

DOI: 10.11779/CJGE202009017

# 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯-张模型研究

安然<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>1,2</sup>, 张先伟<sup>1,2</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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 花岗岩残积土广泛分布在中国东南沿海地区, 是近地表花岗岩的风化产物。为了研究花岗岩残积土原位力学行为及其受风化程度的影响, 开展不同深度土层的原位孔内剪切试验, 获得了不同法向应力下的应力-应变关系曲线和广义邓肯-张模型参数。以砾粒含量表征残积土的风化程度, 基于考虑砾粒含量影响的广义邓肯-张模型预测了土体的力学行为, 并与实测数据进行对比。结果表明, 花岗岩残积土的颗粒级配与土层深度有明显的关联性, 用砾粒含量可以表征其风化程度; 由孔内剪切试验得到应力-应变曲线呈应变硬化型特征; 根据孔内剪切试验的应力-应变关系可以有效地反演广义邓肯-张双曲线模型参数, 包括黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、应力破坏比  $R_f$  以及拟合参数  $K$  和  $n$ ; 经回归分析发现 5 种参数均可由砾粒含量的相应函数关系进行拟合求解; 由模型计算得到的应力-应变曲线与实测结果吻合度较高, 说明采用广义邓肯-张模型描述花岗岩残积土的原位力学行为具有合理性, 分析结果拓展了邓肯-张本构模型的适用范围。

**关键词:** 花岗岩残积土; 风化程度; 孔内剪切试验; 原位力学特性; 广义邓肯-张模型

**中图分类号:** TU432      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2020)09-1723-10

**作者简介:** 安然(1992—), 男, 安徽池州人, 博士研究生, 主要从事特殊土的力学特性与基坑工程研究。E-mail: arwhrsm@163.com。

## Mechanical properties and generalized Duncan-Chang model for granite residual soils using borehole shear tests

AN Ran<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xian-wei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Granite residual soil, as the weathering product of near-surface granite, is widely distributed in the southeast coastal areas of China. In order to study the influences of weathering degree on the in-situ mechanical properties of granite residual soil, the borehole shear tests are carried out for the residual soil along the depth of foundation pit. The in-situ stress-strain curves under different normal stresses and parameters of the Duncan-Chang model are obtained. Then, the regression relationships between the five model parameters and the weathering degree index represented by the gravel content are determined. According to the Duncan-Chang model, the stress-strain curves of residual soil with different weathering degrees are predicted and compared with the measured data. The results show that the grain compositions of residual soil are significantly correlated with the depth of soil layers. The stress-strain curves obtained by the borehole shear tests show the characteristics of strain-hardening deformation. According to the stress-strain relationship of in-situ tests, the parameters of the generalized Duncan-Chang model, including cohesion  $c$ , internal friction angle  $\varphi$ , stress failure ratio  $R_f$  and fitting parameters  $K$  and  $n$ , can be deduced effectively. Through regression analysis, the parameters can be fitted by the corresponding functions for the gravel content. The stress-strain curves calculated by the modified model are in good agreement with the experimental results, which shows that the generalized Duncan-Chang model can reasonably describe the in-situ mechanical behavior of granite residual soil. This study extends the applicability of the Duncan-Chang constitutive model.

**Key words:** granite residual soil; weathering degree; borehole shear test; in situ mechanical property; generalized Duncan-Chang model

## 0 引 言

花岗岩残积土是近地表花岗岩经过长时间物理、

收稿日期: 2019-12-27

\*通信作者 (E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

化学风化后形成的未经搬运的土体<sup>[1]</sup>, 广泛分布在中国东南沿海地区, 占闽、粤两省总陆地面积的 30%~40%, 是这些地区基础建设中经常遇到的一种特殊土<sup>[2]</sup>。花岗岩残积土组构特点介于砂性土和黏性土之间, 力学特性比一般黏性土或砂性土更复杂<sup>[3]</sup>。残积土的变形和强度指标很容易受扰动的影响, 通过室内土工试验获得的指标与真实力学状态存在一定差异, 在进行设计参数选取时, 取值往往偏于保守, 影响了工程的经济性<sup>[4-7]</sup>。花岗岩残积土内部裂隙发育各异, 颗粒组成也有明显差异, 在钻探取样、运输和制样过程中容易受到扰动而引起结构性破坏, 采用室内试验确定其真实的力学参数难度较大, 故对相关地层开展原位试验具有重要意义<sup>[8]</sup>。

土体的力学本构模型研究是土力学的一项重要课题<sup>[9]</sup>。近几十年来, 诸多本构模型被引入土力学的研究中。例如: 莫尔-库仑强度破坏准则<sup>[10]</sup>、Druker-Prager 屈服准则<sup>[11]</sup>、Duncan-Chang 双曲线模型<sup>[12]</sup>、弹塑性 Cam-clay 模型及其改进的 UH 系列模型<sup>[13-14]</sup>、由黄文熙提出的弹塑性模型<sup>[15]</sup>以及由沈珠江构建的理想脆弹塑性模型<sup>[16]</sup>等。Duncan 等提出的邓肯-张双曲线模型材料常数少, 物理意义明确, 在岩土工程中得到了广泛应用<sup>[17]</sup>。土力学中的参数反演分析是基于实测的应力-应变关系反求其力学模型参数的方法。目前, 采用原位试验进行本构模型参数反演分析的研究成果还比较罕见。其中, 李广信<sup>[18]</sup>采用原位旁压测试技术进行了推求了邓肯-张双曲线模型的参数; 刘小生等<sup>[19]</sup>联合室内试验、旁压试验和现场载荷试验对双曲线模型进行了反演分析。上述方法由于无法直接从原位应力-应变关系的角度求解模型参数, 存在诸多的假定和经验公式。目前获取邓肯-张模型参数的常规方法仍然是室内三轴剪切试验<sup>[20]</sup>。孔内剪切试验 (borehole shear test, 简称 BST) 是一种新型原位测试手段, 可以对钻孔内不同深度土层直接进行剪切试验<sup>[21]</sup>。近年来, 国内外学者对于 BST 测试已经开展了一系列实践研究, BST 在土体力学参数的确定中得到了诸多应用<sup>[22-24]</sup>, 但利用 BST 结果反演土体本构模型参数的研究还未见报道。

