

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 06. 015

静冰压力对铰链式护坡系统作用的低温模型试验

韩 雷¹,张 滨¹,程卫国²

(1. 黑龙江省水利科学研究院,黑龙江 哈尔滨 150080 ;2. 江苏优凝舒布洛克有限公司,江苏 南京 210005)

摘要 通过低温模型试验模拟了冰盖的形成过程,测试了静冰压力、铰接块位移、冰盖厚度、温度等,建立了这些物理量与时间的关系。根据静冰压力的发展过程、变化原因评价了试验与自然环境的相似性。根据铰链式护坡系统在静冰压力作用下沿坡面位移变形和冰盖融化后的残余变形,评价了该护坡系统的稳定性以及该护坡系统作为柔性护岸结构适应变形的能力,分析了静冰压力、铰接块位移的发生、发展、消失过程和变化原因。试验结果表明:静冰压力作用下铰链式护坡系统沿坡面位移变形很小,冰盖融化后该护坡系统的残余变形也很小,铰链式护坡系统在静冰压力发生、发展和消失的过程中,能够适应岸基变形而不被破坏。

关键词 铰链式护坡系统 静冰压力 位移 稳定性

中图分类号 :TV861 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)06-0058-05

Low-temperature model test of static ice pressure on articulating slope protection system//HAN Lei¹, ZHANG Bin¹, CHENG Wei-guo²(1. Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China ;2. Jiangsu Usablock Co., Ltd., Nanjing 210005, China)

Abstract :The formation of ice cover was simulated with a low-temperature model test. The static ice pressure, the displacement of the articulating concrete block (ACB), the thickness of ice cover, and the temperature were tested, and the relationships between these physical properties and time were established. The comparability test and nature were evaluated based on development of static ice pressure and its reason for changing. The stability adaptability to deformation of the slope protection system was evaluated with the displacement deformation along the slope of the articulating slope protection system under the static ice pressure and the residual deformation of ice cover after thawing. The course of occurrence, development, disappearance and reason for change of the static ice pressure and the articulating concrete block displacement were analyzed. The results show that the displacement deformation along the slope of the articulating slope protection system under static ice pressure is very small. The articulating slope protection system can ensure that the deformation of the shore-base doesn't lead to failure.

Key words :articulating slope protection system ;static ice pressure ;displacement ;stability

混凝土铰接块是一种连锁型预制高强混凝土块,与土工布组成复合铺面结构,可用于防止由于冲刷引起的土壤流失。该护坡系统是由一组尺寸、形状和质量一致的预制混凝土块用一系列绳索相互连接而形成的连锁型矩阵,下面铺设土工布反滤。施工时,在工厂完成复合体的制作,整体运至施工现场,用吊车吊运至坡面并整体铺设。混凝土铰接块的主要类型有 2 种:中间开孔式和中间封闭式。2 种类型的铰接块都有不同的尺寸和厚度,可适应各种水流情况。笔者通过低温模型试验模拟了冰盖的形成过程,测试了静冰压力、铰接块位移、冰盖厚度、温度等,建立这些物理量与时间的关系,并根据静冰压力的发展过程、变化原因评价了试验与自然

环境的相似性,根据铰链式护坡系统在静冰压力作用下沿坡面位移变形和冰盖融化后的残余变形,评价了该护坡系统的稳定性以及该护坡系统作为柔性护岸结构适应变形的能力,分析了静冰压力和铰接块位移的发生、发展、消失过程和变化原因。

1 试验目的与试验内容

1.1 试验目的

在寒冷地区的冬季,铰链式护坡系统不仅要承受浮力、水流拖曳力等,还要承受地基土冻胀力、冰盖产生的静冰压力等外力。在寒冷地区,许多护岸结构在静冰压力作用下会产生爬坡等位移变形,静冰压力超过护岸材料的抗压极限时会导致护岸结构

破碎。因此,进行室内低温环境下物理模型试验的目的主要是检验寒冷环境中铰链式护坡在静冰压力作用下的稳定性^[1]。

1.2 试验内容

按照模型比尺确定试验降温速率和试验时间等试验参数,并通过试验实测的环境温度和冰盖厚度等数据验证模型与原型的相似性,通过试验实测的坡面变形和静冰压力等数据分析和评价铰链式护坡在静冰压力作用下的稳定性。

