

DOI:10.11784/tdxbz202505011

不同排水条件下软黏土蠕变特性及长期 强度指标确定方法研究

刘 润, 杨若辰, 李成凤

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在工程研究领域, 软黏土的蠕变行为及其长期强度的评估是岩土工程中的关键问题。本文以天津滨海黏土为研究对象, 开展了不同应力水平、围压及排水条件下的三轴蠕变试验, 分析了排水条件对土体蠕变特性和长期强度的影响, 并对现有土体长期强度的判定方法进行了探讨和改进, 提出了一种基于应力-应变等时曲线确定长期抗剪强度指标的新方法, 通过对比分析验证其有效性与合理性。研究结果表明: 在相同围压条件下, 蠕变量及变形稳定时间随应力水平的提高而增加; 在相同应力水平下, 各应力水平下蠕变量随围压的增加而降低; 在不同排水条件下, 蠕变变形具有显著差异; 土体蠕变过程中, 排水条件是影响土体抗剪强度及强度指标的重要因素。在固结不排水蠕变条件下, 长期抗剪强度 τ_{∞} 约为瞬时抗剪强度 τ_0 的 84%~93%, 其中黏聚力衰减明显, 长期黏聚力值 c_{∞} 约为瞬时黏聚力值 c_0 的 37%, 内摩擦角变化相对较小。在固结排水蠕变条件下, 长期抗剪强度 τ_{∞} 约为瞬时抗剪强度 τ_0 的 106%~116%, 其中黏聚力降低幅度较小, 而内摩擦角显著提高, 长期内摩擦角 φ_{∞} 约为瞬时内摩擦角 φ_0 的 110%。本文研究成果可为滨海软土地区土体长期稳定性分析和工程设计提供参考。

关键词: 软黏土; 蠕变特性; 长期强度; 长期强度指标; 等时曲线

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)08-0805-10

Study on Creep Characteristics of Soft Clay and Determination Method for Its Long-Term Strength Indicator Under Different Drainage Conditions

Liu Run, Yang Ruochen, Li Chengfeng

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In the field of engineering research, the creep behavior of soft clay and the evaluation of its long-term strength are crucial issues in geotechnical engineering. In this paper, the influence of drainage conditions on the creep characteristics and long-term strength of Tianjin coastal clay were analyzed through triaxial creep tests conducted under various stress levels, confining pressures and drainage conditions. The existing methods for determining the long-term strength of soil were discussed and improved, and a novel approach based on stress-strain isochronous curves was proposed to assess the long-term shear strength indicators of the soil. The proposed method was validated through comparative analysis, demonstrating its effectiveness and rationality in practical applications. Results indicate that under the same confining pressure conditions, the creep amount and deformation stability time increase with an increase in the stress level. At the same stress level, the creep amount at each stress level decreases with an increase in the confining pressure. The creep deformation difference is significant under different drainage conditions. During the process of soil creep, the drainage condition is an important factor affecting the shear strength and strength indicators of soil. Under consolidated and undrained creep conditions, the long-term shear strength τ_{∞} is about 84% to 93% of

收稿日期: 2025-05-08; 修回日期: 2025-07-02.

作者简介: 刘 润 (1974—), 女, 博士, 教授, liurun@tju.edu.cn.

通信作者: 李成凤, licf@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB2603000).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2603000).

the instantaneous shear strength τ_0 , among which the cohesion decreases significantly, and the long-term cohesion c_∞ is about 37% of the instantaneous cohesion c_0 . Meanwhile, the internal friction angle remains relatively unchanged. Under consolidated and drained creep conditions, the long-term shear strength τ_∞ is about 106% to 116% of the instantaneous shear strength τ_0 , with only a minor reduction in cohesion and a significant increase in the internal friction angle. In addition, the long-term internal friction angle φ_∞ is about 110% of the instantaneous internal friction angle φ_0 . The research results can provide a reference for the long-term stability analysis and engineering design of soil in coastal soft soil areas.

Keywords: soft clay; creep behavior; long-term strength; long-term strength indicator; isochronous curve

软黏土在中国滨海及沿江地区广泛分布,其流变性一直是工程研究人员关注的重点. 土体具有流变性的主要原因是土体应力-应变关系有明显的时间相关性^[1-2],宏观表现为蠕变、长期强度、应力松弛、应变率效应等,其中蠕变是软黏土在恒定应力作用下随时间发生的变形,而长期强度则表示土体在长期作用下能够维持稳定变形而不发生破坏的临界应力. 这两者紧密关联,是土体变形与强度的核心问题,对于工程安全及周边环境稳定具有重要意义.

已有研究通过开展试验研究土体蠕变特性及长期强度,并尝试建立应变-应力-时间模型,从而预测土体应力-应变随时间变化规律. 在蠕变变形方面,已有研究针对不同软黏土提出了不同的经验模型及元件模型用于描述土体的蠕变特性:李军世等^[3]发现 Singh-Mitchell 模型能较好地描述不排水条件下上海淤泥质黏土的应力-应变-时间关系;针对天津软黏土,雷华阳等^[4]基于不同加荷方式下的蠕变试验结果建立了修正的对数型表达式;王元战等^[5]和袁宇等^[6]开展了三轴固结不排水蠕变试验,确立了 Merchant 模型参数,并建立了适用于天津滨海地区软黏土非线性蠕变模型. Deng 等^[7]针对温州地区软黏土开展了三轴排水蠕变试验,采用 Merchant 模型与 Burgers 模型对土体的蠕变行为进行预测分析. 上述研究多集中于单一排水条件下的蠕变特性建模,较少涉及排水与不排水条件下蠕变特性的对比.

在长期强度方面,现有研究工作包括长期强度的确定标准及长期强度的影响因素等^[8]. 部分研究将长期强度定义为蠕变由稳定型向加速型转变的临界应力,在此基础上建立了土体长期强度及蠕变失效时间的预测方法^[9-11]. 另一方面,研究人员采用等时曲线法分析了不同时间下的屈服应力,从而建立了土体长期强度的预测公式^[12-14]. 这两种确定土体长期强度的方法在理论上并不一致,其区别与联系需进一步研究. 此外,关于土体长期强度变化的观点尚未统一. 多数研究结果表明,土体长期强度相较于短期强度显著下降,但另一部分研究人员认为长期强度可能有所

提升,排水条件是影响长期强度变化的关键因素^[15].

