

礫分を混入する締固め土の先行圧縮応力と強度の推定

伊藤雅夫*・太田秀樹**・石黒 健***・
米谷 敏****

『礫分を混入する締固め土の先行圧縮応力と強度を簡易に推定する手法』を提案するために、混礫材料を用いた一連の大型三軸試験を実施した。この結果、締固められた混礫材料の先行圧縮応力と強度を、密度と含水比の値を知ることによって概略推定できることが分かった。ただし、このためには次の3種類の準備が必要となる。①混礫材料のふるいわけと礫分の比重・吸水量の試験 ②混礫材料より礫分を除去した細粒分試料に対する一連の圧縮—等体積—面せん断試験 ③Walker-Holtzの礫率補正法を用いた『先行圧縮応力・強度推定用チャート』の作成

Keywords: Compacted soil-gravel mixture, precompaction pressure, shear strength

1. はじめに

フィルダム、道路・鉄道盛土、河川堤防など、我々の周りには『土を締固めて造った構造物』が数多く存在している。土を締固める目的とは何か。それは、各々の構造物が、要求される機能（構造物や車両荷重の支持、沈下の抑制、遮水など）を十分に発揮できるように、締固めによって土の工学的性質（強度・変形性・遮水性など）の改善を図ることにある。

一方、これらの土構造物を築造する場合、現場ではどのように『土の締固め』を管理しているのだろうか。その大半は、D値管理に代表されるように、密度・含水比・飽和度といった物理的指標にもとづいて行われているといつてよさそう。これら土の物理的指標と工学的性質との橋渡しの1つとして、筆者らは、『締固め土の先行圧縮応力（締固めによる先行圧縮効果）や強度を、室内での簡易な圧縮—面せん断試験結果により推定する手法』の提案を試みてきた¹⁾。図-1にその概念を示す。推定手法は概略以下の通りである。

- ① ある土を用いて、室内で簡易な圧縮—面せん断試験を実施する。この結果から、この土における密度・含水比～先行圧縮応力～強度の相関関係が、図中にハッチして示したように得られる。この関係は土の締固め方法にあまり影響されない。
- ② この土を任意の方法で締固めたとする。締固めた後の密度・含水比を図の第一象限にプロットし、矢印で示すような経路で第二、三、四象限のハッチの上を移動させる。この経路と先行圧縮応力軸および

強度軸との交点が締固められた土の先行圧縮応力と強度を与える。

本手法を用いることにより、例えば『土構造物が設計上必要とされるせん断強度を達成するための密度と含水比の組合せ』を事前に予測することができる。設計の段階で現場施工管理の指標を設定することが可能となるわけである。

推定手法の詳細については文献1)を参照されたい。ところで、本手法をこのままの形で原位置の締固め地盤へ適用しようとするのはやや早急であろう。それは、本手法が『礫分を除去した細粒分試料』を対象としているからである。室内試験では試験装置の規模によって使用する供試体の最大粒径が限定される。文献1)では、簡易な面せん断試験装置(φ60 mm, H 20 mm 供試体を使用)を用いるために、試料の最大粒径が2 mmとなるように材料の礫分をカットして用いた。ところが、現場の材料がこのような細粒な部分のみによって形成されていることはむしろ珍しく、ある程度の礫分を混入しているのが普通である。そして、土の物理的・工学的性質は礫分を含むことによって当然変化するため、本手法を実際問題に適用するためには、これを『礫分の混入の影響』を考慮できる形へと改良する必要があることになる。このため、提案手法の適用対象を2 mm以下の細粒分試料から礫を含んだ混礫材料に拡張することを目的として、一連の大型三軸試験を実施した。本文は、その結果について報告するものである。

2. 研究のフロー

図-2に研究のフローを示す。ある混礫材料（礫分を含んだ粘性土）を2 mmふるいでふるい分け、細粒分(< 2 mm)と礫分とに分離する。文献1)で用いたのは、ふるいを通じた細粒の部分のみである。細粒分試料を用いて一連の圧縮—面せん断試験を実施する。『締固め

* 正会員 工修 前田建設工業(株)技術研究所 土質研究室室長 (〒179 東京都練馬区旭町 1-39-16)

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

*** 正会員 工修 前田建設工業(株)技術研究所 土質研究室

**** 前田建設工業(株) 中部支店長島ダム作業所所長

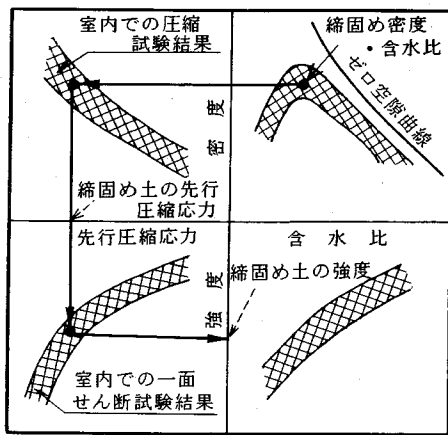


図-1 締固め土の先行圧縮応力・強度推定法

られた土の先行圧縮応力と強度を推定するための基礎データ】(細粒分試料における密度・含水比～先行圧縮応力～強度の相関関係)が、文献1)に詳述されているように求められる。ふるいに残留した礫分については、比重・吸水量試験を行った。これらのデータは礫率補正に用いられる。一方、ふるい分けする前の混礫試料を用いて大型三軸試験(φ300 mm, H600 mm 供試体を使用)を実施した。一部の供試体は、土をモールド内に人力でゆるく詰め、圧縮応力によって静的に締固めて作成した。残りの供試体は、ランマ落下によって動的に締固めている。以後、前者を静的締固め土、後者を動的締固め土と称する。このような2種類の材料を大型三軸セル内で圧縮-等体積せん断し、先行圧縮応力や強度を求めた。そして、別途求めた細粒分試料に対する圧縮-一面せん断試験の結果と大型三軸試験の結果とを比較して、両者の相関性を調べてみた。さらに、この結果にもとづき『細粒分試料に対する簡易な圧縮-一面せん断試験の結果のみによって、礫を含んだ混礫材料の先行圧縮応力と強度を推定する手法』を提案した。