2 试验设计

2.1 相似判据的推导

由于低温冻土模型试验相似理论比较成熟,而冻土中水冻结成冰的过程与水体中的结冰过程相似,这里通过冻土的相似判据推导过程来说明低温模型冰试验的相似性。

根据热传导理论,对于二维、均质、各向同性瞬态温度场问题,冻土体热状况可用带有相变的热传导方程来描述,冻土体满足的控制微分方程(范定方程)^[2]如下:

a. 在融区(Ω_u)内

$$\begin{cases} a^+ \left(\frac{\partial^2 t^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t^+}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial t^+}{\partial T} \\ h_0 < y < h(x, T) \end{cases} \quad (1)$$

$$a^+ = \frac{\lambda^+}{cp}$$

式中: t^+ 为融土温度; $h(x, T)$ 为融化深度; x, y 为土中坐标,横向为 x 轴,深度方向为 y 轴; T 为时间; a^+ 为融土导温系数; c 为相似常数; λ^+ 为融土的导热系数; h_0 为融区的上界。

b. 在冻区(Ω_f)内

$$\begin{cases} a^- \left(\frac{\partial^2 t^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t^-}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial t^-}{\partial T} \\ h(x, T) < y < h_c \end{cases} \quad (2)$$

$$a^- = \frac{\lambda^-}{cp}$$

式中: t^- 为冻土温度; a^- 为冻土导温系数; λ^- 为冻土的导热系数; h_c 为冻区的下界。

c. 边界条件

$$\begin{cases} t^+ \Big|_{y=h_0} = \varphi^+(x, y) \\ t^- \Big|_{y=h_c} = t_c \\ \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \pm \infty} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

d. 衔接条件

$$t^+ = t^- = t^*$$

$$\lambda^- \left(\frac{\partial t^-}{\partial y} - \frac{\partial t^-}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \lambda^+ \left(\frac{\partial t^+}{\partial y} - \frac{\partial t^+}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = Q \frac{\partial h}{\partial T} \quad (4)$$

式中: t^* 为相变温度; Q 为单位体积水的潜热。

e. 初始条件

$$t_{T=0} = \varphi^-(x, y) = t_0 \quad (5)$$

应用积分类比法进行冻土热工模型的相似分析,根据相似理论则可得到相似指标

$$\pi_1 = \frac{l^2}{aT} \quad \pi_2 = \frac{Ql^2}{\lambda tT}$$

式中: l 为几何尺寸; a 为导温系数; λ 为导热系数; t 为温度。

进一步分析可知

$$\begin{aligned} (\pi_1)_p &= (\pi_1)_m & (\pi_2)_p &= (\pi_2)_m \\ \frac{(\pi_1)_p}{(\pi_1)_m} &= 1 & \frac{(\pi_2)_p}{(\pi_2)_m} &= 1 \\ c_l &= \frac{l_p}{l_m} & c_a &= \frac{a_p}{a_m} & c_T &= \frac{T_p}{T_m} \\ c_Q &= \frac{Q_p}{Q_m} & c_\lambda &= \frac{\lambda_p}{\lambda_m} & c_t &= \frac{t_p}{t_m} \\ \frac{(\pi_1)_p}{(\pi_1)_m} &= \frac{l_p^2(a_p T_p)^{-1}}{l_m^2(a_m T_m)^{-1}} = \frac{(l_p l_m^{-1})^2}{(a_p a_m^{-1})(T_p T_m^{-1})} = \\ \frac{c_l^2}{c_a c_T} &= \frac{(\pi_2)_p}{(\pi_2)_m} = \frac{Q_p l_p^2 (\lambda_p t_p T_p)^{-1}}{Q_m l_m^2 (\lambda_m t_m T_m)^{-1}} = \\ &= \frac{(Q_p Q_m^{-1})(l_p l_m^{-1})^2}{(\lambda_p \lambda_m^{-1})(t_p t_m^{-1})(T_p T_m^{-1})} = \\ \frac{c_Q c_l^2}{c_\lambda c_t c_T} &= 1 \end{aligned}$$