综上所述,目前对于土体蠕变及长期强度已有一定研究,但仍存在一些亟待解决的问题. 首先,排水条件对软黏土蠕变特性及长期强度的影响尚未得到充分研究. 其次,土体长期强度及长期强度指标的确定方法并不统一,有待进一步探讨. 因此,本文采用滨海黏土开展三轴蠕变试验,研究围压、排水条件及应力水平对土体蠕变特性的影响,同时分析了不同排水条件下土体长期强度及长期强度指标的变化规律,提出了基于等时曲线确定土体长期抗剪强度指标的方法,研究结果可为工程计算提供参考.

1 试验内容与方案

为研究土体蠕变及长期强度特性,采用 GDS 应力路径试验系统开展不同排水条件、不同应力水平及不同围压下三轴蠕变试验. 试验选用天津滨海黏土进行重塑,滨海黏土天然含水率 $w = 37.0\%$,土体平均粒径 $d_{50} = 0.01 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u = 9.08$,曲率系数 $C_c = 0.56$,砂粒 ($0.075 \sim 2.000 \text{ mm}$) 含量 18.00% ,粉粒 ($0.005 \sim 0.075 \text{ mm}$) 含量 49.44% ,黏粒 ($\leq 0.005 \text{ mm}$) 含量 32.56% . 土体物性参数如表 1 所示. 重塑试样制备时,土体过 2 mm 筛,将干密度控制为 1.60 g/cm^3 ,根据所需试样的体积称取相应质量的土料在三瓣模中分 5 层击实. 试样制备完成后采用抽气及反压饱和法对试样进行饱和,饱和含水率 $w_{\text{sat}} = 25.9\%$.

表 1 天津滨海黏土物性参数

Tab.1 Physical property parameters of Tianjin coastal clay

比重 G_s	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数	孔隙 比 e	压缩模量 $E_s/$ MPa
2.73	37.60	17.27	20.33	1.01	2.71

在蠕变试验前,先进行常规三轴压缩试验,得到试样在不同排水条件及不同围压下的破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$,为蠕变试验中应力水平设定提供依据. 固

结不排水剪切及固结排水剪切试验剪切速率分别设定为 0.080 0 mm/min 和 0.009 6 mm/min^[16]。为减少不同试样差异对试验结果造成的影响,蠕变试验采用分级加载方式,偏应力分 5 级施加,每级应力水平 D_1 (施加偏应力与破坏偏应力比值)增量为 0.15,每级偏应力维持 24 h,偏应力加载速率按照各自排水方式所对应的剪切速率,方案如表 2 所示。

表 2 蠕变试验方案

Tab.2 Creep test plan

围压 σ_3/kPa	排水方式	应力水平 D_1
100	固结 不排水	0.15→0.30→0.45→0.60→0.75
200		0.15→0.30→0.45→0.60→0.75
300		0.15→0.30→0.45→0.60→0.75
100	固结 排水	0.15→0.30→0.45→0.60→0.75
200		0.15→0.30→0.45→0.60→0.75
300		0.15→0.30→0.45→0.60→0.75

2 蠕变变形特性

图 1 为固结不排水和固结排水三轴压缩试验偏应力-应变曲线。从图 1 中可以看出,固结排水剪切及固结不排水剪切偏应力-应变曲线均为应变硬化型,无峰值点出现,取试样轴向应变 $\varepsilon = 15\%$ 时偏应

力为破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。根据不同围压下试样破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 可得到抗剪强度指标,固结不排水剪切和固结排水剪切黏聚力值 c 及内摩擦角 φ 分别为 14.2 kPa、16.3°和 13.6 kPa、28.0°。

根据试验方案可得试样“阶梯型”蠕变全过程轴向应变曲线,不同围压及排水条件下蠕变全过程变形曲线规律相似,选择围压 200 kPa 条件下固结不排水蠕变作为代表,如图 2 所示。

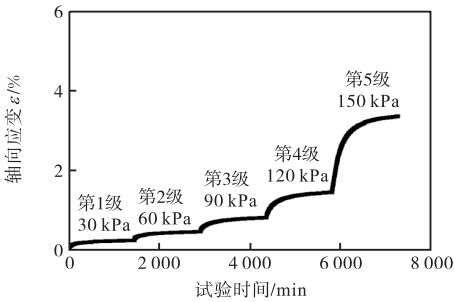


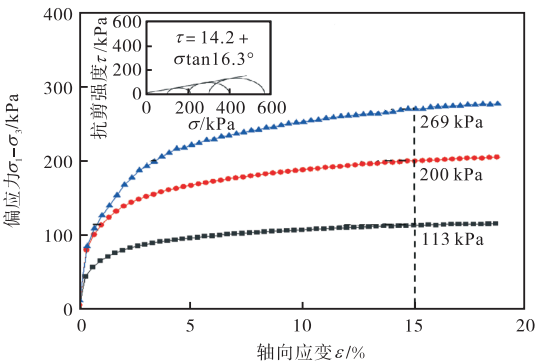
图 2 围压 200 kPa 条件下固结不排水蠕变全过程轴向应变曲线

Fig.2 Axial strain curve of consolidated undrained creep throughout the entire process under confining pressure of 200 kPa

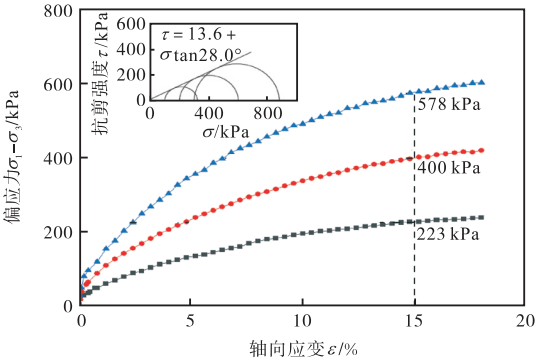
由图 2 可知,在低应力水平下,试样产生的蠕变应变较小,并在短时间内趋于稳定。随着应力水平的提高,相同应力水平增量下产生的蠕变增量及蠕变变形稳定时间逐渐增加。为得到试样在各级偏应力下的蠕变曲线,需对试样全过程应变曲线进行处理。转换时考虑偏应力加载过程中产生的轴向应变及上一级蠕变的影响^[17]。处理后得到不同围压下固结不排水条件和固结排水条件下蠕变-时间曲线,分别如图 3 及图 4 所示。

