

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.005

考虑应力路径影响的吹填土蠕变特性

杨爱武^{1,2}, 张 艳¹

(1. 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:为研究应力路径对长期变形的影响,利用 WF 应力路径试验仪,采用分级加载的方式,对天津滨海新区吹填土进行了减 P 路径(DEP)、等 P 加载路径(CNP)、增 P 加载路径(INP)3 种应力路径下的蠕变试验。试验结果表明,在相同偏应力条件下,DEP、INP 和 CNP 3 种应力路径下的蠕变应变值依次减小,蠕变稳定阶段变形速率按 DEP、CNP、INP 3 种应力路径的顺序依次增大;减 P 和等 P 应力路径下的蠕变试验中,孔隙水压力均为负值,且随着偏应力的增大而减小,而增 P 应力路径下蠕变试验中,孔隙水压力随着偏应力的增大而增大;减 P 和等 P 加载路径下长期强度高于增 P 应力路径下的长期强度。最后,运用二次多项式对 3 种路径应力应变等时曲线进行了拟合,效果较佳。

关键词:应力路径;吹填土;蠕变;初始压缩模量

中图分类号:TU411.3 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)03-0024-06

Creep Characteristics Considering Stress Paths of Dredger Fill

Yang Aiwu^{1,2}, Zhang Yan¹

(1. Key laboratory of soft soil engineering character and engineering environment of Tianjin, Tianjin 300381, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: To study the influence of stress path on the long-term deformation, creep tests of dredger fill in Tianjin Binhai New Area in three different stress paths, namely decrease p paths (DEP), constant p paths (CNP) and increase p paths (INP) respectively, were carried out by using the WF stress paths tester and grading loading method. The results showed that under the same deviate stress conditions, the creep strain decreased in three kinds of stress paths of DEP, INP and CNP in turn, deformation rate of stable stage in the procession of creep increased according to the three kinds of stress paths of DEP, CNP, INP. The pore water pressure were negative in the procession of creep with decrease p and constant p stress paths, and decreased along with the deviate stress increase. However, in the procession of creep with increase p stress paths, the pore water pressure increased with the increase of deviator stress. The long-term strength in decrease p and constant p stress paths was higher than that in increase p stress paths. Finally, the effect is better by using quadratic polynomial to fit stress-strain isochronous curve of the three stress paths.

Key words: stress paths; dredger fill; creep; initial compressive modulus

传统的对软粘土蠕变特性研究主要以单向压缩与三轴压缩试验为基础而取得研究成果。试验类型的采用与所研究的工程背景有直接关系,如研究大

面积堆载长期沉降规律时,采用一维蠕变试验就比较直观和有效。若研究基坑、隧道等地下工程的长期变形与稳定分析,采用一维蠕变试验的局限性就

收稿日期:2013-12-21

基金项目:国家自然科学基金(51179186,41372291)。

作者简介:杨爱武(1971-),男,博士,教授,主要从事软土地基处理及土体微观结构研究,(E-mail)tulilab@163.com。

显得比较明显。对于实际工程而言,土体应力与应变在施工过程中基本上都是在动态变化的,研究长期变形时考虑应力路径的影响符合工程实际。迄今为止单独对土体蠕变特性以及不同应力路径下的土体力学特性研究已取得不少成果,如杨爱武^[1]、张先伟^[2]对软土长期变形特性进行了探讨分析,建立了考虑结构性及其损伤影响的蠕变模型,取得出了有一定理论价值的成果;曾玲玲^[3]以广州南沙典型软土为对象,研究了不同应力路径下土的应力-应变关系特征和孔隙水压力变化规律,探讨了孔压分布与土体变形特征的关系,认为侧向卸荷会造成剪应力增加、体应力减小,从而使土体产生剪胀趋势。陈林靖^[4]采用应力-应变控制式三轴仪对福州市区某基坑影响范围内典型饱和软土进行了一系列应力路径试验,以研究受基坑开挖和支护结构作用影响的土体卸、加载应力-应变特征。土体所处的应力状态对其变形特性有很大的影响,正确认识现场土体的应力状态对其力学特性的影响显得十分必要。目前有关应力路径对土体变形的影响主要集中在弹塑性变形的研究中^[5-8],如任青阳等^[5]按照数值建模理论,建立了砂土在等主应力比路径下的弹塑性本构模型,给出了塑性体应变和塑性剪应变两组屈服轨迹。侯伟等^[8]分别采用 Mohr-Coulomb 模型、修正剑桥模型和 UH 模型预测正常固结土在常规三轴压缩、三轴伸长和平均主应力 P 减小的压缩工况中典型路径下土的变形特性。而对于同时考虑应力路径与时间效应影响的土体长期变形特性的研究成果则相对较少^[9-10]。本文以天津滨海吹填土为研究对象,对考虑应力路径影响的蠕变特性进行研究,以期为相似工程长期变形预测与控制提供理论支撑。

