人工配合した中間土の強度発現機構に関する実験的研究[†]

西田 一彦* 八尾 真太郎** 平田 茂良***

Experimental Study on Strength Development Mechanism of Artificially Mixed Intermediate Soils

by

Kazuhiko NISHIDA*, Shintaro YAO** and Shigeyoshi HIRATA***

In order to make clear the strength development mechanism of intermediate soils, the direct shear tests were performed on artificially mixed soils to examine the influences of soil texture and consolidation pressure. The following conclusions were obtained:

- (1) The shear strength characteristic of soils changes from that of sand to clay with increasing clay content and from that of clay to sand with increasing consolidation pressure.
- (2) From the direct shear tests, the experimental constant $c\sigma_c$ characterizing the boundary between sand and clay was found to exist and vary with the clay content and consolidation pressure.
- (3) The experimental constant $c\sigma_{cn}$ characterizing the soil properties was also found.

Key words: Consolidation, Direct shear test, Intermediate soils, Shear strength, Soil classification, Soil textures, Void ratio

1 緒 言

土木・建築の基礎構造工学の分野においては、対象とする地盤を粘性土と砂質土のどちらかに判別を行い、それぞれについて理想化された材料特性を設計に適用しているのが現状である。粘性土の場合には、内部摩擦角を無視し、粘着力に支配されるとし、砂質土の場合には、粘着力を無視し、内部摩擦角に支配されるものとして扱っている。

しかし、現実の地盤の土は、粘性土と砂質土の中間的性質を示す場合が少なくはなく、これらの土は中間土と呼ばれており、近年になって、その力学的性質および物理的性質についての研究が行われている。^{1)~7)}

筆者らは、中間土の強度発現機構の解明を目的として、粘土・シルト・砂を人工的に配合した土質試料について、実験および理論的研究を行ってきた。本報は、粒度組成と圧密圧力を実験パラメータとして作製した土質試料に対する一面せん断試験の結果を報告するものである。ここで、粘土・シルト・砂の3種類の材料が均一に混合された完全飽和の配合土を対象とし、土の骨組構造については砂の噛み合い等の物理的要因は考慮するが、粘土の鋭敏性等の化学的要因は対象外である。

2 実験概要

2.1 使用材料

配合土の材料として、粘土材はベントナイトとカオリナイトを1:1の乾燥重量比で調合したものを用いた。シルト材はガラスの粉砕物、砂材は豊浦標準砂を用いた。これらの配合材料の粒度分布曲線を Fig. 1 に示し、主な物理的性質を Table I に示す。

2.2 実験計画

せん断特性に対する土の粒度組成と圧密圧力の影響を調べるために、以下の2種類の試験体を作製した。

(1) 粒度組成の影響を調べるため、Fig. 2 中の Line A~E で定義される ○印と ●印で示した計 36 種の全ての配合土 (Table II) について、圧密圧力を一定値 1.2 kgf/cm^2 で試験体を作製した。

(2) 圧密圧力の影響を調べるため、Fig. 2 中の

Fig. 1. Grain size distribution curves of mixed materials.

[†] 原稿受理 平成3年9月11日 Received Sep. 11, 1991

* 正会員 関西大学工学部土木工学科 〒564 吹田市山手町, Dept. of Civil Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564

** 関西大学工学部建築学科 〒564 吹田市山手町, Dept. of Arch. Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564

*** 大和ハウス工業(株)総合技術研究所 〒630 奈良市西九条町, Tech. Res. Inst. Daiwa House Ind. Co. Ltd., Saikuijo, Nara, 630

Table I. Physical properties of mixed materials.

