DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202001016

考虑软土应变软化效应的深埋式大圆筒承载性状分析*

吴宜鹏[1]，范庆来[1]，任增乾[2]，陈箫笛[1]

(1. 鲁东大学海洋土木工程技术研究中心,山东 烟台 264025;
2. 烟台市牟平区住房和城乡建设局,山东 烟台 264000)

摘要: 深埋式大圆筒结构近年来在我国深水软土地区的港口、跨海通道建设中得到了广泛应用,但是软土强度的应变软化效应对于其承载性状的影响没有得到系统的研究。在基于Tresca屈服准则的理想弹塑性模型中引入软土强度随着塑性应变累积的衰减规律,进而对软土中深埋式大圆筒结构的水平承载力特性进行了比较系统的数值分析。计算结果表明,考虑软土应变软化效应时,大圆筒结构的承载力明显降低,而且地基土强度的灵敏度、相对延性以及加固范围对于大圆筒结构承载力影响较大;软土地基加固前后,大圆筒在水平荷载作用下的失稳破坏模式发生改变,从加固前的双面破坏机制演变为加固后的单面破坏机制。

关键词: 大圆筒结构; 软土; 承载力; 应变软化; 失稳破坏机制
中图分类号: TV222.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1672-2132(2022)04-0859-07

Bearing Behavior of Deeply-embedded Large-diameter Cylindrical Structure Considering Strain Softening Effect of Soft Clay

WU Yipeng[1], FAN Qinglai[1], REN Zengqian[2], CHEN Xiaodi[1]

(1. Center for Marine Civil Engineering Technology, Ludong University, Yantai 264025, China;
2. Yantai Muping District Housing and Urban-Rural Construction Bureau, Yantai 264000, China)

Abstract: In recent years, the deeply-embedded large-diameter cylindrical structure has been widely used in the construction of ports and cross-sea passages in soft soil under deep water in China. However, the effect of strain softening of soft soil on the bearing capacity of the structure has not been studied systematically. By introducing the attenuation law of soft soil strength with the accumulation of plastic strain into the ideal elastic-plastic model based on the Tresca yield criterion, the lateral capacity of the deeply-embedded cylindrical structure in soft soil was analyzed. The results show that the bearing capacity of the large cylinder structure reduces significantly when the strain softening effect of the soft soil is considered, and the sensitivity, relative ductility and reinforcement range of the soft soil have a great influence on the lateral capacity of the structure. The failure mechanisms of the large cylinder un-

* **收稿日期:** 2020-01-28;**修回日期:** 2020-04-07
基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE010)、烟台市科技创新发展计划项目(2021XDHZ071)资助
作者简介: 吴宜鹏(1997—),男,硕士研究生。主要从事新型海洋基础性能评价等方面的研究。E-mail:2106771379@qq.com
通讯作者: 范庆来(1977—),男,教授,博士后。主要从事海洋岩土工程、原位测试技术等方面的研究。
E-mail:fanqinglai@ldu.edu.cn

der horizontal loading change from a double-sided failure mode before reinforcement to a single-sided failure mode after reinforcement.

Keywords: large-diameter cylindrical structure; soft clay; bearing capacity; strain softening effect; failure mechanism

