

レジリエントな動的応答を実現する地盤安定化の提案

李洋¹

1 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

概要：砂—ゴム混合体は、粒子の再配列と粒子変形が共存し、相互に競合する工学的地盤材料の一種である。本研究では、砂—ゴム混合体を剛体粒子と軟質粒子の混合系としてモデル化し、単純せん断試験の数値シミュレーションを実施した。特に、ゴム含有率およびゴム粒子形状がせん断挙動に及ぼす影響に着目した。さらに、マイクロ構造の発展過程、粒子回転、および配位数について定量的な解析を行った。

1. はじめに

砂—ゴム混合体は、剛性の高い砂粒子の再配列挙動と、柔軟なゴム粒子の変形挙動が共存・相互作用しながら力学応答を支配する、特徴的な複合地盤材料の一種である。既往の研究により、この種の混合材料はエネルギー散逸性能の向上、減衰特性の増強、および振動伝達の低減に有効であり、特に地震時の応用に適していることが示されている¹⁻²⁾。さらに、画像処理技術を用いた実験的研究により、荷重作用下におけるこれら混合体の挙動の解明が進められてきた³⁻⁴⁾。しかしながら、画像分解能の制約や粒子間力の定量評価の困難さにより、大きな弾性変形あるいは塑性変形が発生した場合、粒子スケールでの信頼性の高い特性評価は依然として困難である。

このような背景のもと、剛体—軟質粒子混合系の挙動に対してマイクロな知見を与えることが可能であることから、数値シミュレーションの利用が近年増加している。従来の個別要素法では、軟質粒子を低剛性の粒子として扱うことが一般的であったが、この手法では粒子の変形特性を十分に再現することができない⁵⁾。より現実的な軟質粒子の変形挙動を表現するために、離散体解析と連続体解析を連成させたマルチフィジックス手法が提案されている⁶⁻⁷⁾。

本研究では、高変形を伴う粒状体の解析を目的として、Mollon (2016) により提案されたオープンソースコード「Multibody Element-free Open code for DYnamic simulation (MELODY)」を用いたマルチボディ・メッシュフリー手法を採用した⁸⁾。本研究の主目的は、ゴム含有率 (RC) およびゴム粒子形状が砂—ゴム混合体のせん断挙動に及ぼす影響を明らかにすることである。マクロ的にはせん断応力—ひずみ応答を評価し、マイクロ的には配位数および粒子回転の発展挙動

を定量的に解析する。

2. 数値解析条件

提案する数値解析手法の妥当性を検証するために、剛体壁により拘束された単一の軟質粒子を対象とした等方圧縮試験の数値シミュレーションを実施した。対象とする粒子のポアソン比は 0.495 とした。図 1 に示すように、無次元拘束圧 (P/E) の増加に伴い、充填率 (ϕ) は徐々に増加し、最終的に 1 に近づく。このことは、拘束系が軟質粒子によって完全に占有される状態に至ることを示している。さらに、本研究で得られた結果は、Cantor ら (2020a)⁹⁾ の結果と良好に一致している。以上より、本研究で用いた数値解析手法は、軟質粒子の挙動を精度よく再現可能であることが確認された。

