

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560978

研究課題名(和文) 高速衝撃貫入により粒状物質集合体中に引き起こされる諸現象の解明

研究課題名(英文) Elucidation of Various Phenomena Induced by High-Speed Penetration in Granular Materials

研究代表者

渡辺 圭子 (WATANABE, Keiko)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：80423599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：砂へ飛翔体を高速貫入させ、本研究で開発したマグネット・コイル法を用いて貫入深さと速度減衰履歴を計測した。結果、飛翔体の貫入挙動が変化する速度である遷移速度が存在し、その速度は砂集合体の弾性波速度に一致することがわかった。このことより、遷移速度前後では貫入中の力学状態が異なることが明らかになった。

飛翔体高速貫入実験において、貫入軌道は蛇行することがわかった。この軌道を精度良く計測するために、マグネット・コイル法を用い、蛇行を模擬した物体の「偏心+傾き」が出力に与える影響を調査し、理論式を構築した。そして、コイル中心からの偏心量および飛翔体貫入経路を同定する手法を確立するのに有益な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：High-speed penetration experiments into sands were performed using a vertical powder gun and a penetration velocity of projectile was measured by Magnet-Coil method developed in this research. The behavior of projectile changed at transition speed, and it was found that the transition speed give a fairly good agreement with the elastic wave speed.

In our high-speed penetration experiments, it was found that the penetrating projectile meandered. In order to measure the trajectory accurately, free fall experiments were performed and the output signal of Magnet-Coil method was formulated using distance from coil center and projectile inclination as parameter. This information is very valuable to establish the method of identification for location and attitude of projectile.

研究分野：衝撃工学

キーワード：粒状物質 高速貫入 速度計測 軌道計測 粒子破碎

1. 研究開始当初の背景

高速衝突は、低速負荷時には見られない特異な現象を引き起こすことから物理的に大変興味深い研究課題である。特に被衝突物が粒状物質集合体の場合、粒子自体は固体であるが、その集合体の挙動は形状不安定な流体として取り扱う必要があり、現象が複雑になる。とりわけ、砂などの粒状地質材料を対象とする場合は、粒径、充填密度、含水率、化学組成といった多くのパラメータがあること、その異方性・不均質性のために、粒子の挙動はさらに複雑化され、高速貫入物体により誘起される物理現象の理解ができていないのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 粒径と充填密度を変化させた砂へ飛翔体を高速貫入させ、本研究で開発したマグネット・コイル法により貫入深さと速度減衰履歴を計測することで、砂のパラメータが貫入挙動に及ぼす影響について調査する。また、飛翔体の貫入挙動が変化する速度である遷移速度が、砂の弾性波速度に一致すると予測されたため、砂の弾性波速度を計測し、遷移速度と比較するとともに、砂の粒径と充填密度が弾性波速度に及ぼす影響について調査する。
 (2) 飛翔体高速貫入実験において、飛翔体の貫入軌道は真っ直ぐではなく、蛇行することがわかった。この時々刻々変化する軌道を高時間・高空間分解能で計測するために、マグネット・コイル法を用い、蛇行状況を想定した物体の「偏心+傾き」がマグネット・コイル法の出力に与える影響を調査し、理論式の構築を行った。

3. 研究の方法

(1) 飛翔体の先端はニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM439)、後部は 7075 アルミニウム合金 (A7075) で構成されており、側面にはポリカーボネート製のスリーブを取り付けた。飛翔体後部から深さ 14 mm の穴の中に、衝突速度と貫入速度を計測するためのネオジム磁石 (直径: 4 mm, 高さ: 4 mm) を挿入し、エポキシ樹脂により固めた。飛翔体全体の質量は約 16 g である。

