

ゴム繊維くずを有効利用した高靱性人工地盤材料の開発

香川高等専門学校建設環境工学科 教授 荒牧憲隆

1. はじめに

近年の気候変動に起因する豪雨と洪水によって土構造物の被害が頻発しており、ため池堤体などの土構造物において耐震および豪雨対策の総合的な強化が進められている¹⁾。しかし、ため池は、住宅地や道路など近接している場合も多く、簡便で効率的な補強技術、経済的かつ迅速な耐災補強工法の開発の検討が重要な課題となっている。一方で、ため池では、定期的に泥土を浚渫する必要がある。この泥土を処分することなく、有効利用方法についても実用化が進められ、ため池本来の機能確保が環境的側面からも実施されている。このような状況を踏まえ、ため池などの土構造物の機能向上を環境的かつ効率的に図るために、材料面および環境面から豪雨・洪水対策を同時に解決できる総合的な技術的取り組みを行うことが重要となる。

本研究では、近年問題となっている老朽化したため池の地震や豪雨への高耐久化対策において、環境に配慮した土構造物補強技術の開発を目指すものである。この中で、本研究課題では、建設発生土、産業廃棄物あるいは低利用資源を選択し有効利用することで、要素試験を中心とした力学特性を検討し、多様な材料の高付加価値化を図る高靱性人工地盤材料の開発することを目的としている。

2. 研究の方針

申請者は、これまで、廃棄物や建設発生土の地盤工学的有効利用に関する検討等に取り組んできた。この中で、現在、地域企業からの相談を受け、古紙や再生プラスチックなどのリサイクル資源を用いた短繊維補強土技術について検討を行ってきた²⁾。土構造物の補強土工法に関する技術は、近年盛んに研究が行われている。この技術において、繊維材と固化材を用いた補強土工法は研究実績もあり、実用化も進められている。しかし、その中で用いられる繊維材は、既製品の繊維材料が中心である。

本研究では、高靱性人工地盤材料の開発を目的としているが、地盤材料の高靱性化を検討するに当たり、ゴム繊維くずの利用を試みる。このゴム繊維くずは、廃タイヤをチップ化にするときに排出される産業廃棄物である。この廃タイヤなどから製造されたゴムチップの有効利用は、地盤材料³⁾やコンクリート⁴⁾への適用が試みられ、ある一定の成果が得られている。しかし、廃タイヤの有効利用に当たって、再度、繊維状の廃棄物が排出されることはあまり知られておらず、その有効利用までは検討されていない。ゴムの特徴として、柔軟性、復元性があり軽量であることから、チップ上で地盤材料へ適用性については有用性が確認されているが、繊維状になったときの人工地盤材料の力学特性については未解明であり、明らかにする必要がある。

本研究での検討内容は以下に示すとおりです。まず高靱性人工地盤材料の開発にあたって、土質材料には、カオリン粘土や珪砂を利用する。リサイクル繊維資源として、廃タイヤからゴムチップ製造時に排出されるゴム繊維くずを利用する。

まず、粘性土軟弱地盤の地盤改良工法や高含水比の泥土の有効利用を念頭に置き、室内試験から補強材として、ゴム繊維くずの有効利用の可能性について検討する。材料特性は、一軸圧縮試験および標準圧密試験より、粘性土から構成される人工地盤材料の静的力学特性を明らかにする。それぞれの試験において、以下の点に着目し、実施する。

試験前には、粘土もしくはゴム繊維混合土供試体を、予圧密装置にて 100kN/m^2 の予圧密を行う。

①標準圧密試験

- ・圧縮特性の検討
- ・圧縮・除荷による復元力の検討

次に、緩い砂地盤での液状化対策工法を念頭に置き、室内試験から補強材として、ゴム繊維くずの有効利用の可能性について検討する。材料特性は、②非排水三軸圧縮試験および③非排水繰返し三軸試験より、砂質土と混合した人工地盤材料の静的および動的力学特性を明らかにする。加えて、④上向き鉛直浸透流に対する浸透破壊試験も実施した。

