

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.021

未胶结钙质砂强度-剪胀特性试验研究

王晓丽^{1,2},裴会敏²,王振豪^{2,3}

(1. 中国人民解放军 92844 部队; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院; 3. 自然资源部第一海洋研究所)

摘要: 为了实现紧急情况下对钙质砂抗剪强度指标的快速准确估算,采用三轴排水试验研究了未胶结钙质砂的强度-剪胀特性,通过改变试样相对密实度与有效围压,分析了影响未胶结钙质砂内摩擦角的因素,并提出了能够准确预测未胶结钙质砂峰值内摩擦角与剪胀角的经验公式。试验结果表明:钙质砂峰值内摩擦角、剪胀角受相对密实度影响显著,基于试验数据修正的公式参数,能提高未胶结钙质砂峰值内摩擦角与剪胀角预测的可靠性,峰值内摩擦角预测误差基本小于 25%,经验公式可用于固结后相对密实度范围在 31%~83%之间、应力峰值处的平均有效正应力范围在 100~1 600 kPa 之间的未胶结钙质砂试样抗剪指标快速估算。

关键词: 未胶结钙质砂;强度-剪胀特性;内摩擦角;应力-应变响应;三轴试验;经验公式

Experimental study on strength and dilatancy characteristics of uncemented calcareous sand

Wang Xiaoli^{1,2}, Pei Huimin², Wang Zhenhao^{2,3}

(1. The 92844th Unit of the People's Liberation Army of China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China; 3. First Institute of Oceanography, MNR)

Abstract: To achieve rapid and accurate estimation of the shear strength indicators of calcareous sand under emergency conditions, drained triaxial tests were conducted to investigate the strength and dilatancy characteristics of uncemented calcareous sand. By varying the relative density and effective confining pressure of specimens, the factors influencing the internal friction angle of uncemented calcareous sand were analyzed, and empirical formulas were proposed to accurately predict the peak internal friction angle and dilatancy angle of uncemented calcareous sand. The test results show that the peak internal friction angle and dilatancy angle of calcareous sand are significantly affected by relative density. The formula parameters modified based on the test data can improve the prediction reliability for the peak internal friction angle and dilatancy angle of uncemented calcareous sand. The prediction errors of the peak internal friction angle are mostly less than 25%. The empirical formulas can be used for rapid estimation of the shear strength indicators of uncemented calcareous sand specimens with a post-consolidation relative density ranging from 31% to 83% and a mean effective normal stress at the stress peak ranging from 100 kPa to 1 600 kPa.

Key words: uncemented calcareous sand; strength and dilatancy characteristic; internal friction angle; stress and strain response; triaxial test; empirical formula

钙质砂,又称珊瑚砂,是珊瑚等海洋生物残骸经过原地沉积或短途搬运堆积形成的海洋沉积物,南海、东南亚、中东、南太平洋岛国等地区广泛分布着钙质砂。近年来,我国承建的马尔代夫机场大桥、苏丹港码头等海外工程也多次遇到钙质砂^[1-4]。由于钙质砂在沉积过程中大多未经长途搬运,且碳酸盐含量高达 80%以上,致使钙质砂具有颗粒形状不规则、多孔隙、易破碎、易胶结等特点,其力学性质与普通石英砂相比存在很大的不同,已有的针对石英砂的工程经验和理论分析不能完全适用于钙质砂^[5-11]。作为工程设施的地基材料,钙质砂力学特性的研究具有重要意义^[12-14]。

钙质砂内摩擦角是反映钙质砂内部颗粒间摩擦特性和抗剪强度的重要力学参数,设计过程中内摩擦角选取合理与否,直接关系到工程的安全和经济性。受颗粒矿物组成和颗粒形状的影响,钙质砂的临界内摩擦角和峰值内摩擦角都普遍高于石英砂,Coop 等^[15-16]发现澳大利亚 Dogs Bay 钙质砂的临界内摩擦角为 40°,且与应力水平无关,而 Jamiolkowski 等^[17]测得钙质砂的临界内摩擦角在 36°~42°之间。以上研究给出了内摩擦角的取值,但没有分析影响钙质砂内摩擦角变化的因素。对于中国南海的钙质砂,内摩擦角随粒径的增

