

軽量盛土材と珪砂の混合土の 下層路盤への適用性の検討

菅原 正則¹・木幡 行宏²・松田 圭大³・川端 伸一郎⁴・菊池 優希⁵

¹正会員 株式会社構研エンジニアリング 地質部 (〒065-8510 北海道札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)
E-mail : sugawara@koken-e.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 室蘭工業大学教授 大学院工学研究科 (〒050-0071 北海道室蘭市水元町 27-1)
E-mail : kohata@muroran-it.ac.jp

³正会員 北海道科学大学講師 工学部都市環境学科 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7-15)

⁴正会員 北海道科学大学教授 工学部都市環境学科 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7-15)

⁵非会員 株式会社構研エンジニアリング 地質部 (〒065-8510 北海道札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

軟弱地盤上に構築された道路では、長期的な残留沈下が発生することがあり、その維持補修対策として下層路盤の軽量化は、この問題を解決するための代替手段である。本研究では、下水汚泥と膨張性頁岩を原料にした人工軽量盛土材の路盤材への適用性を検討するため、珪砂を混合し簡易的に粒度調整を行った 3 試料において、CBR 試験、2 種類の拘束圧及び繰返し載荷(1 万回)の有無の条件で三軸試験を実施し強度・変形特性を検討した。試験結果より、混合率と CBR に一義的な傾向を示すことが明らかになった。また、繰返し載荷を与えることにより、初期剛性が増加することで最大荷重を發揮するまでの軸ひずみが小さくなり、変形係数が同程度から 20%程度増加する傾向が得られた。これらの結果を踏まえ本研究では、剛性と軽量化を併せもつ適正な粒度を提案した。

Key Words: lightweight geomaterial, subbase course material, cyclic loading, triaxial test, stiffness

1. はじめに

近年、我が国では橋梁や道路などのインフラの老朽化が進み維持管理に対する問題が顕著化している。その一つに軟弱地盤上に構築された道路構造物と盛土との接続部における不同沈下による走行性の悪化が挙げられる¹⁾。特に北海道は、泥炭が分布しており、盛土構築時に荷重工法などで沈下対策工を講じたとしても二次圧密沈下の影響により、供用後にも残留沈下が大きく発生する条件にある。この残留沈下の対策として路床土や路体盛土を EPS ブロックなどの軽量材に置換する荷重軽減工法が挙げられるが、掘削が深く施工が長期間かかり、それに伴い通行止めの期間が長くなることや対策費用が嵩むなどの課題がある。また、不同沈下による段差の解消対策としてオーバーレイが挙げられるが、増加荷重の発生により沈下を助長し、繰り返しの対策が必要になる場合があるなど、既存対策にも各々課題がある。

以上の背景より、社会的影響を抑えた維持補修対策の新たな選択肢として舗装材の軽量化、すなわち舗装の打

ち換えと同時に荷重軽減が図られる材料へのニーズは高いといえる。

一方、平成 13 年度の「舗装構造に関する技術基準」²⁾の制定により、舗装の構造設計は、仕様規定から性能設計へ移行する傾向にあり、性能設計では所要の性能を有していれば、材料や設計方法までは限定されていない。また、廃棄物や建設発生土およびリサイクル材の積極的な活用が望まれている。これに伴い、舗装各層への新しい材料の導入が活発化し様々な材料が検討されている。しかしながら、軟弱地盤上の道路の荷重軽減対策として種々の軽量路床材の研究³⁾⁴⁾が進んでいるのに対し、その上層である路盤材への適用性を検討した研究は少ない⁵⁾⁶⁾。これらの条件に適合する材料として、原料の一部に汚泥を利用しているエコ・リサイクル材である人工軽量盛土材(以下、軽量材)^{注1)}が挙げられる。軽量材は、道路の路体・路床や擁壁およびボックスカルバート背面の土圧軽減を目的とした埋め戻し材等で利用されているが、路盤材への適用までには至っていない^{注2)}。これに対し、ZHAO ら⁷⁾の先行研究により、軽量材単一材では

粒度分布が悪く締固めが困難なため、セメント強さ試験用標準砂^{注3)}を混合して粒度調整することにより、下層路盤への適用性が示唆されている。なお、この検討は1ケースの粒度分布での検討のため、さらなる粒度改善による支持力や強度の増加および軽量性の向上が期待できる。一方で、粒子自体の特性が不明確な点や、poreな構造を持つ材料のため、混合量を増やすほど繰返し载荷による粒子破碎の影響が懸念される。

そこで、本研究では、異なる条件で土粒子の密度試験や、CBR試験および繰返し载荷の有無における三軸試験を行い、下層路盤材としての適用性ならびに軽量性と強度・変形特性を踏まえた最適粒度について検討した。

2. 粒子特性と試験粒度

(1) 試料の粒子特性と基本的性質

本研究で用いた試料は、下水処理場から発生した汚泥を一部原料としており、主原料である膨張性頁岩を破碎、粉碎し混合させたものを約 1,100 °C で焼成し、粒度調整した礫状の軽量材である。粒子形状は角礫～亜円礫～円礫状と様々であるが、円礫（球体）状を呈す粒子が卓越している。また、高温で焼成しているため、焼成中の発泡により粒子内に多くの間隙が存在する軽量な材料である。通常の粒状材と同様の施工が可能な材料となるが、前述した ZHAO らの研究⁷⁾が示すとおり、下層路盤として適用させるためには粒度改良が必要である。基礎的検討として、ZHAO らは、予め粒度調整されているセメント強さ試験用標準砂を用いているが、本研究では容易に入手可能な砂材を想定かつ再現性がある珪砂 5号（以下、珪砂）を用いた。

写真-1に示すように、軽量材は粒子内間隙が確認される pore な構造を持つ材料である。写真-1に赤丸で示した箇所が比較的大きな間隙であるが、写真では認識が困難な微細な間隙が支配的である。似たような粒子構造を持つ地盤材料には火山灰質粗粒土、つまり軽石がある。軽石のような材料は粒子内部に間隙があり、それらが破碎性や強度・変形特性に大きく影響している。そのため、軽石では間隙の構造モデルが示され、力学的特性との関係などがまとめられている。図-1は、中田らが提案した図に⁸⁾、本研究に用いた軽量材の物理量の関係を加筆した模式図である。中田らによれば、粒子と粒子の間隙（以下、間隙）の他、粒子内の間隙（以下、内間隙）には、吸水が可能な開口内間隙と吸水が不可能な閉塞内間隙に大別されると定義している⁸⁾。さらに、著者らの研究による異なる軽量材での検討により、水浸程度では吸水せず、煮沸や脱気などの外力により強制的に吸水する準閉塞内間隙の存在が明らかにされている⁹⁾。本研究

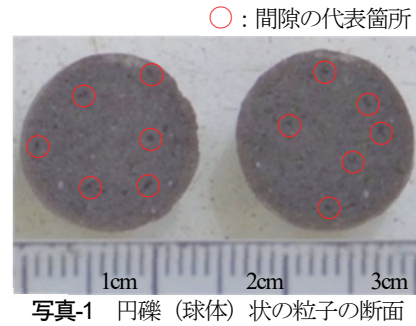
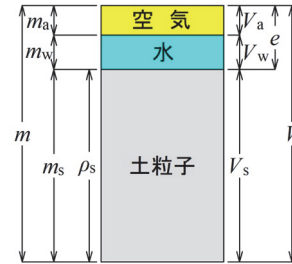
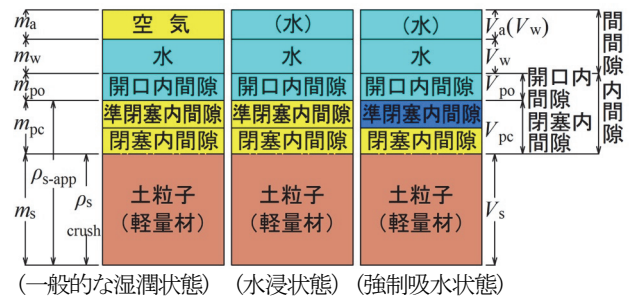


