

産業廃棄物と地域資源しらすを利用した環境負荷低減を考えた

地盤材料の開発

山本健太郎¹、平瑞樹²、橋口周平³、前野祐二⁴

^{1, 2, 3}鹿児島大学、⁴鹿児島工業高等専門学校

地域資源しらすと産業副産物を混合することにより、環境低負荷型地盤材料の開発を実施した。実験方法としては、土質試験である CBR 試験を、しらすに対する混合物の配合比を変えることにより実施した。混合物としては、鉄鋼スラグ、廃ガラス、再生石膏などを考慮した。そして、試験データを基に、最適な混合物の配合比やその強度特性、並びに適応可能な事例などに関する考察を行った。

1. はじめに

しらすとは、鹿児島県本土と宮崎県南部地域において、それぞれ約 50% 及び約 16% の総面積にわたって分布している特殊土の一種を指している。鹿児島県における堆積量は 600 億 m^3 以上にもなる。災害時などには、斜面崩壊などにより大量の土砂が生産され、災害廃棄物となるため、復旧においてはその有効利用が緊急の課題にもなっている。特徴としては、土粒子が細かく、軽量、保水性が良く、破碎しやすいことが挙げられる。近年、リサイクル技術による地盤材料としての有効利用を念頭に置いた研究、さらには地盤環境・防災面における地域資源への貢献も重要な研究課題となってきた^{1), 2)}。本研究ではこのような背景に鑑み、地域資源しらすと産業副産物を混合することにより、環境低負荷型地盤材料の開発を実施した。適用範囲としては、路盤材のみならず、地盤改良用材、配管などの埋め戻し材、地下空洞への充填材、斜面盛土、緑化基盤材などを想定している。

実験方法としては、主として土質試験である CBR 試験を、しらすに対する混合物の配合比を変えることにより実施した。混合物としては、ポルトランドセメント、鉄鋼スラグ(炉前水砕、炉外水砕、除冷スラグ、製鋼スラグ)、廃ガラス材(吸水性と非吸水性)、消石灰、再生石膏、タイヤチップなどを考慮した。そして、試験データを基に、最適な混合物の配合比やその強度特性、並びに適応可能な事例などに関する考察を行った。

2. しらすの特徴

2.1 南九州におけるしらすの成因

しらすは、地質学的に火砕流堆積物の非熔結部と定義され、軽石を含む凝灰角礫層の一部である。またしらすとは、乾燥すると灰白色のさ

らさらした軽石質砂の堆積物(軽石流堆積物)である。成因として、大量の火山性堆積物を噴出した始良カルデラ、阿多カルデラが存在する。鹿児島湾奥に位置する約 22,000 年前に噴火した始良火山を起源とするしらすが広く堆積している。

2.2 しらすの分布

分布上の特徴は、広域分布であることや高低がほぼ一定であること、さらに高い山の頂部には存在しない。しらすは数 10~200m の標高で台地を形成し、旧地形の谷を埋めた形で存在するため、堆積層の厚さは場所ごとに異なる。鹿児島県本土の約 50% 以上を占め、宮崎県南部および熊本県を含む南九州一帯に広く分布している。噴出規模も大きかったため、日本中の地層で始良カルデラのしらすが堆積している。また類似の火山性堆積物は北海道や東北地方の火山を起源とするものがあり、ニュージーランドなどにも存在している。

2.3 理工学的特性

鉱物組成は、火山ガラスが約 80% を占め、結晶鉱物は少ない。化学組成上は SiO_2 が約 70% の酸性岩であるが、雲母や角閃石類以外の輝石類が含まれており、粘土鉱物もわずかに存在している。粒度組成上は、直径 30 μm 以上の軽石礫を含むものの、均等係数は平均 27 程度を示し、比較的細粒分も多い。土質材料としては火山灰質砂に相当するが、土粒子密度(約 $2.4 Kg/m^3$)や乾燥密度は比較的小さく、強度的には見掛けの粘着力の大きいことなどが特徴である。

