



某滑坡滑带土应力-应变关系模型研究

唐正涛, 孙爱国, 熊荣军, 李红, 刘玉龙

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 通过巴东地区某滑坡滑带土的一系列物理性质试验以及不同剪切速率的滑带土重塑样的三轴固结不排水剪试验, 确定了滑带土的岩土分类, 分析了滑带土试样的应力-应变关系, 利用试验数据对邓肯-张 (Duncan-Chang) 本构模型进行了曲线拟合, 通过分析验证, 认为 Duncan-Chang 模型的双曲线型关系能够较好地反映该滑坡滑带土的逐渐硬化类型的应力-应变特性, 可以为该类型滑坡的数值模拟研究提供参考。

关键词: 滑带土; 固结不排水剪切; Duncan-Chang 模型; 应力-应变关系

中图分类号: TU 432

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0156-06

Stress-strain relationship model about sliding-zone soil of landslide

TANG Zheng-tao, SUN Ai-guo, XIONG Rong-jun, LI Hong, LIU Yu-long

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: Based on a series of physical property tests and tri-axial consolidated undrained shear test of remodeling sample of sliding soil under different shear rates for the sliding-zone soil of a landslide in Badong area, this paper ascertains the soil classification of the sliding-zone soil, analyzes the stress-strain relationship about the sample of the sliding-zone soil and does the curve fitting of Duncan-Chang model using the experimental data. According to the analysis and validation, the paper considers that the hyperbolic relationship of Duncan-Chang model can better reflect the gradual hardening type of the type-strain characteristics about the sliding-zone soil of the landslide, and can provide reference for the numerical simulation study on the type of landslide.

Keywords: sliding-zone soil; consolidated undrained shear; Duncan-Chang model; stress-strain relationship

滑坡的一个重要特点就是它具有一个或多个相对明显的滑动带, 位于滑床与滑体之间, 是滑体沿之滑动、与滑床相接触的面^[1-2]。滑带土的物理力学性质, 是滑坡稳定性分析及评价的必要条件^[2], 而滑带土的应力应变状态对滑坡能否发生有着极为显著的影响。由于滑动带在滑坡稳定性中的作用非常重要, 国内外诸多研究人员先后对滑带土的应力应变特点进行了系统的研究^[3-9], 在滑带土的三轴压缩试验方面也取得了诸多研究成果, 并且三轴压缩试验能够较为真实地模拟滑

带土的实际应力应变状况, 而在基于三轴压缩试验基础上对滑带土应力-应变关系模型的研究相对较少。因此, 通过借助滑带土室内三轴压缩试验研究, 探索其应力-应变关系及模型, 对滑坡的预测预报及稳定性评价具有重要的实际应用价值。

1 研究内容

1) 对滑带土进行一系列常规的土工试验, 如颗分试验、击实试验及比重试验等, 得出并分析

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 唐正涛 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程勘测及试验检测工作。

滑带土的基本物理性质。

2) 研究三轴压缩试验的操作方法及操作步骤, 使样品的饱和度达到规定要求, 并尽量减小数据的离散性, 以得出合理的试验数据。

3) 对滑带土样品进行不同剪切速率的三轴固结不排水剪试验, 研究滑带土的应力-应变关系, 研究并选择合适的应力-应变关系的本构模型, 以

描述滑带土的应力-应变关系特征, 结合滑坡区实际的变形情况, 为滑坡的预测预报提供依据。

2 滑带土物理性质试验

通过对滑带土进行一系列物理试验, 得出滑带土的天然密度、天然含水率、孔隙比、比重等物理参数 (表 1)。

表 1 滑带土物理参数

天然含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比重 G_{sm}	孔隙比 e	C_u	C_c	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	I_p	I_L	$\omega_{opt}/\%$	$\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
13.7	2.28	2.701 4	0.344	>5	<1	12.3	24.9	12.6	0.11	10.9	1.949

从表 1 分析可得出, $C_c < 1$ 且 $C_u > 5$, 判定该滑带土为级配不良的非均粒土, 同时根据曲率系数 C_c 和不均匀系数 C_u 还可以评定该滑带土为渗透性较好的土。并且 $10 < I_p \leq 17$, $0 < I_L \leq 0.25$, 根据 GB 50021—2009 《岩土工程勘察规范》, 天然状态下该滑带土可定名为含碎石角砾的硬塑粉质黏土。

