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

御手洗 義夫¹・安原 一哉²・菊池 喜昭³・Ashoke K.Karmokar⁴

¹正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)
E-mail: y_mitarai@toa-const.co.jp

²正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒315-8511 日立市中成沢町4-12-1)
E-mail: yasuhara@mx.ibaraki.ac.jp

³正会員 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部基礎工研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: kikuchi@pari.go.jp

⁴正会員 株式会社ブリヂストン 中央研究所 (〒187-8531 東京都小平市小川東町3-1-1)
E-mail: karmokar.ashoke@bridgestone.co.jp

軟弱な浚渫土砂や建設発生土の有効利用方法のひとつとして、セメントなどによる固化処理工法がある。固化処理土は、その圧縮試験における応力～ひずみ関係が、一般的な粘性土などと比較して小さなひずみでピーク強度を示し、その後急激な強度低下を示す脆性的なものである。筆者らは固化処理土に古タイヤを原料としたゴムチップを混合した複合材料の室内力学試験を実施し、固化処理土の靱性（ねばり強さ）が向上する効果があることを見出した。本論文では主に一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を行った結果から、固化処理土に古タイヤゴムチップを混合することによる基本的な力学特性に与える影響を明らかにするとともに、そのメカニズムの推測を行った。

Key Words: scrap tire, tire chips, cement treated soil, composite material, toughness

1. はじめに

わが国では現在、循環型社会の構築に向けて様々な取り組みが行われている。法制度の面では、平成12年に「循環型社会形成推進基本法」（循環基本法）が制定され、平成13年1月から完全施行された。このに伴い平成13年から、“廃棄物の適正処理”という側面に対しては「廃棄物処理法」が、“リサイクルの促進”という側面に対しては「資源有効利用促進法」が、それぞれ改正施行または完全施行された。

建設業界でも、平成14年5月に建設工事に關わる資材の再資源化等に関する法律、「建設リサイクル法」が施行された。現在では、建設工事に伴って排出される各種の建設発生木材の発生抑制とリサイクルに対する取り組みが行われている。その一方、他産業からの廃棄物再生資材の地盤材料としての適用に関しても盛んに研究開発が行われており、最近の「土と基礎」や他の土木系月刊誌などでも特集が

組まれている^{1), 2)}。

筆者らは、建設残土や浚渫土砂の再利用とともに、使用済みタイヤを裁断・粉碎して作製した古タイヤゴムチップ（以下、タイヤチップ）の地盤材料としての有効利用に関する研究を進めてきた。

本研究では、古タイヤゴムチップの物性を述べるとともに、主にタイヤチップを固化処理土に混合した際に得られる靱性（粘り強さ）の向上効果に着目して各種の室内力学試験を行った。本論文ではそれらの結果から、本材料の基本的な力学特性を明らかにするとともに、固化処理土にタイヤチップを混合することによる靱性改善効果を定量的に評価し、そのメカニズムの推測を行った結果を示すものである。

2. タイヤのリサイクル状況と基本的物性

(1) わが国の古タイヤリサイクル状況^{3), 4)}

現在のわが国の自動車タイヤ生産量は、約120万

図-1 わが国における古タイヤリサイクル状況(2003年)

図-3 タイヤの組成

写真-1 古タイヤゴムチップ
(平均粒子寸法 2mm)

図-2 米国における古タイヤのリサイクル状況

トン(約1億8千万本)であり、タイヤの交換時や廃車時に発生する古タイヤの量は約103万トン(1億3百万本)となっている(2003年, 図-1)。

わが国の古タイヤのリサイクル率は87%であるが、リサイクル量の約半分はその熱効率の良さからサーマル・リサイクル(燃料目的での再利用)となっている。しかし、サーマル・リサイクルは、熱や炭酸ガス(CO₂)の放出を伴うものであり、地球温暖化防止対策に逆行するという観点からは、好ましいリサイクル方法とはいえない側面がある。そのような背景から、日本自動車タイヤ協会(JATMA)や各タイヤメーカーでは、サーマル・リサイクルからリユースまたはマテリアル・リサイクルへの転換を迫られている現状にある。

また、わが国の古タイヤの土木資材用としての有効利用の展開は、次に示す欧米諸国と比較して大幅に遅れており、図-1に示すように、統計量としてはリサイクル量の0.1%未満であり、非常に遅れた状況にある。

(2) 海外での古タイヤのリサイクル状況³⁾

米国や EU 諸国の場合、古タイヤは盛土体(材

料)や構造物裏込め材料などとして、土木分野で盛んに使用されており、しかもそのリサイクル量全体における比率は年々増えている。図-2は RMA (Rubber Manufactures' Association) がまとめた、米国における最近十年間における古タイヤのリサイクル状況の推移を示したものである。

図-2に示すように米国では、2003年には古タイヤの発生量は2.90億本、リサイクル率は80.4%(2.33億本)であり、土木資材用はリサイクル率の約24%(5640万本)となっている。1992年のリサイクル率が27%で、その内の土木資材用は7.4%という実績に対して、近年の米国ではリサイクル率が急速に上昇するとともに、土木資材目的の利用もそれ以上の大きな伸びを示している。英国でも、古タイヤ発生量が46.8万トン、リサイクル率は70%で、その内の7.6%が土木資材用として利用されている(1998年)。

米国では1980年代の終わりごろから、主に地盤材料としての用途を目的とした研究が始められ、タイヤシュレツズ(下記(3)参照)やタイヤチップおよびそれらと土砂との混合材料の、締固め前後の密度特性や圧縮性、せん断特性などに関する室内試験が行われた。さらにゴムとしての断熱性の高さや粒状破砕物として礫材と同等の透水性などを利用して、土木資材としての用途は、次のような様々な目的で利用されている。

- ・軽量盛土材料として
- ・抗土圧構造物の裏込め材料として
- ・廃棄物処理場の排水材、または有害物質の吸着材として
- ・寒冷地における断熱材料として など

(3) タイヤの基本的物性

a) タイヤの組成とタイヤチップの製造方法³⁾

タイヤは、天然ゴム、合成ゴム、テキスタイルお

よびビードワイヤーを主な構成材料としている．各材料の重量構成比は図-3 に示す通りである⁵⁾．

古タイヤゴムチップは，古タイヤを破砕し，金属や繊維を除去した後に，篩い機でサイズ別に分類して作製される（金属，繊維部分を除去せずに裁断したままのものもある）．一般的には平均粒子寸法 1～50mm のものが“ゴムチップ”，それより小さいものは“ゴム粉”，大きいもの（平均寸法 50～300mm）は“シュレッド”と称されている³⁾．写真-1 は本論文の各実験で用いたタイヤチップ（粒子の平均粒子寸法 2mm，金属や繊維部分を除去したもの）を示すが，破砕して作製されるため表面はギザギザや凸凹が多数あり，形状は不定形なものである．

b) タイヤゴムの物理・力学特性

一般的なタイヤゴムの真比重は 1.15 程度で，通常の土質材料の比重（2.5～2.8 程度）と比べて半分以下の軽量材料である．最大引張り強さは，15～35MN/m²（伸び性能：300～400%），弾性係数は $E_{TR}=1\sim5\text{MPa}$ ，ポアソン比は $\nu \approx 0.5$ の等方弾性体である^{6), 7)}．ただし一般的な地盤材料の試験で用いる 15%程度までのひずみ量の範囲では，弾性係数は，平均で $E_{TR}=4\sim6\text{MPa}$ 程度である（図-4）^{8), 9)}．

また表-1 に示すように，一般的にゴムの体積圧縮率（圧縮力に対する体積変化率）は水と同等であり，地盤材料の非排水せん断試験における間隙水圧の変化などに基本的に影響を与えないものである⁶⁾．

c) タイヤゴムの耐久性と古タイヤの物性

タイヤゴムは耐油性，耐有機酸性，耐オゾン性，耐紫外線性は低い傾向があるものの，耐水性や耐高アルカリ性は高い⁸⁾．したがって，土木・地盤材料として使用する場合，紫外線や大気に直接暴露されない土中，固化処理土中または水中・海水中などの環境下であれば，その耐久性は高いものと考えられる．

本研究は，タイヤチップを固化処理土に混合した材料に関するものである．筆者らは耐アルカリ性に関しては，固化処理土の pH が概ね 11 程度であるのに対して，pH=13.0 の強アルカリ溶液内に 4 ヶ月間養生した古タイヤゴムチップスを用いた三軸 CD 試験や固化処理土内に 6 ヶ月間養生したゴムシートの引張り試験を実施し，アルカリ雰囲気での養生の影響が無いことを示している¹⁰⁾．

またここで材料として考えている古タイヤとは，タイヤの交換時や廃車時に正式な流通経路から排出されるものであり，屋外に長期間放置され紫外線照射や酸化による化学的劣化が内部まで深く進行した

