

バラスト解析に対する弾性体モデルの提案および安定化構造体を混入した耐震バラスト基礎の開発と評価

奥村 弘*

Development and Estimation of Mathematical Modeling for Ballast Simulations and Earthquake Resistant Ballast Ground Mixed with the Stabilized Structure

Hiroshi OKUMURA

E-mail: okumura@itc.u-toyama.ac.jp

摘要

バラスト基礎地盤は、鉄道軌道のバラスト道床に代表される土木・建築工事や港湾等の基礎工に利用される重要なインフラ技術であり、耐震性向上は必要不可欠である。一方、バラスト基礎破壊の修復・復旧には膨大な維持・補修費が必要である。地震大国・日本において首都直下型地震や南海トラフ巨大地震などの発生が予測されている中、バラスト基礎地盤のレジリエントな防災・減災機能の強化のため、バラスト基礎地盤の耐震性抵抗力を向上させるハード的対策技術と、その理論的支柱となる数値解析法が求められている。バラスト粒状体により構成される地盤の材料特性と、そのメカニズムを解明する新しい弾性体力学を構築し、大型三軸試験による実証データとシミュレーションとの整合により、耐震性に優れた地盤の評価技術を確立し、地盤の耐震性を高める安定化構造体と耐震基礎を開発する。

キーワード (5語程度)：バラスト (単粒度碎石), 耐震性地盤, 安定化構造体, レジリエントな防災・減災, 弾性体モデル, 有限要素解析

Keywords (5語程度)：Ballast, Earthquake-Resistant Ground, Resilient Disaster Prevention-Reduction, Stabilized Structure, Elastic Body Model, Finite Element Simulation

I はじめに

基礎地盤材料を構成する単粒度碎石(バラスト碎石)の個々としての物理的・化学的性質や工学的分類は、観察と粒度試験などにより地盤材料として分類されているが、単粒度碎石の集合(地盤全体)としての力学的材料特性や応答のメカニズムは理論的に解明されていない^(1, 2)。これまでに、鉄道の単粒度碎石に関する研究でも、「軌道破壊現象」と高強度人工ブロックを投入した混合軌道の「沈下抑制効果」のメカニズムが理論解明できず、実用化の重要な技術課題となっている⁽³⁾。つまり、基礎地盤を連続体として一般化した従来の弾性体/弾塑性体の力学理論体系では、粒状体間におけるせん断応力の釣り合いに、回転モーメントによる微極性(micro polarity)が及ぼす弾性体全体への影響を考慮できないため、耐震性の評価に重要となる不均一な塑性変形や液状化現象のメカニズムは解明できなかった。このことが、現在においても耐震性に優れた地盤材料の開発を大きく阻んでいる理由であると考えられる。

そこで、本研究開発では、安定化構造体として直方体形状の高強度人工ブロックであるモモコキューブ®(注1)を用い(図1)、基礎地盤を構成する単粒度碎石の局所的な回転運動(微極性の回転モーメント)が、それら集合体としての基礎地盤に及ぼす力学的材料特性とそのメカニズムを表現することができる数理モデルを構築し、バラスト粒状体地盤モデルの数値解析技術を開発することで、大型三軸試験等による実証データとシミュレーションとの整合により、耐震性に優れた地盤の評価技術の確立をする。このとき、地盤の耐震性をさらに高める最適寸法形状を有する安定化構造体を開発する。これにより、将来的には耐震性に優れた地盤材料やその延命化・寿命予測・工事計画などを策定することに応用できる。



図1 安定化構造体と単粒度碎石(バラスト碎石)

※ 富山大学 総合情報基盤センター

富山大学大学院 人間発達科学研究科

II バラスト弾性体モデリングの提案

バラスト粒状体により構成される基礎地盤の力学特性は弾性体⁽⁴⁾と見なして差し支えない。なぜなら、バラスト粒状体個々の形状を平均化すれば球体であり、降伏条件に達しなければ、その粒子の集合体はある種の弾性体として挙動することが実証的に分かっているからである。逆に、バラスト基礎地盤が弾性体でなければ、応力・ひずみ関係式（フックの法則）は成り立たないはずであり、バラスト基礎地盤の抵抗力は生じなくなってしまう。本研究では、この弾性体中にバラスト粒状体と異なる力学特性を有する安定化構造体として高強度人工ブロックを混在させた場合、その基礎地盤全体の力学挙動および力学特性を解明するために新しい弾性体力学理論を構築する。

まず、ユークリッド座標系 $\mathbf{x} \in \Omega$ において弾性体の変位場 \mathbf{u} とすれば、次式による平面応力状態とした弾性体応力 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}, E, \nu)$ と外力（体積力：地震動など） \mathbf{f} のつり合い方程式を考える（図2）。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度であるが、弾性体と高強度人工ブロックの密度は異なるため、 $\rho = \rho(\mathbf{x})$ は空間に分布する関数と見なせる。さらに、弾性係数 $E(\mathbf{x})$ とポアソン比 $\nu(\mathbf{x})$ も分布関数となる。このことにより、この弾性体力学は高強度人工ブロックの自由界面（表面）を有する問題⁽⁶⁾と見なせる。