3 滑带土三轴固结不排水剪切试验

三轴剪切试验仪能较好地控制排水条件并且可以量测试验过程中试样内孔隙水压力的变化, 试样的破裂面在强度最弱处, 而不是人为确定, 应力状态也比较明确。基于滑带土实际处于三向应力状态的考虑, 所以采用三轴剪切试验, 能够提供三向应力, 以尽量模拟实际情况, 具有实际的参考价值。

3.1 试验方案

按照最大干密度 1.949 g/cm^3 和最优含水率 10.9% 控制制样, 试样的规格为高度 $H = 8 \text{ cm}$, 底面积 $S = 12 \text{ cm}^2$, 体积 96 cm^3 , 并且一组试验的试样一次性制成。

对黏性土, 固结不排水剪试验剪切应变速率宜为 $0.05 \sim 0.1 \text{ \%}/\text{min}$, 即 $0.04 \sim 0.08 \text{ mm}/\text{min}$, 试验按应变速率 $0.1 \text{ \%}/\text{min}$ ($0.08 \text{ mm}/\text{min}$)、 $0.06 \text{ \%}/\text{min}$ ($0.048 \text{ mm}/\text{min}$)、 $0.075 \text{ \%}/\text{min}$ ($0.06 \text{ mm}/\text{min}$) 分别做 2 组数据较合理、较成功的试验, 共 6 组; 每组至少做 3 个试样, 固结围压分别为 200、300、

400 kPa, 见表 2。

表 2 固结不排水剪试验方案

应变速率/ $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	组数	固结围压/kPa
0.048	2 组	200
		300
		400
0.06	2 组	200
		300
		400
0.08	2 组	200
		300
		400

3.2 试验数据可靠性分析

对试验中的试样都进行了真空抽气饱和与反压饱和, 并量测了孔压系数 B 值, 全部大于 0.95 , 说明试样都达到了饱和要求, 采用的试验有 3 组, 见表 3, 实测含水率在 $\pm 1\%$ 范围内。为避免不同设备之间的误差, 所有试验均在同一台设备上进行。试验结果可靠, 完全可以为数值模拟、统计分析等研究所采用。

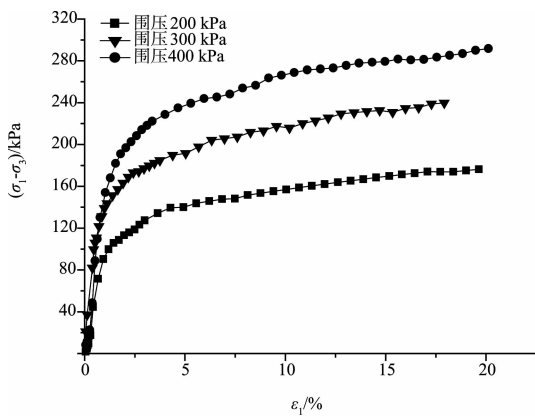
表 3 试样的孔隙压力系数 B 值

试验编号	剪切速率/ $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	试样编号	B 值
HTP-2	0.048	5-4	0.99
		5-2	0.98
		5-7	0.99
HTP-3	0.06	6-1	0.96
		6-2	0.96
		6-3	0.98
HTP-5	0.08	7-3	0.98
		7-4	0.96
		7-5	0.96

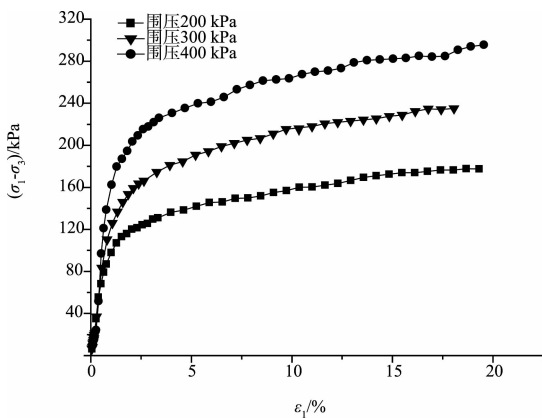
3.3 主应力差与轴向应变的关系

在一部分剪切试验开始后，由于试样帽与活塞接触不够充分，导致剪切初始一小阶段的数据出现误差，因此先对该部分的试验数据进行校正。分别对3个剪切速率0.08、0.06、0.048 mm/min条件下各组试验的主应力差与轴向应变的关系曲线在不同围压下分别进行绘制（图1）。通过对图1中的曲线分析可知，该滑坡重塑滑带土的应力-应变有如下特性：

