

DOI: 10.11779/CJGE2023S10009

用于获取三轴土样局部水力特性的孔压量测新方法

张亮亮^{1,2}, 邓刚^{1,3}, 陈锐^{*1,2}, 皇甫泽华⁴, 陈铄^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518055;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 4. 河南省前坪水库建设管理局, 河南 郑州 450003)

摘要: 土体孔隙水压力的量测对于研究其水力特性至关重要。土体的散粒体结构特性使其内部细颗粒极易在水流作用下发生迁移而改变孔压分布, 进而影响土体内部的局部结构和水力特性。为捕捉颗粒迁移导致的土体结构局部化响应, 提出一种适用于三轴土样可量测局部孔压的新方法。新方法能满足带导管式乳胶膜受应力作用时的密封需求, 由此可沿土样轴向和径向布设孔压传感器量测不同位置的孔压, 进而研究土体局部水力特性。渗蚀试验结果表明, 新方法在应用时具有较好的响应效果, 土体局部渗透系数的时空演变揭示了细颗粒迁移具有显著的局部性和不均匀性。

关键词: 三轴土样; 新方法; 细颗粒迁移; 局部孔压; 局部水力特性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0020-04

作者简介: 张亮亮(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土体渗透破坏方面的研究。E-mail: zliang1992@163.com。

New method with measurable pore-water pressure for studying local hydraulic properties of triaxial soil specimens

ZHANG Liangliang^{1,2}, DENG Gang^{1,3}, CHEN Rui^{1,2}, HUANGPU Zehua⁴, CHEN Shuo^{1,2}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518055, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Construction Management Bureau of Qianping Reservoir, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Measuring the pore-water pressure within a soil mass is critical for studying its hydraulic properties. Due to the granular structure characteristics of soil, the fine particles within soil are prone to migrate with the movement of water flow. The migration of fine particles may change the distribution of the pore-water pressure, thereby altering the local structure and hydraulic properties of soil. In this study, a new method with measurable local pore pressure is introduced to capture the localized response of pore structure of soil induced by the migration of fine particles. The new method meets the sealing requirements of the latex membrane with inserted pipes under stress. Thus, the pore-water pressure transducers can be arranged along the axial and radial directions of the soil specimens to measure the pore pressure at various positions, thereby helping to study the local hydraulic properties. The global and local evolution characteristics of the soil specimens during suffusion are studied using new the method in the suffusion tests. The results show that the new method has a satisfactory response. The spatial and temporal evolution of local hydraulic conductivity reveals that the migration of fine particles along seepage path exhibits significant localization and non-uniformity.

Key words: triaxial soil specimen; new method; migration of fine particle; local pore pressure; local hydraulic property

0 引言

由于土体的散粒体结构特性, 其内部细颗粒极易随水分运移而发生迁移, 致使孔隙水压力分布发生改变, 从而影响土体内部局部结构和水力特性^[1-2]。尤其对于由土颗粒固相和流体液相组成的两相饱和和土体, 若内部存在水头差, 则水分就会沿粗颗粒土骨架间的孔隙流动, 诱发颗粒迁移而影响土体内部局部流态, 进而改变土体渗透系数^[2-3]。目前土体内部颗粒迁

移引发的工程问题已逐渐受到重视, 如在频发的土石坝心墙与坝基的渗透破坏^[4]和堆积体滑坡^[5]等地质灾害, 其研究的核心问题都会涉及颗粒迁移^[3-5]。

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2022YFC3005501); 国家自然科学基金项目(52278339); 深圳市科技计划资助项目(KQTD20210811090112003); 中国水科院基本科研业务费项目(GE0145B032021, GE110145B0032023)

收稿日期: 2023-07-07

***通信作者** (E-mail: cecchenrui@hit.edu.cn)

在研究上述地质灾害的发展演变和致灾机理时, 通常使用的试验装置分两类: 一类是传统刚性壁装置, 其特点是简易且侧壁上便于开孔布设孔压传感器或测压管; 一类是常规或改进三轴装置, 其特点是可更好地模拟土体所处应力状态。然而, 常用装置在研究土体水力特性时还存在一定的局限: ①传统刚性壁装置通常没有考虑土体所处应力状态, 且因刚性边壁易发生优势渗流而影响结果^[4, 6]; ②三轴装置所能容纳土样尺寸较小, 且乳胶膜开孔后的密闭性无法保证, 故无法布设孔压传感器获取土样的局部水力特性^[1-2, 7]。由于这些局限, 研发新技术从全局和局部双重层面探明复杂应力状态下细颗粒迁移对土体内部结构的影响机制, 已成为当前土工测试技术亟待解决的难点。

