒砂（粒径 0.2～0.4mm）を使用する。地盤基本ケースでは、想定する砂密度  $1.6t/m^3$  に地盤試験体重量がなるように、バイブレータで2層に分けて締め固め管理をして製作する。地盤変動ケースは、想定地盤よりも軟弱な地盤を想定して、締め固めない砂密度  $1.4t/m^3$  で地盤試験体重量を管理して製作する。

地盤試験体を製作・拘束するための土槽は、木製及びアクリル製の箱型形状とし、直角入射のために飛翔体衝突位置を円形に切欠き、切れ込みを入れたフィルムで飛翔体衝突時まで砂を留める構造とする。

また、飛翔体発射装置の制約のため、衝突方向を変えることができない。従って、斜め衝突の試験ケースに関しては、図-2 に示すように、地盤表面に斜度をつけた地盤試験体を製作した。そのため、全ての試験ケースで、地表側は土槽等による拘束面を設けていない。

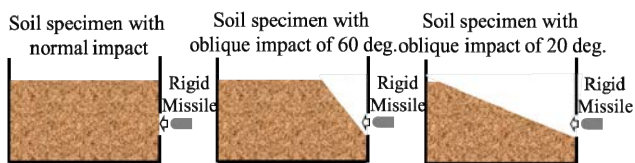


図-2 直角及び斜め衝突に対する地盤試験体の概要

## 2.4 計測計画

剛飛翔体に対する地盤の貫入試験では、衝突前後の状況を確認・把握するための通常ビデオ及び高速カメラ撮影、飛翔体の発射速度、地盤への飛翔体の貫入量に関する計測を実施する。飛翔体の発射速度は、図-1 に示すように、発射直前における発射管 2 点での通過時刻から自動的に計測される。本試験においては、飛翔体の発射速度を衝突速度としているが、高速カメラ撮影から求まる衝突速度と概ね対応することを確認している。最後に、地盤への飛翔体の貫入量に関しては、試験終了後に表層の地盤を剥ぎ取り、飛翔体先端の鉛直方向移動距離と水平方向移動距離をスケールでそれぞれ計測している。

## 2.5 試験ケース

剛飛翔体に対する地盤の貫入試験では、Young, C.W<sup>2)</sup> で定量的な影響が明らかになっていない地盤物性及び衝突角度に加えて、衝突速度を試験パラメータとする。試験ケースは、試験パラメータとして、目標とする地盤への衝突速度は 100m/s, 150m/s, 200m/s の 3 水準、衝突角度は 90 度（直角衝突）、60 度及び 20 度（斜め衝突）の 3 水準、地盤物性として締め固め管理した想定する砂密度  $1.6t/m^3$  の基本物性及び締め固め管理しない砂密度  $1.4t/m^3$  の変動物性の 2 水準を考慮した合計 11 ケースである（表-1 参照）。

## 3. 試験結果

剛飛翔体に対する地盤の貫入試験における代表的な試験ケースに対する飛翔体衝突前後の試験状況を写真-1～写真-2 に示す。また、飛翔体の地中での正確な移動距離は直接計測できないため、図-3 に示すように、地盤への貫入量は、飛翔体先端の鉛直方向移動距離  $V$  と水平方向移動距離  $H$  から最大と想定される貫入量  $D_{max}=H+V$  及び最小と想定される貫入量  $D_{min}=(H^2+V^2)^{0.5}$  を地盤への貫入量の範囲として評価する。

