

DOI: 10.11779/CJGE2023S20014

坝基深厚覆盖层原状砂土动力特性

禹艳阳¹, 彭文明², 李 建², 罗启迅², 马付龙², 陈 聪³, 刘恩龙^{*1}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 3. 四川大学灾后重建与管理学院, 四川 成都 610207)

摘要: 超深厚覆盖层地基是当前水利水电工程建设所面临的一大挑战, 覆盖层土体的动力力学特性是进行地基土液化判别和坝体稳定分析的基础。本文以某拟建大型土石坝工程超深厚覆盖层地基中的砂土层为研究对象, 对原状土样(通过深围井直接开挖取得的)和重塑土样开展了一系列的高围压条件下的不排水循环三轴试验。研究表明: 原状砂土的动强度高于重塑砂土, 且随着围压的增大二者之间的差别逐渐减小; 原状土样和重塑土样的孔压、轴向应变发展规律类似; 固结应力比对动强度指标及土样的破坏模式都有明显的影响, 随着固结应力比的增大, 动强度增大, 土样破坏模式逐渐由液化破坏转变为塑性应变累积破坏。

关键词: 坝基深厚覆盖层; 原状砂土; 不排水动三轴试验; 动强度; 高围压; 动力特性

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)S2-0048-07

作者简介: 禹艳阳(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: 3260186266@qq.com。

Dynamic properties of undisturbed sand in deep overburden of a dam foundation

YU Yanyang¹, PENG Wenming², LI Jian², LUO Qixun², MA Fulong², CHEN Cong³, LIU Enlong¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Survey and Design Corporation of PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 3. Institute of Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

Abstract: The ultra-deep overburden foundation is a great challenge for the construction of water conservancy and hydropower projects. The dynamic mechanical properties of overburden soil are the basis for discriminating liquefaction of foundation soil and analyzing dam stability. The sand layer in the ultra-deep overburden foundation of a proposed large-scale earth rock dam project is taken as the research object. A series of undrained cyclic triaxial tests are conducted on the undisturbed soil samples (directly extracted from an ultra-deep in-situ test well) and remolded soil samples under high confining pressure conditions. The laboratory results demonstrate that the dynamic strength of the undisturbed sand is higher than that of the remolded sand, and the difference between them gradually decreases with the increase of the confining pressure. The evolution laws of pore pressure and axial strain of the undisturbed and remolded soil samples are similar. The consolidation stress ratio has obvious influences on both the dynamic strength index and the failure mode of the soil samples. With the increase of the consolidation stress ratio, the dynamic strength increases, and the failure mode of the soil samples gradually changes from liquefaction failure to plastic strain accumulation one.

Key words: deep riverbed overburden; undisturbed sand; dynamic unconsolidated undrained triaxial test; dynamic strength; high confining pressure; dynamic property

0 引言

水电站建设过程中, 大量的勘探结果显示, 几乎所有的河流现代河床中普遍堆积厚达数十米甚至上百米的覆盖层^[1]。在实际工程中, 为了节省工期的需要, 或是水保环保的要求, 甚至有时因为覆盖层太深, 想要完全挖除建坝是不可能的, 因此常常需要利用覆盖层建坝^[2-5]。水电站工程多建于山高谷深的高烈度地震

区, 强震和复杂覆盖层问题使得工程面临巨大的挑战, 研究清楚坝基覆盖层土体的动力力学特性对工程的设计和建设至关重要。

关于坝基深厚覆盖层的动力特性, 国内外学者已

基金项目: 国家自然科学基金项目(12372376)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者(E-mail: liuenlong@scu.edu.cn)

开展了一些研究, 主要包括室内试验研究^[6-8], 现场试验研究^[9-11]和数值试验研究^[12-15]等。总结现有研究发现, 关于深厚覆盖层土体的动力特性的研究还不成熟, 鲜有学者对原状砂土在高固结应力条件下的动力特性开展研究。

中国西部某拟建大型水电工程拦河大坝地基主体为河谷超深厚覆盖层, 覆盖层最大深度超过 500 m。坝址区处于高烈度地震区(地震基本烈度Ⅷ度、设防烈度Ⅸ度)。覆盖层地质成因复杂, 土层构成多样。坝基的主要持力层为一厚度很大的砂土层, 研究清楚该层的动力力学特性对后续的工程设计和建设非常重要。本文通过深围井直接开挖取样的方式取得了该层的大量原状样, 并对原状和重塑样开展了从较低固结应力到较高固结应力下的不排水动三轴试验, 研究了原状土样在不同固结条件下的动力力学响应及结构性对原状砂样的动力特性的影响规律。研究成果可为深入认识原状砂土在较大应力范围内动强度参数的变化规律提供参考, 也可直接为本工程抗震安全评价提供依据。