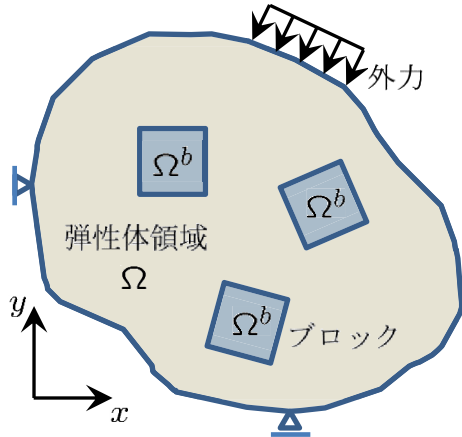


図2 バラスト弾性体モデル

このとき、本研究で提案する新しい弾性体モデリングでは、バラスト粒状体（平均化すれば球体）と高強度人工ブロックの表面接触面 $\Sigma = \partial\Omega^b$ において以下の運動学的条件(式2)と、ブロック自由界面（表面）の法線ベクトルを \mathbf{n} としたときの動力学的条件(式3)を与える。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^b \quad \text{on } \Sigma \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} - \boldsymbol{\sigma}^b \cdot \mathbf{n} = \alpha \kappa^b (1 - \kappa / \kappa^b) \mathbf{n} \quad \text{on } \Sigma \quad (3)$$

ここで、上付き文字 b は高強度人工ブロックを指す。また、 κ はバラスト粒状体（球体）の平均曲率、 κ^b は高強度人工ブロックの曲率、 α は表面接触力モデルにおけるパラメータである。上式において、 $\kappa = \kappa^b$ を選べば、動力学的条件の表面接触力はゼロとなることから、高強度人工ブロック形状に球体をえらんだ場合、バラスト地盤の抵抗力はなんら改善しないことが理論的に示すことができる。このとき、この動力学的条件は、接触面 Σ をまたがる法線方向の応力 $[p]$ のジャンプ条件である：

$$[p] = p - p^b = \alpha \kappa^b \quad \text{on } \Sigma \quad (4)$$

III 数値解析手法の提案

この高強度人工ブロック自由界面を有する弾性体に対する有限要素法による解析のため、高強度人工ブロック表面（自由界面） Σ の挙動を表すレベルセット(Level Set)関数 φ ⁽⁵⁾と距離関数 dist ⁽⁵⁾を次のように導入する：

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} +\text{dist}(\mathbf{x}, \Sigma) & (\mathbf{x} \in \Omega^b) \\ 0 & \text{on } \Sigma \\ -\text{dist}(\mathbf{x}, \Sigma) & (\mathbf{x} \in \Omega) \end{cases} \quad (5)$$

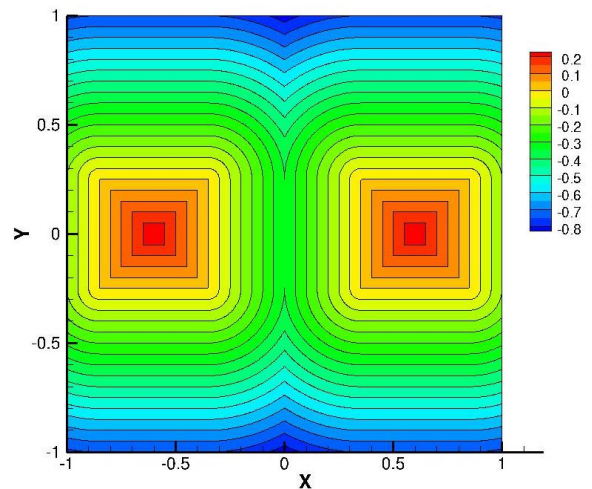
ここで、レベルセット関数は以下の性質を有する。

$$|\nabla \varphi| = 1$$

また、自由界面 Σ 上の法線ベクトル \mathbf{n} はレベルセット関数を用いて以下のように求めることができる。

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \Big|_{\varphi=0} \quad \text{on } \Sigma \quad (6)$$

図3に距離関数 dist のコンター分布図($\text{dist} = 0$ がブロック表面)を示す。このように、レベルセット関数と距離関数を用いて、複数（有限個）かつ任意形状の高強度人工ブロックを表現することができる。



