

バイオマス由来の高分子材料によって改良された中間土のせん断特性の把握

改良土 中間土 三軸圧縮試験

名古屋大学 国際会員 酒井 崇之 中野 正樹
名古屋大学 特別会員 ○竹田 菜都
名古屋大学 非会員 ジンチェンコ アナトーリ 王焯昊

1. はじめに

近年、土質改良の方法として、高分子材料の添加による方法も行われるようになった。例として、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故において、汚染土壌に対して選別補助剤として高分子材料が配合されたものが使用された¹⁾。高分子材料による改良については砂、シルト、粘土の改良効果の検討に関する研究が実施されていることが多い²⁾。しかし、実際の地盤構造物では、礫から粘性土まで含むようないわゆる中間土で造成されることがほとんどである。また、三軸圧縮試験を実施し詳細な力学特性を把握している研究は少なく、高分子材料により改良された土構造物がどのように変形し、どの程度沈下するかなどの性能照査のためには、力学挙動の把握が必要となる。以上のことから本報では、中間土として真砂土を対象に、バイオマス由来の高分子による改良を行い、非排水三軸圧縮試験結果によりせん断特性の把握を行った。

2. 実験試料について

図-1は使用した試料の粒径加積曲線を示す。均等係数 U_c は 39.3、曲率係数 $U_{c'}$ は 3.75 であった。なお、土粒子密度 ρ_s は 2.716g/cm^3 であった。図-2は締め固め曲線を示す。締め固め試験は A-b 法で実施した。最大乾燥密度 ρ_{dmax} は、 1.864g/cm^3 で、最適含水比 w_{opt} は 13.5% であった。

3. 高分子材料による改良機構

正電荷をもつ高分子であるポリカチオンと負電荷をもつ高分子であるポリアニオンを混合すると、両者の間に強い静電的な相互作用が働き、ポリイオンコンプレックス（以下 PIC）が形成する（図-3上）。土壌内では、PICの高分子はさらに土粒子と結合して、土壌を固定する（図-3下）。この際に、ポリアニオンやポリカチオンは、重金属イオンなどと安定な錯体を形成するために、処理土は、重金属処理に用いられてきた。なお、本研究では、ポリアニオンとして、セルロースを原料として得られるアニオン系水溶性高分子であるカルボキシメチルセルロース³⁾（以下 CMC）、ポリカチオンとして、甲殻類の甲羅、昆虫や軟体動物の殻などに含まれるキチンを脱アセチル化することにより得られる天然由来の高分子であるキトサン⁴⁾を用いた。これらの高分子材料は天然由来のものであり、環境への負荷が少ない特徴をもつ。図-4にそれぞれの写真を示す。

4. 試験ケースと供試体作製方法

表-1に試験ケースを示す。濃度 1% の CMC 水溶液と粉末のキトサンを所定の量、ビーカーに入れ、pH 調整剤として粉末の GDL を混ぜ、小型攪拌機にて 1000rpm で 5 分間攪拌した。そして、所定の量の真砂土と高分子材料を十分に混ぜ、ランマーの自由落下により高さ 10cm、内径 5cm のモールド高さの 3 分の 1 となるように締め固めた。この工程を 3 層分繰り返して、供試体の均質化を図り、設定密度に調整した。そして、ラップでモールドを密閉し、温度が 20 度の恒温室内の暗所で 1 週間養生した。