②三軸圧縮試験

供試体の作製は、ウェットタンピング法にて行う。

- ・ゴム繊維混合土の非排水静的せん断特性の把握

③非排水繰返し三軸試験

供試体の作製は、②と同じ。

- ・繰返し荷重を受けるゴム繊維混合土の過剰間隙水圧、変形特性の把握
- ・ゴム繊維混合土の液状化強度特性

④上向き鉛直浸透流に対する浸透破壊試験

- ・ゴム繊維混合土のパイピングやボイリングに対する抵抗性の把握

最後に、これらを取りまとめ、総合的な評価を行い、ゴム繊維くずの地盤材料への有効利用の適否について評価する

3. 研究結果

3.1 実験に用いた試料

本研究で使用するゴム繊維材は、本来、コンクリートにおける細骨材の代替材、もしくは地盤材料への混合材として利用する廃タイヤをゴムチップ化した時に生成された副産物である。そのため、ゴムチップ同様、軽量な材料となっている。それぞれの粒子密度は、ともに 1.208Mg/m^3 になっている。ゴム繊維およびゴムチップの外観を、写真-1 に示す。

圧密試験や一軸圧縮試験で使用する土質試料は NSF カオリン(2.725Mg/m^3)であり、細粒分を主とした粘性土ある。非排水三軸圧縮試験および非排水繰返し三軸試験で使用する土質材料は、豊浦砂(2.653Mg/m^3)である。豊浦砂は、不純物が少なく、粒度は均質である。NSF カオリン、豊浦砂、ゴムチップの粒径加積曲線を図-1 示す。使用したゴムチップは、砂質土の粒度で、粒径 2mm 以上の礫分が 38% 含有されているのが特徴的である。

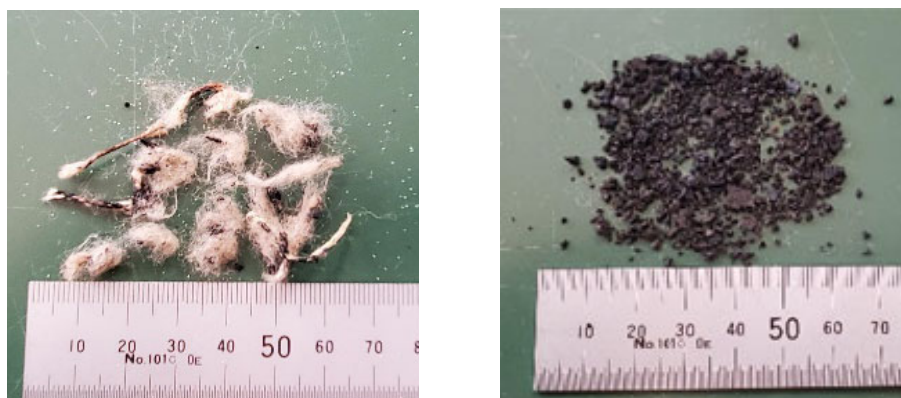


写真-1 ゴム繊維(左)とゴムチップ(右)