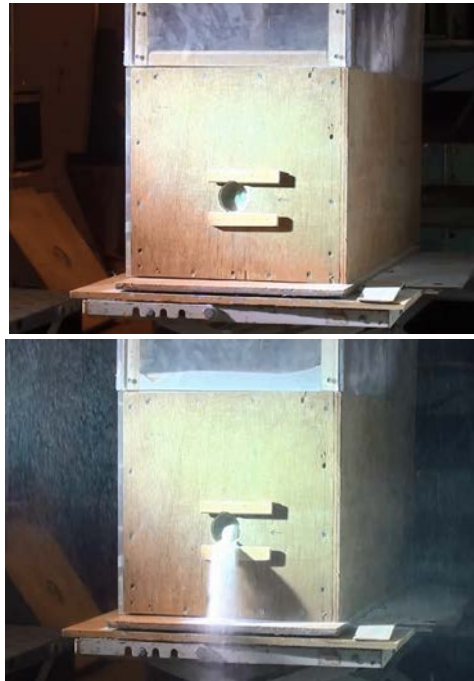


写真-1 代表的な試験ケースに対する飛翔体衝突前後の試験状況（衝突前面の状況）

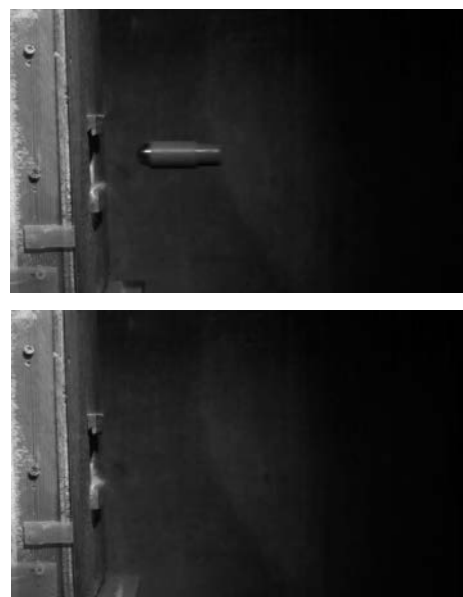


写真-2 代表的な試験ケースに対する飛翔体衝突前後の試験状況（衝突側面の状況）

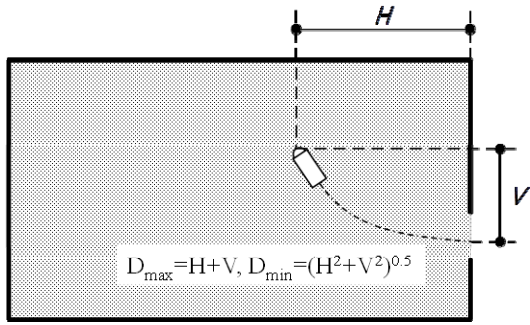


図-3 地盤への貫入量の範囲 (模式図)

各試験ケースに対する計測衝突速度、損傷モード、水平及び鉛直方向移動距離及び地盤への貫入量の範囲をまとめて表-1に示す。これより、衝突速度が20度の場合には地盤貫入後にスキッピングすること、衝突角度が90度及び60度の場合には地盤に貫入し、貫入の合計値は衝突速度が大きくなるに伴い若干大きくなる傾向が観察されたが、本試験範囲内では衝突速度の貫入量に与える感度は大きくないことが分かる。また、地盤密度及び地盤剛性が小さくなることで地盤貫入量は大きくなるものの、衝突速度と地盤貫入量の関係には差が見られないことも分かる。

表-1 試験結果のまとめ

試験ケース	計測衝突速度 (m/s)	衝突角度 (度)	地盤密度 (t/m <sup>3</sup> )	損傷モード	水平方向移動距離 H(cm)	鉛直方向移動距離 V(cm)	地盤への貫入量 (cm)
1	187.1	90	1.6	貫入	21.0	5.5	21.7-26.5
2	153.1	90	1.6	貫入	24.0	3.0	24.2-27.0
3	112.4	90	1.6	貫入	21.0	3.0	21.2-24.0
4	183.4	60	1.6	貫入	25.5	9.0	27.0-34.5
5	145.4	60	1.6	貫入	23.0	2.0	23.1-25.0
6	111.2	60	1.6	貫入	21.0	6.0	21.8-27.0
7	184.9	20	1.6	スキッピング	NA	NA	NA
8	110.1	20	1.6	スキッピング	NA	NA	NA
9	182.8	90	1.4	貫入	47.0	9.0	47.9-56.0
10	152.0	90	1.4	貫入	41.5	3.5	41.6-45.0
11	107.9	90	1.4	貫入	39.0	5.5	39.4-44.5

#### 4. 試験結果の評価

ここでは、衝突速度、衝突角度及び地盤剛性を試験パラメータとした、相似側に基づく多数の試験結果から得られる地盤最大貫入量とYoung式から得られる地盤貫入量を比較し、その経験式の適用性を検討する。

##### 4.1 Young式

剛飛翔体に対する地盤の貫入深さを評価するためのYoung式は、式(1)及び式(2)に示すとおり、地盤定数、先端形状係数、飛翔体重量、飛翔体衝突面積及び衝突速度をパラメータとした経験式である。