写真-1 円礫（球体）状の粒子の断面



a) 一般土（粘土や砂、珪砂）の物理量



b) 粒子内間隙を保有する軽量材の物理量

図-1 一般土と軽量材の基本的物理量⁸⁾⁹⁾に加筆

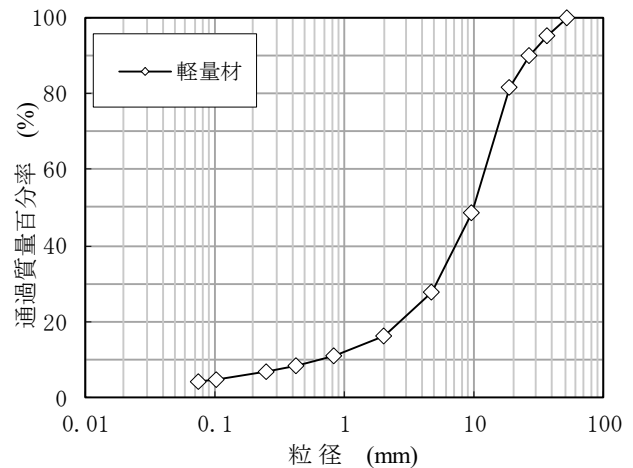


図-2 軽量材の粒径加積曲線

の軽量材においても、同様な粒子内間隙が認められるため、異なる条件で土粒子の密度試験を行い、内部構造を検討した。試験条件は、粒子径を 9.5 mm フレイ目を通過し、4.75 mm フレイ目に残留した軽量材の概ね 50% 粒径（図-2）にあたる 9.5 mm 程度の破碎しない粒子（9.5 mm 以下）とした。また、9.5 mm 以下を基本とし、破碎による影響を確認するため、すり潰して 4.75 mm フレイ

目 (4.75 mm 以下) と 2.0 mm フルイ目を通過 (2.0 mm 以下) するまで調整, さらに真密度に近い結果が得られることを期待した 0.075 mm 以下の計 4 つの粒子条件とした。つぎに, 時間の条件として, 事前に 24 時間水浸し, 煮沸時間を 0 (水浸のみ), 1, 6, 12 時間とした。

図-3 に土粒子の密度試験結果をまとめた。同一粒径においても煮沸時間を長くすると, 間隙へ徐々に水分が侵入し, 土粒子の体積を測定する時の水量が真の値に近づくことにより土粒子の密度 ρ_s が大きくなり, 6 時間煮沸で概ね収束する傾向が得られた。9.5 mm 以下の試料では, 6 時間煮沸で ρ_s が 0.37 g/cm³増加し 1.97 g/cm³となり, これが準閉塞内間隙を表すと考えられる。また, 外力を作用させず水浸で開口内間隙に吸水した状態, すなわち内間隙内に水分を含まないため土粒子の体積を過大評価した見かけの土粒子の密度 (以下, 見かけの密度) は 1.60 g/cm³となる。0.075 mm 以下の試料では, 水浸状態の 2.50 g/cm³ から煮沸処理により僅かに増え 12 時間煮沸で 2.55 g/cm³ となり, この値が概ね真密度と考えられる。また, 0.075 mm 以下の密度変化が僅かであるため, 準内間隙と閉塞内間隙の大部分は, 0.075 mm より大きな間隙で構成されていることが分かる。4.75 mm と 2.0 mm まですり潰した試料においては, 粒子破碎により, 準閉塞内間隙や閉塞内間隙が吸水可能な開口内間隙に置き換わり, 密度が増大したと考えられる。なお, すり潰す過程において細かい粒子が含まれてしまうが, それぞれ対応するフルイ目通過までの破碎を目的としており, 細かい粒子の混入は僅かであるため, その影響はほとんど受けていないと考えられる。今回計測した珪砂の密度が $\rho_s=2.63$ g/cm³であり, 軽量材の真密度を 100%とした場合には珪砂の密度は 103%と僅かな差となるが, 軽量材の見かけの密度を 100%とした場合だと珪砂は 164%と大きく異なる。一方, 予備実験の結果において軽量材の主原料である膨張性頁岩の土粒子の密度が $\rho_s=2.57$ g/cm³を示しており, また著者らの異なる種類の軽量材の研究⁹⁾において 0.075 mm 以下の 12 時間煮沸条件で原料と同等の密度が得られている。さらに神山⁹⁾らによる 8 種類の土質における検討において最長 10 時間煮沸で定値になると報告されているため, 今回の軽量材においても, 0.075 mm 以下の試料において 12 時間煮沸時の値を真密度と評価することが適当と考えている。

以上より, 異なる条件下で土粒子の密度試験を行った結果, 軽量材内部に準閉塞内間隙の存在が確認された。また, この間隙内に吸水し, 保水してしまうと質量が増し軽量性を損なうことになる。しかし, 自然界で被圧水や水蒸気などの外力との接触が長期間作用する条件は稀であり, 地中の排水性の確保など地下水との接触を回避すれば, 路盤材として適用するには閉塞内間隙と同様に軽量性に寄与する構造であると考えられる。

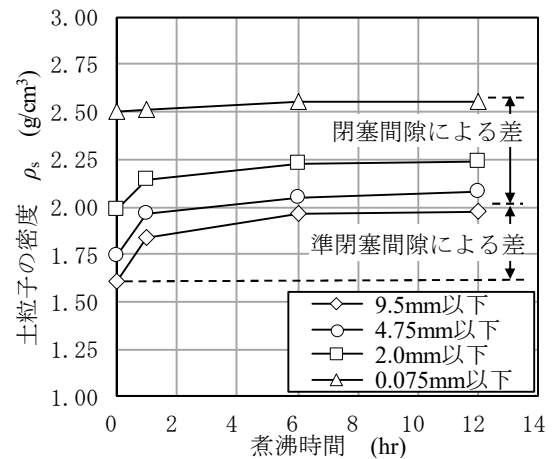


図-3 煮沸時間と粒子条件の違いによる土粒子の密度の変化

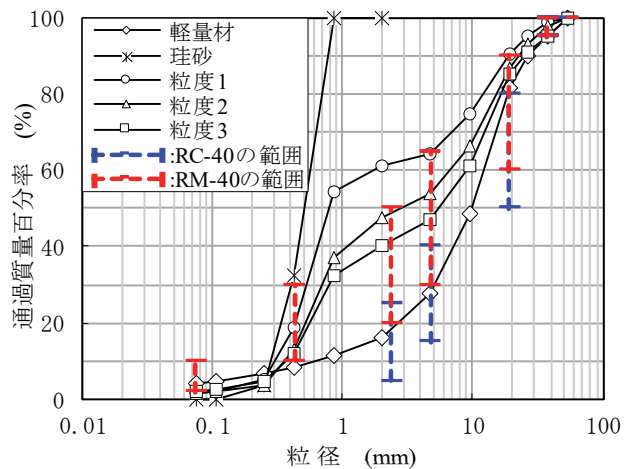


図-4 各試料の粒径加積曲線と基準粒度範囲

(2) 試験粒度

舗装設計施工指針¹⁰⁾には, 再生材の品質等がまとめられており, 粒状路盤材として下層路盤に用いられている再生クラッシュラン (以下, RC) と, 適切に粒度調整が行われ上層路盤に用いられる再生粒度調整碎石 (以下, RM) として図-4 に示す粒度範囲が望ましいとされている。土倉¹¹⁾は, リサイクル材料を用いて品質規定範囲内の粒度調整による CBR 変化を検討しており, CBR が最も大きくなる粒度は, 規定粒度の範囲内において細かい粒子の質量割合が最も多くなる粒度, すなわち規定範囲の上限粒度であり, また粒度が異なると 2 倍以上の違いが生じると報告している。

そこで本研究では, 先行研究と同様に軽量材は珪砂に対し質量比で 1:1 (以下, 粒度 1), さらに粒度改善のため, RM の望ましい粒度範囲内で調整した混合比 2:1 (以下, 粒度 2) と 3:1 (以下, 粒度 3) の 3 つの軽量盛土混合材 (以下, 混合材) により強度・変形特性などを検討することとした。なお, 本研究では全体の乾燥質量に対する質量比で混合しており, 軽量材の混合率は順に, 50%, 67%, 75%となる。図-4 にはこれらの粒径加積曲線を示した。図中には混合前の軽量材と珪砂の粒度も示