残积土工程性质的空间变异性较为明显, 其干密度、渗透性、孔隙度、微结构、变形模量、抗剪强度和应力-应变关系等各项物理力学性质, 均与风化层的埋深有重要关系<sup>[25-27]</sup>。采用 BST 测试探究残积土在不同风化程度下的力学行为变异规律有助于加深花岗岩风化层工程特性的认识和理解。此外, 土体的应力-应变关系综合反映了其强度和变形特性, 通过引入本构理论建立 BST 应力-应变关系模型, 可以为风化程度影响下的力学行为演化特点提供进一步参考。

因此, 通过 BST 确定广义邓肯-张本构模型参数, 建立反映风化程度影响的应力-应变关系模型, 对花岗岩残积土力学行为的研究具有重要意义。

本文以厦门市某地铁站基坑工程为背景, 在花岗岩残积土地层中开展多组原位孔内剪切试验, 基于测试结果反演了广义邓肯-张模型参数, 并评价了物理风化程度对修正模型的影响, 最后与实测结果进行对比以验证模型的合理性。

## 1 场地地质条件与试验方法

### 1.1 残积土基本物理性质指标

原位孔内剪切试验和现场取样的场地位于厦门市地铁一号线沿线的一处典型残积土基坑地层。整平场地后通过钻探 1 个鉴别孔确定土层分布规律, 获取了杂填土、残积土、全风化岩、强风化岩的厚度, 本场地的残积土分布在地下 3.5~20 m。采用钻探取样法沿深度方向自上而下地对残积土地层进行连续取样, 直到取至强风化岩层。试样取出后用不锈钢样盒承装, 用密封胶带包裹后立即封腊, 运至实验室。对取回的试样开展基本物理性质的测试。

土体基本物理性质指标如表 1 所示, 随深度增加, 土体的天然密度和砾粒含量有增加趋势, 渗透系数有减小的趋势。由图 1 (a) 所示的 XRD 衍射图谱发现厦门花岗岩残积土内除含有大量石英颗粒外, 母岩的矿物成分基本风化为高岭石与伊利石, 另含有微量的赤铁矿, 其中, 石英含量为 53.6%, 高岭石含量为 38.5%, 伊利石含量为 5.2%, 赤铁矿含量为 2.5%。花岗岩残积土在不同深度处的颗粒级配结果如图 1 (b) 所示, 可以看出该场地残积土的级配曲线呈明显的阶梯状, 粗粒和黏粒含量较多, 中间粒径含量较少, 根据颗粒级配特点认为残积土是一种介于黏性土和砂性土性质之间的中间土<sup>[28]</sup>。由现场钻探的结果, 场地地下水位在-3.2 m 左右, 认为被测残积土为饱和土, 从含水率分布特征也可以看出土体的含水率差异不大。

### 1.2 风化程度指标

在复杂的成土过程中, 受控于气候主导下的温度与降水变化, 母岩经过漫长时间的风化作用后在地表广泛堆积成残积土。随着母岩矿物的不断发生物理、化学反应, 成土体系内的颗粒组成也会随之改变<sup>[29]</sup>。母岩经历的风化作用越剧烈, 则残积土的黏土化程度越高, 土颗粒越细, 在颗粒组成上表现为粗颗粒含量随物理风化程度提高而下降的现象<sup>[30]</sup>。在同一场地的地层中, 风化程度总是由深至浅地逐渐提高<sup>[31]</sup>。作为残积土粒径分布特征的重要参数, 砾粒含量  $G$  随土体

表 1 土的基本物理力学性质指标  
Table 1 Basic physical and mechanical properties of soil

埋深/m	相对密度 $G_s$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 $e_0$	含水率 /%	液限/%	塑限/%	塑性指数	渗透系数 $/(10^{-6}m \cdot s^{-1})$	砾粒含量 $G/\%$
3.8	2.73	1.75	0.74	26.7	48.3	27.2	21.1	7.12	17.3
5.6	2.72	1.75	0.77	26.4	44.8	25.5	19.3	5.17	16.5
7.0	2.71	1.78	0.78	27.0	47.9	24.5	23.4	5.32	19.0
8.0	2.73	1.81	0.75	30.4	50.2	24.2	26.0	5.01	18.9
9.2	2.73	1.75	0.84	26.7	48.5	27.1	21.1	5.12	19.9
10.0	2.72	1.75	0.77	26.4	44.8	25.5	19.3	4.97	19.4
11.0	2.71	1.77	0.80	28.1	45.2	25.2	20.0	4.50	20.5
12.2	2.71	1.78	0.78	27.0	48.2	24.1	24.1	3.92	20.7
13.2	2.73	1.81	0.75	30.4	50.1	24.2	25.9	4.01	22.5
15.0	2.73	1.75	0.84	26.7	48.4	27.3	21.1	3.42	23.8
16.2	2.72	1.75	0.77	26.4	44.3	25.5	18.8	3.17	24.6
18.2	2.71	1.78	0.78	27.0	48.0	24.5	23.5	3.32	24.5

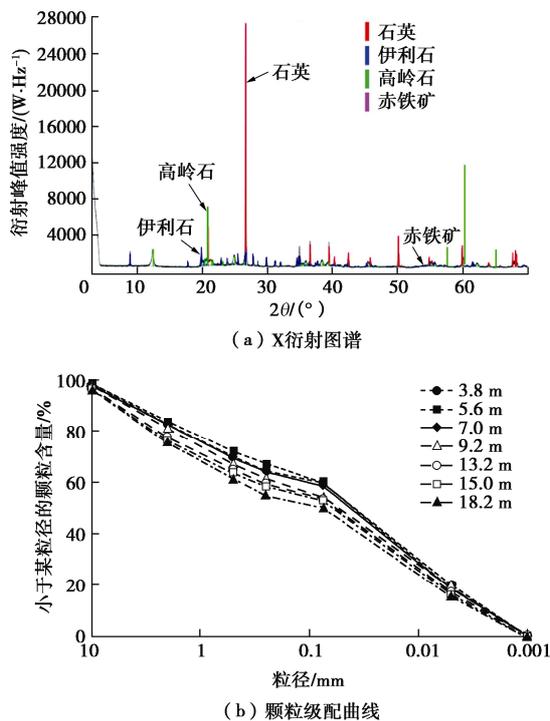


图 1 厦门花岗岩残积土的矿物成分与颗粒级配结果

Fig. 1 Results of mineral composition and grain size of granite residual soil in Xiamen

