

シラス性軟弱路床土の改良に関する研究

伊藤 駿・工藤 正喜*・花田 智秋

Investigation on behavior for improving Shirasu ground

Takeshi ITO, Masaki KUDO* and Tomoaki HANADA

(2002年11月29日受理)

Shirasu ground has been making many troubles when it rained heavily and/or in case of road construction works. Owing to make more strong Shirasu ground, in generally, lime has been mixed into the material. In this study, Shirasu ground including different lime content have also been experienced to investigate mechanical behavior and to obtain the optimum economical condition for effective use as a construction material. Due to lack of detailed geotechnical test information about Shirasu ground, we have been performed several laboratory tests. From the geotechnical test results, numerical geotechnical relationships were newly proposed in this paper. According to the uniaxial compression strengths both of one week and ten days cured samples, the strengths of Shirasu became larger remarkably at the lime content more than 4%. We recognized that the strength of 4% content material is sufficient against the CAE standard. Therefore, we concluded that the optimum lime content might be used by this value for improving Shirasu ground.

1. 緒言

新たな道路建設や宅地造成など土地の有効利用をはかる上で、地盤の強度が不足しながらも利用せざるを得ない状況はしばしば建設現場で遭遇する。こういったところでは地盤改良工事が行われる。地盤改良工法の種類¹⁾は枚挙に暇がないが、シラス地帯などに対する明確な工法は確立されておらず、概ね石灰を混ぜる改良工法が採用されてきた²⁾。

本研究は、秋田北空港路線整備に伴う新路線の築造に当たり、シラス混じりの軟弱層の上を通る計画が生じ、地盤改良工事の必要に迫られたことから、生石灰を混入しその改良を行うために地盤工学的基礎実験を試みたものである。

生石灰を混入する場合、その量と混入後の養生日数等によって強度が変わる。従ってその強度を地盤工学的に把握することが本研究の主な目的であり、次にその実験結果より経済的混入量を見出そうとするものである。このため、いろいろな生石灰を混入したシラス試料を作成し、それに対し各種の地盤工学的実験を行った。その結果、地盤工学的パラメー

タと生石灰混入量、養生期間等との間に新たな関係式を見いだした。これによってさらに適切な経済混入量を推定することを試みた。本文ではこれらの概要を述べる。

2. 試料及び研究方法

まず、原試料について物理試験（粉末 X 線回折、比重試験、コンシステンシー試験等）を行った。次に生石灰を重量比で 2%、4%、6% 混入した試料を作成し、さらにこの時、それぞれの含有量における種々の含水比を持つ試料を作成した。そしてこれらを脱型直後、1日養生、3日養生、5日養生、7日養生、10日間養生させた試料を作成し、締固め試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験 (CU-Test) を実施した。

次にこうした実験結果から、地盤工学的パラメータを取って、それと混入率、養生期間などの関係を検討し、新たな実験式を導き（この試料は限られた含水範囲でしか実験できなかった）、実験困難な範囲まで挙動の予測を行い、さらに適切な混入量を求めた。

コンシステンシー試験では、砂分が圧倒的に多かつ

* 秋田高専専攻科学生

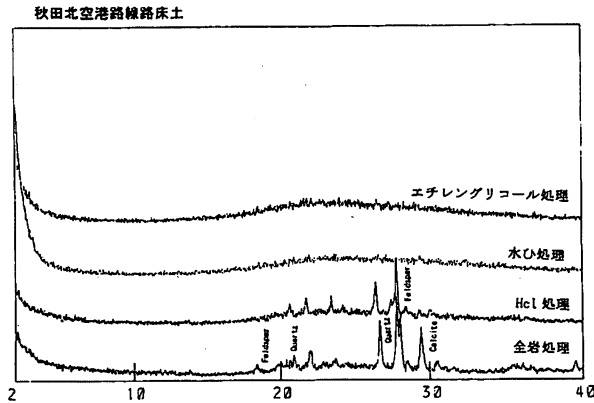


図1 試験試料土のX線回折

たためNPと判定された。

また、粉末X線回折によって鉱物成分を分析してみたところ図1のようであった。この図から明らかに長石 (feldspar) と石英 (quartz) の卓越ピークが確認できる。また、全岩処理では方解石 (calcite) が若干含まれていることが認められ、試料は珪酸塩鉱物を主とする火山灰起源である事が判った。この試料はいろいろな粉末X線回折を行っても長石と

