

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.45 NO.2 June 2006

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告(REPORT OF PARI)

第 45 卷 第 2 号 (Vol. 45, No. 2), 2006年 6月 (June 2006)

目 次 (CONTENTS)

1. NOWPHAS波浪観測データを同化させた波浪推算法の開発とその特性の検討
..... 橋本 典明・河合 弘泰・永井 紀彦 3
(Development of Adjoint WAM Model to NOWPHAS Wave Observation Data
..... Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Toshihiko NAGAI)
2. 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化
..... 菊池 喜昭・永留 健・水谷 崇亮 29
(Permeability and Absorption Property Change of Light Weight Soil with the Change of the Fraction of Air Foam
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Taka-aki MIZUTANI)
3. アーク形の矢板とトラスを有する新形式二重矢板護岸構造の水平抵抗性能の評価
..... 菊池 喜昭・北詰 昌樹・水谷 崇亮・恩田 邦彦・平嶋 裕・木下 雅敬・森 玄 51
(Lateral Resistance of Arc Shaped Double Sheet Wall with Truss Structure
Yoshiaki KIKUCHI, Masaki KITAZUME, Taka-aki MIZUTANI, Kunihiko ONDA, Yutaka HIRASHIMA, Masanori KINOSHITA, Gen Mori)
4. ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム
..... 菊池 喜昭・永留 健・御手洗 義夫 87
(Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Yoshio MITARAI)
5. 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性
..... 菊池 喜昭・中島 研司・木村 淳治・水谷 崇亮105
(Solidification of Granulated Blast Furnace Slag used for Port Construction
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kenji NAKASHIMA, Junji KIMURA, Taka-aki MIZUTANI)
6. 深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案
..... 高橋 英紀・山脇 秀仁・北詰 昌樹・石橋 伸司135
(Effects of Deep Mixing Method on Liquefaction Prevention and Proposal on New Arrangement of Grid-type Improvement
..... Hidenori TAKAHASHI, Shuuji YAMAWAKI, Masaki KITAZUME, Shinji ISHIBASHI)
7. 耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性
..... 宮田 義一・若林 徹・濱田 秀則169
(Cathodic Protection Characteristics of Marine Steel Structure Sheathed with Seawater Resistant Stainless Steel
..... Yoshikazu MIYATA, Toru WAKABAYASHI, Hidenori HAMADA)

ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム

菊池 喜昭*・永留 健**・御手洗 義夫***

要 旨

本研究では、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを用いて、ゴムチップ混合固化処理土のせん断変形時における内部構造の変化と透水係数の変化を検討した。ここでは、X 線 CT スキャナを用いて、供試体の密度分布を求め、ゴムチップ混合固化処理土供試体の内部構造やせん断中の亀裂の進展状況を非破壊で観察した。また、圧縮せん断のいくつかの段階で透水試験を行い、せん断の進行に伴う透水係数の変化について検討した。

ゴムチップ混合固化処理土の工学的性質についてわかった新たな知見は以下のとおりである。

- 1) ゴムチップの体積混入率が 29%程度以下であれば、ゴムチップは固化処理土中に均一に混入させることができ、また、個々のゴムチップは固化処理土中に浮いた状況となる。
- 2) ゴムチップを混入させることで、固化処理土をせん断した時に発生する亀裂の状態を変えることができる。すなわち、固化処理土では、大きな亀裂が数本直線状に入るのに対し、ゴムチップ混合固化処理土をせん断したときに生じる亀裂は多数網目状となり、ひずみの増加とともに新しい亀裂が次々と発生する傾向にある。
- 3) ゴムチップ混合固化処理土では、せん断変形過程での透水係数の上昇が、固化処理土に比べて小さくなる傾向にある。

キーワード：X 線 CT スキャナ，画像解析，ゴムチップ，固化処理土，一軸圧縮試験，三軸透水試験

* 地盤・構造部基礎工研究室長

** 基礎工研究室受託研修生(東亜建設工業㈱)

*** 東亜建設工業㈱技術研究開発センター

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：0468-44-5057 Fax：0468-44-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation

Yoshiaki KIKUCHI*
Takeshi NAGATOME**
Yoshio MITARAI***

Synopsis

The purpose of this study is to evaluate both the failure and permeability properties of cement treated clay with tire chips under shear deformation using a micro focus X-ray CT scanner. It is possible to observe internal structure and crack growth of cement treated clay with tire chips using X-ray CT scanner. And then, density distribution of cement treated clay with tire chips was investigated based on the result of CT scanning with image processing analysis. Following conclusions are drawn from this study:

- 1) Tire chips are found to be well mixed in cement treated clay if the volume of tire chips for cement treated clay is less than around 29%. In addition, the tire chip is isolated and suspended the matrix of cement treated clay.
- 2) It is possible to change crack form of cement treated clay under shear deformation by mixing tire chips. That is, the cracks in cement treated clay are almost straight and their thickness widened as axial strain increased. In contrast, the cracks in the cement treated clay with tire chips are thin and developed successively in a reticulated pattern as axial strain increased.
- 3) The coefficient of permeability of cement treated clay with tire chips under shear deformation is smaller than that of without tire chips.

Key Words: X-ray CT scanner, image processing analysis, tire chips, cement treated clay, unconfined compression test, permeability test by triaxial apparatus

* Head, Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Trainee of Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Researcher, Research and Development Center, Toa Corporation
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5057 Fax : +81-468-44-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

目 次

要 旨	87
1.まえがき	91
2.既往の研究.....	91
2.1 ゴムチップ混合固化処理土に関する研究.....	91
2.2 X線 CT スキャナを利用した研究	92
3.試料の作製方法.....	92
4.ゴムチップ混合固化処理土の内部構造と破壊メカニズム	92
4.1 供試体の作成	92
4.2 GL 値による湿潤密度の推定.....	93
4.3 ゴムチップの混合程度の評価	93
4.4 一軸圧縮過程における内部構造の変化.....	95
5. ゴムチップ混合処理土の圧縮せん断時の変形透水特性の変化	98
5.1 供試体および実験方法	98
5.2 一軸圧縮過程における透水特性の変化.....	99
6. 破壊メカニズムの考察	101
7. 結論	102
8. あとがき.....	102
謝辞.....	102
参考文献	102

1. まえがき

一般に、浚渫土にセメントを混合して作製する固化処理土の力学挙動は、脆性的な挙動を示すことが知られている。このような性質を示す固化処理土に、古タイヤをシュレッド状に粉砕したゴムチップを混合することによって、靱性を向上させる効果があることが最近の研究でわかってきており、剛性と遮水性を持つ変形追随性地盤材料として注目されている(安原・菊池ら, 2004 ; 御手洗ら, 2005)。このことから、ゴムチップを混合した固化処理土は、沿岸域に建設される管理型廃棄物処分場の廃棄物埋立護岸の遮水性材料として利用されつつある(安原・岸田ら, 2004)。この材料の特徴をより明確にするには、変形時の内部構造の変化にゴムチップが及ぼす影響や変形過程での透水特性の変化について詳細に検討することが必要である。

一方、近年のコンピュータの発達に伴い、医療分野においてX線CTスキャナ装置が導入され、画像診断技術として多く利用されている。この技術は、対象物内部の密度分布を非破壊かつ三次元的に評価可能であることから、産業分野にも普及しており、その用途も増えている。地盤工学の分野では、ゴムチップ混合固化処理土のように不均質な材料の内部構造の把握に適した装置であると考えられる。

本研究では、まず、固化処理土と比べて靱性があると考えられるゴムチップ混合固化処理土の力学的性質を明らかにするために、一軸圧縮過程における内部構造の変化をX線CTスキャナによって評価した。ここでは、X線CT画像を画像解析することにより、ゴムチップ混合固化処理土内部の状況を可視化すると共に、密度分布を把握し、固化処理土の力学挙動との比較を行うことによって、ゴムチップ混合固化処理土の力学特性について検討した。さらに、ゴムチップ混合固化処理土のせん断変形時での透水特性の変化を明らかにするために、一軸圧縮過程における内部構造と透水係数の変化をX線CTスキャナおよび透水試験によって評価した。なお、今回用いたX線CTスキャナは、地盤工学への応用を目的として平成16年3月に港湾空港技術研究所で導入したマイクロフォーカスX線CTスキャナ装置(SMX-225CT: 島津製作所)である(菊池ら, 2006)。

