

古タイヤを破碎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

Study on Development of a New Geo Material using Rubber Chips from Crushed Scrap-Tire

御手洗 義夫*・中村 祐**・大谷 順***

Yoshio MITARAI, Yuu NAKAMURA and Jun OTANI

* 正会員 東亜建設工業㈱技術研究開発センター 主任研究員 (〒102-8451 横浜市鶴見区安善町1丁目3)

** 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 博士前期過程 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

*** 正会員 工博 熊本大学教授 工学部社会環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

The purpose of this paper is to develop a new geo-material using recycled scrap tire. Here, triaxial compression test with X-ray CT scanning was conducted for the material of treated soil mixing with tire tips and cement. The material of tire tips can be realized as an elastic property and in order to evaluate the effect of the property of tire tips in the soil, treated soils with different mixing materials such as sand particles as a plastic materials and EPS beads as an elasto-plastic materials were also examined. Based on a series of triaxial compression test with CT scanning for all the treated materials, the engineering properties of these treated soils were discussed. Finally, the deformable characteristic of the treated soil with tire tips was confirmed using the results of X-ray CT scanning, which are visual CT images and the results after image processing analysis of these CT images.

Key Words: scrap tire, cement-treated soil, tri-axial compression test, toughness, X-ray CT scanner

1. 序 論

現在、わが国では年間約100万トンの古タイヤ（使用済みタイヤ）が発生している¹⁾。そのリサイクル率は約90%であるが、リサイクル量の約半分は熱効率の良さからサーマルリサイクル（燃料としての熱回収が目的）となっている（図-1）。しかしサーマルリサイクルは、未回収分の熱や温室効果ガス（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。

土木工事では、一つの工事で大量の土砂などの材料を取り扱うために、古タイヤなども土木・地盤材料としてのマテリアルリサイクルの方法が模索されている。

古タイヤまたはそれを切断・粉碎したゴムチップの特徴としては、

- (1) 粒子比重が土石よりも小さい軽量材料である
- (2) 弾性体である
- (3) 断熱性が高い
- (4) 自然環境に有害な物質を溶出しない

などが挙げられ、欧米諸国では最近の約10年間で軽量盛土材などとして盛んに利用されており²⁾、特に現在の米国ではリサイクル量の約25%が土木資材としてマテリアルリサイクルされている。我が国ではアスファルトラバーなどと

してわずかに利用されているが、その量は欧米諸国と比較して非常に少ない状況にある。

我が国では、近年になって古タイヤの土木・地盤材料としての利用に関する研究が始められた^{3)~5)}。御手洗ら(2003)は、セメント固化処理土にゴムチップを混入することによって、その靱性（粘り強さ）を改善する研究を行っている。粘性土を原料土として作製されたセメント固化処理土は、強度とともに低い透水性を有するものであるが、強度が大きいくほど靱性に乏しいという特徴がある。ゴムチップを混合して靱性を改善した“ゴムチップ混合固化処理土”は、変形追随性遮水材料としての利用を目的とし、海面処分場の遮水工やその一部としての適用の検討がなされてお

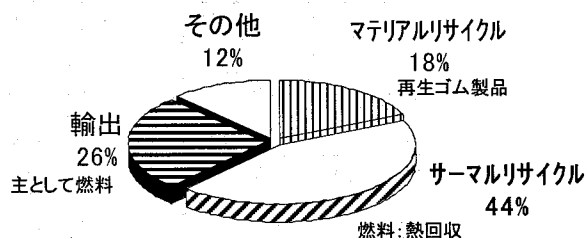


図-1 我が国の古タイヤのリサイクル状況(2004 年)

り、既に実現場にて採用された実績もある⁹⁾。これまでの研究では、ゴムチップ混合による変形性能の改善効果として、応力-ひずみ関係の延性化やクラック発生防止、変形に伴う遮水性能の維持などが確認されている⁹⁾。次の段階としては、その変形・破壊のメカニズムを把握することが本材料の設計法や性能保障手法を確立するためには重要である。よってその変形や破壊における本材料の内部挙動を解明する必要があると考えられる。

本研究では、ゴムチップ混合固化処理土について三軸圧縮試験と産業用X線CTスキャナを併用して三軸圧縮下における内部挙動を可視化し、ゴムチップによる変形性能改善効果を解明することを目的としている。また、弾性体のゴムチップに対して、剛性が高く剛体に近い挙動を示すと考えられる珪砂や、弾塑性体のEPSビーズを混合したケースについても同様の試験を行い、剛性や変形特性の異なる混合材料による複合地盤材料の変形・破壊挙動を比較し、ゴムチップ特有の弾性的性質が固化処理土の変形性能の改善に影響していることを評価・検討するものである¹⁰⁾。

2. 使用材料と供試体の作製方法

本実験で使用した材料を表-1~3および図-2に示す。

固化処理土は、東京湾浚渫粘性土を原料土(表-1)とし、含水比が280%となるまで海水で加水調整したものに、普通ポルトランドセメントを混合して作製した。配合は、事前配合試験の結果から、材令7日における一軸圧縮強度が $q_{u7} = 400\text{kN/m}^2$ として設定した(表-2)。

ゴムチップは、専用の工場で古タイヤを裁断・破碎し、スチールコード・テキスタイル等を取り除いたものである。図-2(a)に示すように、粒子形状は破碎の影響で不定形で表面は凸凹やギザギザ状で、粒子比重は1.15の弾性体である。

EPSビーズは、球形で粒子比重が0.053(発

泡倍率30倍)のもので、弾塑性体で軸ひずみ1~2%で降伏し、塑性変形時には体積収縮とひずみ硬化特性を示すものである。

珪砂は粒子比重が約2.70、非圧縮性で剛性が高く剛体に近い変形性状を示すものである。

表-3に固化処理土と各混合物の物性値をまとめたものを示す^{10),11)}。

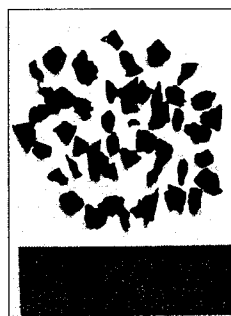
各混合材料の平均粒径は2mmとし、ある体積混合率 f で

表-1 原料土の物性値

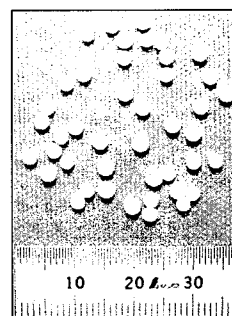
土粒子密度		g/cm ³	2.716
粒度	砂礫分	%	0.0
	シルト分	%	27.5
	粘土分	%	72.5
コンシステンシー	液性限界	%	100.3
	塑性限界	%	42.2

表-2 固化処理土部の配合表 ($q_{u7}=400\text{kN/m}^2$)

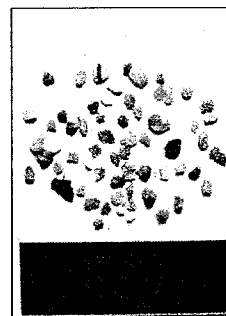
	土粒子	海水	固化材	合計
重量(g)	340.9	875.1	78.8	1294.8
体積(cm ³)	125.5	849.6	24.9	1000.0



(a) 古タイヤを粉碎した
ゴムチップ



(b) EPSビーズ



(c) 珪砂

図-2 各混合物 (平均寸法: 2mm 程度)