1 试验方案

1.1 试验土样

试验所用土样取自天津滨海新区临港工业区经过真空预压处理的吹填场地,取样深度为 3~5 m,地下水位 1 m。基本物理力学性质指标如表 1。

1.2 试验方案

采用分级加载方式,模拟减 P 路径(DEP)、等 P 加载路径(CNP)、增 P 加载路径(INP)等 3 种应力路径的蠕变试验。3 种应力路径下的加荷速率均取 $\Delta q = 0.2 \text{ kPa/min}$,每级荷载持续时间为 5 760 min。

图 1 为在 p - q 空间应力路径示意图,土体初始固结应力由式 $\sigma_m = (\sigma_z + 2\sigma_h)/3$,根据现场埋深计算得到其值为 $p = 65 \text{ kPa}$ 。因此,选用的有效固结压力 $\sigma_3 = 65 \text{ kPa}$ 。具体试验方案详见表 2。

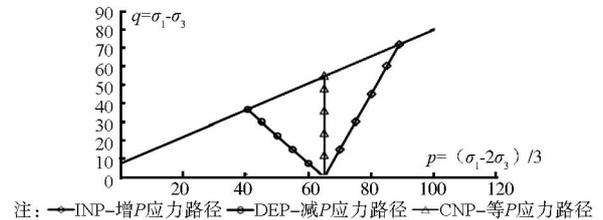


图 1 p - q 空间应力路径示意图

2 试验结果与分析

2.1 变形随时间变化曲线

按照陈氏加载法^[11]将试验得到的蠕变全过程曲线转化为“分别加载”蠕变曲线,见图 2。

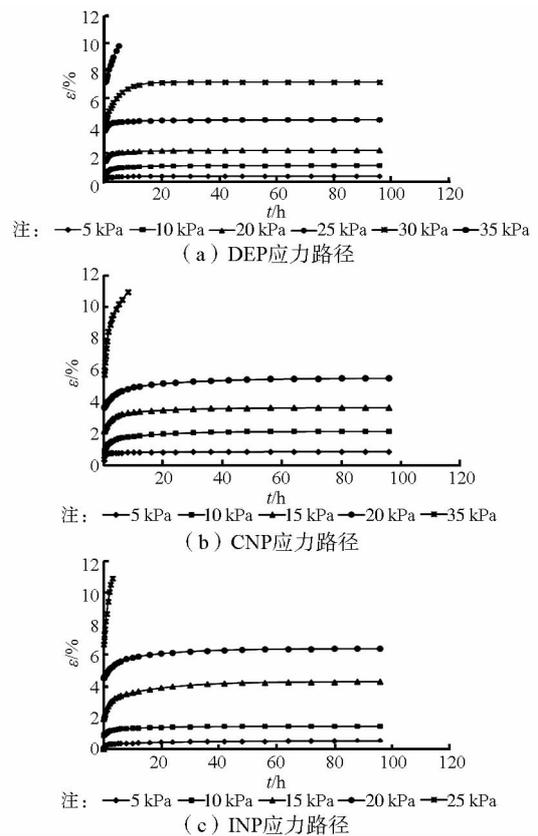


图 2 不同应力路径蠕变曲线

表 1 吹填土基本物理力学性质指标

湿密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	含水量/%	塑性指数	液性指数	状态	饱和度/%	孔隙比	结构屈服应力/kPa
1.68	2.75	49.0	23.5	1.3	流塑	100.0	1.426	10.0

表 2 不同应力路径蠕变试验方案

控制方式	试验编号	固结过程		加荷过程		备注	
		固结压力 终值/kPa	固结路径	加荷路径	分级加载应力/kPa		
					σ_1		$\sigma_2 = \sigma_3$
应力控制(p, q)	INP		三向 等压 固结	σ_3 不变 σ_1 增大	70		
					75		
					80	65	
					85		
					90		
应力控制(p, q)	CNP	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 65$	三向 等压 固结	σ_3 减小 σ_1 增大 $\Delta\sigma_1 = -2\Delta\sigma_3$	69	63	1. 1 h 内达到所设定的蠕变应力状态; 2. 每级蠕变持续时间为 5 760 min。
					73	61	
					77	59	
					81	57	
					89	53	
应力控制(p, q)	DEP		三向 等压 固结	σ_3 减小 σ_1 不变	60		
					55		
					50		
					45		
					40		
					35		