している。粒度1は、RMにおける上限粒度を一部逸脱し、粒度2および粒度3はRMの粒度範囲であり、混合前の軽量材はRCの粒度範囲内である。

表-1には各材料と混合材の基本的性質を示した。単位体積重量は、締固めを伴わない山積みした時の状態を想定しJIS A 1104 骨材の単位容積質量及び実積率試験より求めた値であり、軽量材が10 kN/m³程度と非常に軽い材料であることが分かる。軽量材の推定一軸圧縮強さ q_u は、締固めた供試体で実施する土の一軸圧縮強さではなく、軽量材を岩石として考えた場合であり、粒径 $\phi 10$ mm程度の軽量材粒子10個を無作為に抽出し実施した岩石の点載荷試験¹²⁾結果より推定した岩石の一軸圧縮強さである。その推定値 $q_u=14.2 \sim 23.0$ MN/m²の平均値が18.4 MN/m²となり、JGS 3811-2011¹²⁾の評価方法より、軽量材粒子は軟岩相当の材料と言える。

つぎに、混合材においては、粒度1, 2, 3の曲率係数が全て $U_c < 1$ を示し有意な違いがないのに対し、均等係数 U_e が、それぞれ4.11, 18.70, 23.50であり、締固めに対する粒度分布としては粒度3が最も良好であるといえる。透水係数は、3つの試料で同じ10⁻⁵ m/sオーダーを示すが、粒度1, 2, 3の順で僅かに大きくなっている。なお、透水試験では、19 mm以下の自然含水比の試料を用い、4.5kgランマー、5層25回で直径10cmの供試体を作製し、JIS A 1218の定水位試験方法を用いた。

図-5には3混合材のE-b法による突固めによる土の締固め試験結果を示した。締固め曲線に明瞭なピークが得られており、締固めし易い材料といえる。なお、本試験後には実施していないが、4.5kgランマー、3層・92回の同様な締固めエネルギーで実施するCBR試験後に粒度試験を実施し、粒子破碎が生じていることを確認している。通常は均等係数が増加するほど粒度分布が良く締固まると考えられ、最大乾燥密度も大きくなるが、本研究では、見かけの密度が、軽量材に対し珪砂が1.64倍と極端に異なる材料の混合材のため、軽量材の混合量が多いほど最大乾燥密度が小さい傾向となる。ここで、すべての粒子が均一で見かけの密度が1.64倍異なると仮定すると、粒度1, 2, 3の軽量材が占める体積割合は順に62%, 77%, 83%となる。また、全ての試料で最適含水比が一樣に約20%を示している理由については、今回の粒度範囲では細粒分含有率が2%程度以下と乏しく、保水性や粒子間の結合力に明瞭な差がでなかったためと考えている。

3. 実験方法と手順

(1) 実験方法

繰返し載荷による強度低下の有無や、粒度分布によ

表-1 基本的性質

項目	単位	軽量材	珪砂	軽量盛土混合材		
				粒度1	粒度2	粒度3
自然含水比 W_n	%	10.0	0.0	9.4	9.7	10.5
最大粒径	mm	53.0	2.0	53.0	53.0	53.0
礫分	%	83.6	0.0	39.1	52.3	59.8
砂分	%	12.1	99.8	59.2	46.1	38.1
細粒分	%	4.3	0.2	1.7	1.6	2.1
均等係数 U_e		19.00	1.64	4.11	18.70	23.50
曲率係数 U_c'		3.65	1.03	0.590	0.172	0.169
地盤材料の分類名		粒径幅の広い砂まじり礫	分級された砂	分級された礫質砂	粒径幅の広い砂質礫	粒径幅の広い砂質礫
分類記号		(GW-S)	(SP)	(SPG)	(GWS)	(GWS)
単位体積重量(自然含水状態)	kN/m ³	9.8	-	14.5	13.1	12.5
単位体積重量(絶乾状態)	kN/m ³	9.0	16.6	14.1	12.1	11.3
岩石の推定一軸圧縮強さ q_u	MN/m ²	18.4	-	-	-	-
透水係数 k	m/s	-	-	2.6E-05	2.7E-05	3.0E-05

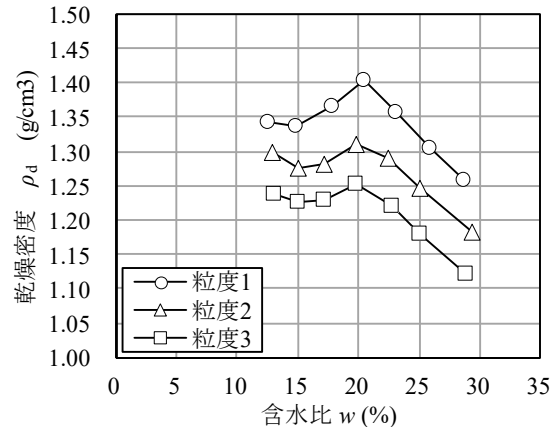


図-5 各試料の乾燥密度と含水比の関係

る強度や変形特性の違いを調べるために、CBR試験と、繰返し載荷を与えない場合および与えた場合における不飽和状態の供試体に対して中型三軸試験を実施した。

三軸試験の供試体は、質量40 kgの上載式バイブレータを用いて、直径15 cm、高さ36 cmのモールドに最適含水比で調整した試料を6層に分け、7分間の振動締固めで作製した。なお、振動締固め条件は、予備試験において締固め時間と乾燥密度の関係から乾燥密度がほぼ一定値となる時間に加え、後述する95%CBRと比較するため、締固め度 $D_c=95\%$ の乾燥密度に近似することを確認し決定した。供試体作製終了後、等方応力状態で下層路盤としての応力状態を想定した拘束圧49.0, 68.0 kPaを負圧によって16時間程度与え、等方圧密終了後、単調載荷三軸圧縮試験を軸ひずみ速度0.05%/minにて、排気・排水条件で行った。なお、前述の拘束圧は、

舗装設計便覧に示される計算例¹³⁾を基に GAMES より試算したアスファルト混合物層の弾性係数が低下する8月のN6~N7交通における下層路盤の上面の応力状態46~69kPa程度の範囲である。

つぎに、繰返し载荷履歴を与える場合には、等方圧密終了後に、所定の拘束圧で等方応力状態から軸差応力振幅 Δq ($= (q_{cyc})_{max} - (q_{cyc})_{min}$) = 62.2 kPa, $(q_{cyc})_{max} = 101.6$ kPa, $(q_{cyc})_{min} = 39.4$ kPa を载荷周波数 0.125 Hz の正弦波で1万回の繰返し载荷を排気・排水条件で与え、その後、単調载荷三軸圧縮試験を行った。なお、繰返し载荷時の軸差応力振幅は、予備試験での単調载荷三軸圧縮試験で得られた最大軸差応力 q_{max} に基づき、路盤材のレジリエントモデュラス試験¹⁴⁾で規定されている繰返し応力振幅(载荷条件3に相当)を参考に決定した。

(2) 試験装置

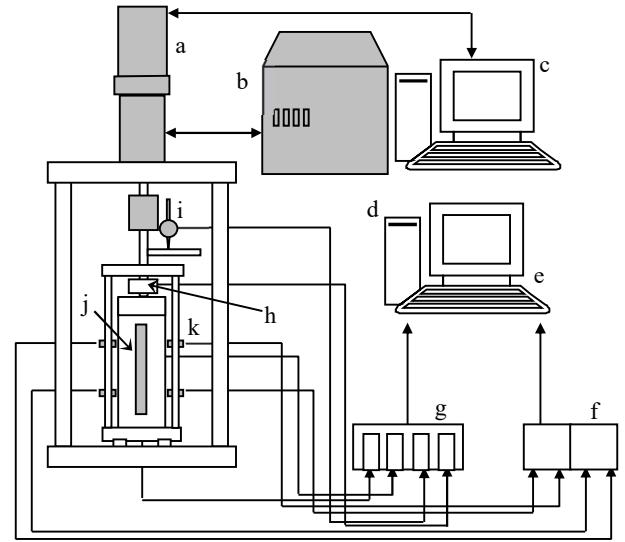
試験装置の概略図を図-6に示す。三軸試験機は単調载荷試験装置、側方変位測定用非接触変位計 (GAP センサー)、軸荷重測定装置 (Load cell) によって構成されている。測定する項目は、軸荷重、供試体軸変位、供試体側方変位の3項目である。試験中の軸変位量の測定には、ダイヤルゲージ、局所変形測定装置 (LDT : Local Deformation Transducer) の2種類の測定装置を用いた。LDT, ダイヤルゲージの順に精度が高いが、LDTは軸ひずみ2%弱までしか算出することができないため、本研究では、これを超えるような軸ひずみは、ダイヤルゲージによる変位量からベディングエラー量を差し引いて補正した変位量を用いて算出した。