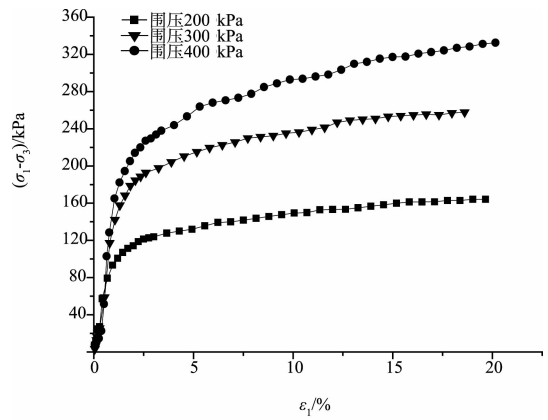
1) 试验初始阶段主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 随着轴向应变 ϵ_1 的增加而基本上呈线性迅速增大，说明在该阶段试样接近线弹性变形，但该线弹性段很小，轴向应变仅有1%左右。在应变1%之后，试样进入了屈服阶段，有研究人员认为，在该阶段由应力增加引起的应变中，既有可恢复的弹性变形，也有显著的不可恢复的塑性变形，试样表现为弹塑性变形。



a) HTP-2(剪切速率0.048 mm/min)



b) HTP-3(剪切速率0.06 mm/min)



c) HTP-5(剪切速率0.08 mm/min)

图1 主应力差与轴向应变关系曲线

2) 主应力差随着轴向应变的增加而一直增大，在曲线上呈现出先迅速上升后缓慢上升的趋势，没有出现明显的峰值点。在剪切过程中试样结构变得更加紧密，呈剪缩状态（图2），因而强度也在提高，表现出应变硬化特性。并且在同一轴向应变时，主应力差随着围压的增大而增大，只是在个别试验初始阶段会出现少量的偏差，这可能与同一组试样中因制样引起的差异性、试样饱和度的细小差别及试验开始后初始阶段试样帽与活塞接触的松紧等因素有关，但不影响总体趋势。

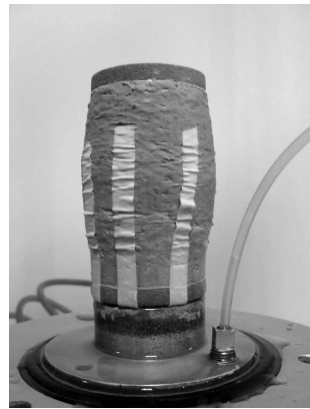


图2 剪缩后的试样

4 滑带土应力-应变关系模型

土体本构关系的探讨和研究日益广泛和深入，也提出了很多本构模型，据这些模型所采用理论的不同，大体可分为弹性模型和弹塑性模型^[10]。其中比较著名且在实际工程中得到广泛应用的有

Duncan-Chang 模型^[11] 和 Lade-Duncan 模型^[12] 等。

4.1 邓肯-张 (Duncan-Chang) 模型

康纳 (Kondner)^[13-15] 1963 年通过大量土的三轴试验, 提出可以用双曲线拟合出一般土的三轴试验 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线, 见图 3 a), 即当 σ_3 为常量时有:

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

式中: a 、 b 为试验常数。对于常规三轴压缩试验, $\varepsilon_a = \varepsilon_1$ 。因此, 式(1)也可以改写为:

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (2)$$

也就是说将图 3a) 所反映的双曲线型曲线改成如式(2)所反映的试验曲线, 如图 3b), 则二者呈线性关系。其中, a 、 b 分别是直线的截距和斜率。

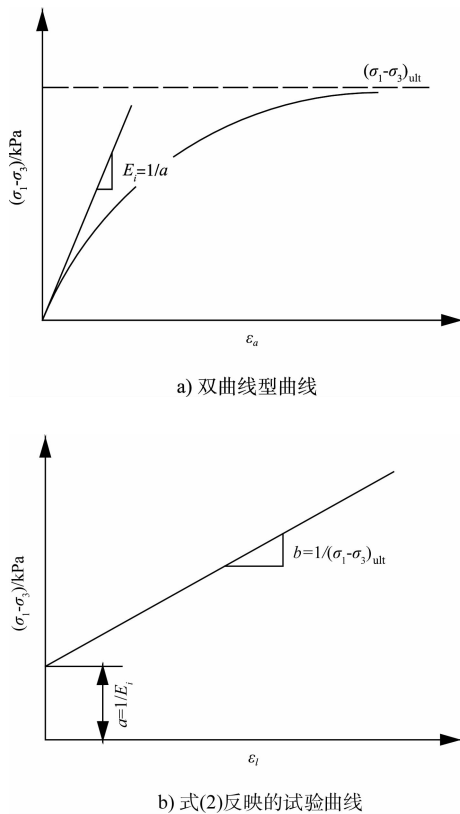


图 3 双曲线型的应力-应变关系

后来 Duncan 和 Chang^[16] 建议将式(1)改写成:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad (3)$$

式中: E_i 为起始弹性模量, 见图 3, 则有:

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (4)$$

$$b = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (5)$$

式中: R_f 称为破坏比, 其定义为:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (6)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏时主应力差; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的极限值。

试验曲线随着试验时围压 σ_3 的不同也将有所差别。Duncan 和 Chang 认为, 这些曲线都可以用式(3)表示, 只是其中的 E_i 值随 σ_3 而变动, 建议采用:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (7)$$

式中: p_a 是大气压力 ($p_a = 101.4 \text{ kPa}$); K 、 n 是试验常数。对于不同土类, K 值可能小于 100, 也可能大于 3 500, n 值一般在 0.2 ~ 1.0。

根据莫尔-库伦强度准则, 有

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (8)$$

则
$$b = \frac{R_f (1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \quad (9)$$

将式(7)、(8)代入式(3), 可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi) \varepsilon_1}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi + R_f K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (1 - \sin \phi) \varepsilon_1} \quad (10)$$

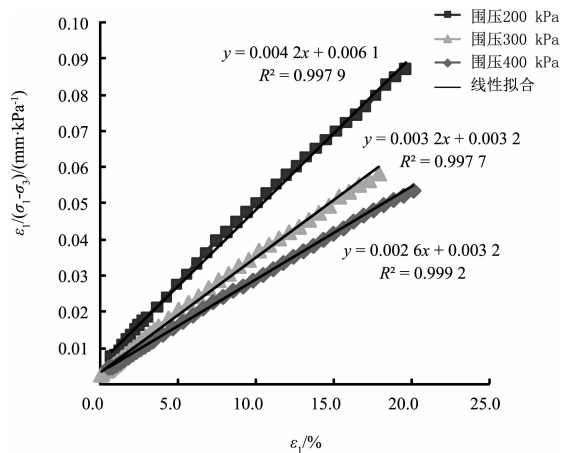
4.2 模型参数的确定

根据图 1 所示, 此滑带土的应力-应变曲线主应力差随着轴向应变的增加而不断增大, 最终趋近于平行横轴的一条渐近线 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$, 呈现逐渐硬化类型的应力-应变关系, 比较符合 Duncan-Chang 模型所反映的双曲线型关系, 见图 3。

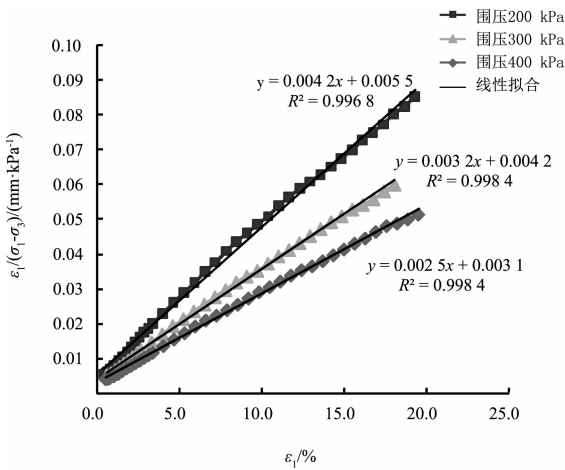
式(10)中共有 5 个参数, 分别是 K 、 n 、 c 、 ϕ 、 R_f , 其中 c 、 ϕ 值已经通过试验获得, 因此只需研究 K 、 n 、 R_f 共 3 个参数的确定方法。

