

重回帰分析による土の残留強度の推定

山口大学大学院 学○都築俊輔

山口大学工学部 正 鈴木素之

山口大学工学部 正 山本哲朗

1.はじめに 土の残留強度と工学的指標の間にある種の相関が認められる。著者らはこれまでに土の残留強度の指数性の性質について検討している¹⁾。土の工学的指標には、土粒子の物理的性質に関して粘土含有量 F_{clay} など、間隙水の化学的性質に関して pH や塩分濃度など、細粒土の工学的性質に関して液性限界 w_L や塑性限界 w_p などがある。本文では、既往の研究結果に著者らの結果を加えて、上記の土の工学的指標と残留強度の相関について展望した。また、既往の研究から引用したデータに基づいて、残留強度を目的変数、コンシステンシー限界や粘土含有量などを説明変数として重回帰分析を行い、少ない種類の物性値から残留強度を精度良く推定する手法について検討した。なお、図中の残留強度には $\tan \phi_r$ (ϕ_r : 残留状態における見掛けの内部摩擦角) を用いており、 ϕ_r は主にリングせん断試験および繰返し一面せん断試験により求められている。

2. 間隙水の化学的性質 Fig.1 に $\tan \phi_r$ と pH の関係を示す。間隙水の液性は $pH < 7$ で酸性、 $pH = 7$ で中性、 $pH > 7$ である。村上ら²⁾のデータ (⊗) はベントナイトに塩酸を加えることによって pH を変化させたものであり、 $\tan \phi_r$ は pH の増加に対して若干減少している。このときの w_L および w_p はともに pH の増加に伴って増加することが示されている。一方、Moore³⁾によって、pH の異なるモンモリロナイトのデータ (⊙) は、pH の変化域は小さいものの、 $\tan \phi_r$ は pH の増加に対して急に増加する結果も示されている。また、鈴木ら⁴⁾のデータ (■, ▣) はそれぞれカオリナイトおよびモンモリロナイトに塩化ナトリウムを添加したものであり、pH の増加に対して $\tan \phi_r$ はカオリナイトでは若干増加し、モンモリロナイトではほぼ一定のようである。Fig.2 に $\tan \phi_r$ と Na^+ モル濃度の関係を示す。Moore³⁾のデータ (⊙) はモンモリロナイトにそれぞれ塩化ナトリウムを加えることによって Na^+ 濃度を変化させたものであり、 $\tan \phi_r$ は陽イオン濃度の変化に対して変化するものと考察されている。しかし、池尻ら⁵⁾のデータ (⊗) も含めてその影響はかなり小さい。また、鈴木ら⁴⁾のデータ (■, ▣) はそれぞれカオリナイトおよびモンモリロナイトに塩化ナトリウムを加えることによって Na^+ モル濃度を変化させたものであり、 $\tan \phi_r$ はカオリナイトの場合には若干減少し、モンモリロナイトの場合には若干増加するようであるが、その影響度合いはかなり小さい。残留強度と間隙水の化学的性質の関係は粘土鉱物の種類によって異なるものと考えられ、これは今後の重要な検討課題である。

3. 重回帰分析による土の残留強度の推定 土の工学的指標と残留強度の関係について重回帰分析を行った。その結果を Table 1 および Table 2(a), (b) に示している。ここで、N は用いたデータ数、C は定数、 $A (= I_p / F_{clay})$ は活性度、 w_p / w_L は De et al.⁶⁾ や宋ら⁷⁾ が用いた指標である。Table 1 には全

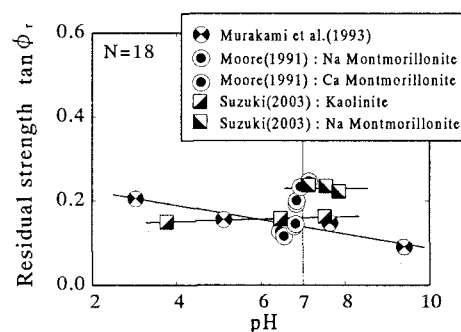
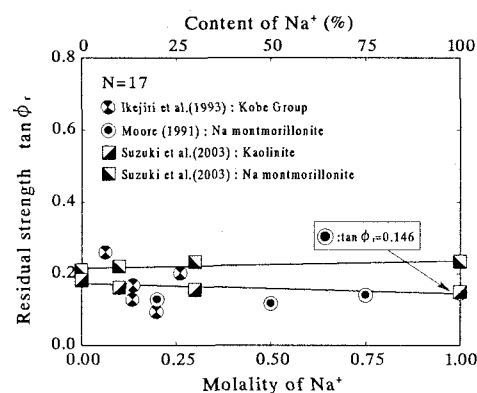


Fig.1 Relationship between residual strength and pH

Fig.2 $\tan \phi_r$ plotted against concentration of sodium cation

試料に対する重回帰分析の結果を示している。表の最左列が目的変数 $\tan \phi_r$ である。また、 $F_{\text{clay}} \sim A$ が説明変数で、そのうち 2~3 個を選択している。その際、多重共線性に注意した。式は $\tan \phi_r = C + aX_1 + bX_2$ (a, b : 回帰係数) のような形で表される。 F_{clay} および w_p/w_L の変数選択の場合、重相