4. 結果および考察

(1) 粒度の違いによる供試体密度と CBR への影響

粒度分布による締固め効果を調べるため、図-1に示した基本的物理量の関係を基に水浸前の CBR 供試体から空気間隙率を算定した。軽量材の真密度を $\rho_{sash} = 2.55$ g/cm³, 見かけの密度を $\rho_{sapp} = 1.60$ g/cm³, 珪砂の密度を $\rho_s = 2.63$ g/cm³ (一般土のため真密度) とし各混合率により平均化し、混合材における見かけの密度 ρ_{sapp} とした。また、水の密度を $\rho_w = 1.00$ g/cm³ とし、自然状態で粒子内の賦存水はないものと仮定した。

つぎに、CBR 試験前の試料と CBR 試験 92 回締固め後の試料の粒径加積曲線を図-7に示し、各締固め回数毎の粒子破碎率の関係を図-8に示した。図-8に示すとおり、各締固め回数毎において Marsal の方法より粒子破碎率を算定したところ、各試料で一義的な傾向はなく、概ね $B_M = 10 \sim 15\%$ の範囲であった。この結果を踏まえ粒度の違いによる粒子破碎の影響は小さいと判断し、空気間隙



- a: 油圧サーボシリンダー
- b: 油圧サーボユニット
- c: 油圧サーボ制御用パソコン
- d: 測定用パソコン
- e: AD変換ボード
- f: 動ひずみアンプ
- g: 非接触変位計アンプ
- h: ロードセル
- i: ダイヤルゲージ
- j: 局所変形測定装置 (LDT)
- k: 非接触変位計

図-6 試験装置の概略図

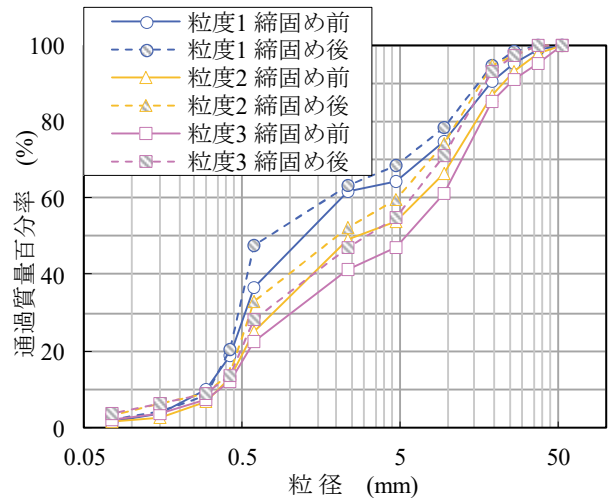


図-7 CBR 試験前後の粒径加積曲線 (92回締固め)

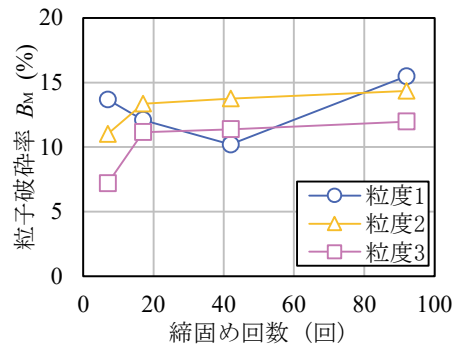


図-8 各締固め回数と粒子破碎率

表-2 CBR 供試体における空気間隙率

	土粒子の密度 (g/cm ³)					締固め回数 (回)	供試体含水比 (%)	供試体密度 (g/cm ³)		空気間隙率 (%)	
	軽量材		珪砂	混合材				湿潤	乾燥	n_a	$n_{a-inter}$
	ρ_{s-app}	ρ_{scrush}	ρ_s	ρ_{s-app}	ρ_{scrush}			ρ_t	ρ_d		
粒度1	1.60	2.55	2.63	2.12	2.59	7	20.3	1.569	1.304	23.2	11.8
						17	20.5	1.613	1.338	20.9	9.3
						42	20.5	1.646	1.366	19.2	7.4
						92	20.5	1.689	1.402	17.2	5.0
粒度2				1.94	2.58	7	20.1	1.483	1.235	27.3	11.6
						17	20.3	1.514	1.258	25.6	9.7
						42	19.9	1.542	1.286	24.5	8.2
						92	20.1	1.579	1.315	22.5	5.9
粒度3				1.86	2.57	7	20.2	1.392	1.159	31.6	14.3
						17	19.9	1.427	1.190	30.0	12.3
						42	20.0	1.458	1.215	28.4	10.3
						92	20.1	1.501	1.250	26.3	7.6

率算定の際には一律破砕しないものとした。

間隙における空気間隙率 $n_{a-inter}$ と、閉塞内間隙を加えた全空気間隙率 n_a は、参考文献(6)と同様に軽量材の密度を ρ_{scrush} 、見かけの密度を ρ_{sapp} で表すと以下の式で整理される。

全空気間隙率

$$n_a = 1 - \left\{ \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(\frac{\rho_d}{\rho_{scrush}} + \frac{w}{100} \right) \right\} \quad (1)$$

間隙の空気間隙率

$$n_{a-inter} = 1 - \left\{ \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(\frac{\rho_d}{\rho_{s-app}} + \frac{w}{100} \right) \right\} \quad (2)$$

式(1)および式(2)で算定した空気間隙率を表-2にまとめた。全空気間隙率 n_a は、軽量材の混合率が多い粒度3が最も大きく 26.3~31.6%を示し、粒度2が 22.5~27.3%、粒度1が 17.2~23.2%となっている。すなわち混合率により n_a の値に違いがみられるが、締固め回数が7回から92回に増加すると、3試料とも一様に n_a は5~6%程度減少する傾向を示す。

一方、準閉塞内間隙と閉塞内間隙を内包した見かけの密度 ρ_{sapp} で算定した $n_{a-inter}$ は、92回締固め時には粒度1が 5.0%と非常に良好な値を示しており、粒度2が 5.9%、粒度3が 7.6%となっている。なお、異なる締固め回数でも、この傾向は同様である。均等係数から粒度3の粒度改善を期待したが、これらの結果より土粒子の密度が1.64倍と極端に異なる材料の混合材のため、質量百分率から算定される均等係数による予測と異なり、粒度1が最も密になっており、空気間隙率 $n_{a-inter}$ が小さくなる。すなわち、混合率の変更による粒度改良を期待したが、同一エネルギーでは、粒度1が最も間隙に対する空気間隙率が小さくなる粒度となった(図-9)。