3. 試料および実験方法

試料は、図-2上部に示すような物理特性を有する礫混り粘性土である(文献1)で用いたものと同一。図-3にその粒度特性を示す。混礫材料は礫分を35%含有している。また、礫分の比重と吸水量は、各々 $G_s = 2.645$, $w = 8.8\%$ である。

実験では、直径300 mm, 高さ600 mm 供試体用の大型三軸試験装置を用い、圧縮-等体積せん断を実施した。せん断過程では、等体積状態を保つために三軸セル内の水の体積(外体積)を体積計によって計測し、この値が変化しないように側圧を手動で制御した。

実験の手順を以下に示す。

- ① 混礫材料を2 mmふるいによってふるい分け、礫

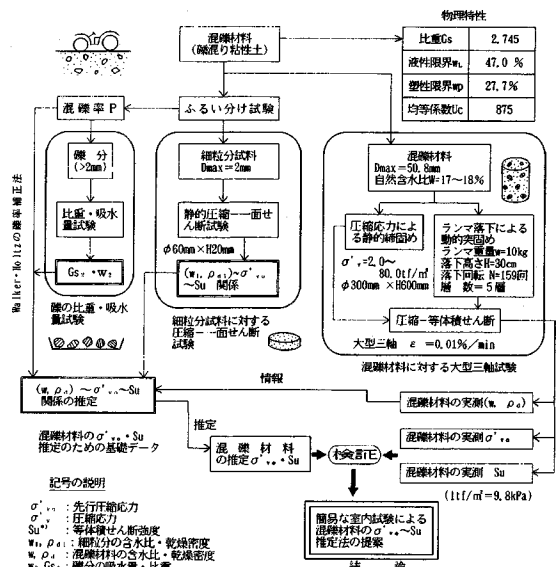


図-2 研究のフロー

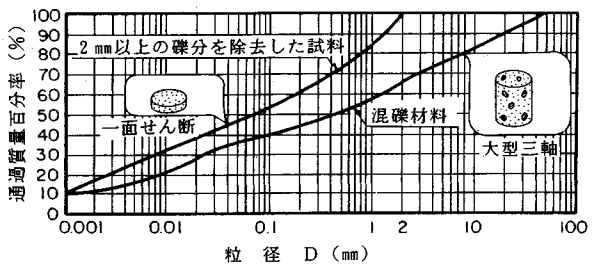


図-3 材料の粒度特性

率を決定する。ふるいを通過した細粒分試料は、一連の圧縮-一面せん断試験に供する。また、ふるいに残留した礫分については、礫の比重・吸水量試験を実施する。

- ② 混礫材料を $w = 17 \sim 18\%$ 程度に含水比調整する。
- ③ 含水比調整した混礫材料を、直径300 mm, 高さ600 mmの鋼製モールド内に人力によってゆるく詰める(初期乾燥密度約 1.72 t/m^3 (1.72 Mg/m^3), ⑤の静的締固め用試料)。
- ④ ③と同じモールド内に混礫材料を詰め、ランマの落下による動的な突き固めを行う。突固めエネルギーは、JIS A 1210の1倍と同じ(ランマ重量10 kg, 落下高さ30 cm, 落下回数159回)とした(動的締固め土)。
- ⑤ ③, ④で作製した供試体を三軸セル内にセットし、 $\sigma_v' = 2.0 \sim 80.0 \text{ tf/m}^2$ ($19.6 \sim 784.0 \text{ kPa}$)の上載荷重で等方および K_0 圧縮を実施する。圧縮の終了は時間-沈下曲線により確認した(圧縮の終了に

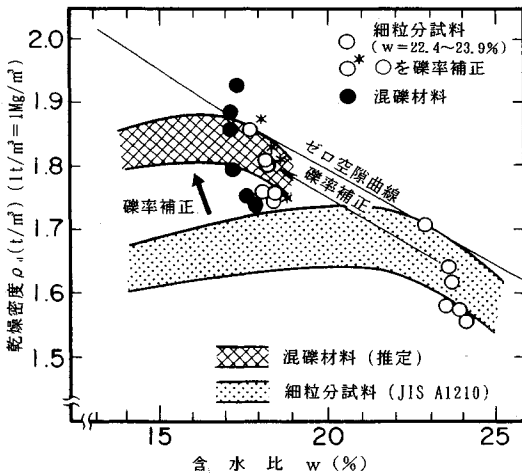


図-4 混礫材料の締固め特性

は数時間を要した)。

- ⑥ 圧縮終了後、0.01%/minのせん断速度で等体積せん断を実施する。せん断は排気条件で行い、せん断中供試体の体積が変化しないように側圧を手動で制御した。圧縮-せん断過程を通じ、供試体からの水の出入りはなく、実験前後で含水比の変化はなかった。

4. 礫分を含む土の締固め特性

混礫材料から礫分を除去し、細粒分試料を作る。細粒分試料に対して簡易な室内試験を行うだけで、混礫材料の先行圧縮応力や強度がわからないだろうか。このためには、締固めた細粒分試料と締固めた混礫材料の物理的・工学的性質を比較し、その相関性を調べる必要がある。ここではまず、締固め特性(締固め密度と含水比)に注目してみる。

細粒分試料と混礫材料とを同等のエネルギーで突き固めた場合、両者の締固め密度・含水比にはどのような相関性があるのか。このことを調べるために図-4を準備した。最適含水比のwet側に含水比調整した細粒分試料および混礫材料を、JIS A 1210の締固めエネルギーで突き固めた。締固めた土をさらに圧縮し、密度と含水比を求めて各々○印と●印でプロットした。なお、細粒分試料については、含水比を6種類変えて締固めを行っている(文献1)参照)。そのうち混礫材料との比較対象として、含水比 $w = 22.4 \sim 23.9\%$ のもの(図-4の○印)をプロットしてある。これは、混礫材料の含水比に相当する細粒分の含水比をWalker-Holtzの式(式(2))²⁾によって逆算し、その値に最も近いデータを選択したものである。含水比を変えた際の細粒分試料のデータ範囲は、図中に点々のハッチで示されている^(注)。図から明らかなように、同等のエネルギーで突き固めた