深度增加保持上升趋势。因此, 砾粒含量  $G$  的大小在一定程度上反映了花岗岩残积土的物理风化程度。

### 1.3 原位孔内剪切试验

试验采用的仪器为美国生产的 Iowa 原位孔内剪切测试仪, 示意图如图 2 所示。仪器主要由剪切探头、剪切盘、压力表、压力控制箱以及压力气源等部分组成。BST 试验具有操作方便, 可重复性高, 适用性广和无须取样等优点。使用 BST 剪切仪进行测试对土体的扰动大大降低, 测试结果更加接近土体的本真力学属性。虽然 BST 结果反映了探头与土之间界面的强度特征, 但参照十字板剪切试验的方法及原理, 可以近似地认为 BST 试验测得的结果可以表征土体的强度

特性<sup>[32]</sup>。

试验前, 首先利用钻机钻取直径为 76 mm 的孔。然后在钻孔的地表位置安装好底座, 将探头放置在预定深度。测试点分布在 4~18 m 的地层中, 每组剪切各进行 25, 50, 100 和 200 kPa 4 组法向应力的固结作用。剪切时, 先施加气压使得两个独立不锈钢剪切盘受压张开后对土体进行法向固结 15 min; 固结完成后匀速转动摇杆向上提拉探头对孔壁土体进行剪切, 同时读取压力表的读数; 待压力表读数基本稳定后卸除法向和轴向的压力, 将探头向下移动 10 cm 后进行下一次剪切的法向固结。试验中为了满足剪切时的排水条件, 剪切速率保持在 0.5 mm/min 左右。

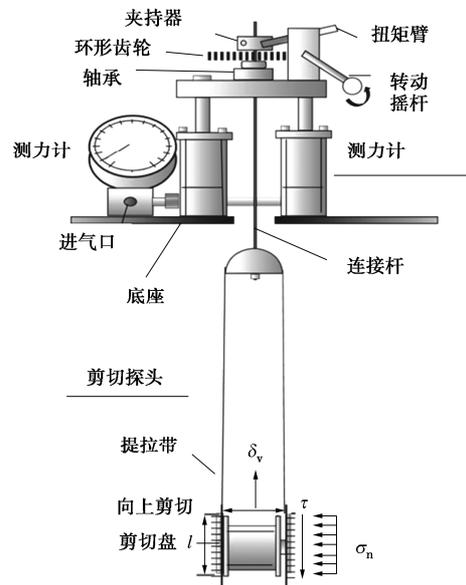


图 2 孔内剪切试验仪器的示意图

Fig. 2 Diagrammatic drawing of in-situ borehole shear testing devices

已知被测残积土均在地下水位线以下, 为饱和土, 故不考虑饱和度对土体性质的影响。由于剪切探头与孔壁土体接触的土样长度  $l$  为 50 mm, 由此可以获得

变形过程中的广义剪应变  $\varepsilon$ ，如下所示：

$$\varepsilon = \frac{\delta_v}{l} \quad (1)$$

式中， $\delta_v$  为竖向剪切位移 (mm)， $l$  为土体剪切段的长度 (mm)。

## 2 BST 试验结果

### 2.1 应力应变曲线

由 BST 试验得到了 4~18 m 深度范围内的残积土广义剪应力  $\tau$  与广义剪应变  $\varepsilon$  的关系曲线，结果如图 3 所示。当土体埋深相同时，剪切强度值随固结压力的上升而增加，且不同法向固结应力作用下的  $\tau - \varepsilon$  曲线均呈弱硬化变形特征。具体表现为：在剪应力加载的初期，残积土应力 - 应变关系近似处于线弹性变形，剪应力随剪应变增大呈直线上升；进入非线性变形阶段后，剪应力随应变增加的上升斜率逐渐减小，直至趋于稳定。另外，花岗岩残积土的应力 - 应变关系曲线受土体深度的影响非常显著。同一固结压力下的剪应力随深度增加而明显提高。

### 2.2 抗剪强度参数

按照莫尔-库仑强度破坏准则，以剪切强度  $\tau_f$  为纵坐标，以法向应力  $\sigma_n$  为横坐标绘制花岗岩残积土的

强度包络线，结果如图 4 所示。可以看出不同深度下的土体强度包络线近似保持线性增长趋势，其相关系数均达到了 0.93 以上。通过回归分析可以计算不同深度处下花岗岩残积土的抗剪强度参数，即内摩擦角和黏聚力指标。

根据图 4 所示的剪切强度与法向应力的关系，经计算得到了基于 BST 测试的花岗岩残积土内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ 。下面分析风化程度对抗剪强度参数的影响，以砾粒含量  $G$  为横坐标，分别以黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  分别作为纵坐标，建立强度参数和风化程度指标的关系，结果如图 5 所示。不同颜色标记数据点反映了土体的埋深，标记颜色与深度的关系如图例所示。从如图 5 (a)，(b) 可以看出，花岗岩残积土的黏聚力、内摩擦角与砾粒含量均符合线性函数特征，且  $c$  随  $G$  增加呈上升趋势， $\varphi$  随  $G$  增加呈下降趋势。可以看出随着花岗岩残积土的深度的增加，砾粒含量下降，即物理风化程度逐渐降低，从而导致内摩擦角呈线性减小趋势，黏聚力呈线性上升趋势。究其原因，物理风化程度上升一方面改变了土颗粒之间的接触关系，砾粒颗粒间的咬合摩擦力减小，使内摩擦角减小；另一方面，黏土矿物含量的增加促进黏粒间化学键强度发挥作用，使得黏聚力增大。