石英の二種類の鉱物が卓越して特定され、主たる鉱物成分はほぼこの二つとみなされ、殆ど粘土鉱物が含まれていないと判断される。

3. 結果と考察

3.1 生石灰混入量と強度変化

先ずシラス試料土に生石灰量 (以下CI%と略記) を2%, 4%, 6%混入した試料を作成し、直ぐ脱型したものについて一軸圧縮試験を行った。図2はその結果を示すものである。この図は、各CI毎にいろいろな含水比 (w) を変えた試料を作成し、応力 (σ) ~ヒズミ (ϵ) 関係を調べたものである。

図を見ると $\sigma \sim \epsilon$ 関係にはCIによって一軸圧縮強度 (q_u) とその時の破壊ヒズミ (ϵ_r) に特徴的な現象がみられる。即ち q_u はCIの変化並びに w の変化に伴って変化していくが、その時の ϵ_r はCIが大きくなれば漸次変形が小さな範囲で現れる傾向がみられ、CIの増大に伴って破壊強度が早めに現れるようになる。この関係をグラフにすると図3のようになり、次の基本式が導かれる。

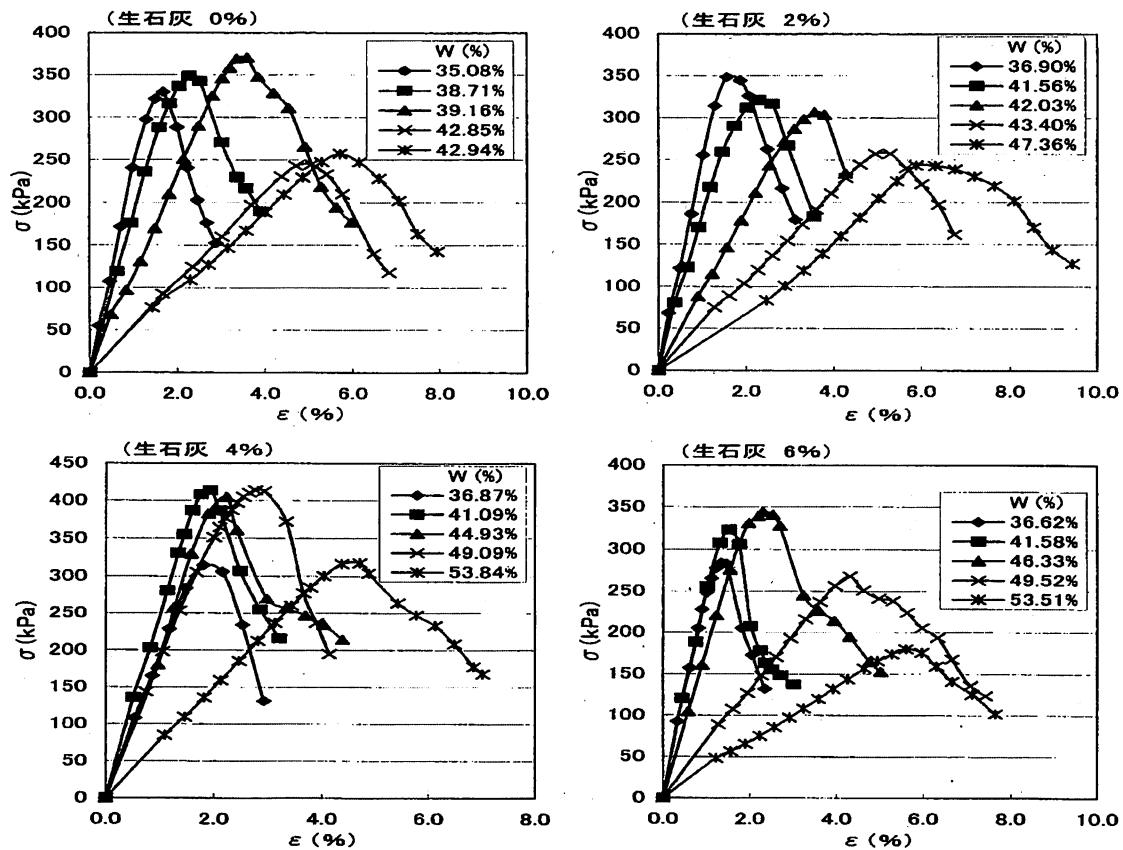


図2 シラス性試料土に生石灰を段階的に混入した時の一軸圧縮試験の $\sigma \sim \epsilon$ 関係

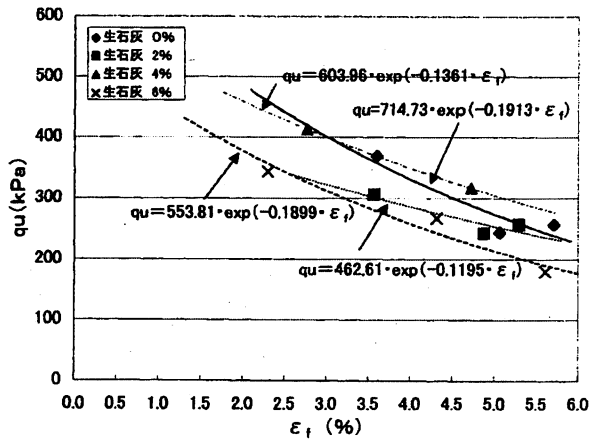


図3 生石灰混入率による $qu \sim \epsilon_f$ 関係

$$qu = a_1 \cdot \exp(-b_1 \cdot \epsilon_f) \quad (1)$$

a_1 , b_1 は CI 含有量の種類によって決まる試料土の係数で、図示のすように試料の種類によって異なる値を持つ。特に生石灰の混入量に注目すると、2%では強度はやや落ちるが、6%のものは安定した強度になるまでやや時間がかかり、混入量が多いため団粒を形成し易く、 w の低いものは試料作成困難であり試験できない。