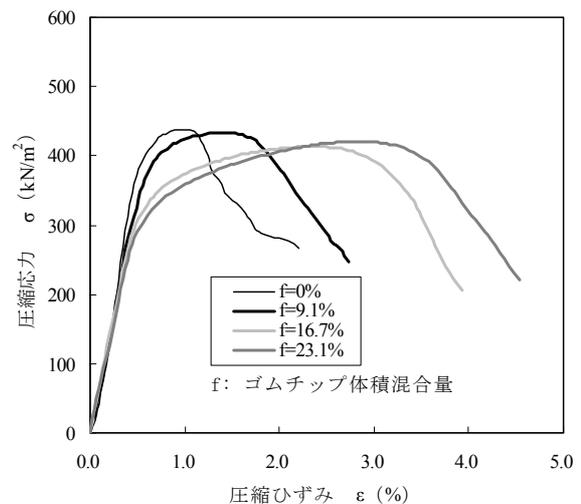
2. 既往の研究

2.1 ゴムチップ混合固化処理土に関する研究

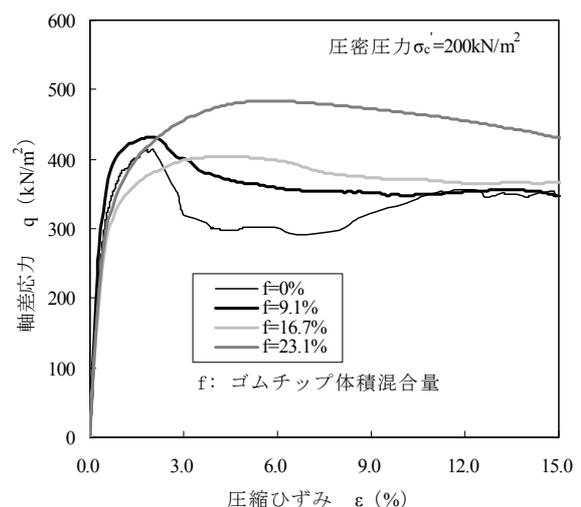
古タイヤや古タイヤゴムチップを地盤材料として有効

利用する研究は、主にアメリカやカナダで1990年代前半から行われている。我が国では、Ashoka・安原らの研究グループ(Ashoka et al., 2002)が2001年ごろから古タイヤゴムチップの力学特性について研究し、地盤材料や複合材料としての幾つかの検討を行ってきた。

安原・菊池ら(2004)は、浚渫粘土や軟弱な建設残土から作製される固化処理土にゴムチップを混合することによって、固化処理土の粘り強さが向上すると報告している。図-1にゴムチップ混合量を変えたゴムチップ混合固



(a) 一軸圧縮試験結果の一例



(b) 三軸圧縮試験(圧密非排水)結果の一例

図-1 応力-ひずみ関係

化処理土の一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の結果を示す(御手洗ら, 2005). この実験では, ゴムチップ混合量(=(混合したゴムの体積)/(ゴムチップ固化処理土全体の体積))を0%から23%まで変化させている. これからわかるように, ゴムチップ混合量が多くなるにつれて破壊ひずみが大きくなり, さらに, 三軸圧縮試験では, 破壊後の軸差応力の低下速度が遅くなるなど靱性改良効果が見られる.

このようなことから, ゴムチップ混合固化処理土が変形追随性を持つ遮水性材料として利用するための研究が行われている. ただし, これまでの研究では力学挙動や配合に関するものが主であり, 破壊メカニズムを詳細に検討した研究が少ないのが現状である(菊池ら, 2005; 永留・菊池, 2005).

2.2 X線CTスキャナを利用した研究

1973年英国EMI社がX線CTスキャナを開発して以来, その装置は医療分野で急速に普及していった. 産業分野にもこの技術は応用され, その用途は増えつつある. 中山ら(1995)は医療用のX線CTスキャナを用いて, 地盤材料や岩盤材料を対象として試料内部の空隙やクラック, 混入物などの規模や位置を三次元的に表し, 試料の物性の評価を行った. 菅原ら(1998)は, 工学材料をより定量的に評価するために医療用よりもエネルギーの高いX線を用いる産業用のX線CTスキャナを用いて, 岩盤の透水現象を定量的に評価し, その有用性を示している. 地盤工学においては産業用X線CTスキャナを利用して, 地盤の内部物性や破壊現象, 浸透現象を評価する研究が報告されている(大谷ら, 2002; Otani, 2003).

以上のように, X線CTスキャナを用いた地盤工学的研究は, 複合地盤材料の挙動に関する研究や密度変化を伴う挙動を把握する上で重要なツールとなることが期待されている.

3. 試料の作製方法

本研究で対象とした試料は, ゴムチップの体積混合量を変えた幾つかの種類固化処理土である. 表-1に用いた各種材料の物性値を示す.

使用した粘土は, 東京湾で浚渫された海成粘土である. その粘土に所定の含水比となるように海水を加え調整泥土とし, 普通ポルトランドセメントを加えミキサーで5分間練り混ぜて固化処理土を作製し, 更にその固化処理土に平均粒径約2mmのゴムチップを3分間手練りで混合, 攪拌してゴムチップ混合固化処理土を作製した.

ゴムチップは, シュレッド状に破碎したものであるた

表-1 使用材料の物性値

使用材料		物性値	
原料土	東京湾浚渫土	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.716
		液性限界 w_L (%)	100.3
		塑性限界 w_P (%)	42.2
固化材	普通ポルトランド	粒子密度 ρ_c (g/cm^3)	3.16
使用水	海水	海水密度 ρ_w (g/cm^3)	1.03
ゴムチップ	破碎古タイヤ	粒子密度 ρ_r (g/cm^3)	1.15



写真-1 ゴムチップ(平均粒径2mm)

め, 粒子形状は写真-1に示すように不定形で凹凸な形状となっている. また, ゴム自体は, 引張り強さ:15~35MN/m², 弾性係数:1~5MN/m², ポアソン比:0.5, 伸び性能:300~600%という物性を有している(小松, 1993).

それぞれの試料は, 直径50mm, 高さ100mmの軽量モールドに充填し, 上面を水平に均した後にラップで覆って, 温度20±2°C, 湿度95%以上の養生容器に入れて約1ヶ月間養生した.

4. ゴムチップ混合固化処理土の内部構造と破壊メカニズム

4.1 供試体の作成

ここで対象とした試料は, ゴムチップ混合量を変えた3種類の固化処理土供試体で, どの供試体も固化処理土部の一軸圧縮強度を約300kN/m²となる配合とし, 25日間養生した供試体である. 各ケースの1m³あたりの配合表を表-2に示す. このときの配合は, 混合土作製時にゴムチップが均等に混ざり, 施工時に混合処理土が適当な流動性を確保できる条件を想定して決めたものである. なお, ここでのゴムチップ混合量は, 全体の体積に対するゴムチップの体積を表したものである. また, Sample-Cの配合は, ゴムチップ混合量として限界に近いと考えられる量である. 供試体の寸法は, 直径50mm, 高さ100mmである. 実測された各供試体の湿潤密度を表-3に示す. どの供試体も湿潤密度の実測値の方が基本配合より小さい値を示している. これは, 供試体作製時に若干の空気が混

表-2 1m³あたりの配合表

	Sample-A (ゴム0%)		Sample-B (ゴム16.7%)		Sample-C (ゴム28.6%)	
	質量 (kg)	体積 (L)	質量 (kg)	体積 (L)	質量 (kg)	体積 (L)
含水比調整土	1225.7	980.5	1021.4	817.1	875.5	700.4
セメント	61.5	19.5	51.2	16.2	43.9	13.9
ゴムチップ	—	—	191.7	166.7	328.6	285.7
全体	1287.2	1000.0	1264.3	1000.0	1248.0	1000.0

表-3 各供試体の実測密度

	湿潤密度 (g/cm ³)
Sample-A (ゴム0%)	1.284
Sample-B (ゴム16.7%)	1.257
Sample-C (ゴム28.6%)	1.239

ざったことなどが原因として考えられる。

4.2 GL 値による湿潤密度の推定

X線CTスキャナでは、対象物に多方向からX線を照射してその物質のX線吸収量を測定し、その結果を元に、voxelと呼ばれる要素ごとにグレーレベル(以下GL値)と呼ばれる数値を求める。GL値はX線の吸収率を示すものである。このため、GL値と密度の間には非常に強い正の相関があり、密度が高いほどGL値が高い値となる(菊池ら, 2006)。図-2は、今回対象とした固化処理土について平均密度と以下に示す補正を行ったのちのGL値の平均値の関係を示したものである。この図よりわかるように、GL値と密度に線形の関係がある。

