



# 船载多功能渗透仪及试验方法

胡伟娜, 刘永胜, 万中喜, 王月松, 王琦

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 在水运工程中, 土的渗透系数是重要设计指标, 工程意义重大。目前, 被广泛应用的渗透系数测定方法具有局限性, 其智能化、精准性、可操作性及环境适应性亟待提高。为了解决此问题, 研制了一套船载多功能渗透仪, 并在曹妃甸某海上勘察项目进行应用的对比试验。结果表明, 该渗透仪不仅适用于船舶晃动的环境, 还采用自动化、智能化设计, 使其能够在实验室模拟土体原位应力状态的条件下测定土样的渗透系数; 不仅具有操作方便、测试精准、自动化程度高等优点, 并且转变仪器的使用方法还可以测试土的静止侧压力系数。

**关键词:** 渗透系数; 渗透试验; 静止侧压力系数; 多功能; 给水(垂压)系统; 压力系统

中图分类号: U 612; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0045-06

## Shipboard multifunctional permeameter and test method

HU Weina, LIU Yongsheng, WAN Zhongxi, WANG Yuesong, WANG Qi

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** In the port and waterway engineering, the permeability coefficient of soil is an important design index, which is of great significance in practical engineering. At present, the widely used test methods of permeability coefficient have limitations, the intelligent, accuracy, operability and environmental adaptability need to be improved. To solve this problem, we develop a set of shipboard multifunctional permeameter, and test and compare the application of this permeameter on a marine geological survey project in Caofeidian. The results show that the permeameter can not only suitable for ship shaking environment, but also can measure permeability coefficient under the condition of simulating in-situ stress state of soil in laboratory by adopting automatic and intelligent design. The shipboard multifunctional permeameter is convenient to operate, high degree of accuracy and automation, and the coefficient of soil pressure at rest can be measured by changing test method.

**Keywords:** permeability coefficient; permeability test; coefficient of earth pressure at rest; multifunction; water supply (vertical pressure) system; pressure system

土具有被水或者其他液体透过的性质称为土的渗透性, 土的渗透性是其重要性质之一, 在实际工程中意义重大。在水运工程中, 码头堆场的软基处理、水工建筑物的基坑开挖中边坡及地基稳定性、降水设计及外力作用下的饱和土固结等问题都与土的渗透性息息相关。表征土渗透性的指标为渗透系数, 其测定方法主要分实验室内和

野外现场测定两大类<sup>[1]</sup>。野外现场测定方法虽可保证土的原始应力状态, 但费时、费力、技术要求繁琐且费用较多而很少被采用。《土工试验方法标准》<sup>[2]</sup>中的实验室内测定方法有变水头和常水头渗透试验方法, 对应的试验设备分别为 TST-55 和 TST-70 型渗透仪, 见图 1、2。这两种设备由于结构简单、价格低廉而被国内土工实验室普遍采用,

收稿日期: 2022-08-23

作者简介: 胡伟娜 (1981—), 女, 高级工程师, 从事岩土测试工作。

但是两种渗透试验全程依赖人工操作，效率低；玻璃管结构不适用于船载晃动的环境，功能单一；TST-55型渗透仪采用钢质环刀制样，在水的作用下容易在环刀内壁与土样之间形成排水通道导致漏水；TST-70型渗透仪体积较大，很难将松散砂土振捣还原成原状样的状态，导致试验失真。