鹿児島島のシラスを研究した山内ら³⁾の解析によると、4%混合のものは路床土強度を満たしていることを報告している。一連の研究で添加量が多くても逆に強度が低下することも判っているので、従って本実験の4%も強度的に最も安定した値が得られたことから、混入量としてはこの程度が適量ではないかと考えられる。

この中で、生石灰が混入した試料のみについてまとめてみると CI と ϵ_f の関係には図4に示すように次式が成立することが判った。

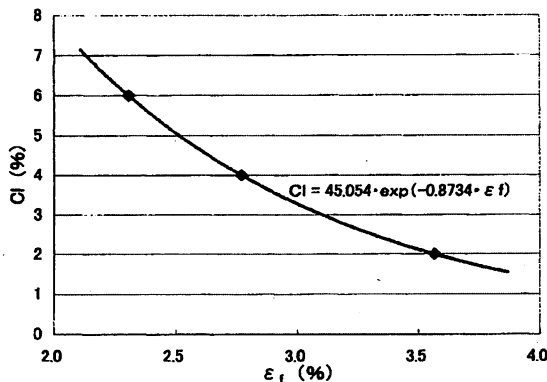


図4 生石灰混入率 (CI :%) による破壊ヒズミ (ϵ_f) の関係

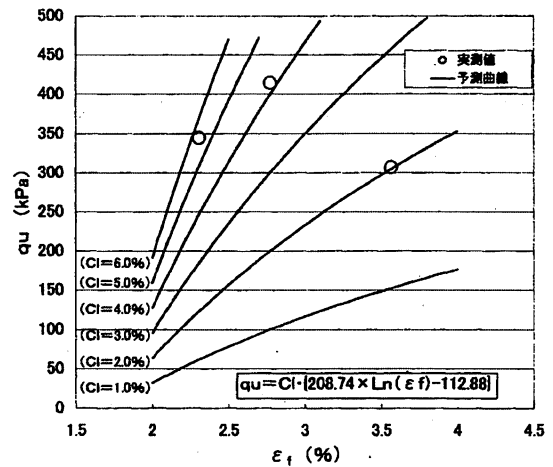


図5 CI によるシラス試料土の $qu \sim CI \sim \epsilon_f$ 予測曲線

$$CI = 45.054 \exp(-0.8734 \cdot \epsilon_f) \quad (2)$$

図3では生石灰を混ぜたシラス土の試料の qu を求めた。これとさらに上の(2)式と併せて CI , ϵ_f , qu の関係を整理すると次式が導かれる。

$$qu = CI \{208.74 \ln(\epsilon_f) - 112.88\} \quad (3)$$

試料を作成しなかった CI ($CI=1\%$, $CI=3\%$, $CI=5\%$) についてこの式を使って予測し、その傾向曲線を描いて示すと図5のような曲線になる。図の中に実測結果 (○印) を示したが、予測曲線は妥当な分布傾向を示していると言える。