式中: $(\pi_1)_p, (\pi_2)_p, l_p, a_p, t_p, Q_p, \lambda_p, T_p$ 分别为原型的 $\pi_1, \pi_2, l, a, t, Q, \lambda, T$; $(\pi_1)_m, (\pi_2)_m, l_m, a_m, t_m, Q_m, \lambda_m, T_m$ 分别为模型的 $\pi_1, \pi_2, l, a, t, Q, \lambda, T$; $c_l, c_a, c_t, c_Q, c_\lambda, c_T$ 分别为 l, a, t, Q, λ, T 的相似常数。

通过以上分析可得相似判据如下:

$$\frac{c_l^2}{c_a c_T} = 1 \quad \frac{c_Q c_l^2}{c_\lambda c_t c_T} = 1$$

可以看出,在 6 个相似常数中,有 4 个相似常数(基本常数)可以任意选定,2 个相似常数由相似准则导出。

试验选用原状土样,因此

$$c_a = c_Q = c_\lambda = 1$$

则上述相似判据变为

$$c_T = c_l^2 / c_t$$

如果模拟野外冻土观测场实测结果,则 $c_t = 1$,有

$$c_T = c_l^2$$

即模拟时间比尺为几何比尺的平方。

2.2 模型比尺的选择

本次试验要验证原型 0.15 m 厚混凝土铰接块护坡结构在静冰压力作用下的稳定性。模型几何比尺选为 1:10,模型试验时间比尺选为 1:100^[3]。

2.3 试验材料

a. 铰接块。铰接块采用原型材料,开孔式,长×宽×厚为 45 cm×44 cm×15 cm,如图 1 所示。

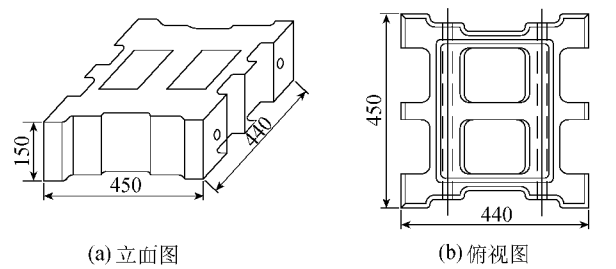


图 1 混凝土铰接块

b. 土工布。本次试验铰接块与土工布复合体中采用长丝土工布,单位面积质量为 400 g/m²。与过去常用的短丝土工布相比,长丝土工布的优点如下:力学强度较高,施工性好,有效孔径较大,透水性好。具体物理性质指标及力学指标见表 1。

c. 土壤。岸基土壤为粉质黏土,黄色,可塑,中压缩性土。具体物理性质指标及力学指标见表 2。

2.4 试验断面设计

本次试验的护坡坡比为 1:3,护坡结构为铰链式护坡。坡面铺设土工布,上压铰接块,铰接块采用原型材料,开孔式,不使用链接绳索。堤肩、坡面和堤脚均采用铰接块护砌,铰接块间按照边缘形状相互嵌合。铰接块上开孔处填入直径为 3~5 cm 的碎石。

2.5 传感器布置

a. 位移传感器。为了评价在静冰压力作用下,坡面护砌结构的变形,在堤顶和坡面上布置位移传感器,用于测量垂直于堤顶和坡面的位移数据以及护坡结构沿坡面爬坡或下滑的位移。

b. 压力传感器。为了评价冰盖对岸坡产生的静冰压力,在 10 cm 厚的冰盖范围内布置压力传感器,包括三面池壁、坡面铰接块和池中冰盖。铰接块上压力、位移传感器布置位置如图 2 所示。

表 1 400 g/m² 长丝土工布物理性质指标及力学指标

单位面积 质量/(g·m ⁻²)	单位面积质量 偏差/%	厚度(2 kPa)/ mm	等效孔径 (O ₉₀)/mm	断裂强力/(kN·m ⁻¹)		断裂伸长率/%		撕裂强力/kN		CBR 顶破 强力/kN	垂直渗透系 数/(cm·s ⁻¹)
				经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向		
402	-4	3.68	0.12	24.5	20.7	56	60	0.56	0.58	4.27	0.486

