

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.06.006

考虑初始结构性影响的吹填软土应力应变关系*

杨爱武^{①②} 张兆杰^① 孔令伟^②

(^①天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300384)

(^②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)

摘要 正常沉积的土体一般具有结构性。目前土的本构模型大多数是以非结构性土为基础建立和发展起来的,用它们直接描述结构性土体应力应变关系与实际出入很大。本文以修正的剑桥模型为基础,建立了可考虑初始结构性影响的结构性吹填软土应力应变关系。与修正的剑桥模型相比,只增加了参数的个数,但参数种类不变,其值通过室内常规试验即可求得。对天津滨海新区吹填场地经过真空预压处理后有结构强度的吹填土体进行了三轴试验,通过试验值与模拟值分析比较,初步验证了本文建立的模型可以考虑吹填软土初始结构性影响。

关键词 吹填软土 初始结构性 修正剑桥模型 结构屈服应力 应力应变关系

中图分类号:P642.13⁺1 文献标识码:A

STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF SOFT DREDGER FILL WITH ORIGINAL STRUCTURE

YANG Aiwu^{①②} ZHANG Zhaojie^① KONG Lingwei^②

(^①Tianjin Chengjian University, Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384)

(^②State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Normal sedimentary soil generally has the characteristics of original structures. Up to now, the most soil constitutive models are developed and built up based on the non-structure soils. If they are directly used to describe stress-strain relations of structure soils, a great difference can be produced between the measured value and the calculated value. This paper is based on the modified Cambridge model. The stress-strain relationship is established considering the influence of original structure property of the structural soft dredger fill. Compared with the modified Cambridge model, the new model only increases the number of parameters. They can be obtained through the conventional triaxial test. The types of parameters are unchanged. The triaxial compression test are conducted of the structural dredger fill which are treated by vacuum preloading method in Tianjin Binhai new area. Compared with the test value and the simulation value, the new model can consider the effect of original structural impact.

Key words Soft dredger fill, Original structure, Modified Cambridge model, Structure yield stress, Stress-strain relationship

* 收稿日期: 2013-06-10; 收到修改稿日期: 2014-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186, 41372291)和天津市科技发展计划项目(06YFSZSF04000)资助.

第一作者简介: 杨爱武(1971-), 男, 博士, 教授, 从事软土地基处理及土体微观结构研究. Email: Tulilab@163.com

0 引言

迄今为止,描述土体应力应变关系的本构模型数百种,基于临界状态土力学理论的修正剑桥模型提出第一个全面考虑土的压硬性和剪胀性的数学模型,被看作现代土力学的开端,但它以重塑土作为研究对象,未能考虑土体结构性的影响。自然界中土体一般都具有结构性^[1,2],因此建立在重塑土之上的本构关系就显得有其局限性。沈珠江^[3]曾指出“建立土体结构性的数学模型是21世纪土力学的核心问题”。目前对结构性土体的本构模型最主要的研究方法主要是以传统的重塑土本构模型为基础,考虑结构性影响,将结构性因素加入到剑桥模型中,使修正后的模型可以真实地反映结构性土的应力应变关系。国内外已有很多学者开展了此方面的研究工作,如 Hashiguchi^[4]、Carter 等^[5]、Liu 等^[6,7]、Wheeler 等^[8]、Sivakumar^[9]、Guo 等^[10]、Asaoka 等^[11]、Nakano 等^[12]、饶为国等^[13]、姚仰平等^[14,15]学者基于剑桥模型,考虑结构性的影响,建立了考虑土体结构性的本构模型。本文亦遵循此思路,基于修正的剑桥模型,尝试建立一种可考虑初始结构性影响的吹填土体弹塑性本构关系。

1 结构性吹填软土力学特性研究

结构性的存在,使结构性黏土的压缩曲线明显不同于其重塑土体,压缩曲线存在明显的转折^[16,17],强度包线也会呈现出在屈服应力前后分段的特征^[18,19],应力应变关系同样发生变化,与强度特性相似,具有分段特征^[20,21]。本文以天津滨海新区吹填软土为研究对象,对其结构性力学特性进行了研究。