2.4 斜面崩壊と液状化

しらす台地周辺部では、ほぼ垂直に形成されるガリ侵食が発達している。これらの谷頭では

梅雨期の長雨や台風期の集中豪雨による斜面災害が毎年繰り返され、いわゆる「しらす災害」と呼ばれている。これらの災害は地表水による侵食の影響の大きさを示しているが、同時にしらすの堆積様式からみて、浸透水によるパイピングが誘因となって土石流が発生することにも注意が必要である。このような豪雨災害のほか、地震災害による地盤の動的作用の影響についても注目される。えびの地震（1968年）や鹿児島県北西部地震（1997年）において、山腹斜面崩壊と沖積しらすの液状化被害が発生した。前者は斜面の滑落であり、豪雨時には侵食防止に役立つ樹木や竹林などの植生が、地震時には斜面の滑落を促進する素因になっている。後者の噴砂現象は地下水位の高い水田地帯および埋立地や干拓地で観察されている。静的な力学試験では、かなりのせん断抵抗を示すため、土工材料としては優れている。一方、液状化しにくい「よい粒度組成」が特徴であるしらすは、動的な作用を受ける場合の力学的性質の解明は今後の課題と言えるだろう。

3. 試料の物理特性及び試験方法

3.1 しらす

本研究で用いたしらすは鹿児島市西別府町西之谷地内に建設する西之谷ダムの工事現場から採取した一次しらすである。自然含水比は9.0%であり、試験には19.1 mmふるいを通じたものだけを使用した。図1にはしらすの締固め曲線を示す。締固め試験³⁾は締固めエネルギーが小さく、繰返し法であるA-a法で行った。図より、しらすは含水比が20~30%の範囲でよく締め固まり、最適含水比が29.2%、最大乾燥密度は1.23 g/cm³であることがわかる。なお、しらすの粒径加積曲線は次項に示す混合物の粒径加積曲線の中において、比較のために示しているのでここでは省略する。

3.2 鉄鋼スラグ

製鋼スラグ（転炉スラグ）、徐冷スラグ、炉外水砕スラグ、炉前水砕スラグの4種類を用いた。上記の順に粒子密度が3.02, 2.93, 2.87, 2.61 g/cm³となり、徐々に小さくなった。鉄鋼スラグの詳細は参考文献4)に示す鉄鋼スラグ協会のホームページにゆずる。なお、水砕スラグに関しては、炉前水砕スラグが地盤工学分野では普及している。これは海砂の代替品として生コン、アスコン用細骨材などに利用されている。一方、炉外水砕スラグは細骨材用ということで、炉前水砕スラグよりも高密度、低吸水率になるよう

に作られている。また、図2にはしらすと鉄鋼スラグの粒径加積曲線を示す。これは土の物理的性質を求める試験である粒度試験⁵⁾から得られたものである。これを見ると、しらすは粒径が広範囲にわたって分布しており、粒度分布の良い土であることがわかる。それに比べて、鉄鋼スラグは粒径加積曲線の傾きが急で、粒度分布が狭い範囲に集中しており、粒度分布が良くないことがわかる。なお、炉前水砕スラグと炉外水砕スラグは、ほとんど同等の粒径分布を示した。これは発生元が同じであるためである。

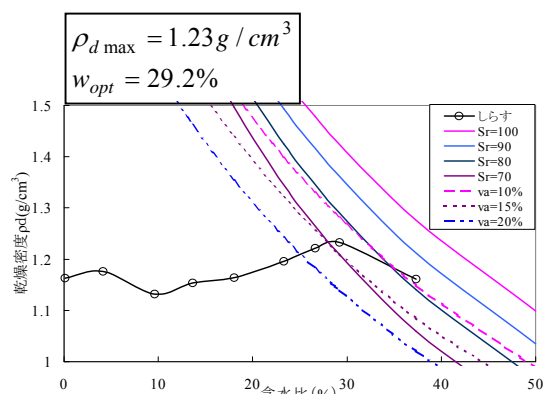


図1 しらすの締固め曲線

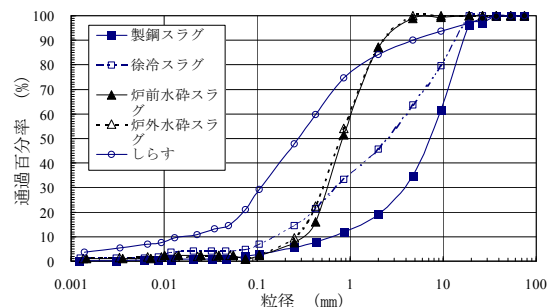


図2 鉄鋼スラグの粒径加積曲線

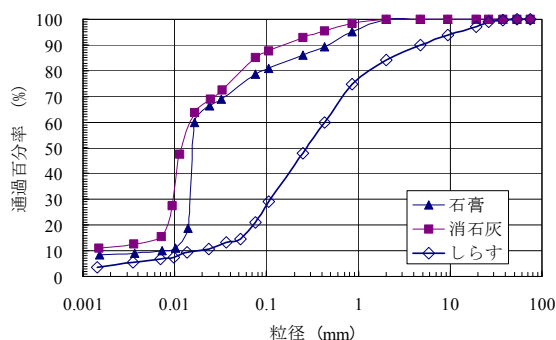
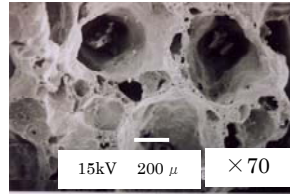