引　言

深埋式大圆筒结构是我国近年开发的一种新型水工建筑物，它类似于无底的圆形沉箱，在软土地基和恶劣海况等复杂条件下，相对于传统结构及工艺，具有造价低、工期短等优势，因此在长江口深水航道治理、港珠澳大桥东西人工岛及深中通道人工岛建设中得到了推广应用。王元战等[1]、肖忠等[2]、张博杰等[3]分别结合具体工程，对于大圆筒结构静力荷载作用下的稳定性进行了比较系统的有限元模拟，分析了大圆筒结构在不同工况时的承载性状。然而，软黏土在循环荷载作用下强度和刚度的应变软化效应对于大圆筒结构的稳定性具有显著的影响。范期锦等[4]、刘海笑等[5]、蒋敏敏等[6]分别根据现场勘察、室内水槽及离心模型试验结果，认为地基土在波浪作用下的应变软化是该类型结构倾倒失稳的主要诱因。范庆来等[7]基于Andersen提出的循环强度概念，建议了非线性弹塑性—循环强度模型，并提出了软基上深埋式大圆筒结构循环承载力的拟静力计算方法。肖忠等[8]将天津港软黏土循环强度曲线与Drucker-Prager屈服准则相结合，进一步发展了基于循环强度概念的拟静力计算方法。Y.Z.Wang等[9]、焉振等[10]将该方法推广至软黏土地基中格型钢板桩结构、倒T型导管墙桩基防波堤、深水全直桩码头的稳定性分析。但是，循环强度的确定往往需要大量组成成分和初始应力状态相同的土样，实验工作量很大，而且所得到的循环强度与初始静剪应力、循环破坏次数之间的关系很难用统一的函数关系来表示，这些都不利于海洋结构物地基的稳定性分析[11]。近年来，西澳大利亚大学提出的一种软黏土不排水抗剪强度应变软化模型（以下简称西澳模型）得到了国际上的普遍认可，并在海洋平台桩靴安装、海底管线铺设、T型及球型全流触探仪循环贯入分析中得到了广泛采用[12]。Z. Xiao等[13]将Tresca屈服准则与西澳模型相结合，对于不排水条件下软基上条形浅基础的力学响应进行了系统的有限元分析，考察了循环荷载作用下软黏土应变软化效应对于浅基础承载性状的影响。在此基础上，本文进一步将该方法应用到深埋式大圆筒结构水平承载力计算中，并分析不同因素对于承载力的影响。

1　西澳模型及其数值实施

关于软黏土不排水强度软化的西澳模型最早由I. Einav等[12]提出，并得到了广泛采用。该模型综合考虑了软黏土强度的剪切速率效应和应变软化效应，如式(1)所示：

$$s_u = \left\{1 + \mu \lg\left[\frac{\max\left(\left|\dot{\gamma}\right|, \dot{\gamma}_{ref}\right)}{\dot{\gamma}_{ref}}\right]\right\} \times \left[\delta_{rem} + (1 - \delta_{rem})\,e^{-3\xi/\xi_{95}}\right] s_{u0} \tag{1}$$

式中，s_u为考虑速率效应和软化效应的软黏土不排水抗剪强度；s_{u0}为在参考剪切应变速率$\dot{\gamma}_{ref}$下测得的初始不排水强度，一般情况下参考剪切应变速率取为1.5%/h[12]；公式中等号右边第一个大括号里的项表明强度随着应变速率$\dot{\gamma}$呈常用对数函数关系增长，μ为参数；式中第二个方括号内的项表示强度随着土单元累积塑性应变ξ呈指数函数递减，其中$\delta_{rem} = 1/S_t$，S_t为软黏土的灵敏度，ξ_{95}为土样达到95%重塑度时所需要的塑性应变值，代表了土体相对延性的大小，即土体材料在受力至产生破坏之前的塑性变形能力大小[14]。

通过二次开发，利用USDFLD子程序对有限元软件ABAQUS中基于Tresca屈服准则的理想弹塑性模型进行了改进。在有限元每一个增量步开始计算之前，通过子程序USDFLD将高斯积分点的塑性应变分量提取出来，代入式(1)进行计算，然后将得到的不排水强度s_u输给本构模型，开始当前增量步计算。在本次增量步迭代计算过程中，土单元高斯积分点上的强度参数保持不变，因此为了准确的估算每个土单元强度的改变，增量步一般需要取的足够小。经过试算，最大增量步长设为0.05。

2 有限元模型

考虑到所研究问题的对称性，取大圆筒结构与地基相互作用体系的一半进行建模，如图1所示。地基模型选取为圆柱体，直径为108 m，深度为50 m，经过试算，所选取的模拟范围可以消除边界效应影响。模型底部约束三个方向的自由度，外侧面约束水平方向两个自由度，在对称面上仅约束法向自由度。筒体内外壁、底面与附近土体之间的界面采用摩擦薄单元进行模拟[15]，其不排水强度取为αS_u，α为考虑扰动影响的折减系数，本文取$\alpha=\delta_{rem}$。参照我国某工程案例中采用的深埋式大圆筒结构的方案设计参数，大圆筒结构直径$D=13.5$ m，筒壁厚度$t=25$ cm，结构埋深$L=25$ m，海床表面以上大圆筒结构的高度$L_i=10.5$ m，波浪荷载的集中作用点距离海床表面处高度$L_p=6$ m。

