

文章编号:1673-9469(2021)04-0023-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.004

基于扭剪试验的细砂区域长距离流滑机制分析

张旭¹, 谭维佳^{2*}

(1. 中建材西南勘测设计有限公司, 四川 成都 610052; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 大量灾害现场发现, 即使地面倾角极其平缓($1^{\circ} \sim 5^{\circ}$), 地表也可能因地震荷载而发生长距离的横向变形。为了解此类砂土变形特性, 在改良的空心圆柱扭转剪切仪中采用涌水量概念进行试验, 随后采用恒定剪应力静态液化试验, 确定排水条件以及小初始静力剪切条件下试样流动的可能性。为突出对比, 相同试样被用以进行不排水循环加载试验, 观察其行为特征。研究发现: (1) 在小初始静态剪应力下可以观察到丰浦砂连续流动的特性; (2) 砂土的连续流动特性由初始密实度决定, 初始密实度也影响砂土的体积膨胀特性; (3) 静态液化试验显示流动砂土试样在涌水机制下可产生流动, 而即使样本发生了液化, 其在典型的不排水试验中却表现出非流动特性。

关键词: 砂土; 扭剪; 流动; 液化

中图分类号: TU441

文献标识码: A

Mechanism Analysis of Long-distance Flow Slip in Fine Sand Area Based on Torsional Shear Test

ZHANG Xu¹, TAN Weijia^{2*}

(1. CNBM Southwest Geotechnical Investigation & Survey & Design Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 830017, China;

2. School of Geological Engineering and Survey, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: At a large number of disaster sites, it has been found that even if the ground inclination is extremely flat ($1^{\circ} \sim 5^{\circ}$), the ground surface may undergo long-distance lateral deformation due to earthquake loads. In order to understand the deformation characteristics of this kind of sand, the research used the concept of water inflow in an improved hollow cylindrical torsion shear tester. Subsequently, a constant shear stress static liquefaction test was used to determine the possibility of sample flow under drainage conditions and small initial static shear conditions. In order to highlight the comparison, the same sample was used for the undrained cyclic loading test to observe its behavior characteristics. The research found that: (1) The continuous flow characteristics of Toyoura sand can be observed under small initial static shear stress; (2) The continuous flow characteristics of sand are determined by the initial density, which also affects the volume expansion characteristics of sand; (3) The static liquefaction test shows that the flowing sand sample can flow under the water gushing mechanism, and even if the sample is liquefied, it shows non-flowing characteristics in a typical undrained test. This study enriches the related research on the fine sand area, and can provide a certain reference for sand liquefaction analysis.

Key words: sandy soil; torsion shear; flow; liquefaction

大量研究发现, 坡度较大的砂土场地往往在
地震液化后产生流动现象并随之促成明显的变

形; 而一些坡度并不大的边坡, 也能产生显著的地
表位移, 有些位移甚至达到了数千米^[1-2]。不断有

收稿日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41790443); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102260105); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190647)

作者简介: 张旭(1984-), 男, 四川成都人, 工程硕士, 高级工程师, 从事水文地质、工程地质及环境地质等研究。

* 通讯作者: 谭维佳(1988-), 男, 陕西西安人, 博士, 主要从事工程地质和地质灾害研究。

学者对此类破坏进行现场调查,以揭示长距离流动破坏的机理。这种地面运动可以在非常平缓的斜坡上大规模发生,即使仅有 $1^\circ \sim 5^\circ$ [3]。Hidayat 等 [2] 研究认为,造成这种长距离流滑的原因是有效应力的显著降低,以及可能来自承压含水层或地下断层水的大量地下水使地表的剪切强度显著降低。Okamura 等 [4] 研究发现,为了将夹水层作为推动这种长距离水流滑动的唯一因素,整个区域的夹水层应该是平滑连续的,而这种假设与调查结果并非完全一致。因此,这种夹水层的概念并不能完全解释长距离流滑的发生。Kokusho [5] 的研究表明,当倾斜的低渗透层下方形成层间水时,低渗透层及其上层在保持其形状的同时,由于重力作用会产生较大的变形。