ものではない．一般的に自動車用タイヤはタイヤの種類や運転状況などによって異なるが，走行距離で 6～10 万 km で交換される⁵⁾．したがってタイヤの側面部（磨耗しない部分）は，わずかに劣化していることが考えられる．それに対して，タイヤチップはタイヤのゴム部分を数ミリ単位の大きさまで破砕したものである．したがって，表面の劣化した部分はタイヤチップ粒子表面においては“点”として存在する程度で，そのほとんどが劣化していない表面部以外の部分に相当するものである．

図-5 は，古タイヤと新タイヤのゴム部分から削りだして作製したダンベル型供試体の引張り試験（静的）結果である¹⁰⁾．両者はほぼ同様の応力ひずみ関係を示しており，古タイヤゴムチップの物性は，新タイヤと同等であると考えてよい．

図-4 タイヤゴムの引張り試験結果

図-5 古タイヤと新タイヤの比較（引張り試験）

表-1 体積弾性率⁶⁾

体積弾性率 K (単位: Pa)	
铸铁	1.7E+11
ガラス	3.7E+10
水	2.2E+09
ゴム	1.9E+09

d) 環境安全性

JATMA は古タイヤの成分や溶出特性に関する公的計量証明機関での試験結果が、わが国の環境基準を十分満足していることを提示し、その環境安全性を示している。古タイヤを埋立て処分した場合の溶出水の影響については、古タイヤカット片の溶出試験を行い、わが国の埋立て基準や排水基準を満足している結果を示している³⁾。

したがって、わが国では古タイヤは、法律上においても、15cm 各以下にカットしてあれば安定型処分場に埋め立てが可能であり、成分的にも安全でかつ安定した一般廃棄物として分類されている³⁾。

筆者らも、屋外で土中に埋設したタイヤチップを通った浸透水の溶出特性を調べているが、約3年間のモニタリングの結果では、環境基準を超える有害物質は検出されていない¹¹⁾。

3. 地盤材料を母材とした複合材料に関する既往の研究

一般的に、2種類以上の素材を組み合わせ、それぞれの長所を兼ね備えた材料を創生することを材料工学の分野では“材料複合化”という。ある母材（マトリックス）に介在物として、粒子や繊維を分散・混合するこの手法は、ポリマーや金属の分野で広く応用されているものである¹²⁾。

本研究は、固化処理土をマトリックスとして、古タイヤゴムチップを介在物とした複合材料の変形・強度特性に関するものである。筆者らはこのテーマに関して、2002年ごろから取り組んできている¹³⁾が、このように地盤材料を母材とした複合材料や、古タイヤを地盤材料として有効利用する研究に関して、既往の知見をここで簡単にまとめてみる。

地盤工学の分野における“複合材料”に関する研究は、粘土と砂を混ぜた中間土の研究が礎となっている。砂と粘土の混合土に関しては、倉田・藤下¹⁴⁾、Trollope&Zafar¹⁵⁾、Skempton¹⁶⁾ など多くの研究者が、各種の室内力学試験を行っており、それらの結果粘性土と砂質土の境界を示す細粒分含有率が存在し、その値は概ね20%程度であると報告している。また福江・大草¹⁷⁾は混合土内部の粗粒分同士が骨格を形成するか否かで混合土の工学的特性が大きく変わることを指摘している。

土質材料または固化処理土をマトリックスとして、土質材料以外の材料を介在物とした複合材料に関する研究に関しては、わが国では1980年代終わりの平

田らのプラスチックが混入した焼却灰や一般廃棄物の土質力学特性に関する研究がパイオニアである¹⁸⁾。その研究は、廃棄物埋立地の跡地利用を想定し、焼却灰やまさ土に裁断した廃棄ポリエチレンシートを混合して作製した複合材料の力学試験を行ったものである。そこでは介在物の体積混合率15%という数値が、複合材料の物性を大きく分ける値であると報告されている。

その後、1990年代はじめには旧建設省土木研究所を中心としたグループによって、建設発生土または固化処理土に短繊維や軽量化材（気泡やEPSビーズ）を混合したHGS（High Grade-Soil）¹⁹⁾の研究開発が始められた。またほぼ同時期に旧運輸省港湾技術研究所を中心としたグループでも、軽量混合処理土（SGM：Super Geo-Material）²⁰⁾の研究開発が始められた。短繊維混合処理土は、建設発生土や固化処理土の強度、靱性（ねばり強さ）など力学的特性の向上や降雨・流水に対する耐侵食性の向上を目的に開発されたものである。また気泡やEPSビーズを混合した軽量混合処理土は、強度のほかに軽量化を目的として開発されたものである。このように従来の土質材料にさらなる強度や靱性または軽量性などの付加価値を高めることを目的として研究開発が行われてきているものである。なおこれらの技術は、基本的な力学的特性、構成モデルの提案や施工に関わる技術まで多方面での研究がなされ、これまでに多くの施工実績がある。

複合地盤材料の介在物として、各種の廃棄物を用いる研究については、加藤ら²¹⁾ら、神田ら²²⁾、木全ら²³⁾などによって、1995年ごろから始められている。加藤らは様々な廃プラスチック片（廃ペットボトル片、廃EPS片、廃棄漁網、廃ビニルシート）を介在物とした室内試験を実施し、介在物の混合量や剛性によって発揮される靱性の評価を行っている²⁴⁾。その他、地盤材料以外の混合物を用いた研究では、古紙²⁵⁾や植物の根茎²⁶⁾など植物由来の高分子（セルロース系）の繊維や、カキ殻²⁷⁾を土砂や固化処理土に混合した材料の研究事例などがある。

古タイヤまたは古タイヤゴムチップを地盤材料として有効利用する研究に関しては、1990年代前半から主にアメリカやカナダで始められた。Humphrey & Manion²⁸⁾、Edil & Bosscher²⁹⁾、Tweedieら³⁰⁾は、タイヤシュレツズのみ、またはシルトと混合した材料の力学的特性を把握し、高速道路の軽量盛土として適用した事例を報告している。国内ではAshokeら³¹⁾が2001年ごろからタイヤチップの軽量土としての力学特性に関しての研究を始めている。このように、

古タイヤの地盤材料としての既往の研究は、軽量土としての物性や現場への適用に関するものが多い。

4. 材料および試験方法

本章では、筆者らが行ったタイヤチップ混合固化処理土に関する各種室内試験において使用した材料と試験の種類および試験方法に関して述べる。

(1) 使用材料と配合

a) 使用材料

固化処理土の原料土は東京湾の浚渫土砂で、5mmふるいで礫や貝殻を除去したものを使用した。表-2に物理試験結果を示す。タイヤチップは平均粒径が2mmのもの（ゴム以外のスチール、テキスタイルなどは除去したもの）を使用した（図-6）。また固化材は普通ポルトランドセメントを使用した。

b) 固化処理土部の配合

固化処理土部の配合は次の3点を条件に設定した。

- ・タイヤチップとの均一な混合が可能なこと
- ・現場打設の際に締め固めの必要性がないこと
- ・気中・水中に打設時に材料分離が少ないこと

したがって、適度な流動性と粘性を有する状態が必要であるため、混合直後のフロー値（JHS A 313-1992）が13～14cmになる配合を選定した。よって原料土は、フロー値が33cmとなるまで加水調整したもの（含水比282%、湿潤密度1.230g/cm³）を使用した。目標配合強度は、一軸圧縮強さ（材令28日）を $q_u=200, 400, 800\text{kN/m}^2$ と設定した。配合表を表-3に示す。

c) タイヤチップの混合量

タイヤチップの混合量は、複合体の単位体積当たり（内割り体積率）として、式(1)に示す体積混合率 f で表現する。

$$f = \frac{V_{TC}}{V_{TC} + V_S} \quad (1)$$

ここで、 V_{TC} ：タイヤチップの体積、
 V_S ：固化処理土部の体積

体積混合率 f の設定は0%、9.1%、16.7%、23.1%の4種類とした。ちなみにこれらの配合は、固化処理土の単位体積当たりの添加率（外割りの体積率）では、それぞれ0%、10%、20%、30%に相当する値である。

タイヤチップの混合量は流動性がタイヤチップを混合する前後で大きく変化せず、現場打設時の材料分離が生じにくいことを目標とし、上限を $f = 23.1\%$ と設定した。