図-10には混合率と95%CBRおよび乾燥密度の関係を

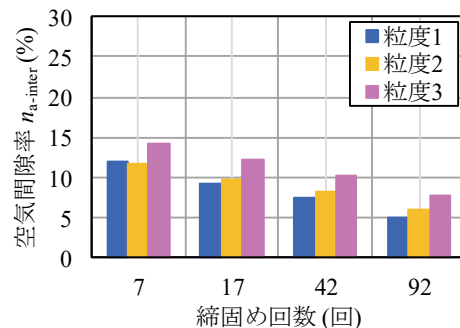


図-9 締固め回数と $n_{a-inter}$ の関係

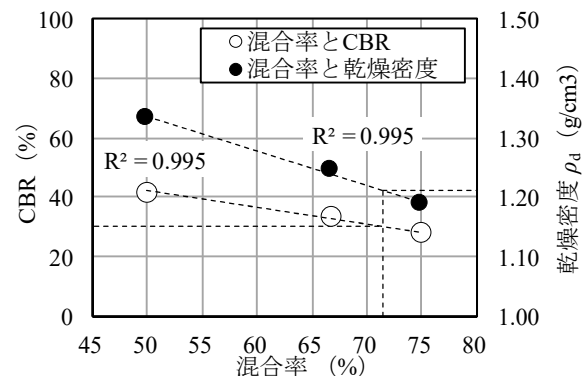


図-10 混合率と CBR 及び乾燥密度の関係

示した。一義的な傾向を示しており、強い相関性が得られたため、任意の混合率の CBR が推定可能であると考えられる。なお、北海道開発局における下層路盤材の品質規格は CBR=30%以上¹⁵⁾であるため、粒度1, 2はこれを満足し、また CBR=30%を確保する場合には、混合率 71.5%、その時の供試体の乾燥密度は 1.20 g/cm³程度となる。すなわち、最適含水比で締固めた状態の湿潤単位体積重量が 14 kN/m³程度であり、一般的な路盤材が 20 kN/m³程度であるため、一般的な碎石における重量の70%程度まで軽量化が図られる材料といえる。

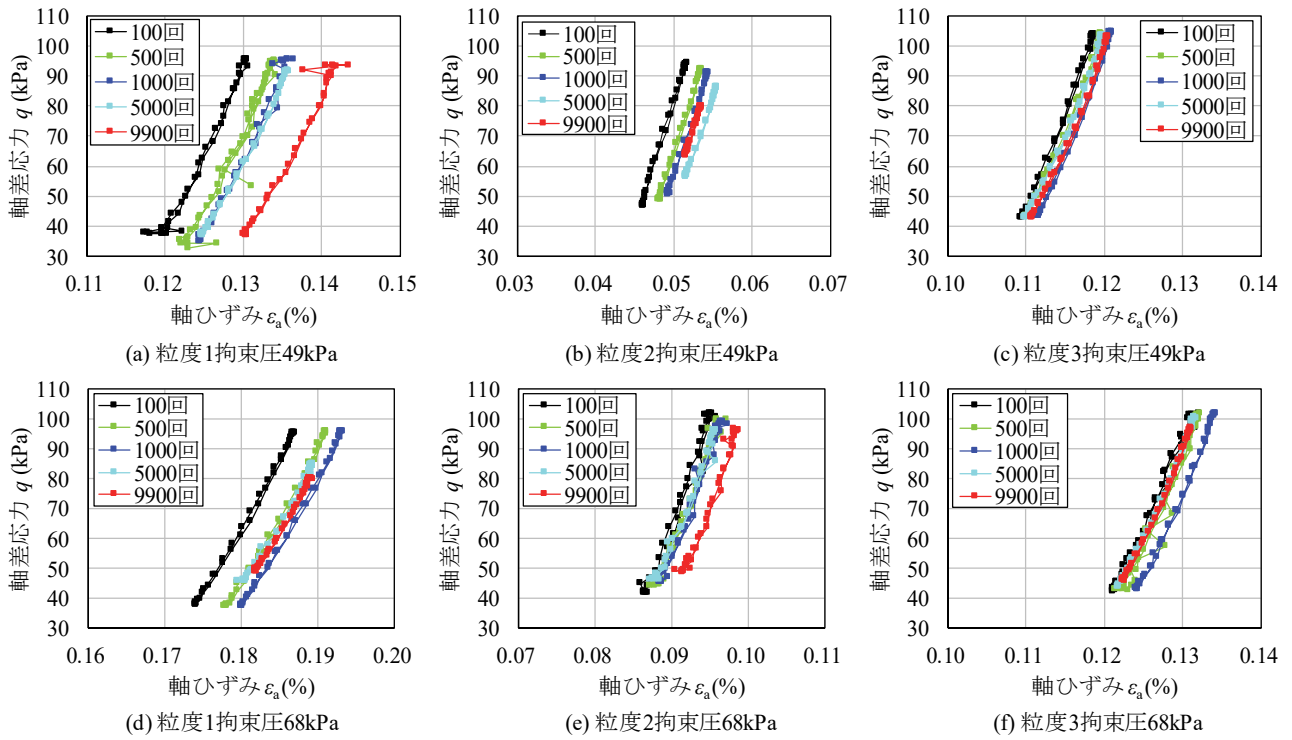


図-11 $q \sim \varepsilon_a$ の関係

(2) 繰返し载荷中の変形特性

図-11(a)~(f)は、繰返し载荷回数 $N_c=100, 500, 1000, 5000$ および 9900 時における軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係である。繰返し载荷中の軸差応力振幅は、载荷回数が増加するにつれ設定した $(q_{cyc})_{max}=101.6 \text{ kPa}$ 、 $(q_{cyc})_{min}=39.4 \text{ kPa}$ よりも小さくなっている。これは载荷の入力信号より変形応答がわずかに遅れるタイムラグにより、目標の軸差応力に到達する前に、設定した载荷周波数 0.125 Hz に到達し、反転したためと考えられる。载荷・除荷の $q \sim \varepsilon_a$ 曲線は、履歴ループが小さくほぼ重なっており、各载荷回数では、弾性的な挙動を示している。一方、繰返し载荷回数の増加とともに累積軸ひずみが発生しているが、 $N_c=100$ 回と 9900 回の間で発生する累積軸ひずみ増分の変化量を見ると、拘束圧 $\sigma_c = 49 \text{ kPa}$ (図-11(a)~(c)) に比べて 68 kPa (図-11(d)~(f)) のほうが、概ね小さいことが分かる。これは、拘束圧が大きいほうが粒子の移動や粒子同士のスリップが生じにくくなることに起因していると考えられる。また、 $N_c=1000$ 回から 5000 回の累積ひずみを見ると、粒度 3 の場合には、 $\sigma_c = 49, 68 \text{ kPa}$ とともに、概ね、減少傾向にある。これは、粒度 3 が粒度 1, 2 に比べ円礫状の粒子が多いため、繰返し载荷により粒子が間隙に入り込み全体の間隙が減少し過圧密的な状態になったためと推察される。

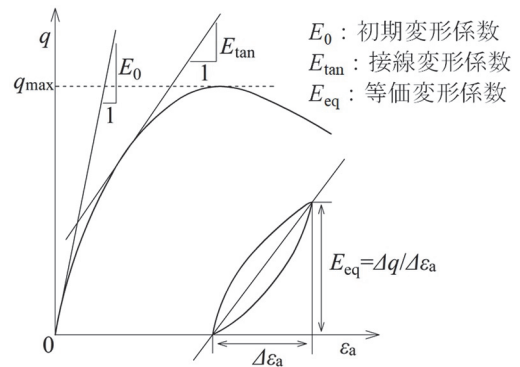


図-12 各種変形係数の定義

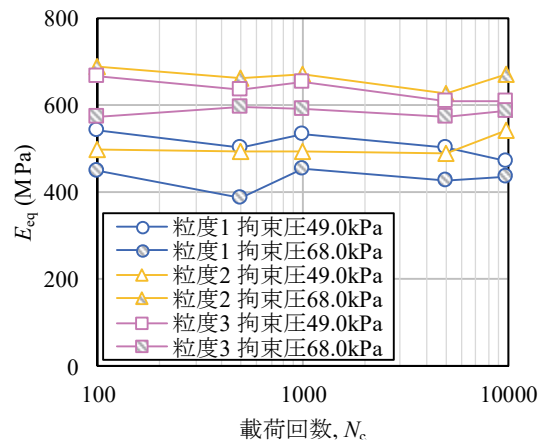


図-13 $E_{eq} \sim N_c$ 関係

図-12 に各種変形係数の定義を示す。図-13 は q と ε_a 曲線の割線勾配から得られた等価変形係数 E_{eq} と载荷回数 N_c の関係である。図-13 より、 E_{eq} は、 $400 \sim 700 \text{ MPa}$ の範囲を示しており、粒度の違いによる一義的な傾向は認め