ブロック2つの場合

図3 ブロック表面を表す距離関数の分布

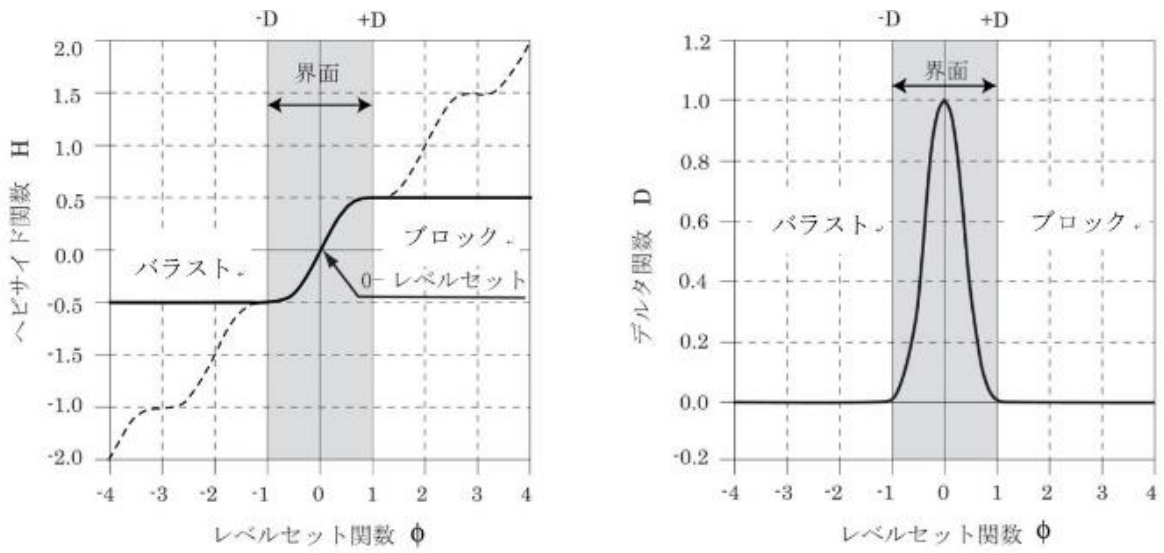


図4 ブロック界面(表面)近傍の近似ヘビサイド関数 H (左図)と近似デルタ関数 δ (右図)の分布

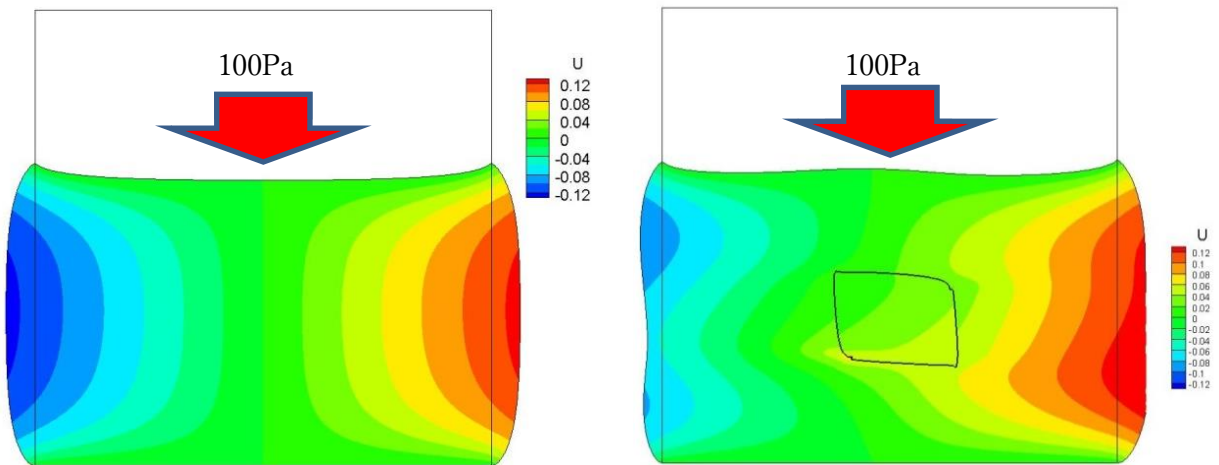


図5 ブロック形状に対する弾性体解析の変形結果

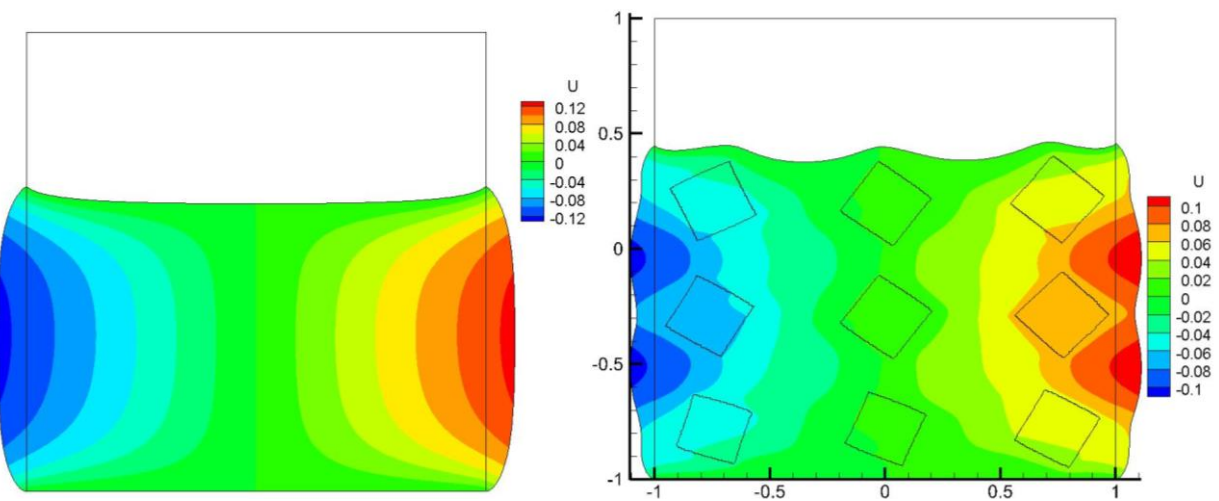


図6 ランダムに四角形ブロックを配置した弾性体解析の変形結果

さらに、高強度人工ブロックの自由界面近傍を表現するために、近似ヘビサイド関数 H と近似デルタ関数 δ を導入する。

$$H(\phi, D) = \frac{1}{2} \max \left[-1, \min \left\{ \frac{\phi}{D} + \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi \phi}{D} \right) \right\} \right]$$

$$\delta(\phi, D) = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi \phi}{D} \right) \right\} \left\{ \text{sign} \left(1, \frac{\phi}{D} + 1 \right) - \text{sign} \left(1, \frac{\phi}{D} - 1 \right) \right\}$$

