

# 不同砂粒含量和粒径下 含砂黏土塑性与不排水强度影响试验

王恒<sup>1,2,3</sup>, 郭敏<sup>1,2</sup>, 陈军浩<sup>1,2</sup>

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;  
3. 中建海峡建设发展有限公司, 福建 福州 350015)

**摘要:** 通过开展含砂黏土的落锥试验, 探究含砂黏土塑性与不排水强度的内在联系随砂粒含量和粒径的演变规律。研究结果表明: 含砂黏土液限随砂粒含量的增加而线性减小, 砂粒粒径越大, 含砂黏土液限越小。当  $w_{sp} > 0\%$  的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线和  $w_{sp} = 0\%$  的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线重合时, 含砂黏土不排水强度以黏土不排水强度控制为主。当  $w_{sp} > 0\%$  的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线偏离  $w_{sp} = 0\%$  的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线时, 含砂黏土不排水强度由黏土基质的不排水强度与砂粒骨架的承载作用共同构成。最后, 提出与黏土液限、砂粒含量和粒径定量相关的含砂黏土不排水强度预测公式, 并进行验证, 计算得到的不排水强度预测值约为实测值的0.8~1.2倍。随着砂粒含量增加, 砂粒接触形成骨架结构是含砂黏土不排水强度发生突变的主要原因。

**关键词:** 含砂黏土; 砂粒含量; 砂粒粒径; 液限; 不排水强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)06-0519-09

## Experimental study on plasticity and its relationship with undrained strength of sandy clay under different sand content and particle size

WANG Heng<sup>1,2,3</sup>, GUO Min<sup>1,2</sup>, CHEN Junhao<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

3. CSCEC Strait Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou 350015, China)

**Abstract:** To investigate the evolution of the internal relationship between plasticity and undrained strength of sandy clay, fall cone tests were conducted on samples with varying sand contents and particle sizes. Results show that the liquid limit of sandy clay decreases linearly as sand content increases, and that larger sand particle sizes result in a lower liquid limit. When the curve of undrained strength versus water content for sandy clay with a sand content ( $w_{sp} > 0\%$ ) aligns with that for hosted clay ( $w_{sp} = 0\%$ ), the undrained strength is primarily governed by the hosted clay. However, when the curve of undrained strength versus water content for sandy clay with  $w_{sp} > 0\%$  deviates from the curve of undrained strength versus water content of hosted clay, the sand particles begin to contribute more to the overall strength, forming a skeletal structure that enhances the undrained strength. Based on these findings, an equation for predicting the undrained strength of sandy clay was proposed, which quantitatively relates the undrained strength to the liquid limit of the hosted clay, sand content, and particle size. This equation was validated, and the predicted undrained strength values were approximately 0.8 to 1.2 times the measured values. As sand content increases, the development of the sand particle skeleton becomes the primary factor driving a sudden increase in the undrained strength of sandy clay.

**Keywords:** sandy clay; sand content; sand particle size; liquid limit; undrained strength

我国每年航道港口清淤工程产生约16亿 $m^3$ 的 淤泥废弃物<sup>[1]</sup>, 清淤中利用高压泥浆泵将原位沉

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2022J01925, 2022J05186); 福建省科技计划项目公益类科研院所专项(2024R1018002)

第一作者简介: 王恒(1989—), 男, 福建南安人, 副教授, 博士, 研究方向: 软土地基处理、数值模拟。

积的泥砂通过水利吹填的方式堆积在围堰中,形成砂粒和黏土共存的含砂黏土,再进行脱水和软基处理,提高吹填土的承载力,作为滨海土工建筑基础下卧土层的优质填料,不排水强度( $C_{ur}$ )是评价软基处理中吹填土承载力的关键指标。统计资料显示,福建沿海地区第四纪海相沉积物中砂粒含量最多可接近 60%<sup>[2-4]</sup>。由于较大粒径砂粒等惰性组分的存在,导致含砂黏土与纯黏土的物理-力学性状存在差异,因此,探索考虑砂粒含量和粒径影响的含砂黏土塑性-强度性状定量评价方法是吹填造陆工程的迫切需求。

传统采用塑限联合测定法(落锥法)测定黏土界限含水率和不排水强度。Hansbo<sup>[5]</sup>首先提出与锥重( $W$ )和贯入深度( $h$ )相关的黏土不排水强度经验关系。在此基础上,殷杰等<sup>[6]</sup>分析了不同规格的圆锥几何尺寸对不排水强度的影响规律。王亮等<sup>[7]</sup>通过研制室内微型高精度十字板剪切仪,研究了初始含水率( $w_{c0}$ )与重塑淤泥不排水强度之间的关系。针对含砂黏土的不排水强度特性,已有研究表明,砂粒含量、源土矿物特征和砂粒级配为控制含砂黏土界限含水率和不排水强度的关键因素<sup>[8-11]</sup>。目前,砂粒含量和粒径变化对含砂黏土塑性和不排水强度的影响规律仍未明确。

本研究拟开展不同砂粒含量和粒径下含砂黏土的落锥试验,通过对比圆锥贯入深度、界限含水率和不排水强度的变化规律,提出砂粒骨架结构形成的判别方法,建立含砂黏土不排水强度预测模型并验证合理性,为含砂黏土地基软基处理的设计和施工提供参考。