		Clay (Kaolinite : Bentonite)	Silt	Sand
Maximum grain size	$D_{\max}$ (μm)	5 (5 : 5)	74	420
Effective grain size	D_{10} (μm)	— (— : —)	13	114
Coefficient of uniformity	U_c	— (— : —)	2.20	1.68
Coefficient of curvature	U_c'	— (— : —)	0.93	0.91
Specific gravity of solid	G_s	2.659 (2.709 : 2.608)	2.537	2.645
Void ratio at densest state	$e_{\min}$	— (— : —)	0.96	0.61
Void ratio at loosest state	$e_{\max}$	— (— : —)	1.97	0.97
Liquid limit	w_L (%)	187.6 (43.9 : 357.3)	—	—
Plastic limit	w_p (%)	38.0 (31.2 : 37.6)	—	—
Plasticity index	I_p (%)	149.6 (12.7 : 319.7)	—	—
Activity	A	2.76 (0.29 : 5.05)	—	—

Point-1~4 で定義される ● 印で示した配合土 (Table III) それぞれについて, 圧密圧力 $p=0.8, 1.2, 1.6, 2.4, 3.2 \text{ kgf/cm}^2$ の 5 種類の試験体を作製した.

2・3 試験体の作製

Table II. Mixtures on Line-A~E.

	Soil texture clay-silt-sand (%)		
Line-A	100-	0-	0
	50-	0-	50
	40-	0-	60
	35-	0-	65
	30-	0-	70
	25-	0-	75
	20-	0-	80
	15-	0-	85
	10-	0-	90
	0-	0-	100
Line-B	25-	10-	65
	20-	10-	70
	15-	10-	75
	10-	10-	80
	5-	10-	85
	0-	10-	90
Line-C	15-	25-	60
	13-	27-	60
	10-	30-	60
	7-	33-	60
	0-	40-	60
Line-D	20-	50-	30
	15-	55-	30
	12-	58-	30
	10-	60-	30
	5-	65-	30
	0-	70-	30
Line-E	(100-	0-	0)
	50-	50-	0
	40-	60-	0
	35-	65-	0
	30-	70-	0
	25-	75-	0
	20-	80-	0
	15-	85-	0
	10-	90-	0
	0-	100-	0

配合材料を所定の乾燥重量比で調合し, 液性限界程度の含水比 (完全飽和状態) でよく練返した後, セン断箱兼用の圧密箱に注いで, 所定の圧密圧力で一次圧密終了 (おおむね 24 時間程度) まで圧密を行った. 試験体の寸法は, 直径 60 mm, 高さ約 20 mm である.

2・4 セン断試験

一次圧密終了後, いったん圧密圧力を除荷し, 直ちに以下に述べる垂直応力 σ_t でせん断試験を行った. 垂直応力 σ_t は, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.4, 3.2 kgf/cm^2 の 7 種類である. セン断試験装置は在来型であり, セン断速度は 5 mm/min である.

Fig. 2. Soil textures of artificially mixed soils.

Table III. Mixtures on Point-1~4.

	Soil texture clay-silt-sand (%)		
Point-1	100-	0-	0
Point-2	15-	10-	75
Point-3	10-	30-	60
Point-4	12-	58-	30

せん断試験を行った全試験体について、含水比、単位体積重量、間げき比、飽和度を求めた。また、代表的な配合土については、液性・塑性限界試験を実施した。

3 実験結果および考察

3・1 液性限界・塑性限界試験の結果

Fig. 3の塑性図中に、代表的な配合土について実施した液性・塑性限界試験の結果を示す。同図より、今回の実験に用いた配合土は、基準線 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ のほぼ上部近傍に分布しており、自然地盤における無機質粘性土と同様のコンシステンシー特性を有していることが分かる。また、Line-AとEの配合土は、ほぼ直線上に分布しており、Line-B, C, Dの配合土は、2つの直線の内側に納まっている。粘土分の多いものは図中の右上に、砂またはシルトの多いものは左下に

Fig. 3. Plasticity chart.

Fig. 4. Relationship between void ratio and clay content on Line-A~E.

