

循环荷载作用下泥炭质土动力累积特性试验研究

陈成¹, 周正明¹, 张先伟¹, 尹松², 穆坤³

(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. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007; 3. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要:工程实践中,泥炭质土由于富含有机质,具有高含水量、低密度、超高压缩性以及低强度的异常力学特性,往往被视为问题土。针对昆明地区交通荷载作用下泥炭质土的动力响应特征,选取滇池草海附近典型泥炭质土,开展考虑围压水平、动应力幅值以及静偏应力影响的不排水循环三轴试验,研究该土的长期累积变形特性。研究表明:研究土样具有典型泥炭质土特征,表现为含水量 181.5%~259.3%,密度 1.10~1.22 g/cm³、有机质含量 29.9%~53.0%,有机物质分解度较高;动应力幅值和静偏应力对昆明泥炭质土的长期动力特性影响显著,大动应力幅值和静偏应力加剧累积变形和孔压的发展,同时,当动应力水平小而静偏应力大时,累积塑性变形的发展速度反而大;虽然初始围压对累积变形影响较小,但对残余孔压的影响显著。此外,基于双对数坐标下累积应变速率与循环周次关系以及前人研究方法,建立了泥炭质土累积塑性应变与动荷载循环周次间的经验关系。

关键词:土力学;泥炭质土;有机质;土动力学;静偏应力;长期循环荷载

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)05-1247-09

Experimental study on accumulative behaviour of peaty soil under cyclic loading

CHEN Cheng¹, ZHOU Zhengming¹, ZHANG Xianwei¹, YIN Song², MU Kun³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007, China; 3. College of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Peaty soils are generally viewed as "problematic" soils for their high organic matter content, high water contents, low bulk density, high compressibility and low strength characteristics. The long-term accumulative behaviour of peaty soils subjected to traffic loads was studied through a series of cyclic triaxial compression tests on the samples retrieved from the site nearby Caohai on the northern side of Lake Dian. The variables including the confining stress level, the amplitude of dynamic stress and the static deviatoric stress were taken into account in this study. It was found that the tested samples were typical peaty soil, which had the initial water contents of 181.5%–259.3%, the initial densities of 1.10–1.22 g/cm³, the organic contents of 34.7%–44.2%. The organic matters were highly decomposed. Both the amplitude of dynamic stress and static deviatoric stress had the distinct

收稿日期: 2016-11-22; **修回日期:** 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402277, 41672293); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732101)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41402277 and 41672293) and State Key Development Program for Basic Research of China(973 Program) (Grant No. 2010CB732101)

作者简介: 陈成(1986-),男,2013年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位,现任助理研究员,主要从事软土力学与土体本构关系方面的研究工作。E-mail: chenchengydx@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1471

influences on the developments of permanent axial strain and pore water pressure. The larger amplitude of dynamic stress or the static deviatoric stress accelerated the developments of the permanent axial strain and pore water pressure. The development of permanent axial strain was faster when a lower dynamic stress and a larger static deviatoric stress were applied, in contrast to the case that a larger dynamic stress and a lower static stress were applied. The initial confining stress level appeared to have a little effect on the development of permanent axial strain, while it had a significant impact on the accumulation of pore water pressure. In addition, an empirical relation between the accumulative plastic strain and loading cycles was presented based on the relationships between the permanent axial strain rate and loading cycles under dual logarithmic coordinates as well as the previous studies.

Key words : soil mechanics ; peaty soil ; organic matter ; soil dynamics ; static deviatoric stress ; long-term cyclic loading

1 引言

泥炭(质)土是由古生物残体在缺少空气的条件下,经过复杂生物化学过程以及数万年的地质作用形成的特殊类软土,具有高有机质含量、大孔隙比、高天然含水量、低承载力、高压缩性等较差的工程地质特性^[1-8]。当前,泥炭土分布地区铁路、地铁、公路等交通工程日趋增多,然而这些基础设施在投入运营之后,由于受到长期循环荷载的作用,常出现工后沉降较大的工程灾害,造成极大的安全隐患。例如,吉林省江密峰—珲春高速公路、延吉绕城公路等公路,均不同程度地经过泥炭土(由于土中有机物质分解度较低,又称之为草炭土)地段,建成后通车运营表明,即使采用挖除换填、填筑砂砾等透水性材料、抬高路基等常规类似于“软土地基”处治的工程对策,路基仍会出现不可避免的沉陷,严重时出现基底被挤压引起侧向隆起或剪裂挤出,路面网裂等不同程度的病害^[9]。南昆铁路沿线泥炭土分布段沉降观测结果显示,即使对泥炭土地基采用粉喷桩加固,地基3 a内的工后沉降仍多达36.5 cm^[10]。加拿大铁路曾发生两起车厢出轨事故,均与铁路线路经过泥炭土地段有关,一次是由于泥炭土地基沉降过大引起的,一次是由于泥炭土地基失稳破坏引起的^[11-12]。这些工程事故一方面说明了交通荷载作用下泥炭土地基的累积变形效应显著,严重影响交通设施耐久性和线路的安全运营;另一方面也反映了目前泥炭土地基处理中存在的技术问题,更深层次上体现了目前人们仍未掌握长期循环荷载下泥炭土的变形特性以及缺乏对累积变形发展机制的深刻认识。

现阶段,针对一般矿物质软土地基在交通荷载作用下的长期服役性能,国内外大量学者从试验研

究与理论分析等不同角度开展了系统的研究,如影响循环荷载作用下软土动力特性的因素^[13-14]、循环荷载作用下软土的累积变形与强度衰减特性^[15-17]、孔压增长模式^[18]以及刚度软化规律^[19]等。然而,对泥炭(质)土这一特殊软土而言,对其在循环荷载下变形与强度特性的研究相对较少,针对具有明显区域性的我国泥炭质土的研究更是鲜有报道。由于一般性软土与泥炭(质)土无论物质组成还是形成原因都明显不同,对循环荷载作用下的力学行为表现有显著影响,因而不能将一般性软土的研究成果直接复制用于泥炭(质)土的相关工程,需要进行深入系统的调查与研究。