ここで、 D はブロック表面近傍の界面幅である。このとき、近似ヘビサイド関数と近似デルタ関数はレベルセット関数によって、図4のような分布が得られる。

このとき、式(1)に対して、三角形1次要素（3次元問題では四面体1次要素）を用いた有限要素近似により計算機上で数値解析を行うことができる⁽⁴⁾。ここで、本数値解析により得られた正規化したバラスト領域にブロック無しのもと、四角形ブロックを混入した場合の弾性体解析結果のコンター図5に示す（ここでコンターは水平方向の変位 u ）。

これらの数値解析結果より、四角形の高強度人工ブロックでは、バラスト粒状体の局所的な回転モーメント力の組み合わせによってバラスト粒状体集合の地盤全体に生ずる荷重抵抗力を高めていることが分かる。

次に、この正規化したバラスト地盤中に、四角形ブロックをランダムに9個配置した場合の数値解析結果を図6に示す。この数値解析結果では、実用に最も近いブロックをランダム配置した弾性体変形解析において、ブロック無しの場合と比較して、鉛直変位が2割～3割も低減されている。このことは、従来の大型三軸圧縮試験において見られたバラスト供試体の挙動⁽⁶⁻⁸⁾と一致していることを示している。さらに、本研究において提唱したバラストと高強度人工ブロック間に作用する表面接触力モデルの妥当性が検証できたといえる。

IV 大型三軸試験機等による安定化構造体の実証試験

1. 大型三軸試験

単粒度砕石内での安定化構造体の挙動並びに、耐震性・耐圧強度向上について、(公財) 鉄道総合技術研究所の大型三軸試験機を用い試験を実施した。大型三軸試験には、安定化構造体として高強度人工ブロックの単粒度砕石への混入個数を1個と2個に変え、上部からの地震による振動を想定して、繰り返し荷重を載荷した。沈下量、割線ヤング率から、耐沈下性、耐震性に対する実証試験をおこなった(目標繰り返し回数1万回)。なお、図7は試験機及び試験状況図である。

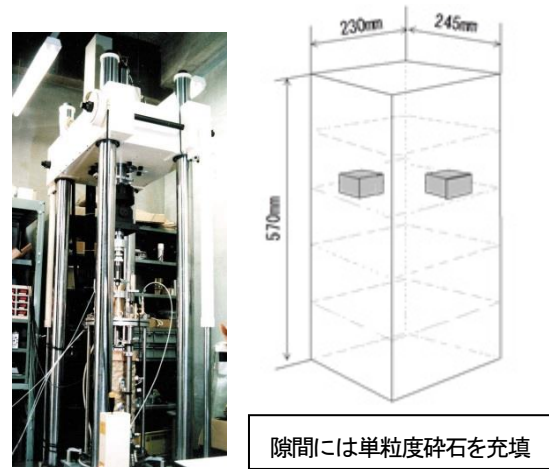


図7 大型三軸試験及び安定化構造体の埋設例

図8に大型三軸試験において、高強度人工ブロックの埋設個数を変えた時の残留沈下量と繰り返し回数の関係を示す。ここで1個、2個以外のデータは、過去に実施したデータ⁽⁹⁾を重ね書きしている。