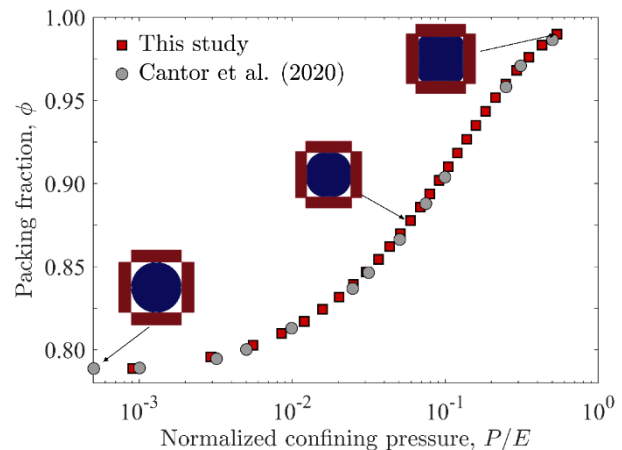


図 1 単一軟質粒子に対する等方圧縮試験による提案手法の妥当性検証

本研究では、ゴム含有率 (RC) として面積比に基づき、0% (全て剛体粒子)、10%、および 20% の 3 条件を設定した。剛体粒子はシリカ砂の二

次元形状により表現し、ゴム粒子は楕円形として簡略化した。ゴム粒子の形状については、長軸と短軸の比で定義されるアスペクト比 (Ar) として、1.0 (円形)、2.0、および3.0の3種類を考慮した。シリカ砂およびゴム粒子の材料特性は既往研究^{6, 8)}に基づき設定し、その詳細を表1に示す。なお、接触剛性については、砂-砂 (S-S)、砂-ゴム (S-R)、およびゴム-ゴム (R-R) の3種類に対してそれぞれ異なる値を設定した。

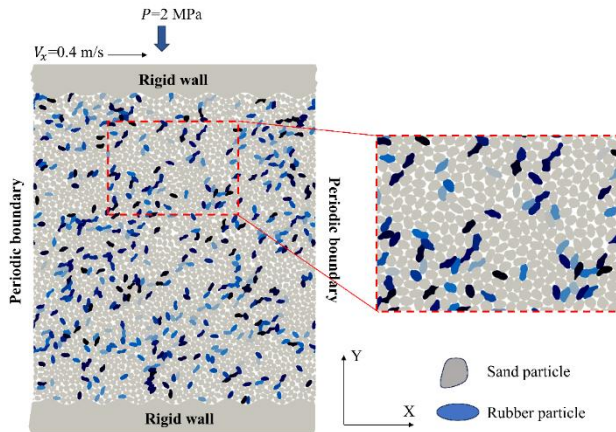


図2 せん断前における砂-ゴム混合体 (RC = 20%、Ar = 2.0) の供試体の様子

表1 数値解析パラメータ

解析パラメータ	値
せん断速度 V_x (m/s)	0.4
鉛直拘束圧 P (MPa)	2
粒子数	2500
平均粒径 (m)	0.004
法線方向剛性 k_n (GPa)	S-S: 100 S-R: 20 R-R: 10
法線-せん断剛性比	1
珪砂	
粒子密度 ρ (kg/m ³)	2650
ゴム	
粒子密度 ρ (kg/m ³)	1150
ヤング率 E (MPa)	5
ポアソン比 ν	0.495
減衰係数 α, β (s ⁻¹ , s)	0.007, 0.001
ゴム含有率 (RC)	0, 10%, 20%
アスペクト比 (Ar)	1.0, 2.0, 3.0

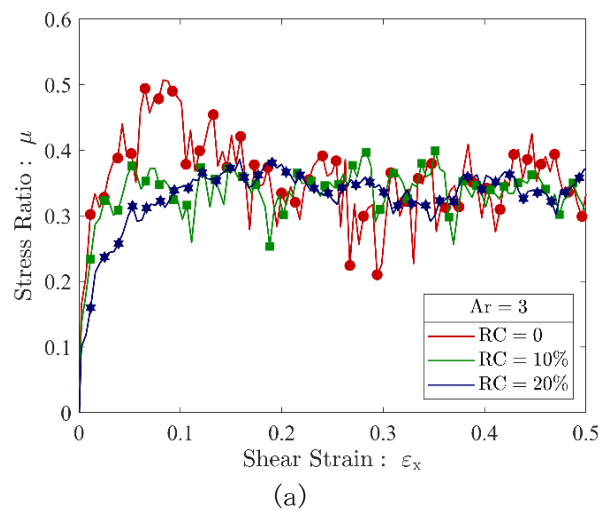
供試体は、初期状態において摩擦係数を0とすることで高密度に充填し、その後摩擦係数を0.5に戻すことで摩擦性粒子系を再現した(図2