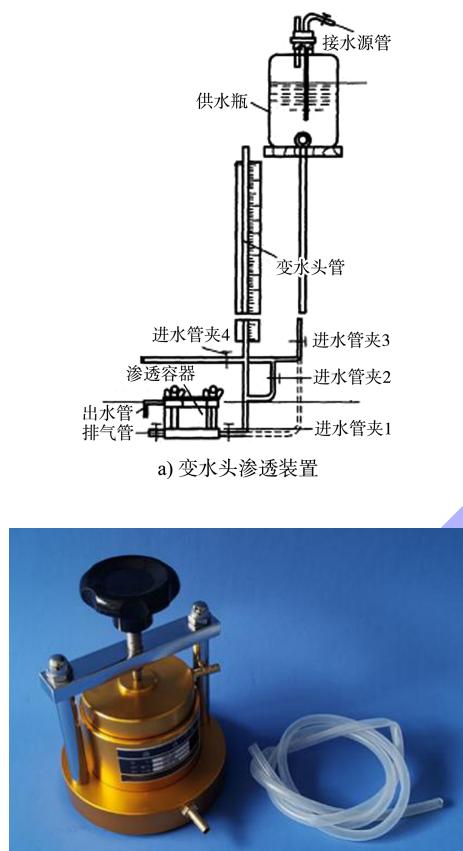


图 1 变水头渗透装置及 TST-55 型渗透仪

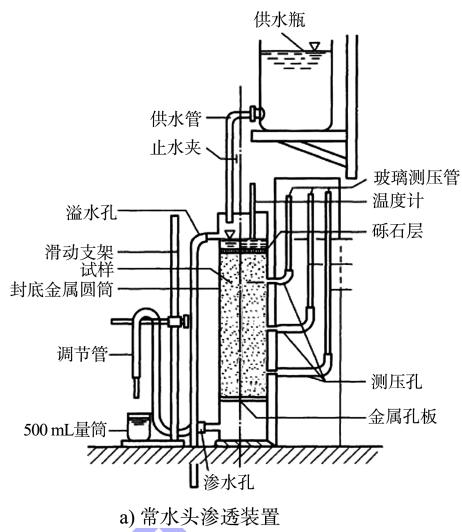


图 2 常水头渗透装置及 TST-70 型渗透仪

随着数据采集技术在土工试验行业的广泛应用，具有智能化、自动化性能的新型室内渗透仪逐渐被研发出来。这些设备有的结构复杂、操作繁琐、自动化性能不足<sup>[3]</sup>，有的仅为固结试验的改良版<sup>[4]</sup>，均不适用于常规土工实验室的生产试验，更不具备船载适用性。

目前，水运工程勘测的区域已从原有海岸线、潮间带逐步向离岸数十公里、甚至上百公里的深远海域发展。因此，具有智能化、自动化、结构简单、操作简便且具备船载适用性的渗透仪亟待研发。为了使实验室内测定的渗透系数更加准确，新式渗透试验过程不仅可以模拟土体的原位应力状态，还要采用自动化、智能化、多功能设计，在兼顾土的静止侧压力系数试验的同时，简化渗透试验操作步骤、提高试验效率。

## 1 船载多功能渗透仪

### 1.1 设备结构

通过对常规渗透试验仪器的调研, 参考国内外先进土工试验技术, 自主研发了可加围压的船载多功能渗透仪, 并成功申请了实用新型专利<sup>[5]</sup>。仪器主要由压力系统、给水(垂压)系统、土样容器、数

据采控及处理系统、储水系统组成, 其结构见图3。由于船载多功能渗透仪具有压力系统和给水(垂压)系统, 当给水(垂压)系统中的水被阻断, 也可以实现加压的功能。因此, 二者本质上同为加压系统, 具有两套能够提供压力、测试压力的系统也可以进行土样的静止侧压力系数试验, 即  $K_0$  固结试验。