本研究では、高さ10cmの供試体の初期状態および一軸圧縮過程における密度変化をX線CTスキャナによって計測した。このような場合、装置の特性からCT撮像を行ったときに、均一な密度の試料であっても高さ方向に違ったGL値が計測される。つまり、同じ密度の試料でもGL値が高さ方向に一定値とならない。そこで、GL値から密度を適切に求めるためには、あらかじめ密度が均一である既知な材料のCT撮像を行い、GL値の高さ方向の変化挙動を把握して、密度とGL値の関係を補正する必要がある。ここでは、固化処理土と密度がほぼ等しくて、高さ方向にほぼ均一な密度となっている黒ゴム供試体($\rho=1.516\text{g/cm}^3$)のGL値の高さ方向の分布をあらかじめ求めることにより、GL値と密度の関係を補正することにした。図-3は、直径50mm、高さ100mmの黒ゴム供試体を、固化処理土のCT撮像と同じ条件で、voxelの厚さを1mmとして高さ方向に1mmごとにCT撮像し、全体にわたり計測した供試体の高さ方向GL値分布である。今回の解析では、得られた高さ方向GL値分布を4次曲線で近似し、各高さのGL値が一定値となるように補正係数を決定した。

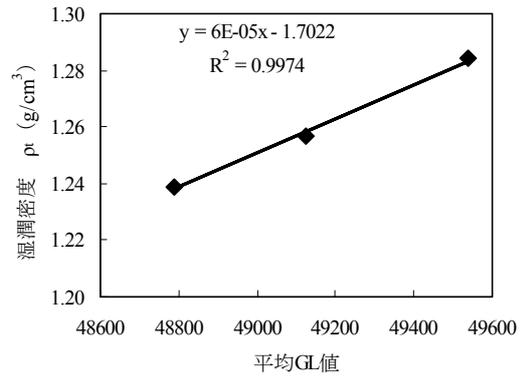


図-2 平均 GL 値と湿潤密度の関係

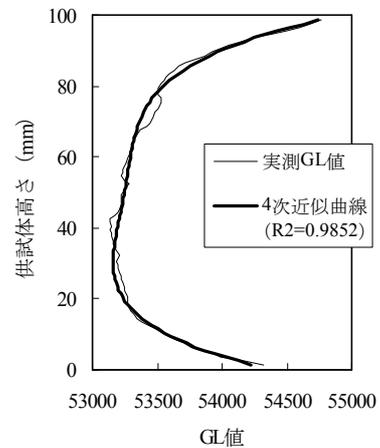


図-3 平均 GL 値の高さ方向分布

なお、この高さ方向の補正係数は、対象物の大きさや撮像条件(X線管の管電圧など)によって変化することから、今回の条件でのみ成立する補正係数であると考えてよく、他の条件で撮像する場合には、別の補正が必要となる。

なお、図-2に示したGL値と湿潤密度の関係は、上記の高さ方向のGL値の補正をした後の固化処理土供試体の平均GL値と湿潤密度の関係であり、図中の回帰直線は次式のとおりである。

$$\rho_t = 6.03 \times 10^{-5} GL_{\text{ave}} - 1.702 \cdots (1)$$

ここで、 ρ_t : 供試体の湿潤密度、 GL_{ave} : 高さ方向の補正を行った後のGL値の供試体全体の平均値である。

今回は、式(1)を用いて各断面の平均密度を算出した。

4.3 ゴムチップの混合程度の評価

図-4は、直径50mmのソフトモールドに入れたゴムチップ

プの横断面CT画像である。CT画像は白黒濃淡画像として表示しており、明るい部分が高密度領域、暗い部分が低密度領域を表している。画像中にある多数の白い粒状のものがゴムチップである。ゴムチップ粒子が大きく不定形であるため、多くの空隙(黒色領域)があることも確認できる。

今回対象とした3種類の固化処理土供試体中央部の一軸圧縮試験前の横断面画像を図-5に、拡大画像を図-6に示す。対象物の拡大倍率は、X線管とステージ、X線管とX線テレビジョン装置の距離関係を調整することによって変えることができ、拡大画像をとるためには、X線管

とステージの距離を小さく、ステージとX線テレビジョン装置の距離を長くすればよい(菊池ら, 2006)。

図-5、図-6の各供試体の断面画像をみると、明色の高密度領域と暗色の低密度領域がまばらに分散している。各供試体の横断面画像にある明色の領域はセメントの塊や粘土中に入った貝殻のかけらで、暗色の領域は供試体作製時に混ざった気泡であることが考えられる。また、図-5、6の(b)、(c)にある粒状のやや暗色の領域は、ゴムチップであると考えられる。つまり、調整泥土とセメントの混合密度が 1.29g/cm^3 であるのに対し、ゴムチップの密度が 1.15g/cm^3 であることからゴムチップはやや暗く表示されると考えられる。

次に、ゴムチップと推定できる低密度領域を黒色、その他の領域を白色で表すためにCT画像を2値化処理した。2値化処理とは、濃淡画像を背景と対象の2値(白と黒)であらわすことによって、画像の中から対象とするものを抽出する方法である。今回はゴムチップの体積混合量がわかっているため、対象物の面積比率が明らかなきに有効であるp-タイル法(田村 2002)を用いて、背景と対象の境のしきい値を設定し、画像解析を行った。

図-7が図-5(b)、(c)の2値化処理画像で、図-8がゴムチッ

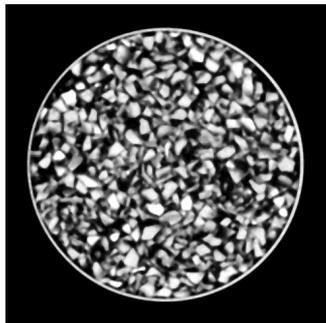
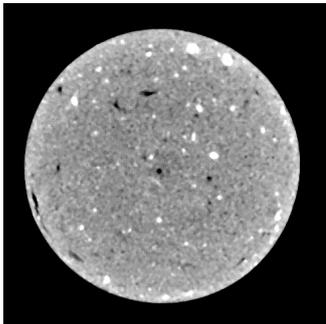
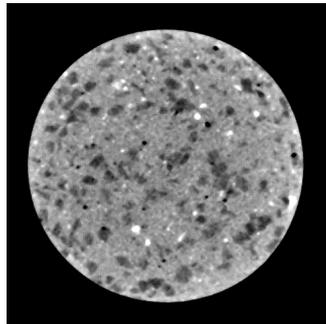


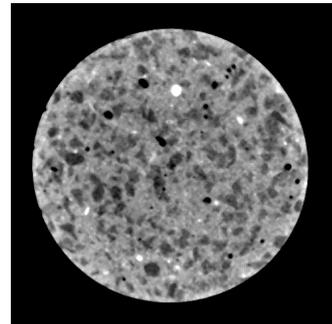
図-4 ゴムチップの CT 画像



(a) Sample-A(ゴム 0%)

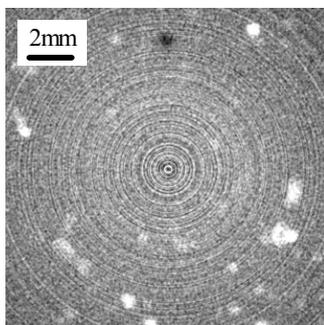


(b) Sample-B(ゴム 16.7%)

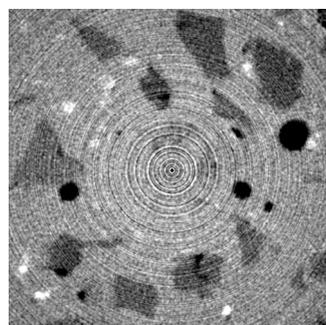


(c) Sample-C(ゴム 28.6%)

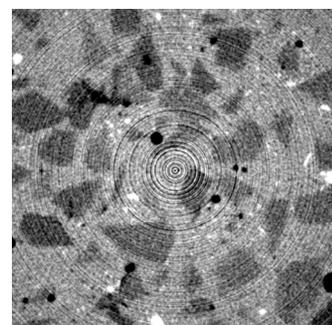
図-5 各供試体の横断面 CT 画像



(a) Sample-A(ゴム 0%)

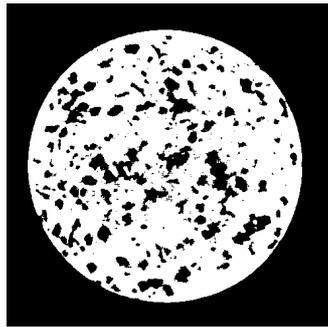


(b) Sample-B(ゴム 16.7%)

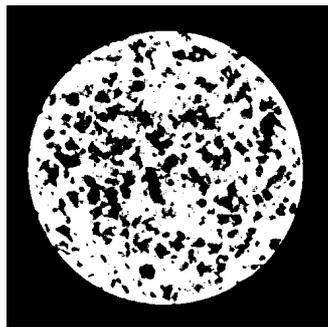


(c) Sample-C(ゴム 28.6%)