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107207)

作者简介: 王晓丽(1993—),女,助理工程师,硕士,主要从事海洋岩土工程设计管理研究。E-mail:847838431@qq.com

通信作者: 王振豪(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事海洋工程地质与地质灾害防护研究。E-mail:wzh-ouc@foxmail.com

大而增大,设计时内摩擦角取值为 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ^[18-19]。现有对钙质砂内摩擦角影响因素的研究多为定性分析,且取值偏于保守。

本文通过三轴排水试验分析了某海域潟湖内未胶结钙质砂的强度-剪胀特性,并建立了一套能够准确预测钙质砂峰值内摩擦角的经验公式,可实现紧急情况下对钙质砂地基材料抗剪强度指标的快速估算,对于深入了解钙质砂力学特性、优化工程设计与施工有重要的参考意义。

1 试验方案

本文通过开展三轴排水试验研究钙质砂静力条件下的强度-剪胀特性,讨论相对密实度和应力水平对钙质砂静力强度的影响。试验采用的钙质砂从珊瑚礁潟湖中获得,为无胶结、完全扰动的生物成因钙质砂,主要由珊瑚及其他生物碎屑组成,颗粒粒径不均匀,如图 1 所示。

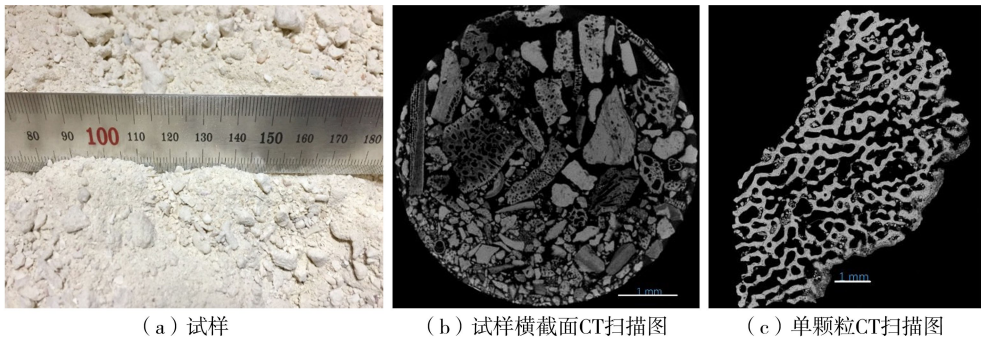


图 1 钙质砂试样

Fig. 1 Calcareous sand sample

从试样颗粒扫描结果(图 1(b))可见,钙质砂颗粒形状表现出显著的不规则性,试样中包含枝状、棒状、块状、片状等不同形状的颗粒,且含有完整的贝壳类生物成分;单颗粒扫描结果(图 1(c))显示,该颗粒可能来源于珊瑚碎屑沉积,表面粗糙多孔,并具有丰富的内孔隙结构,其中部分孔隙为连通结构,有的孔隙中还填充着细小颗粒。

三轴试验采用英国 GDS 生产的应力路径静三轴仪,由压力室、围压控制系统、反压控制系统、轴压控制系统、孔隙水压力测量系统、位移测量系统等部分组成。围压量程为 2 MPa、轴压量程为 3.5 MPa、轴向位移为 25 mm。试样高度为 100 mm,直径为 50 mm,最大粒径为 2 mm,排水和不排水试验的剪切速率分别为 0.2、0.4 mm/min^[20],试样的初始制样相对密实度 I_d 为 20%~75%、初始有效围压 σ'_3 为 50~800 kPa。

2 试验结果与分析

三轴排水试验中每个试样都可以观察到明显的剪切带,剪切带与水平向的夹角为 45° 左右,图 2 为初始相对密实度为 75%、有效围压为 400 kPa 的试样破坏时产生的剪切带。