由图 2 可以看出不同应力路径下蠕变变形有以下特点:应力水平较低时,蠕变变形较小,而且很快就能达到稳定值,当应力水平增大到一定值时,蠕变从衰减稳定变成非稳定的等速蠕变,蠕变变形速率为一常数;应力水平较高时,变形急剧增加,试样很快破坏。此种情况下,土样从加载到破坏,历时很短,一般不作为蠕变来研究。当偏应力小于等于 10 kPa 时,3 种应力路径下蠕变稳定时变形量相差不大;而当偏应力超过 10 kPa 时,以后各级蠕变变形尽管是在等幅度偏应力增加值下发展,但其值大幅度增加,按 DEP、INP 和 CNP 3 种应力路径依次增大。3 种不同应力路径下的蠕变,开始时变形迅速发展,大约经过 10 h 后,应变基本稳定。产生上述现象的原因与土的结构性有关。由表 1 数据知三轴压缩结构屈服应力为 10 kPa,因此当偏应力小于结构屈服应力时,土的结构性完全有能力抵抗外力作用,不同的应力路径作用下蠕变变形相差不大,且稳定快。当偏应力超过结构屈服应力时,土体结构处于开始破坏阶段,由于偏应力及围压都对土体结构破坏起作用,因此不同应力路径下土体结构破坏速度不同,按 DEP、CNP、INP 情况递增。另外,土体变形主要还与所受偏应力有关,由于 DEP 中 σ_1 不变,CNP、INP 中 σ_1 增大,所以偏应力作用下的变形量 DEP 情况下最小,CNP、INP 情况下接近。综合

结构性以及偏应力 σ_1 的共同作用,当偏应力超过 10 kPa 时,随着偏应力的增加,变形按 DEP、INP 和 CNP 3 种应力路径依次增大。由图 2 还知蠕变破坏应力值按 INP、DEP、CNP 3 种应力路径依次增加。原因与土的结构性破坏程度以及蠕变过程中压密作用有关。土体结构破坏按 DEP、CNP、INP 3 种应力路径情况下依次递增,但压密作用按 DEP、CNP、INP 3 种应力路径依次递增,综合 2 种作用最终蠕变破坏应力值按 INP、DEP、CNP 3 种应力路径依次增加。

2.2 孔压随时间变化曲线

不同应力路径下蠕变试验过程中孔隙水压力随时间变化曲线见图 3。

由上图 3 知:在减 P 和等 P 2 种应力路径下的不排水三轴蠕变试验中,开始较短的时间内孔隙水压力变化大,其值都为负值,随着时间的推移,孔隙水压力逐渐趋于稳定。随着偏应力的增大,孔隙水压力逐渐减小。该现象也与土的结构性有关,在减 P 和等 P 2 种应力路径下,实际上相当于产生侧向拉应力。刚开始,土的结构破坏少,孔隙连通较好,由于侧向拉应力作用,很快就产生负的孔隙水压力。之后,随着土结构的进一步破坏,孔隙连通性变差,同时由于土体总体积保持不变,先前达到的孔隙水压力值就基本保持稳定。在增 P 应力路径下的不排

水三轴蠕变试验中,孔隙水压力均为正值,且随着偏应力的增大而增大。在最后一级偏应力下,由于试样已经破坏,孔隙水压力先升后降。此种情况下,在破坏前孔隙水压力增大可用有效应力原理解释。而破坏前后孔隙水压力先升后降的现象,也与土结构的大量破坏,孔隙连通性发生剧变有关。

