



循环荷载作用下重塑素土和 根系加筋土动力试验研究*

严振石

(广西西江开发投资集团有限公司, 广西 南宁 530022)

摘要: 船行波引发的循环荷载是造成内河航道岸坡失稳、破坏的重要原因之一, 深入研究循环荷载作用下土体失稳和破坏机理对航道岸坡的设计具有重要意义。植物护岸技术是通过根系与土体紧密结合, 从而改变土体强度。基于那吉库区重塑素土和重塑根系加筋土, 利用三轴循环荷载试验, 模拟船行波荷载长期作用, 研究重塑素土和重塑根系加筋土在循环荷载作用下的循环荷载振次、强度、围压强度与土体应变之间的关系。结果表明, 当围压稳定时, 试样残余应变随着循环荷载的增大而增大。但相同围压条件下, 重塑根系加筋土的内摩擦角和黏聚力高于重塑素土, 说明植物根系的存在提高了土体对于船行波的抵抗效应, 提高土体在循环荷载作用下的抗剪强度。

关键词: 循环荷载; 重塑素土; 重塑根系加筋土; 残余应变; 抗剪能力

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0186-06

Dynamic experimental study on remolded soil and plant-root reinforced soil under cyclic load

YAN Zhen-shi

(Guangxi Xijiang Development & Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, China)

Abstract: The cyclic load caused by the ship traveling wave is one important reason which leads to the instability of inland waterway revetment, thus it has significance to study the mechanism of soil instability and failure under cyclic load for the design of inland waterway revetment. Plant revetment protection technology can enhance the soil strength by the root combining closely with soil. Based on the remolded plain soil and remolded root reinforced soil of Naji Reservoir, we apply the triaxial cyclic loading test, simulate the long-term action of ship traveling wave load, study the relationships of cyclic loading vibration time, strength, confining pressure strength and soil strain of remolded plain soil and remolded root reinforced soil under cyclic loading. The results show that the residual strain of remolded plain soil and remolded root reinforced soil increases with the increase of cyclic load under different confining pressure. Under the same cyclic load, the internal friction angle and cohesion of remolded root reinforced soil are higher than these of remolded plain soil, and the existence of root improves the resistance effect of soil to ship traveling wave, and improves the shear strength of soil under the cyclic load.

Keywords: cyclic load; remolded plain soil; remolded root reinforced soil; residual strain; resistance to shear

近十年来, 随着内河航运迅速发展, 航道等级不断提升, 通航船舶吨位提升导致船行波频率及振幅增加, 作用在岸坡上的船行波冲击力也随之提升^[1-2]。在船行波引起的循环荷载作用下, 部

分河段土质岸坡极易发生失稳, 导致岸坡崩塌, 威胁通航安全^[3-5]。深入研究船行波引发循环荷载造成岸坡失稳的机理, 对于航道护岸设计具有重要的意义^[6-8]。

收稿日期: 2021-02-13

***基金项目:** 国际科技合作重点项目计划项目(2019YFE0121000)

作者简介: 严振石(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程建设管理。

循环荷载作用下，土体孔隙将产生孔压，进而改变土体强度，降低土体稳定性。周建等^[9]研究了饱和软黏土在循环荷载下的物理和化学性质，将饱和软黏土的软化破坏原因分为两类：1) 循环荷载引起的孔压导致土体软化；2) 主应力方向在循环荷载作用下大小与方向均不断变化，土体强度随着土体结构的重塑而降低。而这一系列原因导致循环荷载作用下黏土的物理和化学性质远复杂于砂土^[10]。因此如何保持循环荷载作用土体强度是亟待解决的问题。

随着生态航道建设和养护技术的发展，植物护岸技术被广泛用于土质岸坡的保护中。植物通过根系与土体紧密结合，改变土体强度。景观植物护岸技术被广泛应用，但其固土机理仍未被解释。本文通过动三轴试验系统，对那吉库区采样重塑素土和重塑根系加筋土进行循环荷载作用下的三轴试验。通过对重塑素土和根系加筋土进行循环荷载动力学试验研究，从残余应变和抗剪强度两个方面对比分析重塑素土和根系加筋土在循环荷载下的破坏过程和破坏机理。

