

水力插板透水丁坝在新疆多沙河流上 优越性的初步研究

刘国起, 李玉建, 侍克斌, 周庆庆, 任志

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:在前人对透水丁坝和水力插板研究的基础上,首次提出将透水丁坝与水力插板技术相结合,形成水力插板透水丁坝新型护岸结构。通过运用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件对水力插板透水丁坝与水力插板实体丁坝、井柱桩透水丁坝的水力特性进行数值模拟比较分析。结果表明:水力插板透水丁坝通过调水调沙的作用在自身防护和保护堤岸两方面均优于水力插板实体丁坝;水力插板透水丁坝比井柱状透水丁坝在缓流促淤、保岸护堤方面效果更好。

关键词:透水丁坝;水力插板透水丁坝;调水调沙;防洪护坦;多沙河流

中图分类号:TV863

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)01-0122-05

Probe on superiority of hydraulic flashboard permeable spur dike in multi-sediment river of Xinjiang

LIU Guoqi, LI Yujian, SHI Kebin, ZHOU Qingqing, REN Zhi

(College of Hydraulic and Civil Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: On the basis of previous study about spur dike and hydraulic flashboard, the paper combined permeable spur dike with hydraulic flashboard technology to form a new revetment structure of hydraulic flashboard and permeable spur for the first time. Through the use of computational fluid dynamics software, it carried out the numerical simulation on the hydraulic characteristics of hydraulic flapper permeable spur dike and entity dike, permeable spur dike of well piling. The results showed that 1) through the action of water and sediment regulation, hydraulic flashboard permeable spur in the two fields of self-protection and embankment protection is superior than hydraulic flashboard entity spur dike; 2) hydraulic flashboard permeable spur dike is superior than well columnar permeable groin in reducing flow velocity, promoting sedimentation, protecting dike and shore areas.

Key words: permeable spur dike; hydraulic flashboard permeable spur dike; water and sediment regulation; desert sandy river

1 研究背景

近几年,新疆在不同地质河床中修建了各种型式的护岸工程,从已实施的堤防工程的寿命及防洪效益分析可知,传统的护岸建筑物在砂砾石、黏性土及砂壤土等抗冲能力相对高的河床上修建的堤防使用寿命较长,防洪效益显著^[1]。然而在粉细砂河床或者软土地基中修建的堤防工程(特别是位于塔里木河流域下游段),河床抗冲强度低、易液化、不宜承重,因此

造成传统的护岸工程不仅施工速度慢,工程造价高,稳定性差,平时维护工作量大,而且在突发洪水到来时极易遭到破坏,危急时刻在堤坝上进行防洪抢险也相当困难,无法充分发挥防洪护岸、稳定河势的作用。因此,通过分析新疆沙漠段多沙河流的洪灾成因、防洪体系现状和存在的问题,均表明研究更安全、更经济、更耐久的新型“生态型”护岸建筑物,以适应新疆沙漠段多沙河流的河型、水沙特性、河道演变规律及洪灾特点,是一项十分紧迫的任务。

收稿日期:2013-10-29; 修回日期:2014-01-06

基金项目:新疆水利水电工程重点学科基金资助(xjzdxk-2002-10-05);新疆维吾尔自治区高校科研计划科学研究重点项目(20130522230200640)

作者简介:刘国起(1986-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事内陆河治理与防洪工程研究工作。