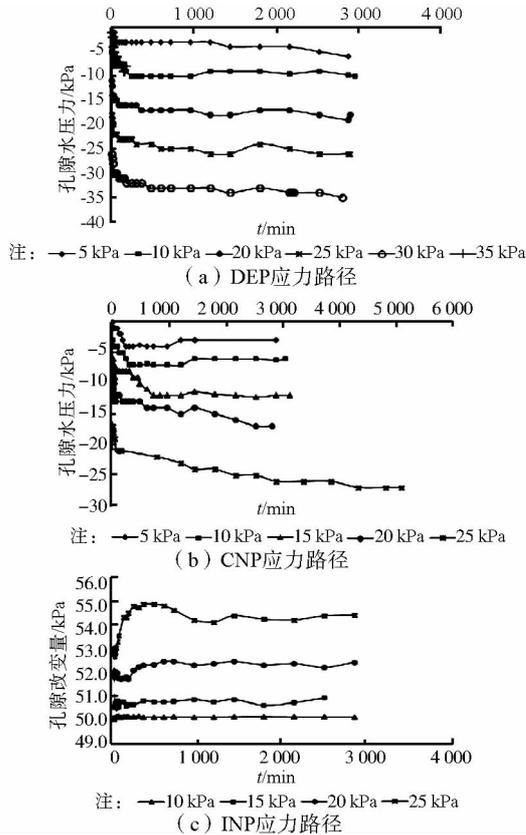


图3 不同应力路径蠕变过程孔压-时间变化曲线

2.3 应力应变等时曲线

不同应力路径下的应力-应变等时曲线如图4所示。

由上图4可以看出,3种应力路径下的蠕变试验得到的等时曲线具有如下特性:应力水平低时,应力应变等时曲线呈直线状态;当超过某一偏差应力值(结构屈服应力)时,应力应变等时曲线由直线状态转变为非线性状态。由上图4还可以看出,应力水平越高,应力-应变等时曲线偏离直线的程度也越大,越靠近应变轴,即应力应变非线性程度随着应力水平的增加而增强。也就是说在小偏应力作用下,土体处于弹性变形阶段;大偏应力作用下土体处于粘塑性阶段。随着时间的推移,粘性变形的发展使应力-应变等时曲线越向应变轴弯曲,应力应变等时曲线逐渐靠拢,形状也逐渐相似,与初始偏离较大,在应力水平高的情况下更为突出。该现象可用土的

结构性变化进行解释。刚开始土的结构调整变化大,表现为等时曲线间隔大;随着时间的推移结构逐渐趋于稳定,也就表现为等时曲线逐渐靠拢。

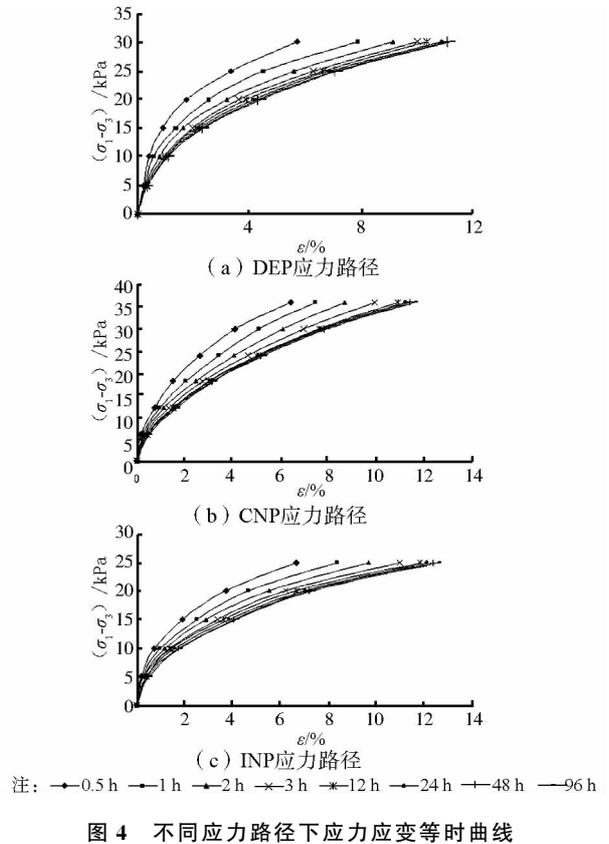


图4 不同应力路径下应力应变等时曲线

3 模型及参数研究

实际上,土的蠕变形态无法直观的从土蠕变曲线上反映,根据以往的研究成果^[12-14],粘土的应力-应变特性可以用等时理论来分析^[15]。应力-应变等时曲线可以很清楚的反映蠕变情况。分析图4中曲线变化规律,本文采用二次多项式拟合不同应力路径下蠕变等时曲线,二次多项式表达式如(1)式所示。

$$\sigma = a\epsilon^2 + b\epsilon + c \quad (1)$$

式中: σ 为竖向应力(kPa); ϵ 为竖向应变(%); a 、 b 为与应力路径及时间等因素有关的参数,间接反映土体压缩性质。图5为采用二次多项式计算的典型应力-应变等时曲线(以DEP、CNP、INP的3、12、24h为例),由图5知拟合曲线接近试验曲线,且参数少,易确定。