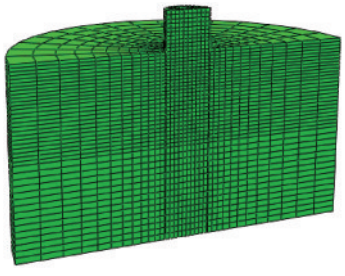

图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

为了便于研究波浪作用下深埋式大圆筒结构的承载力，将实际的不规则波以理想的正弦波来代替[16]，并简化为集中荷载，如式(2)所示：

$$F(t)=A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\varphi\right) \tag{2}$$

式中，A为振幅；T为波浪周期；φ为初始相位，本文取$T=5$ s，初始相位$\varphi=0$。

建立模型后，首先施加重力G和块石压载q，然后根据设计工况，按照式(2)模拟若干次正弦波浪荷载，最后进行单调水平加载直至大圆筒结构发生倾覆失稳，此时得到的极限荷载即为考虑软土应变软化效应的深埋式大圆筒结构承载力，如图2所示。考虑到海岸结构物遭受一次风浪作用的时间约为1小时，本文假定波浪荷载循环$n=500$次后，再进行单调加载直至失稳破坏[13]。

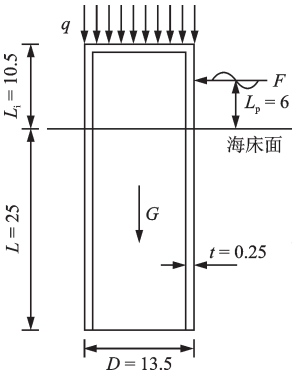

图2 大圆筒结构受力示意

Fig.2 Loads on the cylindrical structure

注：L_i为海床面以上筒高，m；L为筒埋深，m；D为筒径，m；t为筒壁厚，m；G为筒重，kN；q为块石压载，kPa；F为单调荷载或波浪荷载，kN；L_p为荷载作用点与海床面间距，m

大圆筒结构采用线弹性模型模拟，弹性模量$E=210$ GPa，泊松比$v=0.3$。均质地基的初始不排水抗剪强度$s_{u0}=10$ kPa，变形模量$E=500s_{u0}$，泊松比$\nu=0.49$。相对于地震等动力荷载来讲，波浪力的频率一般较低，其作用在大圆筒结构上的力传递到地基中而引起的海床土剪切速率效应不会非常显著，同时为了更好反映应变软化效应的影响，本文暂未考虑剪切速率效应，因此西澳模型中$\mu=0$，$\xi_{95}=30$，$\delta_{rem}=0.25$，相当于软黏土的灵敏度$S_t=4$。根据式(1)，剪切应变速率效应会引起土体强度提高，因此本文不考虑速率效应所得到的承载力偏保守，这对于工程来讲是偏于安全的。

分别进行以下三种情况的计算：

(1) 不考虑应变软化效应，在计算过程中软黏土不排水强度$s_u=s_{u0}$保持不变。同时，也不考虑波浪循环荷载，在模型中施加重力G和压载q后，直接进行单调水平加载直至结构失稳。对于本算例，可得此时的极限承载力为$F_{u0}=4\ 500$ kN。

(2) 不考虑应变软化效应，在计算过程中软黏土不排水强度$s_u=s_{u0}$保持不变。在模型中施加重力G和压载q后，接着进行500次循环加载，其中循环荷载的幅值$A=0.2F_{u0}=900$ kN，然后进行单调加载直至结构失稳。对于本算例，可得此时的极限承载力为$F_{u1}=4\ 600$ kN，与情况(1)得到的F_{u0}相差仅为2%。

(3) 考虑应变软化效应，在计算过程中软黏土不排水强度s_u按照西澳模型产生弱化。加载情况与情况(2)完全一致。可得此时的极限承载力为$F_{us}=3\ 030$ kN，比情况(1)得到的F_{u0}降低33%。