综上所述,由于特殊的成土机制,泥炭(质)土具有富含有机质的物质组成特征,疏松的海绵结构形态,大孔隙比、低密度的物理特性,高压缩、低强度的力学特性,导致长期循环荷载作用下泥炭(质)土地基易出现沉陷、失稳破坏等工程现象。本文采用GDS循环三轴仪,针对滇池北端草海区域典型泥炭质土,系统地开展了泥炭(质)土在长期循环荷载作用下的动力响应试验研究,分析了泥炭土累积变形与残余孔压的发展规律,并建立了累积塑性应变与动荷载循环周次间的经验关系,这可为该区的交通工程基础设施建设提供一定的技术理论支撑。

2 试验土样与方案

2.1 试验土样

本文试验土样取自昆明市区滇池路与广福路交叉口,位于滇池北端,如图1所示。取样期间场地地下水埋深0.5~1.8 m。钻孔揭露深度范围内,土层自上而下分别为:杂填土,层厚0.9~3.3 m;黏土,层厚0.9~6.6 m;泥炭(质)土,层厚2.6~8.5 m;黏土,层厚0.5~5.9 m;粉土,



图 1 取样场地位置

Fig.1 Site location of sampling

层厚 0.5 ~ 8.6 m。场地代表性地质剖面图以及相应的静力触探测试结果如图 2 所示。该场地分布上、下两层泥炭地层，下层泥炭质土层埋深在 27.1 ~ 31.3 m，层厚 0.5 ~ 2.9 m，其对工程建设的影响相对较小。本文试验对象选取为上层全新世的泥炭质土。分析图 2 可知，静力触探锥尖阻力 q_c 变化范围为 0.13 ~ 0.35 MPa，平均值 0.25 MPa，摩阻比 R_f 变化范围为 5.70% ~ 16.13%，平均值 9.45%，这些指标表明上层泥炭质土具有典型的软土特征。

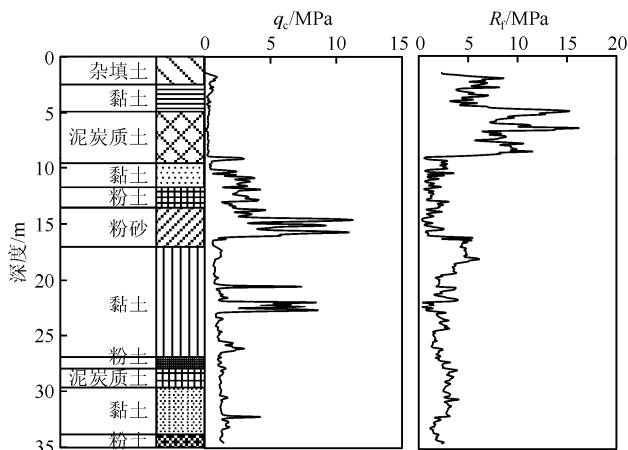


图 2 地质剖面图

Fig.2 Profile of CPT(q_c , R_f) at sampling site

为获取高质量的原状样，采用慢速静压薄壁取土器取样。取样深度为 5.2 ~ 8.9 m，试样原位竖向应力为 51 ~ 53 kPa。土体有机质含量 OC 测试采用灼烧法(马弗炉温度 $(440 \pm 40)^\circ C$)^[20]，其变化范围为 29.9% ~ 53.0%(平均值 39.3%)，根据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2009)，可命名为泥炭质土；

土体含水量 w 测试时烘箱温度控制在 $90^\circ C$ ^[21]，其变化范围为 181.5% ~ 259.3%(平均值 221.8%)。另外，试样初始密度 $1.10 \sim 1.22 g/cm^3$ ，平均值 $1.20 g/cm^3$ 。

2.2 试验方案

试验仪器采用英国 GDS 动三轴仪。由于泥炭质土对变形特别敏感，为准确捕捉小动荷载作用下的变形规律，选择量程为 1.0 kN，精度为 0.1% 的精密水下荷载传感器。针对交通荷载动力特征，循环加载选用半正弦波形，加载方式采用单向等幅应力控制循环加载，荷载频率取为 1.0 Hz。

试验方案见表 1，该方案主要考虑了围压、动应力幅值以及静偏应力 3 个因素对泥炭质土累积特性的影响。试样均采用等向固结。静偏应力施加有 2 种方案：一种是在完全排水条件下施加静偏应力，可以模拟地基土原位非等向固结状态；另一种是在完全不排水条件下施加静偏应力，这相当于地基土在施加静偏应力不久即施加动应力。考虑到静偏应力的组成来源，本研究采用第 2 种试验方案。围压水平取 3 种，分别为 30，52 和 100 kPa。动应力幅值影响通过动应力比 η_d 反映， $\eta_d = q_d / p'_0$ ，其中 q_d 为动应力幅值， p'_0 为初始平均有效应力。每级围压下，动应力比均取 4 级($\eta_d = 0.1, 0.2, 0.4$ 和 0.6)。另外，静偏应力的影响通过静应力比 η_s 反映，其定义为 $\eta_s = q_s / p'_0$ ，其中 q_s 为静偏应力。

表 1 试验方案

Table 1 Cyclic triaxial testing program

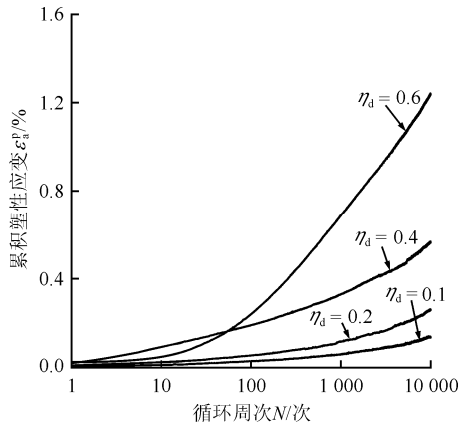
原位竖向应力 σ'_v /kPa	试验时平均有效应力 p'_0 /kPa	静偏应力比 η_s	动偏应力比 η_d
51	30	0.0	0.1, 0.2, 0.4, 0.6
52	52	0.0	0.1, 0.2, 0.4, 0.6
53	100	0.0	0.1, 0.2, 0.4, 0.6
51	30	0.2, 0.4	0.2, 0.4