細粒分試料と混礫材料の締固め密度・含水比は異なる値をとる。混礫材料は、細粒分試料に比べると、礫を含むことによって全体の密度が高まり、一方、全体の含水比は低下するから、これは当然の結果といえよう(混礫材料のデータポイントは、細粒分試料のポイントを左上へ向けて移動させたところに位置する)。では、本当にこの違いが礫分の混入のみによって説明できるのかを確かめてみよう。そのために、Walker-Holtzの礫率補正法によって細粒分試料の締固め密度・含水比を補正し、混礫材料の実測値と比較してみた。Walker-Holtzの式は、以下のように表される。

$$\rho_d = \frac{1}{\frac{1-P}{\rho_{d1}} + \frac{(1+w_2 G_{s2})P}{G_{s2} \rho_w}} \dots \dots \dots (1)$$

$$w = w_1(1-P) + w_2 P \dots \dots \dots (2)$$

ρ_w : 水の密度 ($\cong 1 \text{ t/m}^3$), 他の記号は図-2を参照

さて、○印のデータを式(1),(2)によって補正した結果を○*印でプロットした。この位置は、混礫材料(●印)に非常に近いものとなっていることがわかる。Walker-Holtzの礫率補正式の適用範囲内では、細粒分試料と混礫材料の締固め密度と含水比の違いは、礫分の混入による見かけ上の違いとみなしてもあまり問題はなさそうである。このような仮定は、換言すれば次のようになる。

【締固まった混礫材料の中の細粒部分は、同じ締固め方法で細粒土だけを単独に締固めた場合と同じ締固め状態にある】

このように仮定すれば、例えば含水比を変えた際の混礫材料の締固め曲線は、細粒分試料のデータ範囲を礫率補正することにより、図中の斜線のハッチのように推定されよう。この場合、混礫材料全体の工学的性質は、その中の大部分を占める「締固まった細粒部分」の工学的性質によってほぼ支配されるのではなからうか。この点を確認するために議論を進めてみよう。

5. 礫分を含む土の圧縮特性

締固められた細粒分試料と混礫材料の工学的性質を比較してみよう。ここではまず、圧縮特性の比較を試みる。そして、その結果を用いて『混礫材料の圧縮性や先行圧縮応力を、細粒分試料に対する圧縮試験結果によって推定する方法』を考えてみたい。まず、前節の結果にもとづき次のような仮説をたててみる。

【Walker-Holtzの礫率補正法が適用可能な程度の礫混入率(30~40%以下)であれば、混礫材料全体の圧縮特性(圧縮曲線や先行圧縮応力)は、その中の締固

(注) これらのデータは、圧縮による密度増加の影響が含まれているため、厳密には「締固め時の密度」とは異なる。ただし、圧縮荷重が小さい場合は締固め密度にほぼ等しい。

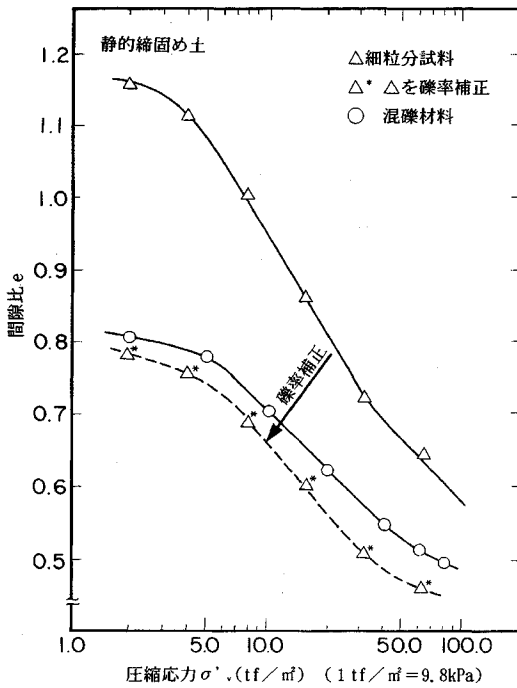


図-5 静的締固め土の圧縮特性

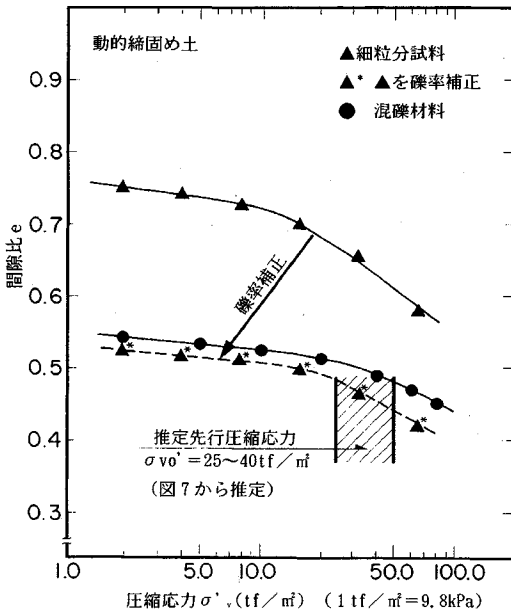


図-6 動的締固め土の圧縮特性

まった細粒の部分が見出す圧縮特性にはほぼ等しい(密度と含水比のみが、礫の混入によって見かけ上異なっているに過ぎない)

この仮説が正しいかどうかを調べるために図-5, 6, 7を準備した。図-5, 6は、大型三軸試験装置による混雑材料の圧縮曲線(○および●印)と、一面せん断試験装置による細粒分試料の圧縮曲線(△および▲印)とを同

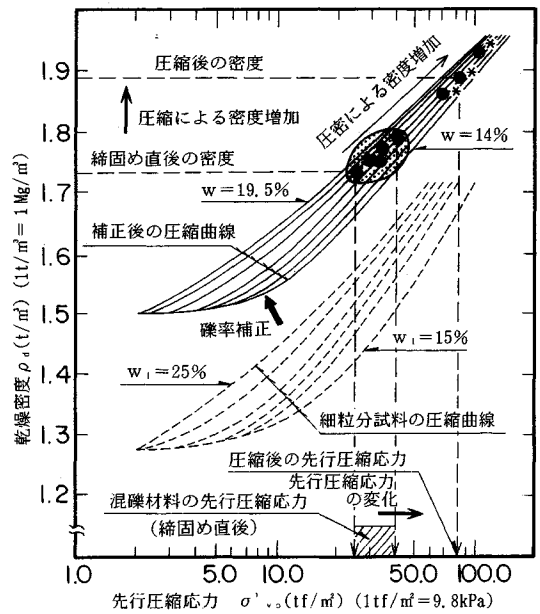


図-7 混雑材料の先行圧縮応力推定法

一図面上にプロットした結果である。図-5の白抜きのデータは静的締固め試料の、図-6の黒塗りのデータは動的締固め試料の圧縮曲線を表している。また図-4と同様、細粒分試料では6種類の含水比に対する圧縮曲線のうち、 $w=22.4\sim 23.9\%$ のデータを比較対象として選択している。