## 1 试验材料与方法

工程中含砂黏土的砂粒含量( $w_{砂}$ ) 0% ~ 60%,砂粒粒径 0.075 ~ 2 mm,含砂黏土试样采用不同液限黏土和特定粒径福建标准砂均匀混合制备,黏土分别取自福建福州高盖山和浙江台州。根据文献<sup>[12]</sup>,使用 GYS-2 型液塑限测定仪测

定黏土液限( $w_{cl}$ ),高盖山黏土和台州黏土的  $w_{cl}$  分别为 79.0% 和 53.8%,塑限( $w_{cp}$ )分别为 30.7% 和 22.0%。图 1 为黏土塑性图,其中, $I_{cp}$  为塑性指数。从图 1 可见,两种黏土均位于 A 线上方,且两种黏土均为高液限黏土。根据密度计法测定颗粒级配(见图 2),通过比重瓶法测定比重,黏土基本物理性质详见表 1。

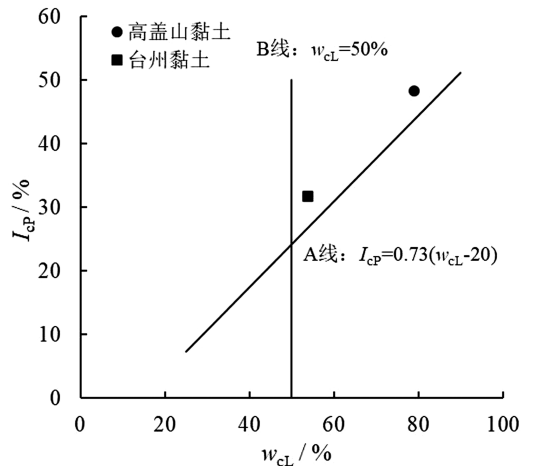


图 1 黏土塑性图

Fig.1 Plasticity chart of hosted clays

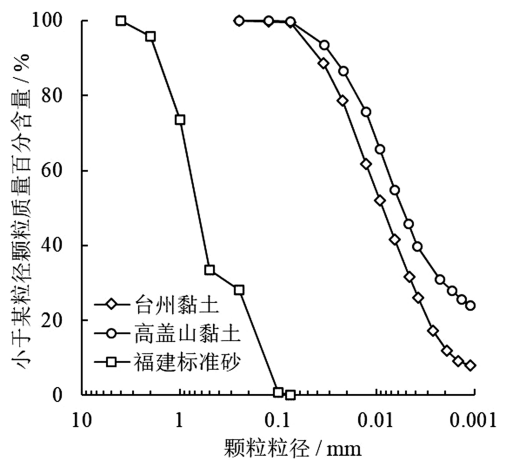


图 2 颗粒级配曲线

Fig.2 Grading curves of clay and sand

表 1 黏土的基本物理性质指标

Tab.1 Basic physical properties of hosted clays

土样名称	液限/%	塑限/%	比重/ $g \cdot cm^{-3}$	黏粒/% (粒径 < 0.005 mm)	粉粒/% (粒径 0.005 ~ 0.075 mm)	砂粒/% (粒径 > 0.075 mm)
高盖山黏土	79.0	30.7	2.72	47.6	52.1	0.3
台州黏土	53.8	22.0	2.75	33.9	65.6	0.5

砂粒含量  $w_{砂}$  为砂粒的干质量占含砂黏土试样总干质量的百分比:

$$w_{砂} = \frac{m_s}{m_{sc}} \times 100\% = \frac{m_s}{m_s + m_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $m_s$  为加入砂粒的干质量, g;  $m_c$  为黏土的干质量, g;  $m_{sc}$  为加入砂粒和黏土的干质量总和, g。试验中,  $w_{砂}$  分别取 0%、10%、30%、35%、40%、45%、50% 和 60%, 砂粒粒径分别取 1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.1~0.25 mm 共 3 种, 每组同步测试 3 个平行样, 共开展 132 组落锥试验, 试验方案详见表 2。

表 2 落锥试验方案

Tab.2 Fall cone test scheme

土样名称	含砂量/%	黏土液限/%	砂粒粒径/mm
高盖山黏土	0	79.0	
	10	79.0	
	30	79.0	
	35	79.0	1~2、
	40	79.0	0.5~1、
	45	79.0	0.1~0.25
	50	79.0	
台州黏土	0	53.8	
	10	53.8	
	30	53.8	
	35	53.8	1~2、
	40	53.8	0.5~1、
	45	53.8	0.1~0.25
	60	53.8	

具体试验步骤: 1) 根据含水率计算黏土的干质量, 根据  $w_{砂}$  计算所需的砂粒质量。2) 将黏土和砂粒用调土刀反复搅拌均匀。3) 根据文献 [12] 开展落锥试验, 落锥锥角为 30°, 质量为 80 g, 试样杯的直径 40 mm, 高度 30 mm。4) 试验完成后取锥体附近不少于 10 g 的试样放入铝盒称重并测定含水率。5) 增加含砂黏土的含水率, 重复以上试验步骤, 最后绘制得到含水率与圆锥贯入深度的关系曲线。

