

# 软土抗剪强度指标随固结度变化规律分析

汪洪星<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 陈 锋<sup>1</sup>, 冒海军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 常规的抗剪强度指标黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  无法准确描述堆载作用下任意固结度时软土的力学特性, 而现有的考虑软土抗剪强度值随固结度增长的极限平衡法无法得出应力场、位移场等实际工程需要的数据, 因此, 基于理论推导和室内试验, 对堆载作用下软土抗剪强度指标随固结度的变化规律进行了分析。对现有的 2 个计算公式进行了对比分析, 得出它们具有等价性。从孔隙水压力的角度进行分析, 提出了新的计算公式, 并且得出内摩擦角随固结度单调递增, 黏聚力随固结度单调递减的变化规律。当固结度一定且不为 100% 时, 黏聚力与初始固结压力呈线性增长的关系, 内摩擦角与其无关。室内试验表明, 由于综合考虑了有效应力参数和总应力参数, 新推导公式与试验结果吻合得更好, 证明了新推导公式正确性和优越性。

**关 键 词:** 抗剪强度指标; 固结度; 孔隙水压力; 变化规律

中图分类号: TU443 文献标识码: A

## Analysis of changing rule of shear strength indexes of soft soil with consolidation degree

WANG Hong-xing<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, MAO Hai-jun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071,

China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The analysis of changing rule of shear strength indexes of soft soil with consolidation degree under the effect of surcharge load is executed based on the theoretical derivation and indoor tests; since the conventional shear strength indexes cohesion value and internal friction angle cannot represent the mechanical character of the soft soil at any consolidation degree at the effect of the surcharge load accurately, and the existed limit equilibrium method considering the increasing of the shear strength value with the consolidation degree cannot get the data such as stress field, displacement field that are needed by the practical engineering. The comparison analysis has been done for two existed formulae, and deduced that they have equivalence property. From the viewpoint of pore water pressure, a new formula is presented; and from which we get: the internal friction angle at any consolidation degree increases with the consolidation degree monotonously; and the cohesion value decreases with the consolidation degree monotonously; when the consolidation degree is fixed and is not 100%, the cohesion value presents the linear increasing relationship with the initial consolidation pressure; but the value of the internal friction angle is not related to it. The indoor test shows that, the newly deduced formula results fit better with the test results than the existed formulae results; since the total stress parameters and the effective stress parameters have been considered comprehensively, so as to prove the validity and advantage of the newly deduced formula.

**Key words:** shear strength indexes; consolidation degree; pore water pressure; changing rule

## 1 引 言

针对堆载作用下软弱土层的强度增长问题, 以往的研究主要侧重于分析附加荷载作用下软土抗剪强度值  $\tau$  随固结度的变化规律<sup>[1-4]</sup>及其在极限平衡

法中的应用, 但只能分析实际工程的稳定性, 对其应力场和位移场等工程中需要的变量却无法分析。如果将根据三轴试验得到的软土抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角代入摩尔-库仑公式, 应用有限元等数值计算方法可以得到工程需要的应力场、位移场和

收稿日期: 2013-10-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助 (No.2010CB226701)。

第一作者简介: 汪洪星, 男, 1983 年生, 博士研究生, 从事尾矿坝及散体材料的稳定性研究工作。E-mail: 30335328@qq.com

稳定性等结果。但是，由于堆载工程的特殊性，计算的过程中抗剪强度指标的选取问题需要注意。

使用不固结不排水（三轴 UU 剪切试验）强度指标时，堆载过程中的土体由于前期堆载的作用已产生了一定的固结，强度得到了增长，计算结果比实际工程偏于不安全。使用固结排水（三轴 CD 剪切试验）的有效应力指标并结合孔隙水压力对实际工程进行分析时，由于实际工程土体在破坏时往往是突然产生的，这个过程中来不及排水，取固结排水的有效应力指标对工程进行分析也不符合实际。使用固结不排水（三轴 CU 剪切试验）总应力强度指标黏聚力和内摩擦角对实际工程进行分析时，软土没有完全固结的情况下其强度没有达到充分的增长，导致计算的结果比实际工程偏于安全，不能真实地反映工程安全状况<sup>[5-6]</sup>。因此，如果能够得到不同的固结度时对应的不排水抗剪强度指标，对于实际工程分析时的应力场、位移场和稳定性的计算将是非常有用的。