表 2 试验用土壤物理性质指标及力学指标

含水量 w/%	密度 ρ/(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	压缩模量 E _s /MPa	压缩系数 a ₁₋₂ /MPa ⁻¹	饱和度 S _r /%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	地基承载力 f _{ak} /kPa
25.1	1.93	0.806	7.0	0.26	85	24.6	13.7	180

2.6 试验时间设计

本次试验模拟一个初冰—封冻—解冻的全过程。根据松花江哈尔滨段 2007~2008 年观测资料,2007 年 11 月 12 日初冰,2007 年 11 月 15 日封冻,2008 年 4 月 8 日解冻,全过程历时 143 d^[4]。2007~2008 年度松花江哈尔滨段气温变化过程如图 3 所示。



图 2 铰接块上压力、位移传感器布置位置

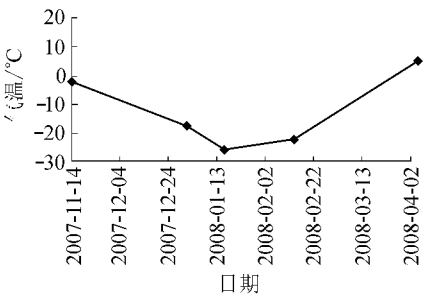


图 3 2007~2008 年度松花江哈尔滨段气温变化过程线

本次试验 c_T = 1:100。试验总历时 2.6 d,其中试验前恒温准备期 1 d,正式模型试验历时 1.6 d (38.4 h),分为降温期、低温保持期与升温期 3 个试验段。

3 静冰压力作用下的稳定性试验

3.1 试验过程

试验严格按照预先设定的降温制度进行。试验过程中实时自动采集温度、静冰压力、位移等数据。试验过程中,铰接块与冰盖冻结在一起,如图 4 所示。

3.2 试验相似性验证

a. 环境温度。本次试验环境温度严格按照设计的环境温度进行控制,实际环境温度过程线即为设计的环境温度控制过程线。为了监测水面上的环境温度,在水面上方 11 cm 处设置了 3 个温度传感



图4 铰接块与冰盖冻结状况

器,由于试验过程受水体(或冰盖)的影响,此处的温度与环境控制温度略有不同。水面上方 11 cm 处的温度实测过程线如图 5 所示。

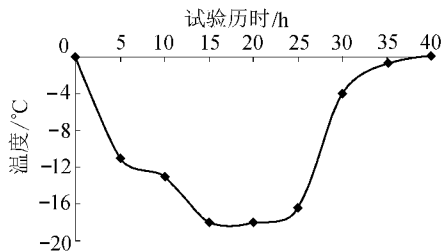


图5 环境温度实测过程线

b. 冰厚度。试验实测冰盖厚度如图 6 所示。为了进行对比分析,也给出了松花江哈尔滨段现场实测冰盖厚度,如图 7 所示。

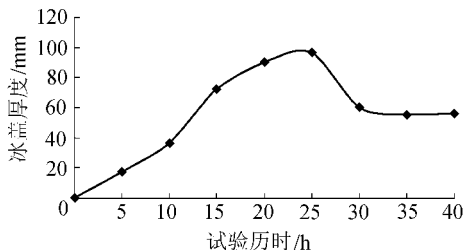


图6 试验实测冰盖厚度

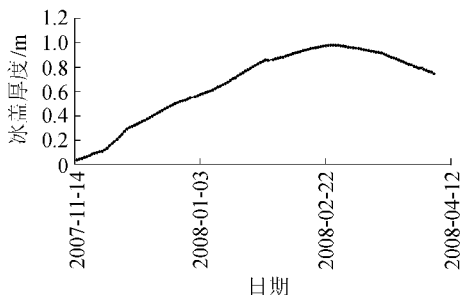


图7 松花江哈尔滨段实测冰盖厚度

c. 试验的相似性。从图 6 可以看出冰盖厚度随着温度的持续降低而增大,在升温期开始之前的 23 h 时,冰盖厚度达到最大值 96 mm;之后随着温度的上升,冰盖厚度开始减小。若将试验数据换算成原型数据,那么最大冰盖厚度约为 1.0 m,与 2007 ~ 2008 年冬季松花江哈尔滨段的最大冰盖厚度相似。从温度控制到冰盖生长的过程验证了模型与原型的相似性。