通讯作者:李玉建(1967-),男,山东德州人,副教授,主要从事内陆河治理与防洪工程研究工作。

2 水力插板透水丁坝的提出

针对新疆以粉细砂、软土地基为主的沙漠段多沙河流的特点,必须找到一种新型护岸建筑物,在这种特殊地质的河床中不仅能够调水调沙,稳定河势,起到护岸的作用,又能够达到堤岸安全、施工快速、工程投资少,减轻洪水对护岸的威胁。通过研究认为,透水护岸建筑物的优点在于具有调水调沙作用,能动态地调节岸滩水沙冲淤平衡,充分发挥其滞流减速作用,同时能最大限度地减少由于局部能量转换所引起的水流对河床的淘刷与下切,以“调”为主,达到与自然和谐共处的生态型护岸建筑物的目的,更符合古人“疏”胜于“堵”的治河思想。与实体整治建筑物相比,透水整治建筑物主要有以下优点:具有一定的挑流控导河势的作用,能起到减缓过坝水流流速,使泥沙在坝后沉降,能够充分利用洪水淤滩刷槽的特点,有目的地落淤造滩,工程量较小,工程投资较低;冲刷破坏小,一般为少抢险或不抢险结构;适应各种标准洪水,不与洪水争空间;不用木料和树梢,保护生态环境^[3]。所以随着学者们对透水丁坝研究的不断深入,透水丁坝其独特的优越性使它在护岸工程中得到了广泛应用。与此同时,水力插板技术在我国得到迅速发展,它是用水力喷射切割地层,将具有导向定位功能的钢筋混凝土预制板桩插入地层,并在地下通过专门的连接技术将板桩连接成各种型的整体地下连续墙。1997年以来,水力插板技术已经应用在黄河险工控制工程、松花江防洪堤坝工程、长江洪水拦蓄工程中。2011年,新疆首次尝试将水力插板技术应用在新疆叶尔羌河东河滩防洪工程和新疆叶尔羌河民生渠防洪工程中。所以经过近十几年的研究和实践表明其优势明显,防护效果显著^[4]。

因此,针对新疆沙漠段多沙河流的水沙条件、演变规律和洪灾特点,需要在透水丁坝和水力插板技术发展的基础上,将两者有效结合形成水力插板透水丁坝,其结构示意图见图1。

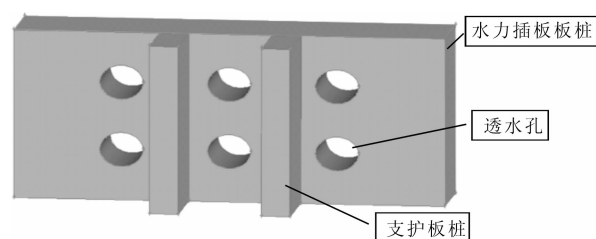


图1 水力插板透水丁坝结构示意图

研究新型水力插板透水丁坝的冲淤特性和护岸效果,为这项新技术在新疆塔里木河流域粉细砂地区河道治理与防洪工程中的应用提供理论依据,为在新疆粉细砂地区河道上修建透水整治建筑物和永久性护岸工程探索新途径。

3 水力插板透水丁坝的优越性

水力插板透水丁坝工程实质上是一种新型桩基护岸工程,由于其独特的构造形式和技术特点,使它与目前国内广泛采用的井柱桩透水丁坝、门架式水力插板桩和灌注桩透水丁坝相比,具有多方面的优势:

(1)桩板进入地层速度快,工期短。水力插板在高压水流对地层进行喷射切割的状态下能以很快的速度进入地层,施工建设速度及方法的优势非常明显,同等条件下施工周期缩短70%以上。松花江防洪堤坝选用水力插板的宽度为1.66~2.6 m,施工过程中进桩速度达到2 m/min,一套设备一天建设堤坝136 m,施工速度方面的优势为提高工程质量、缩短工期和降低工程造价创造了必要条件^[4]。

(2)整体连接性能好,基础入地深度大,稳定性强。根据工程的需要,水力插板可通过纵向、横向、侧向以及注浆固板等一整套特殊的连接方式,使整个工程地下基础连接成一个牢固的整体,坝后有支护,连接强度可以完全满足工程设计的需要;基础入地深度完全可以满足工程建设的实际安全需要,所以这一技术特征从根本上解决了水力插板透水丁坝溃堤垮坝、坝基稳定性差的问题。

(3)透水结构型式多样化,桩板可工厂化预制。①水力插板本身的结构型式多样化,根据工程实际需要设计成各种样式的桩板结构,提前在工厂预制成型的钢筋混凝土板,工程可由不同的桩板组合而成,满足实际需求。②水力插板透水丁坝透水结构型式多样化,为了达到最优防护效果,设计时应以丁坝冲刷规律为基础、结合丁坝的水毁机理,综合考虑透水形式、透水率、布置角度、丁坝长度、结构组合型式等影响参数,组合成多种结构型式可供选择。