1.1 吹填土基本物理力学特性

试验土样取自天津滨海新区临港工业区吹填场地,该场地前期经过真空预压处理。所取土样的物理力学性质(表1),原状样及其相应的重塑样单轴压缩回弹及等向固结回弹试验结果(图1、图2)。

表1数据表明,吹填场地尽管经过真空预压处理,但土体含水量仍然很高,压缩性也仍然很高,属于典型的软土。由图1、图2可看出,单轴压缩试验与等向固结试验中,原状土与重塑土孔隙比随压力变化规律有一定的区别,重塑土可近似用直线描述,

表1 吹填土基本物理力学表

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of dredger fill

含水量 $w / \%$	天然 密度 ρ $/ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	液限 W_L $/ \%$	塑限 W_p $/ \%$	塑性 指数 I_p	压缩 系数 a_v $/ \text{MPa}^{-1}$	压缩 模量 E_s $/ \text{MPa}$
46.6	1.75	1.312	42.5	21.5	21.0	0.924	2.502

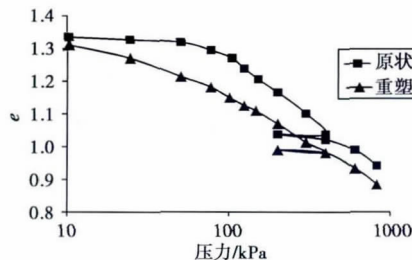


图1 单轴压缩与回弹试验曲线图

Fig. 1 One dimensional compression and rebound curves

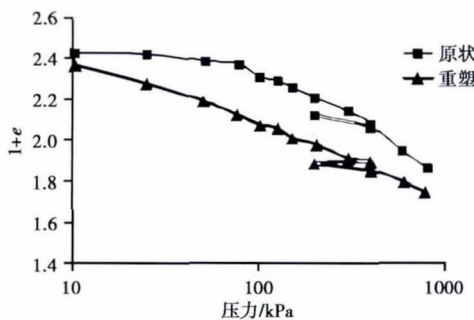


图2 等向固结与回弹曲线

Fig. 2 Isotropic consolidation and rebound curves

而原状样为曲线,可以近似用两条折线来拟合,交点即为结构屈服应力对应点。总之,经过真空预压地基处理后吹填场地地基土为高含水量软土,具有明显的结构性,在实际工程应用中要考虑到其结构性对其力学特性的影响。

1.2 室内常规三轴试验

本文进行了原状土与重塑土三轴不固结不排水试验,得到了应力应变关系曲线(图3)和相应的三轴剪切试验成果(图4)。

三轴不固结不排水压缩曲线(图3)表明,结构性的存在,增大了土体峰值抗压强度,即相同应变条件下原状土应力应变曲线对应的偏应力比重塑土大。图3还表明,原状土与重塑土应力应变曲线基本上呈应变硬化趋势。另外,从图中还可看出,原状土应力应变曲线有转折点,对应的值为结构屈服应力。重塑土应力应变关系曲线较圆滑,无明显转折