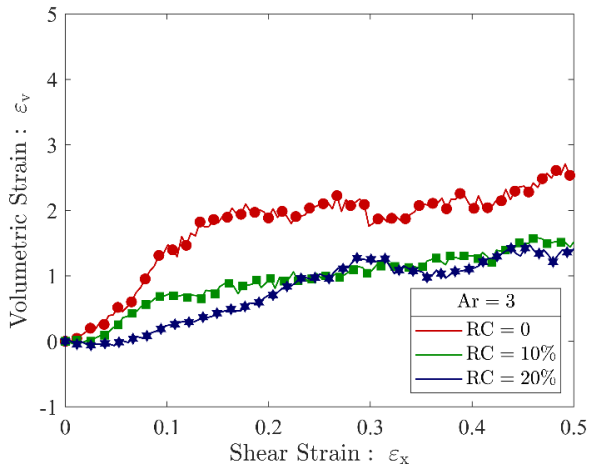
参照)。供試体作製後、上部壁を一定速度 $V_x=0.4$ m/s で水平方向に移動させることにより単純せん断を実施した。このとき、慣性数 10^{-3} 以下に維持されるよう制御し、動的効果を排除した¹⁰⁾。すべての供試体は、臨界状態を明確に確認するため、せん断ひずみ $\epsilon_x=50\%$ までせん断を行った。

3. マクロ応答

図3は、アスペクト比 $Ar=3$ における異なるゴム含有率 (RC) の条件を例として、単純せん断過程におけるせん断応力比 (μ) および体積ひずみ (ϵ_v) のせん断ひずみ (ϵ_x) に対する変化を示したものである。ここで、 μ はせん断応力と法線応力の比として定義される。すべてのケースにおいて、せん断初期には応力比が増加し、その後軟化挙動を示しながら徐々に安定状態へと収束する傾向が確認される。ゴムを含まない供試体は最も高いピーク応力比に到達するのに対し、ゴム粒子の混入によりピーク応力比は低下し、軟化挙動も緩やかになる。

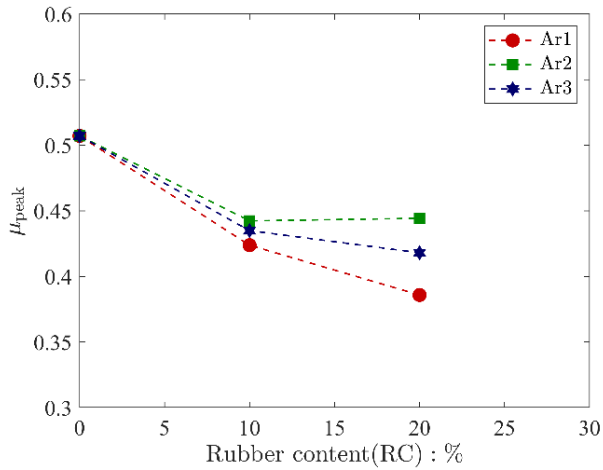
図4は、ゴム含有率 (RC) およびアスペクト比 (Ar) が砂-ゴム混合体のマクロ応答に及ぼす影響をまとめたものである。図4(a)に示すように、ピーク応力比 (μ_{peak}) は、すべてのアスペクト比において RC の増加とともに低下する傾向を示す。この低下は $Ar = 1$ の場合に最も顕著である。一方、 $Ar = 2$ および $Ar = 3$ においても同様の減少傾向が確認されるが、その低下率は比較的小さく、アスペクト比の増加がゴム混入による強度低下を緩和する効果を有することが示唆される。