図3 石膏、消石灰の粒径加積曲線



(a) 粗粒状

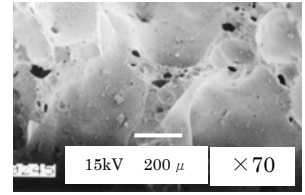


(b) 電子顕微鏡で見た構造

写真1 吸水性発泡廃ガラス材
(絶乾比重 0.4, 連続間隙構造)



(a) 粗粒状



(b) 電子顕微鏡で見た構造

写真2 非吸水性発泡廃ガラス材
(絶乾比重 0.4, 独立間隙構造)

3.3 廃ガラス材、石膏、消石灰、タイヤチップ

廃ガラス材としては、吸水性発泡廃ガラス材と非吸水性発泡廃ガラス材 2 種類を用いた。その特徴としては、絶乾比重は平均値で 0.4, 電子顕微鏡 (SEM) で観察すると、吸水性は連続間隙構造、非吸水性は独立間隙構造になっている (写真 1, 2 参照)。吸水性発泡廃ガラス材は保水力があるため、一時的な貯留能力も備わっている。さらに斜面の盛土や緑化のための植物の成長に有効である。非吸水性発泡廃ガラス材は軽量盛土に適用可能な材料である。約 900°C で焼成してあるため、有害物質の溶出がなく、地下水への影響がない。粒径は約 45mm の均一なものを用いた。また、廃石膏ボードから得られる再生石膏、石灰系添加剤である消石灰、廃棄されたタイヤより加工生成されるタイヤチップも用いた。再生石膏と消石灰の粒子密度はそれぞれ 2.45, 2.46 g/cm³ であった。タイヤチップは 2mm 以下に裁断されたものを使用した。それぞれの特徴として、石膏は防火性、遮音性に優れているため、石膏ボードとしてよく使用されている。欠点として、廃石膏ボードが廃棄物処分場の地下水に生息する硫酸塩還元細菌に代謝されて硫酸水素を発生する環境問題が挙げられる。消石灰は中和剤として用いられ、畑の肥料としても使用されている。タイヤチップは環境影響面で問題がなく、土中と水中での耐久性も高く、環境に優しい材料である。図 3 にはしらすと石膏、消石灰の粒径加積曲線を示す。石膏、消石灰はしらすに比べて、粒度分布の悪い、非常に細かい粒子が多数存在することがわかる。

3.4 試験方法

路床や路盤の強さの評価に利用される CBR 試験⁶⁾を実施した。今回は道路舗装の設計に用いる設計 CBR を求めた。まず、試料の締固めは直径 15cm のモールドを用いて、自動締固め機により 3 層 67 回の突き固めで作成した。吸水膨張試験により浸水時の膨張量を 4 日間 (96 時間) 計測した後、直径 5 cm のピストンによる貫入試

験で荷重強さを求めた。なお、しらすと混合物との体積比率を 7 : 1 (12.5%), 5 : 1 (16.7%), 3 : 1 (25.0%) の 3 パターンで実施した。

4. 結果と考察

CBR 試験結果を以下に示すように、鉄鋼スラグと廃ガラス材、石膏、消石灰、タイヤチップとの混合に分けて、それぞれ述べるものとする。

4.1 鉄鋼スラグとの混合

図 4~6 にはしらす単体とスラグ混合物との体積比率を変化させた膨張率—水浸時間曲線を示す。しらす単体はしらすのみからなり、どの図でも同じである。また、図 6 において製鋼スラグが省略されているが、これはダイヤルゲージを設置した際の設置ミスによりダイヤルゲージが動いていなかったためである。これらを見ると、図 5 の製鋼スラグと徐冷スラグの混合物のみがしらす単体よりも膨張率が大きく生じていることがわかる。また、図 5 の製鋼スラグと炉外水砕スラグの混合物を除き、24 時間を過ぎるとほとんど膨張しなくなることもわかった。図 7 にはしらすに対する体積比率と膨張率との関係を示す。膨張率は 96 時間後のものを用いた。横軸はしらすに対するスラグ混合物の体積比率を表す。これを見ると、しらすと徐冷スラグ混合物との体積比率 5 : 1 のものが最大となり、膨張率は約 0.06% であった。よって、しらすとスラグとの混合物に関して、膨張性は微小となり良好であることがわかる。