(4)能满足特殊环境下的施工需求。施工现场的自然环境比较复杂,例如陆地、沼泽地、水面等,给传统的施工技术带来了困难,工程造价也提高很多,而水力插板技术实现了工厂化、预制化生产,同时具备特殊的机械设备,所以能够满足多种复杂环境下施工的需求。

(5)工程造价低。由上述可知,水力插板透水丁坝在施工速度方面、结构形状的多样化、桩板的工

厂化生产、合理的设计、施工方案等优势成为降低该新型护岸建筑物成本的关键所在。以建设在黄河险工段上的挑流堤坝为例,按传统模式建设的挑流堤坝每延米长需要资金 2 万元,堤坝根基深度 2m。在同一地区用水力插板建设的挑流堤坝每延米 7 000 元,堤坝根基深度 12 ~ 15 m,前者建成之后每年都要向水中投入毛石进行基础加固,维护费用很大,后者不需要进行这项工作,减少了防洪抢险的任务,经济效益和社会效益都非常显著^[4]。

4 水力插板透水丁坝数值模拟

随着计算数学的不断发展,基于其简单性、易操作性等优点,数值模拟已作为重要手段应用于护岸建筑物冲刷机理研究中。为了验证水力插板透水丁坝和其他丁坝的优越性,采用 CFD 软件进行了数值模拟仿真分析,为实验室模型试验研究打下基础,并相互补充。

4.1 数值模拟

4.1.1 数学模型 基本控制方程为不可压缩流体的连续方程和动量方程:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \tau_{ij} \right) + F_{bi} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right)$$

式中: ρ 为流体密度; u 为流速矢量在 x, y, z 向的分量; $\mu_t = \rho C_\mu K^2 / \varepsilon = \rho V_t$ 为紊动动力黏性系数; P 为压强; $\Gamma = \mu + \mu_t$ 为广义黏性系数; τ_{ij} 为雷诺应力; F_{bi} 为质量力; k 为紊动能; ε 为紊动能扩散率; C_μ 为经验常数; δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号(当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$)。

4.1.2 数值计算方法 基本控制方程组采用有限体积法来离散求解,网格为嵌套式交错网格。采用 VOF 模型体积率函数表示流体自由面的位置和流体所占的体积,这是一种简单而有效的处理复杂自由表面的方法,适用于两种或多种互不穿透流体间界面的跟踪计算,其基本思想是:定义函数 $\alpha_a(x, y, z, t)$ 和 $\alpha_w(x, y, z, t)$ 分别代表计算区域内水和气所占计算区域的体积分。为保证数值离散精度及计算稳定性,方程中的对流项采用满足系数一致性的

二阶 QUICK 算法。扩散项采用中心差分格式,速度与压力的耦合采用 SLIPLE 算法求解,收敛准则为所有独立变量的最大无量纲残余小于 10^{-3} 。

4.1.3 边界条件及初始条件 在水力插板透水丁坝入口、出口、自由水面及壁面处应给定边界条件。入口给定初始流速和紊动动能及耗散率值,出口为变量零梯度假定。自由水面处理采用刚盖假定为对称面条件。对壁面则采用壁函数解法以避免在近壁处对细网格划分的要求。初始条件采用求解忽略刚性影响的连续及动量方程的方式提供,以节约计算时间。

4.2 模拟验证

上述泥沙模型首先采用邓邵云等实验结果加以验证^[6]。该实验用水槽长 60 m,宽 10 m,水深 2 m,丁坝高 2m,顶面与水面齐平,属非淹没丁坝,丁坝长 3 m,宽 1 m,与水流流向垂直于,与右水槽边壁正交布置,水流由左流向右,属均匀来流,流速为 1 m/s,水流垂直于入口边界(左边界),水槽左右边壁与水流流向平行,三维模型的网格点在 X、Y 和 Z 的方向为 $60 \times 13 \times 8$,到丁坝附近网格逐渐加密,最小网格体为 0.013 m^3 ,最大网格体积为 0.0425 m^3 ,网格划分见图 2。