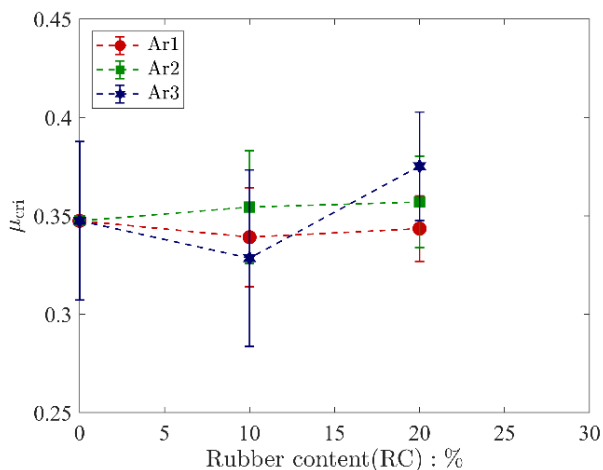


(b)

図3 Ar=3 の条件における砂-ゴム混合体のマクロ応答の変化：(a) せん断ひずみ ϵ_x に対する応力比 μ ，(b) せん断ひずみ ϵ_x に対する体積ひずみ ϵ_v



(a)



(b)

図4 砂-ゴム混合体のマクロ応答：(a) ゴム含有率 (RC) に対するピーク応力比 (μ_{peak})，(b) ゴム含有率 (RC) に対する臨界応力比 (μ_{cri})

これに対し、図 4(b)に示す臨界応力比 (μ_{cri}) は、ゴム含有率に対して比較的鈍感であることが分かる。すべてのアスペクト比において、 μ_{cri} はわずかな変動を伴うものの、おおよそ 0.33~0.38 の狭い範囲内に収まっている。エラーバーは、特に低いゴム含有率において一定のばらつきを示しているが、明確な系統的依存性は認められない。この結果は、ゴム粒子の混入がピーク強度には顕著な影響を及ぼす一方で、臨界状態における力学挙動には限定的な影響しか与えないことを示唆している。

図 5 は、異なるアスペクト比 (Ar) における臨界体積ひずみ ($\epsilon_{v,cri}$) とゴム含有率 (RC) との関係を示したものである。Ar = 1 の場合、 $\epsilon_{v,cri}$ は RC の増加に伴い顕著に減少しており、ゴム粒子の混入によってダイレイタンスが大きく抑制されることを示している。一方、Ar = 2 および Ar = 3 の供試体では非単調な挙動が観察され、RC = 10% においてわずかな増加を示した後、RC = 20% において顕著な減少を示す。この挙動は、ゴム粒子の含有率と粒子形状との間に競合的な作用が存在することに起因すると考えられる。以上の結果より、ゴム含有率の増加はピーク強度およびダイレイタンスの低下をもたらす一方で、より安定で延性的なせん断応答を促進することが明らかとなった。

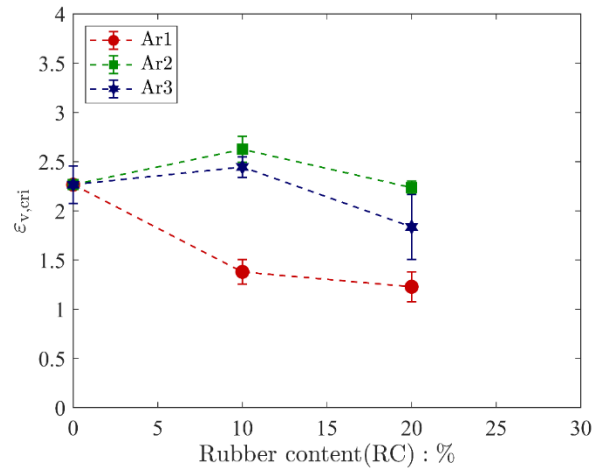


図5 砂-ゴム混合体のマクロ応答：ゴム含有率 (RC) に対する臨界応力比 $\epsilon_{v,cri}$

4. ミクロ応答

図 6 は、単純せん断終了時 ($\epsilon_x=50\%$) における砂-ゴム混合体の可視化結果を示したものであり、カラーバーは軟質粒子におけるフォン・ミーゼス応力場の大きさを表している。純砂の場合 (図 6(a)) と比較すると、ゴム粒子の含有率の増加に伴い、高応力領域の数および強度が増加する傾向が確認される。これは、荷重支持