図 8~10 にはしらす単体とスラグ混合物との体積比率を変化させた荷重強さ—貫入量曲線を示す。図 8 に示される体積比率 7 : 1 の最終貫入値 (12.5mm) では、スラグ混合物の荷重強さはしらす単体より若干大きい値を示した。一方、図 10 の 3 : 1 においては、炉外水砕スラグとの混合物を除き、しらす単体に比べ非常に大きい値を示した。よって、一般的には体積比率が大きくなるほど荷重強さが大きくなることがわかった。また、どの体積比率においても製鋼スラグとの混合物が一番大きな荷重強さを示した。

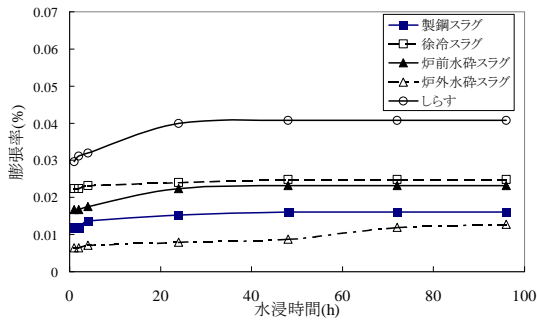


図 4 膨張率—水浸時間曲線 (7:1)

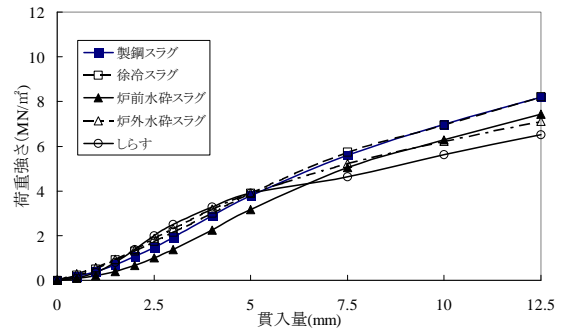


図 8 荷重強さ—貫入量曲線 (7:1)

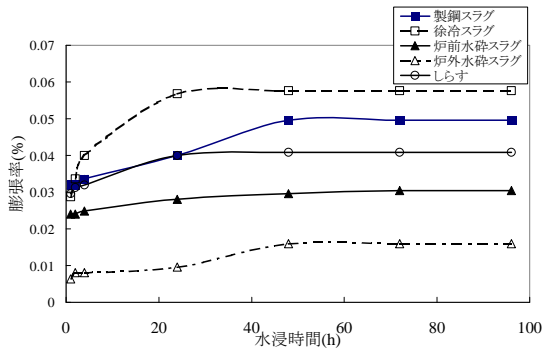


図 5 膨張率—水浸時間曲線 (5:1)

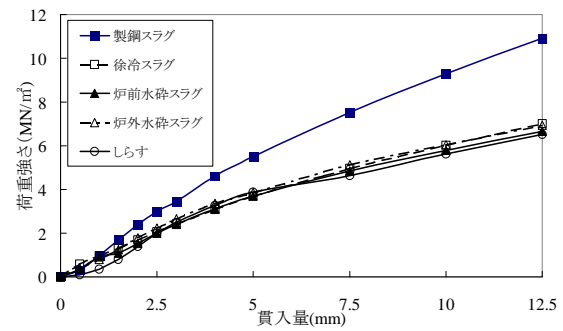


図 9 荷重強さ—貫入量曲線 (5:1)

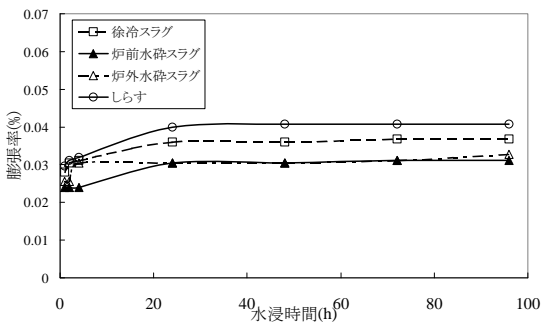


図 6 膨張率—水浸時間曲線 (3:1)