据此研究背景, 本文提出一种用于获取三轴土样局部水力特性的孔压量测新方法, 阐述了新方法的原理和使用流程。通过三轴渗蚀试验, 评价了新方法的密封效果和时效响应, 且应用新方法获得了土体渗流沿程上局部渗透系数的时空演变特征, 从全局和局部双重层面揭示了渗蚀过程中细颗粒的迁移规律。

1 局部孔压量测新方法的原理及应用

1.1 新方法的原理

局部孔压量测新方法的关键是将乳胶膜与连接孔压传感器 (Pore-water pressure transducer, PWPT) 的导管在乳胶膜开孔部位处进行密封处理。

如图 1 (a), 新方法基本原理是利用卡套式螺帽、锁母式卡头和直通式接头底座的相互连接来挤压乳胶膜两侧的 O 型圈, 通过 O 型圈的弹性变形密封开孔后的乳胶膜, 并在密封组装过程中巧妙借助垫片, 使得 O 型圈的受力变形更为均匀, 密封效果更好。

新方法主要包括组装式密封装置本体 (图 1 (b)) 和乳胶膜 (图 1 (c)) 两部分。图 1 (b) 对应于图 1 (a), 自左向右分别是直通式接头基座、锁母式卡头、第一垫片、O 型圈 I、乳胶膜壁、O 型圈 I、第二垫片、卡套式螺帽和聚氨酯 (Polyurethane, PU) 导管 (套有 O 型圈 II)。孔压传感器与导管借助内螺纹式导管接头相互连接, 利用导管引出土样内部孔隙水, 由此量测土体内部的孔隙水压力, 如图 1 (c)。密封装置本体元件均为可拆卸式, 其中锁母式卡头和直通式接头底座是定制而成的整体结构; 滤网粘贴在直通式接头基座上, 以避免土颗粒堵塞导管影响孔压的量测。

1.2 新方法中密封装置的组装及使用流程

新方法涉及的元件组装简易, 具体步骤如下: ①按需在乳胶膜不同位置开设 1 mm 孔洞 (试探性试验获取), 将第一垫片套于直通式接头基座上, 并将 O 型圈 I (乳胶膜壁左侧) 套于直通式接头基座上紧贴第一垫片, 然后按图 1 (b), 将锁母式卡头穿过乳胶膜上的孔洞, 使乳胶膜壁紧贴 O 型圈 I; ②按图 1 (b), 将 O 型圈 I (乳胶膜壁右侧) 套于锁母式卡头上, 并紧贴乳胶膜壁, 然后将第二垫片套于锁母式卡头上紧贴 O 型圈 I; ③将 O 型圈 II 套于 PU 导管的一端, 并将导管套于锁母式卡头上, 然后将卡套式螺帽套于锁母式卡头上, 再将 O 型圈 II 内嵌在螺帽内部, 借助螺纹将螺帽固定在锁母式卡头上; ④锁紧直通式接头基座和卡套式螺帽, 以挤压两者之间的垫片、O 型圈 I 及乳胶膜壁, 由此完成乳胶膜开孔后的密封; ⑤利用开孔式承膜筒将组装后的乳胶膜装套在三轴土样上, 再将孔压传感器和 PU 导管相连, 并确保两者高度相同, 以量测土体内部的孔隙水压力。

1.3 新方法的有益效果

新方法具有如下有益效果: ①能沿土样轴向和径向按需布设孔压传感器, 并能连续量测孔压的全时演变数据; ②新方法提供的密封装置组装简易, 可承受较大应力与变形, 且使用成功率和重复率高。

2 新方法的性能检验及应用

本研究开展两次密封性试验和三次重复性渗蚀试验 (表 1), 以检验新方法在试验过程中的密封效果、孔压传感器的时效与量测响应和新方法的应用性能。

表 1 试验工况

Table 1 Test programs

土样编号	FC/ %	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	初始孔 隙比 e	有效围压 σ_3'/kPa
FC30-D8-C100				
FC30-D8-C100-R1	30	1.80	0.472	100
FC30-D8-C100-R2				

