

DOI: 10.11779/CJGE2020S2010

基于流固耦合的河道土质岸坡护岸结构优化数值分析

张晨¹, 钱亚俊¹, 张桂荣^{1,2}, 詹小磊¹, 朱锐¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 护岸结构可以减小水流冲刷等作用对土质岸坡产生的崩岸破坏, 但这类结构的设置将对既有岸坡的渗流、变形等过程产生不可忽视的影响。以新孟河延伸拓浚工程为原型, 采用流固耦合有限元方法, 分析了边坡在设置了以黏土包坡为主体的防护结构时岸坡渗流特征及长期稳定性。计算结果表明, 高地下水水位地区选择弱透水结构的护岸形式时, 护岸结构附近易产生“侧向绕渗”作用, 在低河道水位工况下有产生渗透破坏的风险; 同时, 因局部渗透力增加而导致边坡稳定系数下降。针对黏土包坡护岸结构的不利因素, 通过数值计算对黏土包坡护岸结构进行了优化。在黏土包坡护岸结构中增设袋装碎石护脚, 可以有效降低黏土包坡层内流速及坡面局部渗透力; 在黏土包坡护岸结构中设置坡面横向排水管, 能提升岸坡的长期稳定性。

关键词: 内河河道; 护岸结构; 渗流; 边坡稳定

中图分类号: TV861

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0056-05

作者简介: 张晨(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程模型试验、数值计算等方面的研究工作。E-mail: czhang@nhri.cn.

Numerical analysis of optimization of revetment structures of soil bank slopes of inland rivers

ZHANG Chen¹, QIAN Ya-jun¹, ZHANG Gui-rong^{1,2}, ZHAN Xiao-lei¹, ZHU Rui¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: The revetment structure can reduce the damage of soil bank slopes caused by water erosion, but its influences on the physical and mechanical processes such as seepage and deformation of the existing bank slopes should be fully considered in practice. Taking Xinmeng River extension project as the prototype, the influences of the revetment structure with clay on the seepage characteristics and stability of bank slopes are analyzed by the fluid-solid coupling finite element method. The calculated results show that when the clay slope is selected as the revetment form in the high water level area, the phenomenon of "lateral seepage" is likely to occur around the revetment structure. However, there is a hidden danger of seepage failure in the low water level area. Meanwhile, the safety factor of slope decreases due to the increase of local seepage force. In view of the unfavorable factors of the revetment structure with clay, numerical calculations are performed to further optimize the revetment structure with clay. Adding bagged gravel foot protection to the revetment structure of clay bank slope can effectively reduce the velocity in the clay slope layer and the local permeability of the slope surface. Setting up lateral drainage pipes on the revetment structure of slope in the clay-encrusted bank can improve the long-term stability of the bank slope.

Key words: inland river; revetment structure; seepage; slope stability

0 引言

受水流冲刷、风浪、船行波等作用影响, 各类江河堤岸易发生崩岸破坏。例如长江中下游地区, 发生崩岸破坏的干流河段占全部江岸的 35.7%, 各支流崩岸破坏更是不胜枚举。为消减崩岸破坏对河道水运、水环境、水生态造成的损失, 通常对堤岸进行防护加固处理一般采用混凝土护岸、钢板桩垂直护岸、抛石或袋装碎石护脚、黏土包坡护岸等对堤岸进行防护加

固。随着水生态文明建设逐渐成为共识, 国内对岸坡生态防护技术的关注度越来越高, 在堤岸整治工程中也较多的采用了“抛石护脚+植草护坡”、“混凝土联锁块+植草”、“石笼网垫+植被”、生态袋护岸等

基金项目: 江苏省水利科技项目(2017010); 国家自然科学基金项目(51979174); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y320011)

收稿日期: 2020-09-01

生态友好型护岸结构^[1-2]。

崩岸过程具有典型的水-土交互作用,高水位差引起的渗透而导致的坍塌型崩岸^[3-4]正是体现了这一特征。另一方面,在设置护岸结构后,岸坡的局部防冲刷能力得到了提升,但也对既有岸坡的水-土交互作用的物理、力学过程产生了长期影响。然而,这种水-土交互过程并未得到足够重视,分析时往往是割裂的。例如在研究崩岸问题时,常常聚焦水流作用而忽视“土侧”;又如在分析边坡稳定性时,多是采用传统条分法求解安全系数,渗流作用的影响没有得到充分考虑;在设计护岸结构时,更是缺乏多工况下的护岸结构及岸坡长期稳定性研究^[5-6]。