また、タイヤチップの固化処理土中における分散状態や骨格の形成の有無は、重要なポイントである。そこでタイヤチップのみで骨格を形成する場合の状態を確認する目的で、最大最小密度試験（JIS A 1224 2000を準用）を行った⁹⁾。その結果、最小密度は0.437g/cm³であり、そのときの体積混合率 f は38%と計算される（表-4）。したがって今回の体積混合率 f の設定値は、タイヤチップが固化処理土中で分散し、連続した骨格を形成していない状態に相当する。

d) 供試体の作製方法

各種室内試験の供試体は、加水調整した原料土と固化材をミキサーで5分間練り混ぜた後に、所定の量のタイヤチップを3分間手練りで混合・攪拌して作製した。混合後は、空気が混入しないように各試験用のモールドに充填し、上端部を水平に均した後にラッピングし、恒温恒湿（20℃±2℃、相対湿度

表-2 原料土の物理試験結果

土粒子密度 g/cm ³	粒度組成(%)				液性限界 %	塑性限界 %
	礫	砂	シルト	粘土		
2.691	0	1	26	73	120.3	50.3

図-6 タイヤチップの粒度

表-3 固化処理土部分の配合

目標配合強度 q_{u28} (kN/m ²)	配合 (g/リットル)			湿潤密度 g/cm ³	フロー値(cm)	
	土粒子	海水	固化材		原料土	固化処理土※
200	318	895	45	1.258	33	14.2
400	316	890	62	1.268	33	13.6
800	313	883	88	1.284	33	13.2

※ミキサーで5分間混合直後

表-4 タイヤチップの最大最小密度試験結果⁹⁾

	最大最小密度試験結果	
	最大	最小
密度 (g/cm ³)	0.550	0.437
ゴム体積 (%)	47.8	38.0
間隙比	1.091	1.632

RH $\geq$ 95%) の環境下で28日間養生した。供試体寸法は、一軸および三軸試験用が ϕ 5cm $\times$ 高さ10cm、圧裂引張試験用は ϕ 60mm $\times$ 長さ30mmである。

(2) 試験の種類と方法

今回は、固化処理土にタイヤチップを混合した複合材料の基本的な力学的特性の確認と、タイヤチップの混合効果（靱性の向上）を確認する目的で、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験および圧裂引張試験を行った。

一軸圧縮試験はひずみ速度1%/minで行い、破壊後の強度がピーク値の50%程度まで達した時点で試験を終了した。

三軸圧縮試験は背圧100kPaのもとで、等方圧密終了後、拘束圧一定の非排水せん断をひずみ速度0.1%/minで最大軸ひずみ15%まで行った。また有効圧密圧力 σ'_c は200, 400, 800kPaの3段階とした。

圧裂引張試験は「圧裂による岩石の引張り強さ試験方法（JGS 2551-2002）」³²⁾に準拠して行った。

5. 試験結果

本章では、まず一軸圧縮試験と圧裂試験の結果について、タイヤチップ混合量の影響と固化処理土部分の強度の影響に関してまとめた。次に三軸圧縮試験の結果から、側方拘束圧力の影響に関して整理した結果について述べる。

(1) 一軸および三軸圧縮試験結果の整理方法

今回、一軸および三軸圧縮試験結果を整理するに当たり、次に述べるような定義を行った。

図-7に示すように、一軸および三軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線は、ベディング・エラーなどの影響でせん断開始直後は、0.1～0.2%程度の圧縮ひずみ量まで圧縮応力の伸びが緩やかであり、その後直線的に圧縮応力が伸びていく結果が得られることがある。したがって今回は初期の直線部分とひずみ軸の交点を“ひずみ0%”と定義した。また補正後のひずみレベルで0.3～0.5%までの応力ひずみ曲線の直線部分の勾配を初期弾性係数 E_i と定義した。

また、通常は最大応力点を“破壊点”と定義する。しかし、後に示すようにタイヤチップ混合固化処理土は、粘り強い材料であるため、最大応力を示した後に急激なひずみ軟化を示さないため、破壊点を決めることが困難である。したがって今回は、最大応力点に対して明確に応力低下を示す点として、最大

図-7 一軸圧縮試験結果の整理の概念

応力より3%以上応力低下を示した点を“破壊点”と定義するものとした。

(2) 一軸圧縮試験結果

a) 応力～ひずみ関係³³⁾

一軸圧縮試験結果の一覧を表-5に示す。

図-8および図-9(a)～(c)は、一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線である。図-8は、同じ原料土に対して固化材添加量を変えて目標強度が異なるケースで養生条件が同じ“固化処理土のみ”のケースの試験結果であり、表-5の $f=0.0\%$ に対応するものである。

図-9は、図-8の3種類の固化処理土に平均寸法2mmのタイヤチップを体積率で $f=0.0, 9.1, 16.7, 23.1\%$ で混合した場合の試験結果である。

一般的に固化処理土は、図-8に示すように、せん断開始後に線形弾性的に圧縮応力 σ が伸び、目標強度が大きいケースほど線形弾性的な挙動後の塑性変形量が少なく、小さなひずみで圧縮応力 σ のピークを示し、その後急激な応力低下を示す、脆性的な変形特性を示すものである。

それに対してタイヤチップを混合すると、図-9に示すように、いずれの目標強度のケースでも、線形弾性的な挙動を示した後に、タイヤチップの混合量が増えるほど緩やかなひずみ硬化を示し、破壊に至るひずみ量が大きくなっている。

図-9から、固化処理土部の強度が小さい $q_u=200\text{kN/m}^2$ の場合、タイヤチップの混合が無い $f=0\%$ のケースでは、破壊ひずみが約2%と大きく、ある程度の靱性をもともと有しているといえ、タイヤチップ混合による破壊ひずみの伸びは少ない。しかし $q_u=400, 800\text{kN/m}^2$ の固化処理土部の強度が大きいケースでは、 $f=0\%$ の破壊ひずみが約1%と小さく、タイヤチップの混合量が多いほど顕著に ε_f が伸びて

表-5 一軸圧縮試験結果一覧

固化処理土部の 目標強度 q_u (kN/m ²)	タイヤチップ 体積混合率 f (%)	初期弾性係数 E_i (MPa)	ピーク強度 q_u (kN/m ²)	破壊ひずみ ε_f (%)
200	0.0	33	173	1.9
	9.1	28	203	2.4
	16.7	24	188	2.8
	23.1	23	180	2.7
400	0.0	78	437	1.2
	9.1	69	433	1.7
	16.7	68	412	2.8
	23.1	68	420	3.3
800	0.0	176	845	1.0
	9.1	166	754	1.2
	16.7	107	633	1.9
	23.1	94	555	2.4

図-8 応力～ひずみ関係（固化処理土のみ， $f=0\%$ ） (a) 固化処理土部 $q_u=200\text{kN/m}^2$ (b) 固化処理土部 $q_u=400\text{kN/m}^2$ (c) 固化処理土部 $q_u=800\text{kN/m}^2$

図-9 タイヤチップ混合固化処理土の一軸圧縮試験結果（応力～ひずみ曲線）

いる。この結果は本来脆性的な変形・破壊性状を示す固化処理土がタイヤチップを混合したことによって、破壊前の“靱性（粘り強さ）”が向上したことが確認される。

b) 一軸圧縮強さと初期変形係数

図-10 (a), (b)はそれぞれ、一軸圧縮試験におけるタイヤチップの体積混合率とピーク強度、 E_i の関係を示したものである。これらの結果より、固化処理土部が $q_u=200\text{kN/m}^2$ と $q_u=400\text{kN/m}^2$ のケースではタイヤチップの混合量が多いほど、ピーク強度、 E_i はともにやや低下する傾向が認められる。それに対し $q_u=800\text{kN/m}^2$ のケースでは、ピーク強度と、 E_i ともにタイヤチップを混合することで顕著に減少する傾向が認められる。したがって一軸圧縮試験の場合、マトリックス部である固化処理土の強度がある程度（ $q_u=400\text{kN/m}^2$ ）以上大きくなると複合材料の初期剛性と一軸圧縮強さに顕著な影響が現れてくるものといえる。

一般的には、固化処理土にそれよりも剛性の低いタイヤチップを介在物として混合した場合、複合材料としての剛性は低下するものと考えられる。表-6

に、固化処理土とタイヤゴムの弾性係数を示すが、今回の場合、固化処理土に対するタイヤゴムの弾性係数の値（剛性比）はおよそ15%～3%の大きさである。

図-11は、固化処理土部の一軸圧縮強さと、複合材料としての初期弾性係数 E_i との関係を示した結果である。固化処理土のみ（ $f=0\%$ ）の場合、一軸圧縮強さ q_u と初期弾性係数 E_i の関係は、式(2)に示す原点を通る線形関係にあることがわかる。

$$E_i = 204 \cdot q_u \quad (2)$$

タイヤチップを混合した場合、複合材料としての E_i は各ケースとも低下している。ただし、固化処理土部の強度が概ね $q_u=400\text{kN/m}^2$ までの範囲では、 $f=25\%$ 程度までのタイヤチップ混合による E_i の低下は非常に小さく、固化処理土そのものに近い物性を示しているといえる。また $f < 10\%$ の配合では、固化処理土部の強度が $400\text{kN/m}^2 < q_u < 800\text{kN/m}^2$ までの範囲であっても、同様にタイヤチップ混合による E_i の低下は小さい。