静的に締固められた土と動的に締固められた土の圧縮特性の違いについては西原, 平川, 大野²⁾らの研究があるが、このように混雑材料と細粒分試料とを直接比較した事例はない。

図より、両者の圧縮曲線は、その位置(間隙比の値)も傾き(圧縮指数や膨潤指数)も異なったものとなっていることがわかる。礫を含むことによって土の乾燥密度(あるいは間隙比)が異なるため両者が一致しないことはむしろ当然であろう。さて、前述した仮定が正しければ、この違いは、両者の見かけ上の密度・含水比の違いを補正することのみによって説明できるはずである。図-4と同じようにして、細粒分試料の圧縮曲線全体をWalker-Holtz法によって礫率補正してみた。その結果を図中に△*および▲*印でプロットしている。補正後の圧縮曲線は、静的・動的締固め試料のいずれにおいても混雑材料の実測圧縮曲線に近く、実用の範囲内ではWalker-Holtz法の適用が可能と考えられる。圧縮曲線の傾きもよく似ており、圧縮指数や膨潤指数についても、細粒分試料の圧縮試験結果に礫率補正を施すことによって、混雑材料の値を概略推定できることが示唆されている(ただし、圧縮応力 σ'_v が大きくなるほど補正值と実測値が離れていく傾向が認められるため、応力レベルに

よって適用範囲を限定する必要がある)。

次に、先行圧縮応力についての検討を行うために図-7を準備した。締固め履歴を与えた土の先行圧縮応力は、圧縮指数や膨潤指数とともに、その後の付加荷重に対する変形抵抗性を表す重要な指標となる。文献1)では、細粒分試料を対象として、その推定法を提案した。図-7はそのためのチャートである。詳細は文献1)に譲るとして、推定法は概略以下のようにまとめられる。

- ① 細粒分試料を用いて一連の圧縮試験を行う。図中の破線の曲線群が圧縮試験の結果である(含水比の違いによってほぼ平行な曲線群となる)。
- ② 任意の方法で締固められた細粒分試料の密度と含水比を測定し、その組み合わせをこの曲線群上で探す。その点を横軸に下すと、横軸との交点が締固められた土の先行圧縮応力を与える(つまり、その点の横座標がその土の先行圧縮応力である)。

さて、前出の仮説が正しいならば、礫を含んだ材料の先行圧縮応力は、このチャートをさらに次のように補正することによって推定できることになる。

- ③ 細粒分試料に対する一連の圧縮曲線を、Walker-Holtzの礫率補正法によって礫率補正する。これは、図-7の実線で示すように、細粒分試料のデータをシフトアップしたような曲線群となる(各圧縮曲線の含水比の値も、礫率補正によって変更されている)。
- ④ 締固めた後の混礫材料の密度と含水比を測定し、その組み合わせをこの補正カーブの上で探す。その点を横軸に下した交点が、礫を含んだ材料の締固めによる先行圧縮応力を与える。

混礫材料を締固めて密度と含水比を測定した。その組み合わせを、上述の方法にしたがって図-7の補正曲線群の上にプロットしてみた(図-7の黒丸)。これらの点はややばらついているが、上記の手法により先行圧縮応力を求めると、 $\sigma_{vd} = 25 \sim 40 \text{ tf/m}^2$ (245.0 ~ 392.0 kPa)を得る。この応力範囲を前出の図-6中にハッチで示した。確かに、この応力レベルは動的に締固めた混礫材料の圧縮曲線の変曲点に近い。最初に示した仮説、および上で述べた補正推定手法の妥当性を示す結果とあってよからう。ただし、この手法については留意点が2つある。細粒分試料の先行圧縮応力推定法(文献1)で述べたものと同一の留意点であるが、ここでもう一度繰り返しておきたい。以下の2点である。

- ① 先行圧縮応力が発現される時点での密度と含水比は、実際の現場で得られる値(締固めた直後の値)とはやや異なっている。膨潤指数に相当するだけの密度変化が生ずるからである。この点については、密度変化を微小なものとして無視するか、推定した膨潤指数 C_s によって密度変化を計算するかしなけ

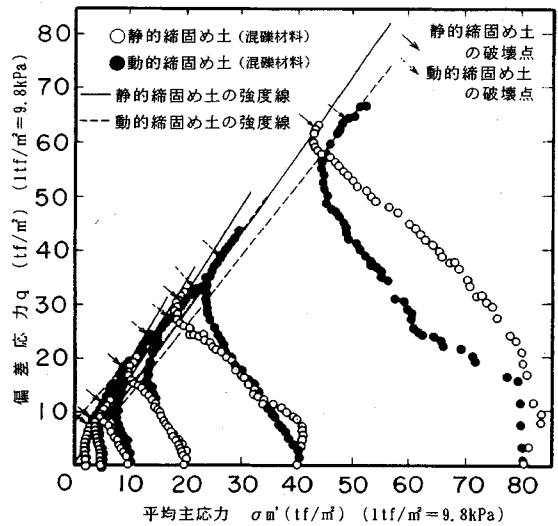


図-8 等体積せん断時の応力経路

ればならない。

- ② 締固め後(さらに盛土がなされるなどで)、先行圧縮応力を越えるような荷重増分が加わった場合、先行圧縮応力は新たな上載荷重へと変化する。この場合、圧縮後の密度を計算し、補正曲線群にプロットしなおす必要がある。図-7中にその一例を示した(●印から●*印への移動)。

さて、ここで得られた結論をもう一度まとめておこう。【混礫材料の圧縮特性(圧縮曲線や先行圧縮応力)は、この中から礫分を除去した細粒分試料に対する圧縮試験結果に対して、密度と含水比のみを礫率補正することによって概略推定することができる】

6. 礫分を含む土の強度特性

次に、締固められた細粒分試料および締固められた混礫材料の強度特性を比較してみよう。そして、その結果を用いて『混礫材料の強度を、細粒分試料に対する簡易な圧縮一面せん断試験結果によって推定する方法』を考えてみたい。圧縮特性の場合と同様に、まず次のような仮説をたててみる。