由图 3 可知,固结不排水蠕变时,在蠕变时间 $t = 0 \text{ min}$ 时,各级应力水平下会产生瞬时应变,此应变可视为土体在各级应力水平下产生的瞬时响应。随着蠕变时间推移,土体在试验设定各级应力水平下均呈现衰减型蠕变,蠕变速率逐步降低,轴向变形趋于稳定,未出现加速蠕变阶段。在相同围压下,各级蠕变量及蠕变趋于稳定的时间随着应力水平提高逐渐增加。在不同围压下,当应力水平相同时,产生的轴向应变随围压的增加而下降,在高应力水平下围压对蠕变的影响更加显著,这与王元战等^[5]、杨果岳等^[18]和张浴阳等^[19]的研究结果相似。

由图 4 可知,固结排水蠕变总体规律与固结不排水蠕变总体规律相似,但值得注意的是,试样在各级应力水平下加载结束时($t = 1440 \text{ min}$)产生的蠕变总量与下级轴向应变的初始($t = 0 \text{ min}$)量有较大差值,



(a) 固结不排水剪切



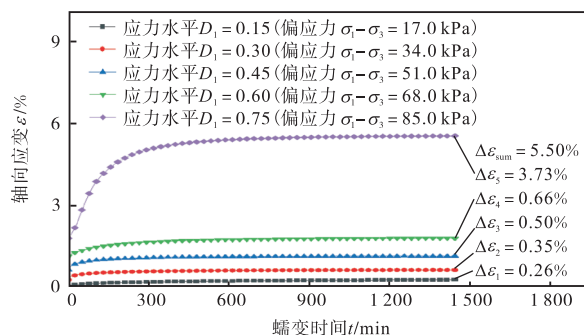
(b) 固结排水剪切

— 围压 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ — 围压 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ — 围压 $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$

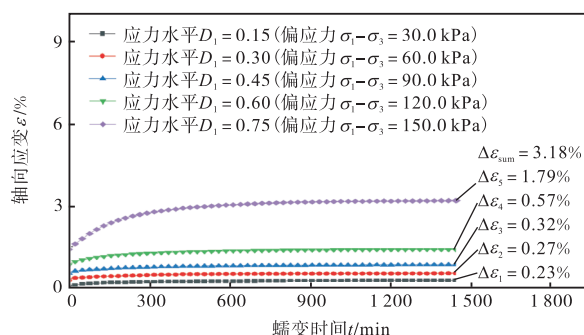
图 1 偏应力-应变曲线

Fig.1 Deviatoric stress-strain curves

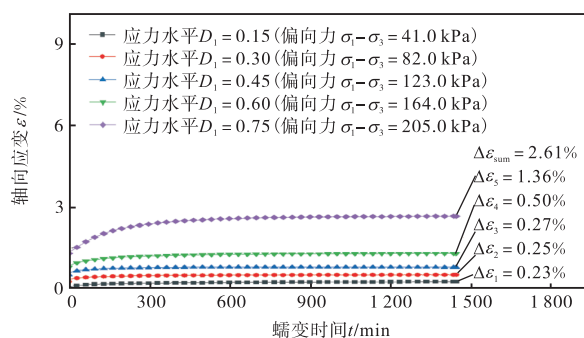
此部分差值产生的原因为试样在荷载施加及恒定时均处于排水状态, 应力水平从上级施加到下级过程中会产生较大变形, 此变形以主固结变形为主, 未计入蠕变变形^[7].



(a) 围压 $\sigma_3 = 100$ kPa



(b) 围压 $\sigma_3 = 200$ kPa



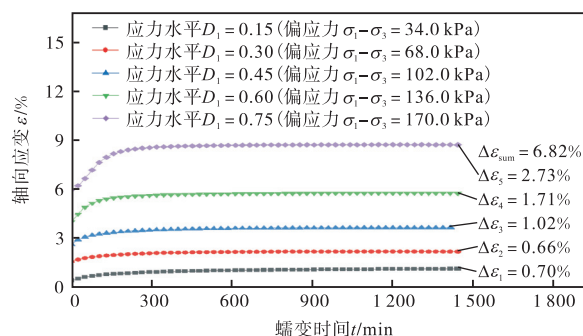
(c) 围压 $\sigma_3 = 300$ kPa

图 3 固结不排水蠕变-时间曲线

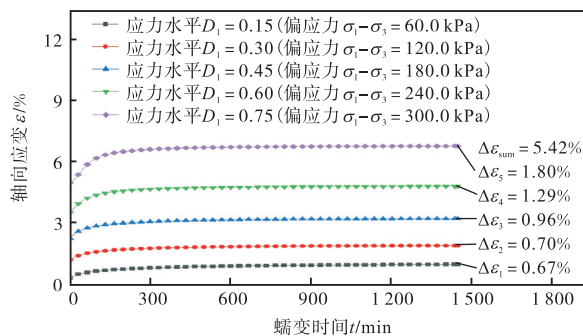
Fig.3 Consolidated undrained creep-time curves

对比图 3 及图 4 可以发现, 低围压状态下(100 kPa)排水蠕变应变在总体上大于不排水蠕变应变, 在最后一级应力水平($D_1 = 0.75$)下不排水蠕变应变大于排水蠕变应变. 随着围压增加到 200 kPa, 在不同应力水平下均呈现出排水蠕变应变大于不排水蠕变应变的现象. 这是由于在排水条件下黏土变形为固结和蠕变的耦合作用. 低围压时, 在荷载加载初期土颗粒被压密, 土样压缩变形量大, 随着时间发展, 结合水膜厚度变薄, 颗粒间摩擦力增大导致蠕变变形减弱. 在不排水条件下, 土样不存在固结排水过程, 变

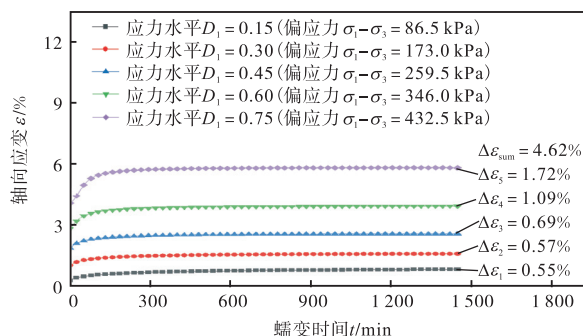
形只是蠕变的结果, 随着时间的发展土颗粒之间出现滑移, 土样后期出现持续变形. 随着围压增大, 固结造成的影响逐步显现, 同时高围压对土体的蠕变变形产生约束, 导致土体在各应力水平下排水时轴向应变均大于不排水时轴向应变. 由以上结果可知, 排水条件以及应力水平会对土体长期蠕变变形产生显著影响.