図-6 各供試体の横断面拡大 CT 画像

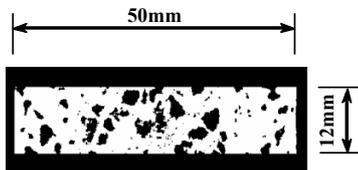


(a) Sample-B(ゴム 16.7%)



(b) Sample-C(ゴム 28.6%)

図-7 2 値化処理画像(横断面)



(a) Sample-B(ゴム 16.7%)



(b) Sample-C(ゴム 28.6%)

図-8 2 値化処理画像(縦断面)

プ混合固化処理土供試体の中央付近(供試体高さ50mm±6mm)の縦断面2値化処理画像である。この縦断面画像は、横断面画像を重ね合わせて作成したものである。これらの図では、ゴムチップとゴムチップよりも密度が低い部分が黒色で示されている。図-7、8の2値化処理画像をみると、ゴムチップ混合量の少ないSample-Bの方がゴムチップは独立して存在しているようにみえるが、どの画像においてもゴムチップとみられる領域はおおむね分散して存在しており、ゴムチップ同士が接触している

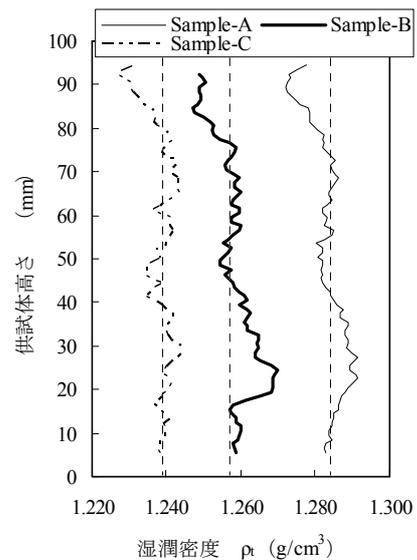


図-9 高さ方向密度分布

ものは比較的少ないようである。

図-9にGL値より推定した各供試体の高さ方向密度分布を示す。密度分布は供試体高さ1mmごとに平均断面密度を計測しており、図中にある点線は各供試体の外部計測による体積と質量から求めた平均密度である。この密度分布から各供試体の高さ方向の密度は、Sample-Aが1.272～1.292g/cm³、Sample-Bが1.247～1.270g/cm³、Sample-Cが1.227～1.244g/cm³の範囲で分布していると判断される。このように、固化処理土の密度のばらつきの程度とゴムチップ混合固化処理土の密度のばらつきの程度はほぼ同じである。このようにゴムチップの混入によって密度のばらつきが大きくなっていないことから、ゴムチップは均質に混入されていると判断できる。

4.4 一軸圧縮過程における内部構造の変化

写真-2に示すX線CT専用載荷装置を用いて、作製後25日の供試体の一軸圧縮試験を実施した。X線CT専用載荷装置は、最大直径250mm、高さ734mm、重量約235Nである。この装置はX線試験室内に設置し、載荷試験を行うことができるように設計されている。この装置を用いることにより三軸圧縮試験や三軸透水試験をX線CT装置内で行うことが可能である。

実験では、供試体をX線CT専用載荷装置にセットし、初期状態から一軸圧縮過程(ひずみ速度1.0%/min)で圧縮ひずみ約0.5%ごとにX線CTスキャナで逐次CT撮像を行うことにより供試体内部状況の変化を観察した。なお、一軸圧縮は変位制御で行い、CT撮像中はひずみ速度を0%とし、CT撮像終了後に所定のひずみ速度にもどして載荷

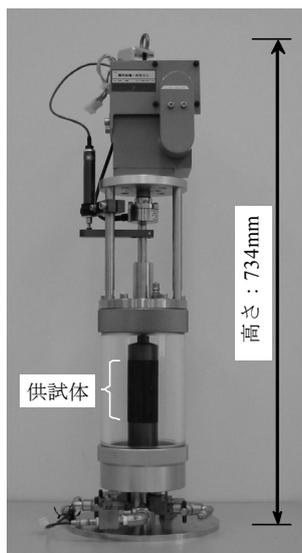


写真-2 X線CT専用載荷装置

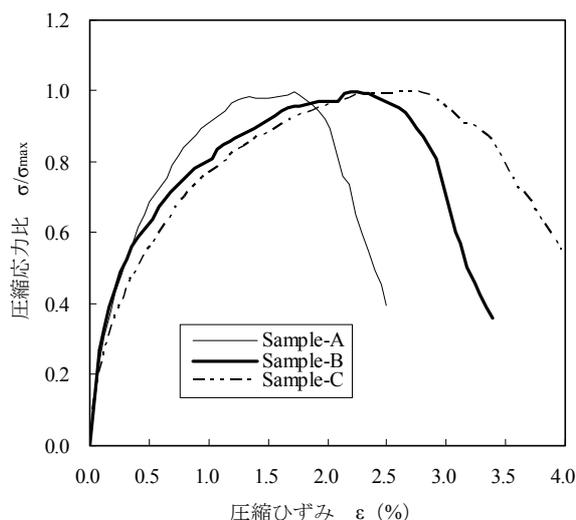


図-11 応力比-ひずみ関係

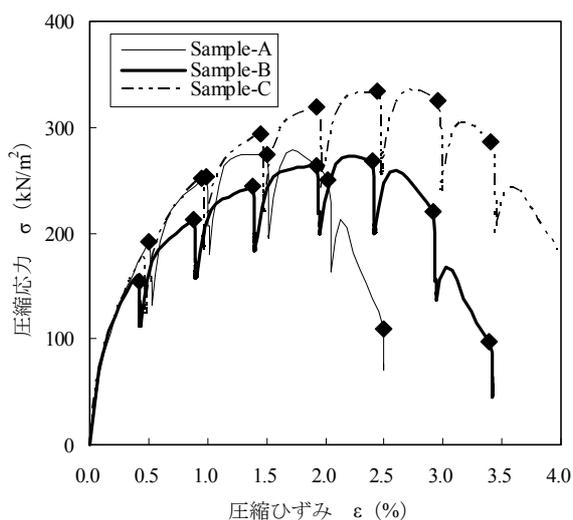


図-10 応力-ひずみ関係

を続けるという手順を繰り返して実験を行った。

図-10に一軸圧縮試験から得られた各供試体の応力-ひずみ曲線を示す。図中の◆印の部分には、CT撮像を行うために圧縮を中断した箇所である。◆印直後の応力低下は、CT撮像中の供試体にリラクゼーションが生じていることをあらわしているが、CT撮像後の再圧縮によって圧縮中断前の応力-ひずみ曲線の延長上に戻っていることがわかる。

図-11にCT撮像時の応力変化を除いた圧縮応力比 (σ/σ_{max}) とひずみの関係をまとめた。図-10, 11の結果をみると、ゴムチップ混合量が多いほどピーク強度を示す破壊ひずみが大きくなっていること、最大圧縮強度が変

わらないことなどがわかる。また、固化処理土がピーク強度に達した後、急激に強度低下をおこなっているのに対し、ゴムチップ混合固化処理土の強度はピーク強度後の強度低下がやや緩やかになっている。

図-12に各供試体中央部の一軸圧縮過程における初期、応力ピーク付近、応力ピーク後の横断面画像を示す。まず、図-12(a)の固化処理土(Sample-A)の横断面画像をみると、初期($\epsilon=0\%$)から応力ピーク付近($\epsilon=1.5\%$)にかけては、みかけの変化はほとんどない。その後、応力がピークとなった直後あたり($\epsilon=2.0\%$)で亀裂が入り、ひずみの増加とともにいった亀裂が大きくなっていく($\epsilon=2.5\%$)。次に、図-12(b), (c)のゴムチップ混合固化処理土(Sample-B, Sample-C)の横断面画像をみると、固化処理土同様、初期($\epsilon=0\%$)から応力ピーク付近(Sample-B: $\epsilon=1.9\%$, Sample-C: $\epsilon=2.4\%$)まで画像中の変化はあまりないように見える。その後、応力ピーク直後あたり(Sample-B: $\epsilon=2.4\%$, Sample-C: $\epsilon=3.0\%$)で亀裂が入り、ひずみの増加とともに応力ピーク直後ではみられなかった多数の亀裂も入っている(Sample-B: $\epsilon=2.9\%$, Sample-C: $\epsilon=3.4\%$)。ただし、固化処理土の亀裂が供試体側面から中心に向かって数本だけ直線状に入っているのに対し、ゴムチップ混合固化処理土の亀裂は、供試体中心から多数網目状に入っていることが観察できる。