当前,“共抓大保护”的时代背景将内河航道岸坡的治理要求提升到了新的高度。研究论证护岸结构及岸坡的长期稳定性,水、土相互作用的耦合分析是关键内容。近年来,有限元技术的进一步发展为岸坡稳定性流固耦合计算问题的研究提供了便利,该技术不仅可以考虑渗透作用影响,还能克服传统条分法对渗透作用处理的困难,特别是有限元强度折减法能反映岸坡渐进破坏过程,且可以根据需要设置多因素的边界条件及材料类型。本文依托具体工程,结合典型不利工况,采用流固耦合有限元模拟技术对河道土质岸坡护岸结构进行数值分析,论证和优化既有护岸结构。

1 依托工程概况

新孟河延伸拓浚工程位于太湖流域湖西区,工程河道总长 116.47 km,其中拓浚老河道 79.84 km,新开河道 36.63 km,该工程作为“引江济太”主体工程的重要环节,对保障太湖流域和区域水环境、提升防洪排涝能力和水资源配置能力具有显著意义。但该工程一直饱受崩岸灾害的困扰,主要原因是工程水位变幅区及以下土层分布以壤土、砂壤土或砂土为主,其抗冲刷能力较差,导致未设置护岸工程的拓浚老河道河段在水流冲刷和船行波侵蚀作用下,岸坡坍塌严重(图 1)。针对这一现象,综合考虑取材、造价、生态等因素,提出了以黏土为主要材料的包坡护岸处置措施(图 2)。黏土包坡方案是一种开放式的系统,有利于河道与岸坡间的水气交换,相比模袋混凝土等硬质护岸具有生态优良、造价低廉的特点;同时,抗冲刷性优于植草型护岸。工程实施时包坡材料选用了当地典型黏性土,以 40 cm 厚度按 0.91 压实度碾压处理。但该护坡方案的设计无规范可循,设计厚度也仅是按实践经验取值。另一方面,工程所在地水网密布,降水丰富,平均地下水位高于通航水位,渗流作用对河

道运行安全的影响不可忽视。



图 1 新孟河河道崩岸情形

Fig. 1 Bank collapse of Xinmeng River



图 2 新孟河延伸拓浚工程云南段黏土包坡护岸

Fig. 2 Slope revetment with clay in Yunnan section of Xinmeng River extension project

2 流固耦合数值分析方案

采用有限元软件 ABAQUS 对考虑设置黏土包坡的岸坡渗流特征及边坡稳定性进行分析。参照新孟河河道南延段典型岸坡断面特征,建立河道二维计算模型(图 3)。模型总宽 80 m,高 19 m,其中河道边坡宽 33.75 m;考虑二维边坡边界效应,将河底宽放大至 11.25 m,整个模型底边为不透水边界。土体共 4 层,自上而下依次为粉质黏土、黏土、粉砂质壤土,粉细砂根据地勘报告确定各土层的基本物理力学参数,如表 1 所示。其中,在-3.0~2.4 m 高程设置黏土包坡层,位于坡脚处,设计压实度为 0.91,土体物理力学参数与土层 2 近似。同时,充分考虑渗流作用,在模型侧边设置地下水位边界 7.0 m。

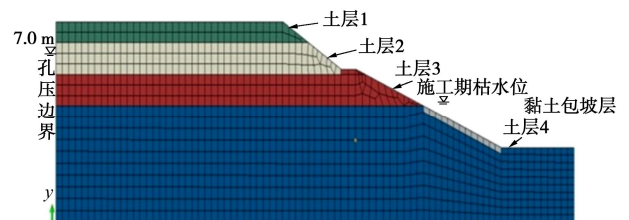


图 3 内河河道有限元模型

Fig. 3 Finite element model for inland river

根据土层物理力学性质可知,岸坡可能存在因渗流、施工水位变化、强降雨引起的边坡失稳,以及管涌、土层接触冲刷等破坏。因此,本文在平均地下水位(7 m)的条件下,设置了 3 种不同河道水位,包括防洪水位(5.63 m),运行引水水位(3.97 m),施

