

卸荷土体本构模型选用及其参数的确定—— 以港珠澳大桥拱北隧道明挖段基坑为例

柳志平¹, 刘泉声¹, 程勇², 贾瑞华², 蒋景东¹

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 对卸荷土体工程性质的认识是解决基坑开挖工程中问题的关键, 港珠澳大桥连接线珠海拱北隧道处于海相软黏土地层, 基坑开挖深度大, 断面宽, 研究该基坑土体在卸荷应力路径下的土体本构模型及其参数, 对工程设计有着重要的意义。取现场土样, 选定海相沉积的淤泥质土和可塑状粉质黏土作为研究对象, 测定其 K_0 值, 采用应力控制式三轴仪, 在围压 100, 200, 400, 600 kPa 状态下进行 K_0 排水固结, 对固结完成的土样进行不同应力路径的卸荷试验, 根据应力-应变关系曲线的非线性特征, 采用邓肯张 $E-\mu$ 模型作为该基坑土体的本构模型, 依照试验结果, 分别确定邓肯张 $E-\mu$ 模型的 8 个基本参数, 为基坑有限元分析提供重要依据。

关键词: 基坑; 卸荷试验; 邓肯张模型; 模型参数

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0197-06

作者简介: 柳志平(1985-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 从事基坑设计及地基处理等方面研究。E-mail: lzp0313@whu.edu.cn。

Selection and parametric determination of constitutive model for unloading soil—Case study of foundation pit at open excavation section of Gongbei tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macau Bridge

LIU Zhi-ping¹, LIU Quan-sheng¹, CHENG Yong², JIA Rui-hua², JIANG Jing-dong¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The understanding of engineering properties of unloading soil is the key to solving the problems in excavation of foundation pits. Gongbei tunnel in Zhuhai of Hongkong-Zhuhai-Macau Bridge is located in marine facies soft clay. The excavation depth and width of its foundation pit are both very large. The researches on of constitutive model and model parameters of the foundation pit soil under unloading stress path are of great significance to the engineering design. The marine faces sediment-mucky soil and plastic silty clay are studied so as to determine their K_0 coefficients. K_0 drained consolidation experiments are performed under the confining pressures of 100, 200, 400 and 600 kPa by using the stress controlled triaxial apparatus. Unloading tests with various stress paths are conducted after the soil samples are completely consolidated. According to the non-linear feature of stress-strain relationship curve, the Duncan-Zhang $E-\mu$ model is adopted as the constitutive model for soil. According to the experimental results, 8 basic parameters are determined, and this study provides important basis for the FEM analysis of the foundation pit.

Key words: foundation pit; unloading test; Duncan-Zhang model; model parameter

0 引言

港珠澳大桥是解决香港与内地(特别是珠江西岸地区)及澳门两岸三地之间的陆路客货运输要求的重要交通枢纽, 是建立连接珠江东西两岸大珠江三角洲地区、辐射泛珠江三角洲地区新的陆路运输通道。港珠澳大桥珠海连接线工程是港珠澳大桥工程的重要组成部分。拱北隧道作为珠海连接线的一部分, 明挖暗埋的施工方法占主要部分。明挖段隧道基坑长达几公

里, 最深处超过 20 m, 最宽处超过 30 m, 属于典型的狭长型基坑。研究土体在开挖状态下的力学及变形特征, 确定合适的本构模型及模型参数, 对基坑设计

基金项目: 2010 年度教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT1031); 中交建设股份特大科技项目“港珠澳大桥珠海连接线隧道工程建设关键技术研究”; 中央高校基本科研业务费专项资金(20112100202006)

收稿日期: 2012-08-24

具有重大的意义。

Lambe^[1]提出了土体的应力路径的方法, 曾国熙等^[2]研究表明受应力路径影响的正常固结黏土的应力应变曲线可以用双曲线拟合, 何世秀等^[3]进行了普通三轴仪的卸荷试验和真三轴卸荷试验, 对试验结果进行对比分析表明, 采用真三轴的卸荷试验结果更接近实际工程。周秋娟^[4]对原状土样进行了侧向卸荷的三轴剪切试验, 结果表明: 软土在 $p - q$ 平面上的屈服条件满足 $D - P$ 模型的屈服条件, 并建立了卸荷条件下的变形模型计算公式。