1 试验设计及工况设置

试验装置采用 DCSS 型动三轴试验系统，该装置集动三轴和动单剪系统于一体，可施加轴向循环荷载及进行水平方向的动单剪试验。土体试样经真空饱和后，再利用土样重塑仪、脱模器及加压设施等仪器设备，制备重塑素土及根系加筋土试样。

重塑根系加筋土及重塑素土试样制备时土样的取土深度为地表下 0.7~6.9 m，土质为黏土。通过相关测试，试样土质参数见表 1。根系加筋土中植物根系选用毛毯草原状根系，直径 1 mm，长度 20 mm，为保持根系加筋土物化性质与取土地一致，根系加筋土含根量取 0.9 g/样。土样物理性质参数见表 1。

表 1 土样物理性质参数			
天然密度/ (g·cm ⁻³)	干密度/ (g·cm ⁻³)	相对密度	天然含水率/%
1.916	1.527	2.748	25.44

考虑到岸坡最不利情况，本文选取船行波最大波峰作为循环作用荷载。考虑到船行波的波高、波长等受到船速、河道宽度、水深等多因素共同控制，因此船行波的波高及波长均根据工程实际观测进行确定，并作为循环荷载计算条件。最大船行波波高与波压力之间关系为^[11]：

$$p=1.34\rho gh$$

(1)

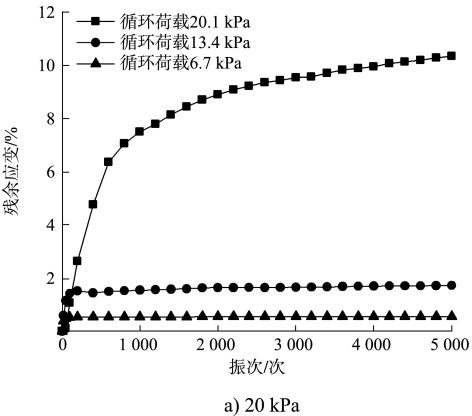
式中： p 为最大波压力； ρ 为水密度； h 为船行波波高。根据某工程实际观测，最高船行波波高为 1.5 m，因此选取 0.5、1.0 和 1.5 m 共 3 种船行波波高用于计算船行波所施加的循环荷载量级，作为试验相关参数。围压加载及循环荷载强度施加方案见表 2。

表 2 循环荷载作用试验方案			
围压/kPa	循环强度 1/kPa	循环强度 2/kPa	循环强度 3/kPa
20	6.7	13.4	20.1
35	6.7	13.4	20.1
50	6.7	13.4	20.1

2 结果分析与讨论

2.1 残余应变分析

循环荷载作用下，在动三轴剪切条件下重塑素土试样产生的轴向应变随着循环荷载的变化发生显著变化。本文将循环荷载作用一个周期内产生的轴向应变平均值定义为该试样的残余应变。试验中对重塑素土和重塑根系加筋土施加表 2 的循环荷载，并在振次为 1~5 000 次内测量试样的残余应变，得到了不同围压时循环荷载作用下重塑素土的残余应变-振次关系，如图 1 所示，循环结束后残余应变值见表 3。