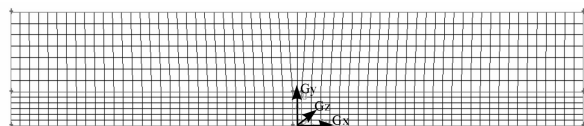
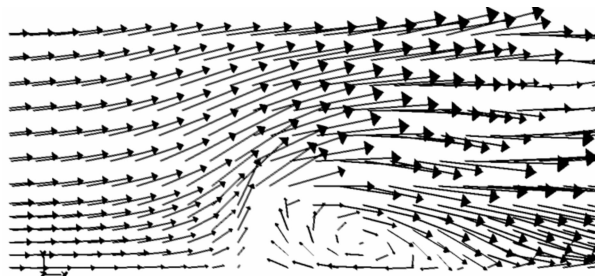
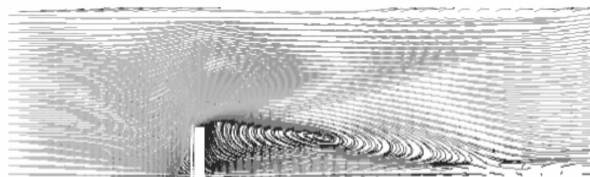


图 2 丁坝网格划分示意图

计算模拟时,所有条件和试验条件相同,实体丁坝作用区水流流速场模拟计算结果与实验结果的比较见图 3(a)、(b);丁坝作用区河槽底面相对压力模拟结果见图 4。



(a) 实体丁坝流速场数值模拟结果



(b) 水力插板实体丁坝流速场模型试验结果

图 3 实体丁坝流速场的数值模拟与模型试验结果图

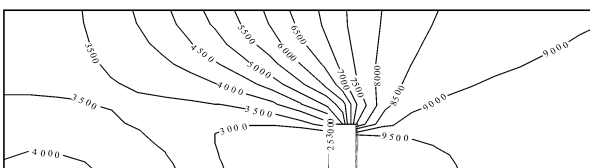


图 4 实体丁坝河槽底面相对压力模拟结果(Pa)

通过以上对比可知:①数值模拟计算与模型试验的实体丁坝流速场基本一致,水流遇坝绕流,坝后均形成回流区;②根据透水丁坝流速场规律可知:由于丁坝的阻挡以致上游水面壅高,迫使水流绕流,造成坝头单宽流量增大,流速增大。而图 4 模拟结果正好符合能量方程中流速与压强的关系,相对压力大的区域为壅水区,相对压力小的区域为跌水区,水流结构基本相同。模型的计算结果与实验相当吻合,所以比较结果表明该数学模型可取,计算方法正确,数值模拟结果可靠。

4.3 水力插板透水丁坝与实体丁坝的比较

数值模拟计算采用邓邵云概化模型进行验证,流速为 1 m/s,其他条件相同,分别模拟水力插板透水丁坝在 30% 透水率和 0% 透水率(实体丁坝)流速场的异同,结果见图 5,图 3(b),上、下游断面 1 m 处表流速度见图 6。

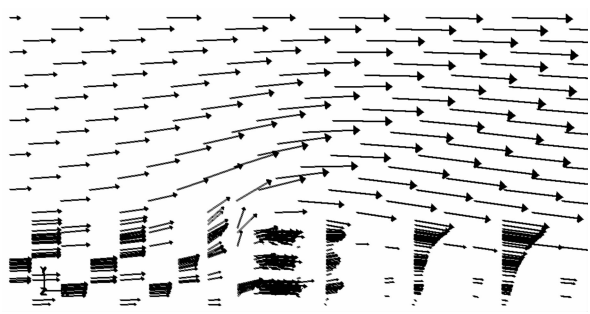
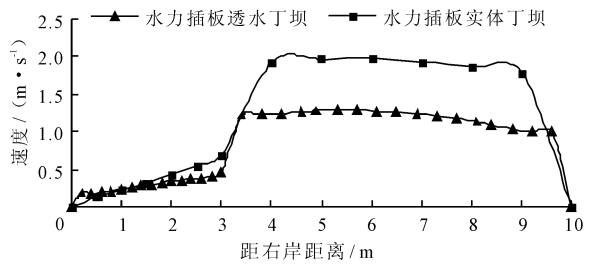