## 2 试验结果分析

图 3 所示为典型的含砂黏土下台州含砂黏土贯入深度 ( $h$ ) 与含砂黏土含水率 ( $w_{sc}$ ) 变化关系曲线, 从图 3 可看出, 随着含砂黏土含水率增加, 贯入深度线性增加。同时, 砂粒含量大的试样贯入深度与含水率关系曲线位于砂粒含量小的试样贯入深度与含水率关系曲线左侧, 且砂粒含量小的试样贯入深度与含水率关系曲线斜率小于砂粒含量大的试样贯入深度与含水率关系曲线斜率。

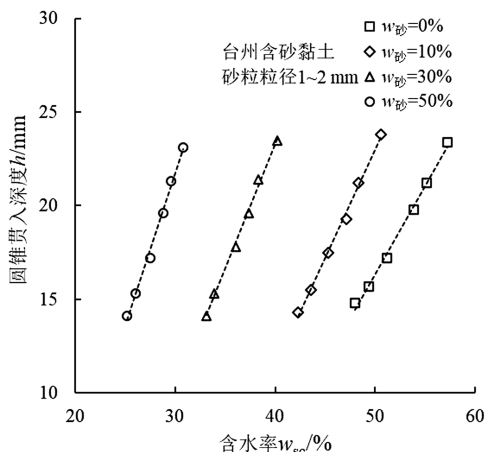


图 3 典型含砂黏土圆锥贯入深度随含砂黏土含水率变化关系曲线

Fig.3 Relationship curves between cone penetration and water content for typical sandy clays

根据文献 [12], 将贯入深度为 20 mm 时所对应含水率定义为含砂黏土的液限, 将计算得到的液限与砂粒含量关系曲线绘制于图 4。

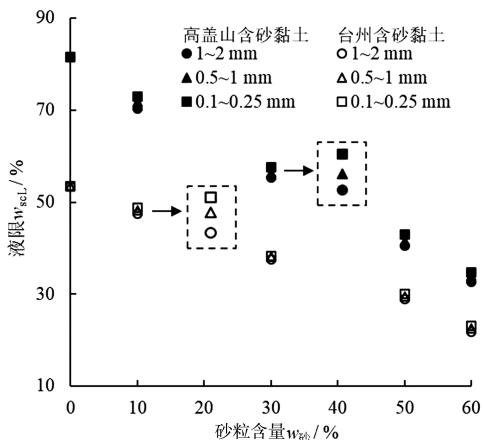


图 4 不同粒径下含砂黏土液限-砂粒含量关系曲线

Fig.4 Relationship curves between liquid limit and sand content of sandy clays with different particle size

图 4 中,  $w_{scL}$  为含砂黏土液限。由图 4 可见, 随着砂粒含量的增加, 含砂黏土的液限呈线性减小趋势。砂粒含量相同时, 砂粒粒径小的含砂黏土液限与砂粒含量关系曲线位于砂粒粒径大的含砂黏土液限与砂粒含量关系曲线的上方。以上研究表明, 砂粒含量和粒径对含砂黏土的液限有显著影响。

为明确砂粒含量和粒径对含砂黏土液限  $w_{scL}$  的定量影响规律, 引入液限比值 ( $w_{scL}/w_{cL}$ ) 概念, 定义为砂粒含量大于 0% ( $w_{砂} > 0\%$ ) 时含砂黏土液限  $w_{scL}$  与砂粒含量为 0% ( $w_{砂} = 0\%$ ) 时黏土液限  $w_{cL}$  的比值。图 5 为液限比值与  $w_{砂}$  的变化关系曲线, 当  $w_{砂} = 10\%$  时, 液限比值介于 0.85~0.95 之间; 当  $w_{砂} = 30\%$  时, 液限比值介于 0.65~0.75 之间; 当  $w_{砂} = 60\%$  时, 液限比值介于 0.4~0.45 之间。

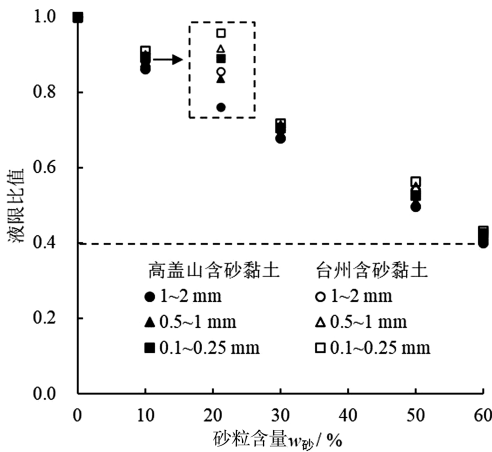


图 5 不同砂粒含量下液限比值与砂粒含量关系曲线

Fig.5 Relationship curves between liquid limit ratio and sand content with different sand content