また、図-13に各供試体の応力ピーク後(Sample-A: $\epsilon=2.5\%$, Sample-B: $\epsilon=3.4\%$, Sample-C: $\epsilon=3.4\%$)の三次元画像を示す。三次元画像は横断面画像を重ね合わせて作成したものである。図からわかるように供試体全体でも固化処理土供試体では亀裂が直線状に入っているのに対し、

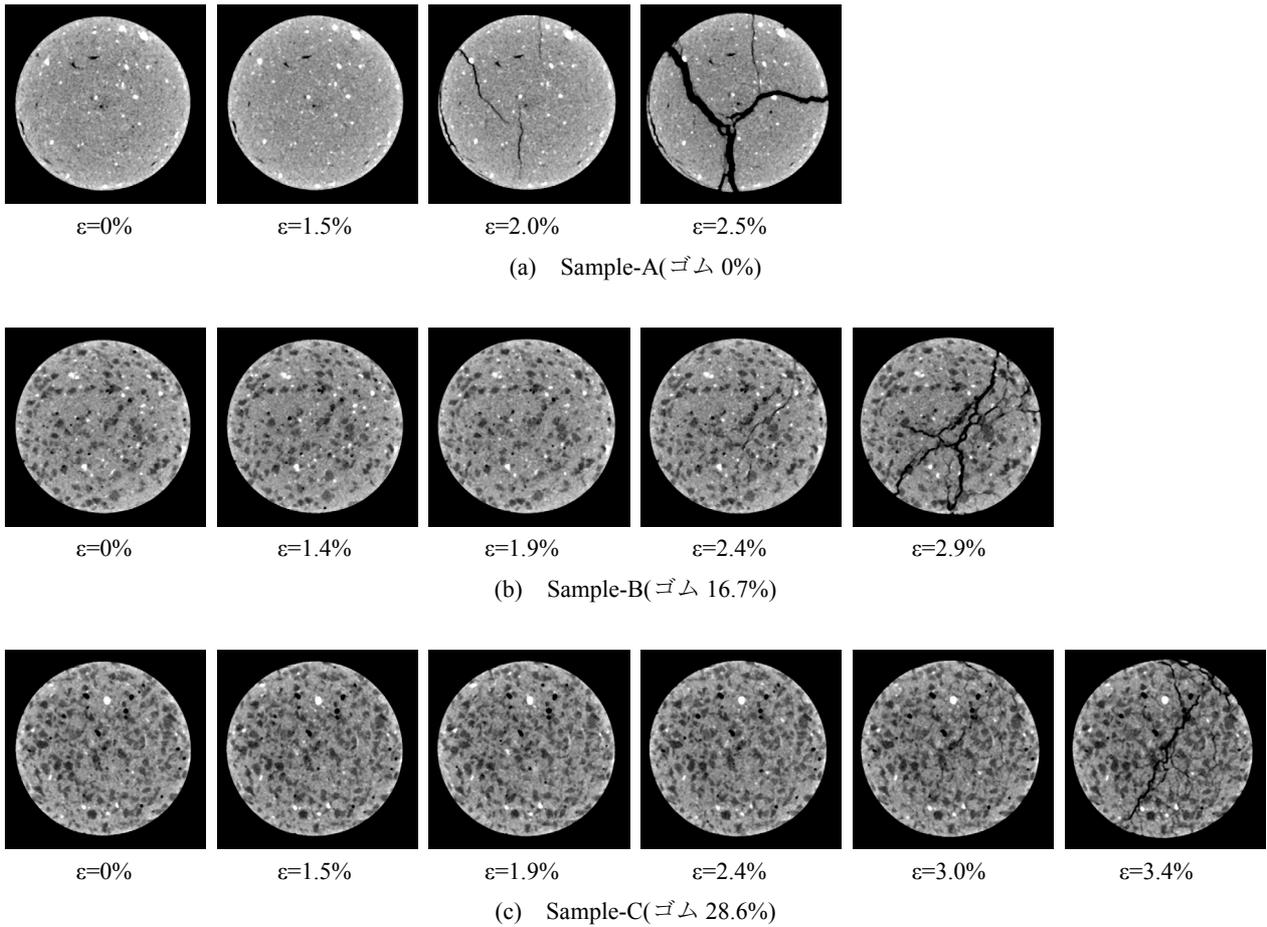


図-12 各供試体の一軸圧縮過程における横断面 CT 画像

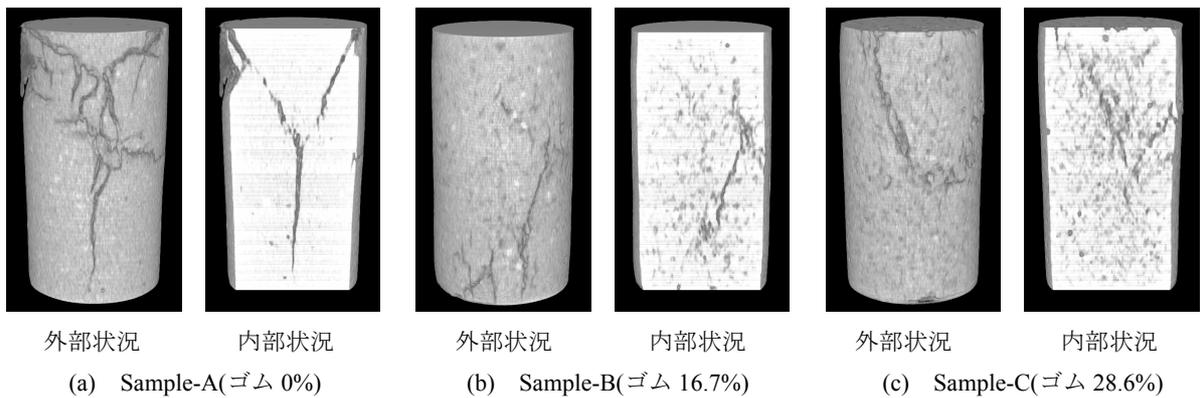


図-13 各供試体の応力ピーク後における三次元画像

ゴムチップ混合固化処理土供試体では亀裂が網目状に入っていることが確認できる。

以上のように亀裂の種類が異なってあらわれているのは、ゴムチップの存在によるものと推測される。

次に、各供試体の一軸圧縮過程における高さ方向の密

度分布を図-14に示す。高さ方向密度分布は、供試体高さ1mmごとの断面密度を計測した。図-14(a)の固化処理土(Sample-A)の密度分布をみると、供試体の密度は初期から応力ピーク付近($\epsilon=2.0\%$)まであまり変化していない。その後、供試体は応力がピークとなった後に上部を中心

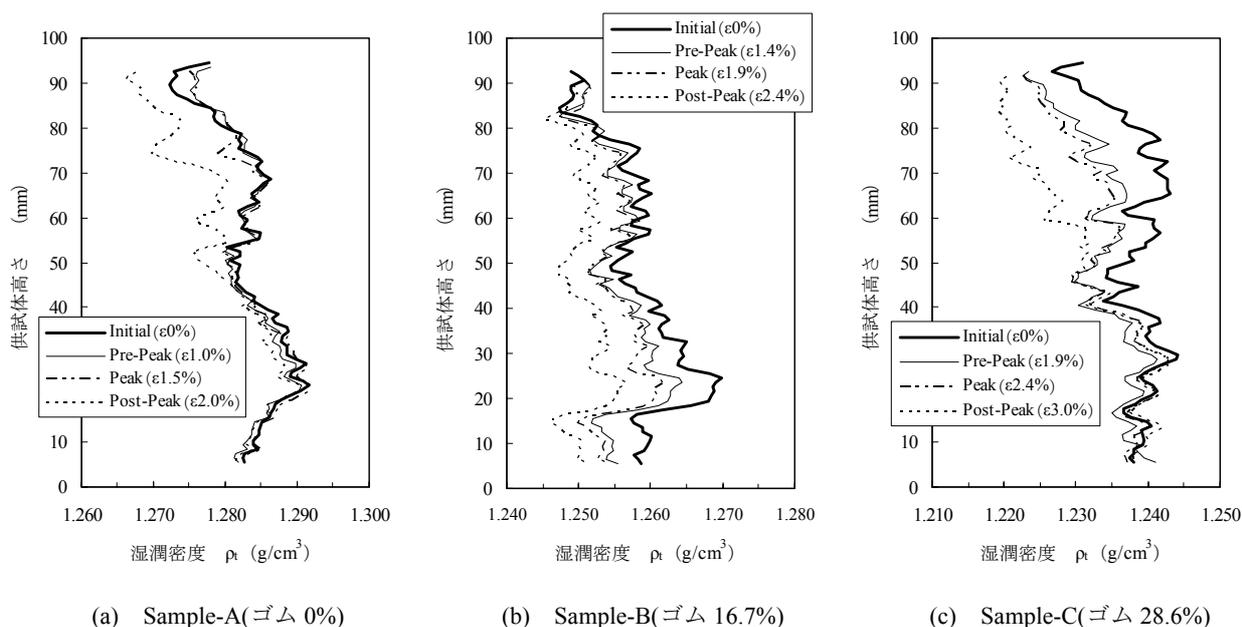


図-14 各供試体の一軸圧縮過程における高さ方向密度分布

に大きな亀裂が発生し、供試体上部の密度が低下した。次に、ゴムチップ混合固化処理土の密度分布をみると、図-14(b)のSample-B(ゴム量：16.7%)の密度分布は、全体的にせん断初期から徐々に密度が低下している。図-14(c)のSample-C(ゴム量：28.6%)では、供試体下部で密度変化があまりみられないが、供試体上部ではSample-Bと同様にせん断の初期から密度が低下する傾向がみられた。