飛翔体加速装置として縦型火薬銃 (加速管内径: 15 mm, 加速管長さ: 1 m) を使用した。装置上部には火薬室があり、その下に飛翔体と隔膜を設置する。火薬室上部の雷管を点火することで火薬を燃焼させ、発生した燃焼ガスの圧力によって飛翔体を 150~510 m/s で砂に衝突させた。飛翔体の衝突速度は加速管下部に設置した 3 つのコイルを通過する際に発生する誘導起電力の出力の時間差より算出した。

飛翔体の貫入速度を計測するためのマグネット・コイル法の概略図を図 1 に示す。複数のコイルを巻き付けた円筒を砂の入った容器に被せて設置し、磁石を搭載した飛翔体が各コイルを通過する際の誘導起電力の時

間差より飛翔体の貫入速度を計測した。コイルは直径 0.2 mm の銅線を 10 mm あるいは 20 mm 間隔で 50 巻したものである。本計測方法は非接触法のため飛翔体の貫入挙動に影響を及ぼすことなく、不透明媒体中でも飛翔体の位置がわかるという利点がある。

弾性波の速度計測に使用した SHPB 型衝撃圧縮試験装置の概略図を図 2 に示す。試料が流動性を有する砂であるため、ポリカーボネート製で内径が応力棒と同じサイズ (φ25 mm) の円筒容器に砂を充填し、応力棒と同じ材質 (S45C)、同じ直径 (φ25 mm) の圧盤で蓋をした。圧縮された空気で打ち出された打撃棒 (長さ: 1 m) は約 4 m/s で入力棒 (長さ: 2 m) に衝突し、発生した弾性応力波が入力棒、試験部 (圧盤と砂)、出力棒 (長さ: 2 m) へと伝播する。このとき、入力棒と出力棒に貼られたひずみゲージの出力から弾

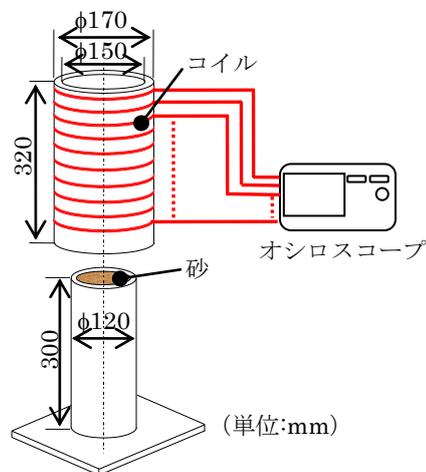


図 1 マグネット・コイル法による貫入速度計測システム

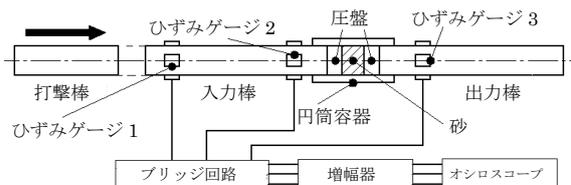


図 2 SHPB型衝撃圧縮試験装置

表 1 実験条件

| 実験内容 | 粒径 [μm] | 充填密度 [$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$] (空隙率 [%]) |
|-----------|-------------|---|
| 高速貫入実験 | 106-300 | 1.35 (49.1) |
| | | 1.55 (41.5) |
| | 300-500 | 1.33 (49.8) |
| | | 1.53 (42.3) |
| 500-1000 | 1.40 (47.2) | |
| 弾性波速度計測実験 | 106-300 | 1.55 (41.5) |
| | | 1.43 (46.0) |
| | 300-500 | 1.53 (42.3) |
| | | 1.61 (39.2) |
| 500-1000 | 1.54 (41.9) | |