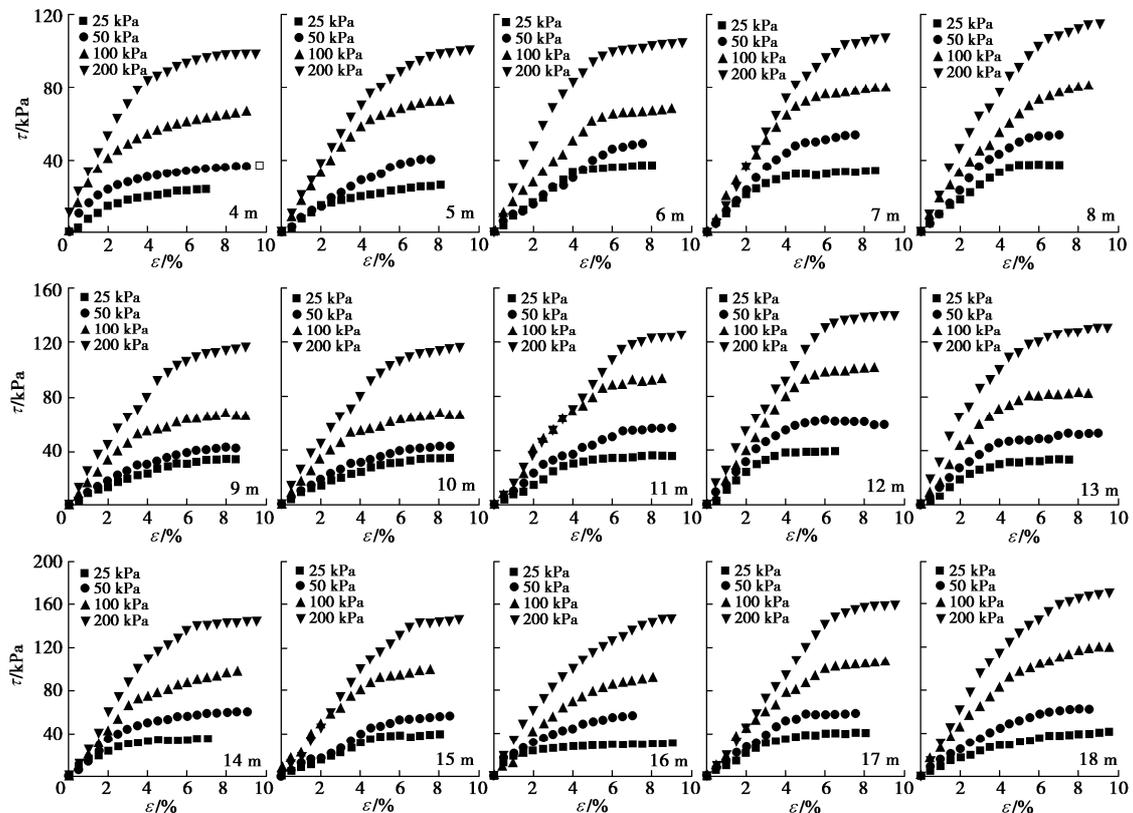


图 3 花岗岩残积土 BST 应力 - 应变曲线 (4~18 m)

Fig. 3 Stress-strain curves of granite residual soil based on BST measurements (4~18 m)

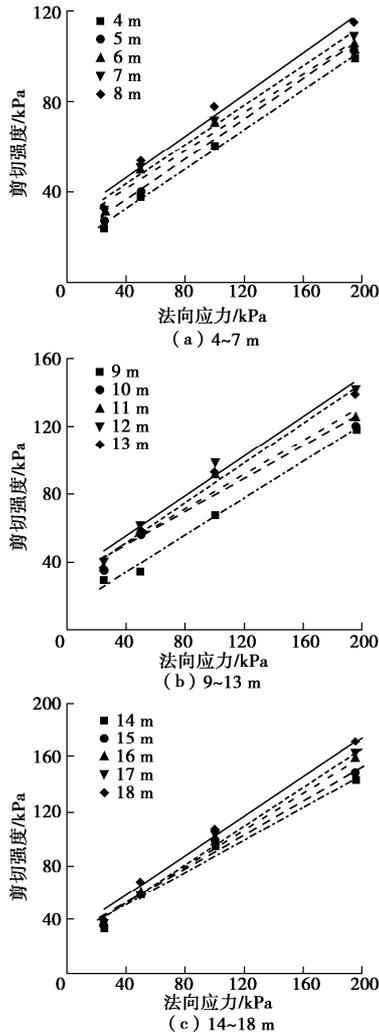


图 4 BST 试验的剪切强度与法向应力的关系曲线

Fig. 4 Relationship between shear strength and normal stress from

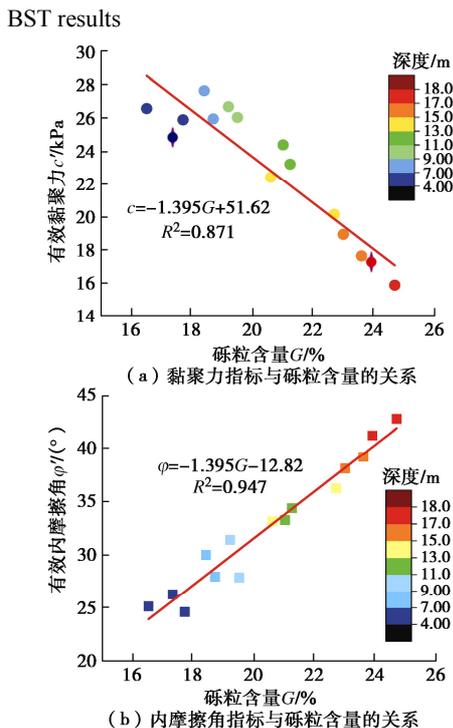


图 5 抗剪强度指标与砾粒含量的关系曲线

Fig. 5 Relationship between shear strength and gravel content

### 3 基于 BST 的广义邓肯-张模型

#### 3.1 广义邓肯-张模型的适用性验证

##### (1) 广义邓肯-张模型介绍

邓肯-张模型是一种能够通过改进以灵活反映不同测试条件、荷载和边界条件等因素影响的土体本构模型<sup>[33]</sup>。在土力学本构模型研究中, 传统邓肯-张模型参数采用三轴剪切试验结果确定。三轴试验是一种有侧限的压缩, 侧向固结压力在剪切过程中始终保持不变。BST 也是在一定法向应力作用下的剪切变形过程, 与三轴试验在受力模式和边界条件有相似的地方。基于以上分析, 本文借鉴前人采用三轴试验结果分析邓肯-张模型的方法, 采用比拟的思路获取了基于 BST 结果的广义邓肯-张模型参数。求取模型参数时, 采用 BST 试验的法向应力  $\sigma_n$  取代三轴试验中的围压  $\sigma_3$ ; 采用广义剪应变  $\varepsilon$  取代轴向应变  $\varepsilon_1$ , 采用剪应力  $\tau$  与取代偏应力  $q$ 。另外, 由于孔内剪切试验没有进行侧向变形的量测, 对切线泊松比的验证是近似的。然而根据李广信的研究<sup>[18]</sup>, 大部分工程问题接近于平面应变问题, 在确定本构模型参数时, 建议用平面应变试验得到的指标代替三轴试验的指标。BST 本质上是一种平面应变问题, 无法测量侧向应变的缺陷对模型参数的影响不大。