针对砂土的研究,在典型的室内不排水剪切试验中,即使非常松散的砂土,张力较大时砂土的强度和刚度最终也会恢复 [6-7]。而结果表明,在不排水条件下,在缓坡地面不可能发生长距离流滑。然而,考虑到承压含水层的地下水或地下断层水的流入可能为液化层提供了充足的水分,因此允许出现显著的膨胀现象。而这种情况显著降低了地表的剪切力,导致即使在缓坡地面也会发生长距离的流滑 [8-9]。

本研究以华东区域广泛分布的细砂为研究对象 [10],并采用性质较为类似的丰浦砂进行流动变形性质分析,采样砂土在改进的圆柱形空心扭转剪切仪中发生流动变形行为。采用恒剪应力静态液化试验,研究了排水条件下砂土样本在小初始静力剪切作用下流动的可能性。而采用相同的现场砂土试样,进行不排水循环加载试验,观察样本在不排水条件下的力学行为。

1 大应变扭剪试验

1.1 仪器及样品准备

本研究采用了一种全自动扭转剪切装置,装有空心圆柱形试件(图 1)。试件外径为 100 mm,内径为 60 mm,高度为 200 mm。该装置采用皮带驱动扭力加载系统,通过电磁离合器和一系列减速齿轮与交流伺服电机连接,可实现超过 100% 的双幅剪切应变(γ -DA)水平。采用铁丝和滑轮的外接电位器来测量大面积变形。指定的剪应力幅值由连接到计算机的数据采集系统控制,它监测来自力传感器的输出并计算剪应力。通过使用来自 Umar 中相同试件尺寸的经验方程来校正测量的剪

应力对膜力的影响 [8]。

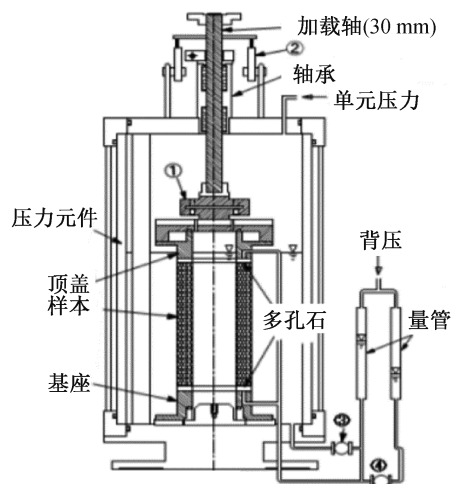


图 1 空心圆柱扭剪仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of hollow cylindrical torsional shear apparatus

本研究采用细粒含量 10% (非塑性) 的丰浦砂 ($G_s = 2.648$, $e_{\max} = 0.948$, $e_{\min} = 0.619$) 和现场采用的华东细砂 ($G_s = 2.639$, $e_{\max} = 0.948$, $e_{\min} = 0.519$) 进行研究,两种样品的粒度分布如图 2 所示。