上述分析表明, 含砂黏土液限与黏土液限、砂粒含量和粒径基本呈线性的变化规律, 基于本研究

的试验数据, 拟采用公式 (2) 预测含砂黏土液限。

$$w_{scL} = w_{cL}(-Rw_{砂} + 1) \quad (2)$$

式中,  $R$  为考虑砂粒粒径影响的参数, 介于 0.93~1.00 之间, 计算中取平均值 0.95。为验证公式 (2) 的适用性, 本研究收集了已有文献的试验数据, 共 126 组, 除 Deng 等<sup>[13]</sup> 的液限数据采用碟式液限仪测定外, 其他液限数据均通过落锥试验测定, 锥体规格均为锥角 30°、锥重 80 g, 含砂黏土基本物理性质如表 3 所示。将采用公式 (2) 计算得到的含砂黏土液限值与实测值对比, 结果绘制于图 6。由图 6 可看出, 对于  $w_{砂}$  介于 0%~60% 的含砂黏土试样, 公式 (2) 的含砂黏土液限计算值为实测液限值的 0.9~1.1 倍, 计算精度高。因此, 在已知黏土液限、砂粒含量和粒径的工况下, 公式 (2) 可用于快速预测含砂黏土的液限。

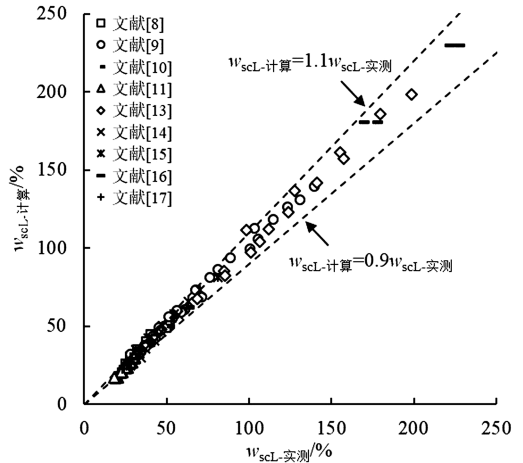


图 6 液限计算值与液限实测值对比

Fig.6 Comparisons on liquid limit between calculated results and measured data

表 3 收集的含砂黏土的基本物理性质

Tab.3 Basic physical properties of collected sandy clay specimens

土样名称	黏土液限/%	含砂量/%	砂粒粒径/mm	组数	数据来源
黏土	50	0、10、20、30、40、50	0.425~0.3	11	文献[8]
			0.6~0.075		
			0.6~0.18		
			4.75~2.0		
			4.75~0.075		
CL-黏土	49	0、10、20、30、40、50	0.3~0.6	31	文献[11]
			0.6~1		
			1~2		

表 3(续)

土样名称	黏土液限/%	含砂量/%	砂粒粒径/mm	组数	数据来源
膨润土	140	0,30,40,50,60	—	24	文献[9]
高岭土	59				
膨润土和高岭土 <sup>①-③</sup>	260 <sup>①</sup>	0,30,40,50,60	0.075~2	15	文献[13]
	198 <sup>②</sup>				
	157 <sup>③</sup>				
膨润土	399	0,33,50	0.063~0.5	10	文献[14]
高岭土	57	0,20,30,40,50,60			
高岭土	81	0,10,20,30,40,50,60	2~3.35	7	文献[15]
膨润土	344	0,20,35,50	—	13	文献[16]
海相黏土	62.4	0,20,40,60	—	4	文献[10]
连云港黏土	62.1	0,15,30,45,55,60	1~2	11	文献[17]
台州黏土	39.9	0,15,30,40,45			

注:①膨润土和高岭土质量比为 9 : 1;②膨润土和高岭土质量比为 7 : 3;③膨润土和高岭土质量比为 5 : 5。

### 3 含砂黏土不排水强度

根据文献[18],采用公式(3)估算含砂黏土的不排水强度:

$$C_{ur} = K \frac{W}{h^2} \quad (3)$$

式中,  $W$  为圆锥质量,  $g$ ;  $K$  为锥因子,取值 0.85。

将计算得到的含砂黏土不排水强度与含砂黏土含水率关系( $C_{ur}-w_{sc}$ )曲线绘制于图 7,由图 7 可知,随着含水率增加,含砂黏土不排水强度非线性减小。同时,随着砂粒含量增加, $C_{ur}-w_{sc}$  曲线总体向左侧移动。在相同砂粒含量和含水率工况下,砂粒粒径大的含砂黏土不排水强度小于砂粒粒径小的含砂黏土不排水强度。

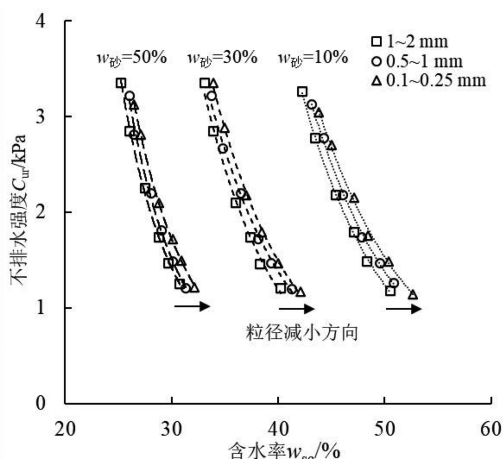
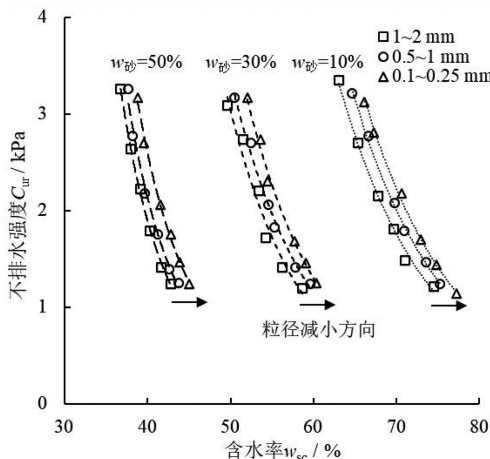