構造がより分断化され、応力の局所化が進行していることを示している。

また、粒子形状の影響はアスペクト比が大きい場合において特に顕著である。Ar = 2.0 (図 6(c)) および Ar = 3.0 (図 6(d)) では、高応力領域がより細長く、かつ相互に連結したパターンを示し、鎖状構造を形成していることが分かる。Ar = 1.0 の場合と比較すると、Ar = 3.0 における応力ネットワークはより連続的かつ組織化された構造を示しており、幾何学的効果により荷重支持能力が部分的に回復していることが示唆される。

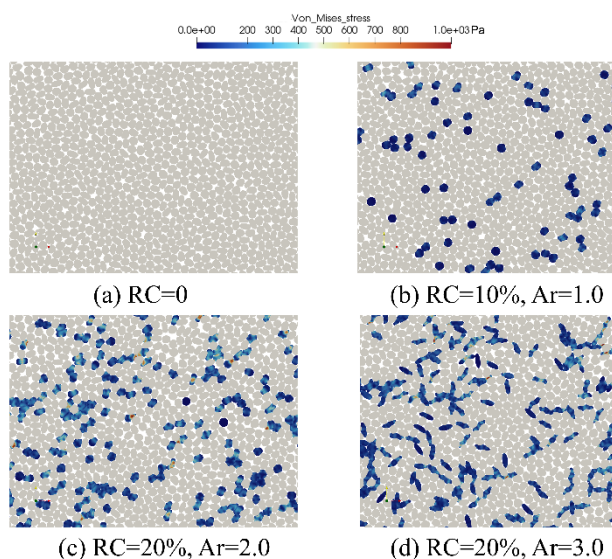


図 6 単純せん断終了時における砂—ゴム混合体の可視化結果 (カラーバーは軟質粒子の von-Mises 応力場の大きさを示す): (a) RC = 0, (b) RC = 10%, Ar = 1, (c) RC = 20%, Ar = 2, (d) RC = 20%, Ar = 3

図 7 は、砂—ゴム混合体における砂粒子の回転量 (θ) とせん断ひずみ (ϵ_x) の関係を示したものである。ここで、累積粒子回転量 (θ) は、すべての砂粒子の回転量の絶対値平均として定義される。図より、せん断の進行に伴い θ は全体として増加する傾向を示しており、せん断過程において粒子の再配列が継続的に生じていることが分かる。

さらに、図 8 はせん断終了時における粒子回転量 θ_{peak} とゴム含有率 (RC) との関係を示したものである。図より、ゴム粒子の混入は一般に砂粒子の回転を促進する傾向が確認される。特に、アスペクト比 (Ar) の大きいゴム粒子は、RC = 10% の条件において砂粒子の回転をより顕著に増加させる。一方で、RC = 20% の場合には同様の傾向は明確ではなく、ゴム粒子の含有率と形状との間により複雑な競合的相互作用が