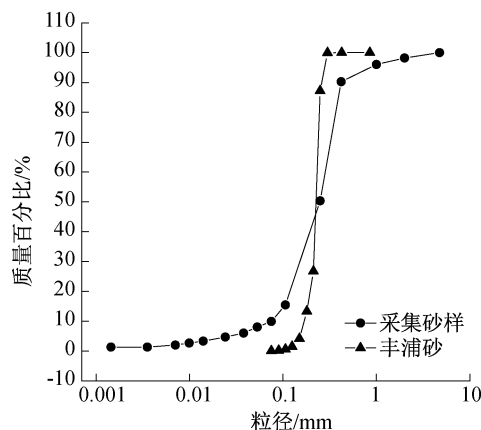


图 2 丰浦砂及现场采样试样粒度分布图

Fig. 2 The particle size distribution of Toyoura sand and field sample

1.2 测试程序

本研究在改进后的扭剪仪上进行了一系列恒定剪应力下的静力液化试验。所有样品均采用砂雨法制备并采用双真空法对试样进行饱和处理。

对于丰浦砂,试样进行各向同性固结,平均有效应力(p')为 100 kPa,背压为 200 kPa。固结后,排水条件下试件的初始静态剪应力(τ_{static})为 7.5 kPa。对于现场样本,固结程度达到 $p' = 50$ kPa,初始静态剪应力(τ_{static})为 4 kPa。丰浦砂样品和现场样品的测试条件都代表了 1.5% ~ 2% 的地面倾角,

表 1 修改后的扭转剪切仪试验参数详情

Tab. 1 List of experiments on modified torsional shear apparatus

测试序号	相对密实度 $D_r/\%$	初始静态剪应力 $\tau_{\text{static}}/\text{kPa}$	平均有效应力 p'/kPa	B 值	试验材料	测试类型
TS 1	23.4	7.5	100	0.96	丰浦砂	静态液化
TS 2	44.0	7.5	100	0.96	丰浦砂	静态液化
TS 3	50.0	7.5	100	0.96	丰浦砂	静态液化
TS 4	58.0	7.5	100	0.97	丰浦砂	静态液化
TS 5	73.0	7.5	100	0.96	丰浦砂	静态液化
TS 6	84.0	7.5	100	0.96	丰浦砂	静态液化
NS 1	75.0	4.0	50	0.94	采样细砂	静态液化
NS 2	84.0	4.0	50	0.94	采样细砂	不排水循环加载+不排水单调加载

并通过 Chiaro^[9]提供的公式进行计算分析。

在初始静态剪应力(τ_{static})作用下, p' 随背压的增大而逐渐减小,幅度为 5 kPa/min;这种减少一直持续到样品在 τ_{static} 下表现出连续的流动行为。在减少 p' 的过程中,样本的高度没有固定。当剪切应变(γ_{zq})大于 80%时终止试验。在扭剪仪中进行的静力液化试验列表如表 1 所示。

对采样土先进行不排水循环加载试验,然后进行单调加载试验。首先,将试件固结至 $p'_{\text{ini}} = 50 \text{ kPa}$,初始静态剪应力(τ_{static})为 4 kPa。之后,对试件进行不排水循环加载 τ_{cyclic} 至 20 kPa(双振幅),直至 γ_{zq} 达到 7.5%(双振幅)以上。从这个状态试样进行不排水单调加载,直到 γ_{zq} 达到单一振幅的 90%。

状态 B 时,监测到 $p' = 5 \text{ kPa}$,此时 γ_{zq} 持续增加,从 18%发展到 43%。当 γ_{zq} 达到 43%后,在 p' 和 τ 急速下降时可以观测到 C 状态。在这种情况下,TS6 的应力恢复速度快于 TS1。

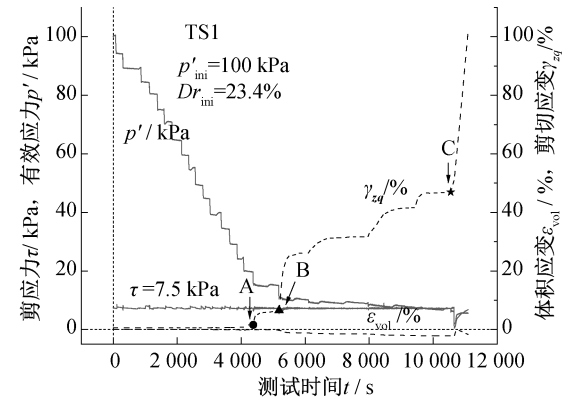


图 3 松散试样的应力-应变发展(TS1)的时间序列

Fig. 3 Stress-strain development of loose specimen (TS1) in time series

2 恒剪应力静态液化试验条件下丰浦砂的流动变形特性

图 3 为密度相对较低的 TS1 的应力-应变发展变化趋势。本研究发现,有效应力(p')的降低是由于背压的增加导致的。当 p' 减少时,体积应变(ϵ_{vol})逐渐增大。 ϵ_{vol} 的增加导致了剪切应变(γ_{zq})以特定增量不断增大。该试样的 γ_{zq} 发展主要分为 A、B、C 三种破坏状态,与流动变形行为相对应。