『Walker-Holtzの礫率補正法が適用可能な程度の混礫入率(30~40%以下)であれば、締固めた混礫材料の強度特性は、その中の細粒部分が示す強度特性にほぼ支配される(密度と含水比のみが、礫の混入によって見かけ上異なっているに過ぎない)』

この仮説を検証するために図-8~図-11を準備した。図-8は、締固めた混礫材料に対する等体積せん断時の応力経路を示す^(註)。

(注) ここでは、不飽和な締固め土の等体積せん断時の応力経路を、飽和土における有効応力経路に対応するものとする(松尾・軽部⁴⁾を参照)。

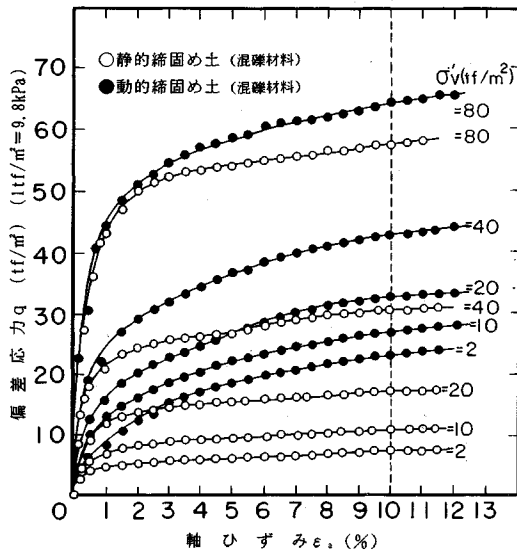


図-9 等体積せん断時の応力-ひずみ関係

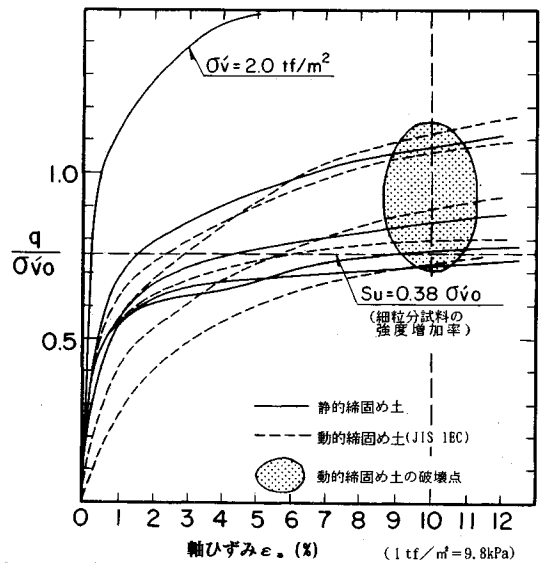


図-11 正規化応力-ひずみ関係

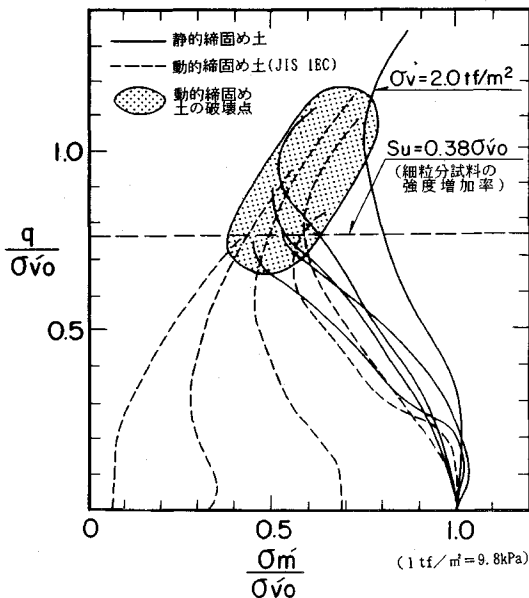


図-10 正規化応力経路

白抜きデータの静的締固め土の、黒塗りのデータは動的締固め土の結果を示している。せん断時の応力経路は、飽和度・締固め効果（先行圧縮効果）・圧縮応力など数多くのファクターに影響され、その挙動は複雑である。応力経路に関する詳細な検討は別報に譲るとして、ここでは「破壊点」のみに着目してみる。なお、本文では軸ひずみ10%におけるせん断抵抗をもって「強度」を規定しており、通常の軸ひずみ15%は採用していない。これは、本装置が礫混じり土を試験するための大型三軸装置であり、強度上ストロークを大きくとることが

表-1 各試料の密度・含水比および推定先行圧縮応力値

試料	圧縮応力 $\sigma'v$ (tf/m ²)	乾燥密度 ρd (t/m ³)	含水比 w(%)	先行圧縮応力 $\sigma'vo$ (tf/m ²)
静的 締固め土	2.0	1.519	17.6	2.0
	10.0	1.600	17.4	10.0
	20.0	1.685	17.4	20.0
	40.0	1.741	17.2	40.0
	80.0	1.905	18.0	80.0
動的 締固め土	2.0	1.736	17.9	25.0
	10.0	1.753	18.0	29.0
	20.0	1.758	18.2	29.0
	40.0	1.792	17.2	40.0
	80.0	1.882	17.1	79.0

1 tf/m² = 9.8 kPa, 1 t/m³ = 1 Mg/m³

できないために軸ひずみ12%以下で実験を停止せざるを得なかったことによるものである。

図-9に、等体積せん断時の応力-ひずみ関係を示す。この図より軸ひずみ10%におけるせん断抵抗（せん断強度）を求め、図-8中に矢印で示した。矢印の位置、すなわち静的および動的締固め土の破壊点は、やはり飽和度・締固め効果（先行圧縮効果）・圧縮応力などの複数の要因に影響されているようにみえる。

さて、これらのデータを統一的に評価することを目的として、図-10, 11を作製した。両図は、図-8, 9の各々を、締固めによる先行圧縮応力によって正規化した結果である。動的締固め試料の先行圧縮応力は、図-7に示す方法によって推定したものを用いた。また、静的締固め試料では圧縮応力=先行圧縮応力となる。各試料の密度と含水比、および推定された先行圧縮応力の値を表-1にまとめる。