表-3 固化処理土と混合物の物性比較 (文献 10)に加筆・修正)

	固化処理土	混合物		
		ゴムチップ	EPSビーズ	珪砂
粒子密度	2.7g/m ³ 程度	1.15g/cm ³	0.053g/cm ³	2.70g/cm ³
強度	$q_{u7}=400\text{kN/m}^2$ (圧縮ひずみ約2%)	500kN/m ² 程度 (引張ひずみ10%時)	350kN/m ² 程度 (圧縮ひずみ10%時)	10~50MPa以上 (準硬岩としての値)
弾性係数	40MPa (E ₅₀)	5MPa程度	10MPa程度	1000MPa以上
弾性限界	0.3%程度	50~100%程度	1~2%程度	—
ポアソン比	0.1~0.2	0.5	0.1~0.2	(0.2)
変形特性	弾塑性(脆性的 ひずみ軟化)	等方弾性	弾塑性(延性的 ひずみ硬化※)	剛体に近い

※EPSビーズは、塑性域では体積圧縮を伴う

混合した。体積混合率 f は式 (1) で計算される。

$$\text{体積混合率 } f = \frac{\text{混入材料の体積}}{\text{供試体の全体積}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

供試体は、加水調整した原料土に固化材（普通ポルトランドセメント）を混合し、ミキサーで5分混合した後に、手練で2分間各混合物を所定量投入し、均一に混合することで作製した。供試体は $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ の円柱型プラスチックモールドに空気が混入しないように数回に分けて入れ、ラッピングし、 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温恒湿の環境下で材令7日まで養生したものを使用した。

3. 実験概要

3.1 X線CT法と三軸圧縮試験

X線CT法は、材料の内部状況を3次元的に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¹²⁾。

本研究で使用している産業用X線CTスキャナ装置は、以下のような特徴を有している。

- 試料台の最大積載重量が980Nまでである。
- 撮影中に、試料台がX線源と検出器の間を並進および回転する。
- 最大撮影領域は、直径400mmである。
- 撮影中は、完全に外部より遮断される。

これらの特徴は従来の三軸試験装置を使用する場合に制

約条件にもなるため、CT撮影との併用が可能なX線CT用三軸試験装置を新たに開発した（図-3）。この装置は、従来の三軸圧縮試験装置に比べて様々な点で以下のような工夫がなされている。

- コンパクトかつ軽量（総重量273N）であり、試料台に固定することでCT撮影中における試料台の並進および回転移動に追従可能である。
- 载荷に伴う荷重増加は装置内に反力をとることによりキャンセル、試料台には装置の自重のみが作用する構造となっている。
- 供試体セット時やせん断変形過程など载荷棒を作用させる際には図-3におけるmotor controllerとパソコンを接続し、プログラムで载荷速度が制御可能である。
- 従来の三軸試験装置では、X線CT撮影を行うとX線吸収量の大きい鉄支柱の影響で画像に乱れが生じる。よって、本装置では支柱のないアクリル材のセル筒のみで上载荷重を支える構造となっている。
- 撮影中はX線検査室内を完全に遮蔽するため圧力室上部のcockを閉じることにより拘束圧を一定に保つことが可能である。

3.2 実験方法

三軸圧縮試験は、背圧 100kN/m^2 で12時間以上飽和させた後に、有効拘束圧 200kN/m^2 で等方圧密し、側圧一定でひずみ速度 $0.3\%/min$ にて非排水せん断を行った。

なお今回示す試験結果は、圧密過程における有効圧密圧力が、供試体の一軸圧縮強さの約1/2の応力レベルであり、いわゆる“固結力による過圧密状態”であり、実測された圧密時の体積ひずみは1%未満であった。すなわち圧密による降伏がなく、供試体の内部構造に圧密圧力による影響がない状態で行った試験結果である。

CT画像の撮影は供試体の底部より10mm, 30mm, 50mm,

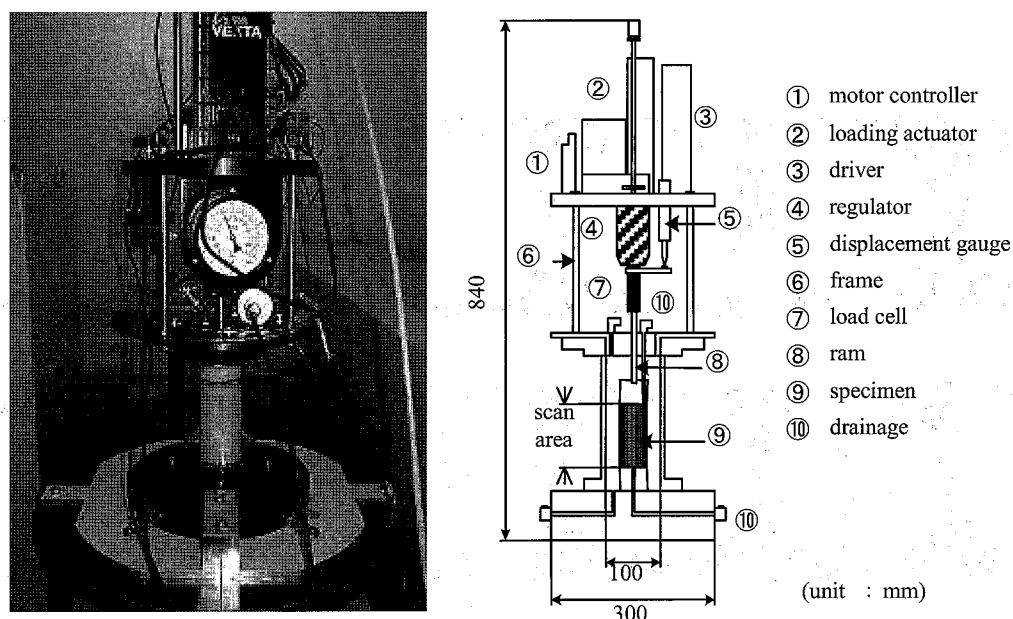


図-3 X線CT用三軸試験装置

70mm, 90mm の位置について, 載荷開始前と軸ひずみ 1%, 2%...と各軸ひずみレベルにおいて載荷状態で行った (除荷は行っていない)。

4. 実験結果および考察

4.1 ゴムチップによる変形性能改善効果の検討

(1) 応力-ひずみ関係

ここではまず, 一般的な三軸試験装置で行ったゴムチップ混合固化処理土の応力-ひずみ関係を図-4 に示す。なお図-4 では, 体積混合率 f を 0% から 23.1% までの 4 段階に変えた場合の結果を示している。固化処理土単体 (体積混合率 $f=0.0\%$) のケースでは軸ひずみ 2% 程度でピーク強度を示した後にひずみ軟化 (強度低下) を示しているのに対して, ゴムチップを混合したケースは, 強度の伸びとピーク後の強度低下が緩やかで, タイヤチップの混合量が多いほどピーク強度を示すひずみ量や残留強度が大きくなっている。すなわち脆性的な変形性状が延性的な性状に変化している。これらの結果は, タイヤチップ混合による靱性 (粘り強さ) の向上効果を示しているといえる。

次に図-5 に X 線 CT 用三軸試験装置を使用した場合の応力-ひずみ関係を示す。固化処理土単体 ($f=0.0\%$) とゴムチップ混合 ($f=16.7\%$) の 2 ケースを対象としている。なお, 図中の応力-ひずみ曲線の応力緩和部分は CT 撮影時に生じたものである。