工期水位 (2.4 m) 等设置计算工况, 用以分析设置黏土包坡后的岸坡长期渗流特征和边坡稳定性。

表 1 土层基本物理力学参数

Table 1 Basic parameters of soil layer

| 参数名称 | 干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 不均匀系数 C_u | 渗透系数 /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) | 内摩擦角 /($^\circ$) | 黏聚力/kPa | 弹性模量/kPa | 深度范围/m |
|------|--|-------------|---|--------------------|---------|----------|--------|
| 土层 1 | 1.55 | — | 4.0×10^{-7} | 12 | 40 | 6 | 0~2 |
| 土层 2 | 1.48 | 14 | 5.0×10^{-8} | 10.5 | 35 | 7 | 2~5 |
| 土层 3 | 1.50 | 5.3 | 4.0×10^{-5} | 28 | 6 | 12 | 5~8 |
| 土层 4 | 1.49 | 3.3 | 4.0×10^{-4} | 29 | 6 | 14 | 8~19 |

模型单元采用 CPE4P 孔隙流体-应力耦合单元, 渗流计算时土体采用弹性模型, 边坡稳定分析时采用莫尔-库仑本构模型。模型左右两侧先设置相同水位的孔压边界 (7 m 高程) 进行地应力平衡计算, 计算完成后导出地应力值进行渗流分析, 渗流计算中改变模型右侧孔压边界模拟不同的渗流工况, 再将渗流计算结果以体力形式导入相应的边坡稳定计算模型中, 然后对土层的力学指标进行强度折减, 即采用基于流固耦合的强度折减法分析边坡稳定性, 此时静水压力作用以分布荷载形式施加在河道水位面。需要说明的是, 渗流分析前在模型定义初始孔隙水压力, 再在 “soils” 分析步中进行稳态渗流分析, 暂不考虑基质吸力对渗透系数的影响。此外, 船行波对岸坡稳定性的影响主要体现在坡脚崩塌, 对边坡稳定系数影响甚微, 故本次计算时不予考虑。计算中的水-土相互作用过程基于总孔隙水压力和有效应力。

3 计算结果分析

图 4 (a), (b) 为防洪水位和施工期水位下的岸坡稳态渗流场 (运行引水水位工况下的计算结果介于两种工况之间)。计算显示的孔隙水压力分界线确定了稳定渗流条件下的岸坡浸润线。根据输出的出溢流速矢量 (FLVEL) 可知 (图 4 (c), (d)), 防洪水位条件下出溢点位于坡脚和河道水位附近; 而在施工期水位时, 位于坡脚的最大出溢流速增加了 10 倍以上。

进一步地, 按照细粒土渗透变形 (流土型) 的临界水力比降^[7]:

$$J_{cr}=(G_s-1)(1-n) \quad (1)$$

可得黏土包坡层的临界比降为 0.97。根据数值计算结果可知, 黏土包坡在运行水位时的实际渗透比降平均值为 0.3, 最大值为 0.58; 在施工期水位时平均值 0.41, 最大值达到了 1.8, 位置靠近黏土包坡上部。进一步地, 补充了不设置黏土包坡时岸坡渗流特征分析 (计算结果如图 4 (e)), 并将计算渗流结果统计在表 2 中, 临界比降计算表明, 施工期水位可能发生局部渗透破坏。设置黏土包坡虽然对岸坡浸润线的影响

不大, 但改变了一级马道下方临河岸坡的局部渗流场, 产生了 “侧向绕渗” 的作用。

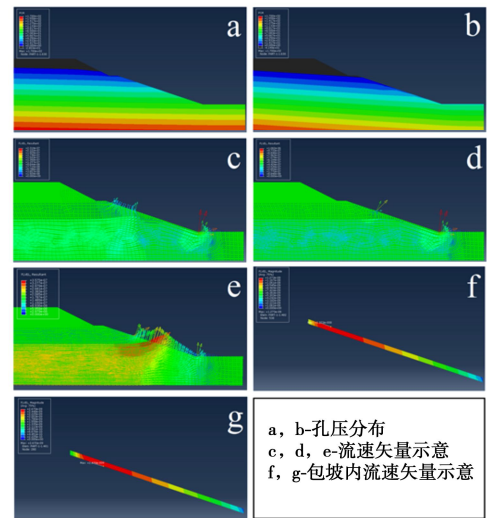


图 4 黏土包坡层的流速矢量 (FLVEL) 示意

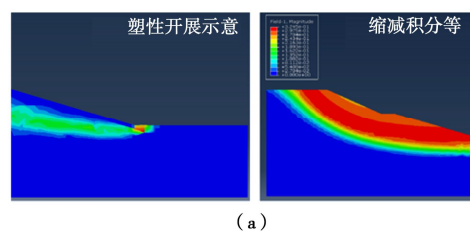
Fig. 4 Flow vectors of clay layer

表 2 设置黏土包坡的岸坡渗流计算结果

Table 2 Calculated results of seepage of bank slope with clay

| 编号 | 计算工况 (水位/m) | 计算平均水力比降 | 计算最大水力比降 | 临界水力比降 |
|----|--------------|----------|----------|--------|
| #1 | 5.63 | 0.30 | 0.58 | 0.97 |
| #2 | 3.97 | 0.35 | 0.91 | |
| #3 | 2.40 | 0.41 | 1.80 | |
| #4 | 2.40(不设黏土包坡) | 0.48 | 0.77 | |