2.1 应力-应变响应

试样固结后对密实度进行校正,发现固结前松散的试样在固结后密实度绝大多数在 40% 以上。图 3 和图 4 为中密($I_d = 41\%, 43\%$)和密实($I_d = 73\%, 74\%$)试样在较低、较高有效围压下剪切过程中的应力-应变关系和体应变-轴向应变关系,其中 q 为偏应力, ε_a 为轴向应变, ε_v 为体应变。

从图 3 可以看出,中密和密实试样在排水剪切过程中都表现出应变软化的性质,密实试样在轴向应变 6%~12% 时达到峰值强度,而中密试样需要 10%~15% 的轴向应变才能达到峰值强度。中密试样在达到临界状态时的残余强度与峰值强度相比衰退了 1/5 左右,而密实试样衰退了 1/3 左右。从图 4 可以看出,中密和密实试样受剪后首先表现为体积收缩,随后低应力水平下的密实试样表现为剪胀,中密试样和高应力水平下的密实试样表现出剪胀的趋势。由于轴向应变较大时(超过 15%)试样可能已经破坏,此时的体应变结果

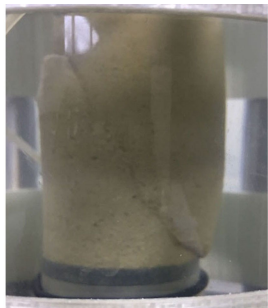


图 2 试样剪切带

Fig. 2 Sample shear zone

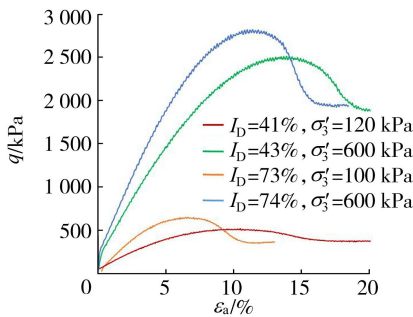


图 3 排水试验应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain relationship curves of drained tests

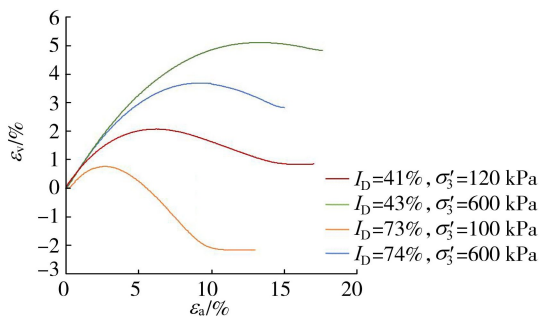


图 4 排水试验体应变-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Volumetric strain-axial strain relationship curves of drained tests

并不可靠,因此忽略图 4 体应变-轴向应变关系中不可靠的体应变部分,保留的部分仍能体现出剪胀的趋势。

对于密实试样,所受的有效围压越大,达到强度峰值所需的轴向应变越大,受到剪应力后体积收缩所需的轴向应变也越大。对于受到相同初始有效围压的试样,试样的相对密实度越高,试样达到强度峰值时所需的轴向应变越小,试样的剪胀性越强,达到临界状态时强度衰退的程度越高,应变软化的现象越明显。

2.2 内摩擦角与剪胀角

在排水条件下剪切,达到强度峰值时对应的内摩擦角为峰值内摩擦角。石英砂的强度-剪胀理论^[17]表明:峰值内摩擦角与相对密实度和应力水平有关,随相对密实度的增大而增大、随应力水平的增大而减小;剪切产生较大的变形后,石英砂会达到临界状态,此时砂土会继续变形,但体积和抗剪强度不再发生变化,此时对应的内摩擦角为临界内摩擦角,临界内摩擦角的取值主要取决于颗粒的矿物组成,除此之外还可能受级配、颗粒形状、平均有效正应力和切应力的影响。对于石英砂,临界内摩擦角的范围在 28°~33°之间^[17,21]。在达到临界状态之前,石英砂抵抗外力所需的内摩擦角由砂土的剪胀率控制,峰值内摩擦角与临界内摩擦角的差值可表示为剪胀角的倍数。对于不考虑破碎的未胶结钙质砂,本文尝试采用石英砂的强度-剪胀理论分析其在排水条件下内摩擦角与剪胀角的变化规律。