筆者が先に行った建設廃材の有効利用に際し、一軸圧縮試験を行ったが、それと比較し CAE の基準強度に照合してもその基準に見合った強度であることを確認した⁴⁾。

3.2 経済評価

また、道路施工にあたり、路床土の湿潤密度 (γ_t) を 1.85 gf/cm^3 ($=18.15 \text{ kN/m}^3$) とする。この時、生石灰の単価を $16,000 \text{ 円/1tf}$ と仮定して、層厚 1 m を施工対象とする。そうすると $CI=4\%$ では、 74 kg/m^3 を必要とするから概略 $1,200 \text{ 円/m}^3$ となる。 $CI=6\%$ とすれば約 $1,800 \text{ 円/m}^3$ となるため、経済的にかなり負担である。 CI を 10% 以上も混入させた実験も見受けられるが⁵⁾、強度は逆に小さくなる等の報告があるから明らかに無駄であり、 $CI=4\%$ 位が適当と考えられる。

以上のように、生石灰を含むシラス土試料の強度 qu は、 CI を含む事によって連続的な変化がみられる事を予測し、それを式で提示した。その予測式が実測値とよく合致することを検証し、妥当な予測結

果を示すことを述べた。そして経済的にはCI=4%位が適当であると判断された。

3.3 養生期間と強度変化

混入した生石灰は試料土の内部の水分と化学反応をおこし強度にも変化が見られる事は広く知られている。この影響は養生期間にも依存する。これを調べるため、養生前の試料の初期密度を決定しなければならないが、これは締固め試験時の最適含水比(Wopt)を目標とした。

次に、前述の養生日数を経た試料土それぞれのquを求め、各CI毎に養生日数(T:day)を取ってみた。それを図6に示す。この図をみると、1日養生では生石灰混入量の差異による強度変化は殆どみられないが、Tが増加すれば次第にquが増加していることが判る。特に6%から顕著に大きくなるのが観測された。Tとquの関係曲線はほぼ類似して