図-10 タイヤチップ混合率 f と E_i および q_u
(一軸圧縮試験)

図-12 圧裂試験における応力～変形の関係

表-6 固化処理土部とタイヤチップの剛性

固化処理土部		タイヤゴム	剛性比 E_{TR}/E_i
目標強度 q_u (kN/m ²)	初期弾性係数 E_i (MPa)	弾性係数 E_{TR} (MPa)	
200	33	5	0.150
400	78	5	0.064
800	176	5	0.028

表-7 圧裂試験結果一覧

混合物	混合率 $f(\%)$	σ_t (kN/m ²)	q_u (kN/m ²)	σ_t/q_u
タイヤチップ	0	82	389	21.1%
タイヤチップ	9.1	59		15.2%
タイヤチップ	16.7	75		19.3%
タイヤチップ	23.1	73		18.8%
PP繊維	0.5	94		24.2%

図-11 固化処理土部分の q_u と複合材料の E_i

それに対し、固化処理土部の強度が大きい $q_u = 800 \text{ kN/m}^2$ でかつタイヤチップ混合率が $f > 16.7\%$ と多いケースでは、ほかのケースと比較して E_i の低下が大きく、比較的柔らかいタイヤチップを混合した影響が顕著に現れているといえる。

c) 圧裂試験結果

圧裂試験の結果を図-12、表-7に示す³³⁾。なお図-12は応力-変形関係であるが、変形量として供試体直径 d に対する圧縮率 $\Delta d/d$ を用いて示した。

圧裂試験は固化処理土部の強度が $q_u = 400 \text{ kN/m}^2$ のケースについて実施した。またここでは比較対照として、一般的に土砂やコンクリートなどの引張り強さを向上させる目的で使用される短繊維を同じ固化

処理土に混合したケースの試験結果も示す。短繊維は市販のPP繊維（太さ×長さ=40 μm ×12mm，比重1.30，引張強度1600N/mm²）を用いた。混合量は複合体積の0.5%である。

圧裂試験では、圧裂強度はタイヤチップ混合との確な相関関係は無く、 $f=0\%$ のケースの一軸圧縮強さの約20%であった。またピーク強度を示した後の直線的な強度低下の程度が軽減されているものの、残留強度の値には優位な差がみられない。ただし、完全に割裂する変形量（図中の×印；供試体が完全に割れて連続的な強度計測が不能になる状態、 $f=0\%$ では圧縮率 $\Delta d/d = 2.4\%$ ）は大きくなっている。

一方、短繊維混合のケースでは、圧裂強度がやや伸びるとともに、ピーク後の残留強度はタイヤチップ混合のケースと比較して3～4倍のレベルを保っている。ピーク強度を示した後はクラックが生じるものの、圧縮率が5%を超えても完全に割裂することは無く、ピーク強度を示した後にも供試体全体としての応力低下が少ないためと考えられる。

土砂や固化処理土またはコンクリートに短繊維を混合する場合、それらはマトリックスと短繊維との摩擦・付着または絡み合いに起因する拘束効果によって引張り強さが増し、靱性が向上するとされている¹⁹⁾。それに対してタイヤチップ混合の場合は、短繊維のケースほどマトリックスとの摩擦や付着の効果が大きくないことがわかる。すなわちタイヤ

ップの混合による靱性向上のメカニズムは基本的に、短繊維混合のように摩擦、付着または絡み合いなどによるものではなく、そのメカニズムは異なるものと考えられる。

(3) 拘束圧力の影響その 1 (軽度な過圧密状態の場合)

ここでは三軸試験結果の内、有効圧密圧力 σ'_c が 200kPa のケースを対象としてまとめる。これらのケースは、固化処理土部の強度が $q_u = 400\text{kN/m}^2$ または $q_u = 800\text{kN/m}^2$ であるのに対して、 σ'_c がその 1/2 または 1/4 のレベルであり、等方圧密段階における体積ひずみがゼロに近く (1%未満)、いわゆる“固結力による軽度な過圧密状態”を対象とした試験である。

図-13 および図-14 はそれぞれ、固化処理土部の強度が $q_u = 400\text{kN/m}^2$ と $q_u = 800\text{kN/m}^2$ のケースの、それぞれ (a) 軸差応力～ひずみ関係、(b) 過剰間隙水圧～圧縮ひずみ関係および(c) 有効圧密圧力で正規化した有効応力経路を示したものである。

a) 軸差応力～ひずみ関係

図-15 は固化処理土部が $q_u = 800\text{kN/m}^2$ の場合の一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の軸差応力～ひずみ曲線を比較した結果である。

両試験の応力～圧縮ひずみ関係は、タイヤチップ混合の有無に関わらず、圧縮ひずみ $\varepsilon = 0.3 \sim 0.5\%$ 程度までの線形弾性を示す段階においてはほぼ一致しており、側方拘束圧力の影響はほとんど現われていない。

線形弾性限界以降は、タイヤチップを混合した場合、三軸試験では一軸試験と比較してひずみ硬化が顕著である。 $f=0\%$ の破壊点のひずみレベルが、三軸試験の応力ひずみ曲線における変曲点、すなわち“降伏点”に相当しており、それ以上のひずみレベルにおいて、大きなひずみ硬化を示している。また、ここでは図には示していないが、これらの傾向は $q_u = 400\text{kN/m}^2$ のケースでも同様である。ただし $q_u = 800\text{kN/m}^2$ の場合、一軸圧縮試験ではタイヤチップ混合のケースではピーク強度が低下していたが、三軸圧縮試験では線形弾性限界以降のひずみ硬化が大きく、 $f=0\%$ のケースと同等かそれ以上のピーク強度を示しており、側方拘束圧力の影響が現れている。

図-16 は図-9、図-13 および図-14 から、一軸および三軸圧縮試験における破壊ひずみ ε_f とタイヤチップ体積混合率 f の関係をまとめたものである。両試験の結果とも、 f が大きいほど ε_f が大きくなると

いう、同様の傾向が認められる。ただし概ね $f > 10 \sim 15\%$ になると、側方拘束圧力のある三軸試験では急激に破壊ひずみ ε_f が大きくなっている。またその傾向は、固化処理土部の強度が大きいほど顕著である。一般的に固処理土は長期的に強度増加を示す特性を示し、徐々により脆性的な変形性状を示す傾向が強くなるのものである。しかし、タイヤチップ混合することによって長期の強度増大に伴う更なる脆性化に対し、変形性能の安定性の面において有利な特性を有するものと評価できる。

破壊後の挙動に関しては、タイヤチップ混合に関わらず、側方拘束のある三軸圧縮試験では、ピーク強度を示した後の強度低下が無拘束状態の一軸試験と比較して非常に小さい。ただしタイヤチップを混合したケースでは、ピーク強度を示した後のひずみ軟化は固化処理土のみのケースのように急激なものではなく、非常に緩やかである。

図-17 は、三軸圧縮試験における残留強度比 (式 (3)) とタイヤチップ混合率 f の関係である。この残留強度比は破壊後の靱性を示す指標のひとつである。

$$(\text{残留強度比}) = (\text{残留強度}) / (\text{ピーク強度}) \quad (3)$$

固化処理土の残留強度特性に関しては、寺師ら³⁵⁾、小林・龍岡³⁶⁾や渡部ら³⁷⁾がすでに述べているように、強度の 1%程度のわずかな有効拘束圧力があることで残留強度比は 0.7～0.8 程度が得られ、一軸圧縮試験でみるほど小さくないことが分かっている。ここで示すように、三軸試験では固化処理土にタイヤチップを混合することで、弾性限界後のひずみ硬化が生じるとともに、破壊後のひずみ軟化が、側方拘束圧力の無い一軸試験より緩やかになる。その結果、図-17 に示すように $f=0\%$ の場合と比較して大きな残留強度が得られている。残留強度比は、タイヤチップ混合量が多いほど大きくなり、1.0 に近い値が得られている³⁸⁾。

b) 過剰間隙水圧～ひずみ関係

図-13 (b)と図-14 (b)は過剰間隙水圧とひずみの関係である。線形弾性領域 ($\varepsilon = 0.3 \sim 0.5\%$ 程度まで)においては、過剰間隙水圧も軸差応力と同様に線形的に上昇しているが、タイヤチップの混合量が多いほど、発生する過剰間隙水圧の値も小さい。このことは、せん断開始直後からタイヤチップ混合の影響が少なからず現れていることを示している。