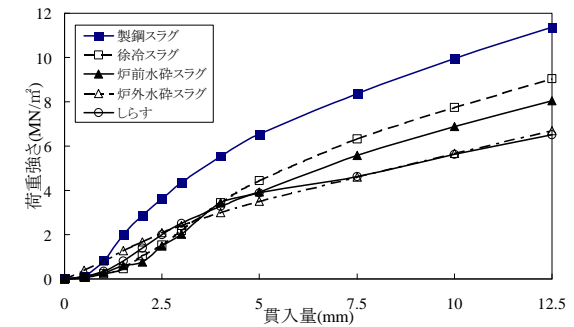


図 10 荷重強さ—貫入量曲線 (3:1)

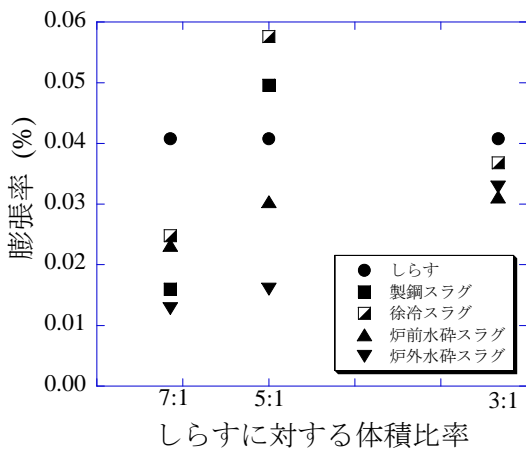


図 7 しらすに対する体積比率と膨張率との関係

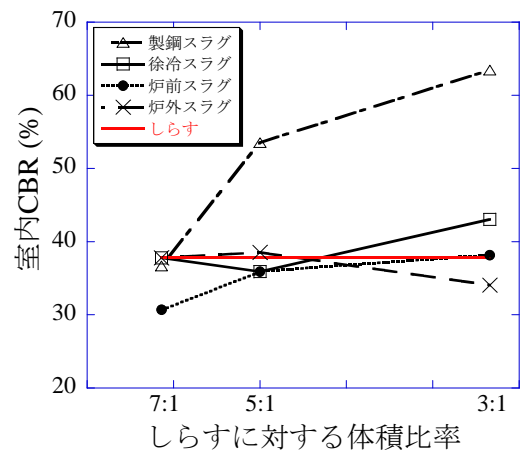


図 11 しらすに対する体積比率と室内 CBR との関係

これは製鋼スラグが硬質で耐磨耗性も良く、4種類のスラグの中で最も礫状の粒度組成を示し（図2参照）、比較的表面の粗いしらす粒子とのインターロッキングが良いからだと考えられる。次に、図11にはしらすに対する体積比率と室内CBRとの関係を示す。全てのケースにおいて、 $CBR_{2.5}$ の値よりも $CBR_{5.0}$ の値の方が大きくなり、室内CBRとしては $CBR_{5.0}$ の値を用いた。また、しらす単体のCBRの値は約38%程度を示し、単体で粘性土などと比較すると高い強度を有する。しかし、スラグと混合することにより、製鋼スラグにおいては非常に高い強度を得ることができた。特に、体積比率3:1においては室内CBRの値は約63%を示し、今回の実験の中で一番高い強度を得た。徐冷スラグにおいても体積比率3:1の場合のみ高い値を示したが、他の体積比率や炉前水砕、炉外水砕スラグとの混合物に関してはしらすと同程度の値を示した。これは炉前水砕、炉外水砕スラグはスラグの中では粒子形状も小さく、しらすとのインターロッキングの影響などもあるものと考えられる。

4.2 廃ガラス材、石膏、消石灰、タイヤチップとの混合

図12~14にはしらす単体と廃ガラス材（吸水性発泡廃ガラス材と非吸水性発泡廃ガラス材）、再生石膏、消石灰、タイヤチップ混合物との体積比率を変化させた膨張率—水浸時間曲線を示す。これらを見ると、石膏はどの体積比率でも非常に膨張率が大きくなった。吸水性発泡廃ガラス材はしらす単体よりも膨張率は大きく、非吸水性発泡廃ガラス材はしらす単体とほぼ同程度であった。タイヤチップは図12に示される体積比率7:1の時に少し大きな値を示した。また、体積比率7:1の時のみ、セメントの効果を見るために、セメントを重量比で3%混入した。図12からはセメントを混入しないタイヤチップ混合物の膨張率が3%混入したものよりも大きいことがわかる。全般的に、石膏の膨張率は著しく、96時間経っても膨張率は増加し続けたが、その他の試料は24時間後まで膨張し、その後はあまり変化がなかった。図13, 14からは消石灰混合物の膨張率は石膏ほどではないが、大きいことも観察される。なお、図12では消石灰混合物の膨張率は吸水性発泡廃ガラス材と同程度で、あまり大きくは生じなかった。次に、しらすに対する体積比率と膨張率との関係を図15に示した。膨張量は96時間後のものを用いた。石膏、消石灰の混合物は体積比率が大きくなるにつれて膨張率も大きくなった。発泡廃ガ