いる事より、CI毎に実験式を導いたものを図中に示した。一般式として、CI≤6%に対しては次式が与えられることが判った。

$$T(\text{days}) = a_2 \cdot \ln(qu) - b_2 \quad (4)$$

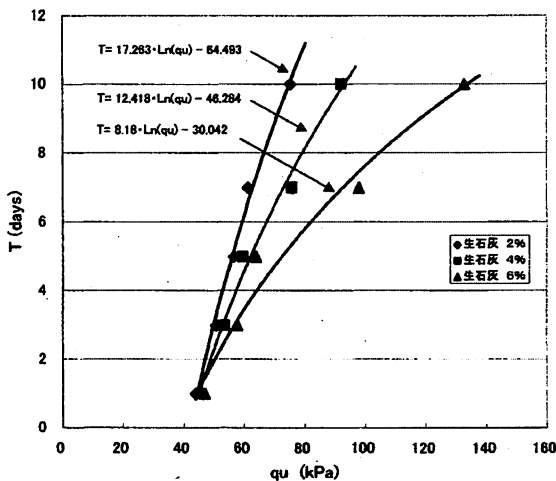


図6 CIによるシラス試料土のqu~Tの関係

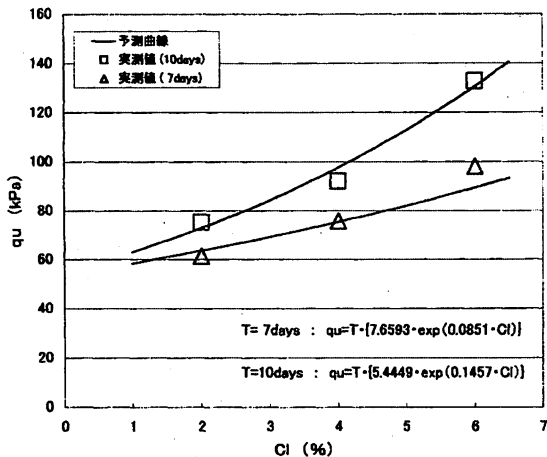


図7 T=7days, T=10daysの予測と実測を示すqu~CI関係

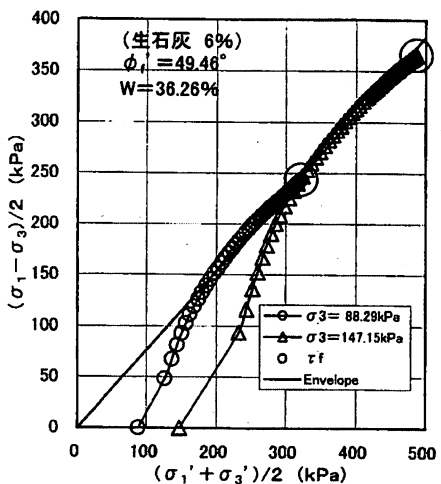
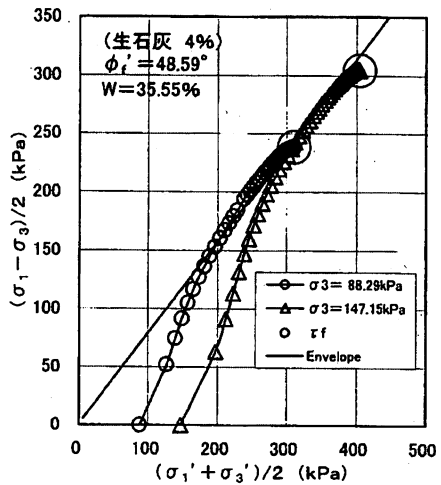
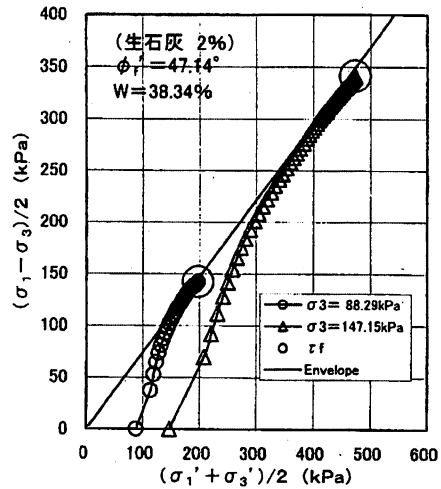


図8 CI=2~6%のCU-testによるstress paths

本実験では、最大の $CI=6\%$ であるため、これ以上含む試料の挙動はわからないが、シラスのような砂質土では前述のように強度が低下することが既に知られている。

そこで CI が 6% までの特徴をさらに展開すると、例えば 7 日養生と 10 日養生について上記予測式を当てはめると、図 7 のような結果が得られる。

この場合、 T 並びに qu 以外に CI を考慮し、一般式を導くと次式となる。

$$qu = T \{ a_3 \cdot \exp(b_3 \cdot CI) \} \quad (5)$$

この関係曲線を見ると、本実験の範囲内 ($CI \leq 6\%$) における上記予測曲線と実験結果が良く合致している事が読みとれ、養生期間と生石灰の混入量による qu の決定式として、かなり近似度が高い予測式であると判断される。

3.4 三軸圧縮試験 (CU-test)

CI が変わると強度が変わることから、この試料についてさらに CU-test を実施した。図 8 はその時の stress paths を示すものである。

実験曲線の○印は、 $\sigma_3=88.29\text{kPa}$ 、△印は $\sigma_3=147.15\text{kPa}$ 、また ϕ'_i はピーク強度時の内部摩擦角を示している。