存在することが示唆される。

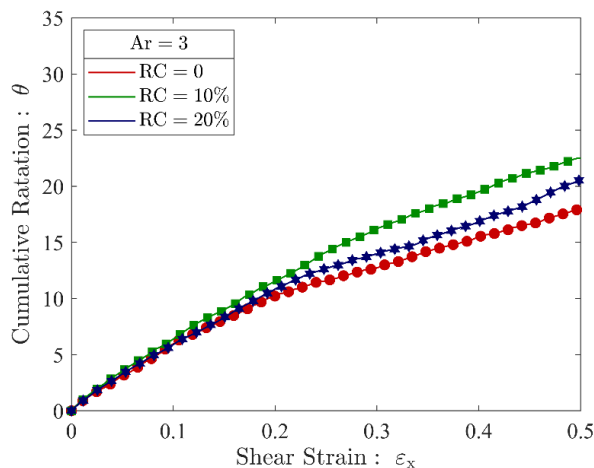


図 7 Ar = 3.0 の条件における砂—ゴム混合体中の砂粒子の回転量 (θ) とせん断ひずみ (ϵ_x) の関係

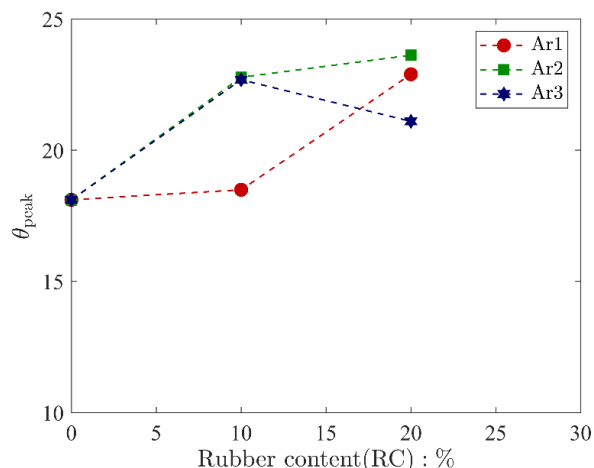


図 8 せん断終了時の粒子回転量 (θ_{peak}) とゴム含有率 (RC) との関係

図 9 は、Ar = 1 の条件における砂—ゴム混合体について、異なるゴム含有率 (RC) における配位数 (Z) とせん断ひずみ (ϵ_x) の関係を示したものである。せん断初期において、すべての供試体は比較的高い配位数を示し、その後せん断ひずみの増加に伴い顕著な低下が見られる。また、ゴム含有率の影響が明確に確認され、RC の増加に伴い、せん断過程全体を通じて配位数が系統的に増加する傾向を示す。この結果は、ゴム粒子の混入が接触ネットワークの連結性を向上させることを示唆している。

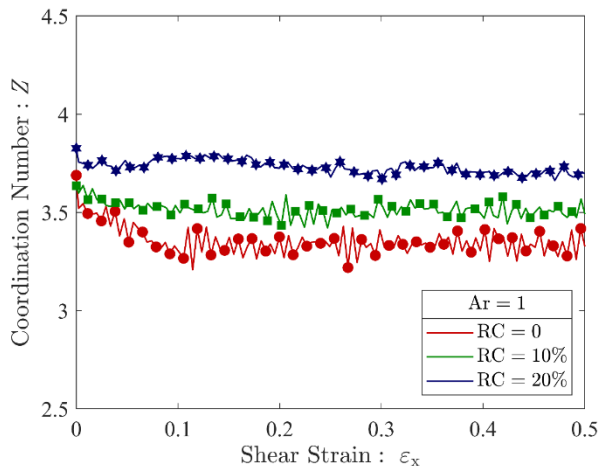


図9 Ar = 3.0 の条件における砂—ゴム混合体中の砂粒子の配位数 (Z) とせん断ひずみ (ϵ_x) の関係

図10は、異なるアスペクト比 (Ar) における臨界状態での配位数 (Z_{cri}) とゴム含有率 (RC) との関係を示したものである。すべてのアスペクト比において、 RC の増加に伴い Z_{cri} はほぼ線形に増加する傾向が確認され、ゴム粒子の混入が臨界状態における粒状体の連結性を系統的に向上させることが示される。また、同一の RC においては、 Ar の増加に伴い Z_{cri} はわずかに増加し、細長い粒子 ($Ar = 3$) が最も高い配位数を示す。