また、Young式の特徴として、式(1)における低速度の

領域では衝突速度に対して地盤の貫入深さが対数的に増加するため、式(2)における高速度の領域では衝突速度に対して地盤の貫入深さが線形増加するのに比べて、衝突速度の感度が小さくなっていることに特徴があり、式(1)と式(2)の遷移点は多数の試験結果に基づき決定している。

さらに、式(1)と式(2)とも、地盤の貫入深さは地盤定数に対して線形増加するが、この地盤定数の設定のために地盤種別に対する定性的な分類表のみが与えられているだけで、地盤密度及び地盤強度等の地盤物性値との関係が明らかではない。例えば、今回対象としている細粒砂に対しては地盤定数Sとして8~12(中央値10)の値が与えられている。参考までに、粗粒砂や礫に対しては地盤定数Sとして2~3(中央値2.5)が、中粒砂から粗粒砂に対しては地盤定数Sとして4~6(中央値5)が与えられている。なお、ここで示す地盤定数Sは、Bernard, R.S. and Creighton, D.C.<sup>4)</sup>の分類に従ったものである。

$$\textcircled{1} V < 200 \text{ ft/s}$$

$$Z = 0.53SN(W/A)^{0.5} \ln(1 + 2V^2 \times 10^{-5}) \quad (1)$$

$$\textcircled{2} V \geq 200 \text{ ft/s}$$

$$Z = 0.031SN(W/A)^{0.5} (V - 100) \quad (2)$$

ここで、

Z : 地盤貫入深さ(ft)

S : 地盤定数

N : 先端形状係数 (球状 : 0.65)

W : 飛翔体重量 (lbf)

A : 飛翔体衝突面積 (in<sup>2</sup>)

V : 衝突速度 (ft/s)

#### 4.2 試験結果との比較・分析

試験結果から得られる地盤の最大貫入深さと地盤定数Sとして2.5, 5.0及び10.0と設定したYoung式から得られる地盤の貫入深さを比較して、図-4に示す。これより、締固めした砂密度1.6t/m<sup>3</sup>の地盤基本ケースの試験結果から得られる地盤の最大貫入深さに関しては、地盤定数S=2.5(粗粒砂や礫に相当)によるYoung式から得られる貫入深さよりもやや小さめの貫入深さを示した。同様に、締固めした砂密度1.4t/m<sup>3</sup>の地盤変動ケースの試験結果から得られる地盤の最大貫入深さに関しては、S=5(中粒砂から粗粒砂に相当)によるYoung式から得られる貫入深さよりもやや小さめの貫入深さを示す結果となった。

これは、試験に使用した乾燥した均質な細粒砂(粒径

0.2~0.4mm, 地盤定数  $S=10$  相当)を相似側に従って実機スケールに換算した場合には粒径 10~20 mm程度に相当する中粒砂~粗粒砂であること,かつ Young 式の保守性によるものと考えられる. また, 図-4 には, 参考として, Young 式の低速度領域における式(1)から算定される地盤の貫入深さに関して, 適用範囲を超えた衝突速度に当てはめた値を破線で示している. 破線と試験結果との対応を見ると, 本試験結果は, Young 式における式(1)と式(2)の遷移点がさらに高速度の領域になっており, Young 式における式(1)と式(2)の遷移点が保守的に設定されている可能性が示唆される.

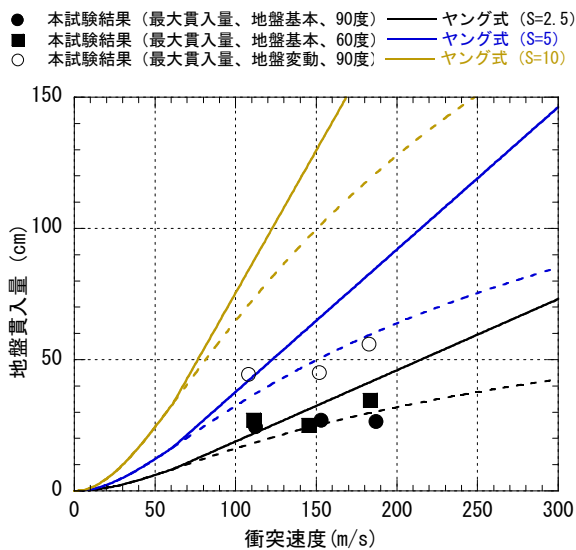


図-4 地盤の最大貫入深さの試験結果と Young 式との比較

## 5. シミュレーション解析

代表的な試験結果に対して, CEL (オイラー, ラグランジェ連成解析)法を用いたシミュレーション解析を実施し, 将来的な実スケールでの数値実験を視野に入れた, 数値解析法の妥当性確認のための検討を行う.