まず, 両者における軸差応力ピーク時の軸ひずみを比較すると, 固化処理土単体が 2.2%, ゴムチップ混入固化処理土が 4.2% と, ゴムチップ混入によってピーク時のひずみが 2% 大きくなっている。また, 応力-ひずみ曲線をみると, 固化処理土単体のケースでは, せん断直後からほぼ直線的に強度増加を生じ, ピーク時の軸ひずみ 2.2% を超えた後に

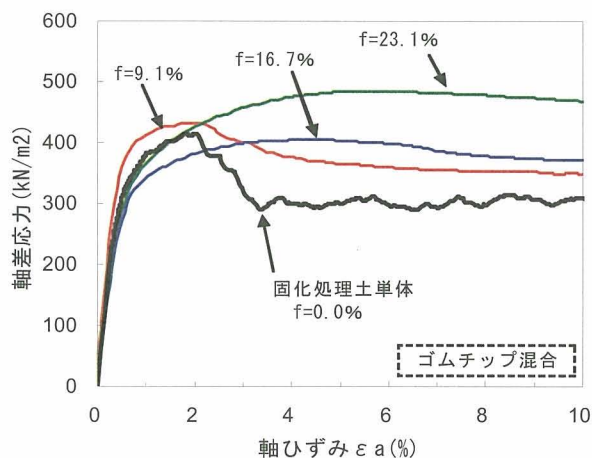


図-4 三軸圧縮試験結果 (ゴムチップ混合)

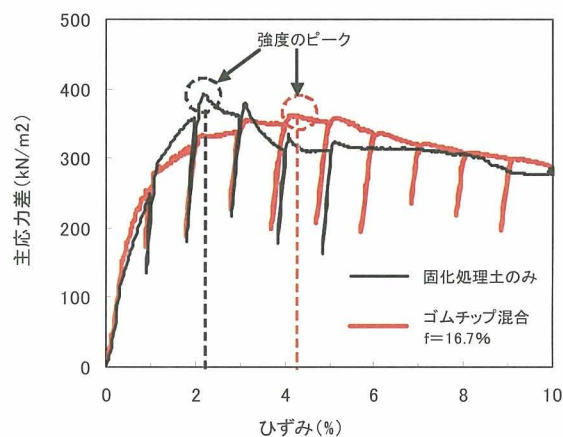


図-5 X 線 CT 用三軸試験装置を使用した場合の応力-ひずみ関係

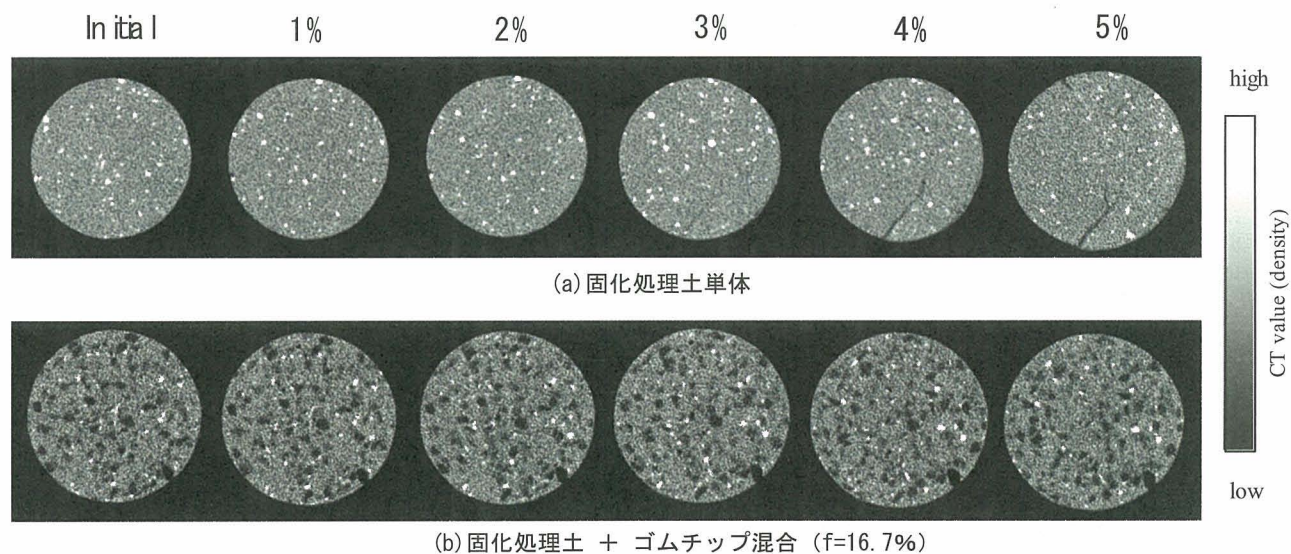


図-6 X 線 CT 画像 (固化処理土単体とゴムチップ混合したケースとの比較)

軸ひずみ 4%まで急激に強度低下を示し、その後はほぼ一定値に収束している。一方、ゴムチップを混合したケースでは緩やかな強度増加とピーク後には緩やかな強度低下を示している。すなわち、図-4 の一般的な三軸試験装置で行った試験結果と同様に、固化処理土の変形性能が脆性的から延性的なものに改善されたことが確認できる。

(2) X線CT画像による内部破壊状況の比較

図-6 に固化処理土単体とゴムチップ混合固化処理土においてクラックの発生が最も顕著であった断面の X 線 CT 画像を示す。

CT 画像は、1 ピクセルという小さな正方形メッシュの集合体で、本装置では 512×512 ピクセルで構成されており、それぞれのピクセルにはその内部の平均 CT 値が与えられている (1 ピクセルは $0.293 \times 0.293 \text{ mm}$)。CT 値と呼ばれる数値は、白黒の 256 階調濃淡レベルに置き換えることにより表示され、一般に CT 値が高い領域は白く、低い領域は黒く表示される。また CT 値は材料の密度と比例関係にあるとされており、CT 画像では白色部分が高密度領域、黒色部分が低密度領域となる。従って、CT 画像における灰色の部分の部分が固化処理土 (密度: 1.295 g/cm^3) であり、白色の点は、混合材料の中で最も密度が高い貝殻片またはセメントの塊と考えられる。図-6 (b) のゴムチップ混合のケースにおける少し濃い黒色部分が、最も密度が低いゴムチップ (密度: 1.15 g/cm^3) である。ほぼ均一に固化処理土をマトリックスとした内部で分散していることが分かる。

まず固化処理土単体のケースでは、軸差応力ピーク直後 (軸ひずみ 3%) において、左下部にクラックが確認され、その後ひずみの増大に伴いクラックが徐々に進展している。一方、ゴムチップ混合のケースでは、軸ひずみ 5% までは目視可能なクラックは確認されていない。これらの結果は、タイヤチップがクラックの発生を抑制し、靱性の向上に寄与していることを示唆しているものといえる。

(3) 画像解析による変形性能改善の評価

(破壊直前における供試体の側方変形状況の比較)

前項では、ゴムチップ混合により変形性能が改善された効果を応力-ひずみ関係と供試体の内部破壊状況 (クラックの発生状況) で評価した。ここでは、変形性能改善効果の評価を軸ひずみと側方ひずみの関係で評価するために画像解析を行った結果を示す。