本文取现场原状土在 K_0 固结完成后, 对土样进行不同应力路径的卸荷试验, 选用合适的土体本构模型, 并根据试验结果求出模型参数, 为工程设计提供指导性帮助。

1 室内试验

1.1 土样的选取及土体基本参数

根据拱北段地质断面图和隧道位置图, 选取比较典型的两层土(海相沉积的淤泥质土和可塑状粉质黏土)作为研究对象, 如表 1 所示。

表 1 土样的基本参数

Table 1 Basic parameters of soil samples

编号	名称	深度 /m	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	K_0
③-1	海相沉积的淤泥质土	25.5 ~ 29.2	46.90	20.70	26.2	0.59
③-2	可塑状粉质黏土	19.4 ~ 22.5	48.10	23.60	24.5	0.56

1.2 试验仪器

卸荷应力试验是在中科院武汉岩土力学研究所应力控制式三轴仪上进行的, 该仪器是在国家电力公司南京电力自动化设备总厂 SJ-1A.G 型应变控制式三轴仪基础上改装而成, 如图 1 所示。试验中将应变控制式三轴仪改装为应力控制式三轴仪, 主轴应力通过施加(卸载)砝码来实施。



图 1 自制应力控制式三轴仪

Fig. 1 Modified stress controlled triaxial apparatus

1.3 试验方案

根据现场地质条件, 确定本试验采用 K_0 固结排水方式进行先期固结。固结荷载分 5 次施加, 研究两种土层在围压 100, 200, 400, 600 kPa 四种情况下进行先固结后卸荷试验, 卸荷方式为: ①轴向荷载不变, 径向卸荷, 即: σ_1 不变, 改变 σ_3 , 用 $UU_{0.0}$ 表示; ②轴向加荷、径向卸荷, 卸加荷量之比为 1.0, 即: $\sigma_1 + \sigma_3 = K$, K 为固定值, 采用 $UU_{1.0}$ 表示, 如表 2 所示。

表 2 试验说明

Table 2 Experimental instruction

土层编号	名称	试验编号	试验安排
③-1	海相沉积的淤泥质土	$UU_{1.0}$	轴向加荷、径向卸荷, 卸加荷量之比为 1.0
③-2	可塑状粉质黏土	$UU_{0.0}$	轴向荷载不变, 径向卸荷

1.4 试验结果

从图 2~9 可以看出, 在两种应力路径下, 不同围压状态的应力 - 应变曲线形状相似, 均近似呈双曲线关系。且当土的应力或应变达到一定值后, 土体的应力 - 应变关系曲线表现出非线性。应力应变关系曲线初始斜率随 K_0 固结压力的增加而增加, 这是由于土体的压缩性跟固结压力的增大而减小。同一种土样由于固结压力和应力路径的不同, 破坏应变也不同, 在土体卸荷排水状态下, 即使产生较小的应变也能导致土体破坏, 这一点充分说明了工程中实测的围护墙后土压力值在较小的侧向变形条件下能接近主动土压力的情况, 如果不能较好的控制基坑支护结构的水平位移, 基坑周边上部土体较容易出现破坏裂痕^[5]。