1 深围井取样

由于原位试验受限于深度和钻孔取样法对土样的扰动较大两方面原因, 获取坝基深厚覆盖层土体的真实力学参数很困难。然而, 100 m 深度内的土性参数对工程设计是十分重要的。因此, 一个超深原位试验井被开挖来开展大型现场试验和深部原状样取样^[13]。深围井直接开挖方式取出的原状土样比钻孔取样扰动小, 且在可以在一个较小的区域内取到较多的土样, 可供全方位深入研究。本文研究的土体取自该深围井 22 m 深处, 即图 1 (a) 所示②层。采用一种新型胶凝材料框格固定法^[16]进行取样, 具体取样流程为: ①把土体切削为 30 cm×30 cm×30 cm 的立方体, 如图 1 (b) 所示; ②在土样四周安装可拆卸模板, 模板与土样之间留 1~2 cm 空隙, 模板比土样顶面高 1~2 cm, 如图 1 (b) 所示; ③在土样与模板之间倒入特制砂浆^[17]并漫过土样顶面, 在顶面和四个侧面形成包覆层, 如图 1 (c) 所示; ④待包覆层凝固后, 拆除模具; ⑤在土样上套一个木箱, 挖开试样根部, 使之与母体分离, 再翻转过来削去根部多余土料; ⑥在木箱和土样之间冲入泡沫胶(泡沫胶凝固后起到固定及减振作用); ⑦在土样表面铺一层塑料布以减少水分的散失, 在塑料布上面放置一块泡沫板, 盖上木箱的盖子并用螺钉固定, 封装好的土样如图 1 (e) 所示。本次试验所用的 5 块原状土样取自同一高程的同一点位, 土样不均匀系数为 1.4~2.0, 曲率系数为 0.8~0.9, 属于级配不良砂, 土样的级配曲线如图 2 所示。土样的相对质量

密度平均值为 2.68, 干密度平均值为 1.42 g/cm³, 相对密度平均值为 0.62。

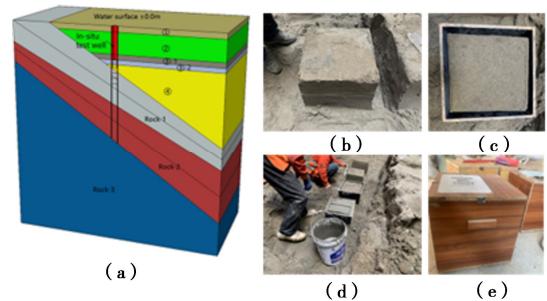


图 1 深围井及现场取样图

Fig. 1 Formation of in-situ test well^[13] and photos of field sampling of soil materials

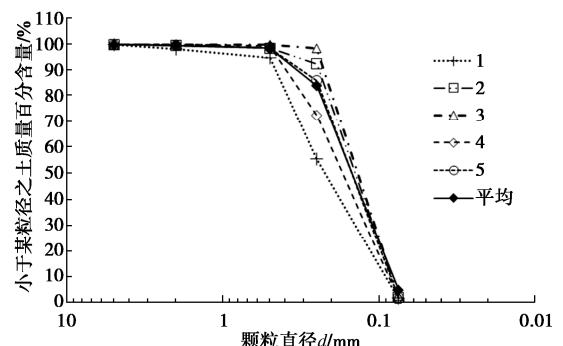


图 2 试验用原状样颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of undisturbed soil samples

2 试验流程

2.1 三轴原状砂样制备

本文研究的砂土的土颗粒之间的胶结较弱, 采用传统的切削法很难成功制备原状样。鉴于此, 采用冻结法来制备原状样, 该方法主要流程为(见图 3): ①去除由新型胶凝材料框格固定法取得的方形大体积原状样的表层受扰动土层, 然后在试样表面喷水或是晾干, 使土样达到预定的含水率范围; ②把三轴薄壁环刀静压入土中(环刀壁厚仅为 0.5 mm, 且在环刀内外壁涂抹润滑剂); ③挖出环刀和试样(此过程先刨除环刀四周的土体, 然后再用一个小铲子从试样底部插进去, 托起环刀和试样); ④用美工刀削平试样底部和顶部, 然后顶部和底部分别放置一块滤纸和一块透水石, 然后置于三轴试样饱和器上固定; ⑤将固定好的试样放入温度为-10℃左右的冰柜里冷冻 8 h 以上; ⑥从冰柜取出试样, 去除饱和器固定装置, 用三轴试样脱模器轻轻顶出试样。该方法具有操作简单, 制样成功率高的优点。重塑砂土试样采用干装法直接在仪器上制备, 试样干密度采用原状样干密度的平均值 1.42 g/cm³, 级配采用原状土样的平均级配, 具体制备方法