ラス材は常に吸水性が非吸水性よりも大きくなり、体積比率が変化しても、膨張率はさほど変化しないことがわかった。

図16~18にはしらす単体と廃ガラス材、再生石膏、消石灰、タイヤチップ混合物との体積比率を変化させた荷重強さ—貫入量曲線を示す。しらす単体と比べて石膏、消石灰の混合物は大きな強度を得た。しかし、消石灰は多く混ぜすぎると図18で示されているように降伏(2.5mm、5.8MN/m²)が見られ、3:1の体積比率の時は約5mm以上の貫入量においては、しらす単体よりも小さな値を示した。図17で示される、5:1の体積比率においても降伏(10mm、10.1MN/m²)することが見られた。吸水性発泡廃ガラス材、タイヤチップ混合物はしらす単体と比べても小さな値を示した。特に、タイヤチップ混合物はほとんど荷重強さがでなかった。これは締め固まらなかったためである。しかし、他の混合物とは異なり、弾力性に富むことが貫入試験時にも確認できた。また、体積比率7:1の時のみにセメントを重量比で3%混入した供試体も作製したが、しらす単体よりも小さな荷重強さとなった。ただ、セメントを混入したことにより荷重強さは増加したが、ゴムの弾力性がなくなること貫入試験時には確認できた。次に、図19にはしらすに対する体積比率と室内CBRとの関係を示す。室内CBRでは $CBR_{2.5}$ の値と $CBR_{5.0}$ の値を比べ、大きい値の方を室内CBRと設定した。特記すべきこととしては、しらすと消石灰または石膏を体積比率3:1で混合した時のみに、 $CBR_{2.5}$ の値が $CBR_{5.0}$ の値よりも大きな値を示した。これを見ると、消石灰混合物が一番大きな室内CBRの値を示し、体積比率7:1, 5:1, 3:1としらすに対する体積比率が増加するほど室内CBRの値が減少した。よって、しらすに対して消石灰は少量混ぜた方が効果的なことがわかった。また、石膏混合物もしらす単体を大きく上回る値を示した。非吸水性発泡廃ガラス材は吸水性発泡廃ガラス材よりも少し大きな値を示し、両者は多く混入するほど室内CBRの値は増加したが、しらす単体の値を大きく上回るものはなかった。なお、タイヤチップは体積比率に関係なく非常に小さい値を示した。

5. おわりに

本研究では、地域資源しらすと産業副産物を混合することにより、環境低負荷型地盤材料の開発を実施した。しらすにはセメントなどをある程度混入しないと、一軸圧縮試験は実施できないことから、CBR試験を実施し、強度指標と

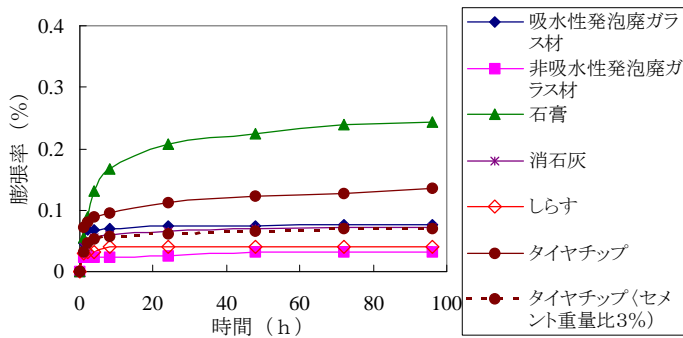


図 12 膨張率—水浸時間曲線 (7:1)