5. ゴムチップ混合処理土の圧縮せん断時の変形透水特性の変化

5.1 供試体および実験方法

ここで対象とした試料は、ゴムチップ混合量を変えた2種類の固化処理土供試体で、どちらの供試体も固化処理土部の一軸圧縮強度を約500kN/m²となる配合とした。各ケースの1m³あたりの配合表を表-4に示す。供試体の寸法は、直径50mm、高さ100mmである。実測された各供試体の湿潤密度を表-5に示す。

ここでは、固化処理土とゴムチップ混合固化処理土の圧縮過程における透水係数の変化を調べるために、圧縮過程のいくつかのポイントで透水試験を実施した。用いた試験装置は、写真-2に示すX線CT専用載荷装置である。

一連の試験は、軽量モールドより取り出した供試体をメンブレンでシールし、X線CT専用載荷装置にセットした後実施した。圧縮は拘束圧をかけない状態で、

表-4 1m³あたりの配合表

	Sample-D (ゴム0%)		Sample-E (ゴム16.7%)	
	質量 (kg)	体積 (L)	質量 (kg)	体積 (L)
含水比調整土	1199.0	974.8	999.2	812.3
セメント	79.6	25.2	66.4	21
ゴムチップ	—	—	191.7	166.7
全体	1278.6	1000.0	1257.3	1000.0

表-5 各供試体の実測密度

	湿潤密度 (g/cm ³)
Sample-D (ゴム0%)	1.270
Sample-E (ゴム16.7%)	1.251

透水試験は、水頭差をかけて供試体内に通水させる必要があるため、圧力室に圧力をかけて試験を行った。すなわち、具体的な手順としては、供試体を載荷装置にセットした状態でまず初期状態のCT撮像を行い、次にセル圧を40kPaかけて供試体を安定させて、供試体下面に通じるビュレットに20kPaの圧力をかけることで動水勾配を20として透水試験を実施した。その後、供試体下面の水圧とセル圧を開放して、所定の圧縮ひずみまで圧縮した。このように、CT撮影、透水試験、圧縮という手順を圧縮ひずみが15%になるまで数回繰返し行った。なお、一軸圧縮過程でのCT撮像および透水試験は、供試体への載荷を止めた状態で実施した。

5.2 一軸圧縮過程における透水特性の変化

図-15に一軸圧縮試験から得られた各供試体の応力-ひずみ曲線を示す。図中の◆印の部分は、CT撮像および透水試験を行うために载荷を止めた箇所である。◆印直後の応力低下は、CT撮像や透水試験の間に供試体にリラクゼーションが生じていることをあらわしている。この結果をみると、圧縮ひずみ1%付近でゴムチップ混合固化処理土の曲線の方が延性のある傾向を示し、ピーク強度を示す破壊ひずみは、Sample-Dで1.6%、Sample-Eで2.6%とゴムチップを混合させたほうが大きくなっている。

図-16 に各供試体中央部の一軸圧縮過程における横断

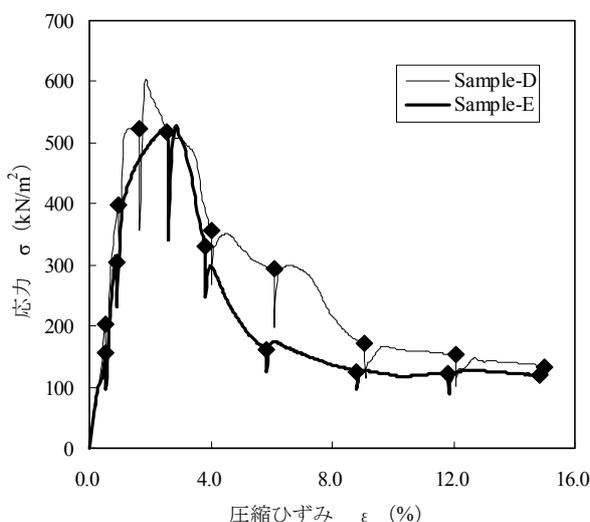


図-15 応力-ひずみ関係

面画像を示す。図をみると、固化処理土(Sample-D)は初期(ε=0%)から応力ピーク付近(ε=1.6%)まで画像中の変化はほとんどないように見える。その後、応力ピーク後(ε=4.0%)に直線状の亀裂が発生しており、それらの亀裂がひずみの増加とともに大きく開いている様子が観察された。これに対し、ゴムチップ混合固化処理土(Sample-E)については、初期(ε=0%)から応力ピーク前(ε=1.1%)まではそれほど変化がみられないものの、応力ピーク付近(ε=2.6%)で微細な亀裂が発生している。その後、ひずみの増加とともにゴムチップ混合固化処理土の亀裂は多数網目状に発生している。各々の破壊形態は、図-14の結果と同じ傾向であるが、この試験では供試体がメンブレンで覆われている分だけ亀裂の幅が小さくなっている。

これらの状況をより詳細に表示した各供試体中央部の拡大画像を図-17に示す。拡大画像をみると、図-16の画像と同様に、固化処理土の亀裂は直線状に数本発生しており、ゴムチップ混合固化処理土の亀裂は多数網目状に発生している。特に、それぞれの応力ピーク付近である、Sample-Dのε=1.6%とSample-Eのε=2.6%とを比較すると、Sample-Dでは亀裂が生じていないのに対し、Sample-Eではゴムチップと固化処理土の境界付近から微細な亀裂が発生している。Sample-Eについては、その後もゴムチップの周辺からの亀裂が多数発生していく傾向にあり、Sample-Dに見られるような大きな亀裂は発生していないことがわかる。