4.2.1 E_i 及 R_f 值的确定

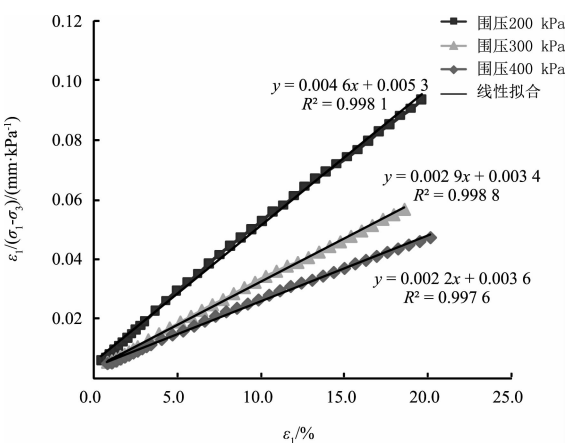
根据式(2)及图3b)可知, $\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - \varepsilon_1$ 的关系应该近似为直线, 如图4所示, 对两者关系进行了线性拟合。该直线与 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 轴的截距



a) HTP-2(剪切速率0.048 mm/min)



b) HTP-3(剪切速率0.06 mm/min)



c) HTP-5(剪切速率0.08 mm/min)

图4 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

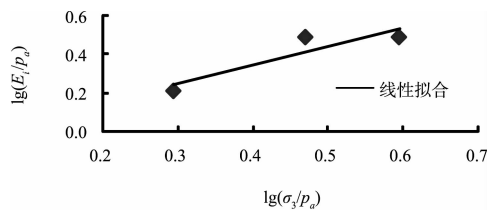
a 值即为 $1/E_i$, 然后相应的 E_i 值即可求出; 该直线的斜率即为 b 值, 确定 b 值后再根据式(9)就可得到相应的 R_f 值, 见表4。

表4 模型参数

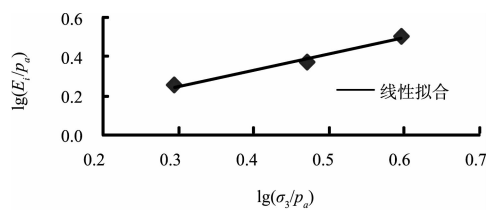
试验编号	剪切速率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	围压 σ_3/kPa	R_f	K	n
HTP-2	0.048	200	0.771 1	0.897 8	0.974 1
		300	0.740 1	0.897 8	0.974 1
		400	0.725 3	0.897 8	0.974 1
HTP-3	0.06	200	0.722 7	1.011 3	0.816 5
		300	0.725 6	1.011 3	0.816 5
		400	0.703 6	1.011 3	0.816 5
HTP-5	0.08	200	0.840 3	1.320 1	0.593 2
		300	0.721 8	1.320 1	0.593 2
		400	0.693 2	1.320 1	0.593 2

4.2.2 K 及 n 值的确定

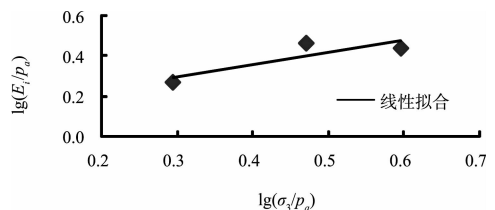
E_i 值确定后, 再绘出 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的双对数坐标关系曲线, 同样也可以发现二者近似成线性关系, 同样也进行了线性拟合, 如图5所示, n 、 $\lg K$ 分别表示直线的斜率和截距, 相应的值见表4。



a) HTP-2(剪切速率0.048 mm/min)



b) HTP-3(剪切速率0.06 mm/min)