如图 5 所示,可通过偏应力 q 与平均有效正应力 p' 的应力路径获得钙质砂的峰值和临界内摩擦角:对于三轴排水试验的应力路径,将应力路径中偏应力的最高点与坐标轴原点连接,由连线的斜率推算峰值内摩擦角 φ'_p ;将临界状态时的偏应力与坐标轴原点连接,由斜率推算临界内摩擦角 φ'_{cv} 。针对三轴压缩试验的计算公式为:

$$M = \frac{6\sin\varphi'}{3 - \sin\varphi'} \tag{1}$$

式中: φ' 、 M 分别为所求的内摩擦角 (φ'_p 、 φ'_{cv}) 和对应的斜率 (M_p 、 M_{cv}),如图 5 所示。根据 Rowe^[22] 提出的应力剪胀理论,剪胀率主要取决于土的相对密实度、平均有效正应力以及压缩性,剪胀角 ψ 通过下式求得:

$$\sin\psi = -\frac{d\varepsilon_1/2d\varepsilon_3 + 1}{d\varepsilon_1/2d\varepsilon_3 - 1} \tag{2}$$

式中: ε_1 、 ε_3 分别为轴向和径向主应变。

普通石英砂的峰值内摩擦角由临界内摩擦角和剪胀角两部分组成,虽然钙质砂颗粒破碎的性质不同于普通石英砂^[15,23],但钙质砂的力学特性仍然与普通石英砂类似。因此对于不考虑破碎作用的钙质砂,认为其峰值内摩擦角同样由临界内摩擦角和剪胀角两部分组成。

三轴排水试验结果如表 1 所示,固结后相对密实度为 31%~83%、初始有效围压为 50~600 kPa 的钙质砂试样,临界内摩擦角 φ'_{cv} 在 36°~40°之间,与已有研究结果相差不大,如 Coop^[15] 发现澳大利亚 Dogs Bay 钙质砂的临界内摩擦角为 40°,且与应力水平无关;Jamolkowski 等^[17] 测得钙质砂的临界内摩擦在 36°~42°之间。

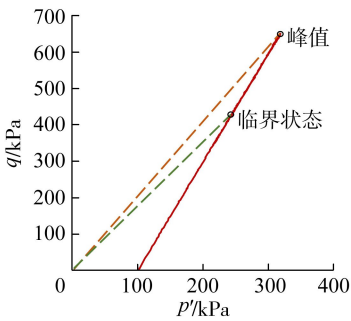


图 5 三轴排水试验内摩擦角求法

Fig. 5 Method for determining internal friction angle in drained triaxial test

图 6 给出了临界内摩擦角随相对密实度和应力水平的变化,临界内摩擦角受应力水平的影响较小,受相对密实度 I_D 的影响较大。当 $I_D < 50\%$ 时,临界内摩擦角随相对密实度的增大而增大,当 $I_D \geq 50\%$ 时,临界内摩擦角几乎不随相对密实度变化。因此根据相对密实度的大小可确定钙质砂的临界内摩擦角,当 $I_D < 50\%$ 时,临界内摩擦角由式(3)求得;当 $I_D \geq 50\%$ 时,建议取临界内摩擦角为 39° 。

$$\varphi'_{cv} = 15(I_D - 0.3) + 36 \quad (I_D < 50\%)$$

(3)

表 1 三轴排水试验测得的内摩擦角和剪胀角

Table 1 Internal friction angles and dilatancy angles measured in drained triaxial tests