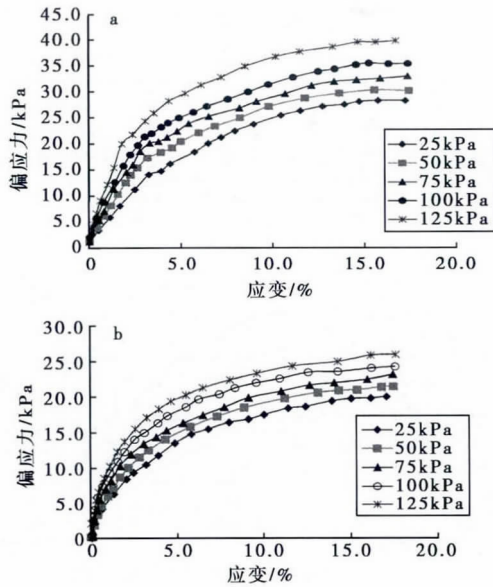


图3 三轴不固结不排水压缩曲线

Fig. 3 Triaxial unconsolidated undrained compression curves a. 原状土; b. 重塑土

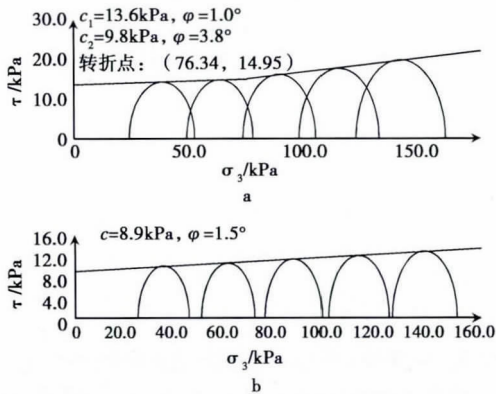


图4 三轴UU剪切试验曲线图

Fig. 4 Triaxial UU shear test curves a. 原状土; b. 重塑土

点出现,但其屈服应力值可通过数值处理方法得到^[22]。原状土的结构屈服应力与重塑土屈服应力的差值即为结构性作用的结果。总之,结构性影响土体应力应变关系,建立结构性本构模型,符合结构性土实际。

三轴UU剪切试验曲线图(图4)表明,结构性的存在,原状土与重塑土的强度包线形状不一致。原状土可用折线拟合,分界点处为剪切结构屈服应力,而重塑土近乎直线,也就是说结构性导致土体强度在结构屈服前后的发挥不一致。

总之,本文所研究的结构性吹填软土,其力学特性与传统的研究成果具有一致性,即压缩与剪切曲

线以及应力应变关系在结构屈服前后具有分段性特征,可用不同的参数来表达。

2 基于修正的剑桥模型应力应变关系研究

修正的剑桥模型是土力学的一大进展,为此后土体本构模型发展奠定了良好的基础^[23]。但其存在如下不足:(1)受制于经典塑性理论,采用Drucker公设和相关联的流动法则,在一定程度上与实际土体性状有所偏差。(2)因为屈服面只是 ϵ_{vp} 的等值面,只采用 ϵ_{vp} 作硬化内变量,而没有充分考虑剪切变形对硬化的影响。(3)模型所依据的试验全部是常规的等向固结三轴试验,没有考虑原位土体K0固结引起的塑性各向异性,对于三轴压缩剪切和三轴拉伸剪切同等对待,不符合室内试验和实际工程现象。(4)模型没有考虑天然土体和重塑土体性状的不同,无法反应软黏土的结构性,也没有考虑旋转硬化对应力应变关系的影响。

本文是在修正的剑桥模型基础上对其不足之(4)进行修正,具体如下:

2.1 修正土的强度包线

修正的剑桥模型认为正常固结土的强度破坏包线在 $p-q$ 平面上通过坐标原点(图5),即没有考虑土的凝聚力。实际上自然界中土体基本都有凝聚力,因此邓肯将强度破坏包线修正为不通过坐标原点,而是在 p 轴上相交于离原点距离为 p_r 的直线(图6)这样一来,上面推导的所有公式中关于 p 的量都要增加上 p_r 值。本文综合室内试验结果,在邓肯修正的基础上,将强度包线不再简单地用一条直线拟合,而改用两条直线近似拟合,折线交点处对应为土的剪切屈服应力(图7)。

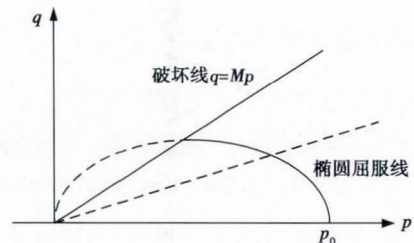


图5 修正的剑桥模型 p-q 平面示意图

Fig. 5 p-q plane schematic diagram of modified Cambridge model

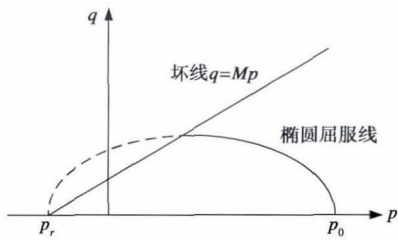


图6 邓肯修正的剑桥模型 p-q 平面示意图

Fig. 6 p-q plane schematic diagram of modified Cambridge model improved by Duncan