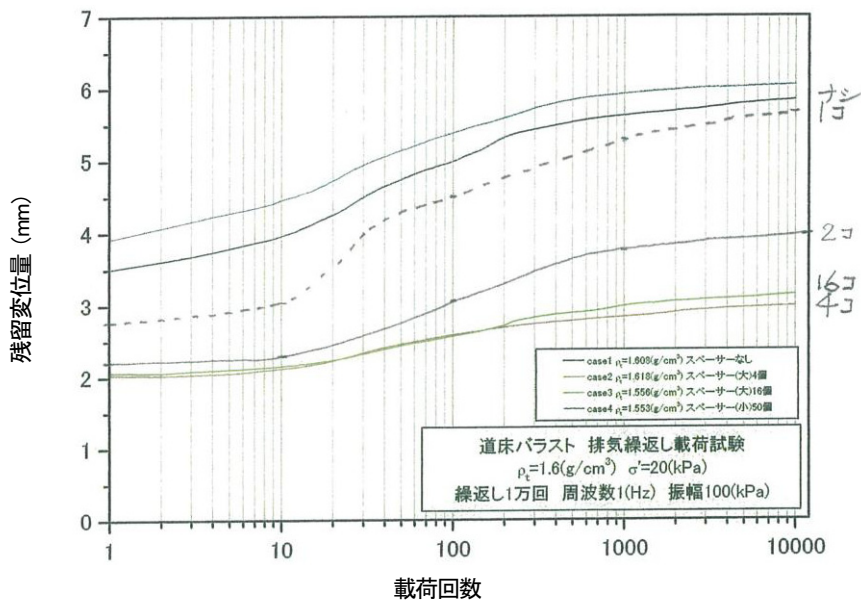


図8 大型三軸試験の結果： 残留変位—繰り返し回数の関係

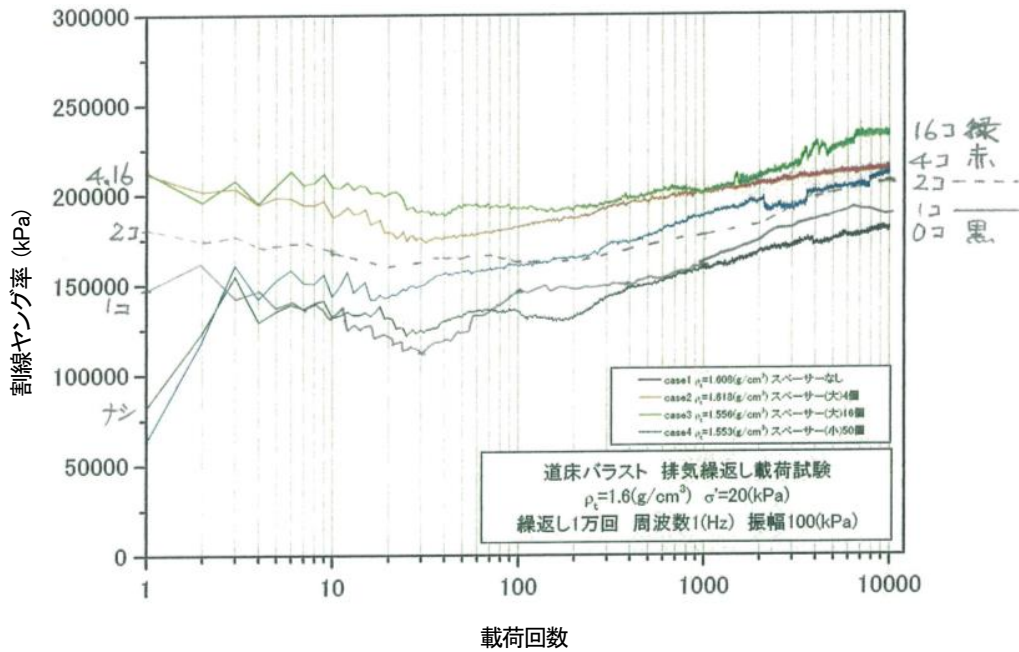


図9 大型三軸試験 割線ヤング率—繰り返し回数の関係

ここで試験条件は以下のとおりである。

供試体サイズ

角柱モールド w230mm×d245mm×h570mm

鉛直応力振幅：

100 kPa (最大：120 kPa 最小応力：20 kPa)

周波数：1 Hz

また、図9に割線ヤング率を比較した図を示す。これらの試験の10,000回実施後の値について比較したものを図10、図11に示す。なお、図10の縦軸は沈下量 (mm) を表し、図11の縦軸は割線ヤング率 (kPa) を表している。

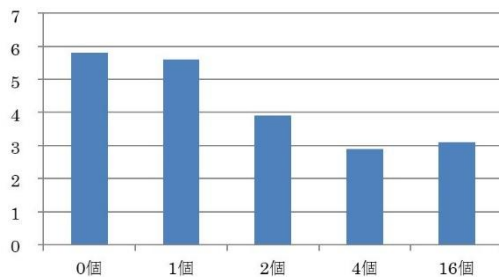


図10 大型三軸試験： 個数と沈下ミリ数の関係

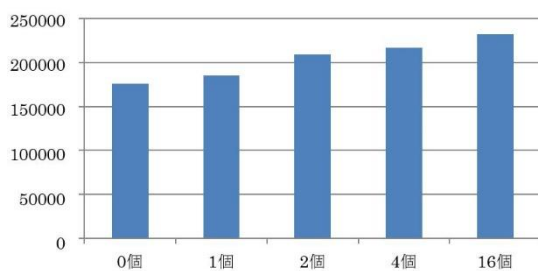


図11 大型三軸試験： 個数と載荷荷重強度の関係

これらの大型三軸試験の結果を比較したところ高強度人工ブロックを4個以上投入した場合安定する事が分かった。これを単位面積当たりの個数に換算すると、基礎地盤の面積あたり70個/m²以上(断面積当たりの高強度人工ブロックの専有断面積25%以上)の投入量となる。

三軸試験供試体の断面積：高強度人工ブロック4個の断面積
 = 230 mm × 245 mm : (60 mm × 60 mm) × 4個
 = 56,300 mm² : 14,400 mm²
 = 1 : 0.2557

2. 水平加振試験

基礎地盤に上の構造物に対する耐震性の評価を行うため、単粒度砕石上に建築物基礎を模したダミー構造物としてコンクリートブロックを置き、地震を想定した水平加振を行い、この時の上部にダミー構造物の加速度を測定した。試験の概要を図12に示す。なお、加振条件は次の通りである。

加振方向：水平(写真左右方向)

周波数：5 Hz

加速度：4.35 m/s² (震度6弱相当)

8.10 m/s² (震度6強相当)

加振時間：30 sec

プラスチックテナ内に20Hz 0.5 mmppの加振を加えて単粒度砕石を締めながら積層し、図13に示すように、容器の中間層に安定化構造体として高強度人工ブロックを配置