線形弾性限界以降では、過剰間隙水圧の最大値やピーク後の低下の程度は、タイヤチップの混合量が多いほど小さく、かつ固化処理土部の強度が大きい

図-13 (a) 応力～ひずみ関係
(三軸, 固化処理土部 $q_u=400\text{kN/m}^2$)

図-14 (a) 応力～ひずみ関係
(三軸, 固化処理土部 $q_u=800\text{kN/m}^2$)

図-13 (b) 過剰間隙水圧～ひずみ関係
(三軸, 固化処理土部 $q_u=400\text{kN/m}^2$)

図-14 (b) 過剰間隙水圧～ひずみ関係
(三軸, 固化処理土部 $q_u=800\text{kN/m}^2$)

図-13 (c) σ'_c で正規化した有効応力経路
(三軸, 固化処理土部 $q_u=400\text{kN/m}^2$)

図-14 (c) σ'_c で正規化した有効応力経路
(三軸, 固化処理土部 $q_u=800\text{kN/m}^2$)

図-15 一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の応力～ひずみ関係の比較 (固化処理土部 $q_u=800\text{kN/m}^2$)

ほどその傾向がより顕著である．このように，固化処理土にタイヤチップを混合することで，ダイレタンシー特性が変化し，せん断中の体積膨張傾向が顕著になっていることがわかる．また各ケースの過剰間隙水圧のピーク時の圧縮ひずみ値は， $f=0\%$ のケースの破壊ひずみ値とほぼ一致している（図-13 (b)と図-14 (b)に図示）．したがって固化処理土が破壊するひずみレベル以降において，タイヤチップの混合の影響によりせん断中の体積膨張傾向が顕著になっていることがわかる．

c) 有効応力経路

図-13 (c)と図-14 (c)は有効圧密圧力で正規化した有効応力経路である．既に述べた応力，過剰間隙水圧の挙動から，タイヤチップ混合固化処理土は，非排水せん断において，固化処理土に比べて間隙水圧の低下すなわち体積膨張（正のダイレタンシー）を伴いながらひずみ硬化を生じていることが特徴的である．

また図中には，後で示す $f=0\%$ のケースの限界状態線（CSL，傾き $M_r=2.1$ ）を示した．この図から，タイヤチップを混合したケースの限界状態は固化処理土と同等かわずかに勾配 M_r が小さい，原点を通る限界状態線に収束していることがわかる．したがって，タイヤチップの混合にかかわらず複合材料の残留状態は，固化処理土そのものの性質が支配的に現れているといえる．これは，複合材料のなかでタイヤチップ粒子同士の噛みあわせが骨格を形成していない分散状態にあるため，残留状態ではタイヤチップ粒子間にある破壊した固化処理土の摩擦特性に大きく依存し，固化処理土そのものの残留状態に近い性質を示しているためと考えられる．

(4) 拘束圧力の影響その2（軽度な過圧密状態～正規圧密状態の場合）

ここでは，固化処理土部が $q_u=400\text{kN/m}^2$ でタイヤチップの体積混合率が異なる4種類の供試体について，有効圧密圧力 σ'_c が200，400，800kPaの等方圧密非排水せん断試験を行った結果について述べる．

これらの試験条件は，有効圧密圧力 σ'_c が供試体の降伏応力（固化処理土の場合，一軸圧縮強さの約1.2～1.4倍程度）をまたいだ応力レベルでの等方圧密～非排水せん断特性であり，軽度な過圧密状態～正規圧密状態のせん断特性を対象にしたものである．

a) 圧密段階における体積変化量の違い

図-18 (a)～(d)は，タイヤチップの体積混合率 f ごとの3段階の圧密圧力 σ'_c における時間一体積ひずみの関係である．またこれらの結果から，有効圧密

図-16 タイヤチップ体積混合率と破壊ひずみ（一軸および三軸圧縮試験の比較）

図-17 残留強度比とタイヤチップ体積混合量

圧力と圧密終了後における複合材料全体の体積ひずみの関係をまとめたものが図-19である．

これらの結果より，タイヤチップを混合したケースでは $f=0\%$ のケースと比較して体積ひずみが非常に小さいことがわかる．ここで，第2章 (3) b) に述べたように，ゴムチップは外力に対して体積変化を生じない等方弾性体であるため，供試体全体の体積変化は複合材料の固化処理土部分の体積変化に等しいものと考えられる．したがって，同じ圧密圧力で $f=0\%$ のケースを基準（100%）とした場合の固化処理土部の体積ひずみ割合を計算した値は，それぞれのケースの圧密終了時における固化処理土部の（有効）応力分担率に相当する．その固化処理土部の応力分担率とタイヤチップ体積混合率との関係を示したものが図-20である．

図-20に示すように，タイヤチップを混合したケース（図中の▲印）の固化処理土部の応力分担率は， $f=0.0\%$ のケースに対してタイヤチップの体積混合率分を差し引いた値より小さく，固化処理土部分に

図-18 等方圧密段階の時間～体積ひずみ

最終的に作用した有効圧密応力が体積混合率分より小さくなっていることを示している。

また図-20 には、李ら²⁷⁾が行った非圧縮性で剛体に近い“カキ殻”を粘性土に混合した材料の等方圧密試験における粘性土部分の応力分担率を計算した結果(図-20 中の●, ○印)を併せて示している。

このケースは、液性限界(87%)の粘性土を約2倍の含水比に調整したスラリーにカキ殻を混合し、等方圧密を行った結果である。図に示すように、カキ殻混合粘性土のケースでは、圧密応力レベルや混合量によってやや傾向が異なるものの、タイヤチップ混合のケースと異なり、概ねカキ殻と粘性土の混

図-19 有効圧密圧力と複合体の体積ひずみ

図-20 タイヤチップ体積混合率と圧密終了時点における固化処理土または粘性土部の応力分担率

合率に応じた応力配分となっていることがわかる。

ここで示したタイヤチップ混合固化処理土の試験は固化処理土マトリックス中でタイヤチップは単独で宙に浮いており、連続した骨格を形成していない状態の試料を対象としたものである。したがって、圧密過程において介在物の骨格構造の変化にエネルギーが費やされることは無い。また、ゴムチップと固化処理土の異材料間の摩擦抵抗も考えられるが、上記のカキ殻混合粘性土の試験結果から考えて、その影響は非常に小さいと考えられる。したがって、ゴムチップ自体が大きな等方圧力を分担しているものと推測される。そのメカニズムに関しては、一つの推論として次に述べるようなことが考えられる。

粘性土や固化処理土は、自身の有する圧密降伏応力を超えた荷重载荷を受けた場合、透水性が低いいため骨格構造が変化(圧密による体積収縮)を生じる前に、間隙水が外力を分担し、载荷重相当の過剰間隙水圧が発生する。タイヤチップは間隙水と同様に等方弾性体であり、固化処理土や粘性土の内部に分散した状態において、载荷直後に間隙水と同様に応

図-21 軸差応力～ひずみ関係

図-22 有効圧密圧力とピーク強度

力分担するものと考えられる。その後、固化処理土や粘性土の骨格が等方圧密によって密になる過程において、間隙水圧は排水によって消散するものの、タイヤチップは非圧縮性の等方弾性体であるため、徐々に応力分担が増大していくものと推測される。

b) 軸差応力～ひずみ関係

図-21 (a)～(d)は、タイヤチップ体積混合率ごとの軸差応力～ひずみ曲線である。

いずれのケースも有効圧密応力の増大に伴い、ピーク強度が増大している。 $f=0\%$ のケース（図-21 (a)）では、圧密による固化構造の降伏と密実化に

起因して、初期剛性やせん断抵抗が増大している。それに対してタイヤチップを混合したケースでは初期剛性が圧密圧力の大きさによらずほぼ同じである。したがって、せん断過程における弾性変形の段階までは、圧密降伏前の固化処理土の特性が応力ひずみ関係に大きく反映されているといえる。これは、前述の圧密段階における固化処理土部分の体積ひずみが小さいことを反映していると推測される。

それに対してせん断時の弾塑性～塑性変形の段階では、タイヤチップの混合量が多いほど、緩やかなひずみ硬化を示し、有効圧密圧力 σ'_c が大きいケー

図-23 有効応力経路

スほど、より延性的な変形を示している。

また、タイヤチップの混合量が多い $f=16.7\%$ と 23.1% のケースでは圧密による強度増加がやや小さい(図-22)。これは、固化処理土部分の圧密終了時における実質的な有効圧密圧力が小さく、体積ひずみが小さいことが影響しているとも考えられるが、 $f=9.1\%$ のケースでは、 $f=0\%$ のケースと同等の最大強度が得られており、一概に固化処理土部分の圧密度の影響とはいえない。この結果に関しては、第6章の考察で詳細に述べるものとするが、弾性限界以降にひずみ硬化を示す特性は、タイヤチップの応力分担やゴム弾性に起因して発生する反力や復元力による内部拘束効果のような力が作用していることが原因ではないかと推察される。このような結果は、圧密とせん断の関係において、従来の土質材料では説明のつかない本材料の特徴的なものである。

c) 有効応力経路

図-23 (a)~(d)は、それぞれタイヤチップ体積混合率ごとの有効応力経路である。

図-23 (a)は、タイヤチップを混合していない f

$=0\%$ のケースであるが、圧密応力の増大に伴い、セメントによる固結力を有する過圧密状態から、圧密によって降伏した正規圧密状態に近い形状に変化している。図中には、固化処理土のみのケースの限界状態線(CSL)を描いているが、一定の残留状態(CSLの勾配 $M_r=2.1$, $\phi_r=51.1^\circ$)に収束している。