图 7 含砂黏土不排水强度与含水率关系曲线

Fig.7 Relationship curves between undrained strength and water content for sandy clays

以上分析表明,含水率、砂粒含量和粒径是影响含砂黏土不排水强度的重要因素。考虑到砂粒不透水,持水能力较差,理论上可将含砂黏土的持水能力归结于黏土的持水能力。当砂粒含量小于临界砂粒含量时,含砂黏土的不排水强度以黏土

的不排水强度为主;当砂粒含量大于临界砂粒含量时,砂粒颗粒瞬间接触形成骨架,此时含砂黏土的不排水强度由黏土基质的不排水强度与砂粒骨架的承载作用共同构成。因此,可通过对比含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线的差异探

讨论临界砂粒含量的范围。根据上述思路,采用公式(4)定义含砂黏土的含水率<sup>[19]</sup>。

$$w_{sc} = w_c(1 - w_{砂}) \quad (4)$$

式中,  $w_c$  为含砂黏土中黏土的含水率, %。

将典型的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线绘制于图 8 和图 9。从图 8 可看出, 当  $w_{砂} \leq 40\%$  时, 含砂黏土试样的不排水强度与黏土含水率关系曲线和  $w_{砂} = 0\%$  的不排水强度与黏土含水率关系曲线近乎重合。在图 9 中, 当  $w_{砂} > 40\%$  时, 随着砂粒含量增加, 含砂黏土试样的不排水强度与黏土含水率关系曲线逐渐向  $w_{砂} = 0\%$  的不排水强度与黏土含水率关系曲线的右方偏移。

图 10 为相同砂粒含量工况下, 不同颗粒粒径含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线。从图 10 可看出, 随着颗粒粒径减小, 含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线整体向右偏移。

### 4 不排水强度预测方法

对于  $w_{砂} = 0\%$  的含砂黏土, Hong 等<sup>[20]</sup> 给出了与归一化含水率 ( $w/w_L$ , 即含水率/液限) 相关的不排水强度经验表达式如式(5)。

$$C_{ur} = 1.40(w/w_L)^{-4.50} \quad (5)$$

采用公式(5)计算表 2 中的含砂黏土试样工况, 将计算结果绘制于图 11 中。

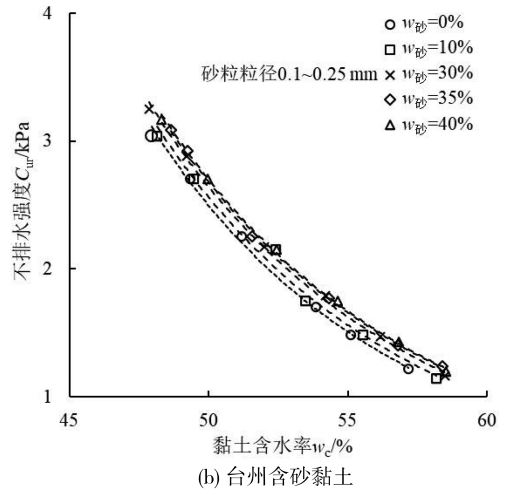
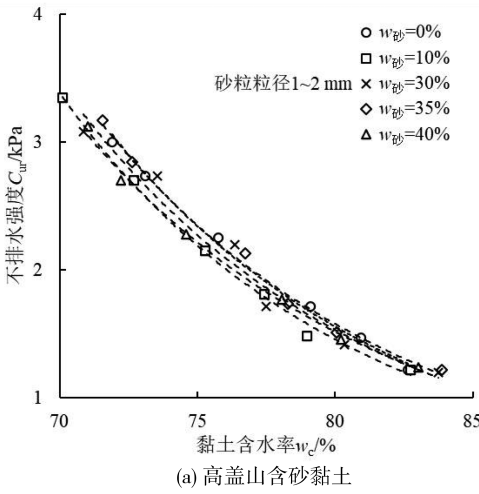


图 8 黏土含水率与含砂黏土不排水强度关系曲线 ( $w_{砂} \leq 40\%$ )

Fig.8 Relationship curves between water content of hosted clay and undrained strength of sandy clays ( $w_{砂} \leq 40\%$ )