この実験は正規圧密状態で行われているが、図を見ると砂分が多かったことから粘着成分が無く、その強度は ϕ'_i だけに依存している。先の一軸圧縮強度と比較するとその破壊時応力は、 $CI=4\sim 6\%$ に対し側圧 $\sigma_3=147.15\text{kPa}$ で行った $T=10\text{days}$ のものにほぼ近いことが判った。 $CI=2\sim 6\%$ の範囲では既に qu が CI 増加に伴って大きくなることを述べた。同様にこの現象は CU-test でも似た傾向を示すこ

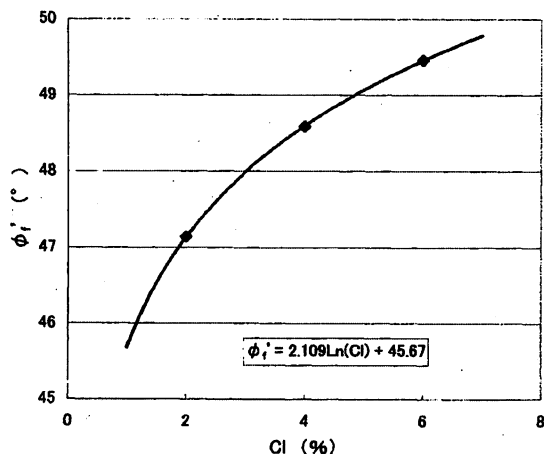


図 9 CI と ϕ'_i の関係

とが判った。 CI が $2\sim 6\%$ に対しても図からやはり ϕ'_i がわずかながら変化していることが読みとれる。そこでこの様子を図化してみると図 9 のようになり、本実験の範囲内では次式のような傾向曲線となることが示された。

$$\phi'_i = 2.109 \ln(CI) + 45.67 \quad (6)$$

以上の諸関係は、従来知見できなかったものであり、本研究によって新たに見出されたものである。地盤改良工法の一助となれば幸いである。

4. 結論

以上から、シラスを多量に含む軟弱路床土改良のため、現場から採取した試料について生石灰混入による改良工法を採用し、室内での地盤工学的実験を試みた。その結果、次のような成果を得ることができた。

- (1) 生石灰量 (CI :%) が多くなればシラス地盤の強度は大きくなるが、 $CI=4\%$ が最も安定した強度となり、これが CAE の基準値に合致していた。
- (2) 生石灰量 (CI :%) が多くなれば破壊時のヒズミ (ϵ_f) は、変形量が漸次小さな範囲で発生する。
- (3) $CI=4\%$ での施工が強度的にも経済的にも適当である。
- (4) $CI=2\sim 6\%$ の範囲では、 CI と ϵ_f との関係には次式が成立する。

$$CI = 45.054 \exp(-0.8734 \cdot \epsilon_f)$$

- (5) また、一軸圧縮強度 qu は CI 、 ϵ_f から次式で推定できる。

$$qu = CI \{ 208.74 \ln(\epsilon_f) - 112.88 \}$$

- (6) 同様に生石灰混入後の養生日数 (T) を考慮すると、 qu は次式によって推定できる。

$$qu = T \{ a_3 \cdot \exp(b_3 \cdot CI) \}$$

ここで a_3 、 b_3 は CI によって定まる試料定数である。

- (7) 一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験による強度は両者ともほぼ同じであるが三軸による ϕ'_i と CI との関係は次式となる。

$$\phi'_i = 2.109 \ln(CI) + 45.67$$

謝辞

試料を提供して頂いたニチレキ (株) 並びに X 線回折に際してご協力頂いた秋田大学工学資源学部川原谷浩氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松尾新一郎監修：石灰安定処理工法，日刊工業新聞社，259pp., 1977.
- 2) 日本石灰協会土質安定処理工法委員会編：石灰による土質安定処理工法，山海堂，1970.
- 3) 山内豊聡，石堂 稔：有機質火山灰土の安定処理における予備処理としての石灰転化効果について，第六回日本道路会議論文集，pp.190-192, 1961.
- 4) 伊藤 駿：アスファルト乳剤を用いた低品位未利用骨材の活用に関する研究，あすふぁるとにゅうざい，No.138, pp.3-9, 2000.
- 5) M.Kamal Uddin and B.R.Buesuceo: LIME TREATED CLAY: SALIENT ENGINEERING PROPERTIES AND A CONCEPTUAL MODEL, Soil and Foundation, Vol.42, No.5 pp.79-89, 2002.