図-23 (b)~(d)の、タイヤチップを混合したケースでは、 $\sigma'_c=200, 400\text{kPa}$ のケースでは、ほぼ $f=0\%$ のCSLに近いほぼ一定の状態に収束している。しかし、 $\sigma'_c=800\text{kPa}$ のケースについては、 $f=0\%$ のCSLよりも下側の位置に収束している。この原因のひとつとしても、等方圧密終了時における固化処理土部の有効応力状態の違いが考えられる。しかし、有効応力経路の形状は、タイヤチップ混合量の違いによってさほど有意な差がみられない。複合材料の75%以上の体積を占める固化処理土部のせん断開始時の状態が大きく異なるのにも関わらず、このような結果が得られている点に関しては、やはり土質材料の中に土質材料とは異なる非圧縮性の弾性体であるタイヤチ

ップが影響しているものと推測される。

以上に示したように、固化処理土にタイヤチップを混合した場合は、通常の土質材料のような圧密→降伏→体積変化→強度増加という力学的特性とは異なる結果が得られている。強度を上回る（等方）圧密圧力を受けても、体積変化が非常に少ないが、高い強度と靱性が得られるという、従来に無い新しい地盤材料であるといえる。ただし、その力学的特徴の評価をするにあたり、一般的に土質材料の拘束圧力の影響評価に使われる、等方圧密三軸非排水せん断試験では説明をつけることは難しい。また今回は等方圧密の結果であり、介在物が等方弾性体であることから、原地盤の応力状態である一次元圧密を行った場合は、また異なる結果が得られる可能性があると考えられる。

6. 考察

これまで述べてきたように、固化処理土に、それより剛性の小さいタイヤチップを混合すると、初期弾性係数が低下すること、それは固化処理土の強度が大きくかつタイヤチップの混合量が多いほどより顕著に現れることが分かった。また線形弾性限界以降も、特に側方拘束圧力のある状態では、固化処理土の強度が大きく、かつタイヤチップ混合量が多いほど、緩やかなひずみ硬化がみられ破壊ひずみが増大し、靱性が向上することが分かった。また、固化処理土は、長期的に強度増加を示す特性のあるものであるが、タイヤチップの混合による靱性の向上の効果は、固化処理土部分の強度が大きい顕著であり、長期の変形性能の安定性に関しては非常に有利な特性を有するものであることがわかった。

ただし、以上はタイヤチップ混合固化処理土が固化処理土部の強度を越えない範囲の有効拘束圧のもとにある、軽度な過圧密状態での力学的特徴である。固化処理土の強度を上回る有効拘束で圧密される場合については、前章(4)で述べたように、従来の土質材料と同じ評価が難しいために今後のさらに検討の余地がある課題といえる。

そこで本章では、軽度な過圧密状態のタイヤチップ混合固化処理土を対象に、線形弾性状態までとそれ以降の弾塑性～塑性状態に分けて、タイヤチップの混合効果に関して考察を行ってみる。

(1) 線形弾性状態におけるタイヤチップ混合の影響（複合材料の弾性係数の理論解との比較）

一般的に弾性係数の異なる 2 つの等方弾性体材料で構成される複合材料の弾性係数は、マトリックスと介在物の応力分担割合で決定されるとされている。この複合材料の弾性係数を理論的・解析的に求める方法として Voigt（フォイクト）、Reuss（ロイス）のモデルが最も知られている³⁹⁾。これらのモデルでは、マトリックスと介在物の応力分担を、応力分担パラメータ b として弾性係数の比（剛性比）の指数関数として式(4)のように表している。さらにその応力分担パラメータと介在物の体積混合率 f を用いて、複合材料の弾性係数は式(5)で求められるとされている。

$$b = \left(\frac{E_I}{E_M} \right)^n \quad (4)$$

$$E_C = \frac{(b-1) \times f + 1}{f \times b \div E_I + (1-f) \times E_M} \quad (5)$$

Voigt model

$$E_C = (1-f) \times E_M + f \times E_I \quad (6)$$

Reuss model

$$E_C = \frac{1}{(1-f) \times E_M + f \div E_I} \quad (7)$$

ここで、 E_C : 複合体 (composite) の弾性係数

E : 介在物 (inclusion) の弾性係数

E_M : マトリックス (matrices) の弾性係数

f : 介在物の体積混合率 (式(1))

n : 複合体内の応力、ひずみまたは仕事量の分布状態から理論的に設定される値

Voigt modelは、微視的に見て図-24 (a)のような状態で、複合材料が外力によって変形した際に複合材料内の微視的ひずみが一定で巨視的ひずみと等しい（ひずみ一定）と仮定し、弾性論に基づいて導かれたモデルである。したがって、式(4)の応力分担パラメータは、 $n=1$ ($b=E_I/E_M$) とされ、式(5)に代入することで複合材料の弾性係数 E_C は式(6)で表される。このモデルでは、剛性比が小さくかつ介在物の体積混合率が小さい場合は、マトリックスの弾性係数がより支配的な値を示すものとなる。

図-24 Voigt model と Reuss model の仮定

Reuss modelは、微視的に見て図-24 (b)のような状態で、複合材料内の微視的応力が一定で巨視的応力と等しい（応力一定）と仮定したモデルであり、式(4)で $n=0$ ($b=1.0$)とされ E_c は式(7)で表される。

上記のVoigt modelとReuss modelは、それぞれ複合材料の弾性係数の上限値または下限値を表すものとされ、金属材料やプラスチック材料の分野で使われている。ただし、これらのモデルはマトリックスと介在物の剥離や損傷を考えていないものであり、またマトリックスと介在物の弾性係数の比（剛性比）の適用限界が0.1程度までともいわれている⁴⁰⁾。ちなみに今回の場合、固化処理土とタイヤゴムの剛性比は表-5に示したとおり、0.15~0.03と非常に小さい値である。

図-25は各実験結果とVoigt modelとReuss modelで計算した複合材料の弾性係数（初期弾性係 E_i ）を示している。これらの結果から、今回の実験結果は固化処理土部が $q_u=800\text{kN/m}^2$ でタイヤチップの体積混合率 f が概ね15%以上の場合を除いて、ひずみ分布が一定と仮定したVoigt modelと比較的よく合っていることがわかる。したがって概ね、固化処理土部が $q_u \leq 400\text{kN/m}^2$ と小さく（複合材料の剛性比が0.064以上）、 $f < 25\%$ の範囲では、弾性領域におけるタイヤチップ混合固化処理土は複合材料として、Voigt modelで仮定している内部のひずみ分布が一定に近い状態で変形しているものと考えてよいと推察される。また、固化処理土部の強度が大きく剛性比が0.028と小さい $q_u=800\text{kN/m}^2$ のケースでは、タイヤチップの体積混合率 f が概ね10%未満と少ない場合は、内部のひずみ分布が一定というVoigt modelが成り立つが、タイヤチップの体積混合率 f が15%以上と多くなると解析値より、実験結果の初期弾性係数 E_i が小さくなっている。これは材料同

図-25 初期弾性係数の実験結果と理論解の比較

士の剛性比やポアソン比の違いに起因した剥離などの影響が出はじめるためと推測される。

(2) 弾性限界以降におけるタイヤチップ混合の影響

一般的に硬質の金属やポリマーなどの単体材料にみられる脆性破壊は、金属系の場合は結晶粒子の転位（移動）によって^{41), 42)}、ポリマー系の場合は結合力の弱い分子鎖の境界に沿って微細な亀裂（マイクロ・クラック）が入ることによって生じる⁴³⁾ものと考えられている。すなわち、材料内部における弱点に応力やひずみの局所化が生じ、それによって発生する転位やマイクロ・クラックが局所的に成長することで脆性破壊は生じる。脆性破壊を防止・抑制するにはその逆で、応力・ひずみの局所化に対して、応力・ひずみの分散または均質化を可能にすることが必要となる^{41), 44)}。