図-7 に画像解析により得られた差画像を示す。差画像とは各ピクセルにおける CT 値の差値による画像で、載荷により変化した部分を抽出することを目的としたものである。すなわち供試体横断面の膨張量 (断面積増分量; 差画像における白いライン) に着目し、ゴムチップによる変形性能改善効果の検討を行った。この断面積増分量は差画像を 256 階調から 16 階調に変換し、画像内に表示されている断面積が増加した部分 (白いライン) を 1 ピクセル毎に抽出した後、これらのピクセル数に 1 ピクセルのサイズ $0.293 \times 0.293 \text{ mm}$ を掛けることにより算出した。

今回は、両ケースにおけるほぼピーク強度を示した時点における供試体中央部の CT 画像から載荷前の CT 画像を差し引くことにより、供試体が破壊するまでの変形量を比較した。

まず固化処理土単体のケースでは、初期値と軸ひずみ 2% (軸方向変位量 2.0 mm) の差画像ではほとんど変化は見られず、断面積増分量は 9.443 mm^2 (供試体直径換算で 0.124 mm の増大) であった。一方、ゴムチップを混合したケースでは、初期値と軸ひずみ 4% における差画像の断面積増分量は 88.140 mm^2 (供試体直径換算で 0.911 mm の増大) であった。従って、ゴムチップ混合によって、破壊に至るまでに供試体が内部に大きな構造的なクラックを生じることなく、側方へ大きな変形をしていることを示しており、固化処理土単体のケースと比較して、延性的な変形挙動となっていることを反映した結果であるといえる。

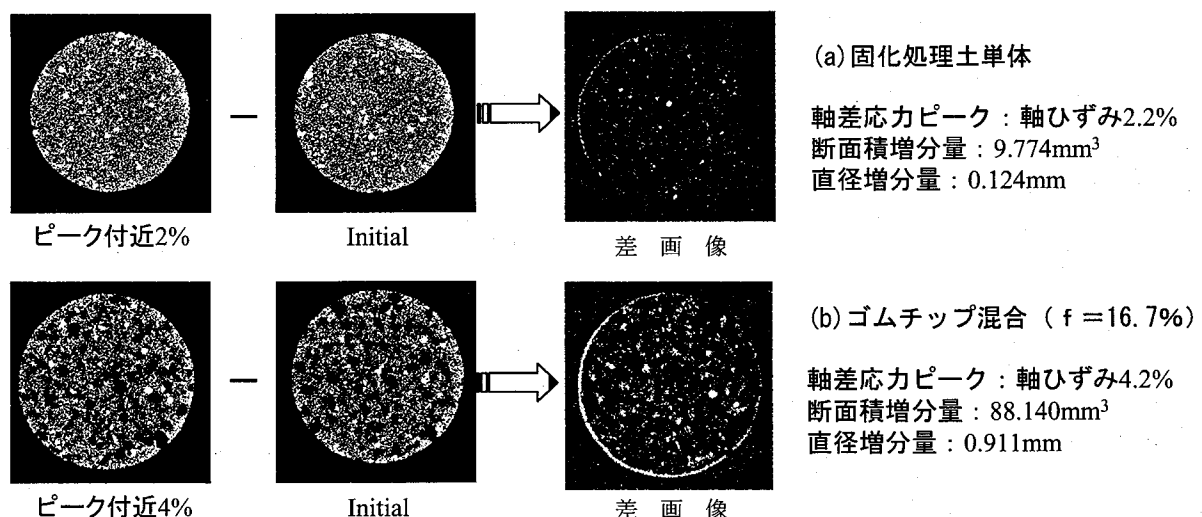


図-7 差画像による変形性能改善効果の評価

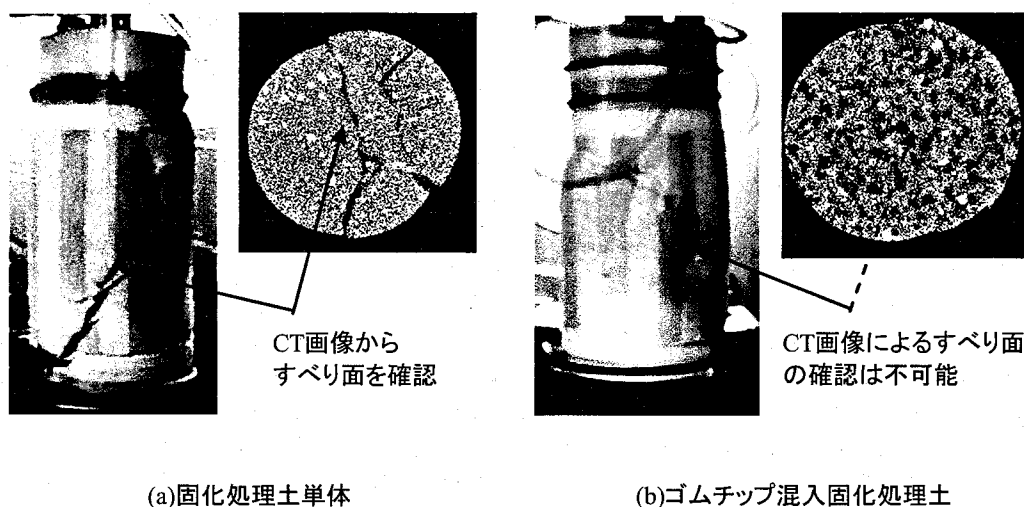


図-8 残留状態（軸ひずみ 15%）におけるすべり面またはクラック発生状況の比較

また上記の結果から破壊直前の“みかけのポアソン比”（＝供試体中央部における、側方ひずみ÷軸ひずみの値）を計算することができる。その値は、固化処理土単体のケースでは約 0.12 と小さく固化処理土としての一般的な値（0.1～0.2 程度）である。一方、ゴムチップを混合したケースでは約 0.46 と計算される。すなわち、固化処理土に体積当たりで 16.7%のタイヤチップを混合することで、複合材料全体のみかけのポアソン比は大きくなり、ゴムチップそのものとほぼ同等の値（ポアソン比≒0.5）に変化していることがわかる。

(4) 残留状態における変形・破壊状況の比較

4.1(2)で示したように、ゴムチップ混合固化処理土は、軸ひずみ 5%までの CT 画像からは明確なクラックが確認されなかった。ここでは三軸圧縮試験における残留状態（軸ひずみ 15%）における変形・破壊状況を比較した結果を示す。

図-8 は固化処理土単体およびゴムチップ混合のケースの軸ひずみ 15%における供試体の外観写真とその断面の X 線 CT 画像である。

固化処理土単体のケースは、外観写真において供試体を完全に分断する明確な“すべり面”が確認される。また CT 画像では、供試体を分断する太い“すべり面”またはクラックが確認され、さらにそのほかにもクラックが確認される。それに対して、ゴムチップ混入固化処理土のケースは、外観写真から確認される形状からは“すべり面”を生じている样子が確認されるものの、CT 画像からは完全に分断する明確な“すべり面”を確認することができない。すなわち、ゴムチップを混合することで、残留状態においても供試体を分断するような太いすべり面やクラックが生じおらず、固化処理土の脆性的な変形材料特性が延性的なものに大きく変化していることが確認される。言い換えると、