情况(2)和情况(3)的比较如图3所示。通过比较可以看到,采用西澳模型考虑强度软化效应,经过波浪循环作用后的结构承载力发生比较明显的降低,而不考虑软化效应,即使在有限元模型中进行了循环加载,极限承载力也基本不变,这与已有的勘察、试验结果不相符合,从而说明了在计算分析中考虑软黏土应变软化效应的必要性。

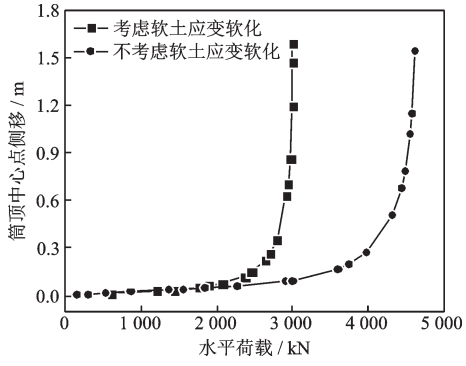

图3　软土应变软化效应对于荷载—位移曲线的影响

Fig.3　Effect of strain softening of soft clay on load-displacement curve

3　参数分析

3.1　软土灵敏度的影响

在其它参数不变的条件下,S_t=2、4、6情况下得到的大圆筒结构水平荷载-筒顶中心点侧移关系曲线如图4所示。从图中可以看出,当软土敏感度S_t=2时,δ_{rem}=0.5,大圆筒结构的极限承载力为3 480 kN;软土灵敏度为4和6时,其承载力分别比S_t=2情况降低13%和21%。说明实际工程中必须进行软土的灵敏度试验。对于灵敏度较高的地基,必要情况下需要进行适当的加固处理。

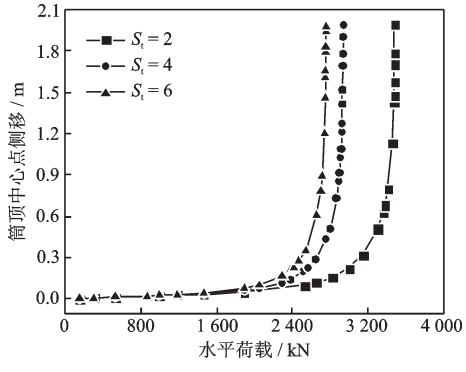

图4　软土灵敏度对于承载力的影响

Fig.4　Effect of soil sensitivity on bearing capacity

3.2　土体相对延性的影响

在其余参数不变的情况下,研究土体的相对延性参数ξ_{95}对结构水平承载力的影响。ξ_{95}=10、30和50情况下得出的水平荷载-筒顶中心点侧移的关系曲线如图5所示。从图中可以看出,土体相对延性ξ_{95}=10时,结构的水平承载力为1 572 kN;ξ_{95}=50时,结构的承载力极限值达到3 459 kN,表明地基土体延性参数ξ_{95}值较高时,结构的水平极限承载力得到了显著提高。

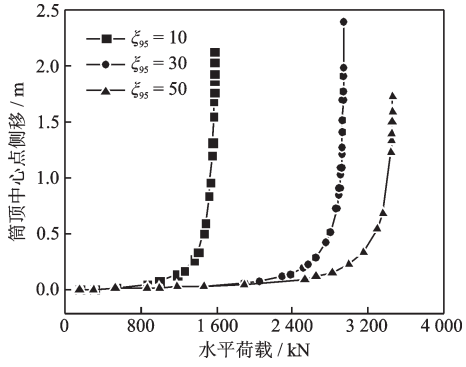

图5　土体相对延性对于承载力的影响

Fig.5　Effect of soil ductility on bearing capacity

3.3　土体加固范围的影响

在软黏土地基上,往往需要通过对大圆筒周围的软黏土进行插打塑料排水板联合堆载预压加固,从而提高大圆筒结构的水平承载力。参考肖忠等[8]的建议,软黏土地基土体加固前后的强度参数见表1。而且在计算过程中,加固区域土体不产生应变软化,直接用ABAQUS中内置的Mohr-Coulmb模型进行模拟,其余参数均与第2节中的算例一致。