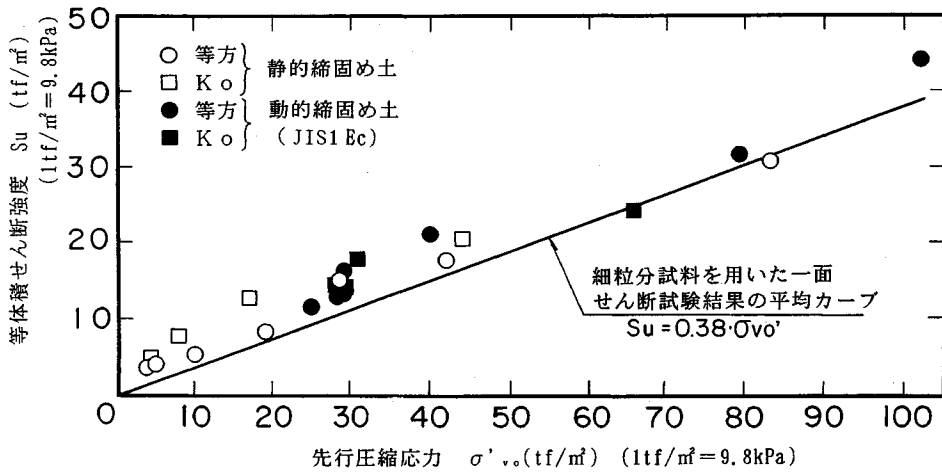


図-12 混礫材料の先行圧縮応力と等体積せん断強度の関係

さて、破壊点のみに注目してみると、次のことが言えるであろう。

【締固められた混礫材料の破壊点の高さ（図中にハッチングして示した）、すなわち強度と先行圧縮応力との比率 (Su/σ'_{v0}) は、試験条件の違いにかかわらず、ほぼ一定となる】（ただし、 $\sigma'_{v0}=2.0 \text{ tf/m}^2(19.6 \text{ kPa})$ のデータだけは異なった傾向を示している。試料調整時に土をやや乾燥させてしまったことの影響であるかもしれない）

それでは、その比率（文献1）にならない、便宜的に強度増加率と称する）はどのような値をとるのか。このことを調べるために図-12を準備した。図は、先行圧縮応力 σ'_{v0} を横軸に、せん断強度 $Su (Su=(\sigma_1-\sigma_3)_f/2)$ を縦軸にとって、両者を直接比較したものである。確かに、両者はほぼ線形的な関係を示しており、 Su/σ'_{v0} は一定値に近いといえよう。

次に、この『混礫材料の強度増加率』と『その中の細粒部分のみを用いて行った一面せん断試験より求まる強度増加率』との関係について検討を加えてみる。太田、西原、森田⁹⁾は、種々のせん断試験によって得られる強度増加率の値について理論的な比較を試みているが、本文でもこれを参照し、大型三軸試験で求まる強度増加率 $Su/\sigma'_{v0}=(\sigma_1-\sigma_3)_f/2 \sigma'_{v0}$ と一面せん断試験で求まる強度増加率 $Su/\sigma'_{v0}=\tau_f/\sigma'_{v0}$ を直接比べてみた（ただし、一面せん断では水平変位 6 mm におけるせん断抵抗にて τ_f を規定）。文献1)では、細粒分試料に対する一面せん断試験結果について図-12と同様なデータの整理を試みた。そして、細粒分試料においても Su と σ'_{v0} はほぼ比例関係にあり、その平均的な強度増加率は図-12中に直線 ($Su/\sigma'_{v0}=0.38$) で示した値として得られた。そして図より、混礫材料のデータポイントは、この細粒分試料の平均曲線の近くに位置していることがわかる。

図-10, 11には $Su/\sigma'_{v0}=0.38$ の高さ（三軸試験では $q/\sigma'_{v0}=0.76$ に対応）を破線で示したが、確かに、混礫材料の破壊点（ハッチング部）はこの付近に存在しているようである。さて、以上の結果より次の結論が得られる。

【混礫材料と、礫を取り除いた細粒分試料とで、強度増加率（せん断強度/先行圧縮応力）の値はほぼ等しい】

前節では、混礫材料の先行圧縮応力を、細粒分試料に対する圧縮試験結果および礫分の比重・吸水量試験結果によって概略推定できることを示した。そして、推定された混礫材料の先行圧縮応力の値に、やはり細粒分試料を用いて行った一面せん断試験より得られる強度増加率をかけあわせれば、大型の試験を行うことなく混礫材料の強度を推定できることになる。すなわち、2つの結果を総合すると次の結論が導かれたことになる。

【細粒分試料に対する圧縮一面せん断試験と礫分の比重・吸水量試験のみを行っておけば、あとは締固められた混礫材料の密度と含水比のみを計測することによって、その先行圧縮応力とせん断強度のすべてを推定できる】

次節では、この推定方法をより具体的にフローとしてとりまとめる。

7. 礫分を含む土の先行圧縮応力・強度推定法

ここまで、礫分を含む土の締固め特性・圧縮特性・せん断特性について検討し、礫分を除去した細粒分試料での各特性との比較を行ってきた。最後にこれらを総合し、礫分を含む土の先行圧縮応力と強度を推定するための具体的なフローをまとめておこう。推定手法をあらわす模式図を図-13に示す。