对于试件 TS1,在 A 状态下,当 $p' = 15 \text{ kPa}$ 时, γ_{zq} 从 1.6%显著提高至 6.4%。随后逐渐增长放缓至停止。 p' 的降低导致 γ_{zq} (状态 B) 从 6.4% 提高到了 25%,并且持续到 γ_{zq} 达到 47%。随着 γ_{zq} 的连续增长,状态 C 时的有效应力 p' 和剪应力 τ 均突然下降,但下降后又出现了回弹现象。

在相对密度度较高的试件(TS6)上也进行同样的观察,如图 4 所示。对于 TS6 试样在状态 A,有效应力 $p' = 8 \text{ kPa}$ 时, γ_{zq} 由 2.3%发展到 18%。

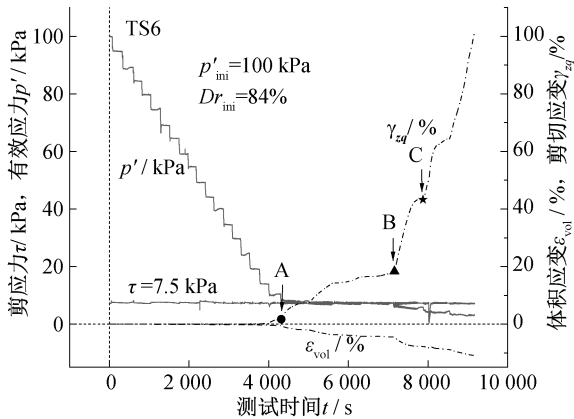


图 4 紧密试样的应力-应变发展(TS6)的时间序列

Fig. 4 Stress-strain development of dense specimen (TS6) in time series

丰浦砂在 A、B 和 C 状态下的行为与流入的水流行为的发展相对应。在状态 A 试样表现出初步

的软化行为,原因与试样的相位变换有关。通过 B 状态下观察到 p' 的进一步减小导致了剪应变的持续发展,这一特性代表了恒定剪应力下试件的流动特性。最后,在状态 C 中可以观察到应力突然下降的特殊现象。这种应力下降可能是由于试样在排水条件下的大变形而导致的颗粒咬合损失的标志。随后是应力恢复,即土体强度的恢复。通过比较 TS1 和 TS6 的应力恢复情况,可见,TS1 的应力恢复时间要比 TS6 长,说明松散试样为了调动相同的作用剪应力需要更多的时间恢复土的强度。

在应力恢复后,试样的形状变得相对不均匀。图 5 为实验过程中试件形状的变化。图 5(a)、(b)为应力下降前试件的形状,观察可见试件的形状仍然是一致的。随着剪切应变的增大,出现了一些膜皱。图 5(c)为应力下降后的形状,可以看出,试样在应力下降后发生了严重的变形。因此,状态 C 后试件的变形并不合理,存在一定偏差,因此不必纳入结果讨论范围。图 5(d)为 $\gamma_{zq} = 100\%$ 时的试件形状。

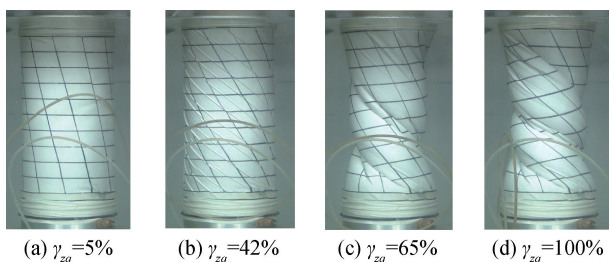


图 5 TS1 在扭剪静力液化试验中试件形状的变化

Fig. 5 Specimen shape change of TS1 during static liquefaction test in torsional shear