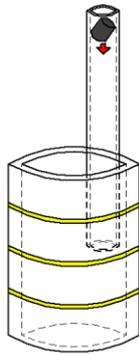


図3 「偏心+傾き」実験の概略図

性波の各ゲージへの到達時刻がわかり、ゲージの位置関係から弾性波の伝播速度を算出した。また、砂の粒径と充填密度を変化させ、各条件につき 10 回ずつ実験を行った。使用した砂は石英を 90% 以上含んだ海砂（密度： $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）で、粒径と充填密度（間隙率）を表 1 のように分類し、各実験を行なった。(2) 図 3 のように、磁石を傾かせながらコイル中心に対して偏心させ、自由落下させる。外径 170 mm、厚さ 10 mm、高さ 320 mm のアクリル製円筒に上方から深さ 4 mm の溝を 10 mm 間隔で切削加工しており、各溝にコイルとして直径 0.2 mm の銅線を直径 166 mm で 200 回巻いた。落下物をコイルに対して決まった偏心および傾き条件で落とす必要があるため内径 24 mm、長さ 1000 mm のサポートチューブを用いた。落下物には直径 15 mm、高さ 15 mm のネオジム磁石を用い、傾きながら落下させる必要があるため、専用のスリーブを装着した。偏心距離を 10 mm、20 mm、40 mm とし、磁石の角度をそれぞれの偏心につき 0 度、30 度、60 度と変化させ、各条件につき 5 回ずつ実験を行った。

4. 研究成果

(1) 高速貫入実験における貫入深さと速度の関係の例を片対数グラフを用いて図 4 に示す。飛翔体は 510 m/s で砂に衝突した後、貫入速

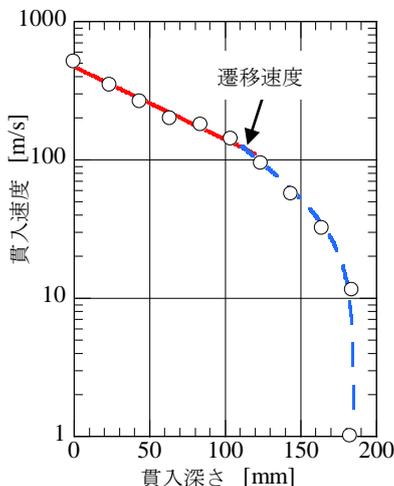


図 4 砂中での貫入深さと速度の関係

度が 100~200 m/s の遷移速度に達すると、減速の仕方に変化が生じることがわかった。遷移速度は他の条件の実験においても同様に確認された。飛翔体の加速度を表す方程式には式(1)が提案されており^①、この式を元にフィッティングを行なった。その結果、遷移速度より速い貫入初期における加速度は αv^2 のみで表現でき、遷移速度以下の遅い速度域では αv^2 、 βv 、 γ で表すことができた。

$$-\frac{dv}{dt} = \alpha v^2 + \beta v + \gamma \quad (1)$$

式(1)において、 αv^2 は飛翔体が前方の砂から受ける抗力に関する項、 βv は飛翔体側面にかかるせん断力に関する項、 γ は砂の凝集力に関する項である。実験結果を式(1)で近似したとき、 β 項が貫入挙動に与える影響力は小さいことがわかった。これは飛翔体が砂に貫入する際、砂は他の流体よりもせん断変形が大きく、回復力も小さいために剥離が生じやすいことが原因である。

フィッティングより求めた遷移速度以前の係数 α を表 2 に、遷移速度以降の係数 α および γ を表 3 に示す。いずれにおいても充填密度の増加に伴い α の値は増加傾向にあり、遷移後の γ の値も増加することがわかった。これは飛翔体が貫入する際、充填密度が高い砂ほど間隙が少なくなり、飛翔体が前方の砂から受ける抗力や凝集力が増加したためである。2 つの表の α を比較したとき、遷移前よりも後の方がより大きな値を取ることがわかった。これは遷移速度の前後で飛翔体に作用する力学状態が変化することを意味している。

表 2 遷移速度以前の係数 α の値

| 充填密度 [$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$] | 1.33 | 1.35 | 1.40 | 1.53 | 1.55 |
|--|------|------|------|------|------|
| α | 10.2 | 12.1 | 9.66 | 15.6 | 15.9 |