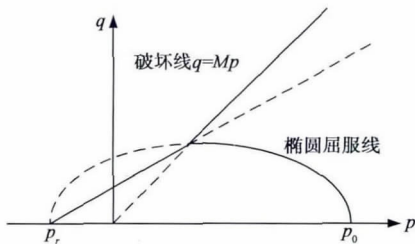


图7 本文修正的剑桥模型 p-q 平面示意图

Fig. 7 p-q plane schematic diagram of modified Cambridge model improved by the author

2.2 修正土的等向压缩曲线

邓肯研究得到,修正的剑桥模型等向压缩曲线(图8)斜率λ不能简单地用常数表示,其为变量随p值的改变而改变,即λ值是一系列数值。本文结合试验成果,综合前人研究的成果,对邓肯的研究成果进行简化,即将压缩曲线斜率λ在等向压缩结构屈服应力前后简单地各分为两段(图9)。

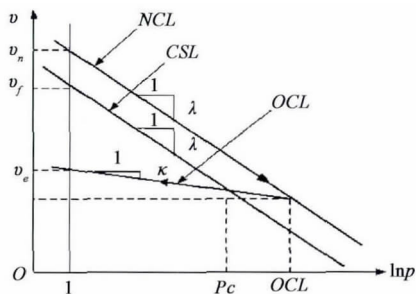


图8 修正的剑桥模型等向压缩曲线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of isotropic compression curve of modified Cambridge model

当应力分量用 p、q 表示,硬化参数为 ε_{vp} 时,根据等向固结试验得塑性体积应变为硬化参数的修正剑桥模型屈服函数:

$$F = \frac{\lambda - k}{1 + e_0} \ln \frac{p}{p_0} + \frac{\lambda - k}{1 + e_0} \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

修正的剑桥模型总应力应变关系用矩阵的形式

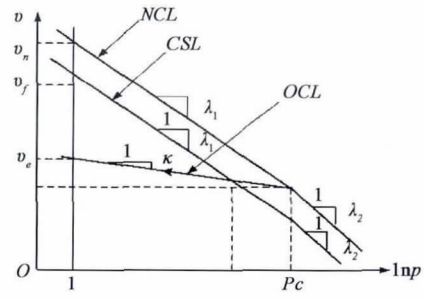


图9 本文修正的剑桥模型等向压缩曲线示意图

Fig. 9 Schematic diagram of improved isotropic compression curve of Cambridge model by the author

都可表示为:

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_d \end{bmatrix} = [D^{ep}] \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} = \frac{1}{p} \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pq} \\ D_{qp} & D_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵式(2)中各变量按式(3)计算。

$$\left. \begin{aligned} D_{pp} &= c_k + c_p \frac{M^2 - \eta^2}{M^2 + \eta^2} \\ D_{pq} &= c_p \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} \\ D_{qp} &= c_p \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} \\ D_{qq} &= \frac{2}{9} c_k \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} + c_p \frac{4\eta^2}{M^4 - \eta^4} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $c_p = \frac{\lambda - k}{1 + e_0}$, $c_k = \frac{k}{1 + e_0}$ 。

按本文上述方法对土强度包线以及等向压缩曲线进行处理,将处理后的结果代入式(3)中,然后将其代入式(2)中,这样得到的应力应变关系就考虑了初始结构性的影响。应用时对模型参数 η、λ、M 采用分段的形式进行计算,即在结构屈服应力前后分别用 η₁、η₂、λ₁、λ₂、M₁、M₂ 代替式(3)中的 η、λ、M。各参数按如下计算:

$$M_1 = \frac{6 \sin \varphi_1}{3 - \sin \varphi_1}, M_2 = \frac{6 \sin \varphi_2}{3 - \sin \varphi_2}$$

$$p_r = \frac{c_1}{\tan \varphi_1}, p = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3}$$

$$p_0 = \left(1 + \frac{\eta^2}{M^2} \right) (p + p_r) - p_r$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p}, \eta_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p + p_r}$$