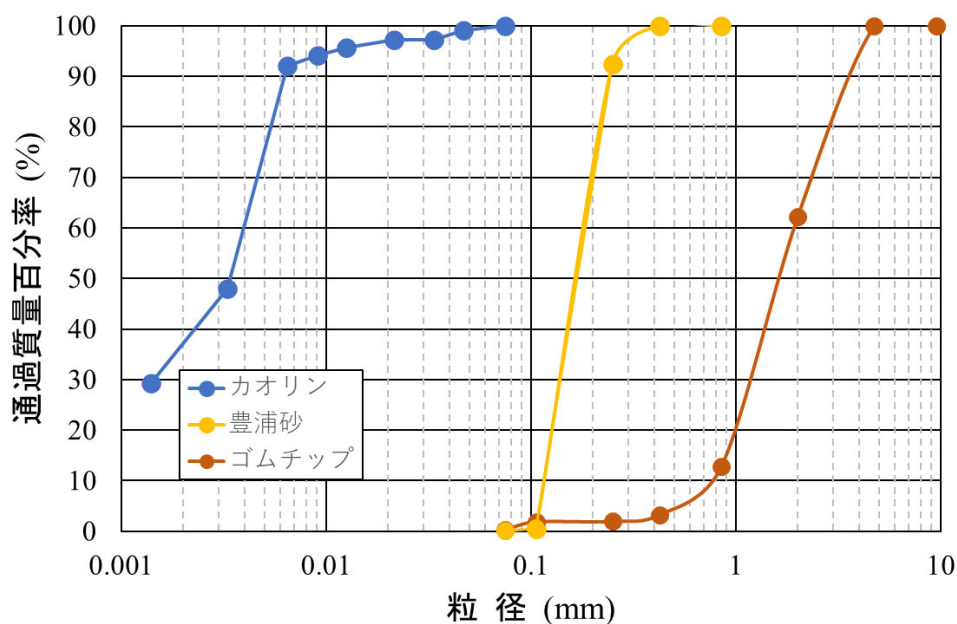


図-1 本研究で使用した材料の粒径加積曲線

3.2 本研究で行った実験方法および条件

3.2.1 ゴム繊維混合粘性土

(1) 圧密試験

実験に使用した材料は、NSF カオリン単体の無補強土、NSF カオリンの乾燥質量に対してゴムチップ混合率を 10%，ゴム繊維混合率を 1.5%混合した 3 種類を対象とした。それぞれの供試体は、軟弱地盤を想定して、カオリンの乾燥質量をベースに含水比を 96%（液性限界の 1.5 倍）で初期状態として固定し、作製した。それぞれ圧密試験前に、予圧密装置（直径 100mm×高さ 300mm）にて 2 日間 100kN/m^2 で圧密させた。これにより、供試体は応力履歴を受けた状態となる。圧密後、試料を取り出し、直径 60mm×高さ 20mm の供試体を作製し、圧密試験を行う。

圧密試験は、標準的な方法で行うケースと、載荷・除荷工程を複数回行う 2 ケースについて実施した。後者の載荷・除荷工程は、10, 20, 40, 80, 40, 10, 40, 80, 160, 320, 160, 10, 160, 320, 640, 1280, 640, 10kN/m^2 とした。各圧密圧力段階で 24 時間圧密している。

(2) 一軸圧縮試験

実験に使用した材料、ゴムチップやゴム繊維材の混合率、供試体作製方法は、(1)と同様である。供試体は、直径 50mm×高さ 100mm である。一軸圧縮試験は、軸ひずみ速度 $1.0\%/min$ を標準として、連続的に供試体を圧縮する。

3.2.2 ゴム繊維混合砂質土

(1) 圧密非排水三軸圧縮試験 (CU 試験)

実験に使用した材料は、豊浦差のみの無補強土、豊浦砂の乾燥質量に対してゴムチップ混合率を 5%，ゴム繊維混合率を 5%混合した 3 種類を対象とした。それぞれの供試体は、豊浦砂の相対密度 $D_r=40\%$ を基準とし、ウェットタンピング法により作製した。供試体は、直径 50mm×高さ 100mm である。供試体作製時、豊浦砂の初期含水比は 5%程度とした。CU 試験は、供試体を脱気水で通水後、B 値 0.96 以上を確認し、供試体の飽和化を図る。その後、拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ で圧密を行う。圧密終了後、非排水条件で軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ を標準として、連続的に供試体を圧縮する。試験は軸ひずみ 15%を超えた時点で終了する。

(2) 非排水繰返し三軸試験

実験に使用した材料、ゴムチップやゴム繊維材の混合率、供試体作製方法は、(1)と同様である。拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ であり、圧密終了後、周波数 0.05Hz の正弦波を加えて行った。試験は、軸ひずみ両振幅 DA が 5% を超えた時点で終了する。

(3) 上向き鉛直浸透流における浸透破壊試験

実験に使用した材料は、豊浦差のみの無補強土、豊浦砂の乾燥質量に対してゴム繊維混合率を 5% 混合した 2 種類を対象とした。それぞれの供試体は、豊浦砂の相対密度 $Dr=40\%$ を基準とし、ウェットタンピング法により作製した。供試体は、直径 $100\text{mm} \times$ 高さ 100mm である。供試体作製時、豊浦砂の初期含水比は 5% 程度とした。試験装置（写真-2 参照）は供試体へ水道水を供給する貯水槽、供試体へ通水する浸透破壊試験装置モールドから構成される。供試体下部への流量と水圧を測定するため流量計を貯水槽とモールド間に設置した。本試験は、貯水槽を段階的に上昇させることにより、貯水槽と供試体上部との動水勾配を段階的に増加させ、浸透破壊の発生に伴い急激に流量が増加する時の動水勾配を測定する試験である。実験終了時に、表層部の土粒子の上下動、噴砂現象の変化を目視より観察した。