図-18に、各供試体の一軸圧縮過程における三次元画像を示す。この図からも、固化処理土の亀裂は全体的に直

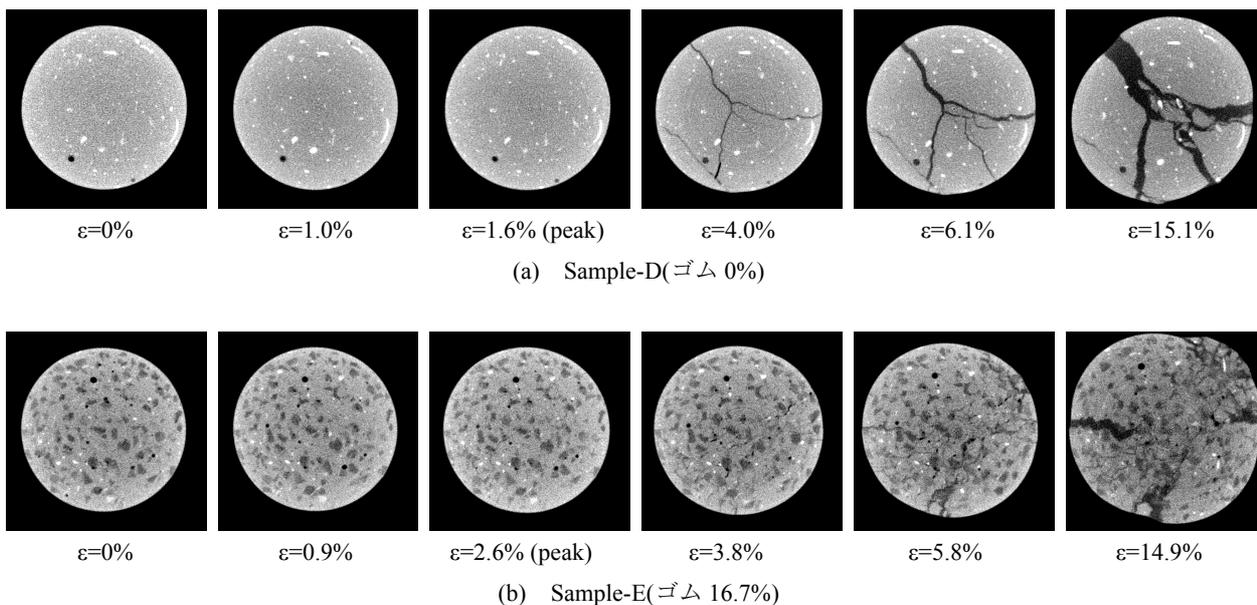


図-16 各供試体の一軸圧縮過程における横断面 CT 画像

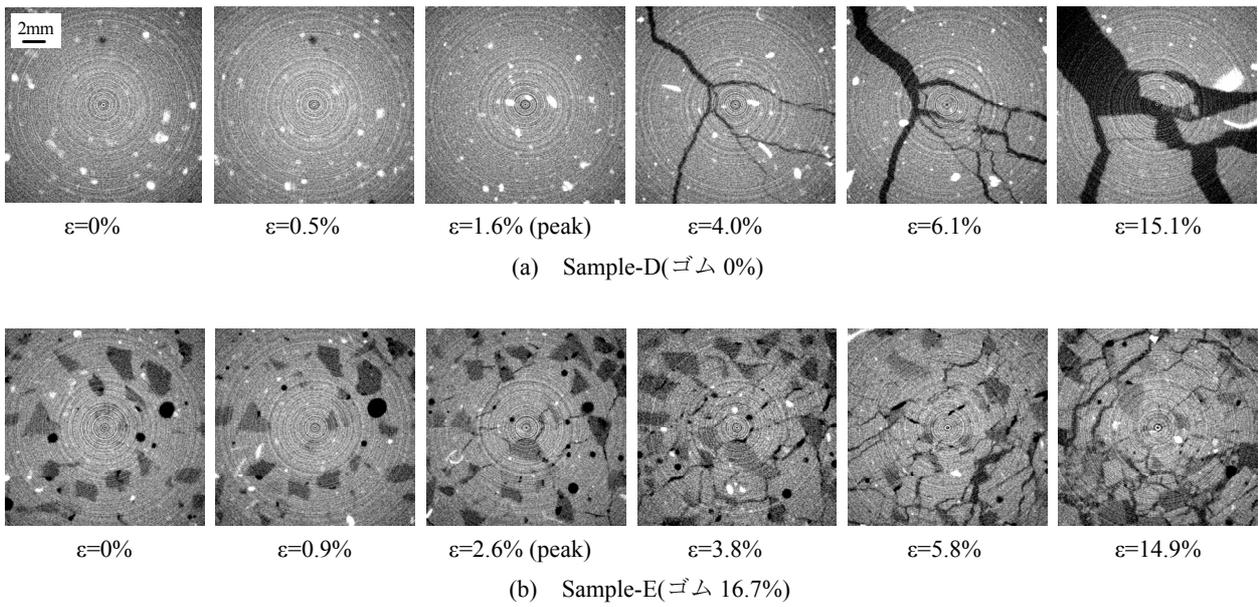


図-17 各供試体の一軸圧縮過程における横断面 CT 拡大画像

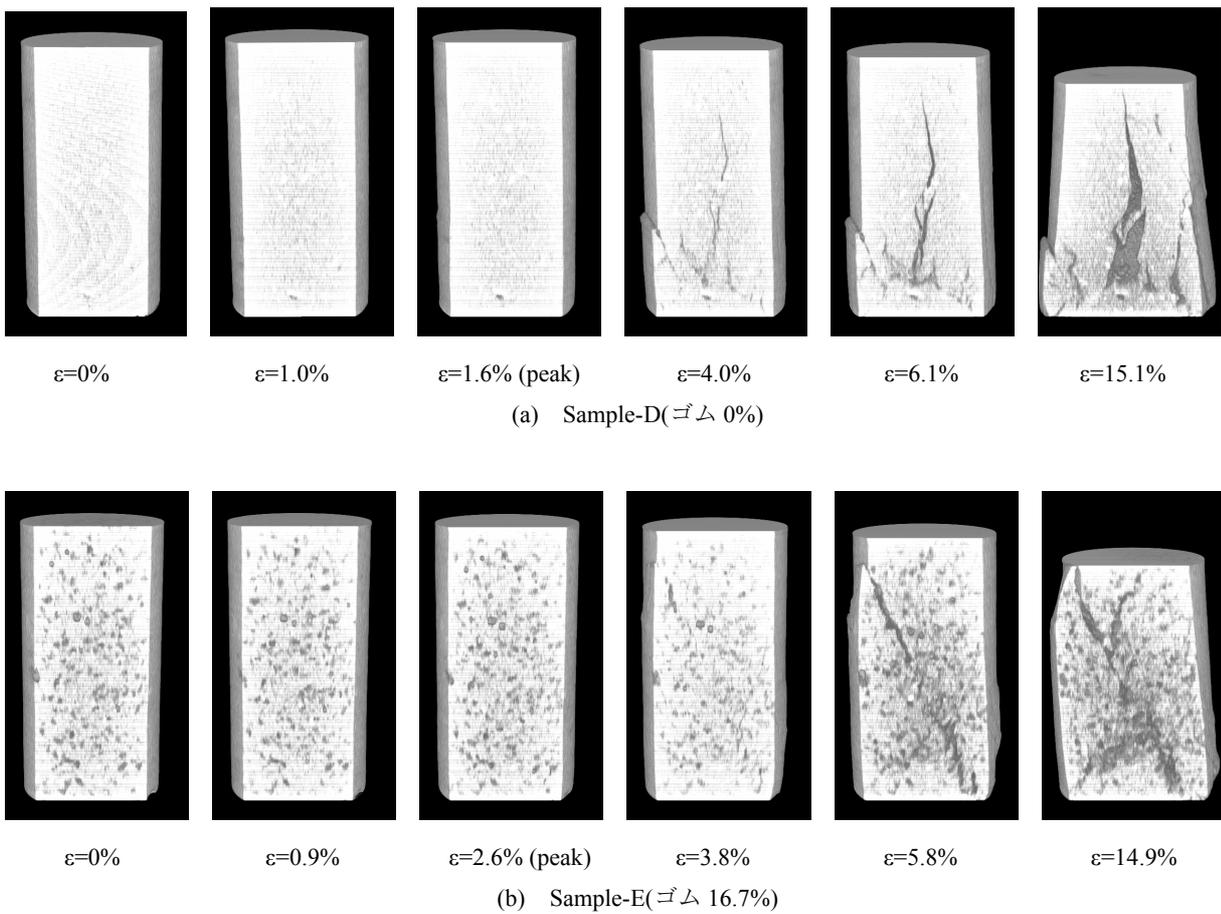


図-18 各供試体の一軸圧縮過程における三次元画像

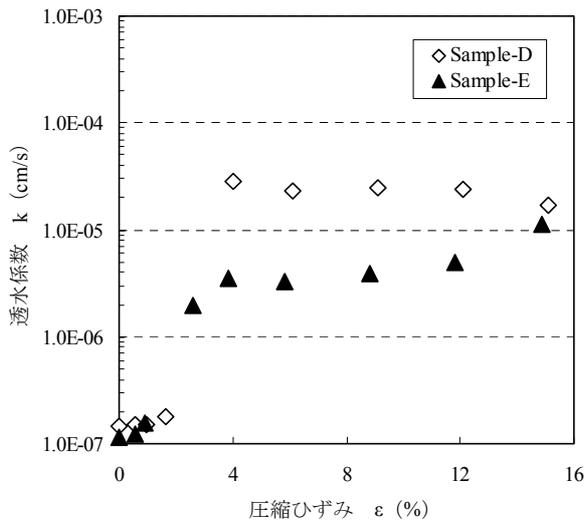


図-19 透水係数と圧縮ひずみの関係

線状に発生しており、ゴムチップ混合固化処理土の亀裂は直線状ではなく、独立して発生していた亀裂が次第に繋がっていく様子が観察できる。

図-19に、一軸圧縮過程における圧縮ひずみと透水試験により得られた透水係数の関係を示す。これらの関係と図-16～18のCT画像から、せん断変形時における固化処理土の透水係数とゴムチップ混合固化処理土の透水係数を比較すると、固化処理土の透水係数は、亀裂が生じた直後に急激に大きくなっている。これに対して、ゴムチップ混合固化処理土の透水係数は、亀裂が生じた後にゆるやかに大きくなっており、圧縮ひずみ15%付近で固化処理土の値とほぼ同じ値になっている。