タイヤチップの混合による固化処理土の変形性能の改善効果は、破壊前後の状態のみならず、破壊後（通常はピーク強度発現後）の残留状態の大変形状態にまで影響を与えているということがいえる。

4.2 混入材料の変形特性の違いによる比較

(1) 応力-ひずみ関係で見た混合物の種類の影響¹⁰⁾

ここまでは、固化処理土単体とゴムチップを混合したケースの変形・破壊状況について述べてきた。それらの結果からは、本来脆性的な弾塑性体である固化処理土に、弾性体であるゴムチップが内部に分散していることによって、変形性能が改善されていることが分かった。そこで、ここでは弾性体のゴムチップに対して、剛性が非常に大きく剛体に近い性状を有する珪砂と、弾塑性体の EPS ビーズを混合したケースについて同様の実験を行い、比較・検討を行った結果を示す。

図-98(a), (b)は、 $q_u=400\text{kN/m}^2$ と $q_u=800\text{kN/m}^2$ の固化処理土に 3 種類の異なる材料を混合したケース（体積混合率はいずれも $f=16.7\%$ ）と固化処理土単体のケースについて、通常の三軸試験装置で行った、等方圧密三軸非排水せん断試験（背圧：100 kN/m²、有効圧密圧力 200kN/m²）の応力-ひずみ曲線である。

図-9(a)の固化処理土部分が $q_u=400\text{kN/m}^2$ の場合、ゴムチップ混合以外のケースでは、ピーク強度を示すひずみレベル（破壊点 $\varepsilon_a=1.5\sim 2.0\%$ ）までの応力-ひずみ関係がほぼ等しく、明確な強度のピークを示している。EPS ビーズと珪砂のケースでは固化処理土単体のケースと比較してピーク後の強度低下がやや小さく、その後応力レベルが一定またはわずかなひずみ硬化を示している。また両者には応力-ひずみ関係においては明確な差異は認められない。それに対してゴムチップ混合のケースでは、明確なピーク

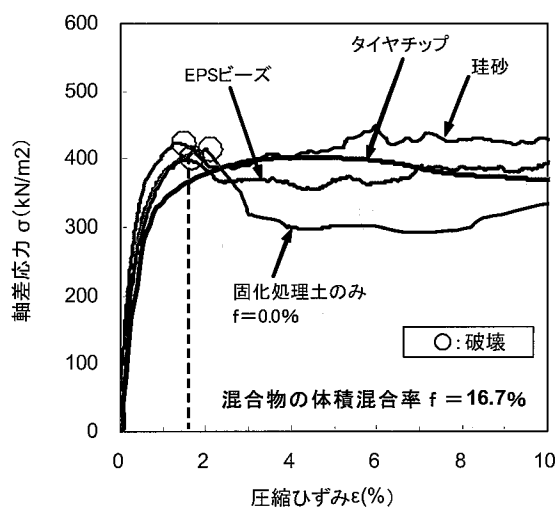


図-9(a) 混合物の違いによる比較-1
(固化処理土部 $q_u=400\text{kN/m}^2$ の場合, $f=16.7\%$)

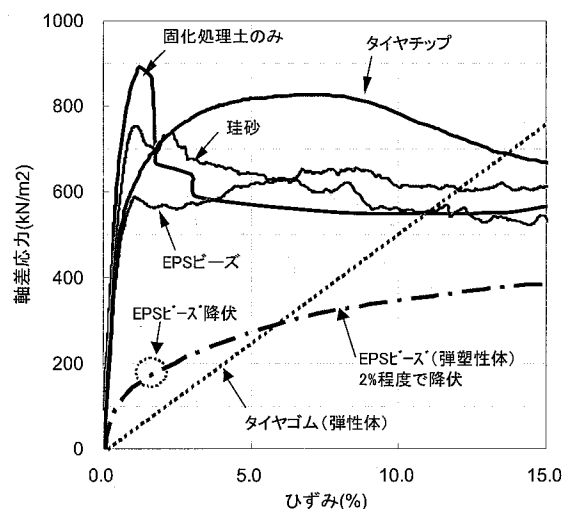


図-9(b) 混合物の違いによる比較-2
(固化処理土部 $q_u=800\text{kN/m}^2$ の場合, $f=16.7\%$)

強度を示さない延性的な変形挙動を示している。

図-9(b)の固化処理土部分が $q_u=800\text{kN/m}^2$ の場合では、珪砂混合、EPS ビーズ混合のケースの順で固化処理土のみのケースと比較してピーク強度が小さい。破壊後は珪砂混合のケースではひずみ軟化を示し、EPS ビーズ混合のケースでは破壊後の応力はわずかに強度低下した後に、わずかなひずみ硬化を示している。ゴムチップ混合のケースは $q_u=400\text{kN/m}^2$ の場合と同様、明確なピーク強度を示さない延性的で滑らかな応力-ひずみ関係を示している。これらの結果から、固化処理土単体の応力-ひずみ関係に近い順から、珪砂>EPS ビーズ>ゴムチップという順番であり、混合材料の弾性的性質が強いほど、かつ固化処理土部の強度が大きいほど混合物による靱性改善効果は顕著に現われているということがいえる。

図-9(b)には、EPS 単体の応力-ひずみ関係を併せて示したが、EPS ビーズ混合の場合は EPS ビーズ自身が軸ひずみ 1~2%程度のひずみレベルで降伏するため、その影響が複合材料の応力-ひずみ関係に現われていることが推測される。降伏後には EPS ビーズは体積収縮を伴いながらも、ひずみ硬化を示すものであるため、複合材料全体としてわずかなひずみ硬化を示しているものと推測される。

以上の結果から、次の2つのことが分かる。

- ①混合物の弾性的性質が強いほど固化処理土の変形性能がより延性的に変化し、靱性が向上している。
- ②混合物の弾性的性質の影響は母材の固化処理土部分の強度が大きい方が顕著に現われる。

(2) X線CT画像による混合物の種類の影響の評価

ここではまず、固化処理土部が $q_u=400\text{kN/m}^2$ の場合について、三軸圧縮試験とX線CT法を併用し、混合物の影響を比較した結果を、軸ひずみ 5%までの断面画像の比較を行う。なお、固化処理土部の強度が多いほど混合物の物性の影響が明確に現われる傾向があることは前項で述べた通りである

が、ここではCT撮影併用の三軸圧縮装置の能力の関係から、強度の小さい $q_u=400\text{kN/m}^2$ の場合の試験を行った。

図-10はX線CT用三軸試験装置を使用した場合の応力-ひずみ関係である。また図-11は、各ケースにおいてクラックの発生が最も顕著であった断面の軸ひずみ 5%までのCT画像である。図-11のCT画像において珪砂混入固化処理土のCT画像に示される白い部分が固化処理土よりも密度が高い珪砂であり、EPS ビーズ混入固化処理土のCT画像に示される黒丸が固化処理土よりも密度が低いEPS ビーズである。

図-10における珪砂とEPS混合のケースを見ると、図-9と同様に、軸差応力ピーク時のひずみレベルまでの挙動は固化処理土単体と珪砂混合のケースとほぼ同じであり、ピーク後はやや強度低下が生じている。しかし、図-11のCT画像では、固化処理土単体と珪砂混合のケースはほぼ同じ軸ひずみレベル(軸ひずみ 3.0または 4.0%)で、明確なクラックの発生が確認できるが、EPS ビーズ混合のケースでは、タイヤチップ混合のケースと同様に軸ひずみ 5%までは明確なクラックの発生が認められない。