し、クラッシャーラン及び単粒度碎石のみの場合と比較した。

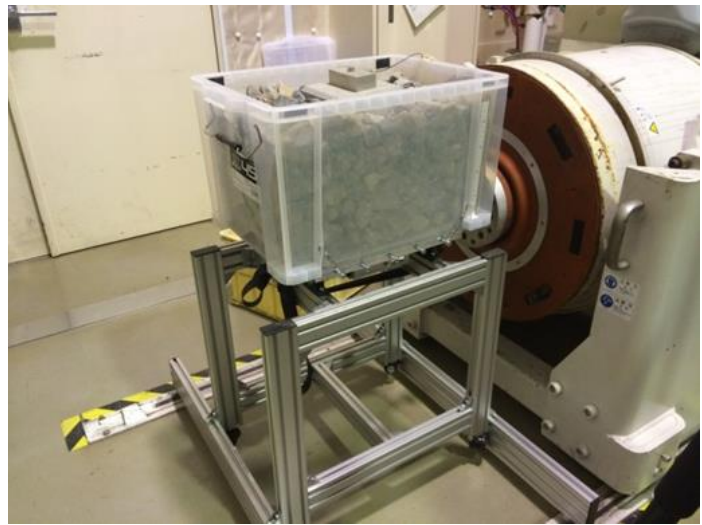
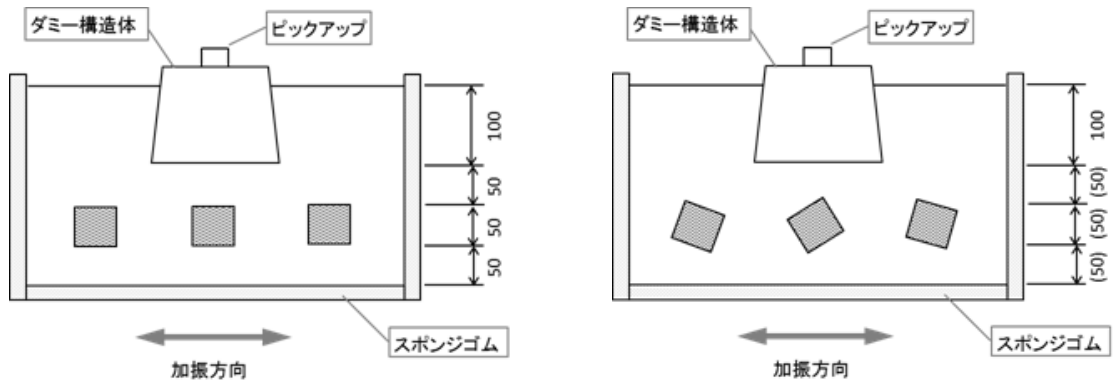


図 12 水平加振試験



整列配置



ランダム配置

図 13 加振試験における試料の状態

ここで、加振加速度については、加振機の仕様から周波数を 5 Hz としたときの加速度を、気象庁ホームページ「震度と加速度」⁽⁴⁰⁾から算出した。

震度 6 弱相当では、ダミー構造体は安定しているが、震度 6 強相当では周囲のバラスト等と一緒に動きだし、加速度が大きく増幅された。この時の、入力加速度に対する、ダミー

構造体の最大加速度を図 14 に、30 秒間の平均加速度を図 15 に示す。バラストのみに対し、高強度人工ブロックを整列配置したものは、増幅加速度が増加し、耐震性の低下が見られた。一方、高強度人工ブロックをランダム配置したものは、増幅加速度の低減傾向が見られ、耐震性の向上が見込まれる。しかし、数値的には、クラッシャーランと同程度であり、本

試験では優位性は見られなかった。

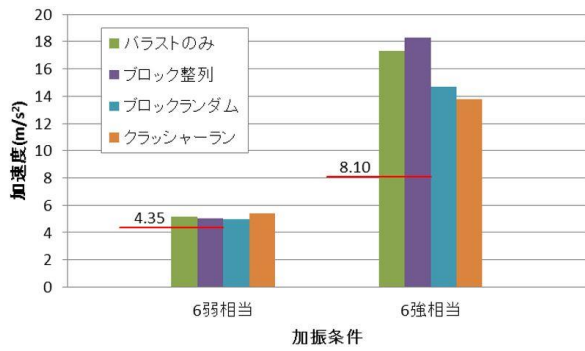


図 14 最大加速度

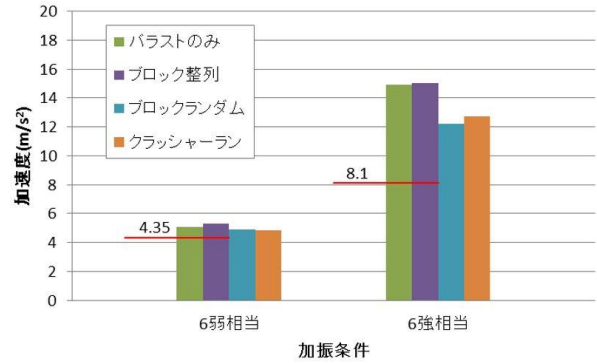


図 15 平均加速度

なお、本試験では、加振両側面にスポンジゴムを配置し、単粒度碎石等に緩い拘束をかけ、水平方向の一定周波数のみで実施したものであり、実際の建築基礎等の施工状態や、地震波形と異なることから、必ずしも、同じ結果となるとは言えないため今後検証を進める必要がある。

V 耐震性に優れた地盤材料評価技術の確立と安定化構造体の最適形状の開発

図 16 に正規化したバラスト領域にブロック無し、四角形ブロック、円形ブロック、三角形ブロックを混入した場合の弾性体解析結果を示す（ここでコンターは水平方向の変位 u ）。