在已有研究成果<sup>[7-9]</sup>基础上，本文对软土任意固结不排水剪总应力强度指标  $c$  和  $\varphi$  随固结度的变化规律进行了分析，同时分析了现有的 2 个计算任意固结度时抗剪强度指标的公式，提出了一个新的计算公式，通过室内试验，验证了新推导公式的计算结果与试验结果的一致性，以及新推导公式相对于现有公式的优越性。

## 2 现有计算公式分析

对于抗剪强度指标随固结度的变化规律，秦植海<sup>[10]</sup>和杨嵘昌<sup>[11]</sup>分别对其进行了分析，并且提出了相应的计算公式。

### 2.1 现有公式

对于抗剪强度指标随固结度的变化规律，秦植海<sup>[10]</sup>提出的相应的计算公式为式（1）、（2），计算简图见图 1。

$$\varphi_i = 2 \arctan \left( \sqrt{\sigma_{12i} - \sigma_{11}} \right) - 90^\circ \quad (1)$$

$$c_i = \frac{[\sigma_{11} \Delta \sigma_3 - (\sigma_{12i} - \sigma_{11}) \sigma_c] / \sqrt{\frac{\sigma_{12i} - \sigma_{11}}{\Delta \sigma_3}}}{2 \Delta \sigma_3} \quad (2)$$

式中： $\varphi_i$  为任意固结度对应的内摩擦角； $c_i$  为任意固结度对应的黏聚力； $\varphi'_{cu}$  为固结不排水剪有效内摩擦角； $c'_{cu}$  为为固结不排水剪有效黏聚力； $\sigma_{11}$  为在初始固结压力  $\sigma_c$  作用下没有附加荷载作用时的垂向破坏应力； $\sigma_{12i}$  为在  $\sigma_c + \Delta \sigma_c$  作用下任一固结度  $U_i$  时的垂向破坏应力，且有

$$\sigma_{11} = \sigma_c + 2c_u \quad (3)$$

$$\sigma_{12i} = \frac{2[\sigma_c(1 + A_f) + \Delta \sigma_c(U_i + A_f)] \tan \varphi'_{cu} + 2A_f \tan \varphi'_{cu} + \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'_{cu}}{2} \right) (\sigma_c + \Delta \sigma_c) \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'_{cu}}{2} \right) + 2c'_{cu}}{2A_f \tan \varphi'_{cu} + \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'_{cu}}{2} \right)} \quad (4)$$

式中： $A_f$  为孔隙水压力系数。

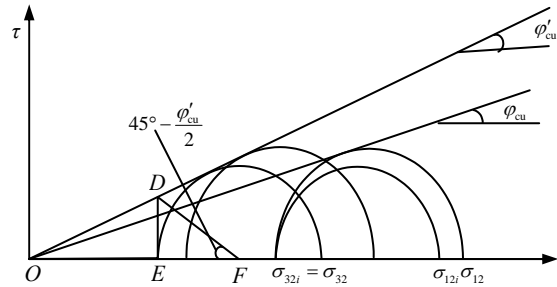


图 1 秦植海公式计算简图

Fig.1 Calculation diagram of QIN Zhi-hai formula

杨嵘昌<sup>[11]</sup>根据图 2，从应力路径的角度对抗剪强度指标随固结度的变化规律进行了分析，计算公式为式（5）、（6）或式（7）、（8）。

$$\sin \varphi_i = \frac{U_i \sin \varphi_{cu}}{1 - (1 - U_i) \sin \varphi_{cu}} \quad (5)$$

$$c_i = \frac{c_{cu} \cos \varphi_{cu} + (1 - U_i) \sin \varphi_{cu} \sigma_c}{1 - (1 - U_i) \sin \varphi_{cu} \cos \varphi_i} \quad (6)$$

或者

$$\sin \varphi_i = \frac{U_i \sin \varphi'}{1 - (1 - 2A_f - U_i) \sin \varphi'} \quad (7)$$

$$c_i = \frac{c' \cos \varphi' + (1 - U_i) \sin \varphi' \sigma_c}{1 - (1 - 2A_f - U_i) \sin \varphi' \cos \varphi_i} \quad (8)$$