对大圆筒结构的筒外软黏土插打塑料排水板进行加固,有竖直(轴向)和水平(径向)两个方向的加固范围。下面分别进行讨论。

取轴向上塑料排水板的插打深度h_g为$L/3$、$L/2$,L为大圆筒结构的埋置深度,径向上排水板布设范围为$R/2$、R和$3R/2$,R为大圆筒结构的半径。

表1　地基土体强度参数

Table 1　Soil strength parameter

参数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/kPa
加固前	10	0	5 000
加固后	25	12	5 400

通过数值模拟，得出当塑料排水板的插入深度 $h_g=L/3$ 和 $L/2$ 时不同径向布设范围对大圆筒结构承载力的影响，如图6所示。

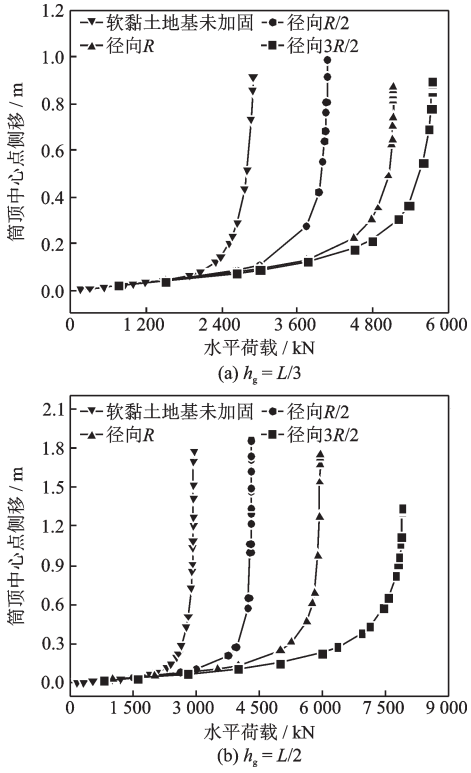

图6　土体径向加固范围对于承载力的影响

Fig.6　Effect of soil radial reinforcement range on bearing capacity

从图6可以看出，在塑料排水板深度一定的情况下，结构的水平承载力随着塑料排水板径向布设范围的增加而提高。例如当 $h_g=L/3$、径向加固范围从 $R/2$ 增加到 R 时，承载力提高了27.5%。可见地基加固可以比较有效的提高大圆筒结构的水平承载力，加固前后大圆筒结构失稳机理变化能够合理的解释，如图7所示。

范庆来等[17]根据研究认为，大圆筒结构绕筒体内中轴线上某点发生转动失稳，筒底部形成球形滑裂面，而靠近泥面附近产生潜在破坏楔体，并将大圆筒的失稳破坏机制划分为仅在筒体被动侧形成楔体的单面破坏机制和在筒前后均产生楔体的双面破坏机制。从图7可以看到，加固前筒体失稳模式是一种双面破坏机制，而加固后筒体失稳接近于单面破坏机制，只是筒体被动侧楔体的形状发生了改变，这是因为加固区的存在引起更大范围的土体参与抵制筒体倾倒，因此导致承载力的提高。