图 6 为丰浦砂的体积应变和剪切应变曲线图。Sento 等^[11-12]研究发现砂样的体积膨胀取决于试样的初始密度。初始密度越大,体积应变的发展速度越快。在本研究也可以得到同样的结果,试件 TS6 的体积应变(ε_{vol})发展较快,密度最大。这一结果也说明密集的材料需要更多的水来诱导连续流动状态。在本研究中,无论试样的初始密度如何,都可以观察到 A、B、C 三种状态。

3 原位砂土的流动变形特性

在扭剪仪中进行恒定剪应力下的静态液化试验,通过现场实测,验证了进水机制能否解释当前的流动灾害。假设地面倾角为 1.5% 左右, τ_{static} 设为 4 kPa, p' 设为 50 kPa。由原状样品估算该材料

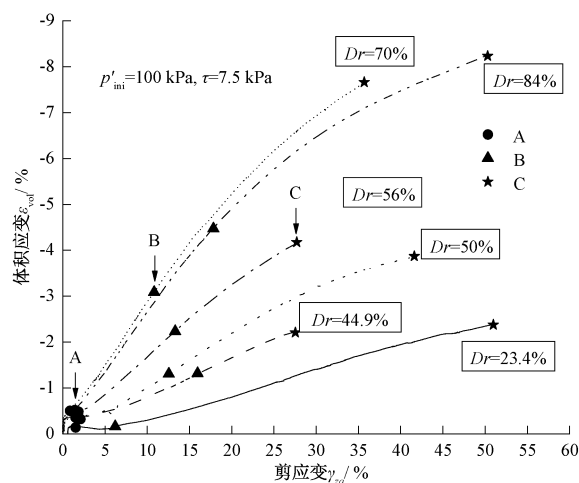


图 6 丰浦砂体应变与体积应变的关系(TS1—TS6)

Fig. 6 Relationship of volumetric strain and shear strain of Toyoura sand(TS1—TS6)

的现场密度为 1.485 g/cm^3 。初始相对密度计算为 75%,说明现场样本处于在稠密的状态。图 7 显示了在扭剪剪切仪中使用该现场材料的静态液化的应力应变发展。

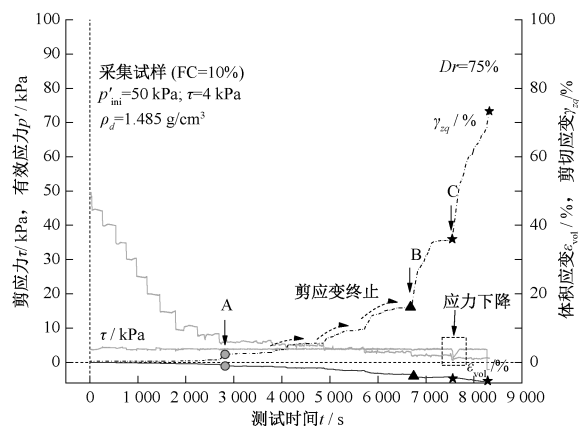


图 7 恒定剪应力下静态液化过程中应变和应力在时间序列中的发展(NS1)

Fig. 7 Strains and stresses development in time series of static liquefaction with constant shear stress of field (NS1)

在此条件下,试件呈现 A、B、C 三种破坏状态。状态 A 出现在 $p' = 6 \text{ kPa}$ 时。在 $p' = 2 \text{ kPa}$ 时, ε_{vol} 为 -4.1%,状态 B 为连续流动失效的开始,当 p' 达到 1 kPa 时,状态 C 出现。与试件 TS5 相比,其 $Dr_{ini} = 73\%$, $\varepsilon_{vol} = -3\%$,由此可以推断,流动样品 ($Dr_{ini} = 75\%$) 明显需要更多的水来产生连续的流动行为。这一结果大致说明,与纯砂试样相比,细砂含量 (FC = 10%) 的试样需要更多的水使其产生流动特性。