计算简图如图 2 所示。

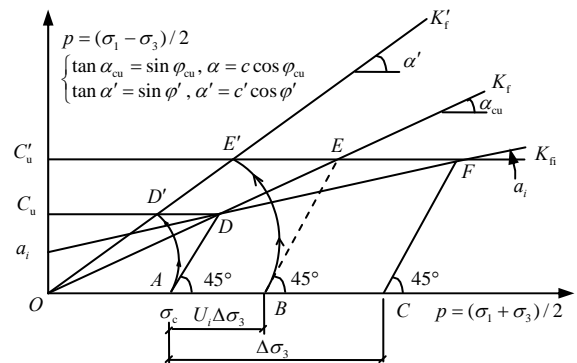


图 2 杨嵘昌公式计算简图

Fig.2 Calculation diagram of YANG Chang-rong formula

从式(1)~(8)可以看出,秦植海公式计算抗剪强度指标通过破坏时的大小主应力表示,且主应力的计算也很复杂,无法直观地描述固结度对于抗剪强度指标的影响;杨嵘昌公式虽然表达方式比较简单,但由于固结度 $U_i$ 同时在分子和分母中出现,也不能直观地描述抗剪强度指标随固结度的变化规律。

### 2.2 现有公式等价性验证

魏丽敏等<sup>[12]</sup>对上述2个公式进行了分析,并且在假设固结排水和固结不排水的黏聚力 $c$ 为0的特殊情况下,提出了2个公式的内摩擦角的计算的等价性。本文针对一般情况下上述2个公式表示的内摩擦角和黏聚力的表达式的等价性进行分析。

对于秦植海公式,由文献[13]可得

$$\frac{c_u}{\sigma_c} = \frac{\sin \varphi' + c' \cos \varphi' / \sigma_c}{1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi'} \quad (9)$$

式中: $c_u$ 为不固结不排水抗剪强度。

将式(9)代入式(3)~(4),可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_c + 2c_u = \sigma_c + \frac{2\sigma_c \sin \varphi' + 2c' \cos \varphi'}{1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi'} \\ \sigma_{12i} - \sigma_{11} &= \frac{1 - (1 - 2A_r - 2U_i) \sin \varphi'}{1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi'} \Delta \sigma_c \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(10)代入式(1)、(2),可得

$$\varphi_i = 2 \arctan \sqrt{\frac{1 - (1 - 2A_r - 2U_i) \sin \varphi'}{1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi'}} - 90^\circ \quad (11)$$

$$c_i = \frac{\sigma_c (1 - U_i) \sin \varphi' + c' \cos \varphi'}{\sqrt{(1 - (1 - 2A_r - 2U_i) \sin \varphi')(1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi')}} \quad (12)$$

对于杨嵘昌公式,由式(7)可直接得到

$$\tan \left( 45^\circ + \frac{\varphi_i}{2} \right) = \frac{1 + \sin \varphi_i}{\cos \varphi_i} = \frac{1 + \sin \varphi_i}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_i}} = \quad (13)$$

$$\sqrt{\frac{1 - (1 - 2A_r - 2U_i) \sin \varphi'}{1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi'}} \quad (14)$$

$$\varphi_i = 2 \arctan \sqrt{\frac{1 - (1 - 2A_r - 2U_i) \sin \varphi'}{1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi'}} - 90^\circ$$

将式(14)代入式(8),可得

$$c_i = \frac{\sigma_c (1 - U_i) \sin \varphi' + c' \cos \varphi'}{\sqrt{(1 - (1 - 2A_r - 2U_i) \sin \varphi')(1 - (1 - 2A_r) \sin \varphi')}} \quad (15)$$

从而证明2个公式具有完全的等价性。从式中可以看出,内摩擦角随固结度的增长而增长,但黏聚力随固结度的变化规律无法直观地从公式中看出。式(9)~(15)中, $\sigma_c$ 为自然状态固结时的围压; $c'$ 、 $\varphi'$ 分别为不排水剪切得到的有效应力指标黏聚力

和内摩擦角; $U_i$ 为任意固结度; $\Delta \sigma_c$ 为加载固结的围压增量; $c_i$ 、 $\varphi_i$ 为通过不完全固结得到的不排水抗剪强度总应力指标黏聚力和内摩擦角,其他符号意义同前。