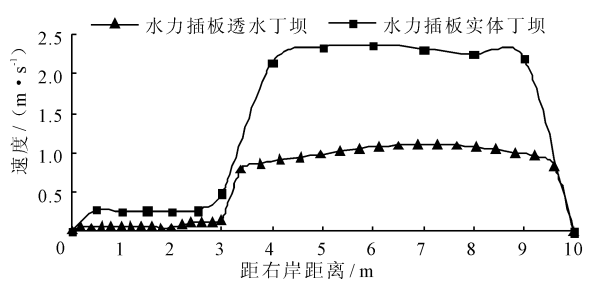
图 5 水力插板透水丁坝数值模拟的流速场分布图

由图 5、图 6 可以看出:①水力插板透水丁坝与水力插板实体丁坝在丁坝作用区流速场的结构形态明显不同。水力插板透水丁坝可通过坝体自身透水,其水流与坝后水流相互碰撞,水流流向下游无明显回流区;而水力插板透水丁坝实体丁坝坝后出现明显的回流区。②水力插板透水丁坝作用区的流速低于水力插板实体丁坝作用区的流速。由于水力插板透水丁坝具有一定的透水率,使得部分水流可通过坝体流过,并且和主流产生的回流相互作用,通过相互碰撞减少能量,从而在透水丁坝后面形成相对静水区,起到缓流促淤的作用,如图 6(a) 所示在丁坝作用区上游流速基本相同,然而经过水力插板

透水丁坝之后速度减少为原来的 30%。③水力插板透水丁坝坝头部位的流速低于水力插板实体丁坝坝头部位的流速。水力插板透水丁坝本身透水的作用分担了水流,减少了来水的阻力,同时坝头部位流量相应减少,流速降低,根据流速与挟沙力的关系,其坝头的冲刷深度将会小于实体丁坝^[7],如图 6(b) 所示水流通过实体丁坝速度后主槽流速最大值增长 0.39 m/s,约为坝前流速的 20%,而水流通过透水丁坝后主槽流速最大值降低 0.18 m/s,约为坝前流速的 14.3%。表明水力插板透水丁坝通过调水调沙的作用在自身防护和保护堤岸两方面均优于实体丁坝。



(a) 水力插板透水丁坝与实体丁坝上游 1m 处横断面表流速度分布图



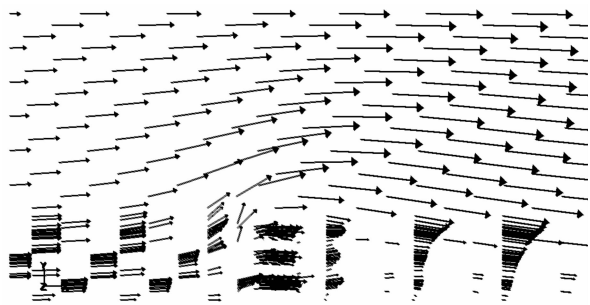
(b) 水力插板透水丁坝与实体丁坝下游 1m 处横断面表流速度分布图

图 6 水力插板透水丁坝与实体丁坝表流速度分布图

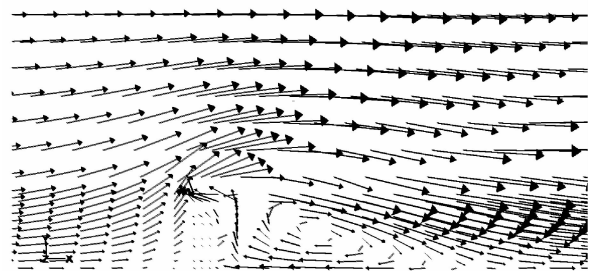
4.4 水力插板透水丁坝与井柱桩透水丁坝的比较

水力插板透水丁坝与井柱桩透水丁坝在宏观上的比较:①两者均是在透水丁坝的基础上发展起来,只是透水结构型式不同,前者可以因地制宜选用多种透水型式、位置、透水率等灵活结合达到最佳效果,而后者只局限于矩形透水孔,所以后者只是前者众多结构中的一种结构型式。②独特的水力插板技术使得水力插板透水丁坝施工速度快、适应多种复杂环境作业、抢险救灾迅速、工程造价低,这使得水力插板透水丁坝优势更加明显。