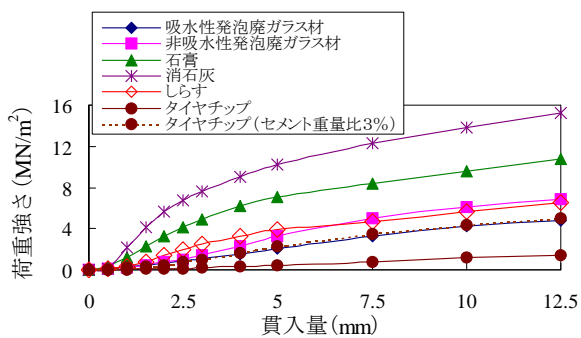


図 16 荷重強さ—貫入量曲線 (7:1)

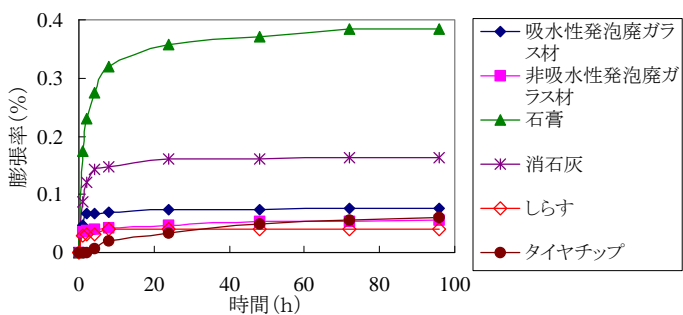


図 13 膨張率—水浸時間曲線 (5:1)

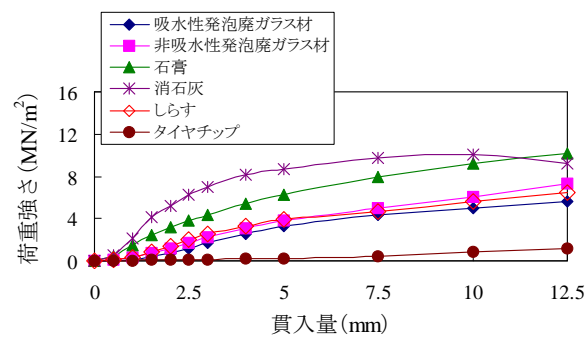


図 17 荷重強さ—貫入量曲線 (5:1)

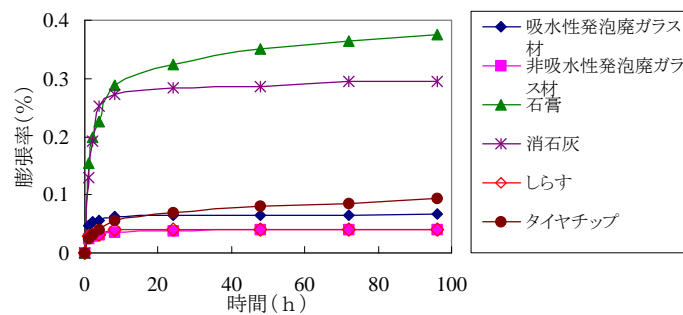


図 14 膨張率—水浸時間曲線 (3:1)

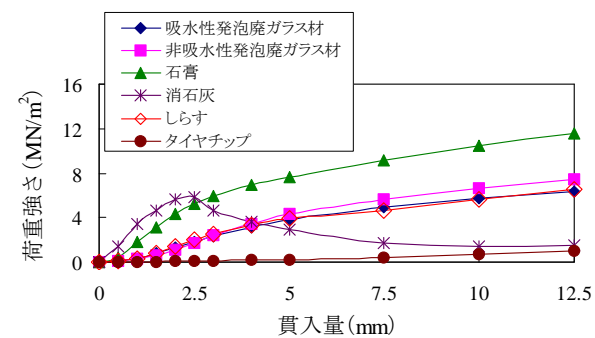


図 18 荷重強さ—貫入量曲線 (3:1)

