

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.04.020

基于界面塑性断裂模型的碾压混凝土 诱导缝问题分析

王怀亮^{1,2}, 田平²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 对于碾压混凝土诱导缝, 基于经典塑性理论, 将黏聚力裂纹模型扩展到 I 型和复合型断裂问题, 通过数值模拟对不同层面处理方式所形成的碾压混凝土层面的断裂问题进行了分析。分析结果预测出了试验所得的预留诱导缝试件控制点处的荷载-位移曲线, 并分析了各种工况形成层面的损伤断裂机理, 分析结果为碾压混凝土相应层面的 I 型、I-II 复合型断裂提供了判据, 为相关问题的分析提供了理论指导。

关键词: 碾压混凝土; 诱导缝; 层面; 复合断裂

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)04-0097-05

Analysis of Induced Crack of RCC Based on Interface Plastic - fracture Model

WANG Huailiang^{1,2}, TIAN Ping²

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Civil and Architectural Engineering College, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract: According to the induced crack of RCC, a numerical procedure based on the cohesive crack approach and the formulation of the classical plasticity is presented, and then is extended to mode I and mixed mode I-II fracture problem. The crack model is performed on the RCC layers formed by different processing ways. According to test database and finite element analysis, the damage fracture mechanism of layer surface resulted from various cases was investigated, the curves of the load versus displacement at several control points of the specimens are well predicted. This method provides a theoretical guidance for the related problems.

Keywords: roller compacted concrete (RCC); artificial seams; concrete layers; Mixed mode fracture

碾压混凝土筑坝技术结合了混凝土坝和土石坝的优点, 结构安全并且造价低、工期短, 在水利工程中得到了广泛的应用^[1]。作为大体积混凝土结构的碾压混凝土重力坝, 温度裂缝是最大危害之一, 为了防止坝体中尤其是碾压混凝土层面间无序温度裂缝的产生, 国内外普遍采用在层面处设置诱导缝和铺设冷水管等并行的温控方案^[2-3]。其原理是: 在碾压混凝土重力坝中, 诱导缝缝尖附近的拉应力为奇异值, 水化热导致坝体内部温度升高, 温度拉应力与诱导缝缝尖处的拉应力叠加, 从而拉应力超过混凝土

抗拉强度, 诱导缝处最先出现温度裂缝, 温度裂缝的出现又释放了诱导缝周围的拉应力, 使得碾压混凝土层面处的应变能数值得到降低, 防止了温度裂缝在坝体内其他地方的无序产生, 从而使温度裂缝按预期发展。在碾压混凝土大坝坝体内复杂应力状态下, 诱导缝可能以各种形式进行扩展, 而目前国内外对大体积混凝土的断裂问题研究, 多集中于测定 I 型裂缝的断裂韧度和断裂扩展准则^[4-5], 缺乏系统的用断裂力学方法来分析碾压混凝土各种工况下层间断裂问题的研究, 尤其是各种工况下层间 I-II

收稿日期: 2016-03-20

修稿日期: 2016-04-24

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2015020593); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2013491811); 大连大学大学生创新项目(2015030)

作者简介: 王怀亮(1979—), 男, 河南郑州人, 博士, 副教授, 主要从事混凝土结构试验研究方面的工作。E-mail: whuailiang@163.com

复合型断裂问题的研究也没有明确的结论。

本文基于经典塑性理论,结合所做的碾压混凝土层间断裂试验,引入一致连续性条件,推导和改进了 Carol 相关界面模型,将黏聚力裂纹模型扩展到 I 型和 I-II 复合型断裂问题,通过数值模拟手段对由于不同层面处理方式条件下的碾压混凝土层间断裂问题进行分析,以探讨不同层面工况下诱导缝扩展和断裂破坏的区别,并证实了此类数值方法是可行的,为大体积混凝土温度裂缝的断裂和扩展问题研究提供了有益的参考。

1 理论模型

1.1 屈服函数和流动法则的选取

在复合断裂状态下,法向应力分量 σ 和切向应力分量 τ 同时作用在碾压混凝土层面上,通过 σ 和 τ 的合力作用,层面将经历初始裂纹出现的临界状态到最后裂缝不稳定拓展状态,这一过程可以由经典塑性力学中的屈服面概念来描述^[6]。这里采用 Carol 双曲线屈服模型作为进入塑性阶段的屈服判断依据:

$$F = \tau^2 - 2c \tan \phi (\chi - \sigma) - \tan^2 \phi (\sigma^2 - \chi^2) \quad (1)$$