根据邓肯-张模型, 土体在剪切过程中的广义剪应力和应变符合如下所示的关系:

$$\tau = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为剪应力,  $\varepsilon$  为剪切沿孔壁轴线方向的应变,  $a$  为初始切线模量  $E_i$  的倒数,  $b$  为极限剪应力  $\tau_{ult}$  的倒数。由初始切线模量与法向压力之间的指数关系, 得到土体初始切线模量  $E_i$  的表达式如下:

$$E_i = Kp_a \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

式中,  $K$  和  $n$  为计算初始切线模量的拟合常数,  $p_a$  为大气压力, 取 101.3 kPa,  $\sigma_n$  为法向应力。

前人在式 (3) 的基础上提出了土体在剪切过程中的切线模量表达式如下所示。此公式可以用于计算基于的邓肯-张本构模型的 BST 试验应力 - 应变关系。

$$E_t = Kp_a \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \left( 1 - \frac{\tau R_f}{\tau_f} \right)^2 \quad (4)$$

式中,  $E_t$  为切线模量,  $R_f$  为破坏比。

$$R_f = \frac{\tau_f}{\tau_{ult}} \quad (5)$$

式中,  $\tau_f$  为土体的破坏强度,  $\tau_{ult}$  为土体的极限剪切强度, 在数值上等于公式 (2) 中  $b$  值的倒数,  $R_f$  的值一般介于 0.5~1。

根据莫尔-库仑强度准则, 可由抗剪强度参数, 即黏聚力和内摩擦角指标求取土体的破坏强度  $\tau_f$ , 表达式如下:

$$\tau_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_n \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

为了验证基于邓肯-张模型的切线模量表达式在描述孔内剪切试验结果中的适用性, 就必须先验证其推导过程中所采用公式与假定的合理性, 即验证公式 (2) 与 (3) 的合理性。首先将式 (2) 转换为下式:

$$\frac{\varepsilon}{\tau} = \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{\tau_{ult}} \quad (7)$$

则由式 (7) 的线性拟合关系式可以获得  $E_i$  和  $\tau_{ult}$  的值。

对式 (3) 的两边取对数得

$$\lg\left(\frac{E_i}{p_a}\right) = \lg K + n \cdot \lg\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right) \quad (8)$$

因此, 通过将邓肯-张模型适用性条件转化为对

$\frac{\varepsilon}{\tau} - \varepsilon$  与  $\lg\left(\frac{E_i}{p_a}\right) - \lg\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right)$  之间线性关系的验证<sup>[33]</sup>。

(2)  $\frac{\varepsilon}{\tau} - \varepsilon$  关系验证

下面以 4, 7, 9, 12, 15 和 18 m 深度处的结果为例, 根据应力-位移曲线获取不同深度处花岗岩残积土的  $\frac{\varepsilon}{\tau} - \varepsilon$  关系曲线, 结果如图 6 所示。从图中可以看出, 不同固结压力下的花岗岩残积土在剪切过程中  $\frac{\varepsilon}{\tau}$  与  $\varepsilon$  近似呈现线性关系, 表明应力  $\tau$  与应变  $\varepsilon$  之间符合双曲线关系。

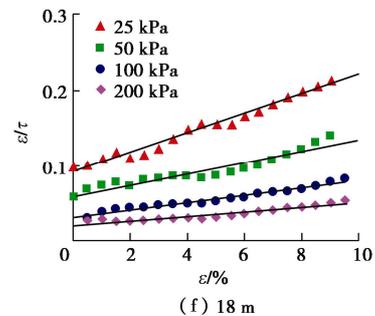
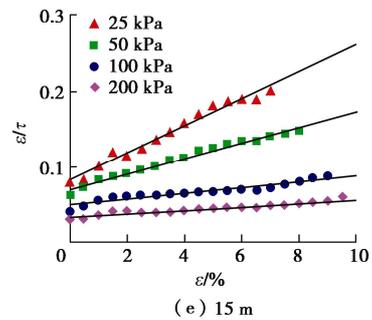
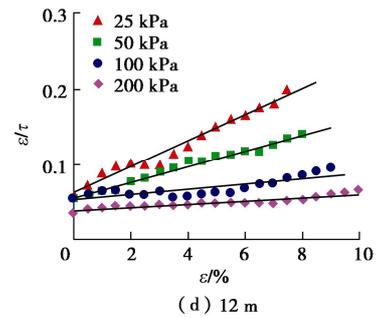
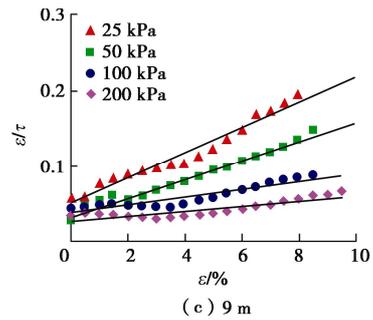
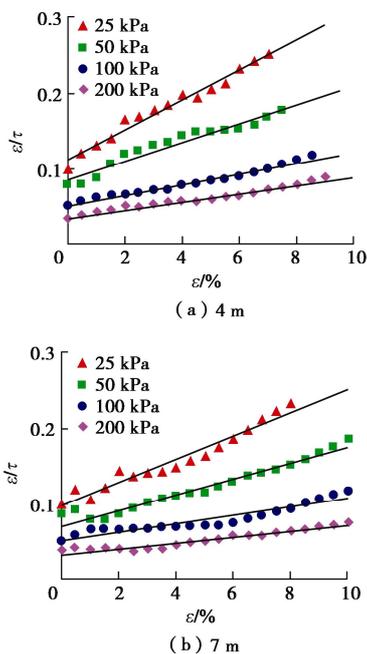


图 6 应力-应变双曲线的关系验证

Fig. 6 Relational verification of stress-strain curves

(3)  $\lg\left(\frac{E_i}{p_a}\right) - \lg\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right)$  关系验证

由式 (7) 获得了不同固结压力下的初始切线模量

$E_i$ , 由图 7 可以看出  $\lg\left(\frac{E_i}{p_a}\right) - \lg\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right)$  之间的线性关系良好, 说明采用 BST 确定的  $E_i$  满足邓肯-张模型的适用性条件。