根据以上的试验方案，制备直径 39.1 mm，高 80 mm 的试样。试验步骤为：首先将试样抽真空饱和，然后施加不同围压，排水固结时间至少 24 h，直至超孔隙水压完全消散；然后在不排水条件下施加静偏应力(如不考虑静偏应力，则直接进入下一步骤)；最后，进行三轴循环压缩试验，循环次数为 10 000 次。

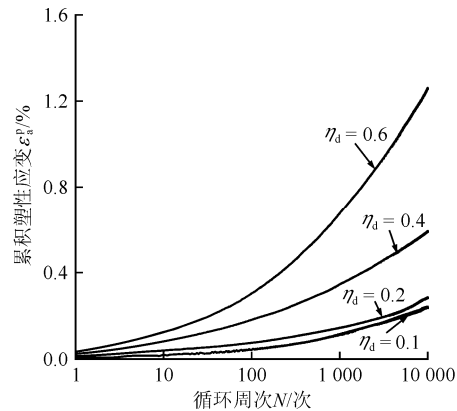
3 试验结果与分析

3.1 不考虑静偏应力影响试验结果

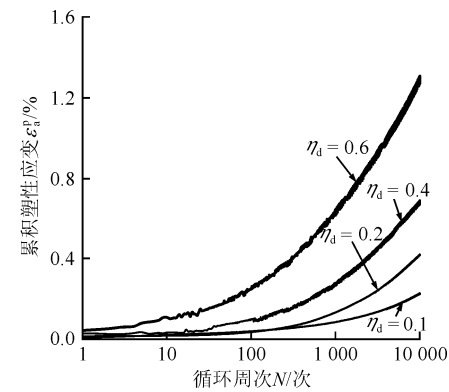
图 3 给出了半对数坐标下不同围压水平下试样累积塑性应变发展曲线。可以看出，围压水平相同



(a) $p'_0 = 30 \text{ kPa}$



(b) $p'_0 = 52 \text{ kPa}$



(c) $p'_0 = 100 \text{ kPa}$

图3 不同围压下 $\epsilon_a^p - N$ 曲线

Fig.3 Curves of $\epsilon_a^p - N$ under different values of p'_0

时,动应力幅值越大,累积塑性应变 ϵ_a^p 发展得越快。循环加载初期, ϵ_a^p 发展得较快,随后累积塑性应变速率逐渐降低。例如对于 $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $\eta_d = 0.6$ 这一工况,循环加载周次 $N = 2\,000$ 时, $\epsilon_a^p = 0.81\%$; $N = 10\,000$ 时, $\epsilon_a^p = 1.30\%$,而加载周次从 $8\,000$ 增加到 $10\,000$ 时, ϵ_a^p 仅增加了 0.08% 。另外,曲线形态表明,即使动应力水平较小(如 $\eta_d = 0.1$), ϵ_a^p 的发展也没有表现出稳定的趋势。图 4 给出了 $p'_0 = 100 \text{ kPa}$, $\eta_d = 0.6$ 工况下试样轴向应变与循环次数关系。可以看出,每一加载循环内,土体发生的塑性变形占总变形的比例很小。即使如此,在周而复始的长期循环荷载作用下,其累积变形也是很大的。

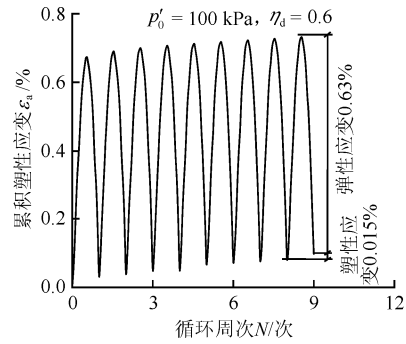


图4 轴向应变与循环次数关系

Fig.4 Relationship of axial strains versus loading cycles

图 5 给出了不同围压水平下加载循环达到 $10\,000$ 次时累积塑性应变 $\epsilon_{10\,000}^p$ 与动应力比 η_d 的关系。可以看出, $\epsilon_{10\,000}^p$ 与 η_d 间存在明显的非线性正相关关系。动应力比相同时,围压对应变的累积有一定影响,但影响相对较小。

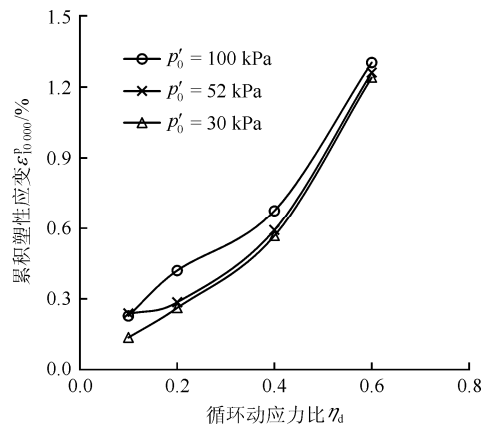
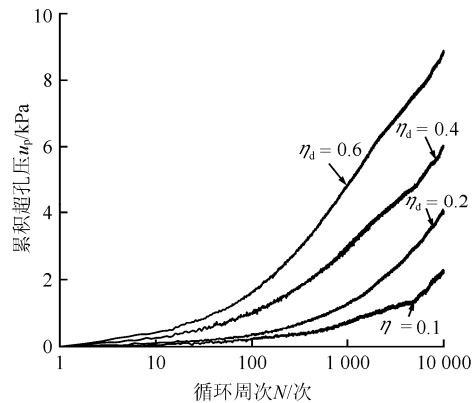