3.3 静冰压力及铰接块爬坡试验数据分析

试验开始后,随着冰盖的出现和不断增厚,静冰压力产生并缓慢增大,在静冰压力作用下铰接块出现爬坡现象。铰接块上平均静冰压力随时间变化曲线如图 8 所示,铰接块沿坡面位移随时间变化曲线如图 9 所示,铰接块上静冰压力与铰接块沿坡面位移的关系曲线如图 10 所示。

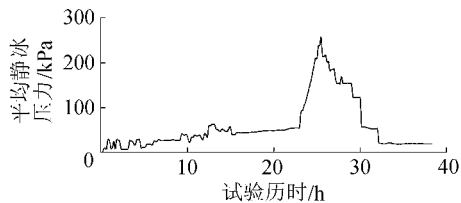


图8 铰接块上平均静冰压力随时间变化曲线

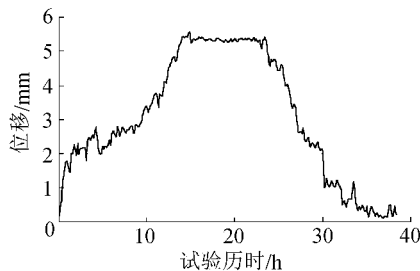


图9 铰接块沿坡面位移随时间变化曲线

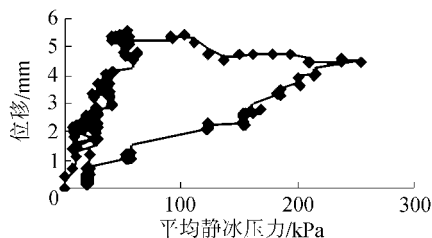


图10 铰接块上平均静冰压力与铰接块沿坡面位移的关系曲线

铰接块上各压力传感器在 10 cm 的冰厚度范围内的布置,从上至下 A 列依次为 PAT-1, PAT-2, PAT-3, B 列依次为 PBT-1, PBT-2, PBT-3。从实测静冰压力可知,传感器 PAT-1 和 PBT-1 测到的静冰压力最大,峰值均在升温阶段的 25.67 h 出现,分别为 313.39 kPa 和 281.22 kPa。试验数据表明,静冰压力作用点位于冰面以下冰盖厚度的约 1/3 处,这与 SL211—98《水工建筑物抗冰冻设计规范》中“静冰压力作用点取冰面以下 1/3 冰厚处”的结论相吻合^[5]。

从铰接块上平均静冰压力随时间的变化过程可知,试验开始后,随着冰盖厚度的增大,静冰压力也不断增大^[6]。在 23.00 ~ 30.17 h 的时间段内,温度从 -18.07 °C 上升到 -0.59 °C,静冰压力出现了一个快速增大的过程,25.67 h 时,静冰压力达到 255.05 kPa 的峰值,之后开始快速下降;30.17 h 后静冰压力经历了一个缓慢降低的过程,试验结束时,静冰压力降

到 19.00 kPa。

随着静冰压力的出现和增大,冰盖推着铰接块沿坡面向上滑动,在 14.00 ~ 24.00 h 的时间段内,位移随时间变化曲线出现一个平台,平台上的位移在 5.00 ~ 5.57 mm 的范围内变化,并出现本次试验的最大平均位移 5.57 mm,冰上坡长为 1 019 mm,位移变形率为 0.5%。试验结束时的残余位移为 0.22 mm,即铰接块沿坡面上推了 0.22 mm,残余位移变形率为 0.02%。14.00 ~ 24.00 h 的时间段基本上与 -27℃ 的低温恒温时间段重合。

在 23.00 ~ 30.33 h 的时间段内,当温度从 -18.07℃ 升到 -0.34℃ 时,铰接块上的静冰压力从 54.80 kPa 快速增大到 255.00 kPa,并又快速回落到 56.68 kPa,这是因为随着温度的升高,冰盖发生膨胀,产生了静冰压力,这与实际河流春季气温升高时,冰盖膨胀,推挤岸坡的工程现象是一致的^[7]。此时间段对应原型的 2008 年 2 月下旬,正是松花江发生冰盖膨胀推挤岸坡的时间段。