按照《水电水利工程土工试验规程: DL/T5355—2006》规定进行^[18]。



图 3 砂土原状样制备流程

Fig. 3 Preparation process of undisturbed sand samples

2.2 动强度试验流程

(1) 试样安装。首先按照规程^[18]要求将制备成功的原状砂土样迅速地安装到设备上。试验设备采用 DYTTS 动三轴试验系统(英国 GDS 仪器公司), 该系统可以进行非常小的应变静力试验到大应变动力试验。试验系统的主要技术指标如下: 最大轴向载荷 40 kN; 最大轴向振动频率为 5 Hz; 最大测量轴向位移 100 mm; 最大固结围压 2 MPa; 最大试件直径为 100 mm。试验机具有载荷、位移、时间 3 种控制模式, 试验过程中可自动采集围压、轴向力、轴向位移、反压和孔压等数据。

(2) 试样解冻及饱和。试样安装好后向压力室内注入 35℃~40℃的温水, 并施加 20 kPa 的围压, 保持 6 h 左右使得试样内部的冰被完全融化; 然后进行水头饱和(水头饱和所用水同样为温水), 水头饱和持续时间为 1 h; 水头饱和结束后进行 B 值检测, 若 B 值小于 0.95, 则再进行反压饱和, 直至 B 值大于 0.95。重塑土样由于不需要解冻, 试样制备好直接进行水头饱和操作, 其他操作同原状样。

(3) 试样固结。土样达到饱和后, 对试样进行固结操作。首先对试样施加围压到试验预定围压值, 然后开启排水阀, 等到孔隙水压力消散且 1 h 内固结排水量不大于 0.1 mL 时认为等向固结完成。对于偏压固结的试样, 在等向固结结束后, 再逐级增加轴向压力直至达到预定的轴向压力值(即达到预定的 K_c 条件), 当 10 min 内轴向变形不大于 0.01 mm 时认为固结完成。

(4) 施加动荷载。固结结束后, 对试样施加频率为 1 Hz 的正弦波型轴向动荷载, 对于等向固结条件当双幅轴向应变达到 10% 时试验结束, 非等向固结条件当轴向应变达到 10% 时试验结束。考虑围压、动剪应力幅值和固结应力比的影响, 对原状土样和重塑土样开展了不同条件的试验, 具体的试验方案如表 1 所示, 共 64 组试验。

表 1 试验方案表

Table 1 Summary of test schemes

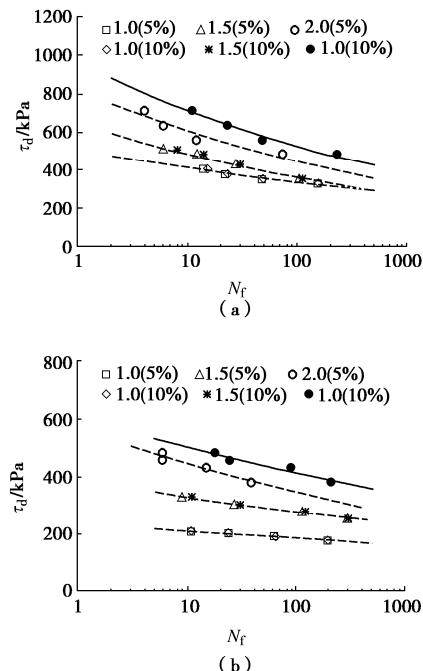
| 土样类型 | 固结应力比 K_c | 围压 σ_3 /kPa |
|------|---------------|---------------------|
| 原状样 | 1.0, 1.5, 2.0 | 200, 400, 800, 1600 |
| 重塑样 | 1.0 | 200, 400, 800, 1600 |