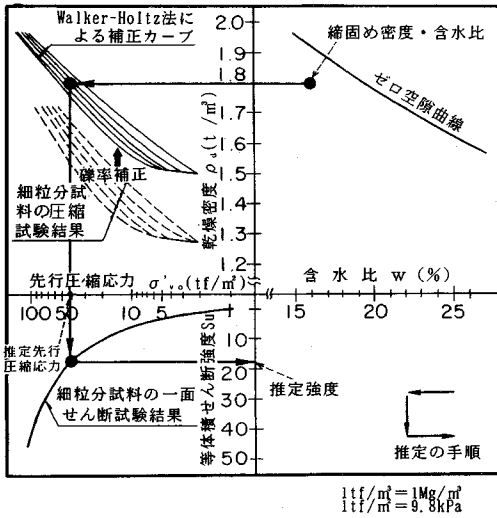


図-13 推定手法の模式図

混礫材料の先行圧縮応力・強度推定フロー

- ① 混礫材料をふるいわけ、細粒分と礫分に分ける。さらに、粒度試験結果より礫率を決定する。礫率がWalker-Holtzの補正法の適用範囲内であれば、本手法の適用が可能である。
- ② ふるいに残留した礫を用いて、比重・吸水量試験を行う。
- ③ ふるいを通過した細粒分試料を用いて、一連の圧縮-一面せん断試験を実施する。この結果を整理し、締固め土の先行圧縮応力・強度を推定するための基本チャートを作製する。図-13に示すように、チャートは乾燥密度・含水比・先行圧縮応力(=圧縮応力)・せん断強度の4つの座標からなり、締固めデータ・圧縮データ・せん断データを1~3象限にプロットすることによって求められる。図-14に、細粒分試料を用いて得られた実際のチャートの例を示す。チャート作製法の詳細については文献1)を参照されたい。
- ④ ③で得られた基本チャートのうち、第2象限には、細粒分試料の圧縮曲線群が含水比ごとにプロットされている。②で得られた礫の比重・吸水量を用い、Walker-Holtzの補正法によってこの曲線群上の密度・含水比の組み合わせを礫率補正する(混礫材料に対応した密度・含水比状態に変換する)。図-14のデータにこのような補正を行った結果を図-15

(注) 図-14の例では、第3象限の強度カーブは、含水比によらずほぼユニークなものとして得られている。しかし一般的には、このカーブも第2象限と同様に含水比をパラメータとした曲線群となる。そのような場合には、第3象限に対しても含水比について礫率補正を施し、補正曲線を求めておく必要がある。

に示す。補正後の曲線は、細粒分試料の圧縮曲線群をシフトアップしたような形状を示す(各曲線に対応する含水比の値も礫率補正されており、図-14の値とは異なっている)。この補正チャートが、混礫材料の先行圧縮応力と強度を推定するための基礎的データとなる^(注)。

- ⑤ 締固められた混礫材料の密度と含水比を計測する。
- ⑥ ⑤で測定された密度・含水比の組み合わせを補正チャートの第1象限にプロットする。この点を高さ一定(乾燥密度一定)のまま第2象限へ平行移動し、④で作製した補正圧縮曲線群のところまで持つていく。前述したように、この曲線群は補正含水比によって何本かに分れているが、その中で、混礫材料の含水比と同じ値(第1象限のプロットの横軸の値)に相当する曲線を捜し交点を求める。
- ⑦ この交点を横軸(先行圧縮応力軸)へ下す。横軸との交点が混礫材料の先行圧縮応力を与える。
- ⑧ この点をさらに第3象限へ下し、細粒分試料の強度カーブとの交点を求める。この点を縦軸(せん断強度軸)へ向けて平行移動し、縦軸との交点を求める。この点が混礫材料の強度を与える。

このような推定経路の例を図-15中に矢印で示しておいた。他のプロットも同様の手順による。図-15中の第1~3象限は、すでに説明に用いた図-4, 7, 12と全く同一である。

最後に、提案された手法による推定強度と、大型三軸試験による実測強度とを比較するために図-16を準備した。両者は極めて良好な整合を示しており、本手法の妥当性を裏づける結果となっている。

8. 結 論

本研究にて得られた結論を以下に示す。

(1) 混礫材料の先行圧縮応力は、これを締固めた後の密度と含水比を計測することによって概略推定できる。ただし、次のような準備が必要となる。

- ① 混礫材料から礫分を除去した細粒分試料を用いて一連の圧縮試験を行うこと。
- ② 礫分に対する比重・吸水量試験を行うこと。
- ③ これらのデータを用いて先行圧縮応力推定用チャートを作製しておくこと。

(2) 混礫材料の強度増加率(せん断強度/先行圧縮応力)は、礫分を除去した細粒分試料における強度増加率と大差なく、細粒分試料を用いた一面せん断試験結果から推定できる。