まず、ゴムチップと珪砂の材料特性に着目して考察を行うと、珪砂は非圧縮性の剛体に近いものであることから、珪砂粒子は外部から作用した力を同じの方向にのみ固化処理土内で伝達するものと考えられる。

それに対して、弾性体であるゴムチップは固化処理土内部で力を受けた場合、等方的に周囲の固化処理土に反力を伝達するため、ゴムチップの周囲の固化処理土を等方的に拘束する効果があり、それが、変形性能の改善に反映されているものと推測される。弾塑性体のEPS ビーズを混入したケースについては、EPS ビーズ自体が軸ひずみ 1~2%程度で降伏する弾塑性体であるが、ゴムチップと同様にEPS ビーズに作用した力を周囲の固化処理土に伝達する効果を有している。ただし、EPS ビーズ単体のポアソン比はゴムチップの 0.5 に比べて 0.1~0.2 程度と小さく、かつその値は固化処理土そのもののポアソン比とほぼ等しい値(表-3を参照)である。

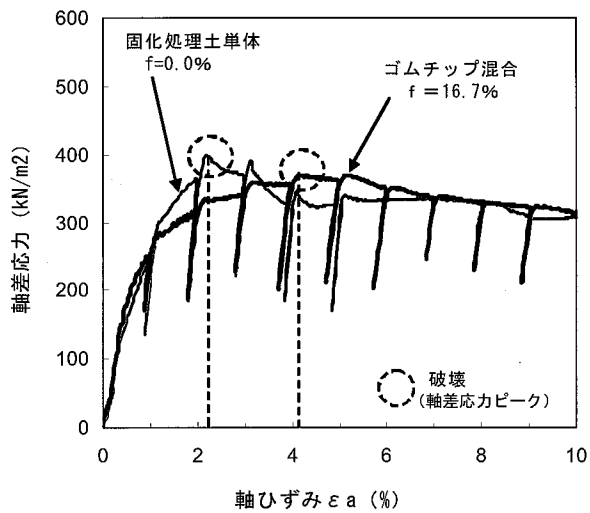


図-10(a) ゴムチップ混合と固化处理土単体 (CT 三軸)

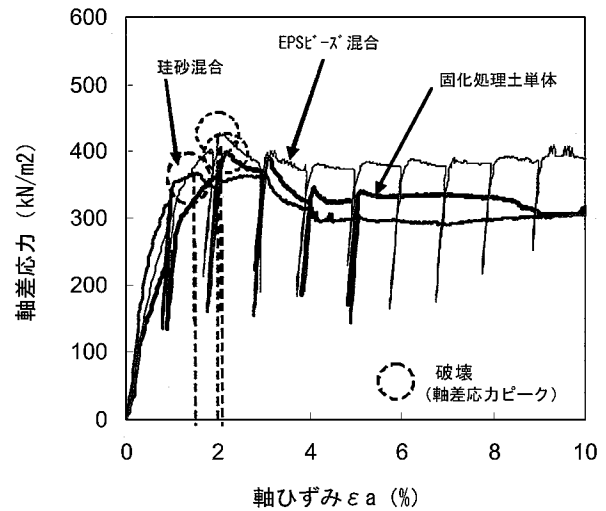
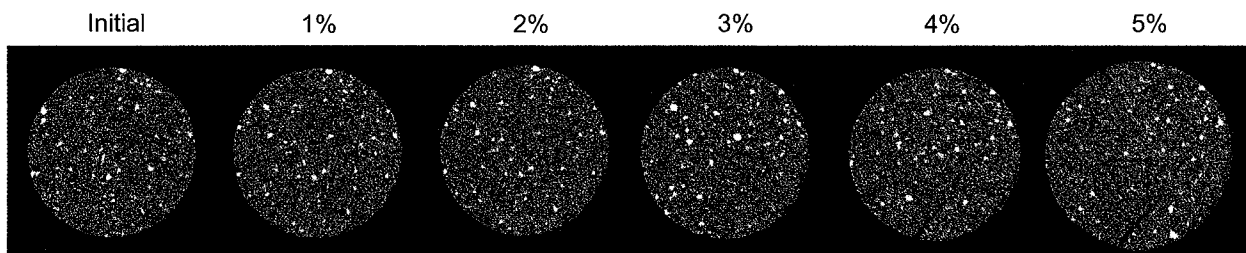
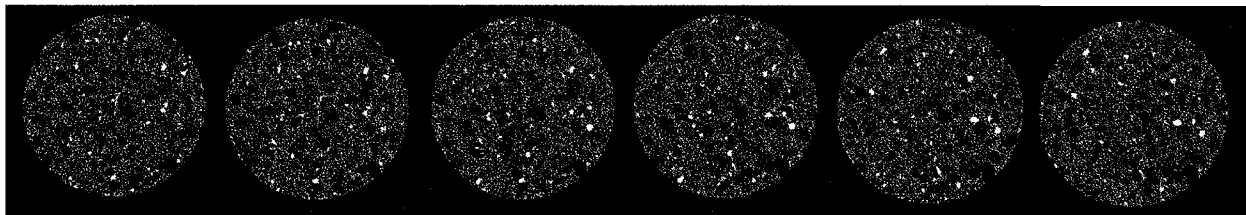


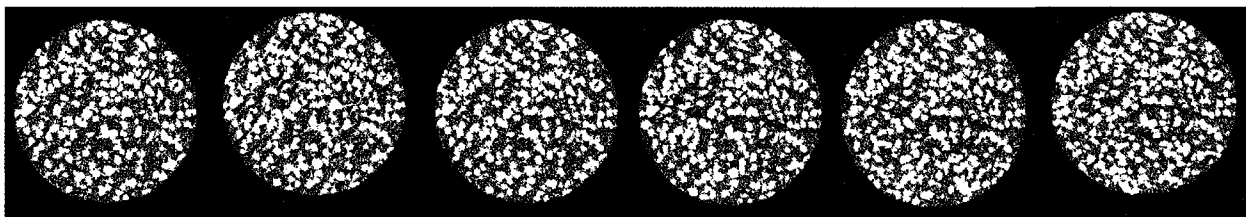
図-10(b) EPS, 珪砂混合と固化处理土単体 (CT 三軸)



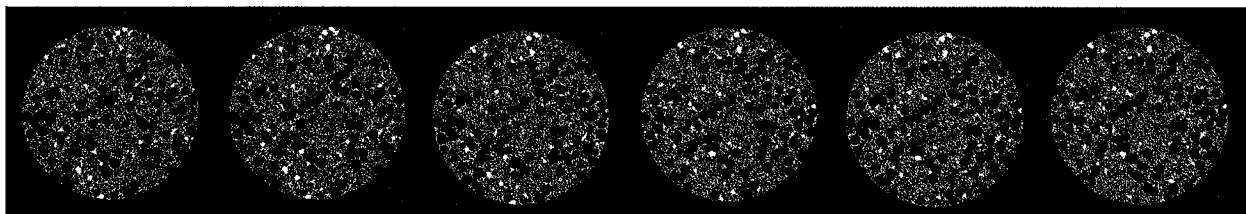
(a) 固化处理土のみのケース



(b) タイヤチップ混合のケース



(c) 珪砂混合のケース



(d) EPSビーズ混合のケース

図-11 X線CT画像 (混入材料特性の違いによる比較)