图5 不同围压水平下 $\epsilon_{10\,000}^p - \eta_d$ 曲线

Fig.5 Curves of $\epsilon_{10\,000}^p - \eta_d$ for different values of p'_0

图 6 给出了半对数坐标下不同围压水平下试样累积超孔压发展曲线。与累积塑性应变发展规律类似,围压水平一定时,相同加载循环周次下试样累积超孔压随动应力比的增加而增加。与累积塑性应变发展不同的是,动应力比相同时,围压对孔压的累积影响较大,如图 7 所示。图中 $u_{p10\,000}$ 表示加载循环达到 $10\,000$ 次对应的累积孔压。



(a) $p'_0 = 30 \text{ kPa}$

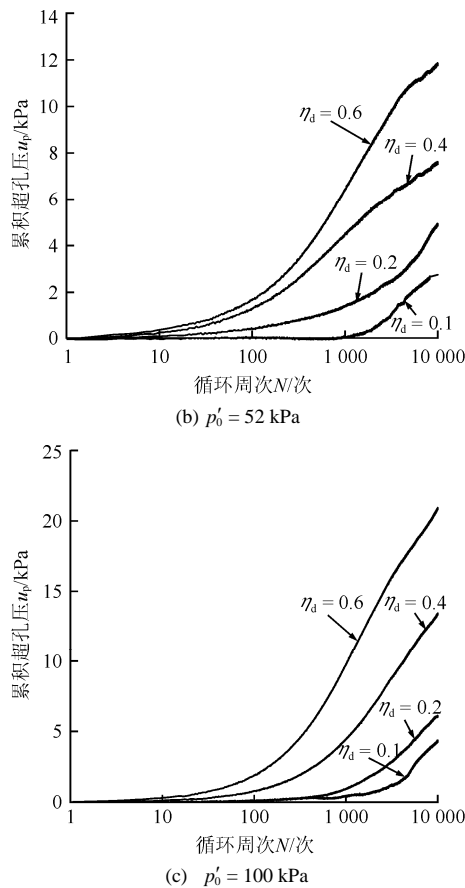


图 6 不同围压下 u_p - N 曲线

Fig.6 Curves of u_p - N under different values of p'_0

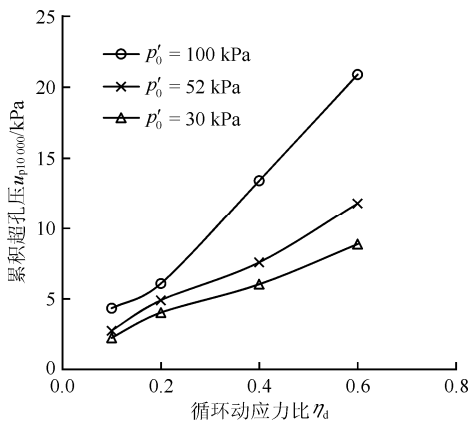


图 7 不同围压水平下 $u_{p10 000}$ - η_d 曲线

Fig.7 Curves of $u_{p10 000}$ - η_d for different values of p'_0

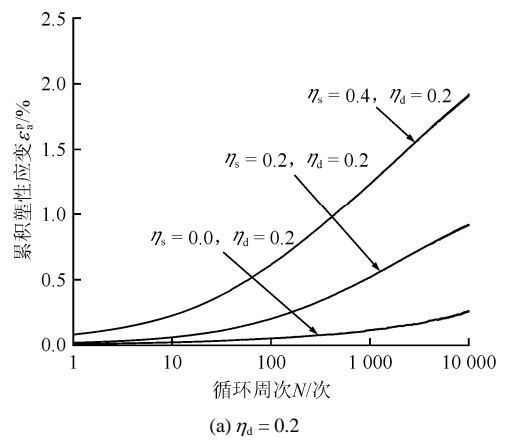
从以上分析可以看出，昆明泥炭质土在不排水循环加载条件下，不同围压水平以及动应力作用下，表现出的累积变形特性以及累积孔压发展规律类似于一般软黏土。但量级上，由于其他研究的一般软土的初始条件、循环荷载加载方式等与本研究的泥炭质土都不尽相同^[15, 17]，其差异机制需要从泥炭质土富含有机质的物质组成上做进一步探索。

3.2 考虑静偏应力影响试验结果

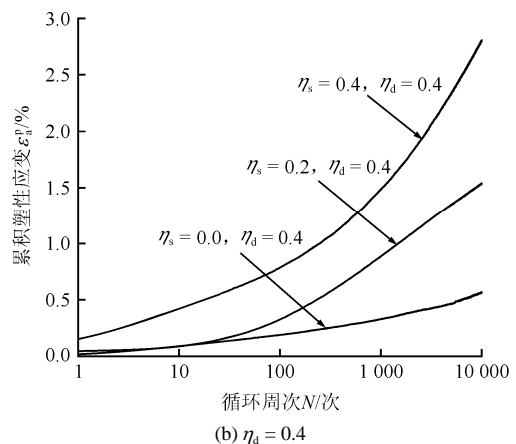
列车引起的动应力是一种单向脉冲模式而非双向正弦模式，动应力以一定的应力值为基准循环变

化，即所谓的交通荷载引起的静偏应力，其大小决定着循环荷载的作用方式。王常晶等^[14, 22-24]对静偏应力的影响效应展开了试验研究。这些研究表明，静偏应力对土体的循环累积特性有着显著地影响，如加快了土体轴向变形和动孔压的发展，并降低土体的动强度等。鉴于泥炭质土与一般土体工程力学特性上的差异，本节开展了静偏应力对泥炭质土动力特性影响的研究。