说明: 每个围压条件下 4 个试样, 振动破坏周次分别在 10, 20, 50, 100 左右。

3 试验结果分析

3.1 动强度

动强度是指土样在一定应力往返次数 N 下达到破坏标准所需要的动应力。由于等压固结条件下土样在试验结束时土样内部的超孔隙水压力已经接近围压, 而对于部分偏压固结条件的试样在试验结束时土样内部的超孔隙水压力还远小于围压, 因此考虑采用应变标准。本文取了轴向应变达到 5% 和 10% 两种破坏标准的动强度结果进行对比分析, 如图 4 所示。由图 4 可以得出以下结论: ① $K_c=1.0, 1.5$ 固结条件下, 两种破坏标准下所取得的动强度值接近, 而 $K_c=2.0$ 固结条件下, 10% 标准取得的动强度明显地高于 5% 标准。② 动强度随着固结应力比的增大而增大。③ 在相同的固结应力比条件下, 随着围压的增大动强度增大。



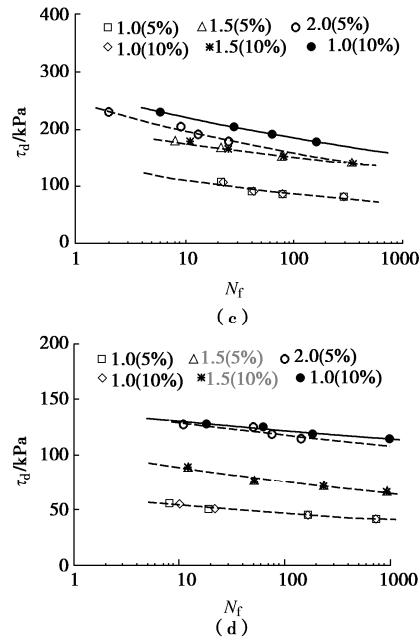


图 4 原状土样在不同固结条件下的动强度曲线

Fig. 4 Dynamic strength curves of undisturbed soil samples under different consolidation conditions

为评价原状砂土样的结构性, 原状样和重塑样的动强度结果被绘制在同一张图上进行对比分析, 如图 5 所示。由图 5 可观察到, 原状土样的动强度曲线位于重塑土样曲线的上方, 即原状土样的动强度明显地高于重塑土样, 即原状土样存在一定的结构性。为定量分析土体结构性对动强度的影响, 定义结构系数 $K_{s(20)} = CRR_{(20)}^{\text{原状}} / CRR_{(20)}^{\text{重塑}}$, 其中 $CRR_{(20)}^{\text{原状}}$ 和 $CRR_{(20)}^{\text{重塑}}$ 分别表示原状土样和重塑样循环加载 20 次时发生破坏的循环剪应力比 CSR。图 6 (a) 展示了 $CRR_{(20)}$ 随围压的变化图, 由图 6 (a) 可观察到原状土样和重塑土样呈现相反的规律, 原状土样的 $CRR_{(20)}$ 随着围压的增大而逐渐减小, 而重塑土样的 $CRR_{(20)}$ 则随着围压的增大而逐渐增大, 二者随着围压的增大而逐渐接近。绘制 $K_{s(20)}$ 随围压的变化图, 如图 6 (b) 所示。由图 6 (b) 发现, $K_{s(20)}$ 的数值范围为 1.05~1.20, 且随着围压的增大 $K_{s(20)}$ 逐渐减小。这主要是由于随着围压的增大土体的结构性在固结阶段的破坏量增多。

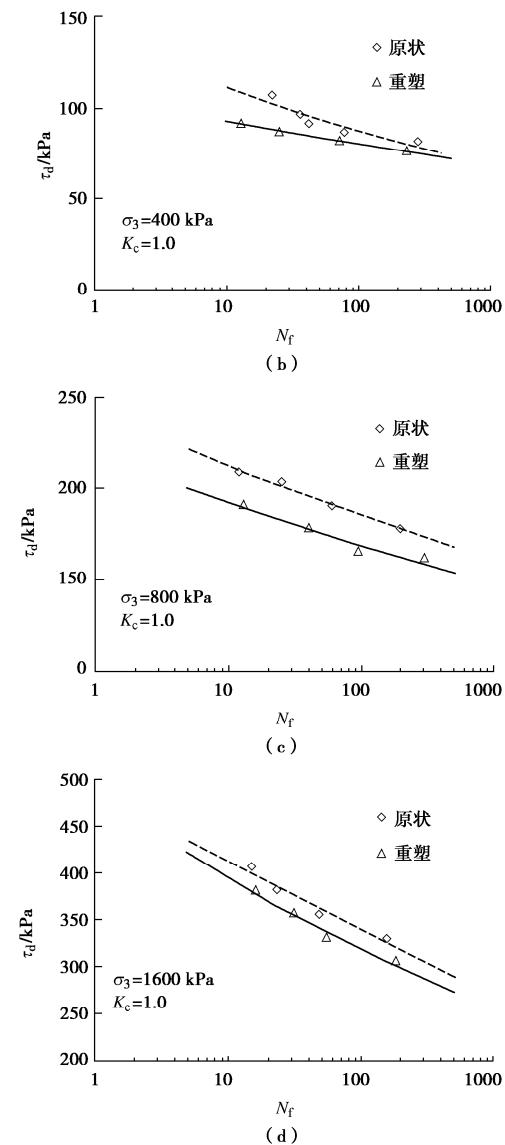
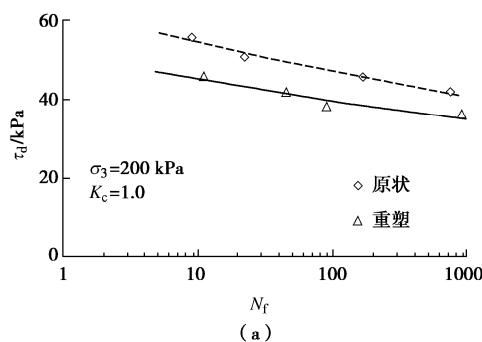