表 3 遷移速度以降の係数 α および γ の値

| 充填密度 [$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$] | 1.33 | 1.35 | 1.40 | 1.53 | 1.55 |
|--|------|------|------|------|------|
| α | 21.0 | 19.4 | 24.7 | 46.2 | 39.5 |
| $\gamma [\times 10^3]$ | 2.60 | 18.6 | 17.4 | 65.5 | 181 |

弾性波速度計測実験における各条件（表 1 参照）での計測結果を図 5 中の白抜き記号で示す。粒径の変化による弾性波速度への影響はなかったが、充填密度と弾性波速度は比例関係を示した。砂の内部を伝播する弾性波は、粒子が接している箇所を経路として伝播する。充填密度が高くなると粒子の接点数が増加し、弾性波が伝播する経路が短くなるため、速度が速くなったと考えられる。本実験では粒径の範囲を限定して計測を行ったが、範囲

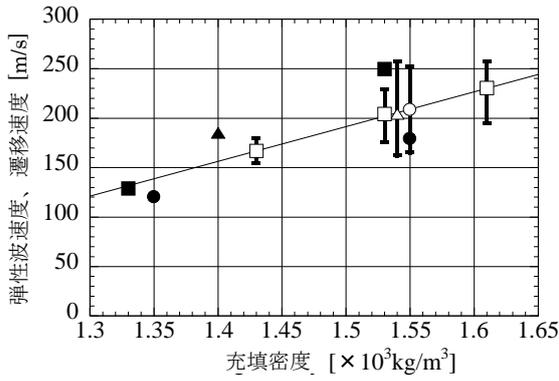


図5 砂中弾性波速度および遷移速度と密度・粒径の関係

白抜き記号：弾性波速度
 黒塗り記号：遷移速度
 ○●：106-300 [μm]
 □■：300-500 [μm]
 △▲：500-1000 [μm]

を広くした条件での計測では粒径の小さな砂が間隙を埋めることで弾性波速度が速くなることが予想される。

また、高速貫入実験各条件（表1参照）での遷移速度を図5中の黒塗り記号で示す。遷移速度は弾性波速度の近似線におおよそ乗っており、遷移速度と弾性波速度は一致することがわかった。遷移点前とは砂中の弾性波速度よりも飛翔体の貫入速度が速いことを意味しており、衝撃波を伴って流体中を移動する飛翔体に作用する力学状態と同様であると推察される。よって遷移点前後では貫入中の力学挙動が異なるを考える。

(2) 偏心距離が40 mmの場合の各磁石角度での出力を図6に例示する。また、各実験条件の出力のピーク - ゼロ間距離の比較を図7に示す。偏心距離が大きくなるほどピーク - ゼロ間距離は小さくなるが、磁石の傾きによる変化は見られなかった。よって磁石が傾きながら偏心したときのピーク - ゼロ間距離は、磁石の傾きによらず、偏心のみが影響を与えることがわかり、偏心距離が特定できることがわかった。