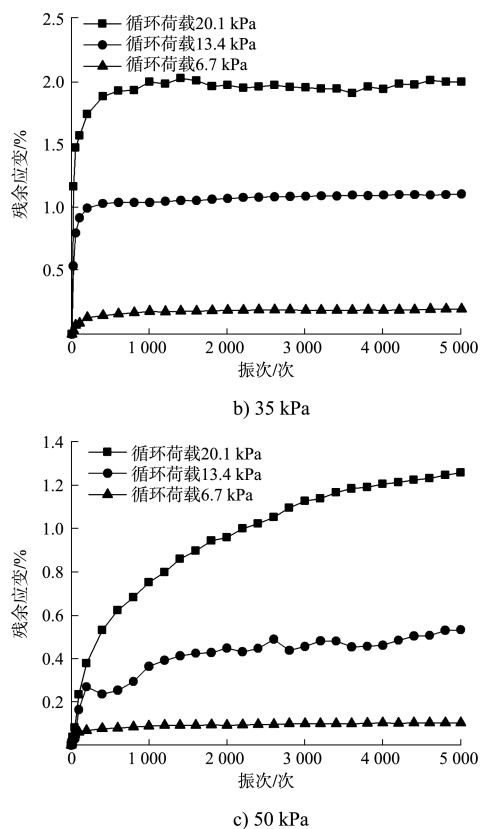


图 1 不同围压作用时循环荷载作用下
重塑素土的残余应变-振次关系

表 3 不同围压作用时循环荷载作用下重塑素土的残余应变

围压/kPa	残余应变/%		
	循环强度 1	循环强度 2	循环强度 3
20	0.553	1.723	10.342
35	0.200	1.116	2.009
50	0.103	0.534	1.260

由图 1 可以发现，在一定围压下，随着循环荷载的增大，试样的残余应变随之增大。同时对不同循环荷载作用下的残余应变进行分析，循环加载 5 000 次所测得的残余应变随振次的变化基本呈对数形式增长。在一定循环荷载作用下，随着围压的增大，试样的残余应变降低。试验结果表明，高水平的围压对循环荷载作用下土体变形具有抑制作用。另一方面，当 6.7 和 13.4 kPa 两种循环荷载作用条件下，重塑素土的残余应变均小于 2%，而当循环荷载增加到 20.1 kPa，与围压比值接近时，重塑素土残余应变急剧增加，达到 10.34%，在该条件下土体受循环荷载的作用变形明显。

与之相比，不同围压作用时不同循环荷载作用下重塑根系加筋土的残余应变-振次关系见图 2，

循环结束后的残余应变值见表 4。对比图 1 和 2 可知，重塑素土的残余应变仅在循环强度 2，即循环荷载为 6.7 kPa 条件下，低于重塑加筋土，而随着围压的增大，重塑素土参与应变均高于重塑加筋土。当循环荷载增加到 20.1 kPa 条件时，围压为 20 kPa 时，重塑加筋土的残余应变仅为 1.212%，远小于重塑素土残余应变 10.342%，充分说明根系发挥了对土体的缠绕挤压作用，可以抑制土体由于拉、压动力交替的作用而造成的塑性应变的累积，从而使土体保存变形与强度。