られない。詳細は後述するとおり、粒度分布、軽量材の量と粒子形状や粒子の硬さの相互作用の影響が出ている結果と考えているが、総じて安定的な値を示している。

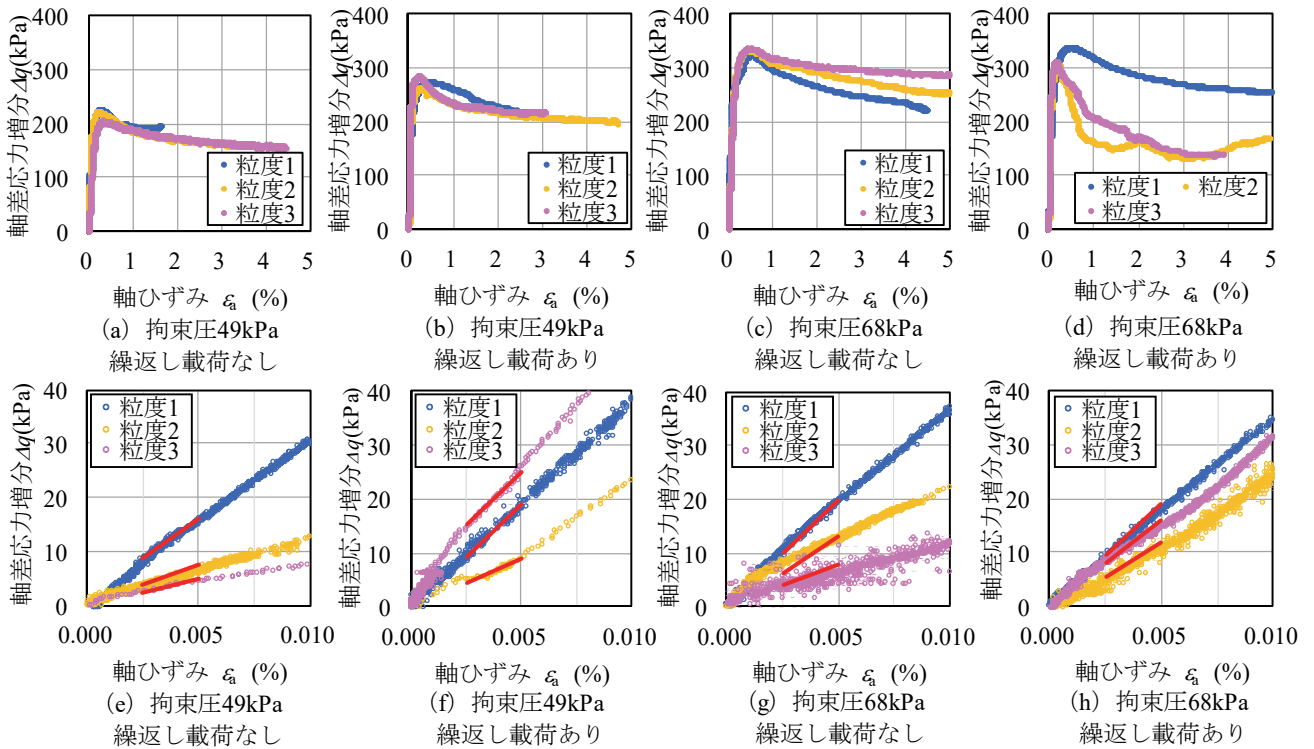


図-14 $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係： (a)~(d)： $\epsilon_a = 5\%$ まで，(e)~(h)： $\epsilon_a = 0.010\%$ まで

(3) 繰返し載荷履歴による強度・変形特性に及ぼす粒度分布の影響

3つの混合材に対して実施した繰返し載荷を与えない場合および与えた場合の単調載荷三軸圧縮試験による軸差応力増分 Δq と軸ひずみ ϵ_a の関係を軸ひずみの範囲ごとに図-14に示した。図-14(a), (c)に示したとおり、繰返し載荷を与えない場合の両拘束圧における q_{max} には、粒度の違いで有意な差が認められなかった。これは、粒度改善と円礫(球体)状の粒子が増えることによるせん断抵抗の減少の相反する作用によるものと考えられる。また、拘束圧が近い2点での結果となるが、 q_{max} と α' の関係より、 ϕ を求めたところ、3つの粒度で概ね $\phi=45^\circ$ と同等な値を示したことから、この要因も有意な差が見られなかった一因であると考えられる。図-14(a)~(d)に示したとおり、繰返し載荷を与えた場合には、与えない場合に比べて q_{max} に至るまでに発生する軸ひずみ量が小さい。この結果は、前述のとおり繰返し載荷による僅かな間隙(ここでは間隙を示す)の減少に伴い、土粒子の噛み合わせ効果により初期剛性が増加することで、最大荷重を發揮するまでの軸ひずみが小さくなったものと考えている。また、各粒度において一般的な地盤材料と同様に拘束圧が大きいほど q_{max} が大きい。さらに、同じ拘束圧および繰返し載荷の有無の条件で各試料における最大軸差応力 q_{max} を比較すると、拘束圧49kPaでは一律20%程度向上し、拘束圧68kPaでは図-14(c), (d)のとおり明瞭な差は見られない。これは拘束圧69kPaを与えることに

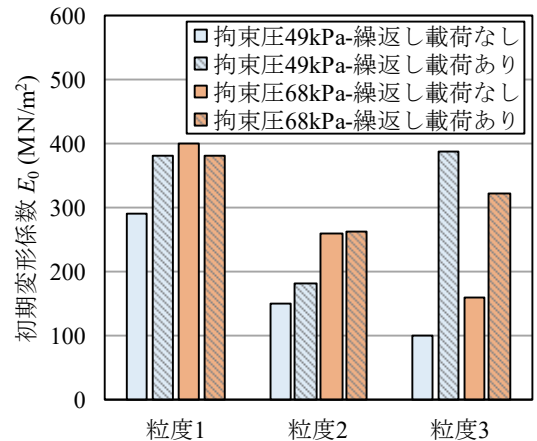


図-15 試験条件ごとの E_0 比較

より、拘束圧49kPaの繰返し載荷ありと同じ程度の間隙が減少しているためと考えている。軽量材の割合が多く80%程度混合している粒度2と粒度3の繰返し載荷後では、 q_{max} 発生後に Δq が急激に低下している。これは、粒度2と粒度3が円礫(球体)状の粒子が支配的であるため、粒子の移動や粒子同士のスリップが生じやすいと推察され、ピーク後に、供試体のせん断面が発達しやすい状況にあったためであると考えられる。しかし、本研究の範囲内では、総じて繰返し載荷の影響で強度低下が生じず、また粒度分布の違いが q_{max} に及ぼす影響は小さいといえる。

図-14(e)~(h)中に示す赤線の勾配から求めた E_0 を粒度ごと図-15に示した。なお、一般的に0.001%程度の軸ひ

ずみレベルにおける $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係の接線勾配を初期変形係数 E_0 と定義されているが、本実験では微小ひずみ領域において、ノイズによるデータのばらつきが大きかったため、0.005%の範囲として定義した。図-15より、粒度1と粒度2では、繰返し载荷なし、ありの比較では同程度の値または2割程度増加を示すのに対して、粒度3の繰返し载荷を与えた場合の E_0 は他に比べて2~3倍大きい値を示している。これは、土粒子の密度が極端に異なる材料を質量比で混合しているため、特に粒度3では円礫(球体)状の軽量材が占める体積割合が多くなり、粒度分布の影響に比べて軽量材の特性が E_0 の値に影響を及ぼしたためと考えている。すなわち、円礫(球体)状のため、繰返し载荷中に、粒子同士のすべりや粒子の回転、移動が生じ、粒子が間隙に入り込み全体の間隙が減少したことにより、 E_0 が顕著に向上したものと考えられる。なお、既往研究^{16),17)}によると、球体に近い粒子の材料の方が繰返し载荷の影響が大きいとされている。図-16には、繰返し载荷前の E_0 と CBR の関係を示した。今回の拘束圧の範囲内では、相関性が見られることから、CBR によって各拘束圧に応じた変形係数を推定することが可能であると考えられる。この関係は、前述のとおり、今回の範囲においては粒度分布の影響が小さく、また繰返し载荷を行っていない結果であるため、軽量材粒子の硬さと量に依存した傾向と考えている。図-17には $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係における接線勾配として定義される接線変形係数 E_{tan} の軸ひずみレベル依存性について示した。木幡ら¹⁸⁾によると、粒状材料の場合には、せん断中の変形係数は繰返し载荷振幅の範囲内では弾性的性質が卓越し、その後、 q_{max} 程度のひずみレベルまで繰返し载荷を与えない場合の値と同程度以上の値を示すとされている。本実験では粒度に依らず繰返し载荷履歴を与えた場合には、载荷初期からせん断の進行とともに E_{tan} が同程度もしくは増加傾向にあり、一般的な粒状材料と同様な傾向となった。また、拘束圧 49 kPa の粒度1および粒度2の場合には、ばらつきが見られるものの、概ね、接線変形係数 $E_{tan}=250$ MPa 程度、粒度3の場合には、 $E_{tan}=400 \sim 600$ MPa 程度を示す。拘束圧 68 kPa の場合には、図-17(c), (d)に示すとおり粒度に依らず概ね $E_{tan}=200 \sim 300$ MPa 程度である。なお、舗装各層に使用される粒状材料の変形係数は100~600 MPa の範囲とされる¹⁹⁾。