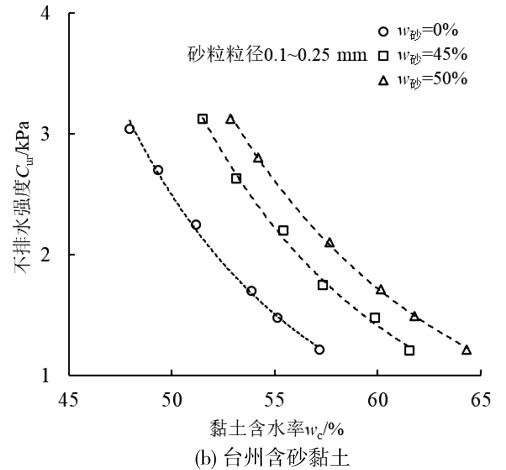
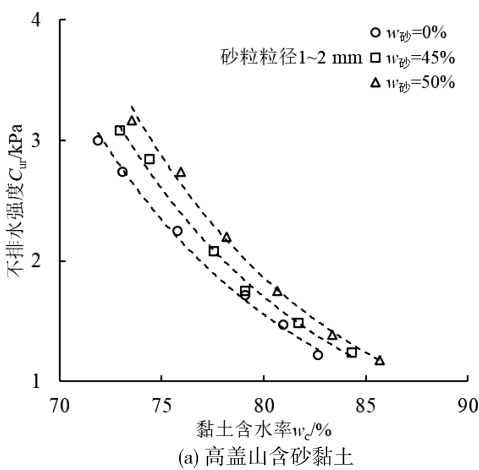


图 9 黏土含水率与含砂黏土不排水强度关系曲线 ( $w_{砂} > 40\%$ )

Fig.9 Relationship curves between water content of hosted clay and undrained strength of sandy clays ( $w_{砂} > 40\%$ )

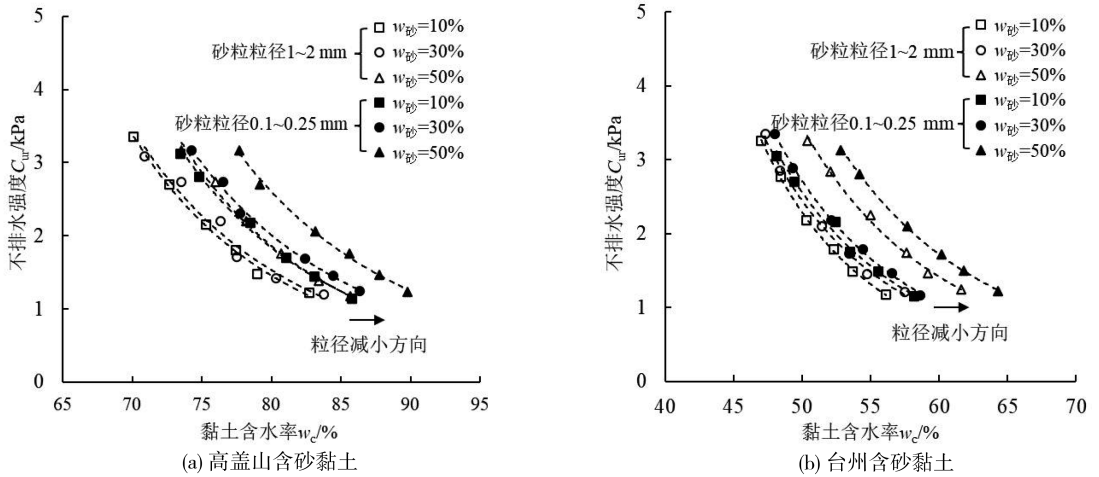


图 10 不同颗粒粒径下黏土含水率与含砂黏土不排水强度关系曲线

Fig.10 Relationship curves between water content of hosted clay and undrained strength of sandy clays with different particle size

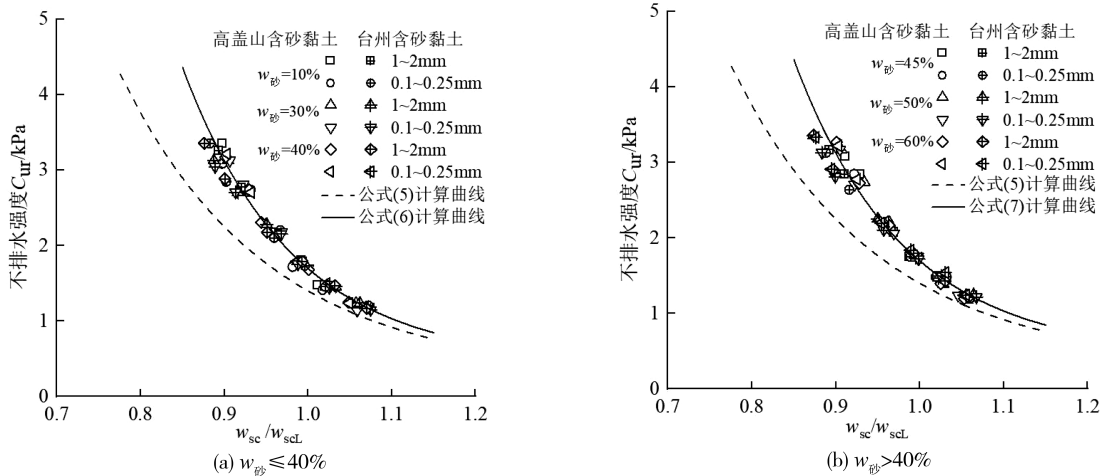


图 11 典型的含砂黏土不排水强度与归一化含水率关系曲线

Fig.11 Relationship curves between undrained strength and normalized water content of typical sandy clay