这里 F 是屈服面函数, c 是黏聚力, ϕ 是摩擦角, χ 为界面抗拉强度。

屈服面发展方向由塑性势函数 Q 得出:

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma} = 2 \tan \phi (c - \sigma \tan \phi) f_{\sigma}^{\text{dil}} f_c^{\text{dil}}, \quad \frac{\partial Q}{\partial \tau} = 2\tau \quad (2)$$

式中: f_{σ}^{dil} 和 f_c^{dil} 分别表示扩容现象引起的界面法向应力增量和切向应力增量。

$$f_{\sigma}^{\text{dil}} = \begin{cases} 1 - \psi \left(\frac{|\sigma|}{\sigma^{\text{dil}}}, \alpha_{\sigma}^{\text{dil}} \right) & \sigma \leq 0 \\ 1 & \sigma > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f_c^{\text{dil}} = 1 - \psi \left(\frac{c_0 - c}{c_0}, \alpha_c^{\text{dil}} \right) \quad (4)$$

式中: σ^{dil} 为剪胀正应力阈值,黏聚力 c 和对应的膨胀参数 α_c^{dil} 作为内变量参数, c_0 是 c 的初始值。屈服函数如图 1 所示。在拉应力空间塑性势函数曲面与屈服面重合,进入压应力空间后,压应力高于剪胀应力阈值 σ^{dil} 时,剪胀效应的控制作用随着压应力的增大而减弱;当裂缝面进化至压剪破坏面时,剪胀扩容效应完全消退,此时,界面状态等效于黏聚力为 0 的纯摩擦状态。根据屈服面的定义可知 $F < 0$ 时,双材料界面处的力学规律服从胡克弹性定律, $F = 0$ 时,双材料界面进入非弹性状态,此时公式中 c 和 α_c^{dil} 演变为下降阶段的软化参数。

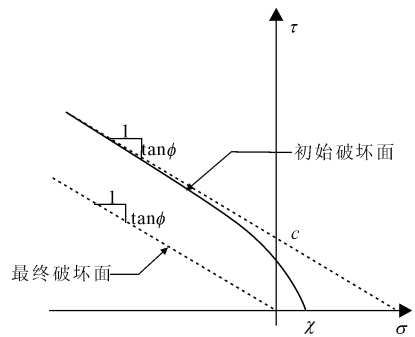


图 1 Carol 界面模型的演变规律

1.2 复合型断裂的黏聚力模型

黏聚力裂缝模型,又叫虚拟裂缝模型,由瑞典学者 Hillerborg 创立^[7],此模型认为岩石和混凝土类型的准脆性材料在应力等于临界值(抗拉强度)后,裂缝开始扩展,但抗拉强度并未消失,并且在裂缝前沿形成了一个虚拟裂缝区域。此模型还假定材料在受力破坏时,只会出现两种断裂模式:其一是拉应力起控制作用时的张开型裂纹扩展模式(I型),此时屈服面为直线型;其二是压应力和剪应力起控制作用时的剪切型裂纹扩展模式(I-II复合型),此时,界面处的屈服面形状为双曲线型,类似于 Mohr-Coulomb 屈服函数形式。从能量观点出发,假定内部变量 c 和 χ 的初始值为 c_0 和 χ_0 ,伴随着裂缝开始扩展以及失稳扩展全过程中所消耗断裂能(功) W^{cr} 的增大, c 和 χ 从初始最大值逐步线性递减到 0,整个过程根据能量守恒(虚功原理)可得 $W^{\text{cr}} = G_f^{\text{I}} + G_f^{\text{II}}$,其中 G_f^{I} 为张开型裂纹断裂能, G_f^{II} 为剪切型裂纹断裂能。根据经典线弹性断裂力学中的概念,剪切型裂纹或者 I-II 复合型裂纹通常记作 II_a 型,亦可称之为渐进 II 型模式。通常还可以引入中间尺度函数来描述内部变量 c 和 χ 的演化规律:

$$\chi = \chi_0 (1 - S(\xi_{\chi})); \quad c = c_0 (1 - S(\xi_c)) \quad (5)$$

其中

$$S(\xi_{\chi}) = \frac{e^{-\alpha_{\chi} \xi_{\chi}}}{1 + (e^{-\alpha_{\chi}} - 1) \xi_{\chi}} \quad (6)$$

$$S(\xi_c) = \frac{e^{-\alpha_c \xi_c}}{1 + (e^{-\alpha_c} - 1) \xi_c} \quad (7)$$