为了研究这种现象是否会在不排水条件下发

生,通过不排水循环加载后的不排水单调加载试验,与上述静力液化试验进行了对比。在这个实验中,野外砂土样品采用空气沉降法准备,干密度为 1.56 g/cm^3 ($Dr=84\%$)。

由于固结后试件处于不排水循环荷载作用下,试件的剪切应变(γ_{zq})达到 10.2% (双振幅),说明试件已经液化($\gamma_{zq}>7.5\%$)。从这个状态,液化试样直接承受不排水单调加载,直至剪切应变达到 80% 以上($\gamma_{zq}>80\%$)。有效应力路径及剪应力与剪应变关系分别如图 8 和图 9 所示。

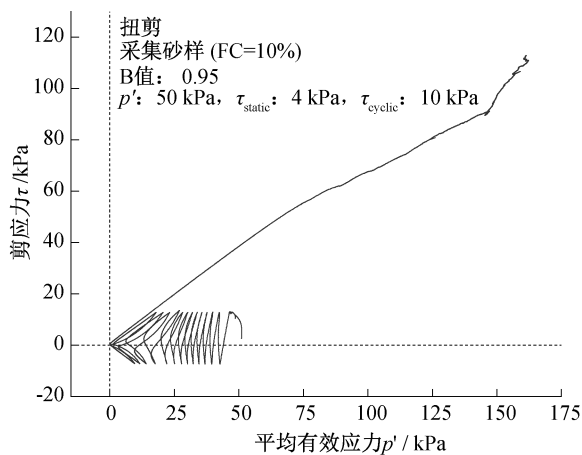


图 8 砂土不排水循环加载实验后的有效应力路径(NS2)

Fig. 8 Effective stress path of sandy soil under undrained cyclic loading test followed by monotonic loading (NS2)

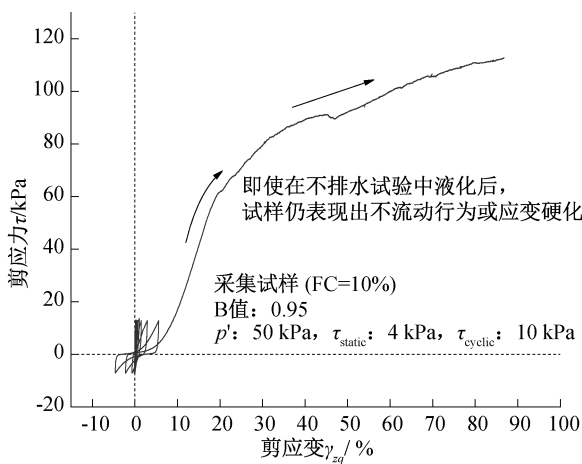


图 9 砂土在不排水循环加载下的剪应力与剪应变关系(NS2)

Fig. 9 Shear stress and shear strain relationship of sandy soil (NS2)

结果表明,在单调加载过程中,随着剪切应变的增加,剪切应力不断增加,在大应变状态($\gamma_{zq}>85\%$)表现出非流动行为。这一结果表明,在此现场条件下,土体液化不能单独引发流动破坏。然

而有必要在流变学实验中检验这一概念,如使用环剪切仪器,以研究不排水条件下试样的流动行为。静态液化试验可以描述试样在静态条件下的流动特性。动态条件下的流动行为观察可能是全面解释当前灾害机制的必要条件。

4 结论

本研究针对华东区域砂土的变形特性,在改良的空心圆柱扭转剪切仪中采用涌水量概念进行试验,采用恒定剪应力静态液化试验确定排水条件以及小初始静力剪切条件下试样流动的可能性。不排水循环加载试验被对比采用以观察行为特征。研究发现:

1) 无论初始密度如何,在每个试件上都可以观察到初始软化、连续流动和应力下降现象。研究发现,密集的标准需要更多的水才能产生连续流动行为。

2) 对采用土的静力液化试验表明,该材料在涌水机制下可以产生流动。而对比显示,该材料在典型不排水试验中,该材料表现出非流动特性,甚至样本也发生了液化。

参考文献:

- [1] O'ROURKE T D. Case Studies Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes: Japanese Case Studies[J]. National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report, 1992:92.
- [2] HIDAYAT R F, KIYOTA T, TADA N, et al. Reconnaissance on Liquefaction-induced Flow Failure Caused by the 2018 Mw 7.5 Sulawesi Earthquake, Palu, Indonesia[J]. J. Eng. Technol. Sci., 2020, 52(1):51-65.
- [3] KIYOTA T, FURUICHI H, HIDAYAT R F, et al. Overview of Long-distance Flow-slide Caused by the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(3):722-735.
- [4] OKAMURA M, ONO K, ARSYAD A, et al. Large-scale Flowslide in Sibulaya Caused by the 2018 Sulawesi Earthquake[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(4):1050-1063.
- [5] KOKUSHO T. Water Film in Liquefied Sand and its Effect on Lateral Spread[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(10):817-826.
- [6] KIYOTA T, KOSEKI J, SATO T. Relationship Between Limiting Shear Strain and Reduction of Shear Moduli Due to Liquefaction in Large Strain Torsional Shear Tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49:122-134.

(下转第 101 页)

- 672-678.
- [9] 张兰金,王正伟,常近时. 混流式水泵水轮机全特性曲线S形区流动特性[J]. 农业机械学报, 2011, 42(01): 39-43+73.
- [10] 李仁年,谭海燕,李琪飞,等. 低水头下水泵水轮机水轮机工况压力脉动研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(08): 85-90.
- [11] MENTER F R. Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications[J]. Aiaa Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [12] 王李科,廖伟丽,卢金玲,等. 基于弱可压缩的水泵水轮机S区压力脉动分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(06): 69-78.
- [13] 朱迪,肖若富,陶然,等. 水泵水轮机泵工况非设计工况流态与压力脉动分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 77-84.
- [14] 石祥钟,滕忠雪,王思恒,等. 混流水轮机导叶出口流场的压力脉动数值分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 99-102.
- [15] GUO Lei, LIU Jintao, WANG Leqin, et al. Pressure Fluctuation Propagation of a Pump Turbine at Pump Mode Under Low Head Condition[J]. Science China (Technological Sciences), 2014, 57(04): 811-818.
- [16] 高峰. 高水头混流式水泵水轮机无叶区压力特征分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [17] 张春泽,夏林生,刁伟,等. 水泵水轮机泵工况旋转失速压力脉动特性及转动机理[J]. 水利学报, 2017, 48(07): 837-845.
- [18] 李萍,宁楠. 多工况下高水头水泵水轮机压力脉动特性分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(05): 137-140.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第27页)

- [7] KIYOTA T, SATO T, KOSEKI J, et al. Behavior of Liquefied Sands under Extremely Large Strain Levels in Cyclic Torsional Shear Tests[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(5): 727-739.
- [8] 张建民,王刚. 砂土液化后大变形的机理[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 835-840.
- [9] CHIARO G, SATO T, KIYOTA T, et al. Effect of Initial Static Shear Stress on the Undrained Cyclic Behavior of Saturated Sand by Torsional Shear Loading[J]. Journal of Guizhou Tea, 2011.
- [10] 庄海洋,胡中华,王瑞,等. 饱和南京细砂初始液化后特大流动变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2164-2174.
- [11] SENTO N, KAZAMA M, UZUOKA R, et al. Possibility of Postliquefaction Flow Failure Due to Seepage[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 707-716.
- [12] YOSHIMINE M, NISHIZAKI H, AMANO K, et al. Flow Deformation of Liquefied Sand under Constant Shear Load and Its Application to Analysis Of Flow Slide of Infinite Slope[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(2-4): 253-264.
- (责任编辑 周雪梅)