(a) 围压 $\sigma_3 = 100$ kPa



(b) 围压 $\sigma_3 = 200$ kPa



(c) 围压 $\sigma_3 = 300$ kPa

图 4 固结排水蠕变-时间曲线

Fig.4 Consolidated drainage creep-time curves

3 长期强度与长期强度指标

3.1 长期强度的确定方法

因土体的蠕变效应, 土体内部颗粒重新排列, 内部结构发生变化, 导致土体抵御外部破坏的能力发生改变. 因此, 可将长期荷载作用下土体的蠕变强度作为长期强度.

通过蠕变试验来确定土体长期强度的方法尚不

统一,目前以下两种确定土体长期强度的方法得到学界的广泛使用.方法1:根据陈宗基^[9]的流变理论,可将稳态蠕变与加速蠕变的分界应力作为土体的长期强度.方法2:绘制偏应力-应变等时曲线,等时曲线中的拐点可认为是土体的屈服点,以屈服点连线的水平渐近线偏应力 y_{∞} 作为长期强度.方法1的精度在很大程度上依赖于每级应力水平的增量.因此,该方法通常只能确定长期强度的大致范围,在实际应用时具有一定局限性.方法2可根据不同时间下试样的偏应力-应变关系推求长期强度,具有更强的适用性,因此其被诸多学者采用^[13,20-21],并被纳入《水利水电工程岩石试验规程》^[22].由于本研究中未出现加速蠕变阶段,故采用方法2来确定土体的长期强度值.通过对图3及图4中蠕变-时间曲线进行处理,绘制固结不排水蠕变及固结排水蠕变偏应力-应变等时曲线.不同围压下偏应力-应变等时曲线的形态及演化规律具有相似性,因此选取在围压200 kPa条件下的排水与不排水蠕变数据作为典型代表,如图5所示.本文将土体在 $t=0$ min时偏应力-应变曲线

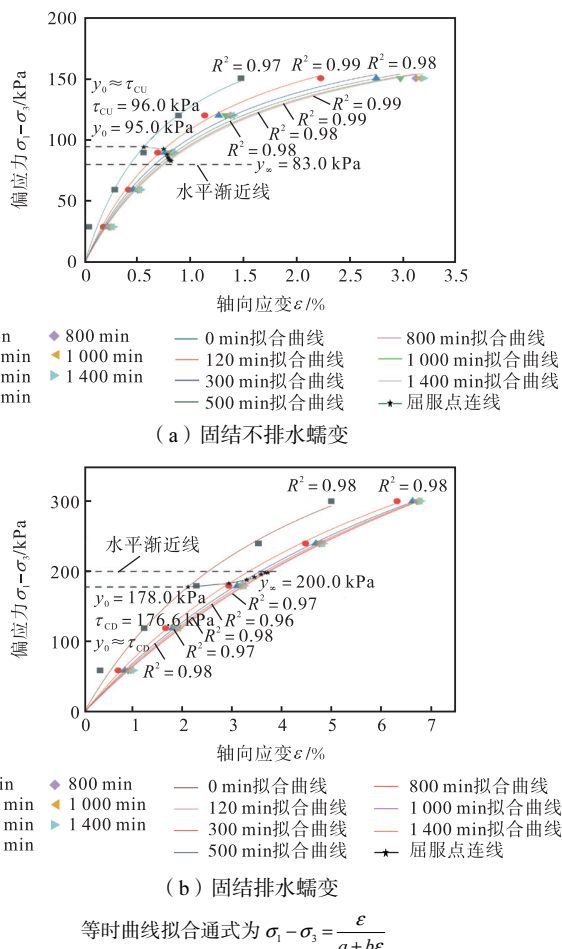


图5 围压200 kPa条件下偏应力-应变等时曲线

Fig.5 Deviatoric stress-strain isochronous curves under confining pressure of 200 kPa

上出现明显塑性变形时所对应的偏应力作为 $t=0$ min时土体的屈服应力 y_0 .

偏应力-应变等时曲线的准确绘制对于分析土体长期强度至关重要.由于将不同荷载下对应的应变连线仅能得到折线,因此无法判定屈服点出现的精确区间.为得到不同时间下偏应力-应变曲线,采用双曲线模型对数据点进行拟合,其中在 $t=0$ min时偏应力-应变曲线可认为是土体的瞬时偏应力-应变曲线,即未经历蠕变时的偏应力-应变曲线.此曲线理论上和常规三轴压缩试验得到的偏应力-应变曲线重合.屈服点反映了土体从弹性响应向塑性响应的转变,标志着土体由弹性阶段转变为塑性阶段.土体应力-应变曲线的1阶导数表示斜率,即切线模量,反映土体的刚度.屈服点可认为是斜率发生转折的点.采用拟合方程得到的偏应力-应变等时曲线为平滑曲线,确定各时间下的屈服点具有一定主观性.为减小误差,对各时间下偏应力-应变曲线求取1阶导数,将1阶导数图像转折点的横坐标作为屈服应变,屈服应变在各时间下偏应力-应变曲线上的纵坐标作为各时间的屈服应力 y_t .

3.2 长期强度的探讨与分析

部分学者^[13]在通过三轴蠕变试验分析土体长期强度变化时,采用等时曲线法将屈服点连线的水平渐近线所对应偏应力 y_{∞} 与常规三轴压缩试验的破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 进行对比,认为长期破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f\infty}$ 会降低至 y_{∞} ,如图6中黑色虚线 t_{∞} 所示.基于此,进一步求解长期抗剪强度指标,即长期黏聚力值 c_{∞} 和长期内摩擦角 φ_{∞} .