试验编号	K_0	$I_D/\%$	p'_p/kPa	$\varphi'_p/(\circ)$	$\psi_p/(\circ)$	$\varphi'_{cv}/(\circ)$
1	0.38	31	382	43.7	3.4	38.5
2	1	37	767	44.2	4.3	36.4
3	1	40	129	44.9	8.9	38.7
4	1	40	496	43.8	5.0	37.3
5	1	41	293	43.1	5.0	37.2
6	1	43	213	45.3	8.9	37.5
7	1	45	1 431	42.5	1.2	37.7
8	1	46	141	46.6	11.8	38.2
9	1	48	382	44.4	5.7	37.9
10	1	51	1 003	43.9	3.6	38.7
11	1	53	274	46.2	7.8	39.2
12	1	54	510	44.4	6.0	39.5
13	1	55	230	47.6	10.6	39.4
14	1	57	757	44.0	4.0	39.1
15	0.38	61	626	46.2	6.7	39.1
16	0.50	67	217	51.1	14.9	38.0
17	1	67	225	46.9	10.9	39.2
18	1	68	578	47.9	10.6	38.2
19	1	70	579	47.4	9.0	38.8
20	1	70	1 077	45.9	6.4	38.8
21	1	71	535	48.3	9.4	39.8
22	1	72	803	45.7	5.7	38.1
23	1	73	318	49.8	11.8	40.1
24	1	74	1 539	44.6	6.0	38.3
25	1	76	272	51.1	14.5	38.9
26	1	80	430	47.7	10.9	39.8
27	0.50	80	1 088	47.6	8.9	38.8
28	1	83	1 149	47.5	8.2	38.4

注: K_0 为静止土压力系数; p'_p 为应力峰值处的平均有效正应力; ψ_p 为峰值剪胀角。

由表 1 可见,固结后密实度为 31%~83%、初始有效围压为 50~600 kPa 的钙质砂试样,试验测得的峰值内摩擦角 φ'_p 大致范围在 $42^\circ \sim 51^\circ$ 之间,剪胀角在 $1^\circ \sim 15^\circ$ 之间。由图 7 可见,与普通石英砂的特性相同,钙质砂的峰值内摩擦角同样受 I_D 和 p'_p 的影响,随 I_D 的增大而增大,随 p'_p 的增大而减小。由于钙质砂颗粒形状不规则、磨圆度低、多棱角,颗粒间具有很强的咬合作用,因此对于相对密实度较低并且受到较大平均有效正

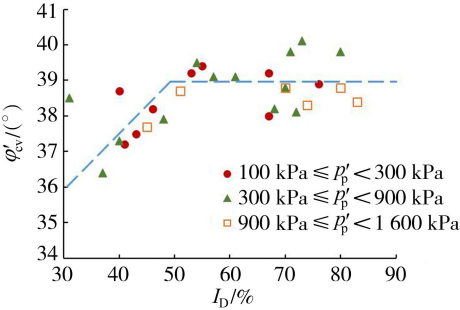


图 6 临界内摩擦角随相对密实度和应力水平的变化

Fig. 6 Variation of critical internal friction angle with relative density and stress level

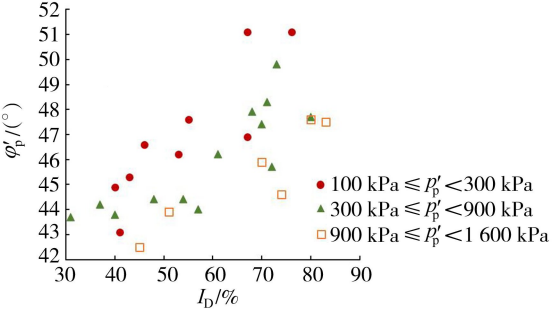


图 7 峰值内摩擦角随相对密实度和应力水平的变化

Fig. 7 Variation of peak internal friction angle with relative density and stress level

应力的试样,试样的剪胀角仍然为正值,钙质砂具有天然的剪胀性。

3 峰值内摩擦角和剪胀角预测的经验公式

与石英砂的性质类似,钙质砂的峰值内摩擦角与相对密实度和应力水平有关,随 I_D 的增大而增大,随 p'_p 的增大而减小。Bolton^[21]根据石英砂的三轴排水试验数据,总结出一套经验公式,将土的 I_D 、 p'_p 以及土粒的粒径分布、矿物成分和颗粒形状考虑在内,定量估算石英砂峰值内摩擦角和剪胀角。将表 1 数据代入石英砂的经验公式中发现,石英砂的经验公式并不适用于钙质砂。因此,本文对石英砂经验公式中的参数进行修正,提出定量估算钙质砂峰值内摩擦角和剪胀角的经验公式。