进一步分析河道岸坡稳定性, 除上述渗流工况外, 增加一种河道无水 (0 m) 的极端工况, 用以考察黏土包坡对岸坡稳定性的影响程度。计算时通过分析每增量步对应的坡顶位移变化, 当位移出现明显拐点时, 此时对应的强度折减系数即为边坡的稳定性系数。图 5 为各种工况的计算结果, 可以看出, 岸坡安全系数随河道水位下降而降低。另一方面, 在考虑渗流影响下, 黏土包坡的设置并不能提升边坡稳定性系数, 反而降低了边坡稳定性。造成这一现象的原因, 一是黏土包坡仅是浅表层防护结构, 并没有加固抗滑作用。二是在渗流作用影响下, 由于黏土包坡的隔水作用, 增加了黏土包坡层附近的渗透作用。虽然边坡在最不利工况下仍有一定的安全储备, 但综合考虑稳定性、防渗透破坏能力, 仅设置黏土包坡显然不是一个较为理想的选择。



(a)

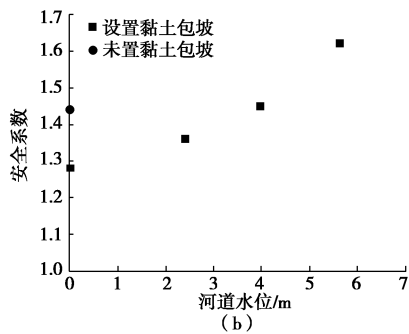


图 5 设置黏土包坡的岸坡边坡稳定计算结果

Fig. 5 Calculated results of stability of bank slope with clay

4 讨 论

针对黏土包坡设置后岸坡存在的工程隐患, 在前述计算基础上, 通过调整材料物理力学属性, 在一定工况下对护坡方案进行数值分析、优化。围绕黏土包坡设置后引起的侧向绕渗现象, 从减小绕渗作用、消减局部渗透力出发, 提出以下优化方案:

(1) 坡脚增设袋装碎石脚

在设置黏土包坡的基础上, 增设坡脚排水结构, 修改数值计算模型进行分析优化效果。将岸坡坡趾设置为常用的袋装碎石脚, 初步考虑宽度为 60 cm。图 6 给出了施工期水位工况下增设碎石脚的岸坡渗流场及相应边坡稳定性分析结果, 表 3 中列出了相关工况下的渗流计算结果。可以看出, 该工况下最大出逸点位于边坡坡趾处, 最大流矢为 1.27×10^{-6} m/s, 渗透坡降计算最大值为 0.31, 小于该土层的临界水力坡降的一半。因此, 增设袋装碎石脚对于消减渗透破坏隐患有积极效果。根据岸坡稳定性分析结果, 相比不设置碎石脚的情形, 坡脚设置碎石脚后, 坡内渗透力(强度折减计算中表现为单元节点体力), 降低碎石脚具有“卸压”功能, 使得边坡稳定性提高至 1.37。

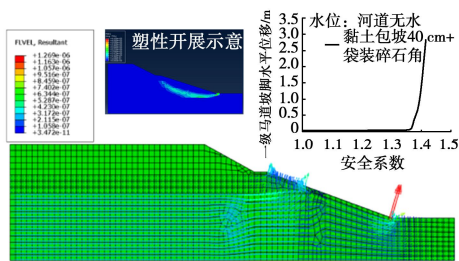


图 6 设置黏土包坡的岸坡边坡稳定计算结果

Fig. 6 Calculated results of stability of bank slope with clay

上述分析可知, “黏土包坡+袋装碎石脚”方案有利于降低岸坡渗透破坏风险, 提升岸坡稳定性。在此基础上, 考察该方案下包坡厚度对岸坡防渗和稳定性的影响。计算中设置 30, 40, 60, 1 m 4 种包坡厚度, 工况仍为施工期水位 (2.40 m)。计算结果如表 4 所示。可以看出, 设置碎石脚后, 增厚黏土包坡有利于岸坡防渗, 而增厚对边坡稳定性的影响并不显著。