写真-2 浸透破壊試験装置の概観

3.3 検討結果および考察

3.3.1 ゴム繊維混合粘性土

繰返し載荷・除荷での圧密試験より、図-2 に NSF カオリンの、図-3 にゴム繊維混合粘性土の $e - \log p$ 曲線を示す。

図-2 より、NSF カオリンのみの場合、最初の除荷点となる圧密圧力 80kN/m^2 まで、間隙比の著しい減少は認められなかった。これは、圧密降伏応力となる予圧密圧力 100kN/m^2 以下で、弾性的な挙動を示すためであると考えられる。その後、圧密圧力 10kN/m^2 まで除荷を行うが、間隙比は初期状態まで回復することはなかった。そして、圧密圧力 320kN/m^2 まで再載荷において、圧密圧力の増加に伴い、間隙比が著しく低下している。この間隙比の低下率は、初期の圧密圧力 80kN/m^2 までの間隙比の減少率よりも大きい。これは、予圧密圧力 100kN/m^2 を超えた圧密圧力で載荷したため、カオリンが塑性的な挙動を示したためと推察される。圧密圧力 320kN/m^2 で、再度、除荷を行うが、間隙比が回復することはほとんど認められなかった。さらに、再載荷を圧密圧力 1280kN/m^2 まで行ったところ、圧密圧力 320kN/m^2 以降、間隙比は著しく低下する。また、前段階の除荷後の間隙比減少率、すなわち圧縮指数は同程度であることが分かる。最後に、圧密圧力 1280kN/m^2 で除荷を行った場

合、圧密圧力 80kN/m^2 、圧密圧力 320kN/m^2 での除荷時と比較して、間隙比の増加すなわち体積膨張は、大きかった。

図-4 より、ゴム繊維 10%混合粘性土において、最初の除荷点となる圧密圧力 80kN/m^2 まで、間隙比は、ほぼ同じ割合で低下している様子が認められる。その後、圧密圧力 10kN/m^2 まで除荷すると、間隙比は回復することはなかったが、わずかに増加した。また、このケースでは予圧密圧力 100kN/m^2 を載荷しているにもかかわらず、NSF カオリンのケースとは異なり、明確な圧密降伏応力は確認できなかった。これは、ゴムチップの弾性力の影響だと考えられる。圧密圧力 1280kN/m^2 までの載荷過程で間隙比は、指数関数的に減少している。圧密圧力 320kN/m^2 で、再度除荷を行うと、間隙比の増加が認められた。最後に、圧密圧力 1280kN/m^2 で除荷を行った場合、圧密圧力 320kN/m^2 での除荷時と比較して、同程度の接線勾配すなわち体積膨張は同程度である。この $e - \log p$ 曲線において、全載荷過程の接線勾配は初期の圧密圧力からほぼ同じである。また、ゴムの混合状態が繊維状であっても、チップ状の場合と同様に除荷時には体積の膨張傾向が認められた。