从图 11 可见,试验数据基本都位于公式(5)计算曲线右侧,这表明公式(5)不适用于预测含砂黏土的不排水强度。

从图 11 可见,实测含砂黏土不排水强度与含水率/液限( $w_{sc}/w_{scl}$ )曲线变化趋势与公式(5)计算曲线接近,参照公式(5)的基本形式,以本文试验数据为基础,通过多元回归分析,发现公式(6)和公式(7)可以较好地拟合含砂黏土的不排水强度与含水率/液限( $w_{sc}/w_{scl}$ )关系曲线。

$$C_{ur} = 1.72(w_{sc}/w_{scl})^{-6.00}, w_{砂} \leq 40\% \quad (6)$$

$$C_{ur} = 1.70(w_{sc}/w_{scl})^{-5.72}, w_{砂} > 40\% \quad (7)$$

将公式(2)分别代入公式(6)、公式(7),最终得到能够定量考虑砂粒含量、粒径和黏土液限

影响的含砂黏土不排水强度预测公式(8)和公式(9)。

$$C_{ur} = 1.72 \{ w_{sc} / [ w_{cl} (-Rw_{砂} + 1) ] \}^{-6.00}, w_{砂} \leq 40\% \quad (8)$$

$$C_{ur} = 1.70 \{ w_{sc} / [ w_{cl} (-Rw_{砂} + 1) ] \}^{-5.72}, w_{砂} > 40\% \quad (9)$$

分别采用公式(8)、公式(9)计算表 3 的所有案例工况。图 12 为计算得到不排水强度与含水率/液限( $w_{sc}/w_{scl}$ )关系曲线和实测不排水强度与含水率/液限( $w_{sc}/w_{scl}$ )关系曲线对比图,从图 12 可看出,计算得到的不排水强度与含水率/液限( $w_{sc}/w_{scl}$ )关系曲线与实测不排水强度与含水率/液限( $w_{sc}/w_{scl}$ )关系曲线基本吻合。

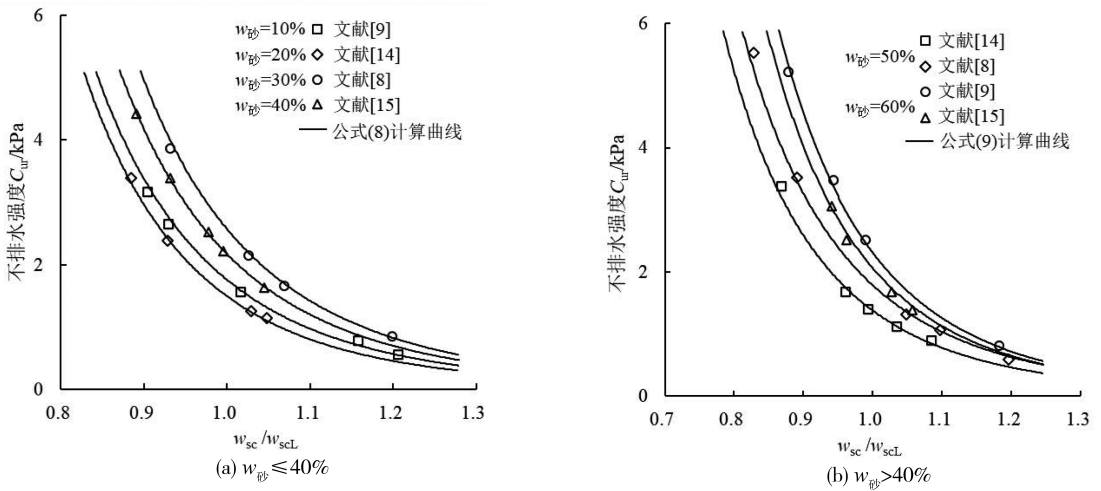


图 12 含砂黏土不排水强度与归一化含水率关系

Fig.12 Relationship between undrained strength and normalized water content of sandy clays