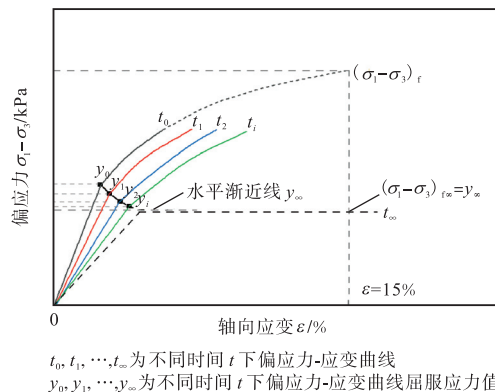


图6 长期蠕变下土体偏应力-应变曲线示意

Fig.6 Schematic of deviatoric stress-strain curves of soil under long-term creep

笔者认为,对于黏土的三轴蠕变试验,将 y_{∞} (即等时曲线法中的长期强度)作为土体的长期破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f\infty}$ 的合理性有待进一步探讨.

根据陈宗基^[9]的流变理论,长期强度是土体稳定蠕变与加速蠕变分界点所对应的应力.如果认为等

时曲线法中的长期强度是长期破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f\infty}$, 本文试验表明, 当应力水平 D_1 达到 0.75 时, 尚未出现加速蠕变, 土体轴向变形趋于稳定, 说明长期强度应高于该应力水平. 然而, 从图 5 可以看出, 屈服点显然在更低的应力水平下就已出现, 因此, 对于天津滨海黏土而言, 将 y_{∞} 作为土体的长期破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f\infty}$ 可能并不合理.

董建国等^[23]对上海软黏土开展三轴试验, 认为当偏应力-应变曲线达到屈服点时, 土体内部剪切带开始形成, 可采用屈服点对应的偏应力来表征土体的抗剪强度. 本研究中也发现类似现象, 如图 5 所示, 当围压为 200 kPa 时, 在固结不排水及固结排水条件下, $t = 0$ min 时屈服应力 y_0 分别约为 95.0 kPa 和 178.0 kPa, 与在 3.1 节常规三轴压缩试验中基于莫尔-库仑强度理论得出的抗剪强度 $\tau_{CU} = 96.0$ kPa 和 $\tau_{CD} = 176.6$ kPa 在数值上近似相等. 此外, 珠江三角洲软土^[24]和望江地区典型淤泥质粉质黏土^[25]的试验结果也表明, 在 $t = 0$ min 时屈服应力与抗剪强度相近. 等时曲线中屈服点位置的改变能直观反映蠕变对土体力学性质的影响. 因此, 建议将三轴蠕变试验中等时曲线中各时间下偏应力-应变曲线上的屈服应力 y_t 作为不同时间下的土体抗剪强度 τ_t , 将屈服点连线的水平渐近线偏应力值 y_{∞} 作为长期抗剪强度 τ_{∞} . 这样可合理解释前述试验中当应力水平 D_1 达到 0.75 时土体仍未出现加速蠕变的原因, 即当应力水平 D_1 为 0.75 时, 土体破坏面上的剪应力尚未到达长期抗剪强度 τ_{∞} .

综上所述, 基于黏土三轴蠕变试验有两种比较长期强度的方法: 方法 1 以偏应力为标准进行比较, 即将土体发生加速蠕变时的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f\infty}$ 与常规三轴压缩试验中的破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 进行比较; 方法 2 以屈服点标准进行比较, 即采用偏应力-应变等时曲线中屈服点连线的水平渐近线对应的应力值 y_{∞} 与 $t = 0$ 时屈服应力值 y_0 进行比较.

本文采用上述方法 2 进行分析, 将等时曲线各时间下屈服应力值 y_t 在数值上近似认为是土体不同时间下的抗剪强度 τ_t , 当时间 t 趋于无穷大时, y_{∞} 为土体的长期抗剪强度 τ_{∞} .

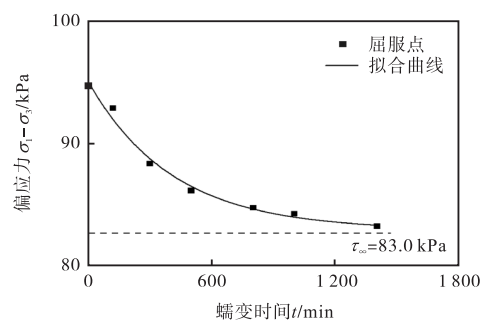
由图 5(a) 可知, 随着蠕变时间的增加, 屈服应力逐步降低, 表明在固结不排水条件下土体强度下降, 土体出现弱化. 由图 5(b) 可知, 在固结排水蠕变条件下, 随时间的推移, 偏应力-应变曲线非线性特性逐步降低, 屈服应力逐渐上升, 表明土体强度提高, 出现硬化, 这与董卫军^[8]、杨果岳等^[18]研究结果相同. 土

体出现硬化现象与试验过程中试样处于排水状态密切相关.

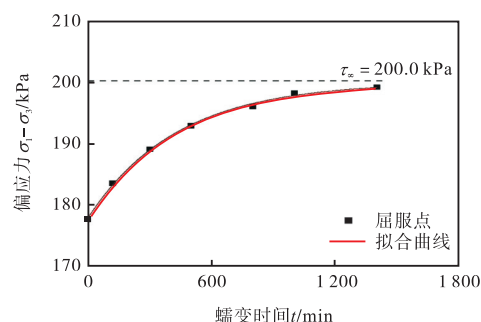
将各时间下的屈服应力值 y_t 近似为各时间下的抗剪强度 τ_t 进行连线(图 7), 确定不同围压下土体的长期抗剪强度 τ_{∞} , 可采用指数函数进行描述, 如式 (1) 所示.

$$\tau_t = a + b \exp(-t/m) \quad (1)$$

式中: τ_t 为不同时间下土体抗剪强度, kPa; a 、 b 、 m 为试验参数. 当时间 t 趋于无穷大时, 可得到长期抗剪强度 τ_{∞} , 即参数 a .