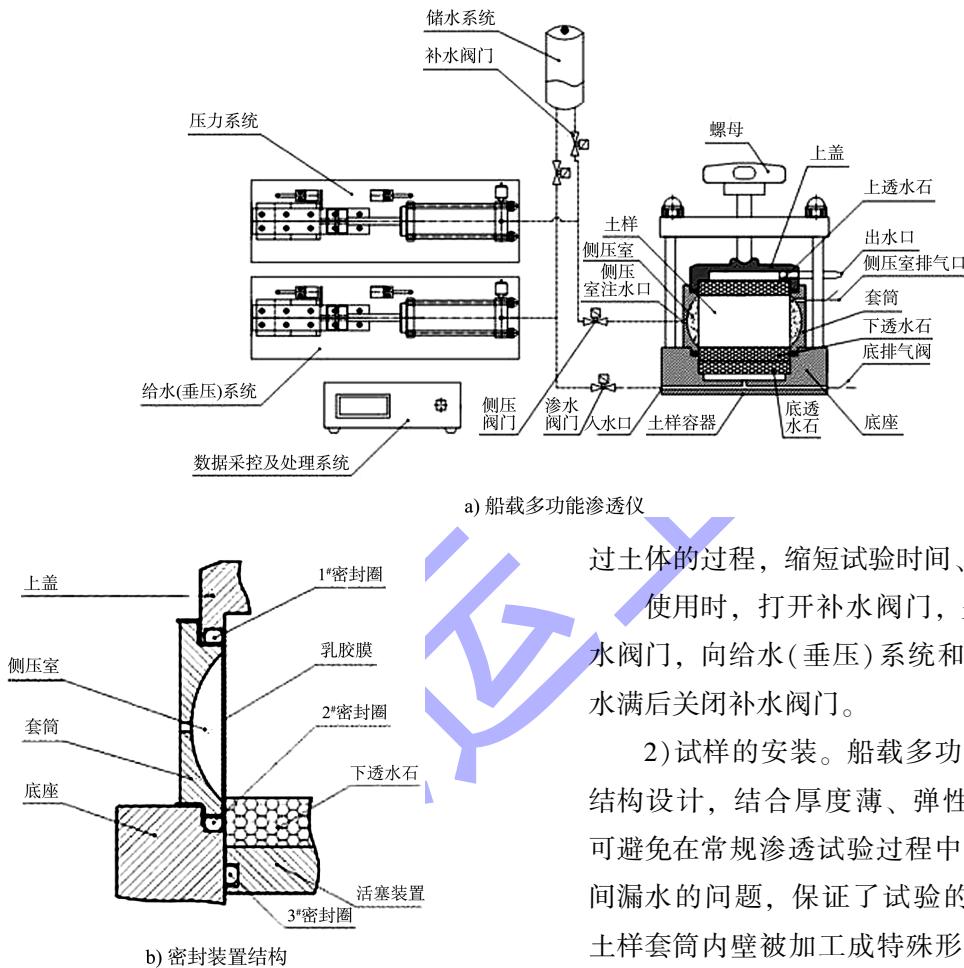


图3 船载多功能渗透仪及密封装置结构

### 1.2 使用方法

#### 1.2.1 渗透试验方法

1) 压力系统注水。船载多功能渗透仪不再采用玻璃管内水头压力提供渗透水压, 而是通过伺服系统驱动活塞移动, 压缩缸内的水产生精准稳定的水头压力, 使渗透仪可适用于船载晃动的环境。压力系统可使土样在渗透试验过程中被施加稳定的围压, 达到模拟土体在地下的真实应力状态的目的; 给水(垂压)系统可向土样内注入大小可调的水压力, 保证水压力稳定的同时加速水渗

过土体的过程, 缩短试验时间、提高试验效率。

使用时, 打开补水阀门, 关闭侧压阀门和渗水阀门, 向给水(垂压)系统和压力系统注水, 待水满后关闭补水阀门。

2) 试样的安装。船载多功能渗透仪采用密封结构设计, 结合厚度薄、弹性好的乳胶膜使用, 可避免在常规渗透试验过程中环刀内壁与土样之间漏水的问题, 保证了试验的精准性和成功率; 土样套筒内壁被加工成特殊形状, 使得土样周围形成有限的密闭空间, 注满水后可通过压力系统实现围压的施加, 并使乳胶膜与土样紧密接触。

使用时, 首先将试样置入乳胶膜中, 再将套有乳胶膜的试样连同乳胶膜一起放入套筒中, 将宽出试样2~3 cm的乳胶膜的两端分别翻折在套筒的外壁两端; 其次在容器底座内依次放置底透水石、下透水石、薄滤纸, 将2#密封圈置入底座的卡槽内, 再将1#密封圈置入上盖的卡槽中; 之后将套筒连同试样放置在底座上, 土样上端依次放置薄滤纸、上透水石、上盖, 旋紧螺母密封容器; 最后打开侧压阀门和侧压室排气口阀门, 启动压力系统向侧压室注水, 当侧压室排气口有水流出

时关闭；同时打开渗水阀、底排气阀，启动给水(垂压)系统，排出土样容器管路中的气泡。

3) 过程控制及结果处理。船载多功能渗透仪采用数据采控及处理系统，通过监测压力系统的伺服机构的运动状态即可判断土样的  $K_0$  固结程度，由给水(垂压)系统的伺服机构位移量可得到某时间段内的渗水量、流速。依据达西定律可得到多组渗透系数，还可绘制出渗透系数随时间变化的曲线。试验全程不再需要人工读数、人工判断试验开始和结束，不仅节约了人力、提高工作效率，还可解决在船舶晃动的环境中玻璃管内水头不稳定难以读数的问题。