粒状または粉体状の介在物を用いて作製した複合材料の高靱性化機構は、材料の種類や剛性などによって異なるが次の(a)~(c)に記すような、大きく3つの機構に分類される。ひとつは、(a)分散粒子による結晶粒子の転位の阻害によるもので、連続した転位の距離を長くするケースや転位の発生を介在物が停留させ、局所化や連続を阻害する効果によるもの（図-26）^{41), 42)}、(b)異材料の接合界面の剥離によって生じる小さな間隙（マイクロボイド）の発生によるもの（図-27）³⁹⁾、および(c)マイクロボイドの発生と介在物の損傷が生じる場合³⁹⁾の3つである。上記の現象に余分なエネルギー消費すること、ひずみの局所化が防止されることが高靱性化を可能としているとされている⁴³⁾。

このうち、(c)の介在物の損傷効果に関しては、

たとえば、高衝撃ポリスチレン（HIP：High impact poly-styrene）の一つとして、硬いポリエチレンの内部に粉状ゴムを分散させて作製されたものがある。HIP では、ポリエチレンと粉状ゴムはその接合界面における反応性（付着性）が高く、外力に対して微細なバネの役割をし、接合界面が損傷することでエネルギー消費した結果、高靱性化されている⁴³⁾。しかし、タイヤチップ混合固化処理土の場合、タイヤチップは疎水性であり高含水比の固化処理土との付着強度は大きくない。また固化処理土マトリックスに対してタイヤチップはポアソン比が大きく、大きな弾性を示すものであり、その損傷を考える必要は無い。従って、タイヤチップ混合固化処理土の場合は、上記の(a)や(b)のような高靱性化機構が働いているものと推測される。特に、タイヤチップ混合固化処理土の場合、異材料間でのポアソン比の違いに起因した(b)と類似の現象が生じていることが考えられる。それは今回の三軸試験における変形に伴う体積膨張傾向（過剰間隙水圧の低下傾向）に反映されていると考えられる。すなわち、変形に伴い固化処理土部とタイヤチップの接合界面におけるマイクロボイドの発生が、変形に伴う過剰間隙水圧の上昇を抑制しているものと推測される。

さらに、タイヤチップ混合固化処理土は、弾性体を介在物とした複合材料であることから、靱性向上のメカニズムにはゴム弾性に起因した特有のものが存在するものと考えられる。タイヤチップ粒子は等方弾性体であるため、せん断時にある方向から圧縮応力を受けた場合、その方向以外には等方的な反力を生じる。その結果、タイヤチップに囲まれたマトリックス部分を均一な応力状態で拘束する“内部拘

束効果”と“内部応力の均質化効果”が生まれ、ひずみの局所化や局所的な成長を阻害しているものと考えられる。なおこれらの推測に関しては、別途、変形性能の異なる介在物を用いて作製した固化処理土の三軸試験を実施し比較検証を行い、ゴム弾性特有の影響であることを報告している⁴⁵⁾。

(3) X線CT法を用いた変形・破壊状況の検証

X線CT法は、材料の内部状況を3次元かつ非破壊で可視化する解析手法であり、X線コンピュータ断層撮影法とも呼ばれている。X線CTスキャナは、医療分野で診療技術に革命をもたらしたことは周知のことであるが、近年では高エネルギーのX線を利用した産業用CT装置も開発され、様々な分野で活用され、土質材料への適用も近年行われるようになった。今回のような脆性材料から延性材料への変形性能の変化をとらえるには、供試体内部の変形・破壊

粒状介在物を避けて、亀裂が進展する

(a) < (b) < (c) の順で、高靱性を示す

または、介在物で亀裂が停留し、亀裂の連続や成長を防止する

図-26 金属系の粒子分散型複合材料の高靱性化の概念⁴²⁾

((a): 粒状介在物による転位の阻害)

図-27 粒子分散型複合材料の延性破壊の機構 ((b): マイクロボイドの発生)³⁹⁾

状況を可視化できるX線CT法は有効な方法の一つである。本研究におけるX線CT法を用いた検証は、別途、タイヤチップ混合固化処理土や上記の変形性能の異なる介在物を用いて作製した固化処理土を対象とした三軸圧縮試験を併用した方法などで行っており、タイヤチップ混合による靱性改善効果を明らかにしている^{34), 46), 47)}。

ここでは、一軸圧縮試験を行った供試体のX線CTスキャナによる画像解析結果の一例を示す³⁴⁾。配合条件は、固化処理土部が $q_u=400\text{kN/m}^2$ 、タイヤチップの体積混合率 f が0%と16.7%である。図-28は各ひずみレベルでの供試体中央部の断面画像、図-29は、ほぼ同じ圧縮ひずみレベル ($\varepsilon \approx 2.5\%$) における3次元画像である。

これらの結果から、固化処理土のみの場合は通常良く見られる局所的なクラックが縦方向に発生しているものの、タイヤチップを混合したケースでは、目視で確認できる大きなクラックが表面、内部ともに生じていないことが確認できる。ただし、上記の異材料間のマイクロボイドの発生などはX線CTスキャンや画像解析の精度上の問題などからここでは確認できていない。しかしながら、これらの結果から、固化処理土のみのケースにおいて一軸圧縮せん断過程で生じる供試体内部の応力やひずみの局所化現象がタイヤチップ混合によって抑制され、その結果として固化処理土の靱性が改善されていることが確認できる。

7. おわりに

本論文では、固化処理土に他産業の廃棄物である古タイヤを有効利用したゴムチップを混合した複合材料の力学的特徴について述べてきた。それらをまとめると以下ようになる。

- 1) 元来、脆性的な変形性状を示す固化処理土に古タイヤゴムチップを $f=10\sim 25\%$ 程度混合することで、圧縮せん断時の破壊ひずみが増大するとともに、破壊後のひずみ軟化の程度が緩やかになり、靱性の改善効果が得られる。その傾向はタイヤチップの混合量が多く、固化処理土の強度が大きい場合 ($q_u \leq 800\text{kN/m}^2$) に顕著である。
- 2) 上記の特性は、側方拘束圧力があるとより顕著に現れる。タイヤチップの体積混合率 f が大きいほど、破壊ひずみが大きく増大するとともに、残留強度比は大きくなり1.0に近い値が得られる。
- 3) 応力ひずみ曲線における線形弾性領域（圧縮ひ

図-28 一軸圧縮試験の供試体中央断面の CT 画像 ³⁴⁾

図-29 一軸圧縮試験の供試体の X 線 CT スキャナによる 3 次元画像 ($q_u=400\text{kN/m}^2$, 圧縮ひずみ $\approx 2.5\%$) ³⁴⁾

ずみが概ね0.3~0.5%まで)の初期弾性係数は、タイヤチップ混合の影響は比較的小さく、Voigt Model を用いてある程度解析的に求められる。ただし $q_u \geq 400\text{kN/m}^2$ でかつタイヤチップの体積混合率 f が概ね15%以上になると、初期弾性係数は解析値よりも小さな値となる。

- 4) 初期弾性係数の値は、タイヤチップ混合の有無に関わらず、供試体の降伏応力を超えない大きさの側方拘束圧力には影響されない。
- 5) 等方圧密を行った場合、タイヤチップを混合したケースでは、タイヤチップの応力分担が体積混合率よりも大きく、圧密による体積変化が小さくなる。
- 6) タイヤチップの混合による靱性改善効果は、短繊維混合の場合のような介在物とマトリックスの付着や摩擦による効果とは異なり、ゴム弾性に起因した別の効果があるものと推測される。
- 7) タイヤチップを固化処理土に混合することによる固化処理土の靱性改善は、固化処理土とタイヤチップのポアソン比の違いに起因する両材料の接合界面におけるマイクロボイドの発生にエ

エネルギー消費をすることと、ゴム弾性に起因する内部拘束、内部応力の均質化およびゴム自身の自己復元力による効果によるものと推測される。またCT画像による供試体内部破壊状況の観察結果から、タイヤチップ混合により供試体内部のひずみ局所化が抑制されていることが確認できる。