式中: c₁、φ₁、φ₂ 通过室内试验得到。

表2 模型参数表
Table 2 Model parameters

土	参 数												
	λ/MPa^{-1}	k/MPa^{-1}	M	$\lambda_1/\text{MPa}^{-1}$	$\lambda_2/\text{MPa}^{-1}$	M_1	M_2	c_1/kPa	c_2/kPa	$\varphi_1/(\text{°})$	$\varphi_2/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
原状土	/	0.0002	/	0.0013	0.0004	0.018	0.067	13.6	9.8	1.0	3.8	/	/
重塑土	0.0005	0.0002	0.027	/	/	/	/	/	/	/	/	8.9	1.5

3 模型参数的确立与模型计算

3.1 模型参数

对图4~图7的试验数据进行处理,计算得到考虑结构性与不考虑结构性的模型参数,即原状土所对应的参数为考虑结构性的模型参数,重塑土所对应的参数为不考虑结构性的模型参数(表2)。

3.2 模型计算

常规三轴试验中, $d\sigma_2 = d\sigma_3$, $d\varepsilon_2 = d\varepsilon_3$, 应力增量与应变增量关系为:

$$dp = \frac{1}{3}(d\sigma_1 + 2d\sigma_3) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dq &= d\sigma_1 - d\sigma_3 \\ d\varepsilon_v &= d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3 \\ d\varepsilon_d &= \frac{2}{3}(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) \end{aligned} \quad (5)$$

在不排水条件下, $d\varepsilon_v = 0$ 。

$$d\varepsilon_3 = -\frac{1}{2}d\varepsilon_1 \quad (6)$$

$$d\sigma_3 = \frac{p}{3} \frac{D_{pp} + 3D_{pq}}{D_{qp}D_{pq} - D_{qq}D_{pp}} d\varepsilon_1 \quad (7)$$

$$d\sigma_1 = -\frac{p}{3} \frac{2D_{pp} - 3D_{pq}}{D_{qp}D_{pq} - D_{qq}D_{pp}} d\varepsilon_1 \quad (8)$$

由于本文为不排水试验,且围压为常数,所以式(7)为0。利用式(3)、式(8)结合考虑结构性的模型参数,计算所得原状结构性土的三轴试验应力应变曲线与试验曲线(图10)。

图10表明,利用本文建立的模型预测原状结构性土应力应变关系,试验值与模拟值较为吻合,初步验证了本文建立的模型的合理性。

4 结论与建议

本文以修正的剑桥模型为基础,通过对结构性土体强度包线以及等向压缩线进行处理,使其考虑

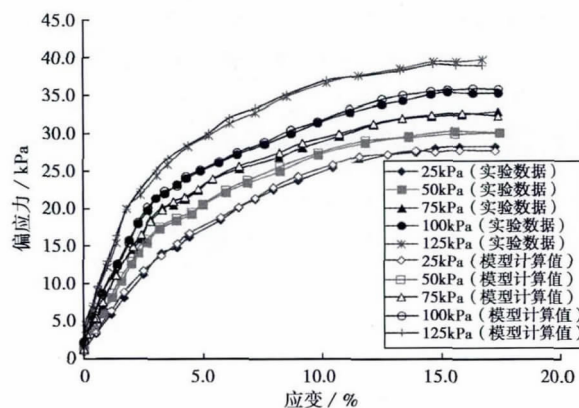


图10 结构性原状土实测值与计算值
Fig. 10 Measured value and calculated value of structure undisturbed soil

初始结构性的影响,建立了一种可考虑初始结构性的弹塑性本构模型,模型计算参数可通过试验直接求得。试验数据与模拟结果比较表明本文提出的模型能够描述有初始结构性吹填软土的弹塑性变形特性。由于结构性土体在受力过程中会有结构损伤,建立考虑结构损伤的应力应变关系将是下一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] Mesri G. New design procedure for stability of soft clays [J]. Engng. Div, ASCE, 1975, 101(4): 409~412.
- [2] Kabbajm M T, Tavenas F, Leroueil S. In situ and laboratory stress-strain relationships [J]. Géotechnique, 1988, 38(1): 83~100.
- [3] 沈珠江. 土体结构性的数学模型-21世纪土力学的核心问题 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 96~97.
Shen Zhujiang. The constitutive model of soil considering the structure is the key problem of soil mechanics in the 21st century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 96~97.
- [4] Hashiguchi K. Subloading surface model in unconventional plasticity [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(8): 917~945.
- [5] Carter J P, Liu M D. Review of the structured Cam clay