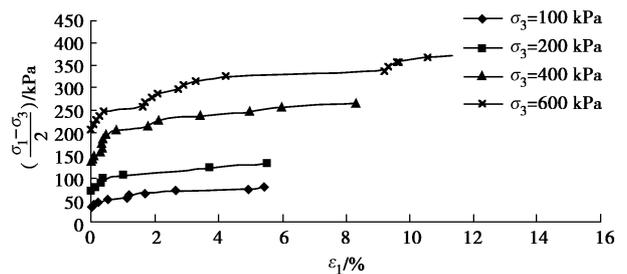


图 2 $UU_{1.0}$ 差值应力与轴向应变关系

Fig. 2 Relation between $UU_{1.0}$ differential stress and axial strain

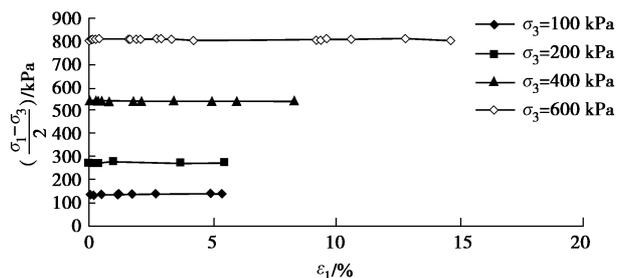


图 3 $UU_{1.0}$ 平均应力与轴向应变关系

Fig. 3 Relation between $UU_{1.0}$ mean stress and axial strain

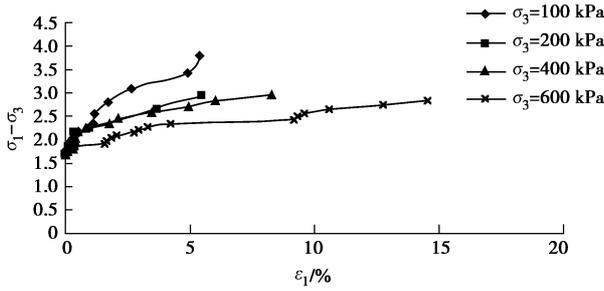


图4 UU_{1.0}应力比与轴向应变关系

Fig. 4 Relation between UU_{1.0} stress ratio and axial strain

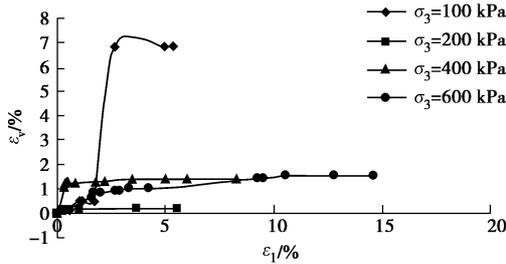


图5 UU_{1.0}轴向应变与体应变关系

Fig. 5 Relation between UU_{1.0} axial strain and volumetric strain

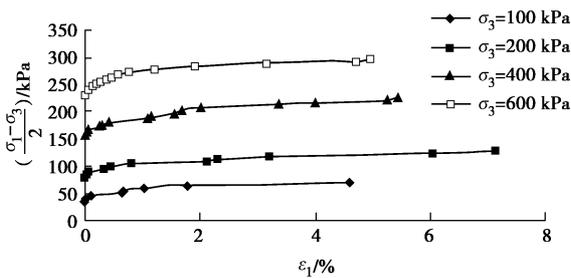


图6 UU_{0.0}差值应力与轴向应变关系

Fig. 6 Relation between UU_{0.0} differential stress and axial strain

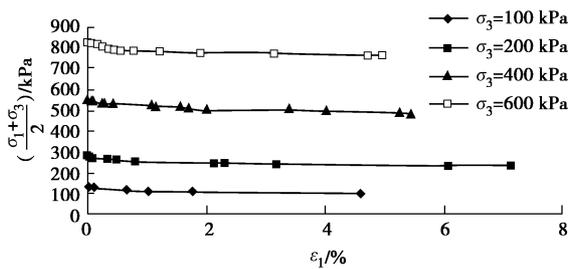


图7 UU_{0.0}平均应力与轴向应变关系

Fig. 7 Relation between UU_{0.0} mean stress and axial strain

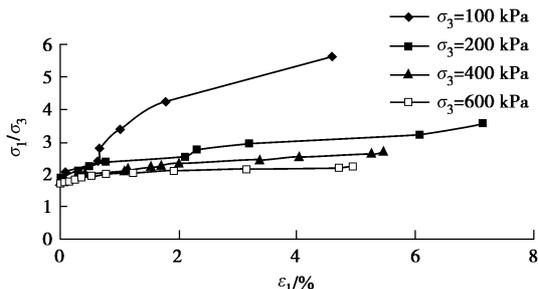


图8 UU_{0.0}应力比与轴向应变关系

Fig. 8 Relation between UU_{0.0} stress ratio and axial strain

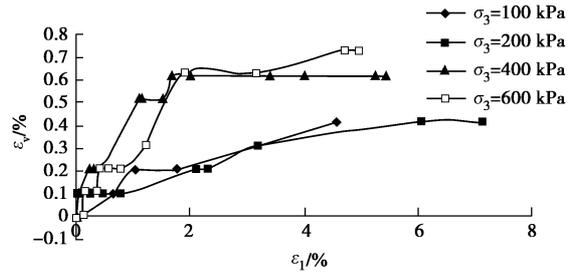


图9 UU_{0.0}轴向应变与体应变关系

Fig. 9 Relation between UU_{0.0} axial strain and volumetric strain

2 土体本构方程选用及模型参数的确定

根据第一部分试验及其结果分析: 土体应力应变关系曲线的非线性。结合使用性, 本基坑的数值分析本构关系采用邓肯张模型。

2.1 邓肯张 E-μ 模型^[6]

(1) 双曲线应力应变关系

Kondner等在1963年提出了凝聚性和非凝聚性土的应力应变关系双曲线方程:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{E_i \varepsilon_1}{(1/E_i) + [\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}]} \quad (1)$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 表示为主应力差; ε_1 为轴向应变; E_i 为初始模量, 是双曲线初始点的斜率; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为主应力差极限, 是应变趋于无限大的主应力差。