本文从任意固结度 $U_i$ 时的孔隙水压力的角度,对抗剪强度指标随固结度的变化规律进行了分析,提出新的计算公式。

为分析方便,将上述等价的公式,即式(11)、(12)、(14)、(15)称为关于抗剪强度指标随固结度变化规律的现有公式,简称现有公式,将新推导的公式称为关于抗剪强度指标随固结度变化规律的新推导公式,简称新推导公式。

## 3 基于孔压的新公式推导

### 3.1 抗剪强度指标与破坏孔压的关系

堆载作用之前,软弱土层有1个初始固结压力 $\sigma_c$ ,若在这个压力下进行三轴固结不排水剪试验,则可得图3中应力圆1。随着附加荷载 $\Delta \sigma_c$ 的施加,软弱土层的固结压力发生了变化,变为 $\sigma_c + \Delta \sigma_c$ 。在这个压力下进行不排水剪切试验,当固结度为100%时,可得图3应力圆3;当固结度为任意固结度 $U_i$  ( $U_i < 100%$ )时,可得应力圆2。其中,应力圆1、3所绘制的强度包络线为固结不排水剪的强度包络线。圆1、2所绘制的强度包络线为任意固结度 $U_i$ 时的不排水剪抗剪强度包络线。

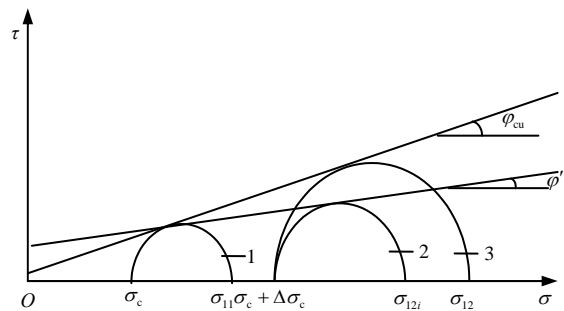


图3 固结度对抗剪强度指标的影响  
Fig.3 Effect of consolidation degree to the shear strength indexes

任意固结度时的孔隙水压力、总应力的有效应力、有效应力的有效应力、总应力抗剪强度指标及有效应力抗剪强度指标等参数见表1、2。表1为固结度为100%时的各项参数,表2为任意固结度 $U_i$ 时的各项参数。表中, $\sigma_{12}$ 为加载完全固结时的竖直破坏压力峰值; $u_{11}$ 、 $u_{12}$ 分别为自然状态固结作用下和加载完全固结作用下竖直加载破坏时的孔隙水压力; $c_{cu}$ 、 $\varphi_{cu}$ 为通过完全固结得到的不排

水抗剪强度总应力指标黏聚力和內摩擦角； $c'$ 、 $\varphi'$  不受加载固结完成程度的影响，是一个定值； $u_{12i}$  为加载不固结作用下竖直加载破坏时的孔壓水压力， $u_{12i} = u_{12i}^* + u_{12i}^0$ ， $u_{12i}^*$  为由于不排水剪切引起的超孔壓， $u_{12i}^0$  为固结阶段由于固结没有完成而残留的超孔壓， $u_{12i}^0 = (1-U_i)\Delta\sigma_c$ ，其他符号意义同前。

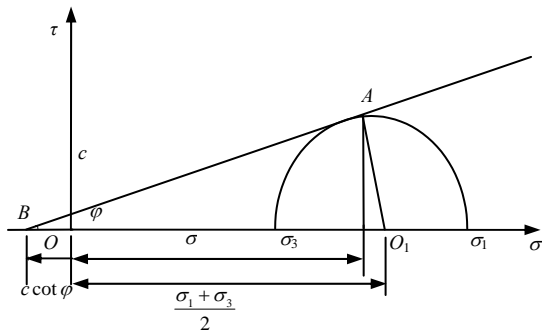
**表 1 固结度为 100%时的各项参数**  
**Table 1 Parameters when consolidation degree is 100%**

参数	自然状态固结	加载完全固结
小主应力	$\sigma_c$	$\sigma_c + \Delta\sigma_c$
大主应力	$\sigma_{11}$	$\sigma_{12}$
总应力		
黏聚力		$c_{cu}$
內摩擦角		$\varphi_{cu}$
孔壓水压力	$u_{11}$	$u_{12}$
有效小主应力	$\sigma_c - u_{11}$	$\sigma_c + \Delta\sigma_c - u_{12}$
有效应力		
有效大主应力	$\sigma_{11} - u_{11}$	$\sigma_{12} - u_{12}$
有效黏聚力		$c'$
有效內摩擦角		$\varphi'$