- model[J]. Géotechnique Special Publication, Soil Constitutive Models-Evaluation, Selection, and Calibration, 2005, **18**: 99 ~ 132.
- [6] Liu M D, Carter J P. Virgin compression of structured soils [J]. Géotechnique, 1999, **49**(1): 43 ~ 57.
- [7] Liu M D, Carter J P. Modelling the destructuring of soils during virgin compression [J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 479 ~ 483.
- [8] Wheeler S J, Sivakumar V. An elastic-plastic critical state framework for unsaturated soils [J]. Géotechnique, 1995, **45**(1): 35 ~ 53.
- [9] Sivakumar V. A critical state framework for unsaturated soil [Ph. D. Thesis] [D]. UK: University of Sheffield, 1993.
- [10] Gu W H, Krahn J. A model for soil structure mobility and collapse [A] // 15th ASCE Engineering Mechanics Conference [C]. New York: Columbia University, 2002.
- [11] Asaoka A, Nakano M, Noda T. Super loading yield surface concept for highly structured soil behavior [J]. Soils and Foundations, 2000, **40**(2): 99 ~ 110.
- [12] Nakano M, Nakai K, Noda T, et al. Simulation of shear and one-dimensional compression behavior of naturally deposited clays by super/subloading yield surface Cam-clay model [J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(1): 141 ~ 151.
- [13] 饶为国, 赵成刚, 王哲, 等. 一个可考虑结构性影响的土体本构模型 [J]. 固体力学学报, 2002, **23**(1): 35 ~ 39.
Rao Weiguo, Zhao Chenggang, Wang Zhe, et al. A constitutive model considering the influence of soil structure [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2002, **23**(1): 35 ~ 39.
- [14] 姚仰平, 侯伟, 周安楠. 基于 Hvorslev 面的超固结土模型 [J]. 中国科学 (E: 技术科学), 2007, **37**(11): 1417 ~ 1429.
Yao Yangping, Hou Wei, Zhou Annan. The study on over-consolidate soil model based on Hvorslev yield surface [J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2007, **37**(11): 1417 ~ 1429.
- [15] 姚仰平, 侯伟. K_0 超固结土的统一硬化模型 [J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(3): 316 ~ 322.
Yao Yangping, Hou Wei. A unified hardening model for K_0 overconsolidated clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(3): 316 ~ 322.
- [16] Liu M D, Carter J R, Desai C S, et al. Analysis of the compression of structured soils using the disturbed state concept [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, **24**(8): 723 ~ 735.
- [17] 沈珠江. 软土的工程特性和软土地基设计 [J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(1): 100 ~ 111.
Shen Zhujiang. The engineering properties of soft soils and design of soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(1): 100 ~ 111.
- [18] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析 [J]. 水利学报, 2000, (10): 43 ~ 47.
Gong Xiaonan, Xiong Chuanxiang, Xiang Kexiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (10): 43 ~ 47.
- [19] Chandler R J, Cotecchia F. A general frame work for the mechanical behaviour of clays [J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 431 ~ 47.
- [20] 王立忠, 丁利, 赵志远, 等. 结构性软土应力-应变关系分段特征研究 [A] // 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集 [C]. 北京: 清华大学出版社, 2003, 25 ~ 28.
Wang Lizhong, Ding Li, Zhao Zhiyuan, et al. Research on segmentation structural soft soil stress-strain relationship [A] // The Ninth Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference Proceedings of China Civil Engineering Society [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003, 25 ~ 28.
- [21] 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 Lizhong, Zhao Zhiyuan, Li Lingling. Non-linear elastic model considering soil structural damage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, **35**(1): 83 ~ 89.
- [22] 沈恺伦. 软黏土结构性、塑性各向异性及其演化 [博士学位论文] [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Sheng Kailun. Structure of soft clay, plastic anisotropy and its evolution [Doctorate Thesis] [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [23] 罗汀, 姚仰平, 侯伟. 土的本构关系 [M]. 北京: 人民交通工业出版社, 2010.
Luo Ding, Yao Yangping, Hou Wei. Constitutive relationship of soil [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.