试验土料的级配曲线及基本物性参数如图 2。渗

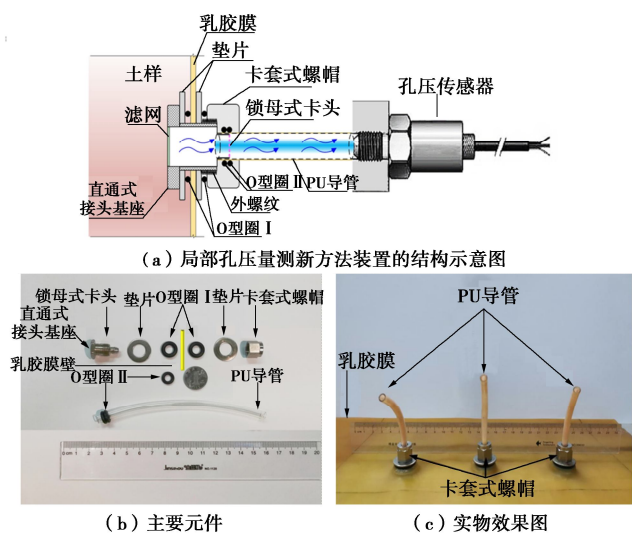


图 1 局部孔压量测新方法装置的结构示意图和实物图

Fig. 1 Schematic diagram and photo of new method device

蚀试验主要过程包括：土样的制备、饱和、固结、水力梯度的逐级施加及数据采集，详情请参考文献[8]。

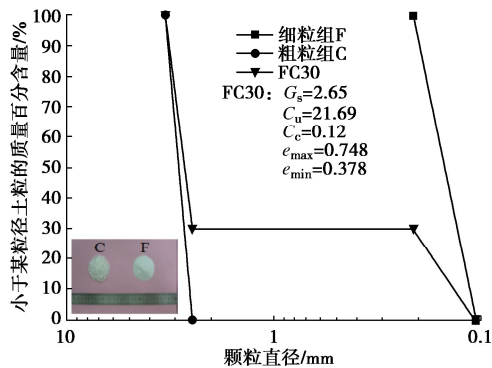


图2 试验土料颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of test soils

2.1 新方法中密封装置的密封性检验

乳胶膜开孔后的密封性能是决定三轴土样饱和效果的关键。检验密封性能时，将带有密封装置乳胶膜的土样安装在三轴腔体内，使用配套 O 型圈将土样两端束紧密封，并向腔体注满围压水。随后利用液压/体积控制器对土样分别施加 200 kPa (2 kPa/min) 和 300 kPa (3 kPa/min) 的围压来营造检验条件。如图 3，两种围压均按设定速度呈线性增加，并在 6000 s 达到目标值，量测的孔隙水压力保持稳定，且控制器中体积示数在 18000 s 后保持稳定；同时，在检验过程中，三轴渗蚀装置的顶部及底部均无漏水现象。由此表明，新方法提供的密封装置具有较好的密封性能。

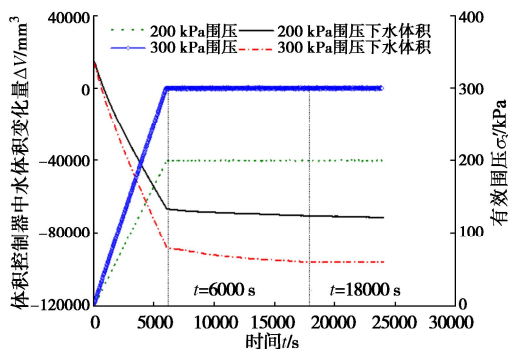


图3 新方法的密封性检验

Fig. 3 Validation of sealing performance of new method

2.2 新方法中孔压传感器连接后的时效响应

参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中的三轴土样饱和程序，以土样 FC30-D8-C100 为例，完成饱和和操作后，对土样施加围压，可获取孔隙水压力增量 (Δu) 和围压增量 ($\Delta \sigma_3$ ，本研究为 60 kPa) 之比，即 B 值，以检验饱和效果。同时，全程量测土样的全局和局部孔隙水压力 (1 s 一次)，以检验孔压传感器的时效响应 (图 4)。