**表 2 固结度为  $U_i$  时的各项参数**  
**Table 2 Parameters when consolidation degree is  $U_i$**

参数	自然状态固结	加载不完全固结
小主应力	$\sigma_c$	$\sigma_c + \Delta\sigma_c$
大主应力	$\sigma_{11}$	$\sigma_{12i}$
总应力		
黏聚力		$c_i$
內摩擦角		$\varphi_i$
孔壓水压力	$u_{11}$	$u_{12i}$
有效小主应力	$\sigma_c - u_{11}$	$\sigma_c + \Delta\sigma_c - u_{12i}$
有效应力		
有效大主应力	$\sigma_{11} - u_{11}$	$\sigma_{12i} - u_{12i}$
有效黏聚力		$c'$
有效內摩擦角		$\varphi'$

在三轴试验中，对于任意由应力圆绘制的抗剪强度包络线，无论是固结不排水剪切、固结排水剪切，或者任意固结度的固结不排水剪，其总应力的或者有效应力的大主应力、小主应力、黏聚力和內摩擦角的关系见式 (16)，如图 4 所示<sup>[14]</sup>。



**图 4 三轴试验的大小主应力关系图**  
**Fig.4 Relationship of maximum and minimum principal stresses in triaxial test**

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (16)$$

对应于表 1、2 中的 4 种情况的大主应力、小主应力、黏聚力、內摩擦角，都应满足式 (16)。将表 1、2 中的 4 种情况的大主应力、小主应力、黏聚力、內摩擦角代入式 (16) 计算，则可得式 (17)、(18)。

$$\sigma_c \left( \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) - \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) \right) + 2c_i \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) - 2c_{cu} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) = 0 \quad (17)$$

$$(\sigma_c + \Delta\sigma_c) \left[ \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) - \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) \right] + 2c_i \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) - 2c_{cu} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) = 0 \quad (18)$$

$$(u_{12i} - u_{12}) \left[ 1 - \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \right]$$

式 (18) 减去式 (17)，可得

$$(\Delta\sigma_c) \left[ \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) - \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) \right] = (u_{12i} - u_{12}) \left[ 1 - \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \right] \quad (19)$$

假设  $\sigma_c + \Delta\sigma_c = m\sigma_c$ ，式 (18) 减去式 (17) 的  $m$  倍，可得

$$\left[ 2c_i \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) - 2c_{cu} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) \right] = (u_{12i} - u_{12}) \left[ 1 - \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \right] / (1 - m) \quad (20)$$

从以上推导可知，不同的固结度下的黏聚力和內摩擦角的变化受破坏时的孔壓水压力的控制。

### 3.2 抗剪强度指标与固结度的关系

孔壓水压力可由式 (21) 来计算<sup>[11]</sup>。

$$u = B\Delta\sigma_3 + A_f(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (21)$$

式中： $A_f$ 、 $B$  为孔壓水压力系数； $\Delta\sigma_3$ 、 $\Delta\sigma_1$  分别为围压和垂向压力的变化量。

本文的推导中，取  $B = 1$ ， $\Delta\sigma_3 = 0$ ，从而可得

$$u = A_f \Delta\sigma_1 = 2A_f c_u \quad (22)$$

由式 (9) 可以得到任意围压作用下任意固结度时的抗剪强度  $c_u$ ，可表示为

$$c_u = \frac{\sin \varphi' (\sigma_c + U_i \Delta\sigma_c) + c' \cos \varphi'}{1 - (1 - 2A_f) \sin \varphi'} \quad (23)$$

$c_u$  为在任意围压作用下任意固结度时试样破坏时的最大剪应力，也就是试样  $45^\circ$ 破坏面上的抗剪强度，抗剪强度与固结度呈正比的关系，随着固结度的增长而增长。

由式 (22)、(23) 可得

$$u_{12i} - u_{12} = u_{12i}^* + u_{12i}^0 - u_{12} = 2A_f \frac{\sin \varphi' (\sigma_c + U_i \Delta \sigma_c) + c' \cos \varphi'}{1 - (1 - 2A_f) \sin \varphi'} + (1 - U_i) \Delta \sigma_c - 2A_f \frac{\sin \varphi' (\sigma_c + \Delta \sigma_c) + c' \cos \varphi'}{1 - (1 - 2A_f) \sin \varphi'} = \frac{(1 - U_i)(1 - \sin \varphi')}{1 + (2A_f - 1) \sin \varphi'} \Delta \sigma_c \quad (24)$$