以上より、本研究で用いた軽量材は、盛土材としての利用に留まっているが、本研究の範囲内ではあるが通常の碎石と同様な剛性を有し、また下層路盤として求められる CBR の目標値を粒度3で下回っているのに対し、粒度1と2では満足している。すなわち、粒度2の混合率(67%)以下であれば、軽量性と剛性を併せ持ち、残留沈下が生じている道路の下層路盤層への置換対策としての有効利用が可能と考えられる。なお、北海道の地盤

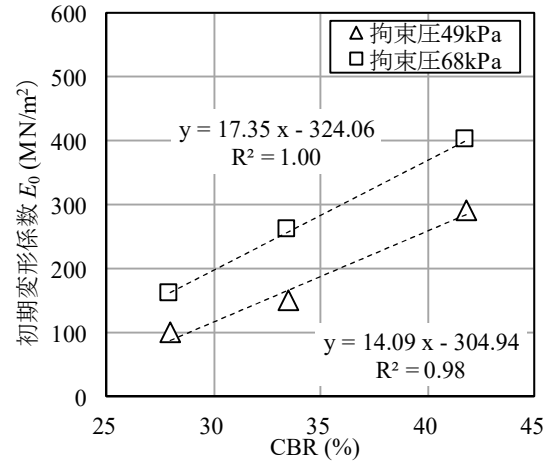


図-16 $E_0 \sim$ CBR 関係

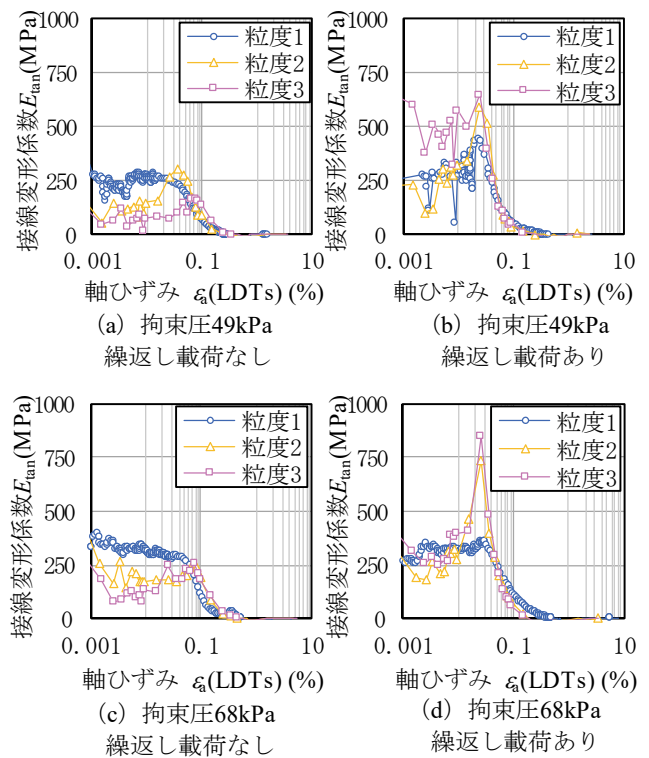


図-17 軸方向ひずみと接線変形係数の関係

条件を例に挙げたが、寒冷地での適用においては、非凍上性であることや凍結融解抵抗性が必要である。今回の混合材は、細粒分含有率が2%程度以下の材料のため凍上性の懸念が少なく、本研究で得られた知見により内間隙への吸水の可能性は低いと考えている。しかし、内間隙内の水が凍結し膨張すると、融解後には強度低下が生じる懸念があるため、凍上や凍結融解に対する検討に加え、実用化に向け現地での混合工法や施工厚さなどの検討が今後の課題であると考えている。

5. 結論

本研究は、人工軽量盛土混合材の下層路盤としての適用性を検討したものである。本研究では、異なる条件で土粒子の密度試験を実施するとともに、粒度を変えた3試料において CBR 試験、単調載荷及び1万回繰返し載荷後の三軸試験を実施し、本研究の範囲内で以下の結論を得た。

- 1) 軽量材には粒子内間隙が非常に多いが、通常の水浸程度では吸水せず、煮沸により強制的に吸水する準閉塞内間隙が存在することが明らかになった。
- 2) 軽量材と珪砂の混合率を 50%, 67%, 75%とした混合率と 95%CBRが一義的な傾向を示し、また今回の粒度範囲では間隙の空気間隙率が最も小さい粒度分布は 50% (混合比 1:1) であった。
- 3) 混合率に依らず全ての試料で繰返し載荷を与えた場合には、与えない場合に比べてピーク強度に至るまでに発生する軸ひずみ量が小さくなり、また拘束圧 49 kPa の場合ではピーク強度が増加する。
- 4) 混合率に依らず全ての試料で繰返し載荷を与えた場合、 E_{tn} が同等または増加傾向にあり、一般的な粒状材料と同様な傾向を示す。
- 5) 本研究の範囲内においては、繰返し載荷を与えない場合の E_0 と CBR が一義的な傾向を示す。
- 6) 繰返し載荷履歴による E_0 の変化は、混合率を 50%, 67% の場合には、繰返し載荷を与える前と同程度から 20% 程度の増加に対し、混合率 75% の場合には 2~3 倍の大きい値を示す。
- 7) CBR=30% を確保させる場合は、混合率 67% (混合比 2:1) とし、その場合には一般的な碎石における路盤重量の 70% 程度まで軽量化が図られる。

謝辞: 本研究に際し、日本メサライト工業株式会社から人工軽量盛土材の試験試料を提供いただいた。また、試料調整や実験の実施およびデータ整理について、室蘭工業大学大学院、前修士2年、遠藤弘気氏、前学部4年、森田幸矢氏、丸山孝成氏、および現修士2年、Nao Minzhuri 氏の多大な協力を得たことを、ここに記して謝意を表します。

NOTES

注1)日本メサライト工業株式会社：軽量盛土材カルグリ
<https://www.mitsui-kinzoku.co.jp/group/mesalite/products/products02.html>, 2023.8.22

注2)日本メサライト工業株式会社：カルグリ施工実績
https://www.mitsui-kinzoku.co.jp/group/mesalite/technology/pdf/karuguri_jirei_ver10.pdf, 2023.8.22