具体操作为：首先在计算机数据采控软件中输入土样编号、围压、渗水压力等参数后开始试验，土样进入  $K_0$  固结排水阶段，当压力系统的伺服机构不再发生位移时土样固结稳定；给水(垂压)系统启动，水被注入土样内，采控系统开始按照某一固定流量或固定时间段进行数据采集及计算，得出一系列渗透系数并绘制渗透系数随时间变化的曲线直至试验结束。

### 1.2.2 $K_0$ 固结试验方法

船载多功能渗透仪进行  $K_0$  固结试验时，将渗透试验时使用的底透水石换成不透水的活塞装置，试验过程中从容器底部施加的水压力推动活塞装置向上移动，起到了为土样施加垂向压力  $\sigma_1$  的作用，即将给水(垂压)系统的功能从渗透试验中“给水”转化为“垂压”；侧压室与压力系统相连，试验开始前侧压室通过压力系统注满水，试验过程中，土由于被压缩而产生的侧压力  $\sigma_3$  即可通过水传导至压力量测装置，从而达到准确量测侧压力  $\sigma_3$  的目的。

$K_0$  固结试验方法具体参照渗透试验，但要将

容器底部的底透水石换成活塞装置；参数设置可依据现行规范或工程的实际要求。

## 2 试验及结果

### 2.1 渗水压力的确定

以曹妃甸某勘察项目为依托开展研究试验工作。工程位于唐山市曹妃甸区西北部，属于滨海平原，有较厚的河流、泻湖及海相沉积物覆盖，属中生代和新生代第四纪地层，具有代表性的砂土、粉土、粉质黏土和黏土土层。

水渗过不同类土的难易程度差别较大，为了缩短渗水时间、提高试验效率，又要避免渗水压力过大对土样内部结构产生影响，应选择适宜的渗水压力。通过对不同类型的土进行不同渗水压力的试验表明，按表 1 选取渗水压力，能够保证船载多功能渗透仪试验值的可靠性。

表 1 船载多功能渗透仪渗水压力建议值

土样类别	渗水压力建议值/kPa		
	液性指数 $I_L \geq 0.75$	$0.25 \leq I_L < 0.75$	$I_L < 0.25$
黏土(淤泥质黏土)	15~<25	25~40	35~50
粉质黏土	15~<25	25~35	30~45
粉土	10~20	10~20	10~20
粉细砂	10	10	10
中粗砂	10	10	10

注：黏土(淤泥质黏土)、粉质黏土同时受塑性指数及是否夹杂透水通道影响，可据实合理设置渗水压力；粉土一般受含水、密实状态的影响；由于渗透容器容量有限，故全自动渗透仪不适用于砾砂及更粗的粗粒土的渗透试验。

### 2.2 试验条件及结果

选用代表性土样，在常规土工实验室采用常规渗透仪与船载多功能渗透仪进行多组渗透对比试验，结果见表 2。分别绘制粉土和黏性土的塑性指数与渗透系数的关系，见图 4。

表 2 渗透对比试验结果

土样类别	数量/个	塑性指数范围	渗透系数范围/(cm·s <sup>-1</sup> )		差值绝对值的范围/10 <sup>-n</sup>
			船载多功能渗透仪	常规渗透仪	
粉土	10	7.3~9.5	$5.0 \times 10^{-7} \sim 5.5 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-6} \sim 7.2 \times 10^{-5}$	0.7~1.7
粉质黏土	10	11.0~16.8	$2.2 \times 10^{-8} \sim 2.9 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-8} \sim 2.9 \times 10^{-6}$	0.5~1.4
黏土	10	17.3~22.7	$3.0 \times 10^{-9} \sim 3.6 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-9} \sim 4.3 \times 10^{-7}$	0.2~1.4