### 5.1 数値解析法及び解析モデル

代表的な試験結果に対するシミュレーション解析に用いる数値解析手法は, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法のような粒子法と比べて, 要素サイズの依存性が小さく, 試験に使用した乾燥した均質な細粒砂による流体挙動を適切にモデル化できると考えられる CEL (Coupled Eulerian Lagrangian, オイラー, ラグランジェ連成解析)法を用いる. CEL 法は要素を移動させずに物体の移動変形が考慮できるため, 有限要素法では扱えないような, 大変形, 破壊, 貫入等の問題を解析するのに適している.

ここで示すシミュレーション解析では, 砂地盤をオイラー要素, 飛来物を剛体と仮定したソリッド要素, 砂地

盤を拘束する土槽を剛体シェル要素でモデル化する. シミュレーション解析に用いる解析モデルを図-5 に示す.

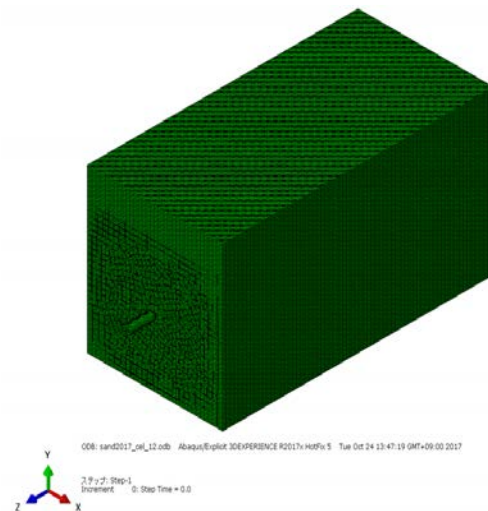


図-5 シミュレーション解析に用いる解析モデル

### 5.2 地盤の材料特性

シミュレーション解析に用いる砂地盤は締固めした砂密度  $1.6\text{t/m}^3$  の基本ケースとし, 材料構成則を Mohr-Coulomb 塑性モデルとし, 材料物性を表-2 に示す. なお, 衝突角度 20 度のケースに関しては, 上載圧が小さいことを考慮して, 表-2 に示す内部摩擦角よりも小さく設定している.

表-2 地盤の材料物性

地盤密度 ( $\text{t/m}^3$ )	ヤング係数 ( $\text{kN/m}^2$ )	ポアソン比 (-)	粘着力 ( $\text{kN/m}^2$ )	内部摩擦角 (度)
1.6	$5.00 \times 10^4$	0.4	0	20

### 5.3 解析ケース及び解析コード

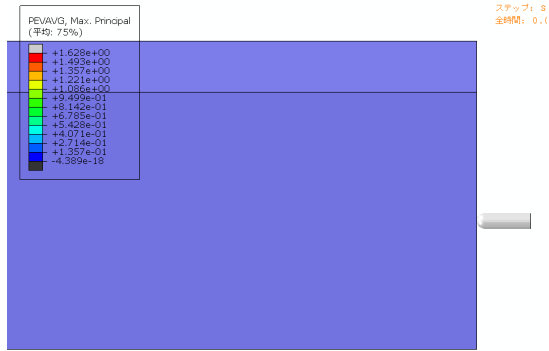
前述のとおり, 締固めした砂密度  $1.6\text{t/m}^3$  の地盤基本ケースを対象として, 衝突角度 90 度及び 20 度の試験ケースをシミュレーション解析対象とする. また, シミュレーション解析に使用する解析コードは, 汎用有限要素コード Abaqus2017 HF5 とする.

### 5.4 解析結果の概要

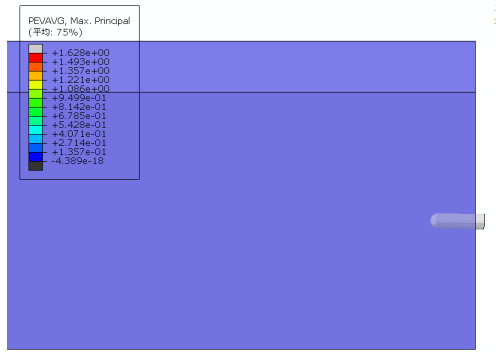
CEL 法を用いたシミュレーション解析結果のうち, 代表的な解析ケースに対する出力結果を示す. 試験ケース No.1 に対するシミュレーション解析結果のうち, 飛翔体の貫入挙動と地盤の最大主ひずみ分布を図-6 に示す. これより, 衝突角度 90 度のシミュレーション解析においては, 試験結果でも観察された飛翔体が水平方向に貫入するとともに鉛直方向にも移動する挙動を再現できていることが分かる.