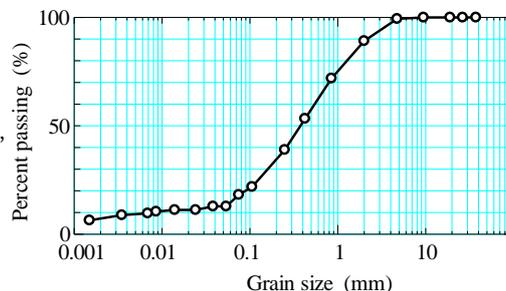


図-1 粒径加積曲線

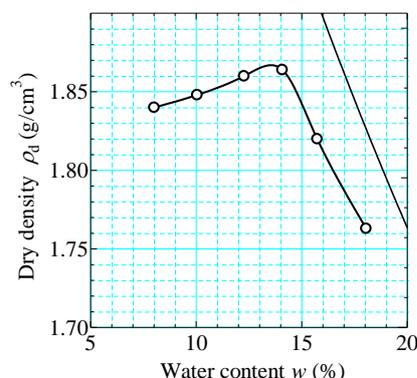


図-2 締め固め曲線

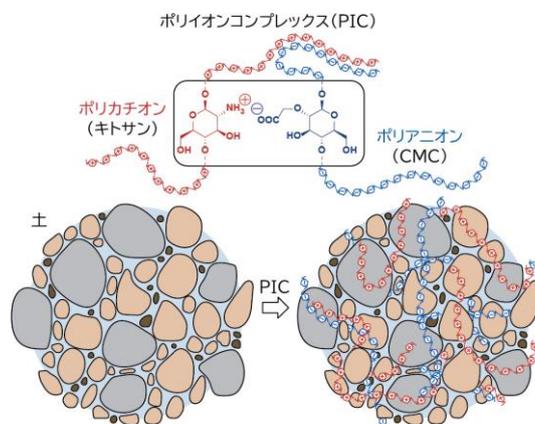


図-3 ポリイオンコンプレックス形成の概要図

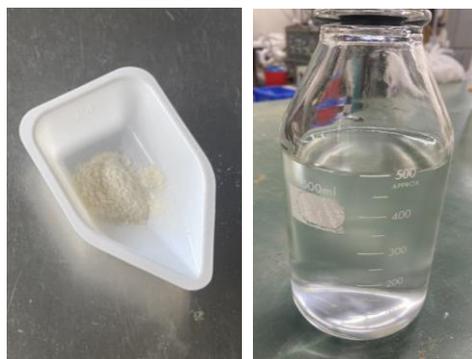


図-4 キトサン粉末（左）と CMC 溶液

表-1 実験ケース

ケース	キトサン : CMC	キトサン (g)	CMC (g)	含水比 (%)	締固め度 (%)
Case 1	-	-	-	15.6	90
Case 2	2:1	1.08	0.54	15.6	90
Case 3	1:1	0.54	0.54	15.6	90
Case 4	-	-	-	15.6	75
Case 5	2:1	0.87	0.435	15.6	75
Case 6	1:1	0.435	0.435	15.6	75
Case 7	2:1	1.74	0.87	31.2	75

三軸圧縮試験については、JGS0523-2009 に準拠して実施した。養生後の供試体をモールドから取り出し、供試体を三軸セルの中に設置後、飽和化を図るために二重負圧法を実施した。そして、有効拘束圧 $p' = 20\text{kPa}$ を維持しつつ背圧を 400kPa まで上昇させて、B 値が 95%以上であることを確認した後、有効拘束圧 $p' = 100\text{kPa}$ で体積ひずみが収束するまで等方圧密を実施した。そして体積ひずみが収束したことを確認した後、 0.014mm/min のせん断速度で非排水せん断を軸ひずみ 20%まで実施した。

5. 非排水三軸圧縮試験結果

図-5, 6 に非排水三軸圧縮試験の結果を示す。図-5 は $D_c=90\%$ で CMC の質量を一定でキトサンの質量を変えて行った実験結果、図-6 は $D_c=75\%$ で CMC の質量を一定でキトサンの質量を変えて行った実験結果である。図-5, 図-6 の q - ϵ_a 関係から分かるように、キトサンの量が多いほどひずみ硬化の程度が大きく、最終的な軸差応力 q が高い。これは、土粒子が負の電荷を持っているため、キトサンを多めに入れた方が電荷のバランスが良くなるためである。

図-5 の $D_c=90\%$ のケースでは、Case 1~3 を比較すると、いずれのケースも、せん断初期において p' の減少に伴う q の上昇、つまり塑性圧縮を伴う硬化挙動を示し、限界状態線に達した後に、 p' の増加に伴う q の上昇、つまり塑性膨張を伴う硬化挙動を示した。初期の塑性圧縮の程度は、高分子材料を混合した Case 2 や Case 3 は Case 1 に比べて小さく、限界状態線に達した後の硬化は、Case 1, Case 3, Case 2 の順に大きくなり、キトサン : CMC = 2:1 のケースが最も改良効果大きい。