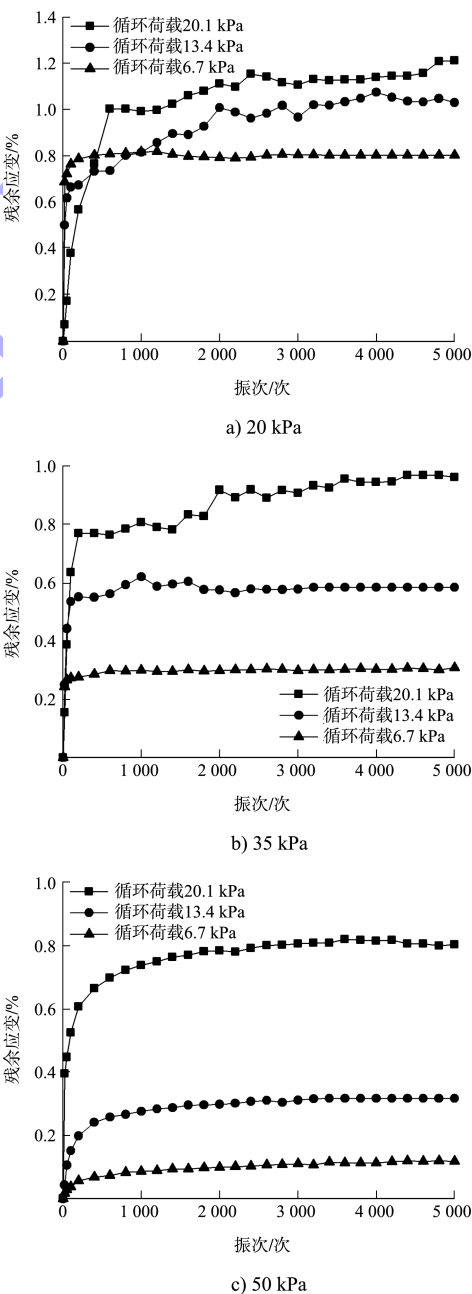


图 2 不同围压作用时循环荷载作用下重塑根系
加筋土的残余应变-振次关系

表 4 不同围压作用时循环荷载作用下
重塑根系加筋土的残余应变

围压/kPa	残余应变/%		
	循环强度 1	循环强度 2	循环强度 3
20	0.804	1.031	1.212
35	0.311	0.588	0.969
50	0.119	0.318	0.806