Table 1 Result obtained from multiple regression analysis for all samples

	N	C	F_{clay}	w_L	w_p	I_p	w_p/w_L	A	r
$\tan \phi_r$	213	0.343	-0.00222	-0.000452	0.00346	-	-	-	0.509
	213	0.403	-0.00159	-0.000386	-	-	-	-	0.472
	217	0.400	-0.00174	-	-	-0.000409	-	-	0.488
	212	0.116	-0.00103	-	-	-	0.528	-	0.650
	213	0.113	-0.000973	-	-	-	-	0.532	0.647
	218	0.287	-	-0.000554	0.00220	-	-	-	0.419

Table 2 Result obtained from multiple regression analysis for samples containing smectite

	N	C	F_{clay}	w_L	w_p	I_p	w_p/w_L	A	r
$\tan \phi_r$	92	0.535	-0.00508	0.0000338	-0.00130	-	-	-	0.705
	92	0.520	-0.00554	0.0000218	-	-	-	-	0.703
	92	0.521	-0.00545	-	-	0.0000250	-	-	0.703
	92	0.231	-0.00325	-	-	-	0.531	-	0.794
	92	0.515	-0.00516	-	-	-	-	-0.00509	0.704
(a)	97	0.463	-	-0.000112	-0.00817	-	-	-	0.572

	N	C	$\log F_{\text{clay}}$	$\log w_L$	$\log w_p$	$\log I_p$	$\log(w_p/w_L)$	$\log A$	r
$\log(\tan \phi_r)$	92	1.010	-0.454	-0.642	0.193	-	-	-	0.828
	92	1.122	-0.401	-0.605	-	-	-	-	0.826
	92	0.792	-0.373	-	-	-0.507	-	-	0.838
	92	0.770	-0.697	-	-	-	0.616	-	0.815
	92	0.795	-0.883	-	-	-	-	-0.502	0.837
(b)	97	0.882	-	-0.775	-0.0836	-	-	-	0.822

関係数 r が最大となり、 $r=0.650$ となる。一方、**Table 2(a)**には、鉱物組成を考慮して、特にスメクタイトを含む土のデータだけを選別して重回帰分析を行った結果を示している。 r はいずれの変数の組み合わせにおいても上述の全データを対象とした場合より高くなり、 F_{clay} および w_p/w_L の変数選択の場合において最大となり、 $r=0.794$ まで向上する。また、**Table 2(b)**には、**Table 2(a)** で用いたデータを常用対数にした値 ($\log(\tan \phi_r)$, $\log F_{\text{clay}}$ など) に対する重回帰分析結果を示している。式は $\tan \phi_r = C \cdot X_1^a \cdot X_2^b$ のような形で表される。 r はいずれの変数の組み合わせにおいても向上し、特に F_{clay} および I_p の組合せにおいて最大となり、 $r=0.838$ まで向上する。

4. 結論 (1) 土の残留強度と各工学的指標との相関は一般に低い。ただし、スメクタイトを含む土に限定すれば、これらの間に良好な相関がある。(2) 残留強度は水素イオン濃度指数の変化に対して若干変化するものの、ナトリウムイオンおよびカルシウムイオンの濃度変化に対してほとんど変化しない。残留強度と間隙水の化学的性質の関係は粘土鉱物の種類によっても異なるようである。(3) 土の鉱物組成を考慮して、特にスメクタイトを含む土のデータだけを選別して重回帰分析を行った結果、いずれの変数の組み合わせにおいても重相関係数 r は向上し、 F_{clay} および w_L/w_p の 2 変数のとき、 $r=0.794$ が得られた。(4) 説明変数と目的変数を常用対数にした場合には、いずれの変数の組み合わせにおいて r はさらに向上し、 F_{clay} および I_p の 2 変数のとき $r=0.838$ が得られた。

参考文献 1) 鈴木素之: リングせん断試験による土の残留強度に関する基礎的研究, 信州大学学位請求論文, 1998. 2) 村上幸利ほか: 地すべり粘土の水素イオン濃度と残留強度の関係把握に関する基礎的研究, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, pp. 956-957, 1993. 3) Moore, R.: The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays, *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.35-47, 1991. 4) 鈴木素之ほか: 塩分濃度が異なる純粋粘土鉱物の残留強度, 山口大学工学部研究報告, Vol. 54, No. 1, pp. 11-15, 2003. 5) 池尻勝俊ほか: 神戸層群の地すべり粘土のせん断強度について, 第 28 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 2183-2186, 1993. 6) De, P.K. et al.: Discussion - Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, *Geotechnique*, Vol.23, No.4, pp.600-601, 1973. 7) 宋 永焜ほか: 乱された粘土の残留強度に及ぼす影響要因, 土質工学会論文報告集, Vol.18, No. 4, pp.107-118, 1978.