位置することが分かる。

3・2 圧密試験の結果

(1) Fig. 4は、Line-A~Eの配合土について、間げき比 e と粘土分含有率 C の関係を示したものである。間げき比は、粘土分含有率が10~20%程度において最小値をとる傾向が見られる。このとき、粒状土粒子（シルト粒子または砂粒子）が接触して形成した粒子骨格の間げき内に粘土分が最も充てんされている状態であると考えられる。粒状土粒子の接触については、後述のせん断試験の結果において、補足することとする。

(2) Fig. 5に、Point-1~4の配合土について、間げき比 e と圧密圧力 p の関係を示す。Point-2, 3, 4の配合土では、Point-1（粘土分含有率100%）に比べ、 e - $\log p$ 曲線の傾きが緩やか（圧縮指数 C_c が小さい）であり、粒状土粒子の接触が生じているものと推測され、接触については、せん断試験の結果で補足する。

3・3 せん断試験の結果

(1) Fig. 6(a)~(e)は、Line-A~Eの配合土それぞれについて、圧密圧力 p を一定（1.2 kgf/cm²）として作製した試験体のせん断試験結果を示したものである。図中には、粒度組成を記号C, M, Sで示した。たとえば、Fig. 6(a)のC10S90は、粘土分10%の砂分90%の粒度組成を表している。同図(a)と(e)において、砂（C0S100）とシルト（C0M100）のせん断

Fig. 5. Relationship between void ratio and consolidation pressure on Point-1~4.

Fig. 6. Relationship between shear strength and normal stress on Line-A~E.

抵抗が発現されることとなる。特性値 c, σ_c は、粘土含有率の増加にともなって増大し、図の横軸が大なる方向へ移動することで、配合土のせん断特性が砂質土から粘性土の性質に変化することが分かる。

(2) Fig. 7 (a)~(d) は、Point-1~4 のそれぞれの配合土について、圧密圧力を変えて作製した試験体のせん断試験結果を示したものである。同図(a)には、粘土のせん断特性が示されているが、圧密圧力 p の増加にともなって、強度増加が生じていることが分かる。また、同図(b)~(d)においても、圧密圧力の増加にともなって、粘着力 c が増大するとともに、粒状土粒子の内部摩擦角が発揮され、砂質土の特性に移行することが分かる。

また、Fig. 6 と同様に、 τ_f - σ_t 曲線が折れ曲がる点に相当する特性値 c, σ_c が存在し、 σ_t が c, σ_c 以上の場合に、粒状土粒子間の摩擦抵抗が発現されている。圧密圧力の増加にともなって、特性値 c, σ_c が減少し、図の横軸が小なる方向へ移動し、配合土のせん断特性が粘性土から砂質土の性質に変化することが示される。

(3) Fig. 8 は、Fig. 6 で見いだされた特性値 c, σ_c と粘土含有率 C の関係を示したものである。Line-A、

特性は、粘着力 $c \approx 0$ であり、内部摩擦角が支配的であり、典型的な砂質土の特性が示されている。一方、粘土 (C100S0 または C100M0) は、 $\phi \approx 0$ であり、典型的な粘性土の特性が示されている。Line-A~E の配合土それぞれで、粘土含有率の増加とともに、砂質土から粘性土の特性に移行することが分かる。

また、同図では、 τ_f - σ_t 曲線が折れ曲がる点に相当する特性値 (以後、 c, σ_c と呼ぶ) の存在が見い出される。各配合土のせん断特性において、垂直応力 σ_t が c, σ_c 以上の場合には、粒状土粒子の接触が生じ、摩擦

Fig. 7. Relationship between shear strength and normal stress on Point-1~4.

D, E の結果から、前述した粘土分含有率と $c\sigma_c$ の正の相関が表される。

$c\sigma_c$ と圧密圧力が一致する場合（以後、このときの圧密圧力を $c\sigma_{cn}$ と呼ぶ）、ここでは、 $p = 1.2$ kgf/cm² の圧密圧力で、Line-A~E の各配合土で摩擦抵抗を

発揮する場合の粘土分含有率は、ほぼ 10~25% の範囲にある。この範囲は、圧密試験結果 (Fig. 4) で間げき比が最小となる粘土分含有率とほぼ一致しており、粒状土粒子間での摩擦抵抗が、間げき比の最小値となる状態で生じることが証される。

Fig. 8. Relationship between $c\sigma_c$ and clay content on Line-A~E. Fig. 9. Relationship between $c\sigma_c$ and consolidation pressure on Point-1~4.