表-4 CT 画像の差画像解析による見かけのポアソン比の算出結果

ケース	軸差応力ピーク時の軸ひずみ	差画像解析時の軸ひずみ	差画像解析による面積増分	差画像解析による直径増分	みかけのポアソン比
	(%)	(%)	(mm ²)	(mm)	
固化処理土単体	2.2	2.0	9.78	0.124	0.12
珪砂混合	1.6	2.0	13.25	0.169	0.17
EPSビーズ混合	2.2	2.0	8.27	0.105	0.11
ゴムチップ混合	4.2	4.0	72.13	0.911	0.46

固化処理土部 $q_u=400\text{kN/m}^2$ 、混合物は $f=16.7\%$ の体積混合率の場合

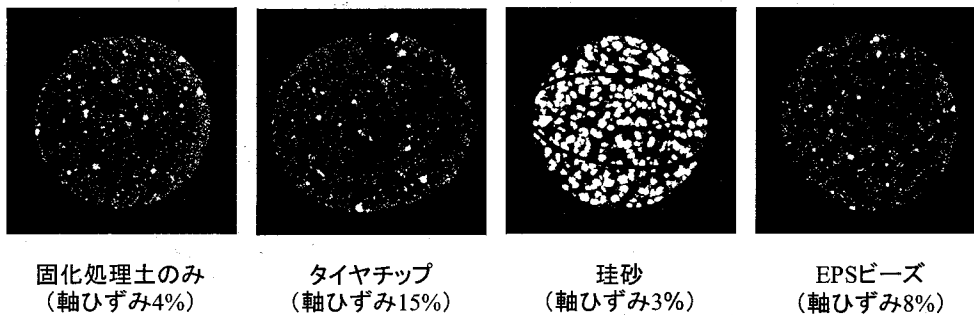


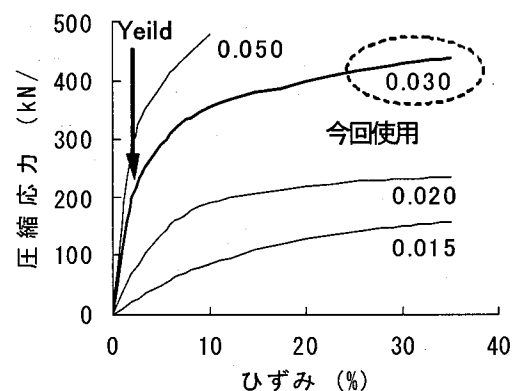
図-12 破壊後の X 線 CT 画像の比較 (各ケースにおけるすべり面の比較)

そのため、ひずみレベルが小さい範囲では、固化処理土単体と同様の挙動を示しているのではないかと推測される。

次に差画像解析による評価について述べる。ここでは、前述の 4.1 (3) または図-7 で行った、非排水せん断の前と破壊時 (軸差応力のピーク時) の CT 画像の差画像における比較を行った結果を示す。

表-4 は、それぞれのケースにおける差画像から求めた、軸差応力のピーク時における“みかけのポアソン比”の算出結果である。みかけのポアソン比の値は、固化処理土単体≒EPS 混合<(<) 珪砂混合<ゴムチップ混合という結果となった。珪砂混合のケースは、軸差応力のピーク後の値 (他のケースは、ピーク直前) であることから考えると、破壊時におけるポアソン比の値は、固化処理土単体および EPS ビーズ混合のケースと同等であるとも考えることができる。従って、軸差応力のピークまで (破壊点まで) は、ゴムチップ混合以外のケースはほぼ同等のポアソン比であり、そのため同等の応力-ひずみ関係を示しているといえる。それに対して、ゴムチップ混合のケースのみ大きなポアソン比 (0.5 に近い) を示しており、靱性が向上している一因となっていることが分かる。

最後に、破壊後の CT 画像の比較した結果について述べる。図-12 は、それぞれの材料のクラック (またはすべり面) を生じたひずみレベルにおける CT 画像である。ゴムチップ以外のケースは、ひずみレベルの違いがあるものの、クラックまたはすべり線に起因した“供試体を分断する空



図中の数値は、かさ密度を示す。

かさ密度 0.030 = 粒子密度 0.053 (30 倍発泡製品)

図-13 EPS の応力～ひずみ関係
(角柱ブロック供試体の一軸試験結果：メーカー提示資料)

間”が生じていることがわかる。EPS 混合のケースも軸ひずみ 7～8% のレベルで明確なクラックが発生している。図-13 に EPS 単体の標準的な応力-ひずみ関係を示すが、これより EPS ビーズの挙動が弾塑性的挙動から塑性的挙動に移行したことが EPS 混合のケースにおけるクラック発生の原因と考えられる。それに対して、タイヤチップ混合のケ

ースでは軸ひずみ 15%に至ってもすべり破壊による形状の変化が現われているものの、明確なすべり線が CT 画像上では確認できない。これはゴムチップが EPS ビーズと異なり、完全弾性体であることが原因であると推測される。

以上より、“クラック”または明確なすべり線を生じるひずみレベルは、

固化処理土のみ≡珪砂混合<EPS ビーズ混合≪ゴムチップ

の順であり、このことは混合物の物性を反映しており、タイヤチップ粒子の弾性的性質や EPS ビーズの弾塑性的性質が固化処理土の靱性向上に寄与しているものと推察される。また、このように図-9(a)や図-10(b)の応力-ひずみ曲線のみからは明確にその差が判断できない EPS ビーズのケースも、X 線 CT 法による画像解析を行うことで、それが珪砂混合のケースとゴムチップ混合のケースの中間的な変形特性を示していることが分かる。このことは X 線 CT 法が地盤材料の変形・破壊特性を調べるのに非常に有効な手段のひとつであることを示唆しているといえる。

5. 結 論

本稿では、産業用 X 線 CT スキャナ装置と三軸圧縮試験を併用して三軸圧縮過程における供試体の内部挙動を可視化することによって、弾性体のゴムチップによる固化処理土の変形性能改善効果を検討した。以下に結論を列挙する。

- 1) 固化処理土にゴムチップを混入することによって軸差応力ピーク時の軸ひずみが増大し、ピーク後の強度低下が緩やかになる。さらに、X 線 CT 画像より、固化処理土単体では軸差応力ピーク直後の軸ひずみでクラックが確認される一方、ゴムチップ混入固化処理土では試験終了時の軸ひずみ 15%においてもクラックは確認されなかったことから、ゴムチップ混合による靱性改善効果があると考えられる。
- 2) 三軸圧縮試験の初期（せん断前）と軸差応力のピーク

時における X 線 CT 画像の差画像解析結果より、ゴムチップ混合により見かけのポアソン比が固化処理土単体の場合(0.1~0.2 程度)より、0.45 程度と大きくなっていることが分かった。

