

# 含水率对花岗岩残积土邓肯-张模型参数影响

吴能森, 赖榕洲, 邹文平, 林智雄, 徐 青

(福建农林大学交通与土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 制作了不同含水率花岗岩残积土击实试样, 进行一系列固结排水三轴试验. 得出在不同围压和不同含水率条件下, 花岗岩残积土击实试样在三向应力作用下均呈现鼓胀破坏的变形特征, 其固结排水应力-应变曲线均为加工硬化型, 与邓肯-张模型的条件式基本吻合. 通过邓肯-张模型参数的计算与分析, 得知含水率对花岗岩残积土的邓肯-张模型参数整体上影响较大, 其中粘聚力受影响最显著, 无因次指数  $n$  和低围压时的初始变形模量受影响较显著, 基本规律为: 抗剪强度指标粘聚力、内摩擦角值, 初始变形模量及无因次基数  $K$  均随着含水率的增大而减小; 无因次指数、破坏比随含水率的增大而增大; 各参数与含水率关系曲线均在最优含水率处出现拐点, 且当含水率大于最优含水率时, 其对各参数的影响不同程度地加大.

**关键词:** 三轴压缩试验; 应力-应变曲线; 变形特征; 影响规律

**中图分类号:** TU411

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2013.09.004

## 0 引 言

花岗岩残积土是花岗岩经风化后残留在原地的碎屑物, 具有很强的结构性, 在原位状态或土的微结构未受损伤时呈现高强度、中低压缩性<sup>[1]</sup>. 但花岗岩残积土经过浸水饱和后, 承载力降低, 压缩性增大, 在具有临空面的浸水条件下, 花岗岩残积土会因软化崩解而坍塌<sup>[2]</sup>. 事实上, 含水率对所有岩土的性质都有很大影响, 因此也是研究热点之一, 如李险峰<sup>[3]</sup>通过三轴排水剪切试验, 研究了含水率对滑坡碎屑土力学特性的影响. 土的本构模型是研究岩土力学性质的核心问题, 显然, 研究含水率对花岗岩残积土本构模型参数的影响具有理论与工程实际意义. 近几十年来, 国内外学者提出描述土体应力-应变关系的本构模型多达数百个, 这些模型基本上可分为弹性、弹塑性及其他各种新型模型. 邓肯-张模型因其概念清晰, 模型参数明确易得, 自提出后 40 多年来得到了不断完善, 被广泛应用于工程实践中<sup>[4]</sup>.

本研究进行了一系列不同含水率条件下花岗岩残积土的固结排水三轴试验, 分析不同围压下花岗岩残积土的应力-应变曲线特点, 通过计算得到不同含水率花岗岩残积土的邓肯-张模型参数, 分析并归纳含水率对花岗岩残积土邓肯-张模型

参数影响的基本规律.

## 1 模型简介

1963 年, 康纳 (Kondner)<sup>[5]</sup>在大量三轴试验基础上, 提出围压为常数的常规三轴固结试验的加工硬化型应力-应变关系可近似地用双曲线来表示, 即:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (1)$$

式(1)中,  $a$ 、 $b$  为试验常数,  $\epsilon_1$  为轴向应变,  $\sigma_3$  为围压,  $\sigma_1$  为轴向主应力.

可将式(1)改写为:

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \quad (2)$$

式(2)是一直线方程,  $a$ 、 $b$  分别为该直线的截距、斜率, 可通过试验数据拟合直线获得.

1970 年, 邓肯 (Duncan) 和张 (Chang) 等<sup>[6]</sup>根据式(1)提出了包括切线模量  $E_t$  和切线泊松比  $\mu_t$  的邓肯-张本构方程式, 简称邓肯-张模型  $E-\mu$  模型. 其中切线模量  $E_t$  表达式为:

$$E_t = E_i \left[ 1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \quad (3)$$

$$E_i = K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (4)$$

式(3)(4)中:  $E_i$  为初始切线模量 (kPa),  $c$  为

收稿日期: 2013-06-26

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2007J0357); 福建省高等学校科技项目 (JA09073); 福州大学土木工程国家级实验教学中心第三期创新性实验研究项目 (IRP2012-3); 福建农林大学创新 (培育) 团队建设项目 (Pytd12006).