Fig. 10. Contour lines of $c_{\sigma_{cn}}$.

(4) Fig. 9 は, Fig. 7 によって得た c_{σ_c} と圧密圧力 p の関係を示したものである。同図に示されるように, c_{σ_c} と圧密圧力は負の対数線形の関係にあることが分かる。また, 同図から, $c_{\sigma_{cn}}$ の値は, 任意の粒度組成の土に対して, 固有の値をとることが分かる。

(5) ここで, 実験の結果を整理する意味で, c_{σ_c} と $c_{\sigma_{cn}}$ の工学的意義を検討することとする。 $c_{\sigma_{cn}}$ は, Fig. 10 に示した三角座標上での等高線から分かるように, $c_{\sigma_{cn}}$ が大きい土は粘性土の性質が強く, 小さい土は砂質土の性質が強くなるといえる。したがって, $c_{\sigma_{cn}}$ は, 土の種類を特徴付けるものである。

一方, c_{σ_c} は, 土の種類と応力履歴で決定されると考えられる。応力履歴は, 事前の圧密圧力とせん断試験時の排水条件で決定され, 以下の概念式が成り立つ。

$$c_{\sigma_c} = F(\text{土の種類; 応力履歴}) \\ = F'(c_{\sigma_{cn}}; \text{圧密圧力, 排水条件})$$

4 結 論

本研究の実験結果の検討によって, 以下の結論を得た。

(1) 粘土分含有率の増加により, 土のせん断特性が砂質土から粘性土へ変化することが分かった。また, 圧密圧力が増加すると, 土のせん断特性が粘性土から

砂質土へ変化することが分かった。

(2) 一面せん断試験において, 粘性土と砂質土の力学的性質の境界を与える特性値 c_{σ_c} の存在が見い出された。 c_{σ_c} は, 土の粒度組成と圧密圧力で増減する性質を有している。 c_{σ_c} を境にして, 垂直応力の大きいところでは, 摩擦抵抗が優先する砂質土の挙動, 小さいところでは, 粘着力が優先する粘性土の挙動を示すことが分かった。

(3) 土質材料を特徴付ける特性値 $c_{\sigma_{cn}}$ の存在が見い出された。 $c_{\sigma_{cn}}$ は, 任意の粒度組成で固有の値をもち, その大小によって, 粘性土か砂質土かを力学的観点から区分することができる。

参 考 文 献

- 1) 倉田 進, 藤下利男, 運輸技術研究所報告, 11, 389 (1961).
- 2) 中瀬明男, 勝野 克, 小林正樹, 港湾技術研究所報告, 11, 83 (1972).
- 3) 中瀬明男, 亀井健史, 第17回土質工学研究発表会講演集, p. 349 (1982).
- 4) 中瀬明男, 竹村次郎, 石沢 毅, 大槻英治, 第23回土質工学研究発表会講演集, p. 511 (1988).
- 5) 大嶺 聖, 落合英俊, 林 重徳, 第23回土質学研究発表会講演集, p. 623 (1988).
- 6) Á. Kézdi, "Soil Physics", Chap. 3 (1979) Elsevier Scientific Pub. Co.
- 7) M. Fukue, S. Okusa and T. Nakamura, ASTM STP. No. 892, Consolidation of soils, Testing and Evaluation, p. 627 (1986).
- 8) 八尾真太郎, 平田茂良, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1425 (1989).
- 9) 八尾真太郎, 平田茂良, 第25回土質工学研究発表会講演集, p. 701 (1990).
- 10) 八尾真太郎, 平田茂良, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1471 (1991).
- 11) 土質工学会編, "土質試験法" (1972).