3.1 经验公式的拟合

对于不考虑破碎的钙质砂,认为其峰值内摩擦角由临界内摩擦角和剪胀角组成。公式中钙质砂的临界内摩擦角按图 6 拟合曲线(式(3))取值。因此在经验公式的拟合中,每个数据不再使用测得的临界内摩擦角,而是根据相对密实度确定临界内摩擦角的经验取值。

Bolton^[21]将相对密实度和应力水平考虑在内,提出了相对剪胀度(I_R)的概念:

$$I_R = I_D(Q - \ln p'_p) - R \tag{4}$$

式中: Q 为一个与土颗粒的矿物组成以及颗粒形状有关的参数; R 为与数据拟合有关的参数。当 $p'_p = p'_{crit}$ (p'_{crit} 为临界状态时的平均有效正应力)时不再发生剪胀,即 $I_R = 0$,因此 p'_{crit} 可以用下式表示:

$$\ln p'_{crit} = Q - R/I_D \tag{5}$$

式(5)能够确保在试样达到临界状态的条件保证剪胀度为零。通过总结大量的试验数据,Bolton^[21]确定了石英砂强度参数 Q 、 R 的经验取值,此公式为砂土剪胀性有关的行为提供了一套定量分析框架。Bolton^[21]给出了不同类型颗粒 Q 的建议取值,对于石英砂 Q 取值为 10,对于石灰石取值为 8。Jamiolkowski 等^[17]发现 Q 可以表示为土颗粒屈服应力的函数,与土颗粒的临界破碎应力或者极限围压水平相关。通过拟合表 1 的试验数据,确定钙质砂 Q 的取值为 8。

通过三轴排水试验数据(表 1)可以发现,对于一定相对密实度和初始有效围压的试样,钙质砂达到临界状态时的平均有效正应力普遍高于石英砂,为了保证经验公式成立,钙质砂参数 R 的取值应小于石英砂,经过拟合数据,钙质砂 R 取-0.8,因此得到经验公式(6)。通过比较表 1 中 $\varphi'_p - \varphi'_{cv}$ (其中 φ'_{cv} 根据试样的相对密实度取建议值)与相对剪胀度 I_R ,拟合得到经验公式(7)。

$$I_R = I_D(8 - \ln p'_p) + 0.8 \tag{6}$$

$$\varphi'_p - \varphi'_{cv} = 4I_R \tag{7}$$

同时,将每个试验的 $\varphi'_p - \varphi'_{cv}$ 与测得的剪胀角比较,拟合得到:

$$\varphi'_p - \varphi'_{cv} = 0.6\psi_p + 3 \tag{8}$$

3.2 经验公式的精度

为了更直观地评价公式的拟合效果,将包含等向固结和 K_0 固结两种固结方式的 28 个三轴排水试验数据代入经验公式(6)(7)(8),得到内摩擦角和剪胀角的预测值,与实测值对比如图 8、9 所示。由图 8、9 可以明显看出,式(7)对峰值内摩擦角的预测精度较高,所有数据都落在 5% 的误差范围内;而式(8)对剪胀角的预测精度相对较低,但 89% 的预测值也落在 25% 的误差范围内。剪胀角预测误差较大的预测值均高于实测值,在这些试验中,两个试样的 I_D 小于 40%,一个试样受到的 p'_p 大于 1 400 kPa, I_D 过小或受到的 p'_p 过高都可能抑制试样的剪胀,因此可以解释剪胀角预测值与实测值的偏离。总体来说,给出的经验公式可以较准确地预测钙质砂峰值内摩擦角和剪胀角。

3.3 经验公式的适用性分析

Bolton^[21]提出的经验公式适用于 $p'_p < 1\,000$ kPa 的试样,这是由于其经验公式中采用固结后的相对密实度代替应力峰值处的相对密实度。而当试样受到的 p'_p 过高时,试样在应力峰值处可能会发生很大的应变,因此用固结后的相对密实度得到的预测结果的可靠性较低。