图 5 原状土样和重塑土样动强度曲线对比 (10% 标准)

Fig. 5 Comparison of dynamic strength curves between undisturbed and remoulded soil samples (strain standard of 10%)

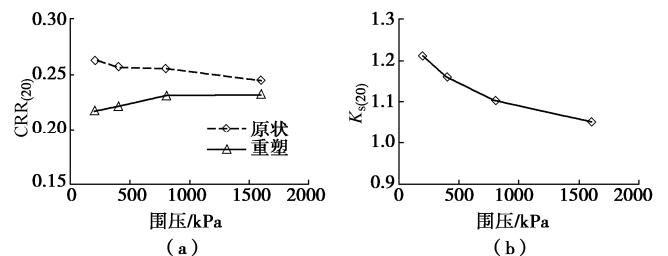
图 6 $CRR_{(20)}$ 和 $K_{s(20)}$ 随围压变化图

Fig. 6 Variation of $CRR_{(20)}$ and $K_{s(20)}$ with confining pressure

3.2 动孔隙水压力

统计达到破坏标准 (轴向应变达到 10%) 时的那个循环土样内部的超孔隙水压力最大值, 并定义为 u_f 。绘制 $u_f / \sigma_3 - N_f$ 关系曲线, 如图 7 所示。由图 7 (a) 和 (d) 可观察到, 等压固结条件下, 土样达到破坏标准时 u_f / σ_3 值接近 1.0, 即土体已经液化, 且大致呈现

土样达到破坏所需的循环次数越多, 数值越接近 1.0 的规律。对于偏压固结条件下, 土样达到破坏时的 u_f/σ_3 值与围压条件和动应力幅值有很大关系。由图 7 (b) 和 (c) 可以发现, 低围压条件下 u_f/σ_3 值接近 1.0。随着围压的增大以及 N_f 的增大, u_f/σ_3 值逐渐减小, 土样破坏时未达到液化标准。这主要是由于在低围压条件下, 固结阶段对原状样结构性的破坏较少, 土样需要在较大的动应力比 (τ_d/σ_3) 的动荷载作用下才能达到破坏, 在动荷载在作用的过程中大主应力方向发生交替变化, 其受力特点与等压固结类似, 故其孔压发展规律与等压固结条件类似。而对于高围压条件下, 由于土样的结构性在固结阶段被破坏, 在较小的动应力比的动荷载作用下土样就能达到破坏, 在加载的过程中大主应力方向未发生变化, 土样最终为压破。3.3 节将结合有效应力路径对其进行进一步分析。