图 8 给出了 $p'_0 = 30$ kPa 条件下静偏应力和动应力组合作用下土体的累积变形发展曲线。从图 8 可知，不同动应力水平下，静偏应力的影响效应类似，即静偏应力越大，土体的累积塑性应变越大，且变形发展愈加不稳定。理论上而言，动应力水平相同时，静偏应力越大，土体受到的总荷载就越大，必然产生更大的累积塑性应变。鉴于此，图 9 对比了峰值偏应力相同(即 $\eta_d + \eta_s$ 相同)条件下土体累积塑性应变的发展规律。可以看出， $\eta_d + \eta_s$ 相等条件下，循环动应力大而静偏应力小得出的轴向累积塑性应变反而小，反映了静偏应力和动应力耦合作用下，静偏应力对土体累积塑性应变发展的影响效应要大于动应力的。



(a) $\eta_d = 0.2$



(b) $\eta_d = 0.4$

图 8 不同静偏应力比的 ϵ_p^p - N 曲线($p'_0 = 30$ kPa)

Fig.8 Curves of ϵ_p^p - N with different values of η_s ($p'_0 = 30$ kPa)

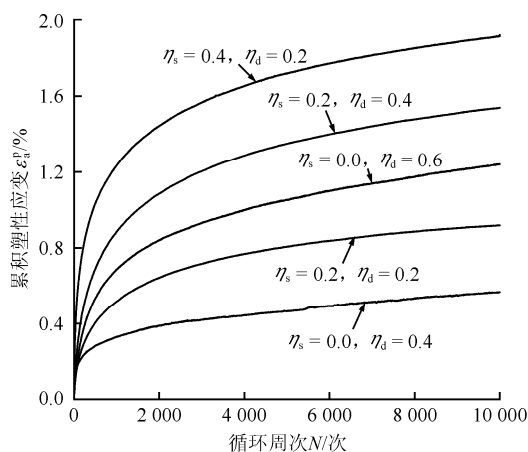
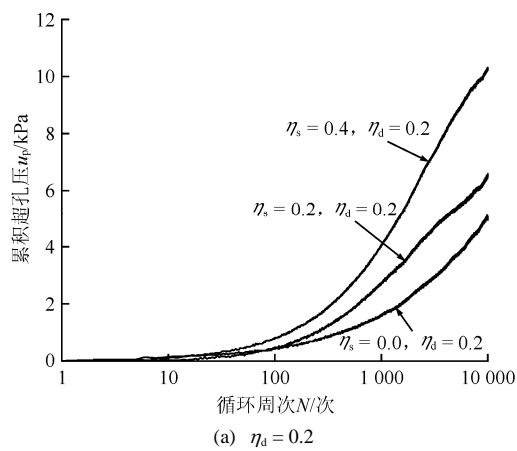


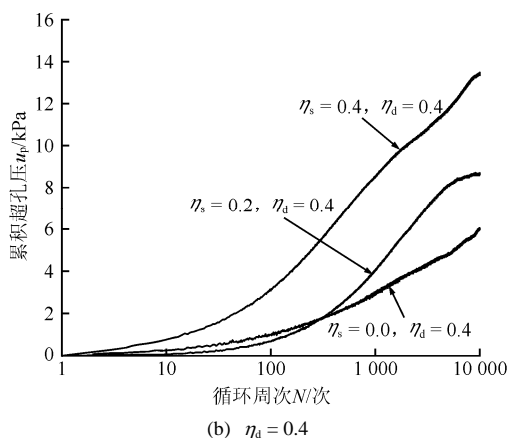
图9 不同静偏应力比和动应力比组合下 ε_a^p-N 曲线对比

Fig.9 Comparisons of ε_a^p-N for different η_d and η_s

图10给出了 $p'_0 = 30$ kPa 条件下静偏应力和动应力组合作用下土体的累积孔压发展曲线。由于仪器中孔压传感器是安装在试样底部，孔压测量有一定的滞后性，在循环加载初期试样中累积孔压测量值差别较小，但随着加载循环周次的增加，累积孔压差距越来越明显，即相同动应力水平下，静偏应力越大，累积孔压发展的越快。同样，图12对比了 $\eta_d + \eta_s$ 相同条件下土体累积孔压的发展规律。可以看出，与累积塑性应变对比结果不同， $\eta_d + \eta_s$ 相同



(a) $\eta_s = 0.2$



(b) $\eta_d = 0.4$

图10 不同静偏应力比的 u_p-N 曲线 ($p'_0 = 30$ kPa)

Fig.10 Curves of u_p-N with different η_s ($p'_0 = 30$ kPa)

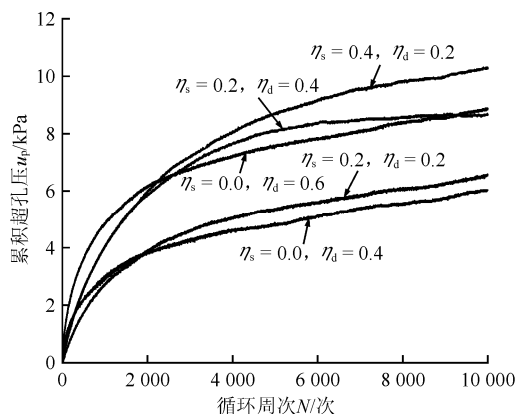


图11 不同静偏应力比和动应力比组合下 u_p-N 曲线对比

Fig.11 Comparisons of u_p-N for different η_d and η_s

时，试样中累积孔压间的差距较小，静偏应力没有表现出优势影响效应。

由此看来，动应力水平和静偏应力都对土体的变形发展产生较大影响，即动应力幅值的增大和静偏应力的增大均导致变形发展的加快。然而，两者耦合作用下，当动应力水平小而静偏应力大时，累积塑性变形的发展速度反而大。这与王常晶等^[14, 16]的研究结果一致。与此同时，孔压的发展并没有表现出太大的差别。因此，在构建土体动力本构模型时，不能单纯以动应力水平来判断变形的发展速度，还应考虑静偏应力这一因素。