(1) 孔压传感器的时效响应

从图 4 可见：对土样施加围压增量时 (即加载过

程)，孔压传感器从加压到读数稳定的时间 ($\Delta t_{\text{加载}}$) 很短；在卸载过程中，孔压传感器从卸压到恢复初始读数的时间 ($\Delta t_{\text{卸载}}$) 也很短。这表明新方法中孔压传感器具有良好的时效响应，并不会因连接导管而影响灵敏度。

(2) 新方法在土样饱和-固结过程中的优势

从图 4 可见，在加载/卸载过程中，土样沿高度方向的孔压均呈现出线性演变的规律，这表明孔压传感器具有良好的量测响应。土样沿高度方向不同土层的 B 值检测均在 0.95 以上，表明该土样从局部到整体均具有较好的饱和效果。类似地，可用局部孔压值的演变来评价固结效果，在此不再赘述。综上，可应用新方法获取的局部孔压响应，更好地评价土样局部和全局的饱和与固结效果。

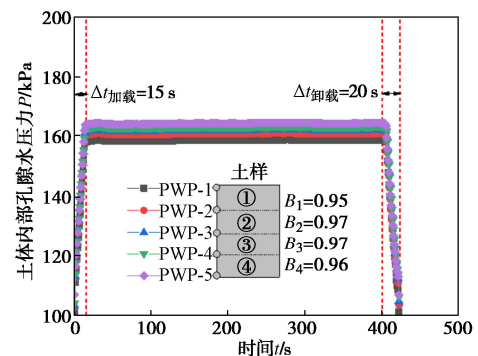


图4 孔压传感器的时效响应

Fig. 4 Response of pore-water pressure transducers

2.3 实例应用——土体渗蚀发展的全局及局部演变特征

通过量测的土样全局和局部孔隙水压力 (PWPT-1~PWPT-5)，可获得土样全局和渗流沿程上的局部水力梯度^[8]。进一步，根据达西定律可获得土样全局 (k_g) 和局部渗透系数 k_{k-j} ，如 k_{1-2} 为 PWPT-1 与 PWPT-2 之间土样段 (即土层①) 的局部渗透系数。

(1) 土体渗蚀发展的全局演变特征

如图 5，三次重复性试验获得的渗流速度 (v)—全局水力梯度 (i_g) 演变曲线基本重合，且渗流速度的变异系数最大值仅为 5.4%，小于 Richards 等^[9]提出的检验阈值 (10%)，表明试验具有良好的可重复性。

以土样 FC30-D8-C100 为例，由图 5 并结合试验现象，可将土样渗蚀发展的全局演变进程划分为渗蚀前期 (A→B 段， $0 < i_g < i_{in}$)、渗蚀发展 (B→C 段， $i_{in} \leq i_g < i_t$) 和渗蚀破坏 (C→D 段， $i_g \geq i_t$) 三个阶段。

(2) 土体内部局部渗透系数的时空演变特征

渗蚀前期阶段，渗流沿程上的局部渗透系数 (k_{k-j}) 几乎相等且近似等于全局渗透系数 (k_g) (图 6)。说明：①制备的土样均匀性良好；②土样仍保持着良好的渗透稳定性。

渗蚀发展阶段，4800 s 后，土样下游部位渗透系

数 $k_{4.5}$ 突然增大, 且同一水力梯度下局部渗透系数的空间分布不再均匀, 表现出 $k_{1.2} < k_{3.4} < k_{2.3} < k_g < k_{4.5}$ 的规律, 并随渗蚀发展而加剧。这说明细颗粒发生了迁移, 且该迁移行为具有显著的局部性和不均匀性, 进而引发了渗流沿程孔隙结构的非均匀变化, 表现出土体渗透性的空间变异。细颗粒堵塞较多的部分, 其局部孔隙变得狭小, 局部渗透系数较低; 反之, 细颗粒疏通或侵蚀较多的部分, 其局部孔隙变得扩张, 局部渗透系数较大。Benamar^[6]开展的砂砾土渗蚀试验也发现细颗粒迁移的不均衡会导致土体渗透性的非均匀变化。