将采用公式(8)、公式(9)计算得到的表 3 中含砂黏土的不排水强度与实测值的对比绘制于图 13,从图 13 可看出,含砂黏土不排水强度计算值

为含砂黏土不排水强度实测值的 0.8~1.2 倍,计算精度满足实际工程需求,能够应用于快速预测含砂黏土的不排水强度。

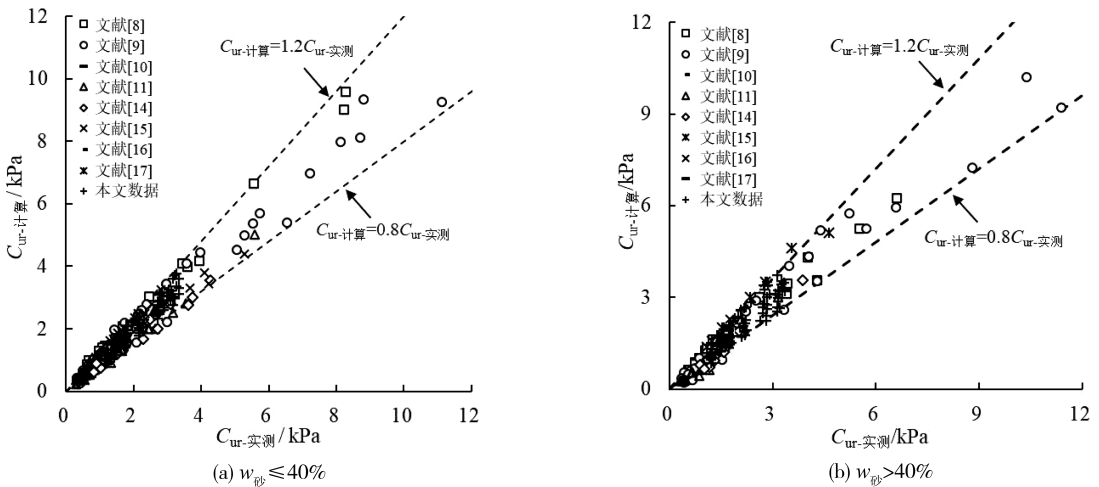


图 13 不排水强度计算值与实测值对比

Fig.13 Comparison of undrained strength between calculated results and measured data

### 5 结论

1)在相同黏土情况下,当砂粒粒径相同时,含砂黏土的液限随砂粒含量增加而线性减小;当砂粒含量相同时,含砂黏土液限随着颗粒粒径减小而增大。

2)以  $w_s = 0\%$  为基准,在  $w_s < 60\%$  工况下,含砂黏土液限与黏土液限的比值介于 0.4~0.95 之间,采用经验公式(2)计算得到含砂黏土液限约为实测值的 0.9~1.1 倍。

3)在相同含水率和砂粒含量下,砂粒粒径越

小的含砂黏土不排水强度越大。当含砂黏土不排水强度和黏土含水率关系曲线和  $w_s = 0\%$  时的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线重合时,含砂黏土不排水强度以黏土的不排水强度控制为主。当含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线与  $w_s = 0\%$  的含砂黏土不排水强度与黏土含水率关系曲线偏离时,含砂黏土不排水强度由黏土基质的不排水强度与砂粒骨架的承载作用共同构成。

4)基于本文试验数据,提出能够定量考虑黏土液限、砂粒含量和粒径影响的含砂黏土不排水

强度预测公式(8)、公式(9),通过公式(8)、公式(9)计算得到的含砂黏土不排水强度约为实测不排水强度的0.8~1.2倍。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2023[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [2] 李东义,徐勇航,王爱军,等. 福建安海湾表层沉积物粒度特征及其现代沉积过程分析[J]. 沉积学报,2015,33(4):724-734.
- [3] 王兆夺,于东生. 泉州湾表层沉积物粒度特征分析[J]. 应用海洋学学报,2015,34(3):326-333.
- [4] 刘治帅. 厦门海域沉积物特征、输运趋势及其环境意义[D]. 南京:南京大学,2012.
- [5] HANSBO S. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test[J]. Swedish Geotech Institute Proc, Stockholm, 1957, 14: 1-48.
- [6] 殷杰,高玉峰,洪振舜. 基于落锥试验的黏性土不排水强度预测方法[J]. 岩土工程学报,2009,31(10):1626-1630.
- [7] 王亮,谢健,张楠,等. 含水率对重塑淤泥不排水强度性质的影响[J]. 岩土力学,2012,33(10):2973-2978.
- [8] CABALAR A F, MUSTAFA W S. Fall cone tests on clay-sand mixtures[J]. Engineering Geology, 2015, 192: 154-165.
- [9] KARAKAN E, SHIMOBÉ S, SEZER A. Effect of clay fraction and mineralogy on fall cone results of clay-sand mixtures[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105887.
- [10] SHI X S, YIN J H. Estimation of hydraulic conductivity of saturated sand-marine clay mixtures with a homogenization approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7): 04018082.
- [11] CABALAR A F, KHALAF M M, ISIK H. A comparative study on the undrained shear strength results of fall cone and vane shear tests in sand-clay mixtures[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(11): 395.
- [12] BSI, BS 1377-2. Methods of test for soils for civil engineering purposes[S]. London: British Standards Institution, 1990.
- [13] DENG Y F, WU Z L, CUI Y J, et al. Sand fraction effect on hydro-mechanical behavior of sand-clay mixture[J]. Applied Clay Science, 2017, 135: 355-361.
- [14] HRUBESOVA E, LUNACKOVA B, MOHYLA M. Mohajerani method: tool for determining the liquid limit of soils using fall cone test results with strong correlation with the Casagrande test[J]. Engineering Geology, 2020, 278: 105852.
- [15] KUMAR G V, WOOD D M. Fall cone and compression tests on clay±gravel mixtures[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 727-739.
- [16] SIVAPULLAIAH P V, SRIDHARAN A, STALIN V K. Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 406-413.
- [17] GAO M Y, JI F, HONG Z S, et al. Changing law of permeability coefficient during compression for reconstituted sandy clays[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2024, 42(11): 1651-1659.
- [18] WOOD D M. Some fall-cone tests[J]. Geotechnique, 1985, 35(1): 64-68.
- [19] GAO M Y, NI J J, HONG Z S. Interrelation between compressibility and permeability of reconstituted sandy clays with different sand fractions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(4): 2461-2473.
- [20] HONG Z S, LIU H L, NEGAMI T. Remolded undrained strength of soils[J]. China Ocean Engineering, 2003, 1(17): 133-142.

(责任编辑:马晓磊)