### 3.2 邓肯-张模型参数分析

通过对试验数据进行处理, 计算了花岗岩残积土邓肯-张模型的 5 个参数 ( $c$ ,  $\varphi$ ,  $K$ ,  $n$  和  $R_f$ ), 结果如表 2 所示。为了分析物理风化程度对模型参数的影

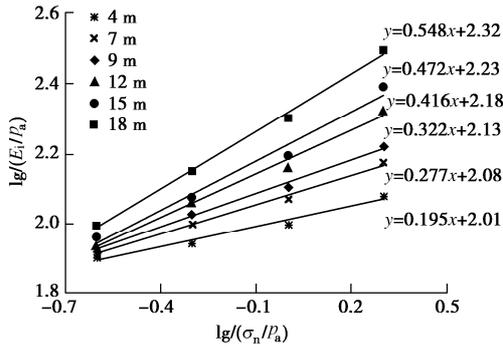


图 7 初始切线模量的适用性条件验证

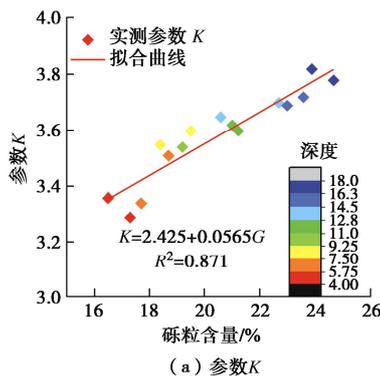
Fig. 7 Relational verification of initial tangent modulus

响规律, 采用砾粒含量  $G$  作为自变量, 分别以  $K$ ,  $n$  和  $R_f$  作为因变量, 进行回归分析, 结果如图 8 所示。发现花岗岩残积土的广义邓肯-张模型参数随砾粒含量变化均呈一定规律性, 其中参数  $K$  与  $G$  保持正相关的线性关系; 参数  $n$  与  $G$  保持二次函数的关系, 随砾粒含量上升, 参数  $n$  先增加后减小; 参数  $R_f$  与  $G$  保持负相关的线性关系。因此, 以砾粒含量为影响因子计算的 5 个待定参数可以根据相关函数表达式进行合理的预测。

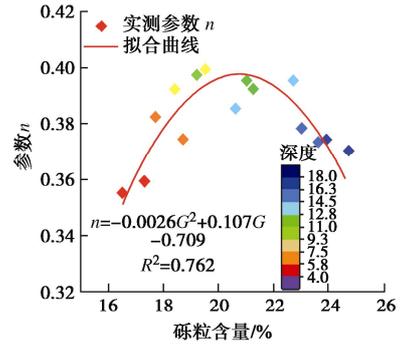
表 2 广义邓肯-张模型参数

Table 2 Parameters of generalized Duncan-Chang model

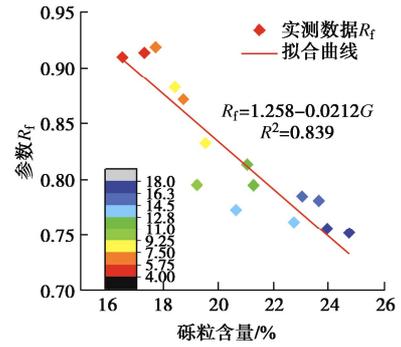
深度 /m	模型参数				
	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$K$	$n$	$R_f$
4	18.2	25.1	3.19	0.356	0.913
5	23.1	23.6	3.36	0.347	0.909
6	19.7	24.4	3.34	0.382	0.918
7	28.5	27.0	3.51	0.374	0.871
8	28.0	29.4	3.55	0.392	0.882
9	27.1	28.1	3.60	0.399	0.832
10	26.5	31.8	3.54	0.397	0.795
11	26.0	32.1	3.62	0.409	0.813
12	25.0	33.8	3.60	0.382	0.795
13	23.4	33.2	3.65	0.418	0.773
14	22.9	33.6	3.70	0.372	0.752
15	21.6	36.3	3.69	0.371	0.785
16	20.9	38.1	3.72	0.355	0.781
17	18.8	43.2	3.78	0.375	0.752
18	18.1	41.9	3.82	0.384	0.756



(a) 参数  $K$



(b) 参数  $n$



(c) 参数  $R_f$

图 8 基于孔内剪切试验的邓肯-张模型参数与砾粒含量的关系

Fig. 8 Relationship between model parameters and gravel content

based on borehole shear tests

### 3.3 实测结果与模型计算结果的对比

在广义邓肯-张本构的模型参数后, 土体的应力-应变关系可以表示为

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon \cdot R_f}{\tau_f}} \quad (9)$$

下面对花岗岩残积土 BST 试验的实测数据与邓肯-张模型的拟合曲线进行对比分析, 结果如图 9 所示。可以看出采用广义邓肯-张模型计算的应力-应变曲线与 BST 测试结果较为吻合, 相对误差较小。就拟合结果而言, 利用 BST 结果有有效地反演土体广义邓肯-张本构模型参数, 同时可以反映物理风化程度对其力学行为的影响。由于孔内剪切试验更能准确地反映土体原位力学特性, 其得到的结果对实际工程参数选取具有很好的参考价值。

## 4 结 论

(1)由原位孔内剪切试验结果发现在不同法向压力下, 花岗岩残积土应力-应变关系曲线均呈现应变硬化型。土体的剪切强度随法向应力增加而上升, 用线性方程可以对两者的关系进行拟合。随土层深度增加, 土体剪切强度明显提高。