2.2 应力-应变分析

在循环荷载作用后的试样上进行三轴不排水剪切，当试样轴向应变达到 15%时认为此时试样发生破坏，不同围压作用下重塑素土剪切过程的应力-应变关系见图 3。

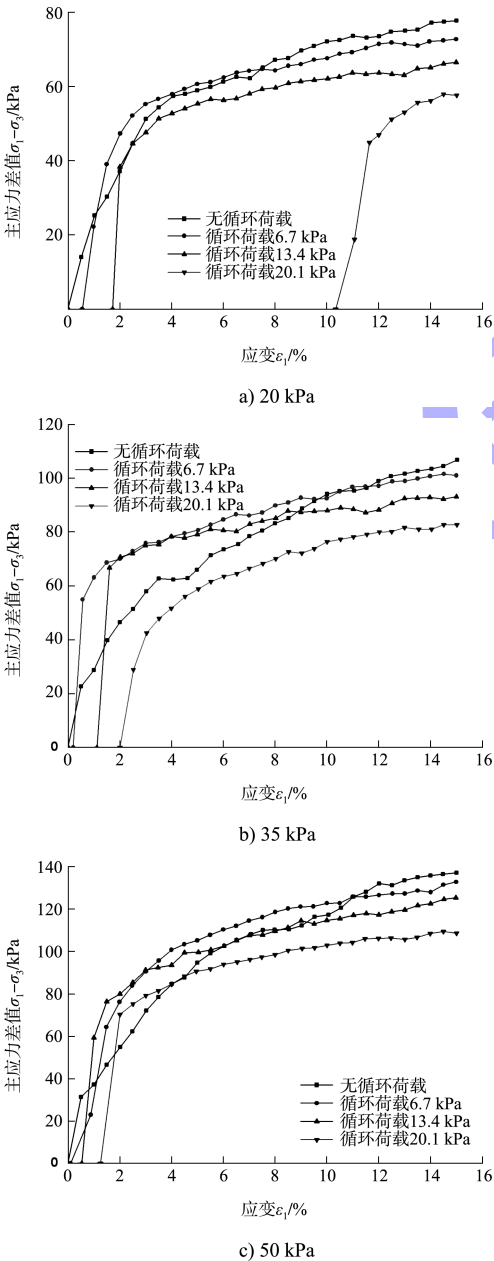


图 3 不同围压作用时循环荷载作用下重塑素土
剪切过程的应力-应变关系

与之相比，不同围压作用时不同循环荷载作用下重塑根系加筋土剪切过程的应力-应变关系见图 4。

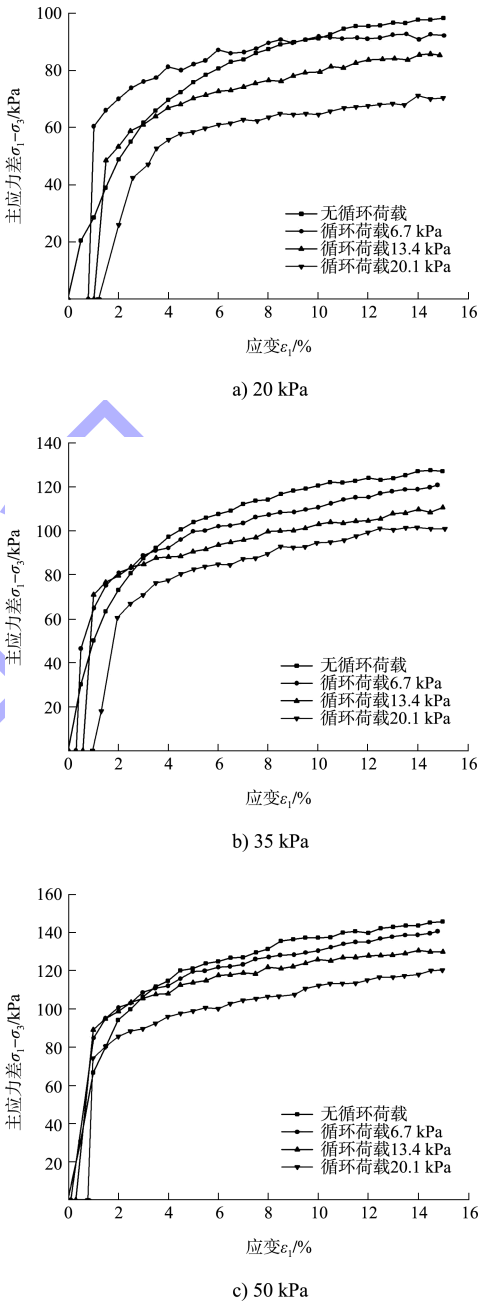


图 4 不同围压作用时循环荷载作用下重塑根系
加筋土剪切过程的应力-应变关系

2.3 抗剪强度折减率分析

本文取轴向应变为 15%时对应的主应力差值进行分析，并将循环荷载作用下的主应力差值与静三轴主应力差值的比值定义为抗剪强度折减率 β ，并分析不同围压下 β 随 σ_d/σ_0 变化过程(其中 σ_d 为动荷载, σ_0 为围压)，如图 5 所示。

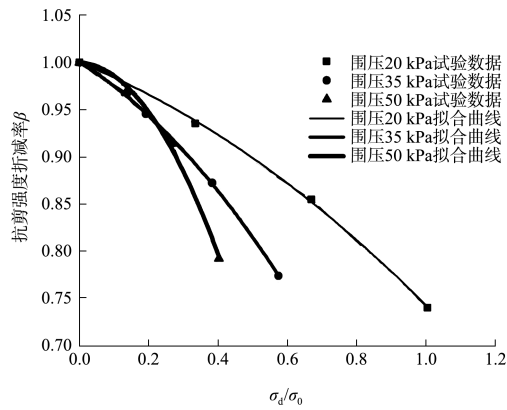


图 5 重塑素土 β - σ_d/σ_0 曲线

不同围压下重塑素土抗剪强度折减率 β 随 σ_d/σ_0 的变化关系可以表述为：

$$\beta = -k_1 (\sigma_d/\sigma_0)^2 - k_2 \sigma_d/\sigma_0 + 1 \tag{2}$$

式中： k_1 、 k_2 为相关拟合常数，取值见表 5。

表 5 不同围压作用时重塑素土抗剪强度折减率中常数取值

围压/kPa	k_1	k_2
20	0.109	0.147
35	0.297	0.221
50	1.221	0.186

不同围压下根系加筋土抗剪强度折减率 β 随 σ_d/σ_0 的变化关系见图 6，拟合公式同式(2)，相关系数取值见表 6。对比发现，根系的存在提高了土体对于船行波的抵抗效应，循环荷载作用下土体的抗剪强度增大。