3.3 累积塑性应变预测

通常预测土体在循环荷载作用下的累积塑性应变有2种方法：一种是建立复杂的动本构模型，另一种是经验拟合法。前一种方法须采用分步积分法进行计算，对于荷载历时较长的交通荷载，计算量较大。后一种方法是建立累积塑性应变与土体初始特性、静应力状态、动应力以及循环次数间的经验关系。如早期 G. B. Parr^[15]基于累积塑性应变速率和循环加载次数的关系建立的对数模型，C. L. Monismith 等^[25]建立的指数模型，D. Li 和 E. T. Selig^[26]通过引入土体的静强度参数对 Monismith 指数模型进行了改进，J. C. Chai 和 N. Miura^[27]又在 D. Li 和 E. T. Selig^[26]的模型基础上，考虑初始静偏应力影响，进一步提出新的指数模型。

基于前人研究方法，数据分析时发现双对数坐标下累积应变速率与循环周次间存在明显的线性关系，如图12所示 ($p'_0 = 52$ kPa)。加载初期，曲线存在一定的非线性，由于这一阶段加载周次较少，因而对曲线整体的线性关系影响较小。采用拟合公式 $\lg(\varepsilon_a^p/N) = A \lg N + B$ 对不同围压水平下的12组 $\lg(\varepsilon_a^p/N) - \lg N$ 曲线进行拟合，发现拟合曲线斜

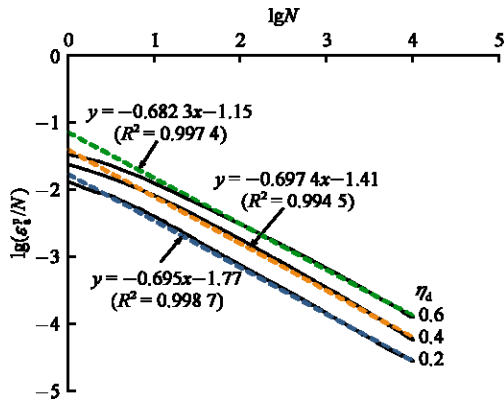


图 12 $\lg(\varepsilon_a^p / N) - \lg N$ 曲线
Fig.12 Curves of $\lg(\varepsilon_a^p / N) - \lg N$

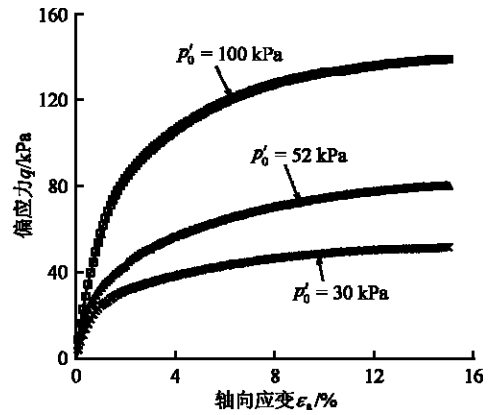


图 14 $q - \varepsilon_a$ 曲线
Fig.14 Curves of $q - \varepsilon_a$

率 A 的变化范围很小，拟合曲线近似平行，如图 13 所示，其变化范围为 $-0.678 \sim -0.712$ ，平均值为 -0.686 。此外，围压水平一定时，拟合曲线截距 B 随动应力水平的增加而逐渐减小。通过引入静破坏偏应力 q_f (不同围压水平下泥炭质土应力-应变曲线如图 14 所示， q_f 取轴向应变 15% 对应的偏应力^[28])。其中， $p'_0 = 30, 52$ 和 100 kPa 对应的 q_f 分别为 $50.59, 80.27$ 和 139.04 kPa，建立参数 B 与 q_d/q_f 间的关系，如图 15 所示，可见两者之间存在明显的对数关系 (拟合相关系数 $R^2 = 0.945$)：

$$B = 1.013 \lg(q_d / q_f) - 0.819 \quad (1)$$

故有：

$$\lg(\varepsilon_a^p / N) = -0.686 \lg N + 1.013 \lg(q_d / q_f) - 0.819 \quad (2)$$

进一步调整可得：

$$\varepsilon_a^p = 0.152 (q_d / q_f)^{1.013} N^{0.314} \quad (3)$$

式(3)的表达形式与 D. Li 和 E. T. Selig^[26]建立的指数模型形式相同，但两者的建立途径不同。利用式(3)对图 3 中的 12 组试验结果进行拟合，如图 16 所示。对比结果表明，式(3)可以很好地描述动应

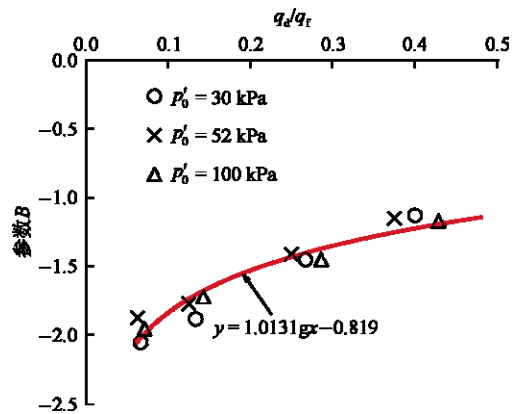
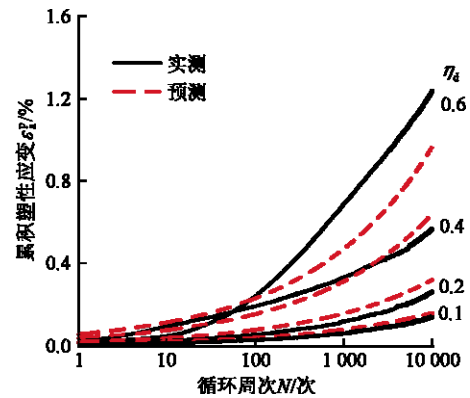
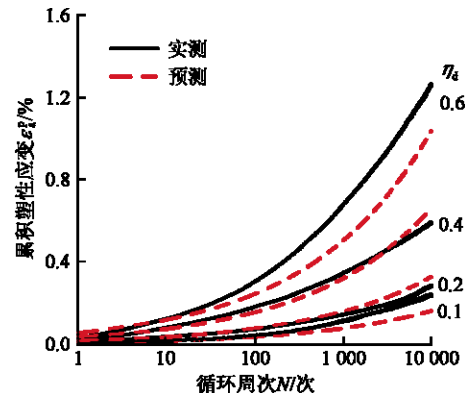