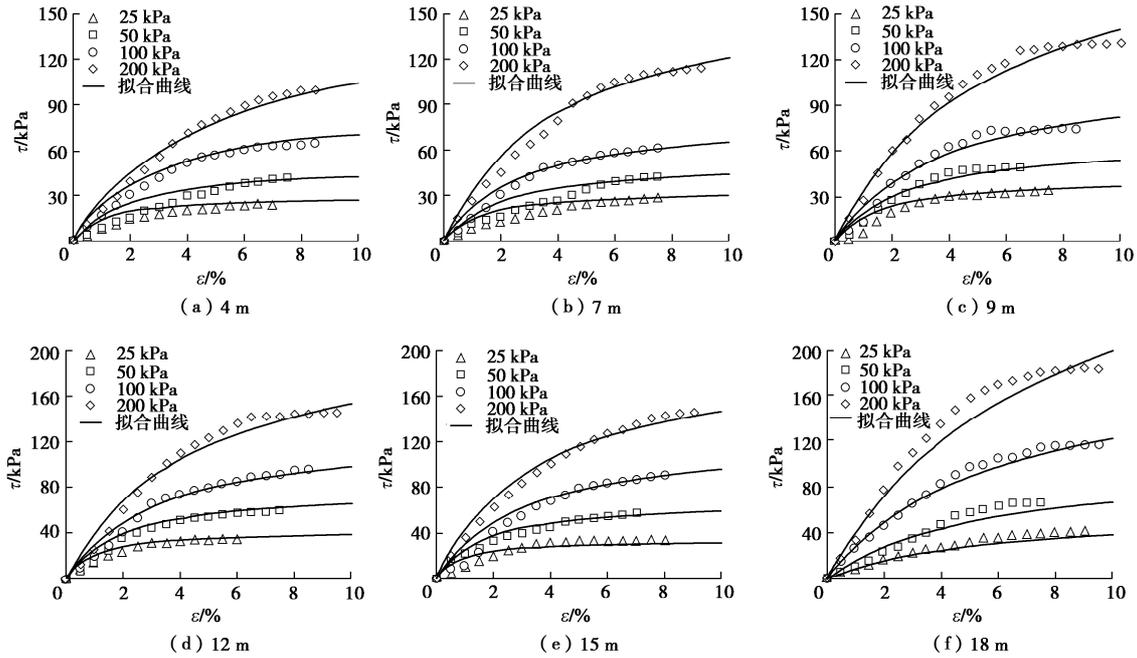


图9 邓肯-张模型计算值与试验值比较

Fig. 9 Comparison between calculated and test values

(2) 通过对 BST 得到的力学参数进行回归分析, 发现随着砾粒含量  $G$  的上升, 广义邓肯-张模型参数中的黏聚力  $c$  和参数  $K$  呈直线型下降; 内摩擦角和应力破坏比  $R_f$  呈直线型上升; 参数  $n$  先增加后减小, 且与  $G$  保持二次函数关系, 说明物理风化程度对广义邓肯-张模型参数有显著影响。

(3) 以砾粒含量为影响因子建立了基于 BST 结果的广义邓肯-张本构模型, 得到的原位应力-应变关系的拟合曲线与实测数据具有较好的吻合度, 验证了采用广义邓肯-张模型反映残积土力学行为的有效性。

(4) 基于 BST 的广义邓肯-张模型研究不仅加深了对残积土力学行为的认识, 也扩大了邓肯-张模型在土力学中的适用范围, 为土体原位力学本构关系的研究奠定了基础。

#### 参考文献:

[1] KONG L W, SAYEM H M, TIAN H. Influence of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin-spin relaxation time ( $T_2$ ) relaxometry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, **55**(2): 208 - 216.

[2] 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2276 - 2284. (YAN Guang-hua. Development and new challenges of deep excavation supporting engineering in Guangdong province[J]. Chinese

Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2276 - 2284. (in Chinese))

- [3] DA FONSECA A V, CARVALHO J, FERREIRA C, et al. Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, **24**(5): 1307 - 1348.
- [4] DA FONSECA A V, SILVA S R, CRUZ N. Geotechnical characterization by in situ and lab tests to the back analysis of a supported excavation in Metro do Porto[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, **28**(3): 251 - 264.
- [5] 安然, 黎澄生, 孔令伟, 等. 花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 109 - 116. (AN Ran, LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, et al. Effects of drilling disturbance and unloading lag on in-situ mechanical characteristics of granite residual soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 109 - 116. (in Chinese))
- [6] 温勇, 杨光华, 汤连生, 等. 广州地区花岗岩残积土力学特性试验及参数研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 209 - 215. (WEN Yong, YANG GUang-hua, TANG Lian-sheng, et al. Tests and parameters study of mechanical properties of granite residual soil in Guangzhou area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 209 - 215. (in Chinese))
- [7] 安然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 确定残积土原位  $G$ - $\gamma$  衰减曲线的建议方法与适宜性分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(12):