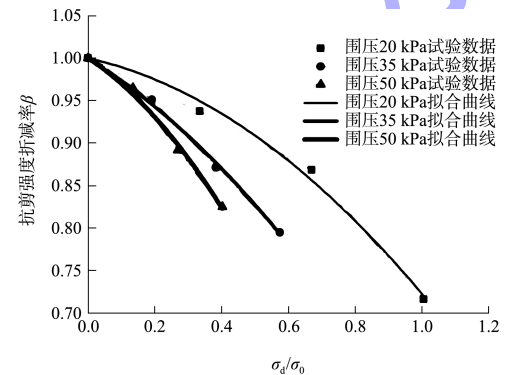


图 6 重塑根系加筋土 β - σ_d/σ_0 曲线

表 6 不同围压作用时重塑根系加筋土抗剪强度折减率中常数取值

围压/kPa	k_1	k_2
20	0.191	0.087
35	0.202	0.245
50	0.469	0.253

2.4 内摩擦角和黏聚力分析

利用式(2)与表 5、6，结合无循环荷载条件

下土体三轴强度，可计算出不同船行波条件下土体抗剪强度值，不同船行波作用下重组素土与重组加筋土内摩擦角 φ 和黏聚力 c 曲线见图 7。重塑根系加筋土的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 以及重塑素土的黏聚力 c 随着船行波增加而减小，但重塑素土的内摩擦角 φ 随着船行波的增加而增加。对比图 7a)与 b)可以看出，重塑素土在不同船行波作用下，内摩擦角 φ 和黏聚力 c 均高于重塑素土。进一步说明植物更细提高土体的抗剪强度，从而增加土质岸坡在船行波作用下的稳定性。

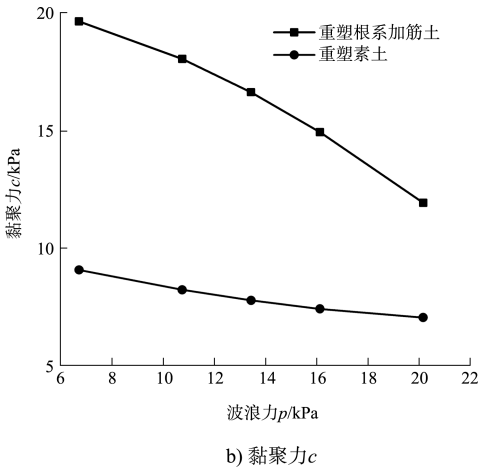
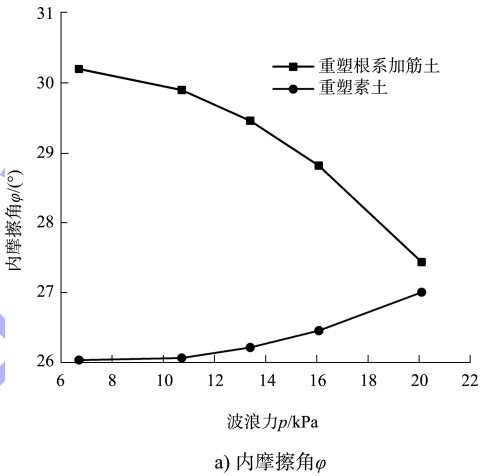


图 7 不同船行波作用下重组素土与重组加筋土的内摩擦角和黏聚力曲线

3 结论

1)在相同围压条件下，重塑素土和重塑根系加筋土在循环荷载作用下，试样参与应变均随着循环荷载的增加而增加；对不同循环荷载作用下的残余应变进行分析，循环加载 5 000 次所测得的残余应变随振次的变化基本呈对数形式增长；在