作者简介: 吴能森 (1964-), 男, 福建福清人, 教授, 博士, 博士研究生导师. 研究方向: 岩土力学及地下工程.

土的粘聚力(kPa), $\varphi$  为土的内摩擦角( $^{\circ}$ ), $R_f$  为破坏应力比, $K$ 、 $n$  为试验常数, $P_a$  为大气压力(取 101.4 kPa).

$E_i$ 、 $R_f$  与  $a$ 、 $b$  的关系为:

$$E_i = \frac{1}{a} \tag{5}$$

$$R_f = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f \tag{6}$$

式(5)(6)中,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为土样破坏时的偏应力.

将式(4)进行坐标变换,可变为  $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$  直线,则该直线斜率为  $n$ ,当  $\lg \sigma_3 = 1$  时的  $\lg E_i$  值即为  $\lg K$ .

2 试验研究

2.1 试验土样

试验土样取自福州晋安区鹤林新城二区某地块,取土深度为 12.3~16.8 m,土样呈褐黄、肉红色,湿-稍湿,硬塑状态,土样的物理性质指标如下:天然密度  $\rho = 1.84 \text{ g/cm}^3$ ,天然含水率  $\omega = 30.1\%$ ,土粒相对密度  $d_s = 2.72$ ,天然孔隙比  $e = 0.976$ ,液限  $\omega_L = 41.1\%$ ,塑限  $\omega_P = 27.3\%$ ,塑性指数  $I_p = 13.8$ .经筛分,土样各粒组的分布情况见表 1.土样击实试验的最优含水率  $\omega_{op} = 17.4\%$ .

表 1 花岗岩残积土粒组分布情况

Table 1 Granularity distribution of the granite residual soil

粒组/mm	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	<0.1
$w/\%$	1.4	17.4	7.3	9.8	8.2	10.6	45.3

2.2 试验方案

试验仪器为 SLB-1 型应力-应变控制式三轴剪切渗透试验仪,采用固结排水三轴压缩试验(CD 试验)<sup>[7]</sup>,花岗岩残积土经过风干、碾碎、过孔径为 2 mm 筛后,测定风干后土样的含水率,然后按照设计的含水率制作试样,试样按击实法制备扰动土制样方法制作,试样直径 39.1 mm,高 80 mm.试样含水率以最优含水率为基准,上下相差 4%左右,经取整分别为 13%,17%,21%.试验固结围压  $\sigma_3$  分别取 100、200、300 kPa,当体积读数变化微小或长时间保持不变时认为试样完成固结.固结完成后,在围压  $\sigma_3$  保持不变的情况下,采用应变控制方式,以 0.012%/min 剪切速率增加轴向压力进行排水剪切,直至试样轴向应变值达到 15%时停止试验,试验过程中排水阀始终保持开启状态.自动数据采集系统能够在试验过程中

采集试验数据并绘制相关曲线.

2.3 试验结果及分析

2.3.1 试样变形特征及应力-应变特性 各含水率试样在三种不同围压下,均在轴向应变达到 15%时呈比较明显的鼓状变形,但尚未发生剪切破坏.各试样的变形情况见图 1.图 2 为各含水率试样的主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  与轴向应变  $\epsilon_1$  关系曲线,可见,不同含水率花岗岩残积土试样在固结排水条件下得到的应力-应变曲线形状相似,未出现明显的峰值,均呈非线性的加工硬化型曲线,与邓肯-张模型的条件式(1)基本吻合.

2.3.2 邓肯-张模型参数及分析 根据三种围压  $\sigma_3$  作用下试样破坏时的偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  试验数据,可绘制出不同含水率下三组试样的强度包线,见图 3,得到不同含水率的花岗岩残积土抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值.