将式(24)表示的孔隙水压力的差值代入式(19)、(20) 即可得到新公式内摩擦角和黏聚力的解:

$$\varphi_i = 2 \arctan \sqrt{K'(U_i - 1) + K_{cu}} - 90^\circ \quad (25)$$

$$c_i = \frac{K'(1 - U_i) \sigma_c + \sqrt{K_{cu}} 2c_{cu}}{2\sqrt{K'(U_i - 1) + K_{cu}}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{K_{cu} \sigma_c + \sqrt{K_{cu}} 2c_{cu}}{2\sqrt{K'(U_i - 1) + K_{cu}}} - \sqrt{K'(U_i - 1) \sigma_c} \right] \quad (26)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} K' &= \frac{1 - \sin \varphi'}{1 - (1 - 2A_f) \sin \varphi'} \left[ \tan^2 (45^\circ + \varphi' / 2) - 1 \right] \\ K_{cu} &= \tan^2 (45^\circ + \varphi_{cu} / 2) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

常量  $K_{cu}$ 、 $K'$  分别为 2 个与总应力指标和有效应力指标有关的变量，与固结度无关，且都大于 0。

式 (25)、(26) 中，内摩擦角随固结度的增大而单调增大；黏聚力随着固结度的增大而单调减小。当固结度一定时，内摩擦的值与初始固结压力  $\sigma_c$  没有关系；当固结度一定且不为 100% 时，黏聚力则与初始固结压力  $\sigma_c$  呈线性增长的关系。

### 4 抗剪强度指标随固结度变化规律试验验证

试验土样取自江西城门山铜矿二期扩建工程污水调节库 1# 拦污坝处，试样的物理参数见表 3。

表 3 土样物理参数  
Table 3 Soil sample physical parameters

含水率 / %	密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	土粒相 对密度	饱和度 / %	孔隙比	液限 / %	塑限 / %
45.5	1.87	2.65	99	1.251	42.7	17.9

土体的固结过程是孔隙水压力消散和有效应力增长的过程，在试验的过程中，可以通过控制孔

压的方式来控制固结度，取初始固结压力  $\sigma_c = 60$  kPa，后期固结压力  $\sigma_c + \Delta \sigma_c$  分别为 100、200、300 kPa，每一个围压作用下的固结度  $U_i$  分别取为 0、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%，达到一定的固结度之后进行不排水剪切试验。

根据试验结果得到了每一级围压作用下抗剪强度  $c_u$  随固结度  $u_i$  变化的关系曲线以及破坏孔压差 ( $u_{12i} - u_{12}$ ) 随固结度变化的关系曲线，如图 5、6 所示。从图 5 中可以看出，随着固结度的增长，抗剪强度增大并且呈较好的线性关系，并且随着总围压的增长而增长，与式 (23) 所示的关系吻合。从图 6 中可以看出，随着固结度的增长，破坏孔压差减小，且呈较好的线性关系，并且随着总围压的增长而增长，与式 (24) 所表示的关系吻合。

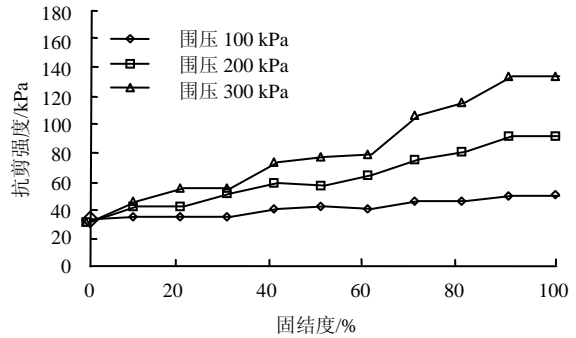


图 5 抗剪强度与固结度的关系  
Fig.5 Relationships between shear strength and consolidation degree