数值模拟选用邓邵云的概化模型进行验证,流速为 1 m/s,其他条件相同,分别模拟透水率均为 30% 的条件下水力插板透水丁坝与井柱状透水丁坝流速场的异同,结果见图 7,断面表流速度分布见图 8。

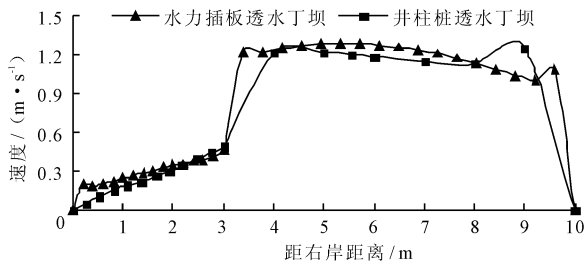


(a) 水力插板透水丁坝流速场分布图

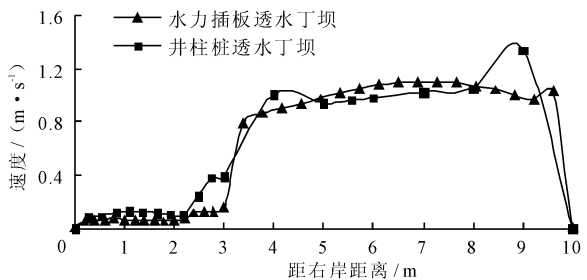


(b) 井柱状透水丁坝流速场分布图

图7 水力插板与井柱状透水丁坝流速场分布图



(a) 水力插板与井柱桩透水丁坝上游1 m处横断面表流流速分布图



(b) 水力插板与井柱桩透水丁坝下游1 m处横断面表流流速分布图

图8 水力插板与井柱桩透水丁坝在上、下游1 m处的横断面流速分布图

由图7和图8可以看出:①水力插板透水丁坝与井柱桩透水丁坝在丁坝作用区的水流结构基本相同,均是通过坝体自身孔洞过水,并且和主流产生的

回流相互作用。但有略微差异,前者流体中过坝水流顺应主槽流体向下流,而后者产生明显的小范围回流。②水力插板透水丁坝与井柱桩透水丁坝在流速方面差异:坝前总体流速基本相同,而在坝后丁坝作用区前者速度约为后者的50%,表明水力插板透水丁坝降低流速达到缓流促淤、保岸护堤的效果更加显著。

5 结 语

针对新疆沙漠段多沙河流的水沙条件、演变规律和洪灾特点,研究了透水丁坝和水力插板技术的特点,将两者有效结合形成水力插板透水丁坝新型护岸建筑物,采用CFD软件对水力插板透水丁坝与水力插板实体丁坝、井柱状透水丁坝进行了比较分析。结果表明:①水力插板透水丁坝通过调水调沙的作用在自身防护和保护堤岸两方面均优于水力插板实体丁坝;②水力插板透水丁坝比井柱状透水丁坝在缓流促淤、保岸护堤方面效果更好,同时它还有可提升的空间,有待进一步研究。综合水力插板技术带来的优势,使得水力插板透水丁坝成为更安全、更经济、更和谐的生态型护岸建筑物。与此同时此次数值模拟计算也为以后的物理模型试验提供了参考依据。

参考文献:

[1] 库尔班·依明,阿里木江胡达拜地. 水力插板技术在新疆粉细沙河床防洪工程中的应用[J]. 水利科技与经济,2012,18(9):92-93.

[2] 李玉建,侍克斌,周峰. 游荡型河道透水整治建筑物研究综述[J]. 人民黄河,2002,24(11):15-17.

[3] 李晓庆. 新疆河流护岸工程冲刷机理及防冲结构型式研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2006.

[4] 何富荣,程义吉,许国辉. 水力插板桩成套技术研究与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.

[5] Abam T K S. Control of channel bank erosion using permeable groins[J]. Environmental Geology, 1993,22(1):21-25.

[6] 邓绍云,王义刚,邱清华. 非淹没丁坝三维绕流数值模拟[J]. 水运工程,2010(6):90-94.

[7] 周银军,刘焕芳,何春光,等. 透水丁坝局部冲淤规律试验研究[J]. 水利水运工程学报,2008(1):57-60.