謝辞：本研究の一部は、平成17年度および平成18年度年度の国土交通省建設技術研究開発助成制度（課題名「古タイヤゴムチップスを用いた多機能・環境配慮型地盤材料の開発」、代表者；茨城大学工学部教授 安原一哉）の助成によって行われたものである。付記して、深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：土と基礎 小特集「地盤工学とリサイクル」：土と基礎, Vol.51, No.6, Ser.No.545, 2003.
- 2) 総合土木研究所：基礎工 特集「再生材の基礎工への活用」：基礎工, Vol.32, No.7, 2004.
- 3) (社)日本自動車タイヤ協会：タイヤリサイクルハンドブック リサイクル状況編, pp.2-3, 2000.
- 4) (社)日本自動車タイヤ協会：日本のタイヤ産業 2004, p.24, 2004.
- 5) (社)日本自動車タイヤ協会：タイヤリサイクルハンドブック リサイクル状況編, pp.2-3, 2000.
- 6) 久保亮五：ゴム弾性[初版復刻版], p.77, 裳華堂, 1998.
- 7) 小松公栄：ゴムのお話, p.53, 日本規格協会, 1993.
- 8) 大島善次郎, 成澤郁夫監修：高分子の寿命予測と長寿命化技術, pp.680-700, エヌ・ディー・エス, 2002.
- 9) 御手洗義夫, 安原一哉, 菊池喜昭, 大谷順, Ashoke K. Karmokar：タイヤチップ混合による固化処理土の靱性改善とそのメカニズムについて, 人工地盤材料の利用技術に関するシンポジウム発表論文集, pp.105-108, 2005.
- 10) 御手洗義夫, 安原一哉, 菊池喜昭, 大谷順, Ashoke K. Karmokar：古タイヤゴムチップの地盤材料としての有効利用と環境影響について, 第 6 回環境地盤シンポジウム発表論文集, pp.351~358, 2005.
- 11) Ahoke, K.K., Takeichi, H., Yasuhara, H., Kawai, H.: Evaluation of Leaching Possibilities from Used Tire Rubber Materials in Civil Engineering Applications, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2337-2338, 2004.
- 12) 東郷敬一郎：材料強度解析学, 内田老鶴圃, pp.217-263, 2004.
- 13) 例えば, 御手洗義夫, 伊藤弘毅, 深沢健, 岸田隆夫, 堀井良介, 橋本文男：廃棄物処分場の遮水工に用いる各種リサイクル材を利用した変形追従性遮水材料の開発, 第 5 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.77-82, 2003.
- 14) 倉田進, 藤下利夫：砂と粘土の工学的性質に関する研究, 港湾技術研究報告, 第 11 巻, 第 9 号, pp.389-424, 1960.
- 15) Trollope, D.H., and Zafar, S.M.: A study of the shear strength of saturated sand, and sand/clay mixtures, in triaxial compression, *Proceedings of 2nd Australia-New Zealand Conf.*, pp.7-16, 1965.
- 16) Skempton, A.W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985.
- 17) 福江正治, 大草重康：砂と粘土の混合土の工学的性質の新しい評価法について, 東海大学紀要海洋学部, 第 14 号, pp.247-261, 1981.
- 18) 平田登基男, 花嶋正孝, 松藤康司, 柳瀬龍二：プラスチックフィルムを混入した焼却灰の土質力学特性, 土と基礎, Vol.36-8, No.367, pp.31-37, 1988.
- 19) 建設省土木研究所 材料施工部土質研究室ほか：混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書ー発泡ビーズ混合土利用技術マニュアル&気泡混合土利用技術マニュアル, 1997.
- 20) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル, 沿岸開発技術マニュアル, No.3, 1999.
- 21) 例えば, 加藤丈晴, 落合英俊, 安福規之, 大嶺望：プラスチック片を混合したセメント安定処理土の強度・変形特性, 第 30 回地盤工学研究発表会講演集, pp.637-638, 2001.
- 22) 神田雅之, 木村俊彦, 村田修, 日下部治, 棚村史郎, 水野清：廃繊維を混入した流動化処理土の配合設計, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2569-2572, 2001.
- 23) 木全卓, 桑原孝雄, 大野高弘：廃棄プラスチック破砕片混合土の一面せん断特性, 第 34 回地盤工学研究発表会講演集, pp.765-766, 1999.
- 24) 落合英俊, 安福規之, 大嶺望：混合地盤材料の開発とその力学的性能, 軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.137-1148, 2000.
- 25) 例えば, 木幡行宏, 藤川拓, 市原道三, 神田政幸, 村田修：繊維混合流動化処理土の強度特性について, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.635-636, 2001.
- 26) 例えば, 矢田部龍一, 八木則男, 榎明潔, 大塚俊二：根系による土の補強効果, 第 26 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1625-1626, 1991.
- 27) 李基豪, 風間基樹, 寺田賢二郎：カキ殻混合土の非排水せん断強度・変形特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.303-314, 2002.
- 28) Humprey, D.N., and Manion, W.P.: Engineering properties of tire chips for lightweight fill, *Ground, Soil Improvement and Geosynthetic*, ASCE, Vol.2, pp.1344-1355, 1992.
- 29) Edil, T.B., and Bosscher, P.J.: Engineering properties of tire chips and soil mixtures, *Geotechnical Testing J.*, Vol.17, No.4, pp.453-464, 1994.
- 30) Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., and Sandford, T.C.: Tire shreds as retaining wall backfill, *Journal of Geotech and Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.11, pp.1061-1070, 1998.
- 31) Ashoke, K.K., Takeichi, H., and Yasuhara, H.: Triaxial compression test on granulated scrape tire rubber for their use as lightweight geomaterials, *Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials 2002*, pp.127-134, 2002.

- 32) (社)地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書 平成 14 年度版, pp.321-338, 2003.
- 33) 御手洗義夫, 川合弘之, 安原一哉, 菊池喜昭, アショカ カマル カルモカル：古タイヤゴムチップを混合した複合地盤材料の力学的特性と港湾工事への適用事例, 第 49 回地盤工学シンポジウム, pp.77-84, 2004.
- 34) 菊池喜昭, 永留健, 大谷順, 御手洗義夫：X 線 CT 法によるゴムチップ混合固化処理土の工学的特性評価, 第 6 回環境地盤工学シンポジウム, pp.343-350, 2005.
- 35) 寺師昌明, 田中洋行, 光本司, 新留雄二, 本間定吉：石灰・セメント系安定処理土の基本的物性に関する研究, 第 2 報, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻, 第 1 号, pp.33-62, 1980.
- 36) 小林晃, 龍岡文夫：セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の変形強度特性, I~VII, 東京大学生産技術研究所, 生産研究, Vol.34, No.7~12, 1982.
- 37) 渡部要一, 古野武秀, 土田孝：浚渫泥土を利用した貧配合セメント処理土の力学特性, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.331-342, 2001.
- 38) 安原一哉, 菊池喜昭, 御手洗義夫, 川合弘之, アショカ K カルモカル：ゴムチップ混合による固化処理土の変形性能および変形後の遮水性能改善効果その 1：靱性の改善効果, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2323-2324, 2003.
- 39) 文献 12), pp.57-67.
- 40) Hshin, Z.: Analysis of composite materials, *J. Appl. Mech.*, Vol.50, pp.481-505, 1983.
- 41) 山田銃一：ユーザーのための金属基複合材料, 関東大学出版会, pp.77-78, 2006.
- 42) 横堀武夫, 石橋正, 鶴戸口英善, 川田雄一, 川本実, 倉西正嗣, 門間改三, 山本実善雄：金属材料の強度と破壊, 丸善, pp.169-192, 1964.
- 43) Lawrence E. Nielsen 著, 小野木重治訳：高分子と複合材料の力学的性質, 化学同人, pp.178-200, 1976.
- 44) 藤井太一, 座古勝：複合材料の破壊と力学, 実教出版, pp.103-105, 1978.
- 45) 御手洗義夫, 安原一哉, 菊池喜昭, 大谷順, Ashoke K. Karmokar：タイヤチップ混合による固化処理土の靱性改善とそのメカニズムについて, 人工地盤材料の利用技術に関するシンポジウム発表論文集, pp.105~108, 2005.
- 46) 御手洗義夫, 中村祐, 大谷順：古タイヤを破砕したゴムチップを用いた新しい地盤材料の開発に関する研究, 土木学会応用力学論文集, Vol.9, pp.591-601, 2006.
- 47) 御手洗義夫, 中村祐, 大谷順, 安原一哉, 菊池喜昭, Ashoke K. Karmokar：古タイヤゴムチップ混合による固化処理土の高靱性化機構, 第 7 回環境地盤工学シンポジウム, pp.317-324, 2007.

(2006. 3. 27 受付)

DEVELOPMENT OF CEMENT TREATED CLAY MIXED WITH SCRAP TIRE CHIPS AS NOVEL GEOMATERIAL AND STUDY OF ITS MECHANICAL PROPERTIES

Yoshio MITARAI, Kazuya YASUHARA, Yoshiaki KIKUCHI
and Ashoke Kumar KARMOKAR

This study is about the recycling technology of soft clay and scrape tire as geomaterial. And, the purpose of this paper is describing the advantageous mechanical properties of cement treated clay mixed with tire chips.

Generally, cement treated clay shows the brittle deformation property, but it is found that it is able to improve its toughness by adding tire chips at 10 to 20% volume. In this paper, it is shown the results of some laboratory tests, unconfined compression test and triaxial compression tests about this composite material, in order to explain the effect of improvement in its deformation property by mixing tire chips, quantitatively. And it is tried to show the consideration of its mechanism.