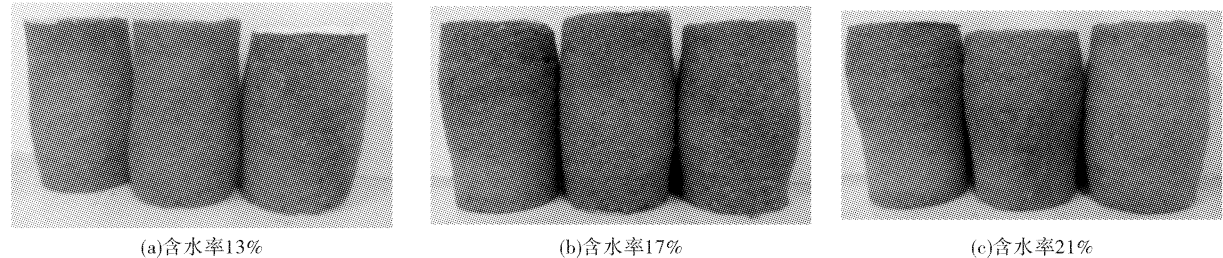


图 1 试样破坏时变形特征  
Fig. 1 Deformation of destroyed test samples

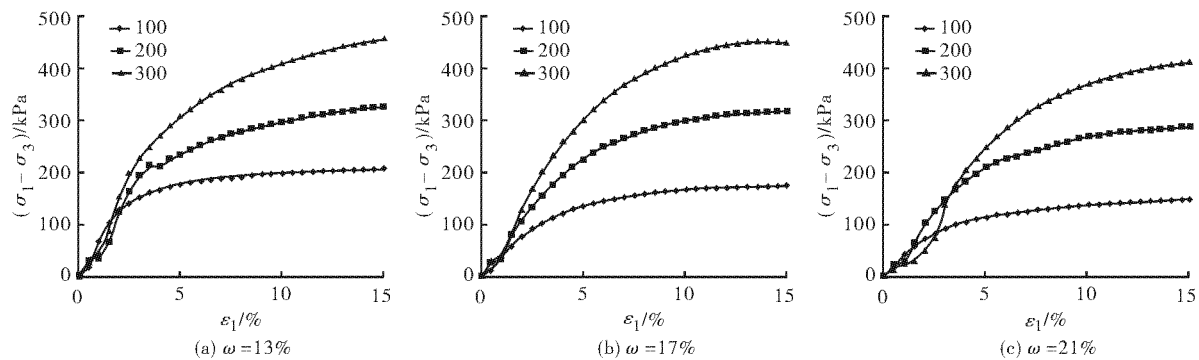


图 2  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$  关系曲线  
Fig. 2 The curves of  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$