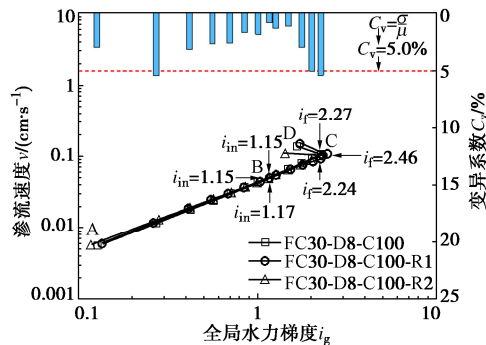


图 5 重复性试验土样的 $\lg v - \lg i_g$ 演变

Fig. 5 Response of seepage velocity to global hydraulic gradient

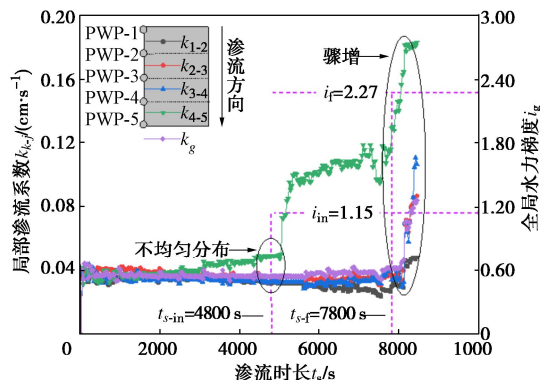


图 6 渗流沿程上局部渗透系数随渗蚀发展的演变

Fig. 6 Evolution of hydraulic conductivity along seepage path

渗蚀破坏阶段, 7800 s 后, 土样全局和局部渗透系数均骤增, 表现出 $k_{1.2} < k_{3.4} < k_{2.3} < k_g < k_{4.5}$ 的规律, 且局部渗透系数空间分布的非均匀性在这一阶段尤为显著。相应地, 渗流速度骤增 (图 5), 说明土样内部形成了贯穿的渗流通道, 细颗粒能自由“逃逸”出土样。

综上说明, 应用新方法可从全局和局部双重层面来研究土体内部细颗粒的迁移规律。

3 结 论

(1) 新方法能沿三轴土样轴向和径向布设孔压传感器, 连续获取土样内部孔压的全时演变规律, 以捕捉颗粒迁移导致的土体内部结构局部响应。

(2) 新方法提供的密封装置组装简单易行, 能

有效密封开孔后的乳胶膜, 并能承受较大的应力与变形, 以满足三轴土样的使用需求。

(3) 新方法在应用时具有良好的时效与量测响应, 可利用获取的土体局部孔压响应, 更好地评价土体局部和全局的饱和与固结效果。

(4) 土体渗蚀试验中, 应用新方法可获取土体的全局和局部水力特性的时空演变特征, 结果表明土体内部颗粒迁移行为具有显著的局部性和不均匀性。

参考文献:

- [1] CHANG D S, ZHANG L M. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(6): 579-589.
- [2] KE L, TAKAHASHI A. Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, **37**(2): 347-364.
- [3] BI J F, LUO X Q, SHEN H. Modeling of suffusion considering the influence of soil gradation[J]. Transport in Porous Media, 2021, **136**(3): 765-790.
- [4] 陈生水, 凌 华, 米占宽, 等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 26-31. (CHEN Shengshui, LING Hua, MI Zhankuang, et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 26-31. (in Chinese))
- [5] ZHANG L L, WU F, ZHANG H, et al. Influences of internal erosion on infiltration and slope stability[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(3): 1815-1827.
- [6] BENAMAR A, DOS SANTOS R N C, BENNABI A, et al. Suffusion evaluation of coarse-graded soils from Rhine dikes[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(3): 815-823.
- [7] LUO Y L, LUO B, XIAO M. Effect of deviator stress on the initiation of suffusion[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(6): 1607-1617.
- [8] 张亮亮, 邓 刚, 陈 锐, 等. 不连续级配无黏性土渗蚀演变特征研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(7): 1412-1420. (ZHANG Liangliang, DENG Gang, CHEN Rui, et al. Experimental investigation on evolution process of suffusion in gap-graded cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(7): 1412-1420. (in Chinese))
- [9] RICHARDS K S, REDDY K R. True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(1): 83-95.