4 结 论

a. 从试验数据可以看出,冰盖静冰压力的发生、增大和消减过程清晰,并与自然环境下的情况相吻合。

(上接第 43 页)

大。变通的方法是直接将其作为实体单元进行计算,可以针对具体情况灵活处理。如对于土工膜或 GCL,可以当成无厚度(或有厚度)的接触面单元划分网格,渗流分析时沿 xy 平面垂直方向平移一虚拟距离 t ,从而构造一虚拟的实体单元,用此虚拟实体单元计算单元刚度矩阵。对无纺布等,可以简化为平板单元,力学行为用板单元对应的力学性质计算,渗流问题则用同样方式构造虚拟的实体单元进行计算。虚拟单元的厚度 t 可以取土工合成材料的实际厚度 δ ,也可以取其他厚度。注意当 $t \neq \delta$ 时,需要按式(1)~(4)计算等价的渗透系数。由于虚拟厚度 t 可以取得较大,因此能够避开单元长短边比值过大的问题。

4 结 论

在涉及土工合成材料的渗流或固结问题分析中,如何在有限元计算中反映土工合成材料的特性是分析的难点。在单纯渗流问题中,将土工合成材料等效为具有一定厚度(大于其实际厚度)的实体单元,通过修正其渗透系数,一般情况下能够得到合理的结果。但在固结分析中,由于需要考虑应力应变对单元划分的要求,上述等效方法则可能不太适合。

b. 根据试验数据可以定性预测,在松花江哈尔滨段,静冰压力作用下铰链式护坡系统沿坡面位移变形很小,冰盖融化后该护坡系统的残余变形也很小。

c. 铰链式护坡系统具有显著的柔性护岸结构特点,在冰盖静冰压力发生、增大和消减的过程中,该系统能够适应岸基变形而不被破坏。

参考文献:

[1] 史庆增,徐继祖,宋安.冰力模型试验[J].冰川冻土,1990,12(2):117-123.
[2] 丁德文,罗学波.冻土热工模型的理论基础[J].科学通报,1979,8(8):360-364.
[3] 黄焱,史庆增,宋安.冰力模型实验中的模型律[J].冰川冻土,2003,25(S2):352-355.
[4] 耿余春,丁树常,罗文荃,等.松花江冰厚及开江日期分析[J].水文,1996(1):52-55.
[5] 卢鹏,李志军.现行规范中计算桩柱冰荷载的比较[J].冰川冻土,2003,25(S2):256-259.
[6] 蔡之瑞,孙泊涛,郭世容,等.冰荷载的实验研究和计算方法[J].地震工程与工程震动,1997,17(4):49-55.
[7] 陆钦年,段忠东,欧进平,等.河冰对桥墩作用的冰荷载计算方法(II)[J].自然灾害学报,2002,11(4):112-118.

(收稿日期 2009-08-19 编辑 陈吉平)

笔者建议的方法有较强的实用性和通用性,可以在将土工合成材料简化为实体单元、接触面单元或杆单元的情况下考虑土工合成材料的渗透性质。对土工膜、土工格栅、无纺布等不同用途材料的模拟都适用,能够解决涉及土工合成材料渗流的大多数问题。

参考文献:

[1] 王殿武,姜晓刚,盖绍唐,等.辽宁省水利工程应用土工合成材料的效益分析[J].水利水电科技进展,1999,19(6):28-29.
[2] 黄婉荣,郭志平.土工合成材料在废物填埋场中的应用[J].水利水电科技进展,1999,19(6):30-33.
[3] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会.土工合成材料工程应用手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000.
[4] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
[5] WU T H. Soil mechanics[M]. Boston: Allyn and Bacon, Inc., 1976.
[6] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.
[7] 毛昶熙,段祥宝,李祖貽,等.渗流数值计算与程序应用[M].南京:河海大学出版社,1999.
[8] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2000.

(收稿日期 2009-07-13 编辑 胡新宇)