(a) 固结不排水蠕变



(b) 固结排水蠕变

图 7 围压 200 kPa 条件下抗剪强度-时间曲线

Fig.7 Shear strength-time curves under confining pressure of 200 kPa

将不同围压下长期抗剪强度 τ_{∞} 与未经历蠕变的瞬时抗剪强度 τ_0 进行对比, 如图 8 所示.

由图 8 可知, 在不排水条件下, 长期抗剪强度变化比随着围压的增加而增加, 长期抗剪强度 τ_{∞} 约为瞬时抗剪强度 τ_0 的 84% ~ 93%; 在排水条件下, 长期抗剪强度变化比随着围压的增加而提升, 长期抗剪强度为瞬时抗剪强度的 106% ~ 116%. 外部应力的增加使土体在固结阶段孔隙比减小, 提升了土体抵抗外部荷载的能力.

综上所述可知, 排水条件是影响土体长期抗剪强度的关键因素. 在实际工程中, 蠕变与固结往往是同时发生的, 应根据现场土体的排水条件及土体固结程度综合考虑固结对土体抗剪强度的增强以及蠕变对

土体抗剪强度的衰减。

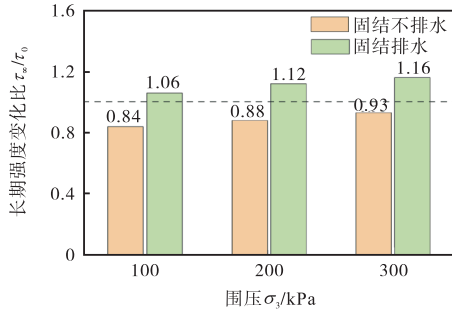


图8 长期强度变化比

Fig.8 Long-term strength change ratio

3.3 长期抗剪强度指标

在海洋及港口工程设计时,往往需要采用抗剪强度指标^[26-27].通过本研究中上述分析,将 y_{∞} 作为土体的长期抗剪强度 τ_{∞} ,得到强度包线如图9中方法1所示.如果将 y_{∞} 作为长期破坏偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{f\infty}$ ^[13],那么得到的强度包线如图9中方法2所示.

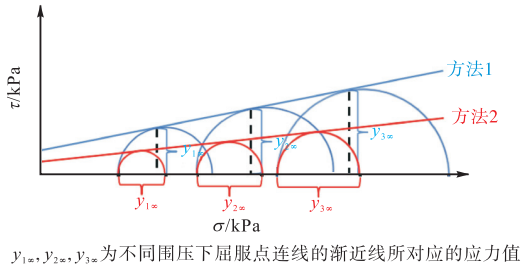


图9 长期抗剪强度指标计算对比

Fig.9 Comparison for calculation of long-term shear strength indicators

在通过常规三轴压缩试验计算土体抗剪强度指标时,对应变硬化土体,取轴向应变 $\varepsilon=15\%$ 对应的偏应力作为破坏偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$,根据摩尔-库伦强度理论可得到黏聚力值 c 和内摩擦角 φ .根据图9中方法2, y_{∞} 的轴向应变并未达到15%,如将其作为长期破坏偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{f\infty}$ 计算长期黏聚力值 c_{∞} 和内摩擦角 φ_{∞} ,可能与土力学中计算抗剪强度指标的方法并不相符,导致长期强度指标和短期强度指标的计算标准并不统一.因此,本研究按照图9中方法1针对不同围压下土体屈服应力的时变规律提出了计算长期抗剪强度指标的方法,如图10所示.

根据摩尔-库伦强度理论可得到抗剪强度、抗剪强度指标和围压 σ_3 之间的关系,其可表示为

$$\tau = c + \left[\frac{\tau}{\cos \varphi} (1 - \sin \varphi) + \sigma_3 \right] \tan \varphi \quad (2)$$

从式(2)中可以看出,抗剪强度 τ 和围压 σ_3 可根据试验结果得到,抗剪强度指标黏聚力值 c 和内摩擦

角 φ 为待求值.

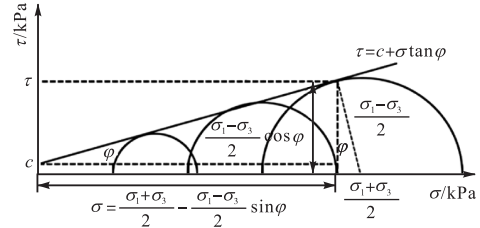


图10 抗剪强度指标计算示意

Fig.10 Schematic of calculation of shear strength indicators

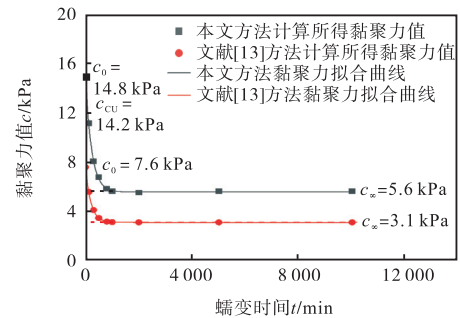
将不同围压下抗剪强度相减,可得

$$\Delta \tau = \left[\frac{\Delta \tau}{\cos \varphi} (1 - \sin \varphi) + \Delta \sigma_3 \right] \tan \varphi \quad (3)$$

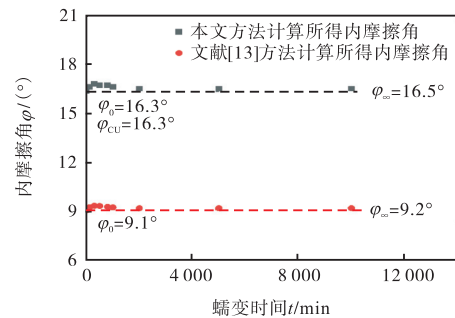
式中: $\Delta \tau$ 为任意两围压下高围压抗剪强度与低围压抗剪强度的差值,kPa; $\Delta \sigma_3$ 为任意两围压下高围压与低围压的差值,kPa.

式(3)中仅有内摩擦角 φ 为未知量.在3组围压下可得到3组抗剪强度指标,取其均值可得此时间下抗剪强度指标.采用式(1)描述抗剪强度指标时变规律,当 t 趋于无穷大时,可得到长期抗剪强度指标 c_{∞} 和 φ_{∞} .

图11及图12为不排水及排水蠕变下抗剪强度指标-时间曲线,其中使用的拟合通式与式(1)类似.