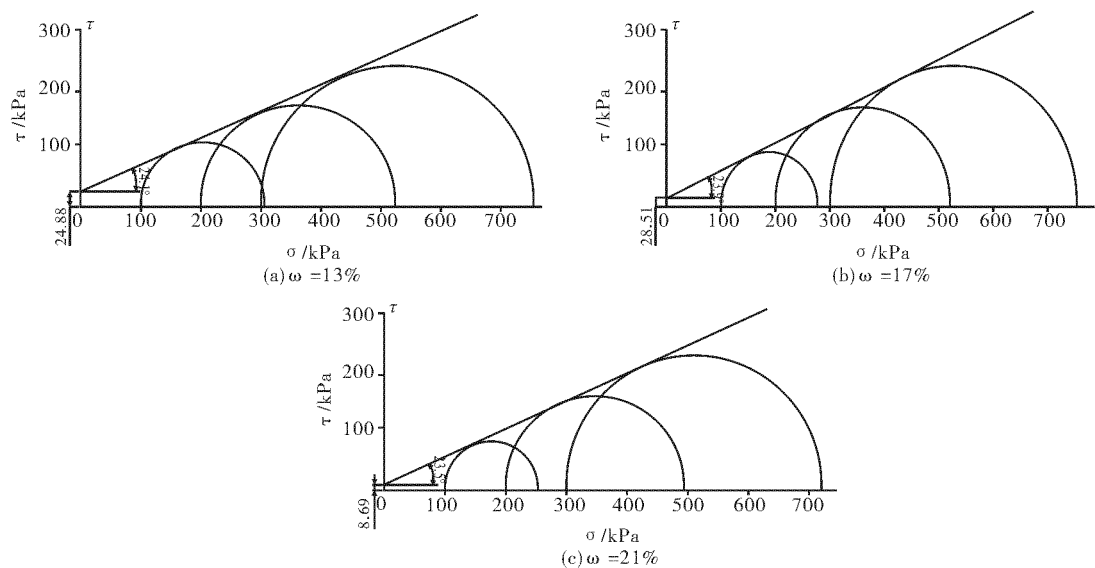


图 3 三轴剪切摩尔强度包线

Fig. 3 The Mohr stress circles of triaxial compression test

将 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$  试验数据按式(2)处理并绘制直线,可得试验常数 $a$ 、 $b$ ,进而根据式(5)、(6)得到初始切线模量 $E_i$ 和破坏应力比 $R_f$ .再利用式(4)的线性化变换和绘图,得到试验常数 $K$ 、 $n$ .

以上 6 个邓肯-张模型参数及主要试验数据见表 2. 依表 2 绘制得到各参数随含水率的变化情况,见图 4~图 8.

表 2 不同含水率花岗岩残积土邓肯-张模型参数表

Table 2 Parameters of Duncan-Chang model under different water content

$\omega/\%$	$\sigma_3/\text{kPa}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/\text{kPa}$	$E_i/\text{kPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$K$	$n$	$R_f$
13	100	207.29	9 090.91	24.88	24.1	87.09	0.22	0.908
	200	325.33	10 309.28					
	300	455.81	11 363.64					
17	100	176.58	7 812.50	18.51	23.9	77.63	0.31	0.919
	200	320.34	9 708.74					
	300	452.51	10 869.57					
21	100	153.52	6 024.10	8.69	23.5	66.07	0.45	0.952
	200	294.22	9 259.26					
	300	421.44	10 416.67					

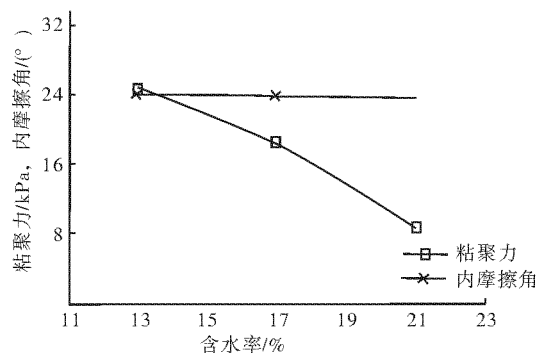
图4 粘聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  随含水率变化

Fig. 4 Cohesion  $c$  and internal friction angle  $\varphi$  change with the water content

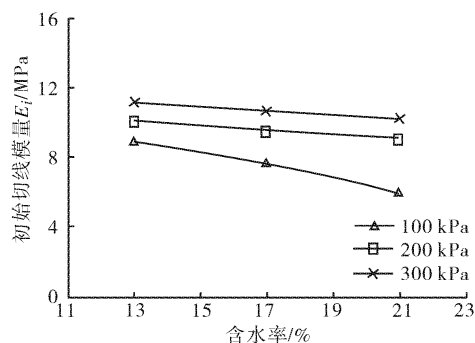
图5 初始切线模量  $E_i$  随含水率变化

Fig. 5 Initial tangent modulus  $E_i$  changes with the water content

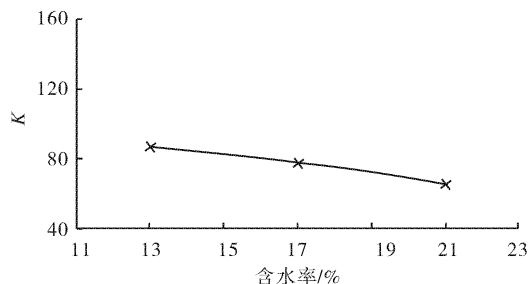
图6 参数  $K$  随含水率变化

Fig. 6 Parameter  $K$  changes with the water content

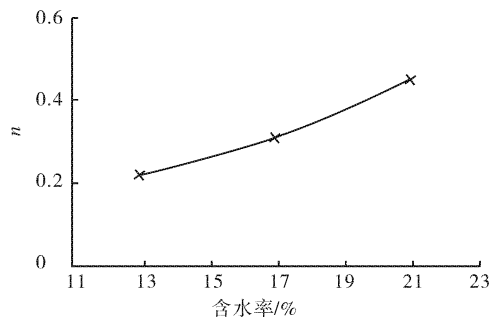
图7 参数  $n$  随含水率变化

Fig. 7 Parameter  $n$  changes with the water content

由图4可见,含水率对花岗岩残积土抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值的影响差异显著,虽然  $c$ 、 $\varphi$  值都随着含水率的增大而减小,但两者的减小幅度相差很大,含水率对  $c$  值影响很大而对  $\varphi$  值影响相对微