图 15 参数 B 与 q_d/q_f 关系

Fig.15 Relationships between B and q_d/q_f



(a) $p'_0 = 30$ kPa



(b) $p'_0 = 52$ kPa

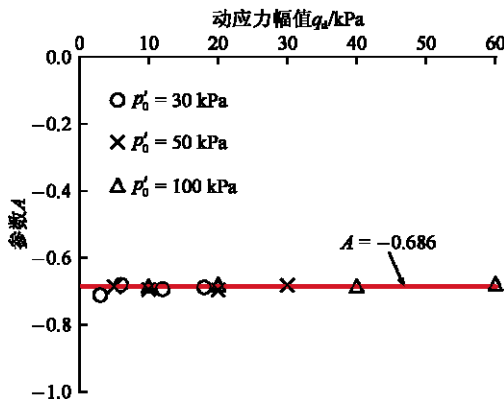


图 13 参数 A 与 q_d 关系

Fig.13 Relationships between A and q_d

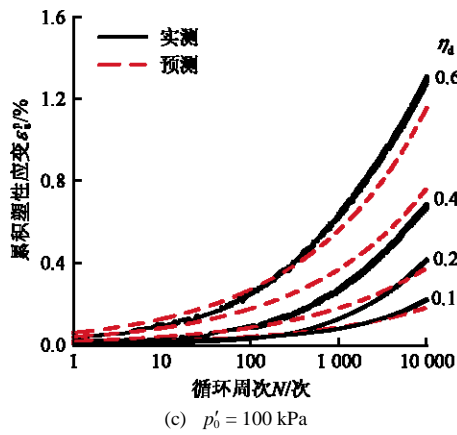


图 16 不同围压下 u_p-N 曲线

Fig.16 Curves of u_p-N under different p'_0

力水平对土体累积塑性应变的影响效应。不同围压水平下，动应力水平较低时，累计塑性应变预测值与实测值接近。动应力水平较高时，累计塑性应变预测值要小于实测值。总体而言，实测值与预测值吻合得较好。

式(3)建立过程中并没有考虑静偏应力对土体累积塑性应变的影响。为此，借鉴 J. C. Chai 和 N. Miura^[27]模型中考虑静偏应力的方法，建立第一次循环塑性应变比 r 与 q_s/q_f 间的关系，如图 17 所示。其中， r 表示在动应力比 η_d 相同情况下，存在静偏应力 q_s 时的第一次循环塑性应变与不存在静偏应力时的第一次循环塑性应变之比。可以看出，两者之间存在如下关系(拟合相关系数 $R^2 = 0.917$)：

$$r = (1 + q_s / q_f)^{8.54} \quad (4)$$

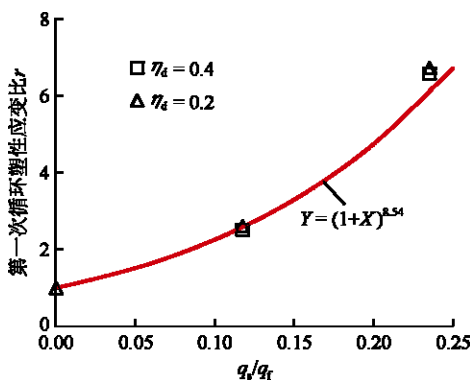


图 17 第一次循环塑性应变比 r 与 q_s/q_d 关系

Fig.17 Relationships between r and q_s/q_d

结合式(3)和(4)，考虑静偏应力效应时，累积塑性应变预测模型可表述为

$$\epsilon_a^p = 0.152(q_d / q_f)^{1.013} (1 + q_s / q_f)^{8.54} N^{0.314} \quad (5)$$

式(5)表达形式与 J. C. Chai 和 N. Miura^[27]模型相同。利用式(5)对图 8 中存在静偏应力的 4 组试验进行拟合，拟合结果与实测结果对比如图 18 所示。可以看出，式(5)可以反映静偏应力对土体累积塑性

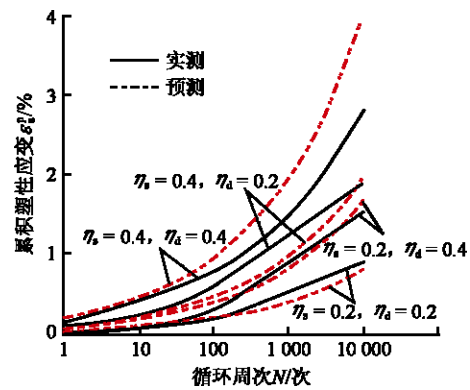


图 18 不同静偏应力比和动应力比组合下 ϵ_a^p-N 曲线

Fig.18 Curves of ϵ_a^p-N for different η_d and η_s

应变的影响效应，如 $\eta_d + \eta_s$ 相等条件下循环动应力大而静偏应力小计算出的累积塑性应变小，与实测结果类似。总体而言，实测值与预测值吻合得较好。

4 结 论

针对滇池草海附近典型泥炭质土，开展了室内动三轴试验，分析了围压水平、动应力幅值以及静偏应力对泥炭质土不排水动力累积特性的影响。得出如下结论：

(1) 围压相同时，动应力幅值越大，泥炭质土的累积塑性应变和孔压发展得越快。动应力比相同时，初始围压对累积塑性应变的发展影响相对较小，而对孔压的累积影响较大。

(2) 静偏应力对泥炭质土的累积变形和孔压均有较大的影响。动应力和静偏应力综合作用下，动应力水平相同时，静偏应力越大，累积塑性应变以及孔压发展得越快。另外，当动应力水平小而静偏应力大时，累积塑性应变的发展速度反而越大。