(a) 黏聚力值



(b) 内摩擦角

图11 不排水蠕变抗剪强度指标-时间曲线

Fig.11 Curves of undrained creep shear strength indicators vs time

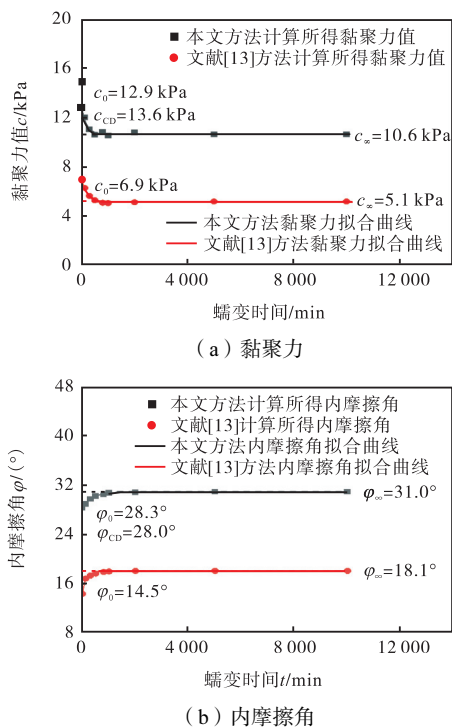


图 12 排水蠕变抗剪强度指标-时间曲线

Fig.12 Curves of drained creep shear strength indicators vs time

从图 11 及 12 可以看出,在时间 $t = 0$ min 时,抗剪强度指标可认为是短期强度指标,理论上与常规三轴压缩试验得出的抗剪强度指标相同.由上述方法计算出的未经历蠕变时不排水及排水蠕变抗剪强度指标与图 2 中通过常规三轴压缩得出的不排水及排水抗剪强度指标相近,说明将土体屈服应力近似为土体抗剪强度具有一定的合理性.图 11 与图 12 也给出了按照文献[13]方法得出的抗剪强度指标.可以发现,两种方法得出的长期抗剪强度指标 c_∞ 和 ϕ_∞ 差异明显,说明了将图 9 中 y_∞ 作为长期抗剪强度 τ_∞ 和长期破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\infty}$ 计算土体长期抗剪强度指标的重要区别.

对比分析不同排水条件下土体的长期抗剪强度指标可以发现,不排水蠕变时土体的长期黏聚力显著降低,仅为瞬时黏聚力值的 37%,而内摩擦角变化并不显著,库伦强度线向下平移,表明在不排水条件下土体长期强度的衰减主要为黏聚力的降低.排水蠕变时,土体的长期黏聚力略有下降,但长期内摩擦角显著提升,库伦强度线斜率增加,排水条件下强度的提升基本为内摩擦角的提升.

上述结果表明,排水条件是影响土体长期抗剪强度指标的重要因素.在不排水条件下,由于孔隙水无法排出,土体内部孔隙水压力逐渐累积,导致有效应力降低,进而削弱颗粒之间的接触力与胶结作用.在

这种作用机制下,土体表现出颗粒间滑移增强、孔隙结构松散化的趋势,从而使得黏聚力显著降低,但内摩擦角变化较小.黏聚力的下降主要源于颗粒间结合力的削弱,而内摩擦角的变化则受到颗粒接触面摩擦特性影响较小,因此长期强度的降低主要体现在黏聚力的衰减.在排水条件下,土体在加载过程中能够通过排水释放孔隙水压力,有效应力维持较高水平,土体颗粒在排水过程中经历主固结和次固结的双重作用,使得颗粒重新排列更加紧密,接触面积增加,颗粒间摩擦与咬合作用增强.在这种机制下,土体表现出结构致密化、颗粒间滑动阻力增大的特征,从而导致内摩擦角显著提升,但黏聚力略有下降.在工程应用时,应综合衡量系统服役周期内地基土体排水状况,选取长期抗剪强度指标,从而保证工程质量.

4 结 论

本研究以天津滨海黏土为研究对象,研究了土体蠕变特性及长期强度,主要得出以下结论.

(1) 天津滨海黏土在试验设定应力水平下呈现衰减型蠕变,未出现加速蠕变阶段,蠕变速率随时间延长而逐渐降低,最终趋于稳定.蠕变量及蠕变变形稳定时间随应力水平的提高而增加,各应力水平下蠕变量随围压的增加而降低.

(2) 排水条件是影响土体蠕变变形的重要因素,总体表现为随着应力水平的提高,在不排水条件下蠕变变形会在较高应力水平下突然增大,在排水条件下蠕变变形增大趋势较为平缓.100 kPa 围压下,低应力水平 (D_1 范围为 0.15 ~ 0.60) 时排水蠕变量大于不排水蠕变量,高应力水平时 ($D_1 = 0.75$) 不排水蠕变量大于排水蠕变量;围压达到 200 kPa 后,在不同应力水平下均呈现出排水蠕变量大于不排水蠕变量.

(3) 建议将三轴蠕变试验中等时曲线屈服点连线水平渐近线对应的偏应力作为土体的长期抗剪强度 τ_∞ .在固结不排水条件下,长期抗剪强度 τ_∞ 约为瞬时抗剪强度 τ_0 的 84% ~ 93%;在固结排水条件下,长期抗剪强度 τ_∞ 约为瞬时抗剪强度 τ_0 的 106% ~ 116%.