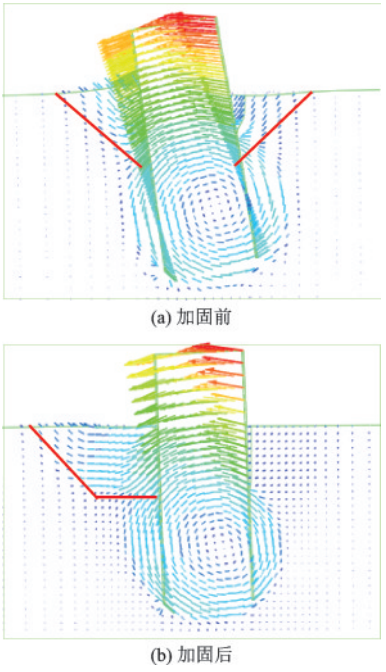

图7　软土地基中大圆筒结构失稳机制

Fig.7　Failure mechanisms of cylindrical structure in soft soil

4　结　论

通过二次开发，在基于Tresca屈服准则的理想弹塑性模型中引入考虑软土应变软化效应的西澳模型，对软土中深埋式大圆筒结构的水平承载力特性进行了数值分析，结论如下：

(1) 考虑软土应变软化效应时，大圆筒结构的承载力产生明显降低，而且地基土强度的灵敏度与相对延性对于大圆筒结构承载力影响较大。

(2) 对筒外土体进行加固可以有效提高大圆筒结构的水平承载力。在加固深度一定的情况下，结构的水平承载力随加固区径向尺寸的增加而提高。

(3) 软土地基加固前后，大圆筒在水平荷载作用下的失稳破坏模式发生改变，从加固前的双面破坏机制演变为加固后的单面破坏机制。筒体被动侧因加固区的存在引起更大范围的土体参与抵制筒体倾倒，因此导致承载力的提高。

参 考 文 献：

[1]　王元战，王文良．大圆筒结构计算及工程应用[M]．北京：人民交通出版社，2008：55-74.

Wang Y Z, Wang W L. Numerical computations and

applications of large diameter cylindrical structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 55-74. (in Chinese)

[2] 肖忠，李斌，王元战. 大圆筒人工岛围堰结构稳定性和筒底地基应力的有限元分析[J]. 港工技术，2014，51(5)：24-28.
Xiao Z, Li B, Wang Y Z. Stability of large cylindrical cofferdam for man-made island and finite element analysis of foundation stress at the bottom of large cylinder [J]. Port Engineering Technology, 2014, 51(5): 24-28. (in Chinese)

[3] 张博杰，王婷婷. 大圆筒结构整体稳定性和水平变位三维数值模拟[J]. 水运工程，2019，44(8)：177-182.
Zhang B J, Wang T T. 3D numerical simulation of the overall stability and horizontal displacement of large cylinder structure [J]. Port & Waterway Engineering, 2019, 44(8): 177-182. (in Chinese)

[4] 范期锦，李乃扬. 长江口二期工程北导堤局部破坏的原因及对策[J]. 中国港湾建设，2004，24(2)：1-8.
Fan Q J, Li N Y. The reasons & countermeasures for north bank's part failure in the second phase regulation project of Yangtze Estuary[J]. China Harbour Engineering, 2004, 24(2): 1-8. (in Chinese)

[5] 刘海笑，王仲捷，唐云，等. 随机波作用下沉入式大圆筒结构的动土压力及结构失稳机理探究[J]. 中国港湾建设，2002，22(6)：21-25.
Liu H X, Wang Z J, Tang Y, et al. Dynamic earth pressures on deeply embedded large cylindrical structure under random waves and mechanism investigation on structural instability [J]. China Harbour Engineering, 2002, 22(6): 21-25. (in Chinese)

[6] 蒋敏敏，蔡正银，肖昭然，等. 黏土中箱筒型基础防波堤静力失稳破坏模式和承载力研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(4)：642-649.
Jiang M M, Cai Z Y, Xiao Z R, et al. Analyses of bearing capacity for deeply-buried large-diameter cylindrical structure on soft clay considering cyclic-softening effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 642-649. (in Chinese)

[7] 范庆来，栾茂田，杨庆，等. 考虑循环软化效应的软基上深埋大圆筒结构承载力分析[J]. 大连理工大学学报，2006，46(5)：702-706.
Fan Q L, Luan M T, Yang Q, et al. Analyses of bearing capacity for deeply-buried large-diameter cylindrical structure on soft clay considering cyclic-softening effect [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(5): 702-706. (in Chinese)

[8] 肖忠，王元战，及春宁，等. 波浪作用下加固软基上大圆筒结构稳定性分析[J]. 岩土力学，2010，31(8)：2648-2654.
Xiao Z, Wang Y Z, Ji C N, et al. Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2648-2654. (in Chinese)

[9] Wang Y Z, Yan Z, Wang Y C. Numerical analysis of caisson breakwaters on soft foundations under wave cyclic loading [J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(1): 1-18.