(3) したがって、「混礫材料に対するふるいわけ試験」、「礫の比重・吸水量試験」、「細粒分試料を用いた一連の圧縮-等体積一面せん断試験」を実施しておけば、

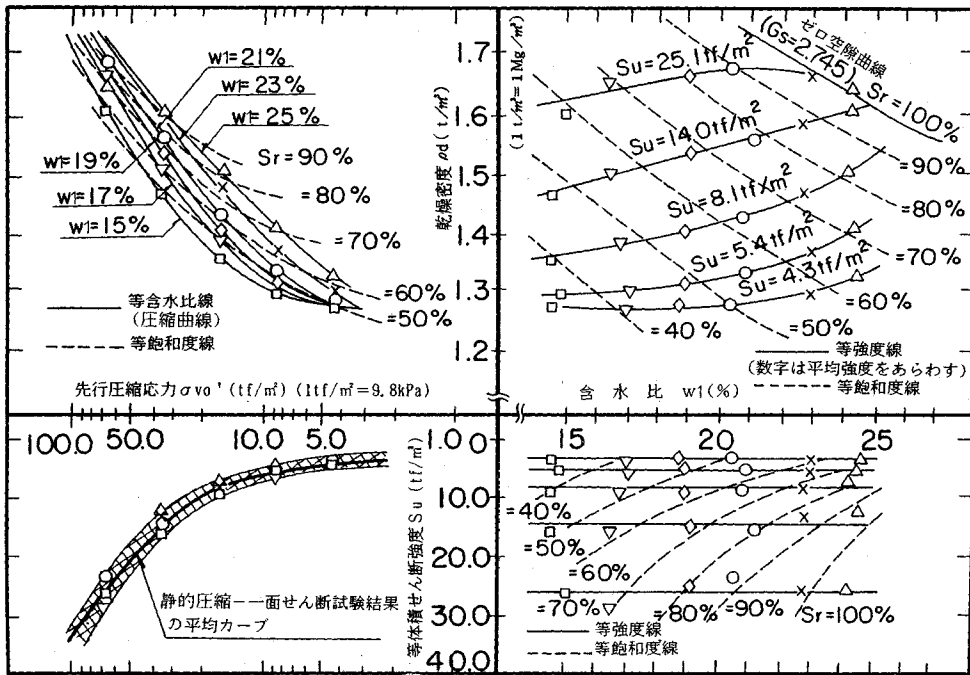


図-14 細粒分試料に対する圧縮一面せん断試験結果

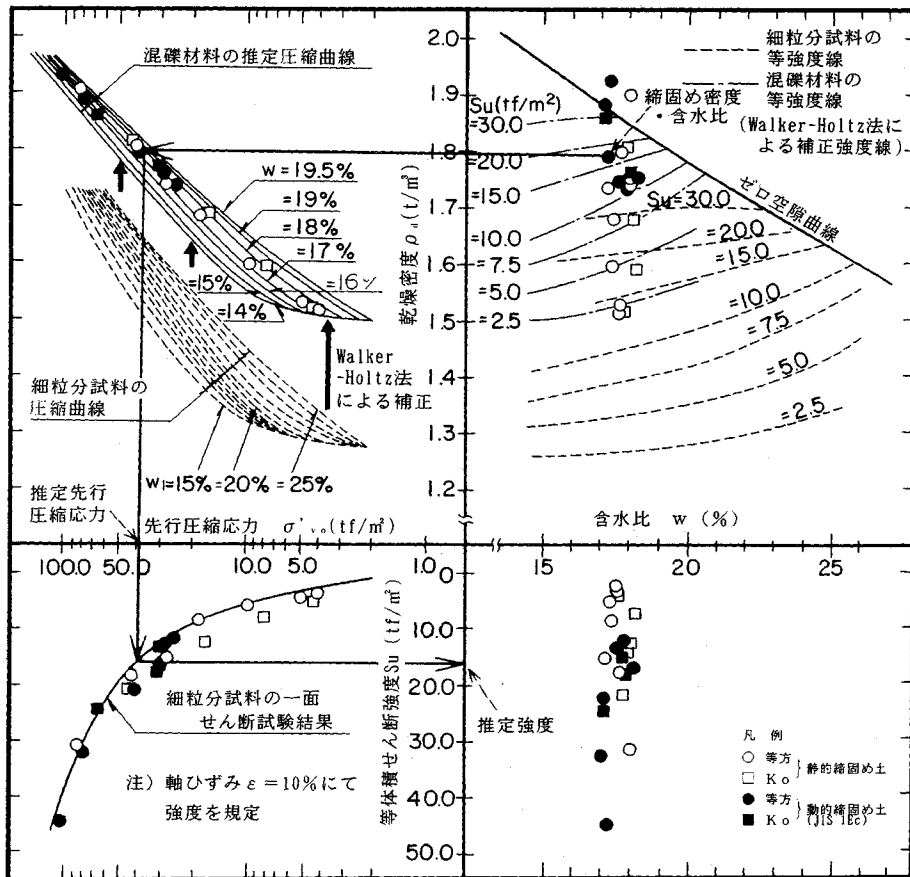


図-15 混礫材料の先行圧縮応力、強度推定例

1t/m² = 1Mg/m²
1tf/m² = 9.8kPa

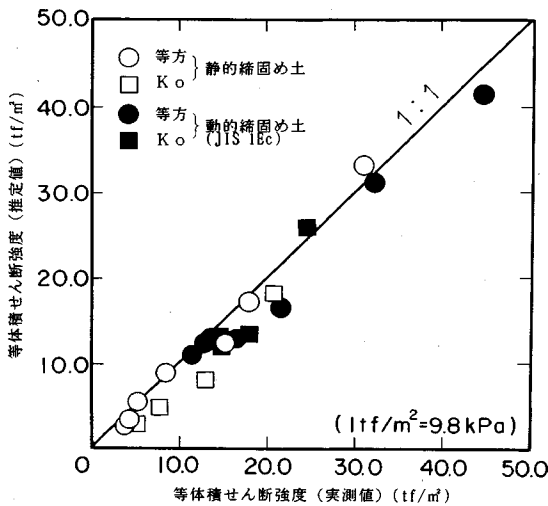


図-16 推定値と実測値の比較結果

混雑材料の密度と含水比のみを計測することによって、その先行圧縮応力と強度を推定できる。

(4) (3)の結論にもとづき、『混雑材料の先行圧縮応力・強度推定フロー』を提案した。

現在、締固め地盤の密度と含水比は、RI 密度計・水分計によってほぼリアルタイムに計測することが可能となっている。したがって、今回提案した手法を用いれば、

礫分を混入する締固め地盤の品質を、『先行圧縮応力と強度』という工学的特性によって、しかもリアルタイムに把握することが可能となろう。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、前田建設技術研究所 上出厚研究員には実験面での御援助を頂いた。末筆ながら謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 太田秀樹・伊藤雅夫・石黒 健・米谷 敏：締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定，土木学会論文集，No. 436/Ⅲ-16，pp. 27~36，1991. 9.
- 2) Walker, F.C. and Holtz, W.G. : Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc., ASCE, No.108, pp.1~25, 1951.
- 3) 西原 晃・平川修治・大野 勲：静的・動的締固め土の圧縮・強度特性，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp. 155~160, 1988.
- 4) 松尾 稔・軽部大蔵：室内せん断試験結果の設計への適用に関する 2, 3 の問題点，第 11 回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 91~100, 1966.
- 5) Ohta, H., Nishihara, A. and Morita, Y.: Undrained stability of Ko-consolidated clays, Proc., 11th Int. Conf. SMFE, pp.613~616, 1985.

(1990. 9. 5 受付)

PRECOMPACTION PRESSURE AND STRENGTH OF COMPACTED SOIL-GRAVEL MIXTURE

Masao ITOH, Hideki OHTA, Takeshi ISHIGURO and Satoshi YONETANI

The precompaction pressure and strength of compacted soil-gravel mixture are estimated from the density and the water content of the mixture provided the following two types of experiments were carried out prior to the compaction work in the field.

(i) The soil portion of the soil-gravel mixture were compacted and sheared under constant volume conditions. This test should be carried out on the soil with several different values of water content. Thus, the dry density-compaction pressure curves during compaction are obtained with the water content of the soil as a parameter. The constant volume shear strength is also related to the compaction pressure.

(ii) The specific gravity and the water absorption tests were carried out on the gravel portion of the mixture.

Based on these tests, the density and the water content of a soil-gravel mixture are converted to the density and the water content of the soil portion of the mixture using the correction method proposed by Walker and Holtz.

A series of large-scaled triaxial tests were carried out on compacted soil-gravel mixtures to ensure the performance of the procedure proposed in the paper. The test results were found to be in accordance with the precompaction pressure and strength estimated by employing the proposed method.