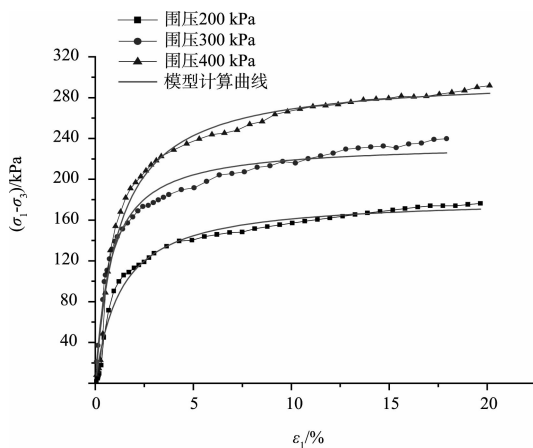
c) HTP-5(剪切速率0.08 mm/min)

图5 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

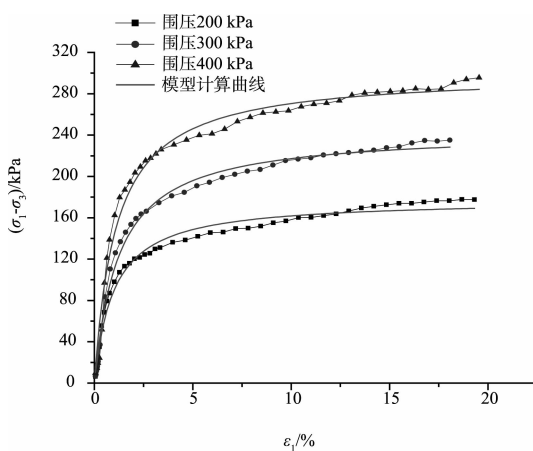
4.3 模型的验证及评价

由于该滑带土的逐渐硬化类型的应力-应变关系比较符合 Duncan-Chang 模型所反映的双曲线型关系, 所以利用试验数据对 Duncan-Chang 模型中的参数进行了拟合确定。

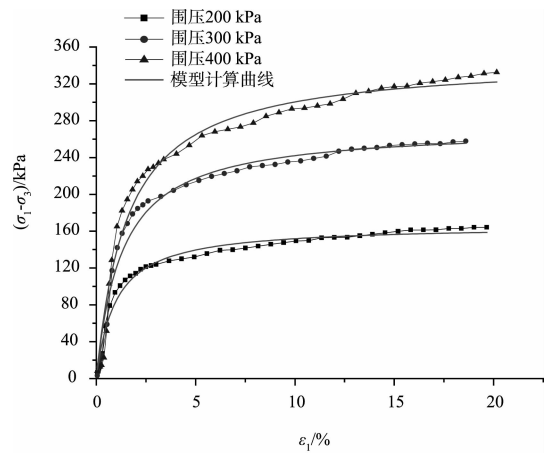
结合已经确定的模型参数 K 、 n 、 c 、 ϕ 、 R_f 和模型公式(10), 分别对试验 HTP-2、HTP-3、HTP-5 中滑带土的应力-应变关系进行了模型计算, 并与实际的试验曲线进行比较, 如图 6 所示, 从图中可以看出, 模型计算曲线与试验曲线吻合得比较好, 计算得出的相关系数都在 97% 以上, 表明 Duncan-Chang 模型的双曲线型关系能够较好地反映此粉质黏土类的滑带土的逐渐硬化类型的应力-应变特性。



a) HTP-2



b) HTP-3



c) HTP-5

图 6 应力-应变试验曲线与模型计算曲线比较

5 结论

1) 对于三轴固结不排水剪试验的主应力差随轴向应变变化的关系曲线, 在轴向应变 1% 以内接近于线弹性变形, 在应变 1% 之后, 主应力差随着轴向应变的增加而一直增大, 呈现出逐渐硬化的应变特性。在剪切过程中试样结构变得更加紧密, 表现为剪缩性。

2) 通过模型计算和验证, 结果表明, Duncan-Chang 模型计算曲线与试验曲线吻合得比较好, 计算得出的相关系数都在 97% 以上, 表明 Duncan-Chang 模型的双曲线型关系能够较好地反映此粉质黏土类的滑带土的逐渐硬化类型的应力-应变特性, 可以为此类滑坡的数值模拟研究提供参考。

参考文献:

- [1] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [2] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] Skempton A W. First-time slides in over-consolidated clays[J]. Geotechnique, 1970, 20(3): 320-324.
- [4] Skempton A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Geotechnique, 1985, 35(1): 3-18.