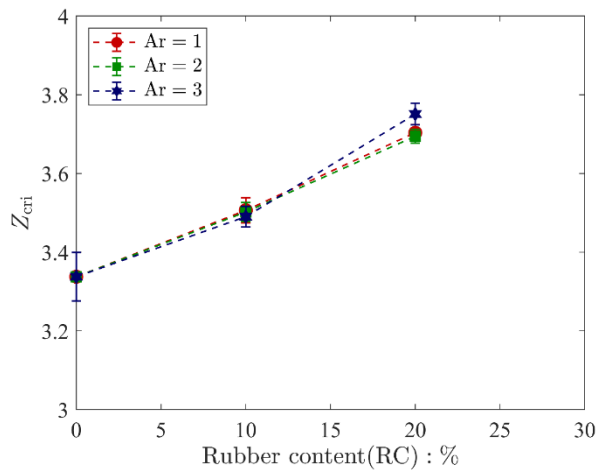
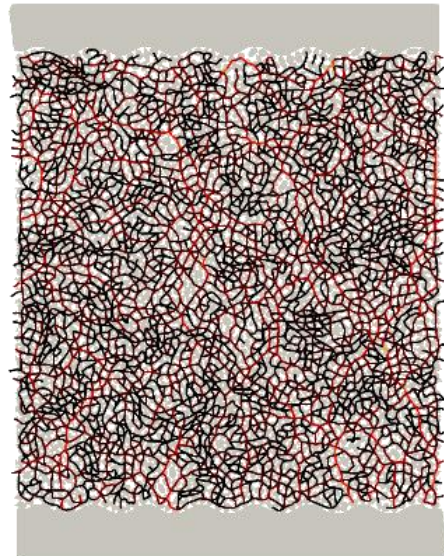


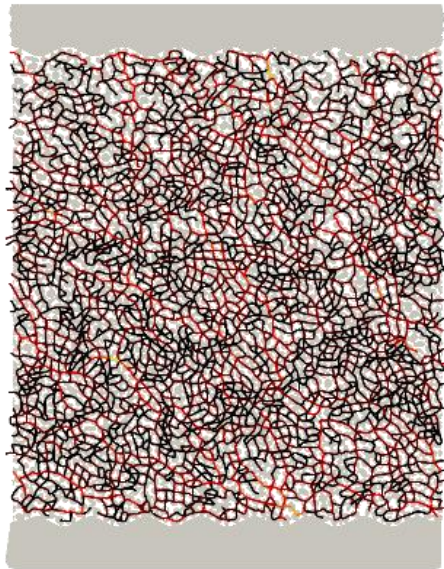
図10 臨界状態における配位数 (Z_{cri}) とゴム含有率 (RC) との関係

図11は、 $RC = 20\%$ 、 $Ar = 3.0$ の条件における砂—ゴム混合体の粒子間力鎖の可視化結果を、せん断前後で比較したものである。力鎖は接触力の大きさに応じて着色されており、より明るい色はより強い力の伝達を示す。せん断前 (図11(a)) では、力ネットワークは比較的均質かつ等方的であり、強い力鎖は明確な配向を持たず試料全体に分布している。一方、せん断後 (図

11(b)) では、力鎖構造は顕著な異方性を示し、強い力鎖が特定の方向に配向して連続的な荷重伝達経路を形成する様子が確認される。



(a)



(b)

図11 $RC = 20\%$ 、 $Ar = 3.0$ の条件における砂—ゴム混合体の粒子間力鎖の可視化：(a) せん断前、(b) せん断後

5. 結論

本研究では、砂—ゴム混合体を対象とした単純せん断試験の数値シミュレーションを実施し、主としてゴム含有率およびゴム粒子形状がせん断挙動に及ぼす影響について検討した。得られた結果に基づき、マクロおよびミクロの観点か

ら応答を分析した。本研究の主な結論を以下に示す。

1. ゴム含有率および粒子形状は、砂-ゴム混合体のせん断挙動に対して顕著な影響を及ぼすことが確認された。ゴム粒子の混入によりピークせん断応力は低下する一方で、臨界状態における応力には大きな変化は見られない。また、体積変化に関しては、一般にダイレイタンスが抑制される傾向を示す。

2. ミクロな観点では、ゴム粒子の存在により砂粒子の回転が促進される傾向が確認された。この挙動は、ゴム含有率と粒子形状との間に存在する競合的な相互作用に起因する可能性がある。