(2) 初始模量

Janbu在1963年指出, 凝聚土和非凝聚土的初始模量都是侧限压力的指数函数, 可表示为

$$E_i = K P_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (2)$$

式中 P_a 为大气压; K 为无因次基数 (试验参数), 可能小于100, 也可能大于3500; n 为无因次指数 (试验参数), 一般在0.2~1.0之间。

(3) 抗剪强度

在实际工程要控制土体的应变。对于应变强化的土体, 通常认为应变达到15%~20%时达到屈服强度, 相对应的应力称为抗剪强度(在三轴试验中称为破坏应力差)即 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。当土体应力超过抗剪强度, 就认为发生了塑流。为方便判断是否发生塑流, 引入 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 和破坏比 R_f , 将它与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 相联系, 即

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (3)$$

式中, R_f 值小于1.0, 一般在1.0~0.5之间。

(4) 莫尔-库仑 (Mohr Coulomb) 准则

根据莫尔-库仑准则, 抗剪强度可以表示为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2(c \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

式中, c , φ 分别表示土体的黏聚力和内摩擦角。

(5) 切线模量

邓肯等1970年提出的土体非线性模型，表示为：

$$E_t = KP_a \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \left[1 - \frac{R_5(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(\cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi)} \right]^2 \quad (5)$$

(6) 应力发挥程度

在计算中，常使用应力发挥程度（也称应力水平） δ 来衡量土体发挥的程度

$$\delta = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (6)$$

当 $\delta < 1.0$ ，表示土体抗剪强度尚未充分发挥； $\delta = 1.0$ ，强度恰好完全发挥； $\delta > 1.0$ ，则土体发生塑流。 δ 值愈大，塑流变形愈大，但最大值不超过 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。可知，邓肯张 $E - \mu$ 模型具有8个参数，分别为 $K, n, R_f, c, \varphi, G, F, D$ 。

2.2 模型参数的确定

(1) c, φ 值可由普通三轴试验得到的莫尔-库仑强度包线确定：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (7)$$

(2) 由公式 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) = a + b \varepsilon_1$ 可知，当绘制 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线时，当进行线性拟合后，由该拟合直线可以确定 a, b 值， a 为该线纵坐标截距， b 为该线的斜率。根据 a, b 值依照式 (8)、(9) 可得出切线模量 E_t 和主应力差极限值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 。

$$E_t = 1/a \quad (8)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b \quad (9)$$

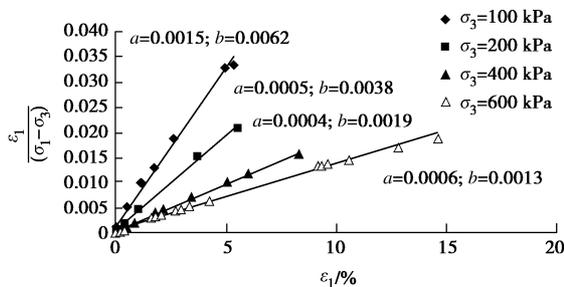


图 10 UU_{1.0} 路径 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系线及线性拟合关系
Fig. 10 Relation between UU_{1.0} path $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1 and its linear fitting

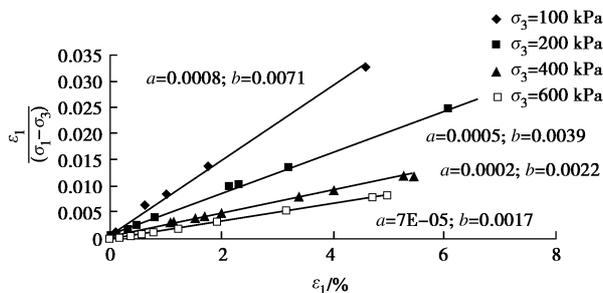


图 11 UU_{0.0} 路径 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系线及线性拟合关系
Fig. 11 Relation between UU_{0.0} path $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1 and its linear fitting

(3) 根据关系式 $E_t = KP_a (\sigma_3 / P_a)^n$ ，绘制 $\lg E_t - \lg (\sigma_3 / P_a)$ 关系线，进行线性拟合后，由直线的截距及斜率可确定出参数 K, n 。