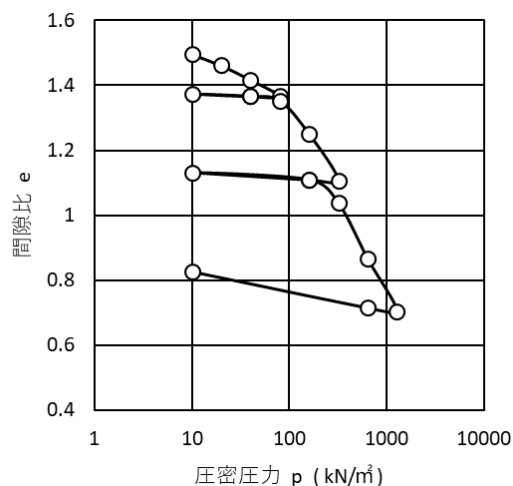
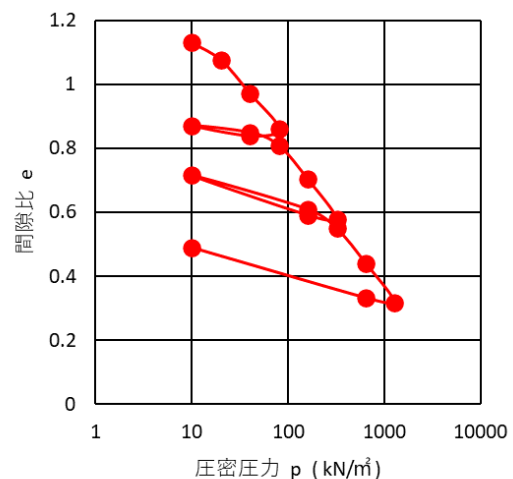
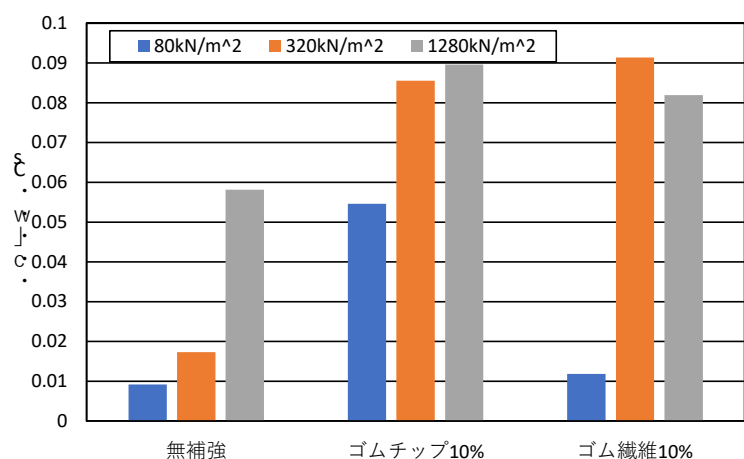
図-2 カオリンの $e - \log p$ 曲線図-3 ゴム繊維混合土の $e - \log p$ 曲線

図-4 に、各材料における圧密試験の除荷時の膨張指数 C_s をまとめた。NSF カオリンの場合、除荷開始時の圧密圧力が増加すると、膨張指数も増加している。ゴムチップ 10% 混合粘性土において、除荷開始時の圧密圧力 80kN/m^2 での膨張指数は、他の 2 試料に比べ、最も高い。除荷開始時の圧密圧力が増加すると、膨張指数も増加しているが、除荷開始時の圧密圧力 320kN/m^2 と

1280kN/m^2 では大きな差が認められなかった。ゴム繊維 10%混合粘土では、除荷開始時の圧密圧力 80kN/m^2 での膨張指数は、NSF カオリンの膨張指数と同程度で、圧密圧力 320kN/m^2 と 1280kN/m^2

図-4 各土質材料の膨張指数 C_s

の除荷時の膨張指数は、ゴムチップ 10%混合粘性土の膨張指数と近似した値となった。ゴム繊維 10%混合粘土の圧密特性は、低圧密領域では NSF カオリンと、高圧密応力域ではゴムチップ 10%混合粘性土と類似した挙動を示す。ゴムの弾性力により、復元力が大きくなったため、膨張指数が大きくなったと考えられる。ゴム繊維およびゴムチップを混合すると、無補強と比較して復元力が働き、膨張効果が得られることが分かった。

3.3.2 ゴム繊維混合砂質土

(1) 圧密非排水圧三軸圧縮試験 (CU試験)

まず、相対密度 $Dr=40\%$ の豊浦砂とゴム繊維混合砂質土について、CU試験より得られた軸差応力・軸ひずみ関係について述べる。図-6 に軸差応力・軸ひずみ関係を示した。相対密度 $Dr=40\%$ の豊浦砂では、载荷初期より軸ひずみの発達に伴い軸差応力も徐々に様子が認められる。これに対し、ゴム繊維混合砂質土では、ある軸差応力に達するまで軸ひずみがほとんど生じておらず、その後、軸差応力の増加とともに軸ひずみが大きく発達している様子が認められる。軸ひずみ 1~3%の発生領域では、豊浦砂、ゴム繊維混合砂質土ともに、せん断挙動は類似した傾向を示すが、ゴム繊維混合砂質土では、その後、豊浦砂と比較して、軸差応力の増加率が大きいことが分かる。両者ともに明確な軸差応力のピークは認められないが、ゴム繊維混合砂質土の軸ひずみ 15%時の軸差応力は、豊浦砂の軸差応力の 1.4 倍程度となっている。