综合经济性和施工难易程度, 建议原型工程的“黏土包坡+袋装碎石脚”护岸方案中黏土包坡在保证压实度的基础上, 理论厚度以不低于 40 cm 为宜。

表 3 增设袋装碎石脚的岸坡渗流计算结果

Table 3 Calculated results of seepage of bank slope with gravel

| 编号 | 计算工况 (水位/m) | 计算平均水力比降 | 计算最大水力比降 | 临界水力比降 |
|----|--------------|----------|----------|--------|
| #1 | 5.63 | 0.30 | 0.58 | |
| #2 | 3.97 | 0.35 | 0.91 | 0.97 |
| #3 | 2.4 | 0.41 | 1.80 | |
| #4 | 2.40(不设黏土包坡) | 0.48 | 0.77 | |

表 4 不同黏土包坡厚度的岸坡稳定性计算结果

Table 4 Calculated results of seepage of bank slope with different thicknesses of clay layer

| 编号 | 黏土包坡厚度/cm | 稳定性系数 | 计算最大水力比降 |
|----|-----------|-------|----------|
| #1 | 30 | 1.57 | 2.01 |
| #2 | 40 | 1.56 | 1.80 |
| #3 | 60 | 1.59 | 1.57 |
| #4 | 100 | 1.61 | 1.42 |

(2) 坡面增设横向排水管

另一种方案是在黏土包坡护岸面上增设横向排水管。通过 3D 建模分析设置排水措施后的稳态边坡渗流特性。3D 精细化建模如图 7 所示, 其中 X—Y 方向与现场实际尺寸相同, Z 方向即沿河道方向取 10 m, 坡趾的排水管通过弹性模量和渗透系数确定, 纵横方向每间隔 100 cm 布置。包坡厚度取 30 cm。排水管共 3 排, 每排设置 10 根, 底层排水管距坡趾的水平距离为 80 cm。计算时河道水位仍取施工期水位。

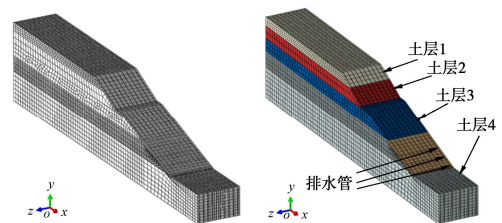


图 7 设置黏土包坡的岸坡边坡稳定计算结果

Fig. 7 Calculated results of stability of bank slope with clay

图 8 (a) 给出了模型稳态渗流条件下的浸润线以及出流 (FLVEL) 示意。计算结果表明, 设置排水管后排水管内流速较大, 在水位边界条件为 7 m 时, 稳态情形下最大流速达 1.58×10^{-3} cm/s, 黏土包坡层内的孔隙流速显著降低, 最大流速仅为 4.45×10^{-9} cm/s。由图 8 (b) 可以看出, 包坡内渗透比降显著下降, 有利于防止地下水位过高引起的对黏土包坡层的冲刷、掏蚀破坏。

另一种方案是将黏土包坡替换为“土工布+长条袋装砂+连锁块”的护岸形式。该方案拟采用 30 cm 厚、水平长度 1.62 m 的袋装砂护坡对黏土包坡进行原位替换, 并增设连锁块至一级马道处。袋装砂的主要物理力学指标: 黏聚力为 280 kPa, 内摩擦角为 32° , 重度为 17 kN/m^3 。连锁块的主要物理力学指标设为: 黏聚力为 450 kPa, 内摩擦角为 40° , 重度为 20 kN/m^3 。

图9为施工期水位工况下渗流场特征数值计算结果。该工况下最大出逸点位于边坡坡趾处,最大出逸点位于土层2和土层3分层处,最大出溢流速为 5.46×10^{-7} m/s,渗透坡降计算最大值为0.13,小于该土层的允许水力坡降0.45。该方案下边坡稳定计算得到的安全系数为1.39。相比较而言,“土工布+袋装砂+连锁块”是更利于防止渗透破坏的形式,但每平方米造价较“黏土包坡+袋装碎石脚”高4倍左右,同时,在流速较快的河道使用时需防止连锁块边缘翻卷、倾覆失稳。