6. 破壊メカニズムの考察

3., 4., 5. で述べてきた実験事実をまとめると次のようになる。

- (1) ゴムチップ混合固化処理土中のゴムチップは固化処理土中に均質に混入しており、固化処理土中に浮いたような状態となっている。
- (2) 一軸圧縮試験の応力ひずみ関係を見るとせん断初期の応力ひずみ曲線の立ち上がりはほぼ等しいが、Sample-A,B,C のケースで比較すると最大圧縮応力の0.6倍程度の圧縮応力に達するとゴムチップ量の多いほうがよりはやく弾性係数が小さくなり、破壊ひずみが大きくなる。
- (3) せん断を受けたゴムチップ混合固化処理土の透水係数の上昇の程度はゴムチップを混ぜないときよりも小さく、圧縮ひずみ4%から12%の範囲では、ゴムチ

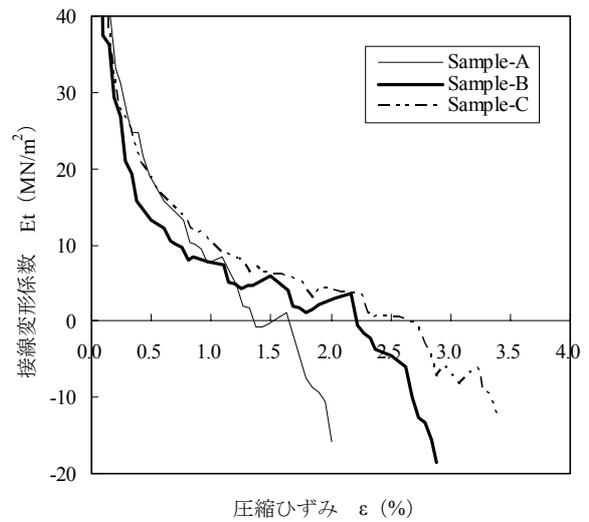


図-20 接線変形係数-ひずみ関係

ップを混入させた方が1オーダー透水係数が低い結果となった。

図-17の観察からもわかるように、ゴムチップ混合固化処理土では、圧縮応力最大時には、ゴムチップ周辺の多数の微細な亀裂が生じている。ゴムチップ周辺の多数の微細な亀裂の発生は、図-14に示した密度変化の様子から見ても圧縮応力最大になる前から発生しているものと考えられる。これは、ゴムチップと固化処理土のポアソン比が違うことによって発生した亀裂であると思われる。このような微細な亀裂は、ゴムチップへのせん断力の伝達に寄与するものであると考えられる。

このことを支持する別の観察として図-20にCT撮像時の応力変化を除いた接線変形係数とひずみの関係を示す。いずれの供試体もせん断初期にはほぼ同じ接線変形係数を持っており、いずれも30MN/m²以上と大きい。圧縮ひずみが0.7%あたりになると接線変形係数が10MN/m²程度以下に低下してくる。このあたりになるとゴムチップを混合したSample-B、Sample-Cの変形係数の低下が遅くなり、ゴムチップを混合した効果が表れてくる。このときの接線変形係数はゴムの弾性係数とほぼ同じレベルの変形係数である。このことから、ゴムチップ混合固化処理土では、せん断初期には、ゴムチップはせん断抵抗にほとんど寄与していないが、固化処理土のせん断変形係数が小さくなっていくとゴム自身のせん断抵抗が期待できるようになり、接線変形係数の急激な低下を防いでいると考えられる。

ところで、微細な亀裂がゴムチップ周辺に多数発生することが結果として、大きな亀裂の発生を防いでいるも

のと考えられる。その結果、図-19に見られるような透水係数の変化挙動の差となって現れたものと考えられる。つまり、ゴムチップを混入させることによって圧縮過程において発生する亀裂の種類が変化し、透水係数の変化に差が出たものと考えられる。すなわち、固化処理土の亀裂は貫通したものが多く、それらの亀裂が水みちになったため、亀裂の発生直後に急激に透水係数が大きくなったものと考えられるのに対し、ゴムチップ混合固化処理土の亀裂は局所的で不連続なものが多かったため、亀裂が発生しても透水係数の急激な変化を抑制できたものと思われる。ただし、大変形が生じると最終的には微細な亀裂も大きな亀裂となり、透水係数を抑える効果はなくなるものと考えられる。

7. 結論

本研究では、マイクロフォーカスX線CTスキャナを用いて、ゴムチップ混合固化処理土のせん断変形時における内部構造の変化を明らかにするとともに、変形過程における透水係数の変化を透水試験によって検討した。ここでは、X線CTスキャナを用いて、供試体の密度分布を求め、ゴムチップ混合固化処理土供試体の内部構造やせん断中の亀裂の進展状況を非破壊で観察した。また、圧縮せん断のいくつかの段階で透水試験を行い、せん断の進行に伴う透水係数の変化について検討した。

本研究の結果、ゴムチップ混合固化処理土の工学的性質についてわかった新たな知見は以下のとおりである。

- 1) ゴムチップの体積混入率が29%程度以下であれば、ゴムチップは固化処理土中に均一に混入させることができ、また、個々のゴムチップは固化処理土中に浮いた状況となる。
- 2) ゴムチップを混入させることで、固化処理土をせん断した時に発生する亀裂の状態を変えることができる。すなわち、固化処理土では、大きな亀裂が数本直線状に入るのに対し、ゴムチップ混合固化処理土をせん断したときに生じる亀裂は多数網目状となり、ひずみの増加とともに新しい亀裂が次々と発生する傾向にある。
- 3) ゴムチップ混合固化処理土では、せん断変形過程での透水係数の上昇が、固化処理土に比べて小さくなる傾向にあることがわかった。

8. あとがき

ゴムチップ混合固化処理土は広い意味では、多種材料を混合させて作製される複合材料であるといえる。今回はこの材料の圧縮過程での内部物性変化の評価およびそ

の破壊メカニズムを非破壊で検討してきた。X線CT装置は、このような内部の密度分布が異なるような材料の観察に威力を発揮する。

今後は、ゴムチップ混合固化処理土の三軸圧縮時や曲げ変形時における内部構造の変化をX線CTスキャナによって把握し、更に透水試験を実施することによってゴムチップ混合固化処理土の変形透水特性について検討を深めていきたい。

謝辞

CT撮像結果について熊本大学の太谷順教授に議論を頂いた。本研究の一部は、平成17年度・国土交通省建設技術研究開発助成制度(実用化研究開発公募)(研究課題「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」、研究代表者・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。深甚の謝意を表す次第である。

(2006年2月17日受付)

参考文献

- 太谷順・椋木俊文・永留健・菊池喜昭・佐藤孝夫(2002) : X線CT法を用いた気泡混合処理土の浸透・乾燥現象の解明, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp. 293-302.
- 菊池喜昭・永留健・太谷順・御手洗義夫(2005) : 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.
- 菊池喜昭・水谷崇亮・永留健・梶俊郎(2006) : マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料, (投稿中)
- 小松公榮(1993) : ゴムのお話, 日本規格協会, p. 53.
- 菅原勝彦・尾原祐三・青井崇浩・小島隆輔(1998) : X線CTによる岩石透水現象の可視化, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 341-346.
- 中山栄樹・持田文弘・田中計吉・田中壮一(1995) : 地盤物性評価におけるX線CTの使用例, 第26回岩盤力学シンポジウム論文集, 土木学会, pp.336-340.
- 永留健・菊池喜昭(2005) : ゴムチップ混合固化処理土の変形透水特性の把握, 第2回地盤工学会関東支部研究発表会, pp.13-16.
- 田村秀行(2002) : コンピュータ画像処理, オーム社, pp. 137-142.
- 御手洗義夫・安原一哉・菊池喜昭・Ashoke K Karmokar(2005) : 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回環境地盤工学シンポジウム, pp.351-358.

- 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(2004)：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，
pp.2323-2324.
- 安原一哉・岸田隆夫・御手洗義夫・川合弘之・アショカ.K.
カルモカル(2004)：港湾事業におけるゴムチップの
活用事例，基礎工，Vol.32，No.7，pp.79-83.
- Ashoka, K Karmokar., Takeichi, H., and Yasuhara, K.(2002):
Triaxial compression test on granulated scrape tire
rubber for their use as lightweight geomaterials,
Proceeding of the International Workshop on
Lightweight Geo-Materials, pp.127-134.
- Otani, J., Mukunoki, T., and Kikuchi, Y.(2002): Visualization
for engineering property of in-situ light weight soils with
air foams, Soils and Foundations, 42(3), pp.93-105.
- Otani, J. (2003): State of the art report on geotechnical X-ray
research at Kumamoto University, X-ray CT for
Geomaterials Soils, Concrete, Rocks, Proc. of
International Workshop on X-ray CT for Geomaterials
—GeoX2003—, 2003., pp.43-78.

港湾空港技術研究所報告 第45巻 第2号

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 ニッセイエブロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。