次に, 試験ケース No.7 に対するシミュレーション解析

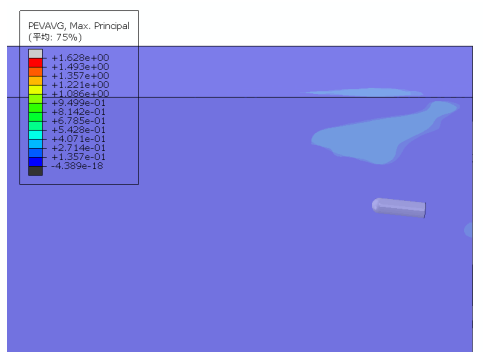
結果のうち、飛翔体の貫入挙動と地盤の最大主ひずみ分布を図一7に示す。これより、衝突角度20度のシミュレーション解析においては、試験結果でも観察された飛翔体がスキッピングする挙動を再現できていることが分かる。



(時刻 0s)

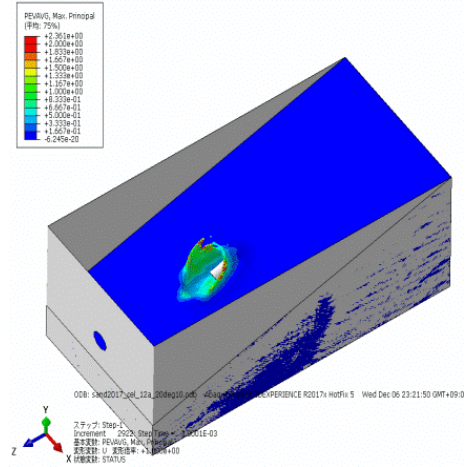


(時刻 1ms)

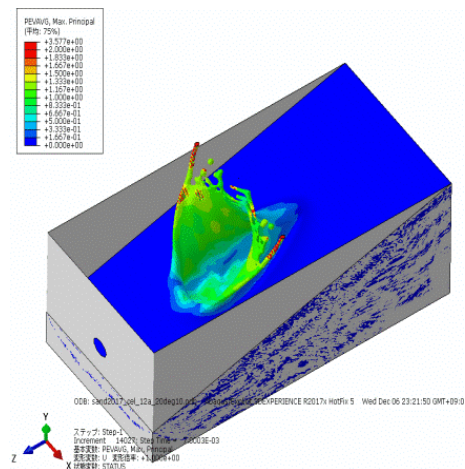


(時刻 0.1s)

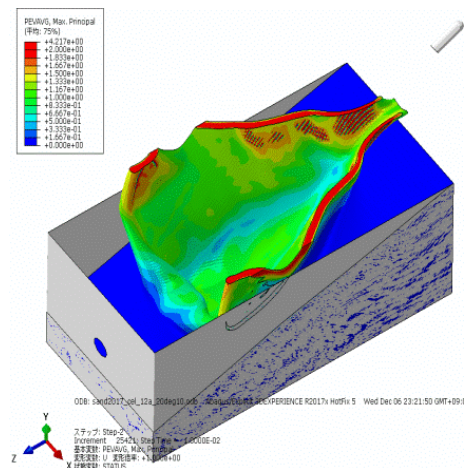
図一六 飛翔体の貫入挙動と地盤の最大主ひずみ分布のスナップショット (試験ケース No.1)



(時刻 3ms)



(時刻 7ms)



(時刻 10ms)

図一七 飛翔体の貫入挙動と地盤の最大主ひずみ分布のスナップショット (試験ケース No.7)