对式(1)求导可得到切线压缩模量 E_{si} ,其表达式如式(2)所示,对应图4中曲线斜率。

$$E_{si} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = 2a\epsilon + b \quad (2)$$

图6为不同应力路径下切线压缩模量 E_{si} 随时

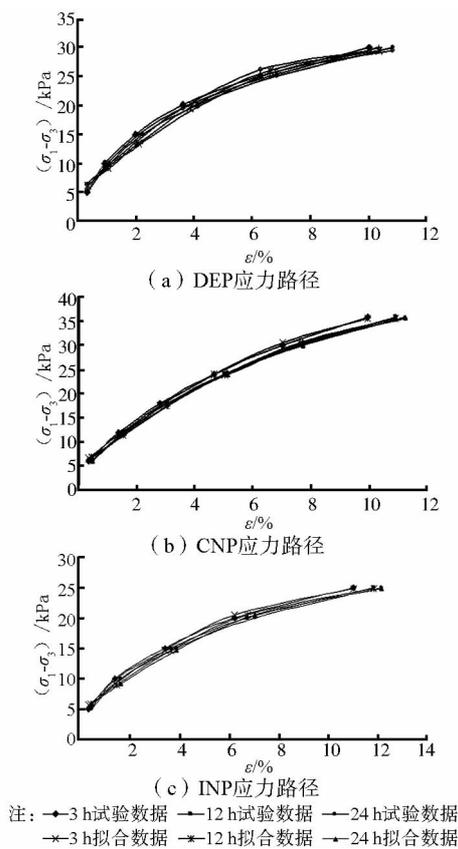
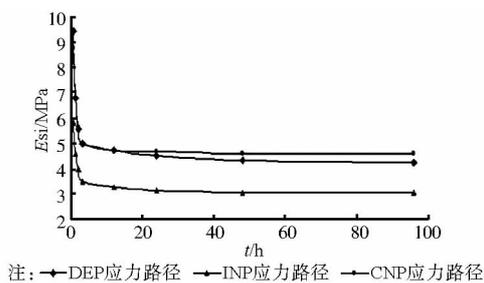


图 5 模型计算的应力-应变等时曲线

间变化规律曲线。

图 6 表明,3 种应力路径下切线压缩模量 E_{si} 随时间的推移变化速率不一致,刚开始变化速率大,呈直线下降,5 h 后逐渐趋于稳定,其值按 CNP、DEP、INP 路径依次减小。

图 6 不同应力路径下切线压缩模量 E_{si} 随时间变化曲线

不同应力路径下模型参数值 (a 、 b) 随时间变化规律如图 7 所示。

图 7 表明: a 值变化趋势与切线压缩模量 E_{si} 随应力路径与时间变化规律相似。 b 值则与 a 呈相反的变化规律,即开始其值增大,很快(5 h 后)就趋于稳定,3 种路径下数值基本接近,即应力路径对 b 值影响可忽略。

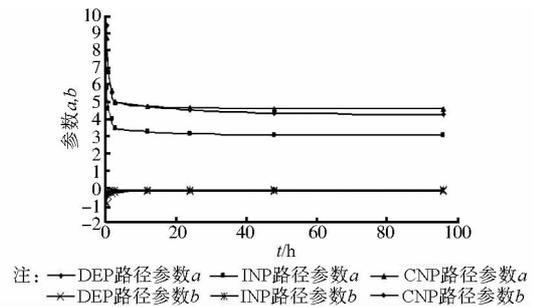


图 7 模型参数随时间变化曲线

4 蠕变试验后实际应力路径与总破坏线

3 种应力路径的试样,由于它们的初始固结条件相同,因此在图中具有相同的初始固结点。图 8 为经过不同应力路径的蠕变与常规固结不排水三轴试验得出的破坏线之间的关系图。