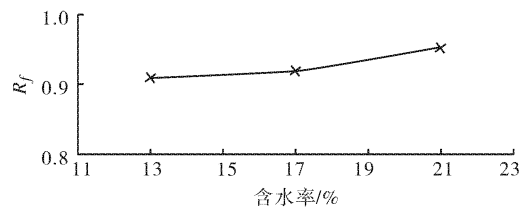
图8 参数  $R_f$  随含水率变化

Fig. 8 Parameter  $R_f$  changes with the water content

小,该结果与文献[1]的统计分析结论一致.由表1可得:当含水率  $\omega = 13\% \sim 17\%$ ,  $\omega$  值每增加  $1\%$ ,  $c$  值下降  $6.40\%$ ,而  $\varphi$  值仅下降  $0.21\%$ ;当含水率  $\omega = 17\% \sim 21\%$ ,  $\omega$  值每增加  $1\%$ ,  $c$  值下降  $13.26\%$ ,而  $\varphi$  值仅下降  $0.42\%$ .在同等条件下,  $c$  值降幅达  $\varphi$  值 30 倍以上.同时,含水率愈高对  $c$ 、 $\varphi$  值的影响愈大:以最优含水率  $\omega_{op}$  为界,含水率大于  $\omega_{op}$  时的  $c$ 、 $\varphi$  值降幅大约是含水率小于  $\omega_{op}$  时的 2 倍.

由图5及表2可知,花岗岩残积土初始变形模量  $E_i$  随着含水率和围压  $\sigma_3$  的变化呈现一定规律:在围压一定时,  $E_i$  随着含水率的增大而减小,其中围压较小 ( $\sigma_3 = 100$  kPa) 时,  $E_i$  随含水率增大而减小的幅度较大,而且以最优含水率  $\omega_{op}$  为界,含水率大于  $\omega_{op}$  时的  $E_i$  值减幅大约是含水率小于  $\omega_{op}$  时的 1.4 倍;而围压较大 ( $\sigma_3 = 200, 300$  kPa) 时,  $E_i$  随含水率增大而减小的幅度较小,而且基本呈线性关系.在含水率不变时,  $E_i$  值随着围压  $\sigma_3$  的增加而增大,特别是围压较小时,围压的增加对  $E_i$  值的增大影响更显著.

同样地,其余参数也随着含水率的变化而变化.由图6~图8及表2可知:参数  $K$  随着含水率的增大而减小,而且以最优含水率  $\omega_{op}$  为界,含水率大于  $\omega_{op}$  时的  $K$  值减幅大约是含水率小于  $\omega_{op}$  时的 1.2 倍;参数  $n$ 、 $R_f$  均随着含水率的增大而增大:对参数  $n$ ,含水率大于  $\omega_{op}$  时的  $n$  值增幅大约是含水率小于  $\omega_{op}$  时的 1.56 倍;对参数  $R_f$ ,含水率大于  $\omega_{op}$  时的  $R_f$  值增幅大约是含水率小于  $\omega_{op}$  时的 3 倍.

说明一点:参数  $R_f$  值一般在  $0.75 \sim 1.00$  之间<sup>[8]</sup>,表2的  $R_f$  值均在  $0.90$  以上,表明实验取轴向应变  $\varepsilon_1 = 15\%$  对应的偏应力作为破坏偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ,与极限偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$  接近,而此试样除了继续发生鼓胀变形外,并未出现破坏剪切面,体现了土样的应变硬化特性和应变控制破坏的特点.