(4) 本研究提出了确定土体长期抗剪强度指标的新方法,结合常规三轴压缩试验结果验证了本文方法的合理性,并与现有文献[13]中确定长期强度指标的方法进行了对比.在固结不排水条件下,长期黏聚力值 c_∞ 大幅降低,约为瞬时黏聚力值 c_0 的 37%,长期内摩擦角 ϕ_∞ 基本不变;在固结排水条件下,长期黏

聚力值 c_{∞} 小幅降低, 长期内摩擦角 φ_{∞} 提升显著, 约为瞬时内摩擦角 φ_0 的 110%。

参考文献:

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
Yin Zongze. Principles of Earth Engineering[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2007(in Chinese).
- [2] Augustesen A, Liingaard M, Lade P V. Evaluation of time-dependent behavior of soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(3): 137-156.
- [3] 李军世, 林咏梅. 上海淤泥质粉质黏土的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 363-366.
Li Junshi, Lin Yongmei. Singh-Mitchell creep model of Shanghai very soft silt clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 363-366(in Chinese).
- [4] 雷华阳, 贾亚芳, 李肖. 滨海软土非线性蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2806-2816.
Lei Huayang, Jia Yafang, Li Xiao. Experimental study of nonlinear creep property of soft soil in littoral area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl 1): 2806-2816(in Chinese).
- [5] 王元战, 黄东旭, 肖忠. 天津滨海地区两种典型软黏土蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 379-384.
Wang Yuanzhan, Huang Dongxu, Xiao Zhong. Experimental research on creep properties of two typical soft clays in coastal region of Tianjin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 379-384(in Chinese).
- [6] 袁宇, 刘润, 邱长林, 等. 与应力相关的软土蠕变本构模型的建立和应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(7): 711-719.
Yuan Yu, Liu Run, Qiu Changlin, et al. Establishment and application of creep constitutive model related to stress level of soft soil[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(7): 711-719(in Chinese).
- [7] Deng H, Dai G L, Azadi M R, et al. Drained creep test and creep model evaluation of coastal soft clay[J]. Indian Geotechnical Journal, 2021, 51(6): 1283-1298.
- [8] 董卫军. 软土流变特性室内试验研究及长期强度的确定[D]. 南京: 河海大学土木工程学院, 2007.
Dong Weijun. Study on the Laboratory Test of Rheological Characteristic of Soft Clay and Long-term Strength [D]. Nanjing: College of Civil Engineering, Hohai University, 2007(in Chinese).
- [9] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1-20.
Tan Tjongkie. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1-20(in Chinese).
- [10] 刘克瑾. 天津滨海新区新近吹填软黏土的流变特性及非线性流变本构模型研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2010.
Liu Kejin. Rheological Property and Non-linear Rheological Constitutive Model Study of Recently Reclaimed Soft Clay in Tianjin Binhai New Area[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2010(in Chinese).
- [11] Tran T T T, Hazarika H, Indrawan I G B, et al. Prediction of time to soil failure based on creep strength reduction approach[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(4): 2749-2760.
- [12] 杨爱武, 张静, 肖敏. 基于不同结构强度软黏土长期强度特性研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 109-117.
Yang Aiwu, Zhang Jing, Xiao Min. Study on the long-term strength characteristics of soft clay with different structural strength[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 109-117(in Chinese).
- [13] 杨爱武, 杨少坤, 梁超, 等. 吹填泥浆固化土蠕变及长期强度特性研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 28-35.
Yang Aiwu, Yang Shaokun, Liang Chao, et al. Research on creep and long-term strength characteristics of solidified dredger mud[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 28-35(in Chinese).
- [14] 何仕娟, 王志良, 瞿嘉安, 等. 昆明泥炭土直剪蠕变特性及长期强度试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增1): 16-22.
He Shijuan, Wang Zhiliang, Qu Jia'an, et al. Experimental study on direct shear creep characteristics and long-term strength of peaty soil in Kunming[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(Suppl 1): 16-22(in Chinese).
- [15] 吴谦. 软黏土的结合水对其次固结和长期强度的影响及机理研究[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2015.
Wu Qian. Research on Influence of Bond Water on Secondary Consolidation and Long Term Strength of Soft

- Clay[D]. Changchun: College of Construction, Jilin University, 2015 (in Chinese).
- [16] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- GB/T 50123—2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019 (in Chinese).
- [17] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 299-312.
- Tan Tjongkie, Kang Wenfan. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 299-312 (in Chinese).
- [18] 杨果岳, 徐运龙, 李良吉, 等. 压实红黏土三轴蠕变特性试验及模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 727-735.
- Yang Guoyue, Xu Yunlong, Li Liangji, et al. Research on triaxial creep characteristics test and models of compacted red clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 727-735 (in Chinese).
- [19] 张浴阳, 巨能攀, 周 新. 倾倒变形边坡层间破碎带土体三轴蠕变试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 232-236.
- Zhang Yuyang, Ju Nengpan, Zhou Xin. Study of triaxial creep tests of soil from fracture zone between the slope layer in toppling rock slope[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1): 232-236 (in Chinese).
- [20] 陈昌富, 朱世民, 毛凤山, 等. 红黏土固结-蠕变特性及其耦合模型[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 723-728.
- Chen Changfu, Zhu Shimin, Mao Fengshan, et al. Characterization and modelling of coupled consolidation-creep behavior of red clay[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 723-728 (in Chinese).
- [21] 孙森军, 唐辉明, 王潇弘, 等. 蠕动型滑坡滑带土蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 385-391, 399.
- Sun Miaojun, Tang Huiming, Wang Xiaohong, et al. Creep properties of sliding-zone soil from a creeping landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 385-391, 399 (in Chinese).
- [22] SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- SL/T 264—2020 Code for Rock Tests in Water and Hydropower Projects[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2020 (in Chinese).
- [23] 董建国, 袁聚云. 基坑设计考虑黏性土变形局部化的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增 1): 1383-1386.
- Dong Jianguo, Yuan Juyun. Studies on design method of excavation considering clay localization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (Suppl 1): 1383-1386 (in Chinese).
- [24] 朱鸿鹄, 陈晓平, 程小俊, 等. 考虑排水条件的软土蠕变特性及模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 694-698.
- Zhu Honghu, Chen Xiaoping, Cheng Xiaojun, et al. Study on creep characteristics and model of soft soil considering drainage conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 694-698 (in Chinese).
- [25] 杨 超, 戴国亮, 龚维明, 等. 望江地区典型淤泥质粉质黏土蠕变特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增 2): 47-52.
- Yang Chao, Dai Guoliang, Gong Weiming, et al. Experimental research on creep properties of typical mucky silty in region of Wangjiang[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (Suppl 2): 47-52 (in Chinese).
- [26] JTS 147—2017 水运工程地基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- JTS 147—2017 Code for Foundation Design on Port and Waterway Engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2018 (in Chinese).
- [27] ISO/DIS 19901—4 Petroleum and Natural Gas Industries—Specific Requirements for Offshore Structures—Part 4: Geotechnical Design Considerations[S]. Geneva: ISO, 2022.

(责任编辑:武立有)