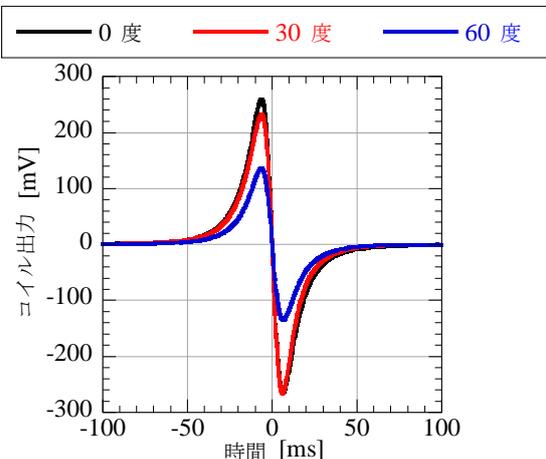


図6 偏心距離40 mmでのコイル出力

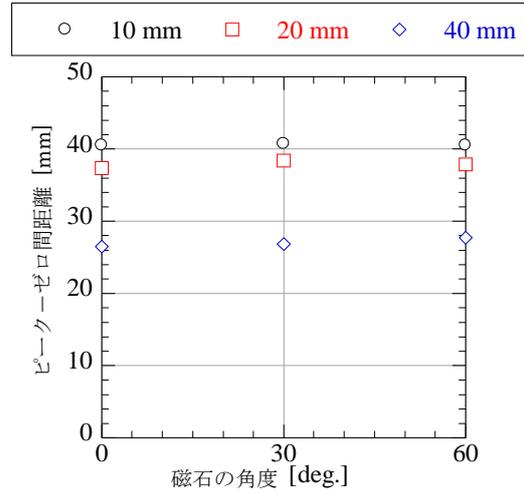


図7 各条件におけるピーク - ゼロ間距離

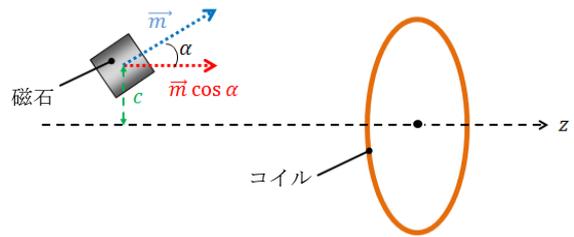


図8 磁石の偏心と傾きを考慮した磁石とコイルの位置関係

磁石の傾きと偏心を考慮した磁石とコイルの位置関係を図8に示す。磁気双極子モーメントの方向が α だけ傾くため、コイルの磁束に影響する磁気双極子モーメント m' は

$$m' = m \cos \alpha \quad (2)$$

となり、磁束は次式となる。

$$\phi = \frac{\mu_0 m a \cos \alpha}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a - c \cos \varphi}{(a^2 + c^2 + z^2 - 2ac \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi \quad (3)$$

コイル出力の式を導出すると、式(4)のようになる。

$$e = -\frac{3\mu_0 m N v a^2 \cos \alpha}{2\pi} \frac{z^2}{\{(a+c)^2 + z^2\}^{5/2}} \cdot \left[\frac{4}{3} \left\{ \left(1 + \frac{c}{a}\right) \cdot \frac{2-k^2}{1-k^2} - \frac{c}{a} \cdot \frac{1+k^2}{k^2(1-k^2)} \right\} \right. \quad (4)$$

$$\left. \cdot \frac{E(k)}{1-k^2} + \frac{2}{3} \left(\frac{c}{a} \cdot \frac{2-k^2}{k^2} - 1 \right) \cdot \frac{K(k)}{1-k^2} \right]$$

コイル出力の実験値と理論値の比較を図9に示す。結果、式(4)の理論式は実験結果とよく一致することがわかり、コイル中心からの

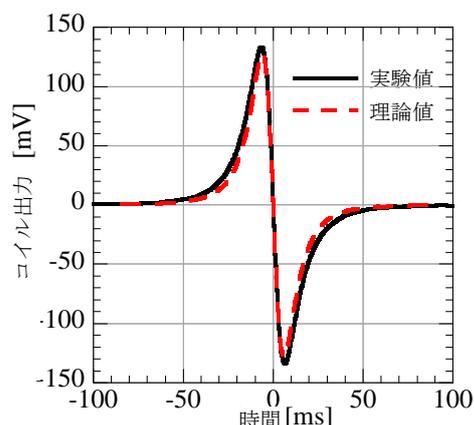


図9 コイル出力の実験値と理論値の比較
(偏心距離 40 mm、磁石の角度 60 度)

偏心量および飛翔体貫入経路を同定する手法を確立するのに有益な知見を得た。

本成果は、これまで理解するのが困難であった「不均質な粒状体中を高速で貫入する物体周りに誘起される物理現象」の解明のために、有益な情報を提供すると考える。

<引用文献>

- ① Allen W.A., et al., Dynamics of a Projectile Penetrating Sand, Journal of applied Physics, Vol. 28, No.3 (1957), pp. 370-376