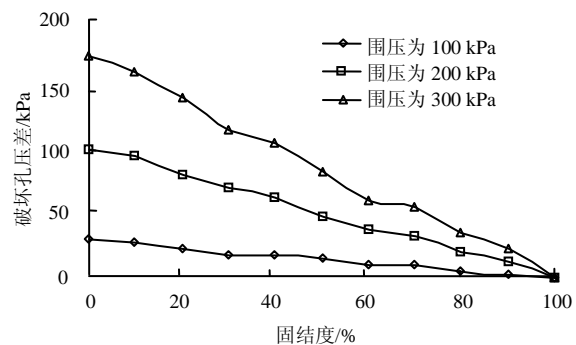


图 6 破坏孔压差与固结度的关系图  
Fig.6 Relationships between destroyed pore pressure and consolidation degree

由试验结果可知，土样的有效内摩擦角  $\varphi' = 15.8^\circ$ ，有效黏聚力  $c' = 3.8$  kPa，总应力内摩擦角  $\varphi_{cu} = 12.6^\circ$ ，总应力黏聚力  $c_{cu} = 4.5$  kPa，孔隙水压力系数  $A_f = 5.7$ 。将  $\varphi'$ 、 $c'$ 、 $A_f$  代入式 (14)、(15)，可得现有公式表示的抗剪强度指标的值，将  $\varphi'$ 、 $A_f$ 、

$\varphi_{cu}$ 、 $c_{cu}$  代入式 (25) ~ (26), 可得新推导公式表示的抗剪强度指标的值。将新推导公式计算的抗剪强度指标的计算结果与现有公式的计算结果及试验结果进行对比分析, 结果如图 7、8 所示。对比分析两个图可以看出, 对于内摩擦角和黏聚力的值, 新推导公式的计算结果与试验结果吻合得很好, 而现有公式的计算结果整体偏小。究其原因, 因为现有公式在计算时使用的参数是  $\varphi'$ 、 $c'$ 、 $A_f$ , 通过有效应力参数来求任意固结度  $u_i$  时的总应力指标, 由于土体的复杂性, 造成了计算结果与试验结果的偏差。例如, 本例中通过现有公式计算固结度为 100% 时的抗剪强度指标  $\varphi_{cu}$ 、 $c_{cu}$  分别为  $11.7^\circ$  和 2.86 kPa, 与试验结果存在着一定的偏差, 但新推导公式在计算是使用的参数是  $\varphi'$ 、 $A_f$ 、 $\varphi_{cu}$ 、 $c_{cu}$ , 综合考虑有效应力参数和总应力参数, 对任意固结度时的总应力指标进行计算, 避免了现有公式计算时的问题, 说明了新推导公式的正确性和以及新推导公式相对于现有公式的优越性。

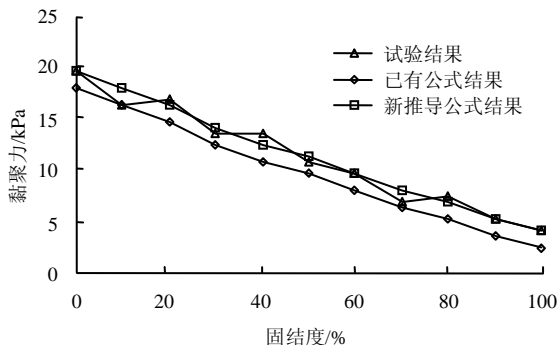


图 7 黏聚力与固结度的关系  
Fig.7 Relationships between cohesion and consolidation degree

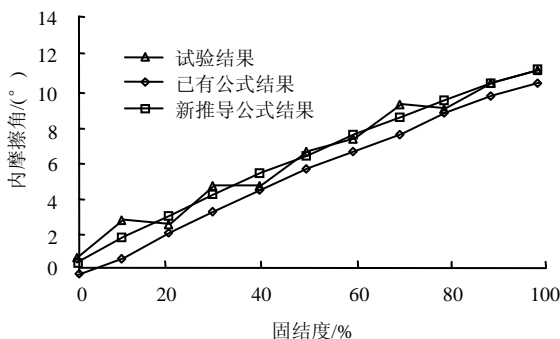


图 8 内摩擦角与固结度的关系  
Fig.8 Relationships between inner friction angle and consolidation degree

## 5 结 论

(1) 对秦植海公式<sup>[10]</sup>及杨嵘昌公式<sup>[11]</sup>进行分析, 前者表达形式过于复杂, 不利于工程实际的应用, 后者虽然表达形式比较简单, 但并不能直观的表现抗剪强度指标随固结度的变化规律, 通过推导分析得出, 两个公式具有等价性。