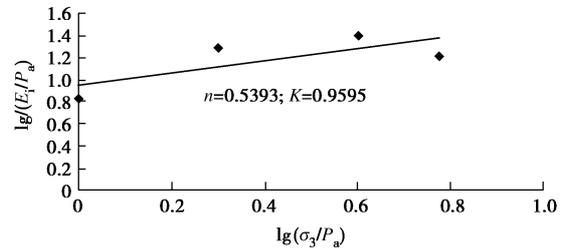


图 12 UU_{1.0} 路径 $\lg E_t - \lg \sigma_3$ 关系线
Fig. 12 Relation between UU_{1.0} path $\lg E_t$ and $\lg \sigma_3$

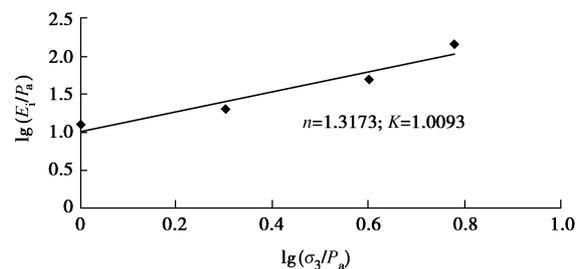


图 13 UU_{0.0} 路径 $\lg E_t - \lg \sigma_3$ 关系线
Fig. 13 Relation between UU_{0.0} path $\lg E_t$ and $\lg \sigma_3$

(4) 根据轴向应变和侧向应变进行线性拟合，直线的斜率为泊松比系数 D 。其中侧向应变根据体积应变与轴向应变之间的关系得出。

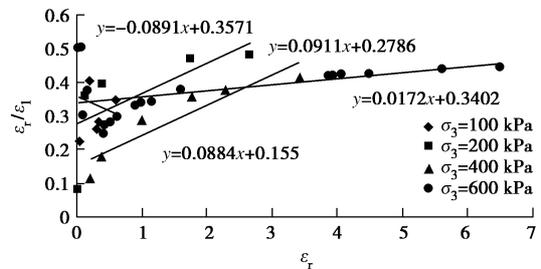


图 14 UU_{1.0} 轴线应变与侧向应变关系
Fig. 14 Relation between UU_{1.0} axial and lateral strain

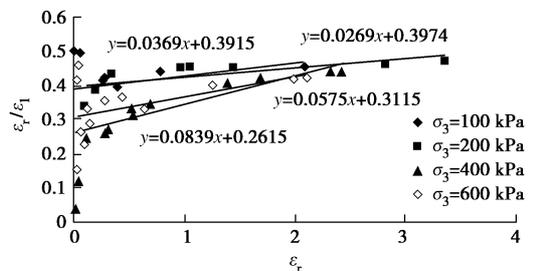


图 15 UU_{0.0} 轴线应变与侧向应变关系
Fig. 15 Relation between UU_{0.0} axial and lateral strain

(5) 根据式 $R_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 可求出 R_f ，其中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 可由式 (12) 求得， $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 可由式

表 3 模型参数汇总表

Table 3 Model parameters

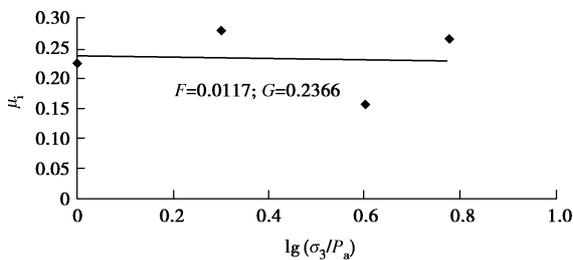
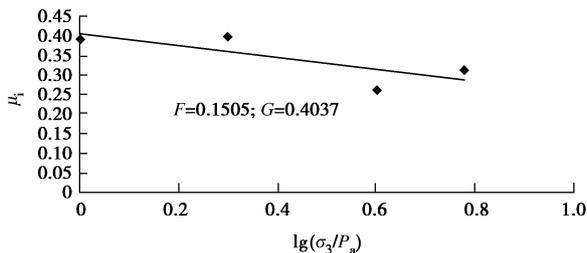
试样号	K	n	R_f	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	G	F	D
UU _{1.0}	0.9595	0.5393	0.12	10	9.4	0.2366	0.0117	0.1157
UU _{0.0}	1.0093	1.3173	0.23	31.9	10.4	0.4037	0.1505	0.0513

(13) 求得:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2(C \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi}, \quad (10)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b \quad (11)$$

(6) 绘制 $\mu_i - \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系线进行线性拟合后, 从拟合公式中可知 G, F 值, 其中 μ_i 为切线泊松比, G 为直线截距, F 为直线斜率。