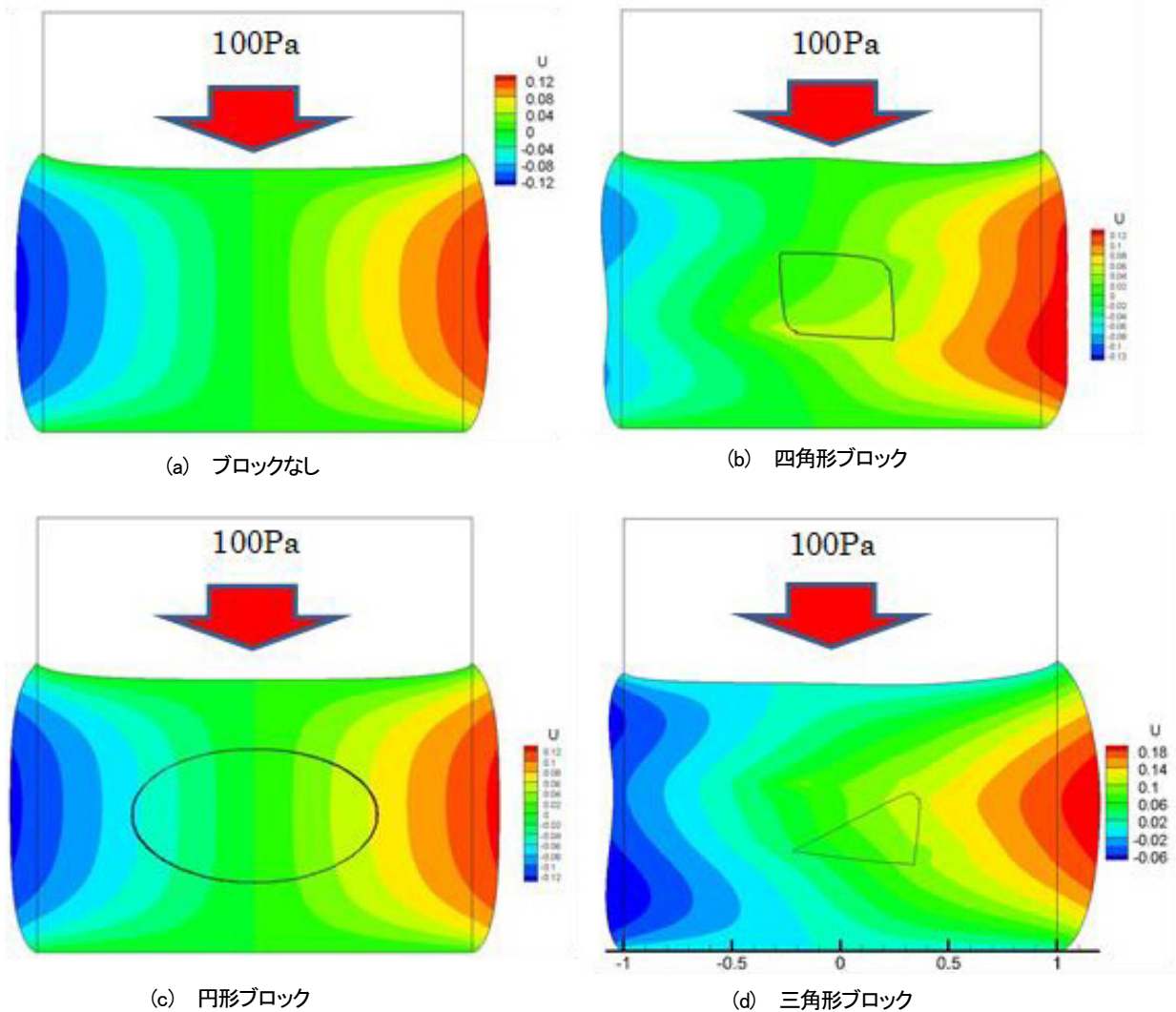


図 16 ブロック形状に対する弾性体解析の変形結果

これらの計算結果より、円形ブロックではバラスト地盤の抵抗力を高めることはほとんどできないことが分かる。一方、四角形ブロックでは、バラスト粒状体の局所的な回転モーメント力の組み合わせによってバラスト粒状体集合の地盤全体に生ずる載荷抵抗力を高めていることが分かる。三角形ブロックでも若干の効果がみられるものの、水平方向に非対称な変位（側方流動）が発生し、また載荷側の三角形頂点でブロックが著しく変形し、実用的には破壊・破損の可能性があるといえる。このことにより、四角形ブロックが最もバラスト地盤の抵抗力を高める形状であることがわかった。

VI 考察

一般的に近年は、建築基礎工にRC-40等のクラッシャーランを使用し、固い路盤が構築されている。路盤の下部が砂地であった場合等、または、液状化が発生する可能性のある箇所には透水性の高い（5～20%の空隙の有る骨材）基礎材を使用して排水効果が可能な工法を提案するが、空隙の多い材料は荷重強度が低いとされている。

今回、単粒度砕石内に単粒度砕石と異なる力学特性を有する安定化構造体として高強度人工ブロックを混在させた場合、その基礎地盤全体の力学挙動および力学特性を解明するために新しい弾性体力学理論を構築した。この解析理論を用い、弾性体解析を行ったところ大型三軸圧縮試験において見られたバラスト供試体の挙動と一致していることが証明できた。