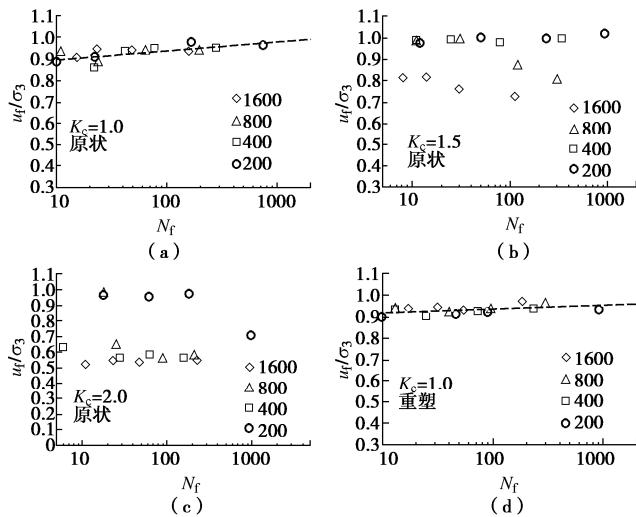


图 7 u_f/σ_3 - N_f 关系曲线

Fig. 7 Relationship between u_f/σ_3 and N_f

为研究加载过程中土样内部的超孔隙水压力的累积过程及对其发展过程进行定量描述, 绘制如图 8 所示的 $u/u_f - N/N_f$ 关系曲线。其中 u 为当前循环土样内部的超孔隙水压力的最大值, u_f 为试样达到破坏时的那个循环土样内部的超孔隙水压力最大值。由图 8 可观察到, 原状土样和重塑土样的曲线的演化规律类似, 不同围压条件下的曲线演化规律也类似。不同固结应力比下的孔压演化规律差别很大。等压固结条件下, 曲线呈倒 S 型, 可用式 (1) 所示的 Seed 模型^[19]较好的描述, θ 为模型参数, 与土的类型及加载条件相关。随着固结应力比的增大, 曲线形状逐渐由倒 S 型转变为上凸的 C 型, 可用式 (2) 所示模型很好描述, θ 为模型参数, 与土的类型及加载条件有关。

$$\frac{u}{u_f} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_f} = 1 - e^{-\beta \frac{N}{N_f}} \quad (2)$$

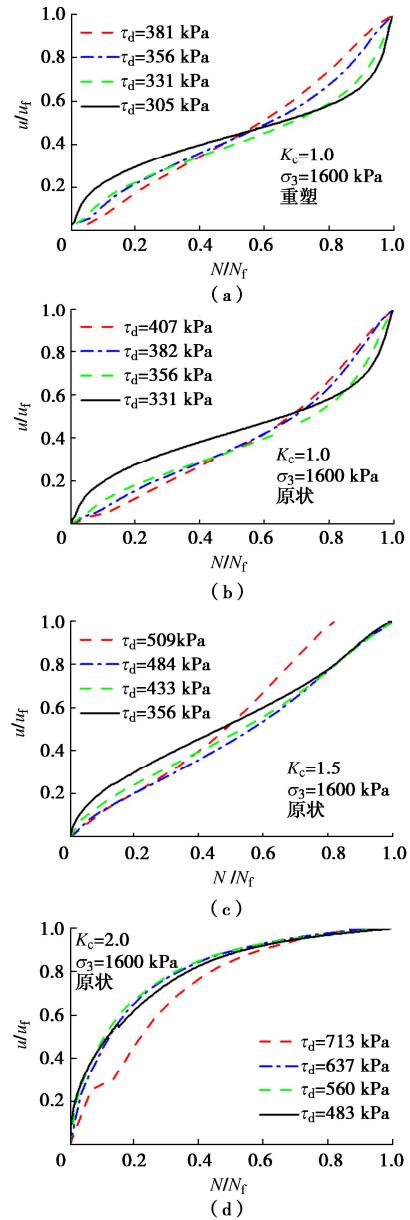


图 8 不同固结应力比条件下土样的 u/u_f - N/N_f 关系曲线 (以 $\sigma_3=1600$ kPa 为例)

Fig. 8 u/u_f - N/N_f relationship curves of soil samples under different consolidation stress ratios (taking $\sigma_3=1600$ kPa as an example)

3.3 有效应力路径及变形分析

图 9 展示了原状和重塑土样在 $K_c=1.0$ 固结条件下典型的有效应力路径及轴向应变图, 由图可发现原状和重塑土的曲线演化规律类似, 表现为在固定大小的循环荷载的作用下, 起初循环应变非常小, 随着作用次数的增加, 有效应力路径逐渐向左发展, 当达到某一循环次数时拉半周的某个时刻开始达到极限平衡状态, 随着循环次数的继续增加, 极限平衡逐渐从一个

瞬时发展为一个时段, 试样剪缩和剪胀交替变化, 应变开始快速增加直至土样达到破坏。试验结束时, 平均有效应力 p' 已经接近零, 说明土样已经达到液化标准。轴向应变-循环次数关系呈非对称喇叭状, 轴向应变在压缩方向和伸长方向都有发展, 但伸长方向发展远大于压缩方向, 这是由于土是一种抗压而不抗拉的材料, 土样在拉半周首先达到极限平衡状态, 所以随着循环次数的增加, 土样的轴向应变主要朝着伸长方向发展。与重塑样相比, 在相同的外荷载作用下原状土样由于内部结构性的存在需要更多的循环次数土样才能达到破坏。