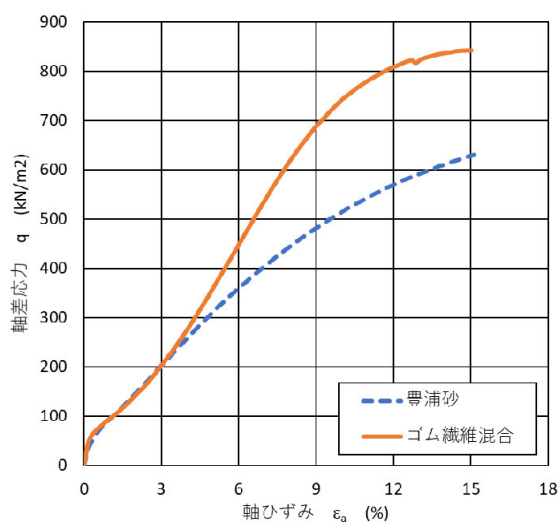


図-6 CU試験より得られた軸差応力・軸ひずみ関係

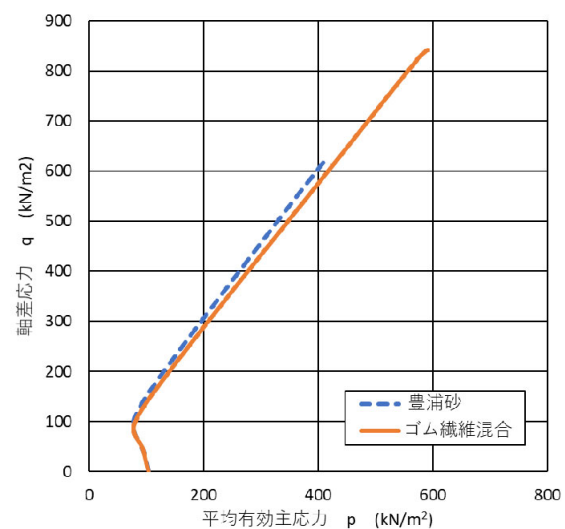


図-7 CU試験より得られた有効応力経路

次に、CU試験より得られたそれぞれの土試料の有効応力経路について、図-7 に示した。豊浦砂では、せん断初期において、有効応力が減少し、収縮的な挙動を示している様子が認められる。その後、有効応力は、ある特定の値で減少から増加に転じている。この有効応力が減少から増加に転じる点は、豊浦砂が収縮傾向から膨張傾向へ移行する変曲点であり、変相点と呼ばれる。有効応力が膨張傾向へと移行すると、有効応力は、初期拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ より大きな値まで回復し、膨張性の挙動を示している。ゴム繊維混合砂質土においても、同様な非排水せん断挙動を示している。変相点の軸差応力、平均有効主応力もほぼ同じである。しかし、有効応力は、大きな値まで回復し、豊浦砂のケースよりも、顕著な膨張性の挙動が認められる。これらのことから、砂質土にゴムチップを混合することで、靱性が発揮され、供試体は粘り強さがより増すことが分かった。

(2) 非排水繰返し三軸試験

豊浦砂，ゴムチップ混合砂質土，ゴム繊維混合砂質土について，非排水繰返し三軸試験より得られた過剰間隙水圧比，軸ひずみ両振幅の変化について示す。図-8 には，それぞれの試料の過剰間隙水圧比と繰返し回数（回）の関係を示している。なお，ここでは，試料間の比較のため，類似した繰返し応力振幅比 $0.220 \sim 0.235$ を適用した結果となっている。最初に，過剰間隙水圧比 $u/\sigma'_e = 1.0$ 付近に到達する，すなわち液状化が発生する繰返し回数は，ゴムチップ混合砂質土，豊浦砂，ゴム繊維混合砂質土の順で，増加していることが認められる。繰返し回数 1 回目に着目すると，豊浦砂とゴムチップ混合砂質土は，過剰間隙水圧比 $u/\sigma'_e = 0.2$ 程度であるのに対し，ゴムチップ混合砂質土では $u/\sigma'_e = 0.4$ と大きくなっている。豊浦砂では，繰返し回数 3 回以降，過剰間隙水圧の増加率が大きくなり液状化に至っている。一方，ゴム繊維混合砂質土では，過剰間隙水圧の増加率は，他の試料と比較して小さく，過剰間隙水圧の発生を抑制している様子が認められる。次に，図-9 には，それぞれの試料の軸ひずみ両振幅 DA と繰返し回数（回）の関係を示している。どの試料も，ある特定の繰返し回数に達するまで，軸ひずみ両振幅はあまり発生していない。豊浦砂とゴムチップ混合砂質土では，その後，急激に軸ひずみ両振幅が増加し，液状化に至っている。ゴムチップ混合砂質土では，繰返し回数 20 回程度まで，軸ひずみ両振幅は緩やかに増加し，その後，他の試料と比較して，軸ひずみ両振幅の増加率は小さく，徐々に増加している様子が認められる。ゴム繊維の混合することで，ゴム繊維と砂粒子との摩擦や絡み合いのより，繰返し载荷に対し，間隙水圧やひずみの発生を抑制しており，繊維の靱性を発揮した粘り強い改良効果が発揮されている。