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Keiko Watanabe, Syungo Fukuma, Tadashi Yoshisaka, Hidetoshi Kobayashi, Penetration Velocity Measurement in Sands Using Magnet-Coil Gages, Applied Mechanics and Materials, 査読有, Vol. 566, 2014, pp.371-376
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.566.371
- ② 松島亘志、渡辺圭子、高速圧縮破碎を受ける砂層に対するユゴニオ状態方程式の土質力学的解釈、土木学会論文集 A2 (応用力学)、査読有、Vol. 69、No. 2、2013、pp.371-378

[学会発表] (計 16 件)

- ① 渡辺圭子、分野横断を目指した衝撃研究、第 138 回衝撃部門委員会及び講演会 (招待講演)、2015 年 03 月 26 日、日本材料学会 (京都府・京都市)
- ② 渡辺圭子、吉坂正、砂中貫入速度および姿勢計測を精緻化するための基礎研究、宇宙科学に関する室内実験シンポジウム (招待講演)、2015 年 02 月 23 日、JAXA (神奈川県・相模原市)
- ③ Kazuhisa Ando, Tadashi Yoshisaka, Keiko Watanabe, Dynamic Behavior under High-Speed Penetration of

Projectile into Sand, 3rd International Symposium on Functionalization and Applications of Soft/Hard Materials (Soft/Hard 2014), 2014 年 11 月 08 日、立命館大学 (滋賀県・草津市)

- ④ Yuya Egawa, Peter Gardiner, Keiko Watanabe, Development and Performance Evaluation of Diaphragmless Vertical Gas Gun, 3rd International Symposium on Functionalization and Applications of Soft/Hard Materials (Soft/Hard 2014), 2014 年 11 月 08 日、立命館大学 (滋賀県・草津市)
- ⑤ 安藤和玖、吉坂正、渡辺圭子、砂への高速物体貫入における力学的挙動、日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス、2014 年 07 月 20 日、福島大学 (福島県・福島市)
- ⑥ 松島亘志、渡辺圭子、高速圧縮破碎を受ける砂層に対するユゴニオ状態方程式の土質力学的解釈、第 17 回応用力学シンポジウム (招待講演)、2014 年 05 月 11 日、琉球大学 (沖縄県・中頭郡)
- ⑦ 渡辺圭子、吉坂正、岩井俊祐、マグネット・コイル法を用いた偏心を伴う移動物体の挙動解析、平成 25 年度衝撃波シンポジウム、2014 年 03 月 06 日、青山学院大学 (神奈川県・相模原市)
- ⑧ Tadashi Yoshisaka, Keiko Watanabe, Dynamics of High-Speed Penetration of Projectile into Sand, 2nd International Symposium on Functionalization and Applications of Soft/Hard Materials (Soft/Hard 2013), 2013 年 11 月 30 日、立命館大学 (滋賀県・草津市)
- ⑨ 吉坂正、岩井俊祐、服部智成、渡辺圭子、マグネットコイル法による砂中の飛翔体高速貫入挙動の測定、日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス、2013 年 10 月 12 日、岐阜大学 (岐阜県・岐阜市)
- ⑩ Keiko Watanabe, Syungo Fukuma, Tadashi Yoshisaka, Hidetoshi Kobayashi, Penetration Velocity Measurement in Sands Using Magnet-Coil Gages, 8th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2013), 2013 年 09 月 04 日、大阪大学 (大阪府・豊中市)
- ⑪ 渡辺圭子、粒状地質材料への高速貫入現象、日本機械学会関西支部第 1 専門部会 (招待講演)、2013 年 02 月 19 日、大阪科学技術センター (大阪府・大阪市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 圭子 (WATANABE, Keiko)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号：80423599