大型三軸試験において、モールド内に高強度人工ブロックの投入個数を変え10,000回の載荷試験を行い、残留沈下量並びに割線ヤング率を比較したところ、大型三軸試験のモールド内に高強度人工ブロックを4個（平米あたり換算で70個/m²）以上投入した場合安定する事が分かった。

また、基礎構造体に地震による加振が加わった際の挙動を確認するため、水平加振試験を行ったところ、単粒度砕石はクラッシャーランと比較すると、入力加速度に対し上部のダミー構造体の加速度が大きくなるが、高強度人工ブロックをランダムに配置することにより、クラッシャーランと同程度に減衰できる可能性があることが判明した。

安定化構造体の最適形状については、前記の解析技術により、円形ブロックではバラスト地盤の抵抗力を高めることはほとんどできない。三角形ブロックでは、若干の効果はあるものの、載荷側の三角形頂点でブロックが著しく変形し、実用的には破壊・破損の可能性があることが判明した。これにより、四角形ブロックが最もバラスト地盤の抵抗力を高める形状であることがわかった。

以上より、今回のようにバラストに高強度人工ブロックをランダムに入れ込むと、震度6強相当までRC-40等と同格に近い内容となったが、地震には、想定外の3軸揺れが発生するため、今後、シミュレーションも取り入れ、形状ブロックの大きさ等を考慮に入れ、更に検討を加えた実験を繰り返す必要がある。

VII 結言

単粒度砕石の集合（地盤全体）としての力学的材料特性や応答のメカニズムは理論的に解明されていないが、安定化構造体として高強度人工ブロックを投入した単粒度砕石の「沈下抑制効果」のメカニズムは、論理的に解明が深まった。これからの応用開発として地盤の耐震性を更に高める工法として、従来からの最大寸法にとらわれない、最適寸法や形状を変えながらシミュレーションとの結合した安定化構造体の開発を進めたい。

謝辞

本研究はJSPS 科研費16K13734の助成を受けたものである。大型三軸試験では（公財）鉄道総合技術研究所から多大なご協力を得た。また、富山県工業技術センターと東洋道路興業株式会社から貴重なご教示をいただいた。記して感謝する次第である。

脚注

モモキューブ®

バラスト道床抵抗力を向上させる技術として、バラスト内に高強度人工ブロックを投入し、コストを掛けずに構造物の基礎の沈下を抑制する技術の特許第5156900「単粒度骨材からなる構造物の基礎及びその施工方法」であり、東洋道路興業株式会社、並びに富山県工業技術センターと、公益財団法人 鉄道総合技術研究所、金沢工業大学が特許を取得後、著者が研究体制に加わり更なる開発を進めた。この技術は高強度人工ブロックが測方流動と振動エネルギーを吸収し、軌道破壊現象を低減させることによりバラスト沈下を抑制することができる。この技術については、バラスト軌道への応用として、高強度モルタルに補強繊維を混入した高強度繊維補強コンクリートを用い、鉄道規格に適合した物性を持った高強度人工ブロックの開発を行い(図1)、大型三軸試験や実物大模型軌道試験により高強度人工ブロックの沈下抑制効果を実験により実証している。

参考・引用文献

- (1) 石田誠, 相川明: バラスト起動の動的挙動, *Railway Research Review (RRR)*, Vol.65 (2008.8) No.8, pp.18-21.
- (2) 桃谷尚嗣, 中村貴久, 曾我部正道, 浅沼潔: バラスト軌道の地震時変形挙動を評価する, *Railway Research Review (RRR)*, Vol.70 (2013.3) No.3, pp.24-27.
- (3) 浦川文寛, 相川明: バラスト砕石集合体の弾性体モデル構築と振動解析, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol.67 (2011) No. 2 P I_395-I_404.
- (4) Eduardo A. de Souza Neto, Djordje Peric, David R. J. Owen: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*, Wiley (2008).
- (5) 奥村弘ら: 続・有限要素法による流れのシミュレーション, 日本計算工学会流れの有限要素法研究委員会編, シュプリンガー・ジャパン (2008), pp.101-126.
- (6) 松井明, 上野実, 長橋孝次, 前川浩信, 梶谷公康: 鉄道軌道安定化のための有機繊維強化コンクリート構造体および安定化工法の開発, 富山県工業技術センター研究報告, No.24 (2010.7) p.66.
- (7) 長橋孝次, 上野実, 九曜英雄, 伊能忠敏: 実物大模型による道床バラストの沈下抑制物, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), Vol.66 (2011.8).
- (8) 上野実, 九曜英雄, 山崎泰之, 長橋孝次, 前川浩信: 鉄道軌道安定化のための有機繊維強化コンクリート構造体および安定化工法の開発, 富山県工業技術センター研究報告, No.25 (2011.7) p.102.
- (9) 上野実, 九曜英雄, 長橋孝次, 前川浩信, 奥村弘: 耐震性に優れた安定化構造体と弾性体力学を応用した耐震基礎の開発, 富山県工業技術センター研究報告, Vol.25 (2011.7) No.29 (2015) p.118.
- (10) 気象庁 HP 「震度と加速度」
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.htm>

(2017年10月20日受付)

(2017年12月20日受理)