式中: $\xi_{\chi} = q_{\chi} / G_f^{\text{I}}$, $\xi_c = q_c / G_f^{\text{II}}$, α_c , α_{χ} 为材料参数; q_c , q_{χ} 分别为界面进入塑性软化区域后,剪应力方向和拉应力方向上的变形度量。

1.3 I型断裂的黏聚力模型

I型张开裂缝前沿依旧形成一个虚拟裂缝区域, I型虚拟裂缝间传递应力的规律可以直接用软化曲线 $\sigma = f(w)$ 来表示,其中 σ 为裂缝面的正应力, w

为裂缝张开位移 (CMOD), I 型断裂过程区内, 传递正应力 σ 垂直于裂缝面, 软化曲线可以由混凝土单轴拉伸试验得出, 本文后续分析中将采用比较光滑的指数下降式。软化曲线上两个材料属性非常重要: 抗拉强度 f_t 和黏聚力断裂能 G_f^I 。对于虚拟裂缝模型, 抗拉强度为产生裂缝并开始扩展对应的应力; 黏聚力断裂能 G_f^I 又称为相对断裂能, 为黏聚裂缝开始产生到完全断裂时的单位表面积与软化函数所包围面积的交集。纯 I 型 ($\tau = 0$) 断裂时, 黏聚力抗拉强度 $\chi = f_t$, 式(1)又可以表达为:

$$F = 2c \tan \phi (f_t - \sigma) + \tan^2 \phi (\sigma^2 - f_t^2) = (f_t - \sigma) \{ 2c \tan \phi - \tan^2 \phi (f_t + \sigma) \} = 0 \quad (8)$$

进而得出

$$f_t - \sigma = 0 \quad (9)$$

1.4 层面断裂判据

裂缝失稳扩展过程中所做的功可以分为两部分

$$dW^{cr} = dW_{I}^{cr} + dW_{II}^{cr} \quad (10)$$

对于 I 型断裂, 失稳判据为

$$dW_{I}^{cr} = \sigma d\omega_n^{cr} \text{ if } \sigma \geq 0; \quad dW_{I}^{cr} = 0 \text{ if } \sigma < 0 \quad (11)$$

对于拉剪和压剪状态下的 II_a 型断裂, 能量耗散判据则采用如图 2 所示的形式, 公式如下:

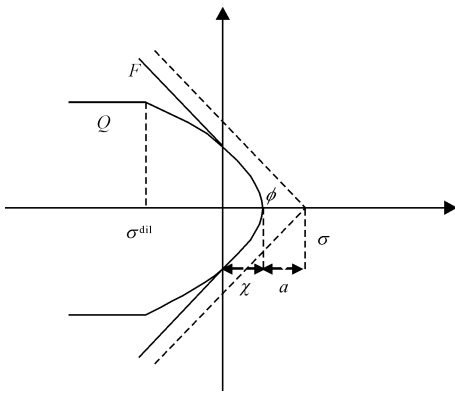


图 2 断裂判据

$$dW_{II}^{cr} = (|\tau| - |\sigma| \tan \phi) |dW_t^{cr}| \text{ if } \sigma > 0 \quad (12)$$

$$dW_{II}^{cr} = (|\tau| - |\sigma| \tan \phi) |dW_t^{cr}| - |\sigma| dW_n^{cr} \text{ if } \sigma = 0 \quad (13)$$

$$dW_{II}^{cr} = (|\tau| dW_t^{cr} - |\sigma| dW_n^{cr}) \left(1 - \frac{|\sigma| \tan \phi}{|\tau|} \right) \text{ if } \sigma < 0 \quad (14)$$