注3)一社団法人セメント協会：セメント強さ試験用標準砂

<https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/2a.html>, 2023.8.22

REFERENCES

- 1) 林宏親, 西本聡, 大場久義: 泥炭地盤における道路の長期沈下とライフサイクルコスト, 第 50 回北海道開発局技術研究発表会概要集, コ-6, 2006. [Hayashi, H. Nishimoto, S. Ohba, H.: Deitanjibanniokerudoronochokichinkatou-happpyokaigaiyoshu, Ko-6, 2006.]
- 2) (公社)日本道路協会: 舗装の構造に関する技術基準・同解説, pp. 6-9, 2001. [Japan Road Association: *Hosonokozonikansurugijutsukijun & dokaisetsu*, pp. 6-9, 2001.]
- 3) 例えば, 安倍隆二, 上野野草, 木村孝司: 積雪寒冷地におけるガラスカレットの凍上抑制層への適用性に関する研究, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 72, No. 3(舗装工学論文集第 21 巻), pp. I_159-I_167, 2016. [Abe, R. Chigusa Ueno, C. Kimura, T.: Applicability of Glass Cullet as The Antifrost Heave Layer for Roads in Cold Snowy Regions, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. E1(Pavement Engineering), Vol.72, No.3(Journal of Pavement Engineering, Jscce Volume 21), pp.I_159-I_167, 2016.]
- 4) 例えば, 松田博, 石蔵良平, 和田正寛, 來山尚義, 白元珍, 谷信幸: 軽量盛土材として用いた高炉水砕スラグの特性の経年変化, 地盤工学ジャーナル, Vol. 7, No. 1, pp. 339-349, 2012. [Matsuda, H. Ishikura R. Wada, M. Kitayama, N. Beak, W. Tani, N.: Aging effect on the physical and mechanical properties of granulated blast furnace slag as lightweight banking, *Japanese Geotechnical Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 339-349, 2012.]
- 5) 若槻好孝, 田中等, 内田裕二, 入江功四郎, 兵動正幸, 吉本憲正: クリンカアッシュの材料特性と適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 4, pp. 271-285, 2007. [Wakatsuki, Y. Tanaka, H. Uchida, Y. Irie, K. Hyodo, M. Yoshimoto, N.: Material characteristics of clinker ash and examination of applicability, *Japanese Geotechnical Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 271-285, 2007.]
- 6) 菅原正則, 松田圭大, 木幡行宏, 畑山良二, 川端伸一郎: 寒冷地におけるガラス発泡軽量材の舗装材料への適用性に関する研究, 第 27 回舗装工学講演会講演集, PL 2022-052, 2022. [Sugawara, M. Matsuda, K. Kohata, Y. Hatakeyama, R. Kawabata, S.: STUDY ON THE APPLICABILITY OF GLASS FOAM LIGHTWEIGHT MATERIALS TO PAVEMENT GEOMATERIALS IN COLD REGION, *Dai27kai-hosokogakukoenkaikoenshu*, PL 2022-052, 2022.]
- 7) Yafei ZHAO, Yukihiro KOHATA: STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ARTIFICIAL LIGHTWEIGHT SUBBASE MATERIAL UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADING, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 77, No. 2(舗装工学論文集第 26 巻), I_217-I_224, 2021. [Yafei

- ZHAO, Yukihiko KOHATA : STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ARTIFICIAL LIGHT-WEIGHT SUBBASE MATERIAL UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADING, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. E1 (Pavement Engineering), Vol. 77, No. 2 (Journal of Pavement Engineering, Jscs Volume 26), I_217-I_224, 2021.]
- 8) 中田隆文, 三浦清一 : 火山灰質粗粒土の粒子破砕による間隙構造の変化と定量化に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 1, pp. 224-236, 2007. [Nakata, T. Miura, S. : Change in Void Structure to Particle Breakage of Volcanic Coarsegrained Soil and Its Evaluation, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. C, Vol.63, No.1, pp.224-236, 2007.]
- 9) 神山光男 : 土粒子の比重測定について, 土と基礎, Vol. 6, No. 2, pp. 4-8, 1958. [Kamiyama, M.:Doryushinohijusokuteinitsuite, *Soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 4-8, 1958.]
- 10) (公社)日本道路協会 : 舗装設計施工指針, pp. 275-280, 2006. [Japan Road Association: *Hososekkeiseikoshishin*, pp. 275-280, 2006.]
- 11) 土倉泰 : 品質規格範囲内の粒度調整がリサイクル材料の CBR に及ぼす影響, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol.67, No.3(舗装工学論文集第 16 卷), pp.I_123-I_128, 2011. [Nakata, T. : EFFECT OF GRAIN SIZE DISTRIBUTION ADJUSTMENT UNDER QUALITY STANDARD ON THE CBR VALUE OF RECYCLE MATERIALS, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. E1 (Pavement Engineering) , Vol.67, No.3(Journal of Pavement Engineering, Jscs Volume 16) , pp.I_123-I_128, 2011.]
- 12) (公社)地盤工学会 : 地盤調査の方法と解説, p.63, pp.448-459, 2013. [The Japanese Geotechnical Society : JAPANESE GEOTECHNICAL SOCIETY STANDARDS Geotechnical and Geoenvironmental Investigation Methods, p.63, pp. 448-459, 2013.]
- 13) (社)日本道路協会 : 舗装設計便覧, pp.129-131, 2006. [Japan Road Association: *Hososekkeibinran*, pp. 129-131, 2006.]
- 14) (社)日本道路協会 : 舗装調査・試験法便覧, 第 4 分冊, pp.[4]-55~[4]-64, 2007. [Japan Road Association: *Hosochosa & shikenhobinran*, Volume 4, pp. [4]-55~ [4]-64, 2007.]
- 15) 北海道開発局 : 道路・河川工事仕様書, pp.3-39, 2021. [Hokkaido Regional Development Bureau, *Doro & kassenkoshishiyoshu*, pp.3-39, 2021.]
- 16) 只野尚徳, 木幡行宏 : 単粒度碎石の三軸せん断特性に及ぼす粒子形状の影響, 地盤工学会北海道技術報告集, 第 41 号, pp. 183-192, 2001. [Tadano, H. Kohata, Y. : Tanryudosaisekinosanjikusendantokuseiniyobosuryushikeijonoeikyo, *JibankogakukaiHokkaidogijutsuhokokushu*, Dai41go, pp.183-192, 2001.]
- 17) 木幡行宏, 三浦宏介, 井口充, 関根悦夫 : 相似粒度による単粒度碎石の強度・変形特性, 鉄道力学論文集, Vol. 7, pp. 25-30, 2003. [Kohata, Y. Mira, K. Iguchi, M. Sekine, E. : THE STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF THE SINGLE-GRAIN CRUSHED STONES ON THE SIMILAR GRAIN SIZE DISTRIBUTION, *Journal of railway mechanics, JSCE*, Vol. 7, pp. 25-30, 2003.]
- 18) 木幡行宏, 只野尚徳, 関根悦夫 : 繰り返し載荷履歴を受ける単粒度碎石の変形特性, 鉄道力学論文集, 第 5 号, pp. 61-65, 2001. [Kohata, Y. Tadano, H. Sekine, E. : Kurikaeshisaikarirekioukerutanryudosaisekinohenkeitekusei, *Journal of railway mechanics, JSCE*, pp. 61-65, 2001.]
- 19) (公社)土木学会 : 舗装工学ライブラリー13b 路床・路盤材料の特性と評価, p.23, 2015 [Japan Society of Civil Engineers: *Hosokogakuribrary13b Rosho & robanzairyonotokuseitohyoka*, p.23, 2015.]

(Received September 11, 2023)

(Accepted November 20, 2023)

APPLICABILITY OF MIXTURE GEOMATERIAL OF LIGHTWEIGHT
EMBANKMENT MATERIAL AND SILICA SAND
TO SUBBASE COURSE

Masanori SUGAWARA, Yukihiro KOHATA, Keita MATSUDA,
Shinichiro KAWABATA, Yuki KIKUCHI

As roads often have a residual settlement on soft foundations, reducing the weight of the subbase course is an alternative way to solve this problem. In this study, the applicability of lightweight geo-materials made from expansive shale and sewage sludge to pavement subbase was investigated by conducting CBR tests, and triaxial tests under two types of confining pressure and with or without 10,000 cycles of cyclic loading on three samples that were simply adjusted in particle size by mixing with silica sand.

The test results showed that there was a clear trend between the mixing ratio and CBR, and that under all conditions, the strength did not decrease, showing a similar trend to crushed stone, and by applying cyclic loading, the deformation modulus increased from the same level to about 20% at the maximum load equivalent axial strain level. In addition, an appropriate particle size with both stiffness and lightness was proposed.