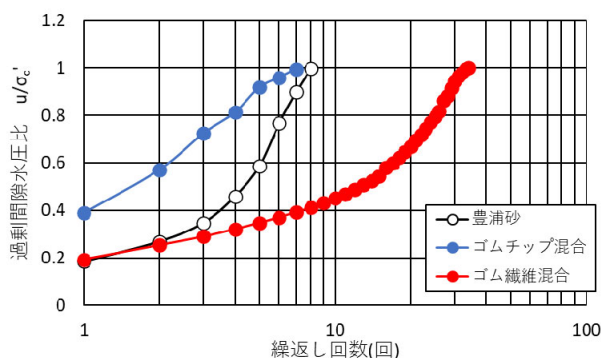


図-8 過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係

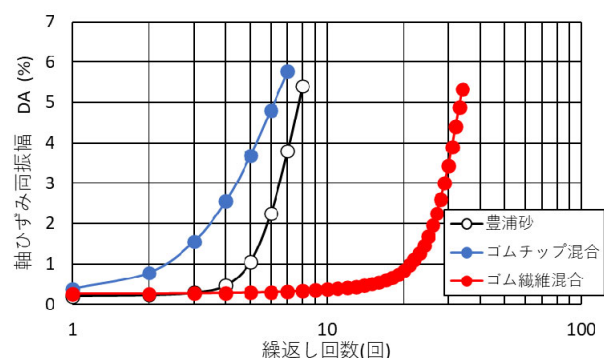


図-9 軸ひずみ両振幅と繰返し回数の関係

図-10 には，豊浦砂ならびにゴムチップ混合砂質土の液状化強度曲線を示した。ゴム繊維混合砂質土の液状化強度曲線が上方に位置しており，液状化抵抗が，豊浦砂に比べ高いことが分かる。ゴムチップ混合砂質土は，ゴム繊維混合土が繰返し回数 20 回程度で液状化する時の応力比 0.239 と同等な繰返し応力比 0.235 で繰返し回数が 8 回であった。ゴムチップ混合土は豊浦砂のみと大きな差は見られなかった。ゴム繊維を混合すると液状化が起こりにくいことが確認できた。