2 试验验证

2.1 算例 1

如图 3 所示一层面处单边开缝的碾压混凝土轴

拉试件^[8], 尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm, 试件类型为本体试件和层面设在试件中部的含层面试件, 使用岩石锯在层面处锯出预留诱导缝, 缝高比为 0.2, 碾压混凝土本体抗拉强度为 2.482 MPa, 本体抗压强度为 33.221 MPa, 有层面碾压混凝土层间抗拉强度为 1.980 MPa, 其抗压强度同本体试件, 根据文献[9-15]补充其他模型参数 $G_F = 142 \text{ N/m}$, $E = 31.9 \text{ GPa}$, $c = 5.0 \text{ MPa}$, $\alpha_c^{dil} = 50$, $\alpha_\chi = 50$, $G_F^{IIa} = 142 \text{ N/m}$ 。这里采用不同梯度加密的三角形网格自动剖分方法, 以考虑层面和预留诱导缝对裂缝张开位移的影响, 如图 4 所示。对两组试件的荷载-裂缝尖端张开位移 (CMOD) 试验曲线进行了计算模拟, 见图 5。可以看到, 有限元计算得到本体及层面试件 CMOD 曲线与试验曲线吻合的非常好, 这是由于基于黏聚力模型的张开型裂纹扩展分析理论已经非常成熟, 对纯 I 型裂纹稳定扩展的和裂纹不稳定扩展的全过程数值模拟时可以得到令人满意的计算精度, 故此, 黏聚力裂缝模型已经广泛地应用于碾压混凝土重力坝的层间断裂问题分析。另外, 在本文的工况条件下, 碾压混凝土本体的极限拉伸值大于有层面碾压混凝土的极限拉伸值, 有层面碾压混凝土极限拉伸值为 0.0737135×10^{-3} , 层面与本体的极限拉伸值之比约为 0.9, 这也表明, 用断裂力学方法来预测单轴应力状态下碾压混凝土的极限拉伸值是完全可行的。

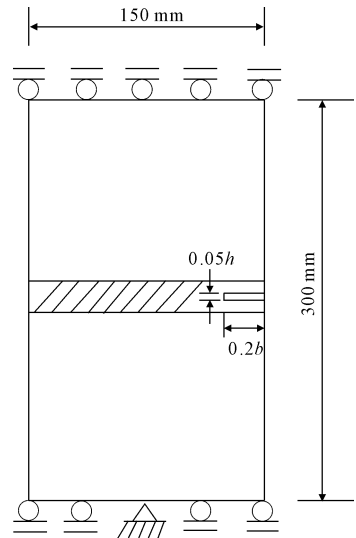


图 3 直接拉伸示意图

2.2 算例 2

算例 2 的试验数据取自本课题组所做的强度相同、尺寸不同的碾压混凝土四点弯曲切口梁断裂试验^[9]。依旧在试件的软弱层面处设置预裂缝, 试件

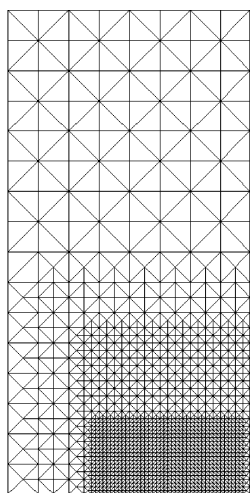


图 4 直接拉伸试件网格剖分

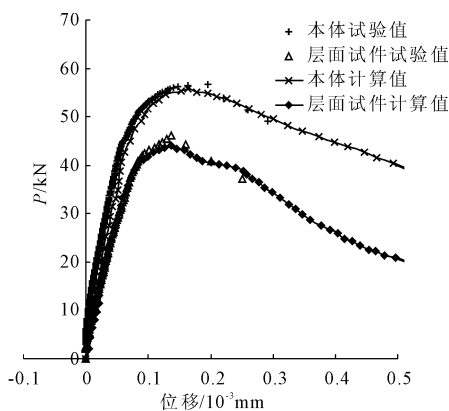
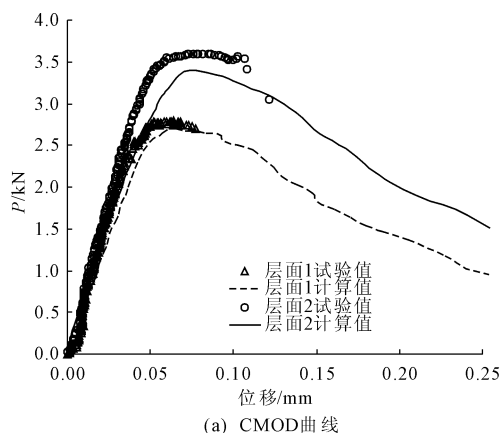