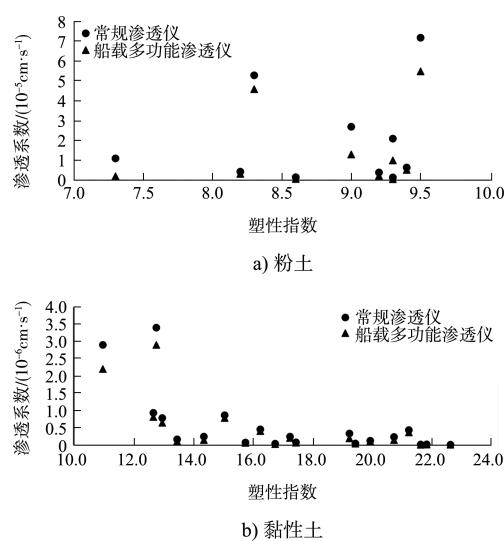


图4 塑性指数与渗透系数关系

为了进一步验证船载多功能渗透仪的性能,采用该工程的土配制5组不同类型的均质试样,每组试样制成多个试件,分别采用常规渗透仪、常规 $K_0$ 固结仪与船载多功能渗透仪进行渗透和 $K_0$ 固结室内对比试验,并将船载多功能渗透仪放置在该工程的勘探船上进行渗透、 $K_0$ 固结试验。为了方便与常规仪器的结果比较,船载多功能渗透仪均施加10 kPa围压。渗透试验结果见表3, $K_0$ 固结试验结果见表4。绘制常规渗透仪与船载多功能渗透仪(室内及船上)试验用时对比,见图5。

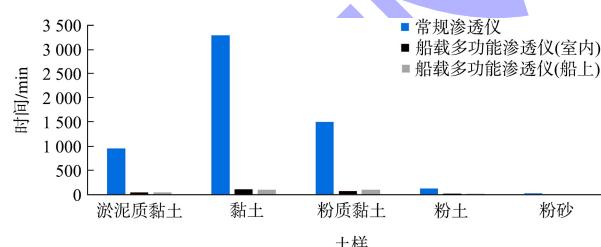


图5 常规渗透仪与船载多功能渗透仪(室内及船上)试验用时对比

表3 渗透试验结果

土样类别	塑性指数	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )			
		常规渗透仪	船载多功能渗透仪(室内)	船载多功能渗透仪(船上)	差值绝对值的最大值
淤泥质黏土	21.7	$5.4 \times 10^{-7}$	$4.3 \times 10^{-7}$	$4.5 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$
黏土	20.6	$4.4 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-8}$
粉质黏土	14.2	$6.3 \times 10^{-7}$	$5.6 \times 10^{-7}$	$5.7 \times 10^{-7}$	$0.7 \times 10^{-7}$
粉土	9.5	$7.5 \times 10^{-6}$	$5.8 \times 10^{-6}$	$6.1 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-6}$
粉砂	-	$5.0 \times 10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-4}$	$0.5 \times 10^{-4}$

表4  $K_0$ 固结试验结果

土样类别	塑性指数	土的静止侧压力系数 $K_0$			变异系数
		$K_0$ 固结仪	船载多功能渗透仪(室内)	船载多功能渗透仪(船上)	
淤泥质黏土	21.7	0.69	0.71	0.72	0.0176
黏土	20.6	0.56	0.53	0.54	0.0230
粉质黏土	14.2	0.42	0.44	0.43	0.0190
粉土	9.5	0.38	0.40	0.40	0.0240
粉砂	-	0.35	0.36	0.37	0.0227

### 3 试验结果分析

1)由表2及图4的形态可知,船载多功能渗透仪与常规渗透仪进行的渗透试验结果差别不大,散点图形态相似,证明了船载多功能渗透仪性能的可靠性;无论何种渗透仪进行的渗透试验,粉土的渗透系数与塑性指数之间均无明显规律,黏性土的渗透系数随着塑性指数的增加有减小的趋势,但规律不明显,证明塑性指数与渗透系数间并无较好的相关性,这种现象反映了土的渗透系数影响因素不仅仅是黏性的大小,同时也受土的结构、有无渗水通道等条件的影响;对于渗透系数较大的土,船载多功能渗透仪较常规渗透仪偏小较多,反映了此类渗水通道较发达的土在采用常规渗透仪时极易漏水,导致渗透系数偏大。

2)由表3可看出,同一种土采用船载多功能渗透仪与常规渗透仪进行渗透试验测得的渗透系数之差在允许范围内,均小于 $2.0 \times 10^{-n}$  cm/s,同样验证了该设备渗透试验性能的可靠性;船载多功能渗透仪无论在稳定的实验室内还是在晃动的船舶上,试验结果差别较小( $\leq 2.0 \times 10^{-n}$  cm/s),试验用时也无较大差异,稳定性很好,证明了船载多功能渗透仪具有良好的船载适用性,可以在晃动的船载环境中进行试验。