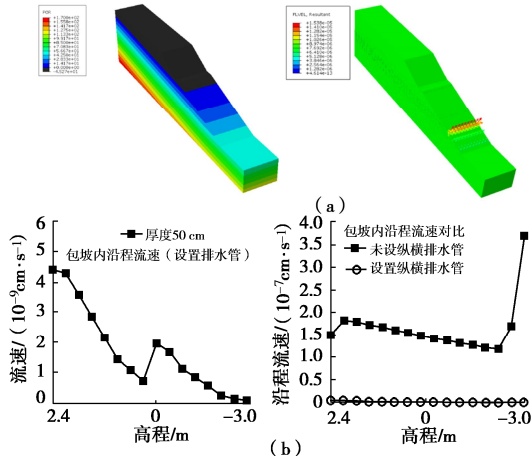


图8 设置黏土包坡的岸坡稳定计算结果

Fig. 8 Calculated results of stability of bank slope with clay

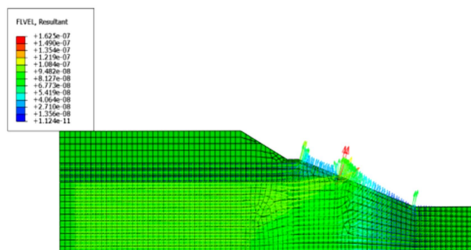


图9 “土工布+袋装砂+连锁块”方案下的岸坡渗流示意
Fig. 9 Seepage pages of bank slope under scheme of "geotextile + bagged sand + interlocking block"

5 结 论

以提升岸坡防渗和稳定性为目的,采用流固耦合数值计算方法分析了江苏新孟河河道工程设计推荐黏土包坡护岸结构的渗透和稳定特性进行了,提出了结构优化措施。

(1) 岸坡渗流分析表明,设置黏土包坡后坡面将产生“侧向绕渗”作用,局部流速过大,有引起渗透变形的隐患。岸坡稳定性分析表明,黏土包坡的设置增加了局部渗透力,不利于提升边坡安全系数。

(2) 在黏土包坡护岸结构处增设袋装碎石脚,可以较大程度地降低黏土包坡层内流速及坡面局部渗透力,且经济性更优;现场施工条件允许的情况下,

建议适当优化黏土包坡层厚度。在黏土包坡护岸结构上增设坡面横向排水管,有利于提高岸坡长期稳定性。

综上,在高地下水位地区选择黏土包坡为护岸形式时,应充分考虑渗流作用对岸坡渗透破坏及稳定性的影响,根据工程具体情况选用不同的优化方案。

参考文献:

- [1] 关春曼, 张桂荣, 程大鹏, 等. 中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 75 - 81. (GUAN Man-chun, ZHANG Gui-rong, CHENG Da-peng, et al. Development trends and the hot topics of ecological revetment technology for medium and small rivers[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 75 - 81. (in Chinese))
- [2] THOMPSON D M. Long-term effect of instream habitat-improvement structures on channel morphology along the blackledge and Salmon Rivers, Connecticut, USA[J]. Environmental Management, 2002, 29(2): 250 - 265.
- [3] 张幸农, 陈长英, 应强, 等. 渐进式崩岸基本特征及其形成原因[J]. 泥沙研究, 2012(3): 46 - 50. (ZHANG Xing-nong, CHEN Chang-ying, YING Qiang, et al. Basic characteristics and cause of gradual riverbank caving[J]. Journal of Sediment Research, 2012(3): 46 - 50. (in Chinese))
- [4] 朱海生, 陈健, 张桂荣, 等. 生态袋挡墙护岸结构设计及其力学性能变化[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 48 - 55. (ZHU Hai-sheng, CHEN Jian, ZHANG Gui-rong, et al. Structural design of retaining wall with ecological geo-textile bags and its changes in mechanical properties [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 48 - 55. (in Chinese))
- [5] 雷国辉, 郑强. 瑞典条分法剖析引发的有效应力和渗流概念问题[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 667 - 676. (LEI Guo-hui, ZHENG Qiang. Issues on concepts of effective stress and seepage force arising from anatomizing Swedish slice method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 667 - 676. (in Chinese))
- [6] 陈曦, 刘春杰. 逐步完善的非饱和土边坡稳定性有限元分析方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 387 - 391. (CHEN Xi, LIU Chun-jie. Staged development of finite element methods for stability of unsaturated soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 387 - 391. (in Chinese))
- [7] 水利水电工程地质勘查规范: GB50487—2008[S]. 2008. (Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower: GB50487—2008[S]. 2008. (in Chinese))