(3) 基于双对数坐标下累积应变速率与循环周次关系，并参考 J. C. Chai 和 N. Miura^[27]模型中考虑静偏应力效应的方法，建立了累积塑性应变与动荷载循环周次间的经验关系，并给出了具体的模型参数值。该经验关系可较好地描述泥炭质土累积塑性应变发展规律。

事实上，除本研究中考虑的围压水平、动应力幅值以及静偏应力 3 个影响因素外，泥炭质土在循环荷载作用下的不排水累积特性还受土体应力历史、固结方式、循环荷载频率以及排水条件等因素的影响。后续研究中，将逐步对这些因素的影响效应展开分析。

参考文献(References)：

[1] BERRY PL, POSKITT T J. The consolidation of peat[J]. Geotechnique,

- 1972, 22(1) : 27–52.
- [2] MADASCHI A, GAJO A. One-dimensional response of peaty soils subjected to a wide range of oedometric conditions[J]. *Geotechnique*, 2015, 65(4) : 274–286.
- [3] MESRI G, STARK T D, AJLOUNI M, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(5) : 411–421.
- [4] MESRI G, AJLOUNI M. Engineering properties of fibrous peats[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(7) : 850–866.
- [5] O'KELLY B C. Effective stress strength testing of peat[J]. *Proceedings of the ICE, Environmental Geotechnics*, 2015, 2(1) : 34–44.
- [6] 刘伟, 赵福玉, 杨文辉, 等. 安高线草海段泥炭质土的特征及性质[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增2) : 671–674. (LIU Wei, ZHAO Fuyu, YANG Wenhui, et al. Features and properties of peaty soil in Caohai section of Anning-Sonming line[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Supp.2) : 671–674. (in Chinese))
- [7] 桂跃, 余志华, 刘海明, 等. 高原湖相泥炭土固结系数变化规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 35(增1) : 3259–3267. (GUI Yue, YU Zhihua, LIU Haiming, et al. Experimental study of the change law of consolidation coefficient of the plateau lacustrine peaty soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 35(Supp.1) : 3259–3267. (in Chinese))
- [8] 吕岩, 俱磊, 徐燕, 等. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(4) : 655–660. (LU Yan, NIE Lei, XU Yan, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turf soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(4) : 655–660. (in Chinese))
- [9] 柳雅玲. 草炭土路基沉降与变形特性研究[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2006. (LIU Yanling. Research on settlement and deformation characteristics of peat soil roadbed[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese))
- [10] 蒋忠信, 黄俊, 陈国芳. 南昆线七甸泥炭土路基加固的沉降控制[J]. *铁道工程学报*, 1998, (4) : 79–89. (JIANG Zhongxin, HUANG Jun, CHEN Guofang. Subsidence control for reinforcing peat soil roadbed in the Qidian worksite of Nanning-Kunming railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1998, (4) : 79–89. (in Chinese))
- [11] TSB. Railway investigation report R99Q0019[R]. [S. 1.] : The Transportation Safety Board of Canada, 1999.
- [12] TSB. Railway investigation report R04Q0040[R]. [S. 1.] : The Transportation Safety Board of Canada, 2004.
- [13] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(9) : 1065–1071. (CHEN Yingping, HUANG Bo, CHEN Yunmin. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(9) : 1065–1071. (in Chinese))
- [14] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(11) : 1742–1747. (WANG Changjing, CHEN Yunmin. Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(11) : 1742–1747. (in Chinese))
- [15] PARR G B. Some aspects of the behaviour of London clay under repeated loading[Ph. D. Thesis][D]. UK : UK University of Nottingham, 1972.
- [16] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7) : 891–895. (HUANG Maosong, LI Jinjun, LI Xingzhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7) : 891–895. (in Chinese))
- [17] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(3) : 325–331. (HUANG Maosong, YAO Zhaoming. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(3) : 325–331. (in Chinese))
- [18] 唐益群, 张曦, 赵书凯, 等. 地铁振动荷载下隧道周围饱和软黏土的孔压发展模型[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(4) : 82–86. (TANG Yiqun, ZHANG Xi, ZHAO Shukai, et al. Model of pore water pressure development in saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(4) : 82–86. (in Chinese))
- [19] 王军, 蔡袁强, 徐长节. 循环荷载作用下软黏土刚度软化特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(10) : 2138–2144. (WANG Jun, CAI Yuanqiang, XU Changjie. Experimental study on degradation of stiffness of saturated soft clay under undrained cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 28(10) : 2138–2144. (in Chinese))
- [20] ASTM D2974-14. Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils[S]. West Conshohocken, PA, USA : ASTM International, 2014.
- [21] LANDVAA O, KORPIJAAKKO E O, PHEENEY P E. Geotechnical classification of peats and organic soils[S]. Testing of peats and organic soils, ASTM STP 820, American Society of Testing and Materials, 1983 : 37–51.
- [22] HYODO M, YAMAMOTO Y, SUGIYAMA M. Undrained cyclic shear behaviour of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress[J]. *Soils and Foundations*, 1994, 34(4) : 1–11.
- [23] HSU C C, VUCETIC M. Threshold shear strain for cyclic pore-water pressure in cohesive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(10) : 1325–1335.
- [24] 闫澍旺, 封晓伟, 田俊峰. 循环荷载下滨海软黏土孔压发展规律及强度弱化特性[J]. *中国港湾建设*, 2010, 169(增1) : 86–89. (YAN Shuwang, FENG Xiaowei, TIAN Junfeng. Pore pressure development and strength softening character of littoral soft clay under cyclic loading[J]. *China Harbour Engineering*, 2010, 169(Supp.1) : 86–89. (in Chinese))
- [25] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. *Transport Research Record*, 1975, 537 : 1–17.
- [26] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(12) : 1006–1013.
- [27] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2002, 128(11) : 907–916
- [28] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))