- 3) 混合材料特性の違いによる影響を評価した結果、非圧縮性で剛体に近い珪砂を混入したケースと弾塑性体でポアソン比の小さい EPS を混合したケースでは応力-ひずみ関係は、軸差応力のピークまでは固化処理土単体とほぼ同じ形状を示すことが分かった。また、CT 画像の差画像解析からも、ゴムチップ混合以外のケースは、“みかけのポアソン比がほぼ同等であることが分かった。
- 4) X 線 CT 画像によると、三軸試験における“クラック”または明確なすべり線を生じるひずみレベルは、固化処理土のみ≡珪砂混合<EPS ビーズ混合≪ゴムチップの順であり、このことは混合物の物性を反映しており、タイヤチップ粒子の弾性的性質や EPS ビーズの弾塑性的性質が固化処理土の靱性向上に寄与しているものと推察される。
- 5) 以上の結果から、脆性的な変形・破壊性状を示す固化処理土にゴムチップを混合することにより得られる靱性改善効果は、ゴム弾性が大きく影響していることが分かった。

以上の結果を受けて、ゴムチップのような弾性体材料が固化処理土の靱性改善に寄与するイメージをまとめてみた。弾性材料はある方向からの外力を受け圧縮されると、等方弾性体であるために、外力に対する反力や載荷方向以外の方向に等方的に変形しようとする力が発生する(図-14)。その結果、固化処理土内部に分散したゴムチップとゴムチップの間に存在する固化処理土を圧迫する働きが生じているものと考えられる。固化処理土は元来脆性的であるため、小さなひずみレベルでクラックを生じ始める。また、ポアソン比の異なる固化処理土とゴムチップとの間に発生する剥離を起因とクラックも生じ始めるものと考えられる。しかしこのゴムチップの外力に対する反力が供試体内部で作

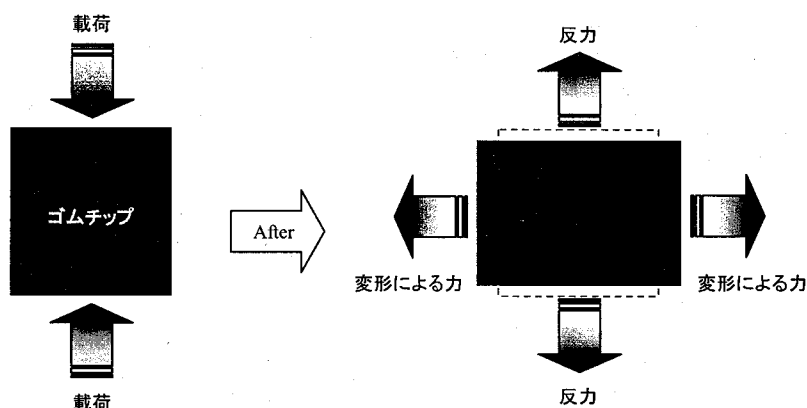


図-14 ゴムチップへの外力の作用と反力

用するため、クラック幅が小さくしたり、クラックの進行を防ぐ働きをしているものと考えられる。また供試体全体のひずみが大きくなるに従い、タイヤチップの応力分担が増え、タイヤチップから発生する供試体内部を拘束する力が大きくなり、応力-ひずみ関係におけるピーク後の急激な強度低下を防いでいるものと推察される。

また言い換えると、弾生体材料は、せん断変形を受けた場合、もとの形に戻ろうとする復元力が働く(図-15)。復元力が作用する結果、すべり面方向に作用する力に対する反力が作用するため、応力-ひずみ関係では軸差応力ピーク後の強度低下が緩やかになると考えられる。

以上のようにゴムチップ混合による固化処理土の靱性改善効果を三軸圧縮試験およびX線CT画像解析から確認することができた。また混合物の物性を変えたケースの実験からは、ゴム弾性の影響をより明確にとらえることができたといえる。それらの結果から、ゴムチップの有する弾性的性質が固化処理土内部でどのように影響しているかの推察を行った。

ただし、これらの図-14や図-15に示したイメージによる、ゴムチップ混合による靱性改善効果のメカニズムは推定に域にとどまっている。今後の研究計画としては、混入材料の粒径を大きくしたケースについて、三軸圧縮試験と産業用X線CTスキャナを併用した試験を行い、三軸圧縮下での内部挙動をより鮮明に可視化することにより、混入材料による挙動をより詳細に検討していくことと、混合物を個別要素、固化処理土を間隙要素としたDEM(個別要素法)などを取り入れることでより明確なメカニズムの解明に努め、普遍的な設計法や性能保障手法を確立していきたいと考えている。

謝 辞

本研究で用いたX線CTスキャナは、熊本大学工学部環境システム工学科岩盤工学研究室が所有するものである。本研究を進めるに当たり、装置の使用のみならず多大なご指導を賜りました菅原勝彦教授、尾原祐三教授に心から厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) (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, 2004.
- 2) Humphrey, D.N., and Manion, W.P.: Engineering properties of tire chips for lightweight fill, Ground, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE, Vol.2, pp.1344-1355, 1992.
- 3) 伊藤弘毅, 御手洗義夫, 深沢健, 岸田隆夫: 管理型廃棄物処分場の遮水工に使用する変形追随性材料の開発 その1—セメント系固化処理土をベースにした遮水材料の開発—, 第38回地盤工学発表会講演集, pp.2433-2434, 2003.7

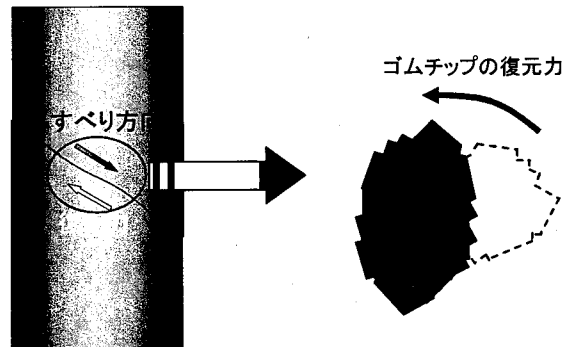


図-15 ゴムチップのせん断変形と復元力のイメージ

- 4) 川合弘之, 岸田隆夫, 御手洗義夫, 安原一哉, アショカ・K・カルモカル: 廃タイヤを利用した複合地盤材料の力学特性, 第38回地盤工学発表会講演集, pp.691-692, 2003.7
- 5) 大信克男, 安原一哉, 小峯秀雄, 村上哲, アショカ・K・カルモカル, 川合弘之: 軽量地盤材料としてのタイヤチップスの非排水せん断特性, 第38回地盤工学発表会講演集, pp.837-838, 2003.7
- 6) Ashoke K Karmokar, Hideo Takeiti, Kazuya Yasuhara, Hiroyuki Kawai: Compressed Scrap Tire Rubber Grain Blocks for Their Use as Lightweight Geomaterials, 第38回地盤工学発表会講演集, pp.835-836, 2003.7
- 7) 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料を利用した変形追随性遮水材料の開発, 第5回環境地盤工学シンポジウム, pp.77-82, 2003.7.
- 8) Ashoke K Karmokar, Hideo Takeiti, Kazuya Yasuhara, Hiroyuki Kawai: Large Scale Triaxial Tests on Segmented Scrap Tire Shreds for Their Use as Lightweight Geomaterials, 第58回土木工学年次講演会概要集, pp.779-780, 2003.9
- 9) 御手洗義夫・川合弘之・安原一哉・菊池喜昭・アショカ・クマル・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.
- 10) 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.
- 11) 小松光栄: ゴムのお話, 日本企画協会, pp.53, 1993
- 12) 大谷順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 椋木俊文: 地盤工学における産業用X線CTスキャナの適用, 土と基礎, No.48, Vol.2, pp.17-20, 2000.

(2006年4月13日受付)