[10] 焉振，王元战，肖忠，等. 循环荷载下软黏土不排水强度弱化分析的动力有限元ABAQUS实现[J]. 岩土力学，2016，37(增2)：735-744.
Yan Z, Wang Y Z, Xiao Z, et al. Dynamic finite element analyses for post-cyclic undrained strength degradation of soft clay in ABAQUS under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 735-744. (in Chinese)

[11] 齐剑峰，栾茂田，聂影，等. 饱和黏土循环剪切强度与变形特性的试验研究[J]. 水利学报，2008，39(7)：822-828.
Qi J F, Luan M T, Nie Y, et al. Experimental study on cyclic shear strength and deformation behavior of saturated clays[J]. Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 822-828. (in Chinese)

[12] Einav I, Randolph M F. Combining upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(14): 1991-2016.

[13] Xiao Z, Tian Y H, Gourvenec S. A practical method to evaluate failure envelopes of shallow foundations considering soil strain softening and rate effects [J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 395-407.

[14] Xiao Y, Stuedlein A W, Chen Q S, et al. Stress-strain-strength response and ductility of gravels improved by polyurethane foam adhesive[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2018, 144(2): 211-223.

[15] 栾茂田，范庆来，杨庆. 非均质软土地基上吸力式沉箱抗拔承载力数值分析[J]. 岩土工程学报，2007，29(7)：1054-1059.
Luan M T, Fan Q L, Yang Q. Numerical analysis of

ultimate pull-out resistance of suction caisson in inhomogeneous soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1054-1059. (in Chinese)

[16] 范庆来，韩彦青，麻世林，等. 循环荷载作用下海上风机桶形基础力学响应数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报，2019，27(3)：646-657.
Fan Q L, Han Y Q, Ma S L, et al. Numerical analysis of response of bucket foundations for offshore wind turbines subjected to cyclic loading[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(3): 646-657. (in Chinese)

[17] 范庆来，栾茂田，杨庆. 横观各向同性软基上深埋式大圆筒结构水平承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(1)：94-101.
Fan Q L, Luan M T, Yang Q. Numerical analysis of ultimate bearing capacity of large-diameter cylindrical structures deeply embedded in cross-isotropic soft soil against lateral loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 94-101. (in Chinese)

（本文责编：赵霞）

“西部艰险山区重大基础设施防灾减灾关键理论与技术”专题征稿函

随着以“川藏铁路”“滇中引水”等为代表的国家重大基础设施建设的不断开展，沿线工程穿越的地形、地质条件越来越复杂，隧道不断往长、深、大的方向发展，工程建设过程中将可能面临高地应力岩爆与大变形、高地温、活动断裂及突涌水等各类工程灾害，同时西部深山峡谷区桥梁、大坝等在高烈度地震下引发的泥石流、滑坡、边坡失稳变形等问题越来越多，导致重大基础设施可能面临的灾害风险高、压力大。

为提升西部复杂艰险山区重大建设工程、生命线工程的抗灾减灾能力和设防水平，建立健全预防为主、防抗减灾相结合的科技支撑体制，保障国家重点难点基建工程的建设与运营安全，《防灾减灾工程学报》拟开展“**西部艰险山区重大基础设施防灾减灾关键理论与技术**”专题征稿，欢迎各位专家学者不吝赐稿。

一、征稿范围：

①西部山区隧道工程防灾减灾关键理论与技术
②西部山区岩土工程防灾减灾关键理论与技术
③西部山区桥梁工程防灾减灾关键理论与技术
④西部山区地震（地质）工程防灾减灾关键理论与技术
⑤西部山区工程建设、运营期灾害风险与应急救援关键理论与技术
⑥西部山区重大工程案例快讯

二、征稿时间

2022年4月18日—2023年4月18日

三、论文格式

同《防灾减灾工程学报》正刊文章，具体要求详见本刊《写稿样式》

四、投稿网址

http://fzjzgcxb.ijournals.cn/fzjzgcxb/home，投稿时请选择栏目“**西部艰险山区重大基础设施防灾减灾关键理论与技术**”。

《防灾减灾工程学报》编辑部