式(6)(7)(8)适用于固结后 I_D 范围在 31%~83%之间、 p'_p 范围在 100~1 600 kPa 之间的试样。本文对每个试样应力峰值处的相对密实度进行校正,并将应力峰值处的相对密实度代入经验公式,结果发现,当试

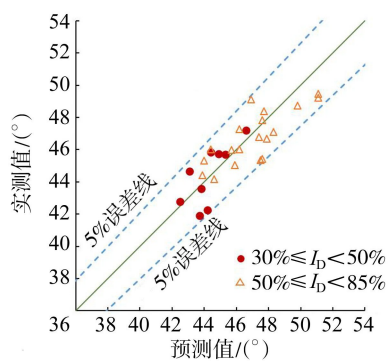


图 8 峰值内摩擦角预测值与实测值的对比

Fig. 8 Comparison between predicted and measured values of peak internal friction angle

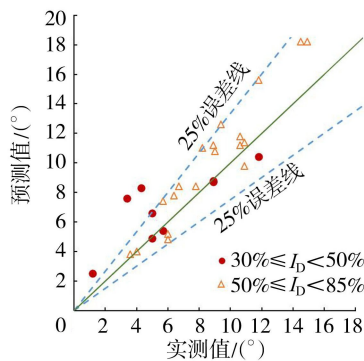


图 9 剪胀角预测值与实测值的对比

Fig. 9 Comparison between predicted and measured values of dilatancy angle

样受到较大的 p_p' 时, 固结完成后初始状态、剪切达到应力峰值状态这两种情况下的相对密实度对预测的峰值内摩擦角影响不大, 相差大多不超过 1° , 这综合表明本文拟合得到的经验公式参数适用区间划分合理, 公式整体适用性较好。

4 结 语

本文通过开展三轴排水试验分析了南海岛礁未胶结钙质砂的强度-剪胀特性, 提出了预测排水条件下未胶结钙质砂峰值内摩擦角和剪胀角的经验公式, 并对公式的可靠性进行了验证, 可实现紧急情况下对钙质砂地基材料抗剪强度指标的快速估算, 可为工程设计提供参考依据, 同时对于深入了解钙质砂力学特性、优化工程设计与施工等方面都具有重要意义。由于三轴仪尺寸的限制, 本文提出的钙质砂峰值内摩擦角的经验公式都是基于 2 mm 以下粒径试样的试验数据得到的, 而在大部分回填场地和自然状态下, 钙质砂的粒径和级配都无法控制, 因此在后续的工作中需要进一步探究提出的经验公式在现场的适用性。

参考文献:

[1] 唐国艺,郑建国. 东南亚礁灰岩的工程特性[J]. 工程勘察, 2015, 43(6): 6-10. (Tang Guoyi, Zheng Jianguo. Engineering properties of reef calcareous rock in Southeast Asia[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(6): 6-10. (in Chinese))

[2] 秦建军,万仁凯,刘健,等. 援马尔代夫马累-机场岛跨海大桥桥址区边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 241-243. (Qin Jianjun, Wan Renkai, Liu Jian, et al. Analysis of slope stability in the bridge site area of the Male-Airport Island cross-sea bridge in the maldives[J]. Highway Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2016, 12(5): 241-243. (in Chinese))

[3] 刘志伟,杨生彬,程东幸,等. 沙特拉比格 2×660 MW 燃油电站珊瑚礁地基工程勘察与实践[J]. 土工基础, 2017, 31(5): 588-590. (Liu Zhiwei, Yang Shengbin, Cheng Dongxing, et al. Geotechnical investigation of a 2×660 MW power plant on coral reef sands in Saudi Arabia[J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31(5): 588-590. (in Chinese))

[4] 余东华,黄俊文,贺迎喜. 强夯联合振动碾压加固珊瑚礁回填料地基[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(2): 283-285. (Yu Donghua, Huang Junwen, He Yingxi. Reinforcement of coral reef backfill foundation by dynamic compaction combined with vibratory rolling[J]. China Water Transport, 2015, 15(2): 283-285. (in Chinese))

[5] 刘崇权,汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998(1): 32-37. (Liu Chongquan, Wang Ren. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998(1): 32-37. (in Chinese))