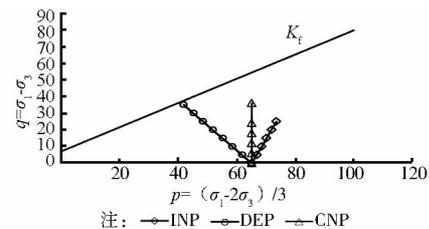


图 8 破坏线与蠕变应力路径关系

土样在经历了一段时间的蠕变变形后,抗剪强度均较常规三轴试验所得的短期强度(标准强度)低。也就是说本文研究的吹填土样在长期受荷后,强度随受荷历时的增长而衰减。其值按照 INP 路径、CNP 路径以及 DEP 路径依次递增。本次试验是不排水蠕变试验,在整个减 P (DEP) 和等 P (CNP) 加载蠕变试验过程中均产生了负孔隙水压力,按照有效应力原理知此时土的有效应力增加,因此,DEP 和 CNP 2 种应力路径情况下抗剪强度比 INP 应力路径情况下高,但比常规三轴试验得到的抗剪强度低。

5 结论

1) 在相同偏应力条件下,DEP、INP 和 CNP 3 种应力路径下的蠕变应变值依次减小,蠕变稳定阶段变形速率按 DEP、CNP、INP 3 种应力路径的顺序依次增大。

2) 在减 P (DEP) 和等 P (CNP) 应力路径下的蠕变试验中,孔隙水压力均为负值,且随着偏应力的增大而减小;而增 P (INP) 蠕变试验中,孔隙水压力随着偏应力的增大而增大。

3) 减 P (DEP) 和等 P (CNP) 加载路径下长期强度高于增 P 应力路径下的长期强度。

4) 3 种应力路径下蠕变应力-应变等时曲线均可用二项式进行拟合, 模型参数少, 易于确定。

参考文献:

- [1] 杨爱武. 结构性吹填软土流变特性及其本构模型研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [2] 张先伟, 王常明. 基于扰动状态概念的结构性软土蠕变模型 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 81-87.
Zhang X W, Wang C M. Study of creep constitutive model of structural soft soil based on the disturbed state concept [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 81-87.
- [3] 曾玲玲, 陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析 [J]. 岩土力学, 2011, 30(5): 1264-1270.
Zeng L L, Chen X P. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress path [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 30(5): 1264-1270.
- [4] 陈林靖, 戴自航, 刘志伟. 应力路径对软土应力-应变特性影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3249-3257.
Chen L J, Dai Z H, Liu Z W. Experimental study of stress path of soft soils in influence range of foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3249-3257.
- [5] 任青阳, 王靖涛, 等. 主应力比路径下砂土弹塑性本构关系的数值建模 [J]. 华中科技大学学报, 2006, 22(3): 69-71.
Ren Q Y, Wang J T. Numerical method in modeling the elasto-plastic constitutive relationship of sand under the path of constant proportion of principle Stress [J]. Journal of Huazhong University of Science Technology, 2006, 22(3): 69-71.
- [6] Charles W W N, Abraham C F. Laboratory study of loose saturated and unsaturated decomposed granitic soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 129(6): 550-559.
- [7] 程涛, 晏克勤. 应力路径对地表变形特性影响的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 661-666.
Cheng T, Yan K Q. Numerical simulation for influences of stress paths on earth's surface deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 661-666.
- [8] 侯伟, 姚仰平. 工程中典型应力路径下土的应力-应变特性分析 [J]. 工业建筑, 2011, 41(9): 24-29.
Hou W, Yao Y P. analysis of stress-strain behavior of clay along typical stress paths in practical projects [J]. Industrial Architecture, 2011, 41(9): 24-29.
- [9] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 270-275.
Yang C H, Bai S W, Wu Y I. stress level and loading path effect on time dependent properties of salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 270-275.
- [10] 李栋伟, 崔灏, 汪仁和. 复杂应力路径下人工冻砂土非线性流变本构模型与应用研究 [J]. 岩土工程报, 2008, 30(10): 1496-1501.
Li D W, Cui H, Wang R H. Nonlinear rheological constitutive model for frozen sand under complex stress paths and its engineering application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1496-1501.
- [11] 陈宗基. 固结及次时间效应的单向问题 [J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1-10.
Chen Z J. One-dimensional problem of consolidation and time effect [J]. China Civil Engineering Journal, 1958, 5(1): 1-10.
- [12] Adachi T, Oka F. Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-visco plasticity [J]. Soils and Foundations, 1982, 22(4): 57-70.
- [13] Arai K, Hashiba S, Kitagawa K. A unified approach to time effects in anisotropically consolidated clays [J]. Soils and Foundations, 1982, 22(4): 147-164.
- [14] Nakase A, Kamei T. Influence of strain rate on undrained shear characteristics of K₀-consolidated cohesive soils [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(1): 85-95.
- [15] 范广勤. 岩土工程流变力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.

(编辑 胡玲)