(2) 从孔隙水压力的角度, 对抗剪强度指标随固结度的变化规律进行了分析, 提出了相应的计算公式, 可见抗剪强度指标可以用  $\varphi'$ 、 $c'$ 、 $A_f$ 、 $\varphi_{cu}$ 、 $c_{cu}$  表示, 内摩擦角随固结度的增大而单调增大, 而黏聚力随着固结度的增长而单调减小。当固结度一定时, 内摩擦的值与初始固结压力  $\sigma_c$  没有关系; 当固结度一定且不为 100% 时, 黏聚力则与初始固结压力  $\sigma_c$  呈线性增长的关系。

本文所推导的新公式综合考虑了有效应力参数和总应力参数, 对任意固结度时的总应力指标进行计算, 避免了现有公式计算时的问题, 新推导公式计算结果与试验结果吻合得更好。

## 参 考 文 献

- [1] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 329-378.
- [2] 林孔鑑. 关于“软黏土抗剪强度增长规律”的讨论[J]. *岩土力学*, 2000, 22(3): 384-385.  
LIN Kong-zi. The discussion of “soft clay shear strength increasing rule”[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 23(3): 384-385.
- [3] 李志, 罗嗣海, 巩田捷. 排水固结法中固结引起强度增长的计算方法探讨[J]. *建筑科学*, 2009, 25(11): 19-22.  
LI Zhi, LUO Si-hai, GONG Tian-jie. Calculation of strength increase due to ground consolidation by preloading[J]. *Construction Science*, 2009, 25(11): 19-22.
- [4] 刘锋, 余湘娟, 倪小东. 真空预压土体强度增长计算方法[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(6): 56-59.  
LIU Feng, YU Xiang-juan, NI Xiao-dong. Method for calculating strength growth of soft foundation with preloading treatment[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(6): 56-59.
- [5] 魏汝龙, 张凌. 稳定分析中的强度指标问题[J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(5): 24-30.  
WEI Ru-long, ZHANG Ling. Strength parameters in

- stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(5): 56—59.
- [6] 胡海军, 魏丽敏, 冷伍明. 黏土强度指标的测定和选取[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2698—2704.  
HU Hai-jun, wei Li-min, LENG Wu-ming. Determination and choice of strength index of clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2698—2704.
- [7] 包伟力, 周小文. 地基强度随固结度增长规律的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(4): 29—31.  
BAO Wei-li, ZHOU Xiao-wen. Experimental study on growth regularity of soil strength with consolidation[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2001, 18(4): 29—31.
- [8] 何群, 冷伍明, 魏丽敏. 软土抗剪强度与固结度关系的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(2): 51—55.  
HE Qun, LENG Wu-ming, WEI Li-ming. Experimental study on relationship between soft soil's shear strength and degree of consolidation[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2005, 2(2): 51—55.
- [9] 张银屏, 宫全美, 董月英. 软土抗剪强度随固结度变化的试验研究[J]. 岩土工程界, 2004, 8(2): 37—40.  
ZHANG Yin-ping, GONG Quan-mei, DONG Yue-ying. Experimental study on soft soil's shear strength changing rule with the degree of consolidation[J]. **Geotechnical Engineering World**, 2004, 8(2): 37—40.
- [10] 秦植海. 饱和黏性土任意固结度的不排水剪强度指标推求方法[J]. 工程勘察, 1996, 1(5): 19—21.  
QIN Zhi-hai. The derivation of soft clay undrained shear strength indexes in any consolidation degree[J]. **Engineering Survey**, 1996, 1(5): 19—21.
- [11] 杨嵘昌. 饱和黏性土任意固结度的不排水抗剪强度[J]. 南京建筑工程学院学报, 2001, 1(4): 20—24.  
YANG Rong-chang. Undrained shear strength index of saturated clayer soil under arbitrary degree of consolidation[J]. **Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute**, 2001, 1(4): 20—24.
- [12] 魏丽敏, 胡海军, 王宏贵, 等. 饱和黏土任意固结度强度指标计算公式及工程应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(1): 68—71.  
WEI Li-ming, HU Hai-jun, WANG Hong-gui. Formula and application of undrained shear strength index of saturated clay under arbitrary degree of consolidation[J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2009, 33(1): 68—71.
- [13] 赵维炳, 施健勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- [14] 唐芬, 唐德兰. 土力学与地基基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.