图 16 UU_{1.0} 路径 $\mu_i - \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系Fig. 16 Relation between UU_{1.0} path μ_i and $\lg(\sigma_3/P_a)$ 图 17 UU_{0.0} 路径 $\mu_i - \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系Fig. 17 Relation between UU_{0.0} path μ_i and $\lg(\sigma_3/P_a)$

两种试样在两种应力路径下的模型参数计算结果见表3所示。

3 结 论

(1) 采用应力控制式三轴仪进行了原位土体不同应力路径下的卸荷试验, 得到了两种土体的应力应变关系曲线。

(2) 根据试验所得的应力应变关系曲线, 结合邓肯张 $E - \mu$ 模型的典型特征, 确定了选用该模型作为研究土体的本构方程。

(3) 结合试验数据进行处理分析, 逐步得到了邓肯张 $E - \mu$ 模型的 8 个参数, 为数值分析提供指导性帮助。

参考文献:

[1] LAMBE T W. Stress path method[J]. Journal of the soil

Mechanics and Foundation Division ASCE, 1967, **93**(SM6): 309 - 331.

- [2] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软黏土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1958, **10**(3): 13 - 22. (ZENG Guo-xi, PAN Qiu-yuan, HU Yi-feng. The behavior of excavation in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1958, **10**(3): 13 - 22. (in Chinese))
- [3] 何世秀, 韩高升, 庄心善, 等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学学报, 2003, **24**(1): 17 - 20. (He Shi-xiu, HAN Gao-sheng, ZHUANG Xin-shan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(1): 17 - 20. (in Chinese))
- [4] 周秋娟. 软土卸荷力学特性及软弱地层中基坑稳定性研究[D]. 广州暨南大学, 2009. (ZHOU Qiu-juan. Research on mechanical characteristics of soft soil under unloading and stability of foundation on weak underground[D]. Guangzhou Ji'nan University, 2009. (in Chinese))
- [5] 付建军. 二元地质环境下狭长型基坑围护体系与防渗体系研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010. (FU Jian-jun Study on Long-narrow Foundation Enclosure System and Impervious System in the Environment of Binary Geological[D]. Wuhan: Institute of Rock and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.6. (in Chinese))
- [6] 高江平, 李 芳. 黄土邓肯张模型有限元计算参数的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, **26**(2): 11 - 14. (GAO Jiang-ping, LI Fang. Experiments on parameters of Duncan Chang Model for Loess[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, **26**(2): 11 - 14. (in Chinese))
- [7] NAGARAJ T S M K, SRIDHARAN A. Incremental Loading device for stress path and strength testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, **4**(2): 35 - 46.
- [8] 矫德全, 陈俞炯. 土的各项异性和卸荷体缩[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 9 - 15. (JIAO De-quan, CHEN Yu-jiong. Anisotropy and volume-contraction of soil due to axial unloading in CD test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(4): 9 - 15. (in Chinese))
- [9] 李广信, 郭瑞平. 土的卸荷体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 158 - 161. (LI Guang-xin, GUO

- Rui-ping. Volume-contraction in unloading of shear tests and reversible Engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 158 - 161. (in Chinese))
- [10] 李广信, 武世锋. 土的卸荷体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 47 - 50. (LI Guang-xin, WU Shi-feng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [11] 常银生. 黏性土应力路径的试验研究与分析[D]. 南京: 南京工业大学, 2005. (CHANG Ying-sheng. Experimental study and analysis of stress path for cohesive soil[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [12] 刘国斌, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 18 - 23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 18 - 23. (in Chinese))
- [13] 刘国斌, 侯学渊. 软土的卸荷载应力 - 应变特性[J]. 地下工程与隧道, 1997(2): 16 - 23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading stress-strain characteristics of the soft clay[J]. Underground Engineering and Tunnel, 1997(2): 16 - 23. (in Chinese))
- [14] 童华炜, 邓祎文. 土体 K_0 固结 - 卸荷剪切试验研究[J]. 工程勘察, 2008(5): 13 - 16. (TONG Hua-wei, DENG Yi-wen. The experimental study on the K_0 consolidation-lateral unloading of the soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(5): 13 - 16. (in Chinese))
- [15] 童华炜. 考虑卸荷应力路径的基坑开挖土体变形研究[J]. 建筑科学, 2008, **21**(7): 35 - 38. (TONG Hua-wei. Researches on soil deformations in foundation pit excavation by triaxial unloading path test[J]. Building Science, 2008, **21**(7): 35 - 38. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)