3. ゴム含有率の増加に伴い、配位数は全体として増加する傾向を示し、砂-ゴム混合体のミクロ構造における連結性が向上することが示された。

以上より、砂中にゴム粒子を混入することは、砂-ゴム混合体のせん断挙動を効果的に制御し、変形追従性やエネルギー吸収性能を向上させる有効な手法であることが示唆される。これにより、地震時や繰返し荷重下においても安定した力学応答を維持しやすく、外乱に対して損傷を抑制しながら機能を保持するレジリエントな動的応答を実現する地盤安定化材料としての高い適用可能性が期待される。

一方で、本研究ではゴム含有率および粒子形状の検討範囲が限定的であるため、今後はより広範かつ体系的な検討が必要である。特に、地震時のような動的条件下において、ゴム含有率および粒子形状の影響をより明確に評価することが期待される。さらに、接触力分布やファブリック異方性などのミクロ力学特性の発展過程を詳細に解析することで、ゴム含有率および粒子形状がマクロ応答に及ぼす影響をより深く理解できると考えられる。

6. 謝辞

本研究は、九州建設技術管理協会令和7年度「建設技術研究開発助成」(研究代表者：李洋)およびJSPS 科研費 26K17462 (研究代表者：李洋)の助成を受けたものです。ここに記して、感謝の意を表す。

7. 参考文献

1) Hazarika, H., Pasha, S. M. K., Ishibashi, I., Yoshimoto, N., Kinoshita, T., Endo, S., ... & Hitosugi, T. Tire-chip reinforced foundation as liquefaction countermeasure for residential

buildings. *Soils and Foundations*, Vol.60, No.2, pp.315-326, 2020.

- 2) 金子崇, 兵動正幸, 中田幸男, & 吉本憲正. タイヤチップおよびその砂との混合土の動的変形特性および地震応答特性. 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, pp.91-107, 2013.
- 3) Cheng, Z., Wang, J., & Li, W. The micro-mechanical behaviour of sand-rubber mixtures under shear: An experimental study based on X-ray micro-tomography. *Soils and Foundations*, Vol.60, No.5, pp.1251-1268, 2020.
- 4) Zhang, T., Cai, G., Liu, S., & Duan, W. Laboratory observation of engineering properties and deformation mechanisms of cemented rubber-sand mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol.120, pp.514-523, 2016.
- 5) Perez, J. L., Kwok, C. Y., & Senetakis, K. Effect of rubber size on the behaviour of sand-rubber mixtures: A numerical investigation. *Computers and Geotechnics*, Vol.80, pp.199-214, 2016.
- 6) Guo, N., Shi, Y., Hu, Z., & Yang, Z. Shear behaviour of sand-rubber mixtures: interpretation from energy transformation and force chain evolution. *Géotechnique*, Vol.75, No.1, pp.41-55, 2025.
- 7) Shi, Q., Liang, W., Jin, Y. F., Yin, Z. Y., & Chen, X. Numerical Investigation of Mechanical Response of Sand-Rubber Mixture by Material Point Method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.49, No.12, pp. 2783-2804, 2025.
- 8) Jiang, H., Guo, N., & Chen, F. Shearing rigid-soft granular mixtures: Intrinsic micro-meso signatures underlying critical-state strength. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 334, pp. 113997, 2026.
- 9) Mollon, G. A multibody meshfree strategy for the simulation of highly deformable granular materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.108, No.12, pp.1477-1497, 2016.
- 10) Cantor, D., Cárdenas-Barrantes, M., Preechawuttipong, I., Renouf, M., & Azéma, E. Compaction model for highly deformable particle assemblies. *Physical Review Letters*, Vol.124, No.20, pp.208003, 2020a
- 11) Cantor, D., Azéma, E., & Preechawuttipong, I.

Microstructural analysis of sheared
polydisperse polyhedral grains. Physical
Review E, Vol.101, No.6, pp.062901, 2020b.

受理日：令和 8 年 4 月 3 0 日