図-6 の $D_c=75\%$ のケースにおいて Case 4~7 を比較する。未処理の Case 4 は、塑性圧縮を伴う硬化挙動を示し、その後、軸差応力 q が一定のままひずみが進展しており限界状態に達した。高分子で処理した Case 5 や Case 6 は、初期の塑性圧縮の程度が、Case 4 と比較して小さく、また、高分子量が多いほど小さくなった。また、高分子で処理した土は、せん断ひずみ 2%以降における塑性膨張を伴う硬化挙動を示しており、その程度は Case 5 が最も大きい。以上のことから、高分子で処理することにより、過圧密比が増大していくような挙動を呈することが明らかになった。Case 7 は Case 5 に比べて高分子を多く混合したのにも関わらず、初期の塑性圧縮挙動が顕著であった。また、Case 7 はひずみの伸展に伴い徐々に硬化していき、他のケースとは異なる挙動を示した。高分子の改良機構として、図-3 に示すような PIC を形成することが挙げられる。高分子の量を多くすることによってより多くの土粒子を巻き込みながら PIC を形成していることが予想される。すなわち、他のケースと比較してより団粒化している可能性が考えられ、より粒径が大きい土のような挙動を示したのではないかと予想している。これらは、試験後の供試体に対して粒度試験を実施するなどして確かめたい。

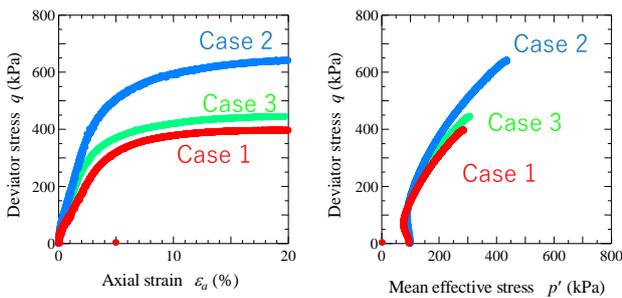


図-5 非排水三軸圧縮試験結果 (Case 1~3)

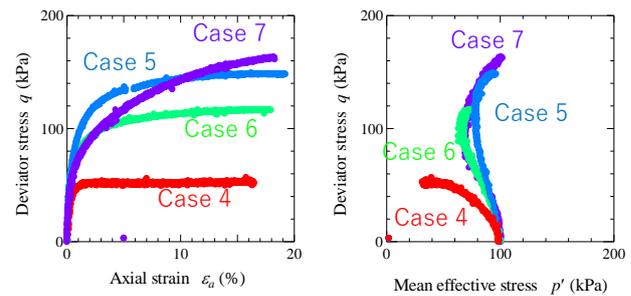


図-6 非排水三軸圧縮試験結果 (Case 4~7)

6. おわりに

本研究では、バイオマス由来の高分子材料を混合して締固めて作製した供試体に対し、三軸圧縮試験を実施した。その結果、締固め度の違いに依らず、高分子材料を混合することにより、軸差応力が増加することや、初期に塑性圧縮しづらくなるなど、改良した効果が得られた。また、キトサン : CMC の比としては、キトサンを多く混合した方が良いことも明らかになったが、締固め度ごとに応じた最適な混合比や、それを調べる手法などは確立できていないため、今後の課題としたい。

参考文献：1) 田中真弓, 大橋麻衣子, 河合達司, 小澤一喜：除去土壌(中間貯蔵施設)を対象とした選別補助剤の開発とその展開 (2018), 鹿島技術研究所年報第 66 号. 2) Fatahi, H., Ong, D., Yu, J. and Chang, I. Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review, Geosciences, 11(7), 291, 2021. 3) 千田壽一 (1985) : カルボキシルメチルセルロース, 有機合成化学協会誌, Vol.43, pp.382-383.4) 相羽誠一 (2007) : キチン, キトサン由来高分子材料, 材料, Vol.56, No.11, pp.1087-1092.