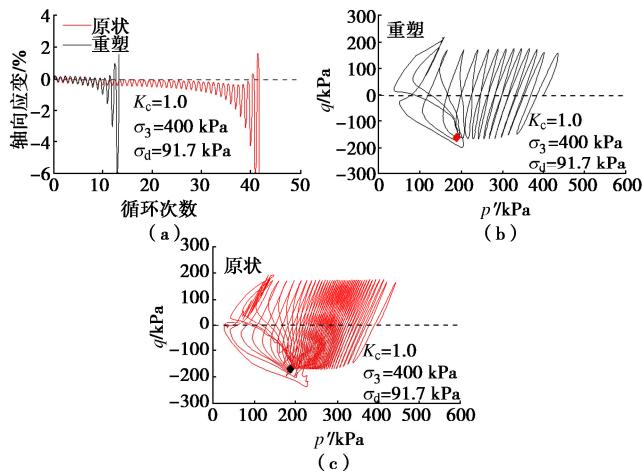


图 9 典型的有效应力路径 ($K_c=1.0$)

Fig. 9 Typical effective stress paths under consolidation condition of $K_c=1.0$

图 10, 11 分别展示了 $K_c=1.5, 2.0$ 固结条件下典型土样的有效应力路径及轴向应变图。随着循环次数的增加, 有效应力路径逐渐向左移动, 土样在压半周的某个瞬间首先达到临界状态, 随着循环次数的增加, 塑性应变持续累积, 直至土样达到破坏标准。土样达到破坏时, 平均有效应力 p' 还远大于零, 即土样还没有达到液化, 土样属于塑性应变累积破坏。轴向应变随着循环次数的增加逐渐朝轴向压缩方向发展, 轴向应变曲线呈现上凸状, 即随着循环次数的增多, 轴向应变的累积速率减缓。 $K_c=1.5$ 固结条件下的结果则兼具 $K_c=1.0, 2.0$ 固结条件的特点。

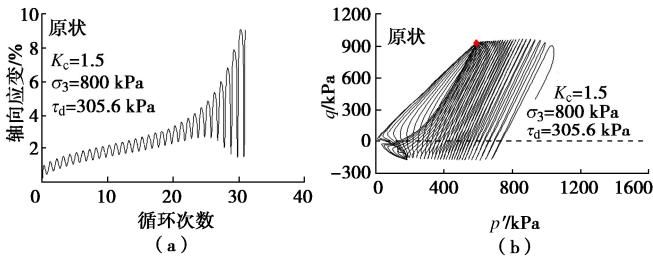


图 10 典型的有效应力路径($K_c=1.5$)

Fig. 10 Typical effective stress paths under consolidation condition of $K_c=1.5$

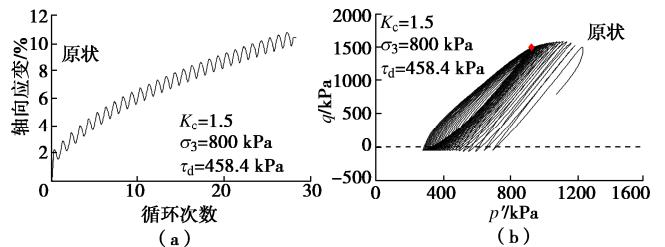


图 11 典型的有效应力路径($K_c=2.0$)

Fig. 11 Typical effective stress paths under consolidation condition of $K_c=2.0$

4 结 论

本文对某拟建大型土石坝工程超深厚覆盖层地基中的砂土层原状样(通过深围井直接开挖取得)和重塑试样开展了一系列高围压条件下的不排水循环加载试验, 重点研究了固结应力条件对原状砂土的动力特性的影响规律及结构性对动力特性影响规律, 主要得出了如下 4 点结论。

(1) 提出了一种快速简便制备三轴原状砂土试样的方法。

(2) 原状砂土的动强度明显高于重塑土, 且随着围压的增大二者之间的差别减小。

(3) 原状和重塑样的变形、超孔隙水压力及有效应力路径的演化规律类似。

(4) 固结应力比对动强度指标及土样的破坏模式都有明显的影响, 随固结应力比的增大, 动强度增大, 且土样破坏模式由液化破坏转变为塑性应变累积破坏。

参考文献:

- [1] 余挺, 邵磊. 含软弱土层的深厚河床覆盖层坝基动力特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 267-277. (YU Ting, SHAO Lei. Study of dynamic characteristics of dam foundation on deep riverbed overburden with soft soil layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 267-277. (in Chinese))
- [2] HAN B, ZDRAVKOVIC L, KONTOE S, et al. Numerical investigation of the response of the Yele rockfill dam during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 88: 124-142.
- [3] WANG W B, HÖEG K, ZHANG Y B. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(12): 1365-1381.
- [4] 李鹏, 杨兴国, 薛新华, 等. 瀑布沟心墙堆石坝地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(1): 217-223. (LI Peng, YANG Xingguo, XUE Xinhua, et al. Earthquake response analysis[J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(1): 217-223. (in Chinese))

- analysis of Pubugou corewall rockfill dam[J]. World Earthquake Engineering, 2015, **31**(1): 217-223. (in Chinese))
- [5] YU X, KONG X J, ZOU D G, et al. Linear elastic and plastic-damage analyses of a concrete cut-off wall constructed in deep overburden[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **69**: 462-473.
- [6] 杨正权, 刘启旺, 刘小生, 等. 厄瓜多尔CCS水电站深厚覆盖层火山灰沉积土动强度特性试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(增刊2): 161-166. (YANG Zhengquan, LIU Qiwang, LIU Xiaosheng, et al. Study on dynamic strength characteristics tests for deposited soils of volcanic ash[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(S2): 161-166. (in Chinese))
- [7] 杨玉生, 刘小生, 李小泉, 等. 固结应力状态对超深厚覆盖层深埋砂土动强度参数的影响[J]. 水利学报, 2016, **47**(4): 518-526. (YANG Yusheng, LIU Xiaosheng, LI Xiaoquan, et al. Effects of effective confining stresses on cyclic resistance ratio of deep buried sands in deep alluvial soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(4): 518-526. (in Chinese))
- [8] EL-SEKELLY W, DOBRY R, ABDOUN T. Assessment of state-of-practice use of field liquefaction charts at low and high overburden using centrifuge experiments[J]. Engineering Geology, 2023, **312**: 106952.
- [9] 周燕国, 谭晓明, 陈捷, 等. 易液化深厚覆盖层地震动放大效应台阵观测与分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1282-1291. (ZHOU Yanguo, TAN Xiaoming, CHEN Jie, et al. Observations and analyses of site amplification effects of deep liquefiable soil deposits by geotechnical downhole array[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1282-1291. (in Chinese))
- [10] OKA L G, DEWOOLKAR M M, OLSON S M. Liquefaction assessment of cohesionless soils in the vicinity of large embankments[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **43**: 33-44.
- [11] JANA A, STUEDLEIN A W. Dynamic in situ nonlinear inelastic response of a deep medium dense sand deposit[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(6): 04021039.
- [12] WANG L, YANG Z Q, ZHAO J M, et al. Transmitting characteristics of seismic motion in super-deep overburden layer ground[J]. Shock and Vibration, 2021, **2021**: 8898012.
- [13] YU T, JIANG B N, HE S B, et al. Study on the seepage control of ultra-deep *in situ* test wells in deep overburden of riverbeds[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, **15**(9): 834.
- [14] WANG L, YANG Z, ZHAO J, et al. Seismic response analysis of earth-rock fill dam on deep overburden under viscoelastic boundary condition[J]. Revista Internacional De Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería, 2021, **37**(1): 1-8.
- [15] 邵磊, 余挺, 徐强. 无限元在超深厚覆盖层坝基动力分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(6): 1537-1543. (SHAO Lei, YU Ting, XU Qiang. Dynamic analysis on super-deep overburdened layer foundation based on infinite element method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(6): 1537-1543. (in Chinese))
- [16] 罗启迅, 丁庆, 李建国, 等. 用于批量快速获取原状土样的施工方法: CN114739729A[P]. 2022-07-12. (LUO Qixun, DING Qing, LI Jianguo, et al. Construction Method for Rapidly Obtaining Undisturbed Soil Samples in Batches: CN114739729A[P]. 2022-07-12. (in Chinese))
- [17] 丁庆, 罗启迅, 田先忠, 等. 用于批量获取原状土样的砂浆材料及取样施工方法: CN114656229B[P]. 2023-04-28. (DING Qing, LUO Qixun, TIAN Xianzhong, et al. Mortar Material for Batch Acquisition of Undisturbed Soil Samples and Sampling Construction Method: CN114656229B[P]. 2023-04-28. (in Chinese))
- [18] 水电水利工程土工试验规程: DL/T 5355—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006. (Code for Soil Tests for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5355—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese))
- [19] SEED H B, IDRISI I M, LEE K L, et al. Dynamic analysis of the slide in the lower San Fernando Dam during the earthquake of February 9, 1971[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, **101**(9): 889-911.

(编校: 孙振远)