图 5 I 型断裂 CMOD 曲线

跨高比 S/D 和相对缝深,以及荷载和边界条件如图 6 所示。层面接缝分为两种工况,层面 1 指间隔 4 h,层面不做任何处理;层面 2 指间隔 12 h 后,层面刷毛铺设粉煤灰水泥砂浆处理,层面 1 单轴抗拉强度为 1.98 MPa,层面 2 单轴抗拉强度为 2.49 MPa,其他参数参照算例 1 取值。网格剖分如图 7 所示,采



(a) CMOD 曲线

用位移控制的分步加载方式,每步的加载位移为 $0.5 \mu\text{m}$,通过计算得出裂缝口张开位移 CMOD、裂缝口滑开位移 CMSD,见图 8。从曲线和计算结果看,层面 2 的拉剪复合断裂参数高于层面 1,说明即使在层面间隔时间较长的情况下,层面 2 的处理效果较好,这是由于下层混凝土终凝后,对层面进行凿毛(冲毛)处理,使表面粗骨料突起,相对滑动面粗糙,致使其复合断裂所消耗的能量较多。

从试验数据看到,试件的裂缝口滑开位移要比裂缝口张开位移小很多,由此可得拉应力在拉剪复合荷载作用时起决定作用。I - II 复合型裂缝在拉剪符合荷载作用时,裂缝起裂扩展较迅速,试件破坏时表现为脆性破坏,尽管试验机刚度较大,还是未能得到层面诱导缝起裂失稳扩展的全过程曲线,也未能测得到试件受力破坏的全过程曲线。但利用界面塑性断裂模型,能够清晰反映 I - II 复合型应力状态下试验不易获取的应力场,如曲线下降段,并且和通过试验得到的分析结果基本吻合。

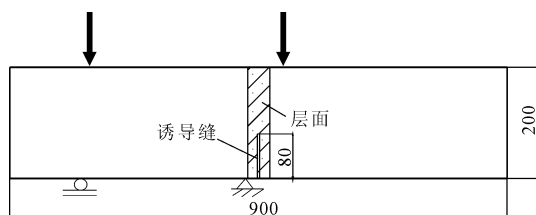


图 6 拉剪试件示意

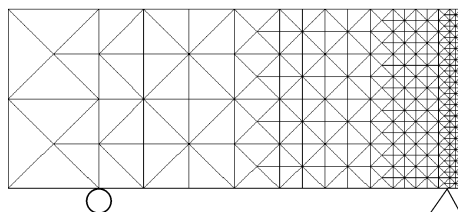
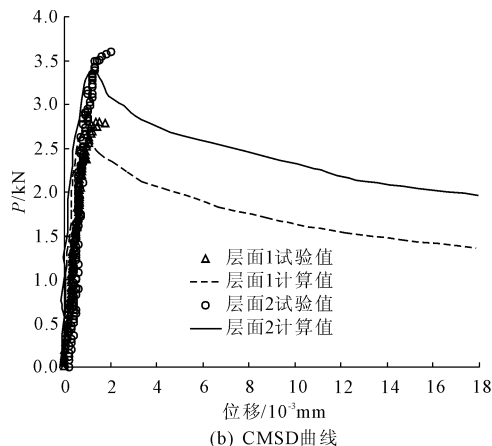


图 7 拉剪试件网格剖分



(b) CMSD 曲线

图 8 拉剪试件试验曲线和计算曲线对比

3 结 论

首先采用直接拉伸法和四点弯曲法等试验方法,开展了碾压混凝土层面的Ⅰ型、Ⅰ-Ⅱ复合型断裂性能的试验研究,涉及到的层面状况按照间隔时间划分为三种不同层面处理工况。然后通过界面塑性断裂模型对碾压混凝土的诱导缝复合型断裂破坏开展了数值分析研究,近似模拟了不同碾压混凝土层间接缝情况对诱导缝失稳扩展的影响机理,找出各种层面在拉剪作用下断裂破坏的规律,建立层面拉剪断裂准则,并验证了本文数值方法的有效性,表明该数值模拟方法非常适用于解决碾压混凝土结构的层间断裂问题。研究成果为碾压混凝土坝的设计、施工、安全评定等提供了试验及理论依据。