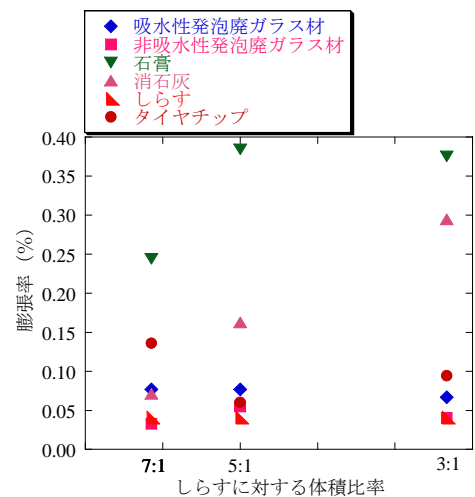


図 15 しらすに対する体積比率と膨張率との関係

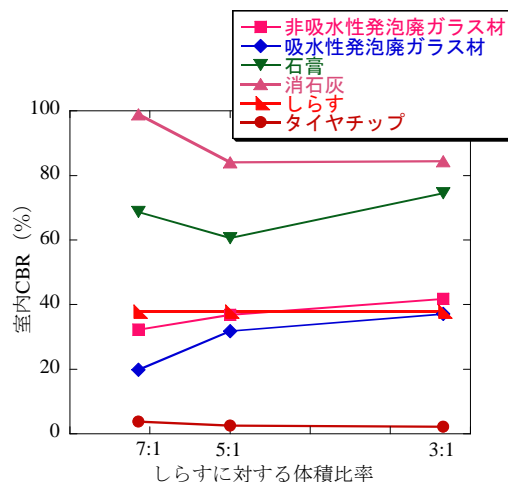


図 19 しらすに対する体積比率と室内 CBR との関係

しては CBR 値を用いた。一般的に、路床や路盤材料以外の利用に関しては CBR 値以外の指標あるいは強度値の換算方法の提案が望まれるだろう。強度のみに着目するのであれば、試験方法の実施から見ても、一軸圧縮試験を指標として用いるのが便利である。ただ、しらすを自立させるために、添加物や混合物の割合を増加させる必要が生じ、場合によっては土本来の性質が大きく変化することが懸念される。また、現場への適応に関しては、シュミット式ハンマーとの対応などを考慮したいと考えている。著者たちは土への添加物に対して、セメントに代わる、環境に優しい材料を模索している。現状では以下のことがわかった。

- 1) 製鋼スラグはスラグ混合物の中で体積比率が大きくなるほど荷重強さが大きくなった。しらす単体との比較から、体積比率 5:1 以上が効果的である。膨張率も小さいことから、路床土に適するであろう。また、長期的な耐久性も有するものと考えられる。
- 2) 吸水性発泡廃ガラス材はしらす単体より CBR 値は小さくなったため、路床土として使用する場合は粒度調整や他の材料と混合するのが望ましい。しかし、軽量であり吸水性にも富むことから、緑化基盤材などには適するであろう。非吸水性発泡廃ガラス材は大量に混ぜると、しらす単体よりも若干大きめの強度が得られるが、製鋼スラグなどと比べて非常に小さいので、路床土というよりは軽量盛土材料、軽量骨材、地盤改良材等への利用が好ましい。
- 3) 消石灰混合物は非常に大きい CBR 値を示し、大量に混合すると他の混合物とは異なり、土の挙動と同様な降伏が見られた。また、少量混ぜた方がより大きな CBR 値が得られるという特記すべき結果となった。
- 4) タイヤチップ混合物は、CBR 値そのものは非常に小さい値であったが、他の混合物とは異なり弾力性を確認できた。よって、その特徴を生かし、歩道や運動施設など足に負担がかかるような場所での舗装材としての利用が期待される。
- 5) 再生石膏は製鋼スラグよりも、大きな CBR 値が得られた。地盤改良材としての利用が十分期待できるが、使用環境や適用する地盤材料によっては、硫化水素や重金属などが溶出する場合も考えられる。よって、溶出試験を実施し、土壤環境基準値内におさまっているかを確認することが不可欠である。

今後は、しらすに廃ガラス材を混合した緑化基盤材や内装建材、タイヤチップを混合した身体に優しい舗装材、再生石膏を混合した地盤改

良材の開発など、ターゲットを定め、より詳細な実験を実施していく予定である。

なお、本報告書の内容は、第 8 回環境地盤工学シンポジウム論文集(地盤工学会、2009 年 7 月)と地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム発表論文集(地盤工学会九州支部、2010 年 1 月)において既に発表したことを記す。

参考文献

- 1) 平瑞樹・山本健太郎・金丸純司: 鹿児島市における現場発生土とリサイクル資材混合しらすの工学的性質, 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.155-158, 2005.10.
- 2) 荒牧憲隆・白井康夫・山本健太郎・大嶺聖・工藤宗治・林泰弘: 九州の火山灰質土の人工地盤材料技術の現状と課題, 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.23-27, 2005.10.
- 3) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引き (第一回改訂版), pp.71-78, 2001.
- 4) 鐵鋼スラグ協会 HP <http://www.slg.jp/>
- 5) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引き (第一回改訂版), pp.27-38, 2001.
- 6) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引き (第一回改訂版), pp.79-90, 2001.