- 4429 - 4436. (AN Ran, KONG Ling-wei, LI Cheng-sheng, et al. A proposed method to determine in-situ shear modulus and shear strain decay curves of granite residual soil and its suitability analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(12): 4429 - 4436. (in Chinese))
- [8] 郑敏洲, 简文彬, 吴茂明. 花岗岩残积土边坡稳定性可靠度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(增刊 2): 5337 - 5340. (ZHENG Min-zhou, JIAN Wen-bin, WU Mao-ming. Reliability analysis of stability of granite residual soil slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(S2): 5337 - 5340. (in Chinese))
- [9] BAI Wei, KONG Ling-wei, GUO Aiguo, et al. Stress-strain-electrical evolution properties and damage evolution equation of lateritic soil under uniaxial compression[J]. *ASTM international Journal of Testing and Evaluation*, 2017, **45**(4): 1247 - 1260.
- [10] 沈珠江. 莫尔-库仑材料的屈服理论[J]. *水利水运科学研究*, 1981(2): 1 - 9. (SHEN Zhu-Jiang. A yield theory for Mohr-Cloumb material[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1981(2): 1 - 9. (in Chinese))
- [11] DRUCKER D C, PRAGER W. Soilmechanics and plastic analysis or limit design[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, **10**: 157 - 165.
- [12] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, **96**(SM5): 1629 - 1653.
- [13] LIU M D, CARTER J P. A structured Cam clay model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(1): 1313 - 1332.
- [14] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(5): 451 - 469.
- [15] 黄文熙. 土的弹塑性应力-应变模型理论[J]. *岩土力学*, 1979, **1**(1): 1 - 20. (HUANG Wen-xi. Theory of Elastoplastic stress-strain model of soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1979, **1**(1): 1 - 20. (in Chinese))
- [16] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型[J]. *岩土工程学报*, 1993, **15**(3): 21 - 28. (SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model of cemented clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **15** (3): 21 - 28. (in Chinese))
- [17] 殷德顺, 王保田, 王云涛. 不同应力路径下的邓肯-张模型模量公式[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(9): 1380 - 1385. (YIN De-shun, WANG Bao-tian, WANG Yun-tao. Tangent elastic modulus of Duncan-Chang model for different stress paths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(9): 1380 - 1385. (in Chinese))
- [18] 李广信. 用旁压试验求 Duncan 双曲线模型的参数[J]. *勘察科学技术*, 1986(5): 25 - 29. (LI Guang-xin. The parameters of Duncan hyperbolic model based on pressuremeter test[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1986(5): 25 - 29. (in Chinese))
- [19] 刘小生, 汪小刚, 马怀发, 等. 旁压试验反演邓肯-张模型参数方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(5): 601 - 606. (LIU Xiao-sheng, WANG Xiao-gang, MA Huai-fa, et al. Study on back-analysis method of constitutive parameters for Duncan-Chang model based on in-situ pressuremeter tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(5): 601 - 606. (in Chinese))
- [20] 刘军定, 李荣建, 孙 萍, 等. 基于结构性黄土联合强度的邓肯-张非线性本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(增刊 1): 124 - 128. (LIU Jun-ding, LI Rong-jian, SUN Ping, et al. Duncan-Chang nonlinear constitutive model based on joint strength theory of structural loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(S1): 124 - 128. (in Chinese))
- [21] 李晶晶, 孔令伟, 穆 坤. 膨胀土原位孔内剪切试验与强度响应特征[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(2): 453 - 461. (LI Jing-jing, KONG Ling-wei, MU Kun. In-situ borehole shear test on expansive soil and its strength characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(2): 453 - 461. (in Chinese))
- [22] MILLER G A, KHOURY C N. Observations from Borehole Shear Testing in Unsaturated Soil[M]// *Unsaturated Soils: Research and Applications*. Napoli: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [23] HANDY R L. Borehole shear test and slope stability[C]// *Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering*, ASCE, 2008, New York.
- [24] LUTENEGGER A J, HALLBERG G R. Borehole shear test in geotechnical investigations[J]. *American Society for Testing and Materials*, 1981: 566 - 578.
- [25] ZHANG X W, KONG L W, YIN S, et al. Engineering geology of basaltic residual soil in Leiqiong, southern China[J]. *Engineering Geology*, 2017, **220**: 196 - 207.
- [26] RAHARDJO H, SATYANAGA A, LEONG E C, et al. Variability of residual soil properties[J]. *Engineering Geology*, 2012(141/142): 124 - 140.
- [27] ZHAI Q, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Variability in unsaturated hydraulic properties of residual soil in

- Singapore[J]. Engineering Geology, 2016, **209**: 21 - 29.
- [28] AN R, KONG L W, GUO A G, et al. A proposed method to determine in-situ shear modulus and shear strain decay curves in different structured soils[C]// 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, 2019, Glasgow.
- [29] 方 谦, 洪汉烈, 赵璐璐, 等. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义[J]. 地球科学, 2018, **43**(3): 753 - 769. (FANG Qian, HONG Han-lie ZHAO Lu-lu, et al. Climatic Implication of authigenic minerals formed during pedogenic weathering process[J]. Earth Science, 2018, **43**(3): 753 - 769. (in Chinese))
- [30] CERYAN S, ZORLU K, GOKCEOGLU C, et al. The use of cation packing index for characterizing the weathering degree of granitic rocks[J]. Engineering Geology, 2008, **98**(1/2): 60 - 74.
- [31] 吴蓓娟, 彭 渤, 张 坤, 等. 黑色页岩化学风化程度指标研究[J]. 地质学报, 2016, **90**(4): 818 - 832. (WU Bei-juan, ZHOU Shang-zhe, ZHANG Kun. A new chemical index of identifying the weathering degree of black shale[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, **90**(4): 818 - 832. (in Chinese))
- [32] 朱思军, 杨光华, 陈富强, 张玉成. 十字板剪切试验在珠三角深厚软土基坑工程中的应用[J]. 广东水利水电, 2016(6): 28 - 33. (ZHU Si-jun, YANG Guang-hua, CHEN Fu-qiang, et al. Application of the vane shear test in excavation engineering in deep and soft soil in the pearl river delta[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2016(6): 28 - 33. (in Chinese))
- [33] 王立忠, 赵志远, 李玲玲. 考虑土体结构性的修正邓肯—张模型[J]. 水利学报, 2004, **35**(1): 83 - 89. (WANG Li-zhong, ZHAO Zhi-yuan, LI Ling-ling. Non-linear elastic model considering soil structural damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, **35**(1): 83 - 89. (in Chinese))

## 2020年（第九届）国际桥梁与隧道技术大会暨展览会

“2020（第九届）国际桥梁与隧道技术大会”将于2020年9月在广州举办。届时大会将围绕国家重大工程规划建设、智能运维、安全保障等一系列关键问题进行深入研讨，推动前沿科学研究和信息技术融合创新，加快新技术、新工艺、新装备的转化应用，促进我国桥隧基础设施产业转型升级和高质量发展，努力将我国建设成为“桥隧强国”，提升国际影响力和知名度。值此机会，组委会诚邀业界专家代表拨冗莅临，共襄盛会！

### 一、会议主题

创新引领，建养并重

### 二、时间和地点

时间：2020年9月23日—25日

地点：广州

### 三、组织机构

指导单位：中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会

主办单位：上海市土木工程学会、同济大学、广东省公路学会、广东省土木建筑学会、江苏省土木建筑学会、上海市工程建设质量管理协会

官方网站：[www.IBTCevents.com](http://www.IBTCevents.com)

### 四、会议内容

- (1) 粤港澳大湾区战略交通规划
- (2) 川藏铁路建设关键技术及重大挑战
- (3) 深中通道关键技术与创新
- (4) 重大桥隧工程前沿热点介绍
- (5) 桥隧设计和施工技术创新
- (6) 拟在建桥隧工程最新进展
- (7) 桥隧工程智能运维和安全保障
- (8) 桥隧工程结构安全与健康监测
- (9) 新技术、新材料在桥隧建设和运维中的应用
- (10) 大跨度、特殊结构桥隧施工工艺与装备
- (11) 既有桥隧工程病害整治技术与装备
- (12) 桥隧工业化、信息化现状及趋势

### 五、组委会秘书处联系方式

联系人：王翔

联系电话：021-51757707

电子邮件：[xiang.wang@wintimechina.com](mailto:xiang.wang@wintimechina.com)。

（摘自《地基处理》）