### 3 结 语

a. 在不同围压和不同含水率条件下,花岗岩

残积土击实试样在三向应力作用下均呈鼓胀变形特征,其固结排水应力应变曲线均为加工硬化型,与邓肯-张模型的条件式基本吻合。

b. 花岗岩残积土的邓肯-张模型参数随含水率变化的基本规律是:抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值,初始变形模量  $E_i$  及参数  $K$  均随着含水率的增大而减小;参数  $n$ 、 $R_f$  随含水率的增大而增大。

c. 除了内摩擦角  $\varphi$  之外,含水率对花岗岩残积土的邓肯-张模型参数整体上影响较大,其中粘聚力  $c$  受影响显著,参数  $n$  和低围压时的初始变形模量  $E_i$  受影响较显著。各参数与含水率关系曲线均在最优含水率  $\omega_{op}$  处出现拐点,而且当含水率大于  $\omega_{op}$  时,其对各参数的影响不同程度地加大。

d. 试样制作前筛除了 2 mm 以上粗颗粒(占 18.8%),必会影响试验结果,但由于土中水主要与细粒土发生作用,因此预计该影响主要表现在参数的大小上,不会改变其应力应变特性及参数的变化规律。

## 致谢

本研究得到福建省科技厅、福建农林大学等部门资助,在此表示感谢。同时也感谢福建省现代工程勘察院在钻探取样方面的支持与帮助,感谢福建农林大学交通与土木工程学院给予本研究的帮助、关心与支持!

## 参考文献:

- [1] 吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京:南京林业大学,2005:51-55.  
WU Nengsen. A study on characteristics and some engineering problems of granite residual soil with structural nature [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005: 51-55. (in Chinese)
- [2] 吴能森. 花岗岩残积土的崩解性及软化损伤参数研究[J]. 河北建筑科技学院学报,2006,23(3):58-62.  
WU Nengsen. A study on calving property and softening damage parameter of granite residual soil [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2006, 23(3): 58-62. (in Chinese)
- [3] 李险峰. 含水率对金坪子滑坡土体力学特性的影响[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(3):27-31.  
LI Xianfeng. Impact of moisture content on mechanical properties of Jinpingzi slip soil [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012, 34(3): 27-31. (in Chinese)
- [4] 张学言,闫澍旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津:天津大学出版社,2004:60-65.  
ZHANG Xueyan, YAN Shuwang. Fundamentals of geotechnics plasticity [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004: 60-65. (in Chinese)
- [5] Kondner R L. Hyperbolic Stress-strain Response: Cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, 1963, 89(SM1): 115-143.
- [6] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of Stress and Strain in Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, 1970, 96(SM5): 1629-1653.
- [7] 水利部南京水利科学研究院. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社.  
Nanjing Hydraulic Research Institute. GB/T 50123-1999 Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- [8] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海:同济大学出版社,1997:146.  
HU Zhongxiong. Soil mechanics and environmental geotechnics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997: 146. (in Chinese)

## Influence of moisture content on parameters of Duncan-Chang model for granite residual soil

**WU Neng-sen , LAI Rong-zhou , ZOU Wen-ping , LIN Zhi-xiong , XU Qing**

(College of Transportation and Civil Engineering Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** A series of triaxial consolidation drained tests were done under different surrounding pressures on the granite residual soil samples of different moisture contents. The result shows that under different surrounding pressures and different moisture contents, the granite residual soil samples in triaxial stress present bulging deformation failure characteristics, all stress-strain curves show the property of work-hardening which coincides with the conditional formula of Duncan-Chang model basically. The calculation and analysis of the Duncan-Chang model parameters shows that the moisture content of granite residual soils has a considerable influence on the Duncan-Chang model parameters overall, in which cohesion  $c$  is the most significant, and the dimensionless index and initial deformation modulus under small confining pressure are comparatively significant, the basic rule is as follows: with the growth of the moisture content, the shear strength indexes, the initial deformation modulus and the dimensionless radix continue to decrease, while the parameters of dimensionless index and failure stress ratio continue to increase; all parameter-water content curves appear inflection point at the optimum moisture content, when the moisture content is greater than its optimal value, the effect of moisture content on the parameters increases to different degrees.

**Key words:** triaxial compression test; stress-strain curve; deformation characteristics; influencing rule

本文编辑: 龚晓宁