3)由表4可看出,5种土的静止侧压力系数 $K_0$ 的变异系数不超过0.024,表明采用船载多功能渗透仪进行 $K_0$ 固结试验,无论在室内还是在船上,其试验结果与常规 $K_0$ 固结仪的试验结果相比离散性小,说明船载多功能渗透仪可以进行 $K_0$ 固结试验,并且稳定可靠。

4)由图5可知,船载多功能渗透仪与常规渗

透仪的试验用时差别较大，试验效率提高最快的黏土试验用时仅为常规渗透仪的 3.3%，粉砂试验用时为常规渗透仪的 36.4%，表明了船载多功能渗透仪可以缩短渗透试验用时，尤其对于渗透系数较小的黏性土，可极大提高试验效率。

#### 4 结语

1) 船载多功能渗透仪的试验方法可进行渗透及  $K_0$  固结试验，具有良好的多功能性；渗透试验过程中可通过模拟土样的原始应力状态，测试土样在地层中受力条件下的真实渗透系数，方法更符合工程实践；可通过为渗透水流施加适当的压力提高渗透流速，大幅缩短试验时间，提高试验效率；数据采控及处理系统实现了试验全过程的智能化、自动化，大幅提高先进性及试验效率。

2) 船载多功能渗透仪的给水系统比常规渗透仪操作简单、体积小且不受船舶晃动的影响，船载适应性能良好；土样容器的密封结构设计及乳胶膜的使用，方便土样的拆卸、有效防止漏水，且使渗透仪适用于不同类型土(细粒土、粗粒土)的渗透试

(上接第 31 页)

#### 3 结论

1)  $\nu$  对混凝土的抗载能力影响较大， $\nu$  越小应力-应变曲线越接近理论值，但收敛速度越慢，甚至不收敛，应尽量取较小值。研究发现， $\nu = 0.001$  时具有良好的计算精度和收敛性。

2)  $\psi$  对混凝土开裂前期的力学行为影响较小，但对开裂后期的影响较大，应慎重选取。随着  $\psi$  的增加，钢筋混凝土梁呈现抗弯能力逐渐提高的趋势。经计算发现，当  $\psi$  取 36° 时，计算与试验结果最为符合。

3) 对于 CDP 模型的钢筋混凝土问题，Risk 法的计算与试验结果不符，不建议采用，而应采用“Static, General”法。

#### 参考文献：

- [1] 王冬雁, 吴岳刚, 杨振坤, 等. C80 早龄期钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(12): 82-87.

验，还可使  $K_0$  固结试验中侧压力的量测更精准。

3) 船载多功能渗透仪相对于常规渗透仪优越性突出，对于促进土的渗透试验研究具有重大意义，但由于该工程未进行野外现场渗透试验，船载多功能渗透仪模拟土样在真实应力状态下的渗透试验指标与野外现场渗透试验指标之间的关系还有待进一步研究。

#### 参考文献：

- [1] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [2] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [3] 孙忠玉, 夏洋洋, 张家超, 等. 一种泵推式黏土常水头渗透试验装置: 201821335184.2[P]. 2018-08-20.
- [4] 吴晓峰, 孙恺, 吴玥. 一种改进型土体联合固结渗透仪: 201510471068.2[P]. 2015-08-04.
- [5] 胡伟娜, 万中喜, 刘永胜, 等. 渗透仪: 2021227168393[P]. 2021-11-18.

(本文编辑 王璁)

- [2] 董卫, 苏志敏, 杨华舒, 等. 箍筋锈蚀对钢筋混凝土梁承载机理影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(6): 86-90.
- [3] 张健新, 戎贤, 刘平. 600 MPa 钢筋混凝土梁裂缝及变形性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(24): 89-92, 82.
- [4] 郝明辉, 陈厚群, 张艳红. ABAQUS 中剪胀角的选取探讨[J]. 水力学报, 2012, 43(S1): 91-97.
- [5] 雷拓, 钱江, 刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. 结构工程师, 2008, 24(2): 22-27.
- [6] 齐威. ABAQUS 6.14 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [7] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 47-52, 96.
- [8] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

(本文编辑 赵娟)