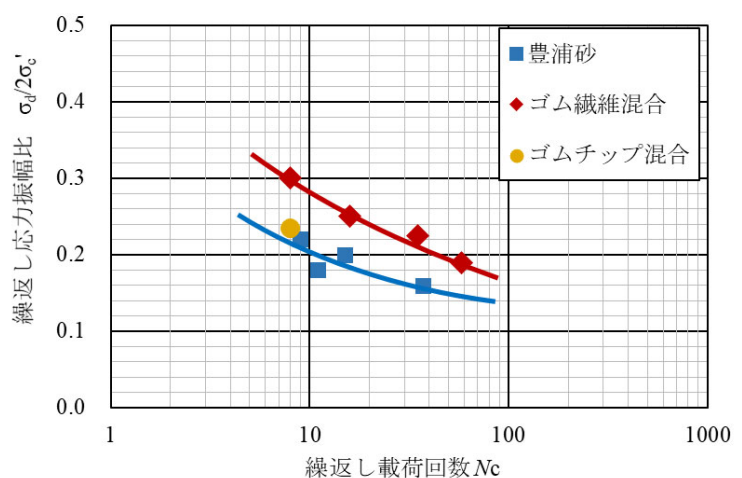


図-10 液状化強度曲線

砂と廃ゴム繊維材との摩擦・付着または絡み合いによって液状化抵抗が増加したと考えられる。ゴム繊維の混合により抑制効果があることが認められた。

(3)鉛直浸透流による浸透破壊試験

豊浦砂，ゴム繊維混合砂質土について，鉛直浸透流による浸透破壊試験より得られた流量と動水勾配の関係について図-10 に示す。豊浦砂の場合，動水勾配が $i=0.8$ までは，時間当たりの流量は非常に少ない様子が認められる。動水勾配が $i=0.9\sim1.0$ の間で流量が急激に増加していることから，ボイリングもしくはパイピングが発生し，供試体は浸透破壊が発生したと考えられる。なお，浸透破壊発生後も流量は増加する傾向が確認された。ゴム繊維混合砂質土の場合，豊浦砂が浸透破壊を発生する動水勾配 $i=0.8\sim1.0$ でも流量は非常に少ない。また，この傾向は，動水勾配 $i=1.7$ まで継続する。その後，動水勾配 $i=1.7\sim2.0$ の間で，流量が急激に増加したことからボイリングもしくはパイピングが発生したと考えられる。浸透破壊後も流量は増加し続けている様子が認められる。

供試体の浸透破壊の発生に伴い急激に流量が増加した際の動水勾配を i_f とすると，豊浦砂では $i_f = 0.8$ ，ゴム繊維混合砂質土では $i_f = 1.7$ となる。このことから，ゴム繊維を混合することで浸透破壊抵抗性として無補強時に比べると 112.5%増加したことになる。ゴム繊維を混合すると，土粒子が遊離する状態になりにくくなるため，浸透破壊に対する粘り強さが発揮されたと推察される。

3.4 まとめ

本研究より得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 軽量のゴム繊維を土に混合することで，軽量の人工地盤材料の作製が期待できる。
- 2) 圧密試験の結果より，ゴム繊維や，ゴムチップを混合させると沈下抑制効果や膨張効果が確認できた。
- 3) 非排水繰返し三軸試験の結果より，砂質土にゴム繊維を混合させると，過剰間隙水圧ならびに変形の発生抑制効果があることが明らかになり，液状化強度も補強効果が確認できた。
- 4) 鉛直浸透流の浸透破壊試験の結果より，ゴム繊維を混合させると耐浸透破壊性が向上することが明らかとなった。
- 5) 粘性土，砂質土にゴム繊維を混合することで，ゴムの材料特性である弾性力と，繊維材としての靱性が向上する補強効果が確認された。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた 豪雨地盤災害に対する地盤工学の課題 - 地盤工学からの提言-，pp.77～119，2019.
- 2) 例えば，荒牧憲隆，新川裕也，平田佐介，Batmunkh Enkh Orgil：繊維系廃棄物を有効活用した短繊維混合補強土の力学特性と耐浸食性に関する実験的研究，ジオシンセティックス論文集，pp.39-46，2022.
- 3) 例えば，御手洗義夫，安原一哉，菊池喜昭，Ashoke Kumar KARMOKAR：古タイヤゴムチップを固化処理土に混合した新しい地盤材料の開発と力学的特性，土木学会論文集C，63 巻，3 号，pp. 881-900，2007.
- 4) 例えば，若林学，丸山武彦：コンクリート分野における廃タイヤの再利用に関する研究，コンクリート工学論文集，2004，15 巻，3 号，pp.39-45，2012.

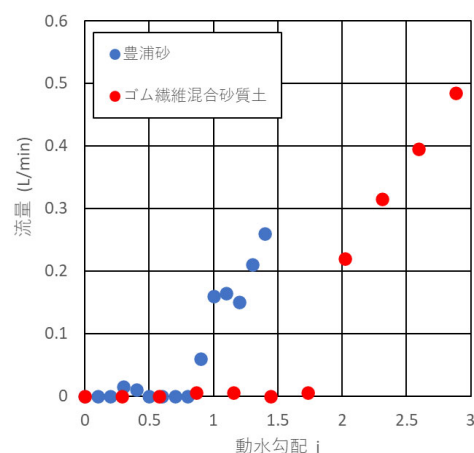


図-10 浸透破壊試験より得られた流量と動水勾配の関係