[6] 朱长歧,陈海洋,孟庆山,等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014(7): 1831-1836. (Zhu Changqi, Chen Haiyang, Meng Qingshan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(7): 1831-1836. (in Chinese))

[7] 王丽,鲁晓兵,王淑云,等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2): 133-143. (Wang Li, Lu Xiaobing, Wang Shuyun, et al. Experimental investigation on cementation of calcareous sand and its basic mechanical characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(2): 133-143. (in Chinese))

[8] 李钊,陈远中,廖洁,等. 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 41-

45. (Li Fan, Chen Yuanzhong, Liao Jie, et al. Experimental study on the effect of particle shape on ultimate particle size distribution of carbonate sands[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) ,2023,51(4) :41-45. (in Chinese))

[9] 汪稔,吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究:从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报,2019,27(1) :202-207. (Wang Ren, Wu Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs:engaged in coral reef research for 30 year[J]. Journal of Engineering Geology ,2019,27(1) :202-207. (in Chinese))

[10] Pei Huimin, Wang Dong. Shear strength and dilatancy of calcareous sand in the south china sea[J]. China Ocean Engineering, 2022,36(5) :781-790.

[11] 孙卓艺,张龙文,张俊麒,等. 废弃口罩改良钙质砂力学性能试验研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6) :107-113. (Sun Zhuoyi,Zhang Longwen,Zhang Junqi, et al. Experimental study on mechanical properties of improved calcareous sand mixed with waste mask[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6) :107-113. (in Chinese))

[12] 叶剑红,曹梦,李刚. 中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(6) :1242-1251. (Ye Jianhong,Cao Meng, Li Gang. Preliminary study on the creep characteristics of calcareous sand from reclaimed coral reef islands in South China Sea[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(6) :1242-1251. (in Chinese))

[13] 叶剑红,何坤鹏,单继鹏. 中国南海岛礁护岸防波堤在波浪冲击作用下稳定性试验研究[J]. 爆破,2019,36(4) :13-23. (Ye Jianhong,He Kumpeng,Shan Jipeng. Experimental study on stability of revetment breakwater built on reclaimed coral reef islands in south china sea under extreme wave impact[J]. Blasting,2019,36(4) :13-23. (in Chinese))

[14] 孙卓艺,张龙文,张俊麒,等. 废弃口罩改良钙质砂力学性能试验研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6) :107-113. (Sun Zhuoyi,Zhang Longwen,Zhang Junqi, et al. Experimental study on mechanical properties of improved calcareous sand mixed with waste mask[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6) :107-113. (in Chinese))

[15] Coop M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Geotechnique,1990,40(4) :607-626.

[16] Porcino D,Caridi G,Ghionna V N. Undrained monotonic and cyclic simple shear behaviour of carbonate sand[J]. Geotechnique, 2008,58(8) :635-644.

[17] Jamiolkowski M,Presti D C F L,Manassero M. Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT[J]. Geotechnical Special Publication,2003,119:201-238.

[18] 崔永圣. 珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J]. 工程勘察,2014,42(9) :40-44. (Cui Yongsheng. Study on geotechnical characteristics of coral reef[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2014,42(9) :40-44. (in Chinese))

[19] 余殷鹏,吕亚茹,李峰,等. 珊瑚砂剪切特性试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2017,18(1) :29-35. (She Yinpeng,Liu Yaru,Li Feng, et al. Experimental analyses of shearing mechanism of coral sand[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition) ,2017,18(1) :29-35. (in Chinese))

[20] Shahnazari H, Rezvani R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study [J]. Engineering Geology,2013,159(9) :98-105.

[21] Bolton M D. The strength and dilatancy of sands[J]. Geotechnique,1986,37(2) :219-226.

[22] Rowe P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proceedings of the Royal Society A,1962,269(1339) :500-527.

[23] 李钊,陈远中,廖洁,等. 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4) :41-45. (Li Fan, Chen Yuanzhong, Liao Jie, et al. Experimental study on the effect of particle shape on ultimate particle size distribution of carbonate sands[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) ,2023,51(4) :41-45. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 04 - 15 编辑:熊水斌)