### 5.5 試験結果との比較・分析

CEL法を用いたシミュレーション解析結果のうち、地盤の貫入量に関して、試験結果との比較を行った。地盤の貫入量の試験結果と解析結果の比較を表一3に示す。

これより、CEL 法を用いたシミュレーション解析結果は、試験結果よりも貫入量を若干小さめに評価するものの、強非線形領域での地盤試験体のばらつきを考えると、地盤の全体的な損傷挙動としては十分な精度で試験結果を再現できることが示された。なお、参考までに、試験ケース No.1 における飛翔体の残留速度に関する試験結果とシミュレーション解析結果を図-8 に示す。ここで、飛翔体の残留速度に関する試験結果に関しては、飛来物後端に計測スケールを取り付けた試験を別途実施し、高速カメラ映像に基づき評価したものである。これより、飛翔体の残留速度が急激に低下する時刻では試験結果とシミュレーション解析結果は良好に対応しているが、それ以降の時刻では試験結果の方がシミュレーション解析結果よりも飛翔体の残留速度が若干大きくなっている。このような要因等もあって、シミュレーション解析結果が試験結果よりも貫入量を若干小さめに評価する結果になったものと考えられる。

表-3 地盤の貫入量の試験結果と解析結果の比較

試験 ケース	地盤貫入量(cm)					
	試験結果			解析結果		
	水平 方向	鉛直 方向	最大	水平 方向	鉛直 方向	最大
1	21.0	5.5	26.5	19.3	4.1	23.4
2	24.0	3.0	27.0	17.4	3.1	20.5
3	21.0	3.0	24.0	13.6	2.0	15.6
7	スキッピング			スキッピング		
8	スキッピング			スキッピング		

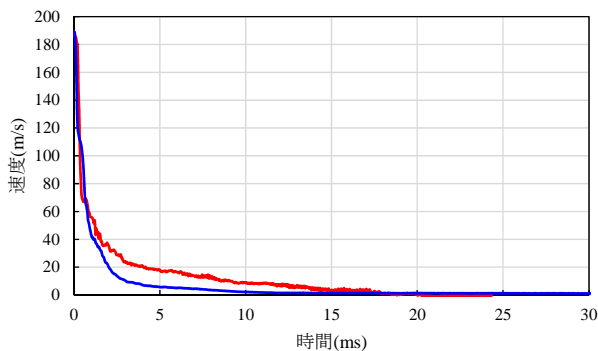


図-8 飛翔体の残留速度の比較  
(試験ケース No.1, 赤：試験, 青：解析)

## 6. まとめ

剛飛来物衝突に対する地盤貫入量評価のために、均質乾燥砂を用いた貫入試験を行った。発射管、エアチェンバー、エアコンプレッサー、増圧器で構成される高圧空気式飛翔体発射装置を用いて剛飛来物を所定の速度及び角度で試験地盤に衝突させた。衝突速度、衝突角度及

び地盤剛性を試験パラメータとした、相似側に基づく多数の試験を実施した。

これより、衝突速度が 20 度の場合には地盤貫入後にスキッピングすること、衝突角度が 90 度及び 60 度の場合には地盤に貫入し、貫入の合計値は衝突速度が大きくなるに伴い若干大きくなる傾向が観察されたが、本試験範囲内では衝突速度の貫入量に与える感度は大きくないことが分かった。また、地盤密度及び地盤剛性が小さくなることで地盤貫入量は大きくなるものの、衝突速度と地盤貫入量の関係には差が見られないことも分かった。

また、試験結果と既往の Young 式の比較を行い、設計式である Young 式の保守性が試験地盤で確認できたことに加えて、剛飛来物の衝突速度と地盤貫入量の関係においては、試験結果と低速領域における Young 式との対応が良好であることが確認できた。

さらに、試験のシミュレーション解析では、CEL (オイラー、ラグランジュ連成解析) 法を用いて、均質乾燥砂をオイラー要素でモデル化することで試験結果との対応が良好となり、図-7 に示す低角度の衝突角度でのスキッピング現象も予測できることが示された。また、剛飛来物の衝突速度と地盤貫入量の関係においても、低速領域における Young 式と同様に、CEL 法を用いたシミュレーション解析では試験結果を再現可能なことが示された。

## 謝辞

本研究は 11 電力共同委託として実施した。関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) NEI 07-13 [Revision 8P], "Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs", April 2011
- 2) Young, C.W., "Depth Prediction for Earth-Penetrating Projectiles", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, SM3 No.6558, pp.803-817, May, 1969
- 3) 紺谷 修, 美原 義徳, "建屋—地盤相互作用を考慮した相似側に関する研究 その1 相似側の構築", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), No.21504, pp.1007-1008, 1997 年 9 月
- 4) Bernard, R.S. and Creighton, D.C., "Projectile Penetration in Soil and Rock: Analysis for Non-normal Impact", Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report SL-79-15, December 1979