参考文献:

- [1] 龙起煌,郑 治.中国碾压混凝土坝技术[J].水利水电技术,2013,44(8):11-14.
- [2] 相昆山,张宏战,马震岳.寒冷地区碾压混凝土重力坝温控防裂研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5):200-203.
- [3] 王晓峰,罗 敏,周先练,等.沙沱水电站大坝碾压混凝土温度控制[J].贵州水力发电.2012,26(1):32-36.
- [4] 陆 俊,胡少伟.碾压混凝土断裂实验分析与静动态断裂韧度关系研究[J].中国科学,2012,42(9):948-955.
- [5] 徐世焯,余秀丽,李庆华.电测法确定低强混凝土裂缝起裂和等效裂缝长度[J].工程力学,2015,32(12):84-

89.

- [6] Christian C G, Bažžant Z P, Vorel J, et al. Comprehensive concrete fracture tests: Description and results[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013,114(12):92-103.
- [7] 管俊峰,李庆斌,吴智敏,等.现场浇筑大坝混凝土起裂断裂韧度研究[J].水利学报,2014,45(12):1487-1492.
- [8] 孙荣书.有层面碾压混凝土双K断裂参数试验研究[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2009,29(2):101-103.
- [9] 王怀亮,宋玉普.多轴应力条件下碾压混凝土层面抗剪强度试验研究[J].水利学报,2011,42(9):1095-1101.
- [10] 王怀亮,任玉清,宋玉普.基于黏塑性理论的碾压混凝土动态剪切本构模型[J].工程力学,2014,31(9):120-125.
- [11] 王怀亮.双向应力下碾压混凝土动态力学性能研究[J].建筑材料学报,2015,18(5):847-851.
- [12] 王怀亮.考虑库底淤积层作用的碾压混凝土重力坝地震响应分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):60-65.
- [13] 王怀亮,周志宇.长期服役老化混凝土重力坝地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2015,35(1):183-188.
- [14] Joško Ožbolt, Akanshu Sharma. Numerical simulation of dynamic fracture of concrete through uniaxial tension and L-specimen[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 85(5):88-102.
- [15] 宋玉普,闻 伟,王怀亮.碾压混凝土压剪强度分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(6):44-47.

(上接第92页)

4 结 语

由于小洼槽倒虹吸距离长、承插口接头多,使得承插口局部水头损失问题凸显。最终得到大口径玻璃钢管承插式接头局部水头损失系数 ζ_0 在不同流量下取值范围为 0.0035 ~ 0.005。承插口造成的总局部水头损失相对不大,但也不能忽略。尤其是大口径超长距离玻璃管输水管道工程更应关注此类局部水头损失。

参考文献:

- [1] 常 胜,牧振伟,万连宾.大口径有压玻璃钢管水力计算公式分析[J].水电能源科学,2014,32(10):159-161.
- [2] 李 炜.水力计算手册(第2版)[M].北京:中国水利水电出版社,2007:10.

- [3] 谭兴华,陈全会,高永传.南水北调倒虹弯管局部阻力设计方法研究[J].灌溉排水学报,2000,19(4):53-55,74.
- [4] 石 泉,张立德,李红伟.大型倒虹吸工程设计与施工[M].北京:中国水利水电出版社,2007:19.
- [5] 蒲振旗,徐元禄,周 骞.玻璃钢管道糙率值实证分析[J].水利建设与管理,2011,31(11):77-81.
- [6] 李栋浩,王文娥,葛茂生,等.突然缩小圆管局部水头损失系数试验研究[J].水利与建筑工程学报,2011,9(4):22-24.
- [7] 上育平,寇君淑,房海勃,等.海底承插式玻璃钢管道安装施工工艺研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):129-132.
- [8] 司徒菲,陈才高,李金印,等.长距离大口径输水管线摩阻系数及局部水头损失系数研究[J].给水排水,2011,37(8):108-111.