一定循环荷载作用下，随着围压的增大，试样的残余应变降低，说明围压的增大可以抑制土体在循环荷载作用下的变形。

2)对于重塑素土，在循环荷载强度低于围压条件下，其残余应变均小于 2%。而随着循环荷载增大到围压时，重塑素土残余应变剧增至 10.342%，土体残余变形明显。

3)对于重塑根系加筋土，除循环荷载为 6.7 kPa 时其残余应变略微高于重塑素土外，随着循环荷载压力增加，重塑加筋土残余应变均小于重塑素土。当循环荷载与围压接近时，将试样的残余应变由 10.342%降至 1.212%，充分说明根系发挥了对土体的缠绕挤压作用，可以抑制土体由于拉、压动力交替的作用而造成的塑性应变的累积，从而使土体保存变形与强度。

4)重塑根系加筋土的内摩擦角和黏聚力均高于重塑素土，说明根系的存在提高土体对于船行波的抵抗效应，从而提高土体在船行波作用下的抗剪强度。

参考文献：

[1] 卓明泉,许劲松,朱志夏.浅水航道船行波数值模拟研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2019,34(1):63-68.

(上接第 110 页)

2)过闸船型组合的变化直接影响船闸的通过能力，合理预测过闸船型组合、分析船型组合与闸室尺度的适应性对合理确定船闸建设规模有着重要意义。

3)从船闸建设场地条件、通过能力需求、过闸船型适应性以及运营调度策略等角度进行对比分析，综合论证了船闸建设规模。

4)集中运营调度策略充分利用双线船闸“一小一大”规模配置的特点，可有效提高各线船闸一次过闸平均吨位和闸室平均率，进一步提升船闸通过能力，可为船闸运营调度提供参考。

5)随机过闸排挡仿真方法简化了过闸流程，无法计算一次过闸时间，反映不了过闸船舶的待闸时间，尤其是集中运营调度策略对船舶待闸时

[2] 崔衍强,王元战,刘旭菲.船行波对内河饱和软黏土刚度和强度弱化影响试验研究[J].水道港口,2015,36(5):425-431.

[3] 严忠民,唐洪武,周春天.通榆河响水段船行波与护坡冲蚀试验研究[J].水利水电科技进展,1997(5):40-44.

[4] 陈洪凯,唐红梅,曾云松.土质岸坡变形破坏浸泡-渗流耦合驱动理论及应用[M].北京:科学出版社,2016.

[5] 马殿光,李华国,刘新,等.库区航道土质岸坡生态治理研究[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[6] 汪小平,刘厚平,周晖,等.循环荷载作用后饱和软粘土抗剪强度变化规律的试验研究[J].铁道建筑,2006(4):56-58.

[7] 侯永峰,张航,周建,等.循环荷载作用下水泥复合土变形性状试验研究[J].岩土工程学报,2001,23(3):288-291.

[8] 李桦.循环荷载作用下饱和粘土不排水抗剪强度模型及应用[D].天津:天津大学,2007.

[9] 周建,龚晓南.循环荷载作用下饱和软粘土应变软化研究[J].土木工程学报,2000,33(5):75-78,82.

[10] 许国辉,单红仙,贾永刚.黄河水下三角洲沉积物在循环荷载作用下土体中孔压变化实验研究[J].青岛海洋大学学报(自然科学版),2003,33(1):80-86.

[11] 封晓伟.波浪循环荷载作用下防波堤-地基稳定性研究[D].天津:天津大学,2010.

(本文编辑 王璁)

间的影 响，有待进一步研究。

参考文献：

[1] 刘涛,彭东方.引江济淮工程航运功能研究[J].人民长江,2020,51(1):154-159.

[2] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.

[3] 张玮,廖鹏,黄海鸥,等.施桥船闸到船特性分析[J].水利水运工程学报,2004(1):70-73.

[4] 商剑平,吴澎,唐颖.基于计算机仿真的船闸联合调度方案研究[J].水运工程,2011(9):199-204.

[5] 袁和平,刘春泽,张婧姝.京杭运河台儿庄三线船闸通过能力及闸室尺度[J].水运工程,2016(10):169-173.

(本文编辑 武亚庆)