

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.06.011

三峡大坝至葛洲坝两坝间河段通航水流条件

姚仕明^{1 2} ,王兴奎² ,张丙印²

(1. 水利部长江水利委员会长江科学院 ,湖北 武汉 430010 ; 2. 清华大学水利水电工程系 ,北京 100084)

摘要 采用水流数学模型对三峡大坝至葛洲坝两坝间河段的通航水流条件进行研究 ,结果表明 ,枯水期日调节条件下两坝间河段的水面比降和流速变化均不影响本河段万吨级船队的航行条件。洪水期间大流量条件下两坝间航道水流条件十分复杂 ,在葛洲坝坝前水位为 66.00 m、流量大于 30 000 m³/s 时 ,两坝间的水流条件不能满足现状条件下万吨级船队的通航 ;随着流量的增加 ,通航卡口段也随之增加 ,主要位于水田角、喜滩上下、石牌、偏脑等局部河段。研究成果可为两坝间航线选择与航道治理提供参考。

关键词 河段 ;数值模拟 ;通航水流条件 ;万吨级船队 ;三峡大坝 ;葛洲坝

中图分类号 :U697.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)06-0043-05

Navigable flow conditions of river reach between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam//YAO Shi-ming^{1,2} ,WANG Xing-kui² ,ZHANG Bing-yin² (1. Changjiang River Scientific Research Institute , Changjiang Water Resources Commission of Ministry of Water Resources , Wuhan 430010 , China ; 2. Department of Hydraulic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

Abstract : The mathematical models for flows were employed to study the navigable flow conditions of the river reach between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam. The results show that , in dry season , the variations of water surface slope and flow velocity of the river reach due to daily regulation have no influences on the navigable flow conditions for ten-thousand-tonnage fleet. However , under high flows in flood season , the navigable conditions are complicated. The flow conditions of the river reach between the two dams can not meet the need of ten-thousand-tonnage fleet when the water level at Gezhouba dam site is 66.00 m in height and the water discharge is larger than 30 000 m³/s , and with the increase of the water discharge , more navigation bottleneck reaches occur , such as Shuitianjiao , Xitan , Shipai and Piannao. The research results will be some references for the selection of navigation routes and the channel regulation.

Key words : river reach ; numerical simulation ; navigable flow condition ; ten-thousand-tonnage fleet ; Three Gorges Dam ; Gezhouba Dam

川江航道地形复杂 ,水流湍急 ,险滩众多 ,严重制约了大吨位船舶上行。1949 年新中国成立以来 ,国家投入大量资金对川江航道进行系列整治 ,但由于川江航道属山区峡谷河流 ,河宽较窄 ,地形复杂 ,水流流态异常复杂 ,仅通过一般整治工程难以解决大吨位船舶上行问题。20 世纪 80 年代 ,葛洲坝水利枢纽的建成运用 ,使水库回水段的航行条件有所改善。但由于其属低水头枢纽 ,回水长度有限 ,不能改善回水范围以上的河段的航行条件 ,因此 ,大吨位船舶及船队仍然难以通过川江航道 ,影响长江上游航运事业的发展。三峡水库蓄水运用前 ,川江航道基本处于天然河流状态 ,航道年均单向下水通过能

力为 1 000 万 t 左右^[1-2]。三峡工程已于 2003 年 6 月蓄水至 135 m(吴淞高程 ,下同) ,2006 年汛后抬至 156 m ,2008 年抬至 172 m ,最终按正常蓄水位 175 m 运行。由于水库水位逐步抬高 ,水库回水末端上移 ,最终达到重庆 ,因此 ,三峡水库将显著改善宜昌至重庆 660 km 的长江上游航道 ,在正常蓄水期 ,库区 3 000 t 单轮或万吨级船队可直达重庆港。三峡工程蓄水运用以来 ,因库区航道等级及通航条件得到大幅度提升 ,过坝货运量也不断增加。据统计 ,2004 年通过三峡工程的货运量首次超过 4 000 万 t ; 2006 年超过 5 000 万 t ; 2007 年突破 6 000 万 t 大关 ; 2008 年达到 6 847 万 t ,是三峡工程运用前年平均货

基金项目 :中国博士后科学基金(20070410065 ,200801085)

作者简介 :姚仕明(1974—) ,男 ,安徽庐江人 ,博士 ,从事河流泥沙与河道整治研究。E-mail :yzhshymq@163.com

运量的 6 倍以上。三峡工程的建设不仅大幅度提高了库区的运输能力,而且使运输成本降低了 35% 左右^[3]。

三峡水库的运用极大地改善了库区的航运条件。然而,三峡大坝至葛洲坝河段(简称两坝间河段)地形和断面形态复杂,河宽较窄,多在 200 ~ 800 m 之间,其河势如图 1 所示。在流量较大的情况下,两坝间河段因为复杂的水流和航道条件成为制约长江干流航运发展的“瓶颈”,也是水上交通事故多发地段^[1]。据统计,2003—2007 年 5 年间,三峡水域发生多起水上交通事故,其中 80% 位于两坝间河段,主要原因是大流量条件下此河段水流条件恶劣,因此,深入开展两坝间河段通航水流条件的研究具有十分重要的意义。笔者采用二维与三维水流数学模型对本河段的通航水流条件进行深入研究,研究成果可为两坝间航线选择与航道治理提供参考。

1 水流数学模型验证

二维水流数学模型的建立可参考文献[4-5],数学模型采用 1998 年两坝间实测的 1/2 000 地形进行验证,考虑到南津关以下河道较宽,水流相对较平缓,当上游河道满足航运要求时,该段也能够满足通航要求。因此,本次计算区域为三斗坪至南津关,长约 36.0 km。由于没有收集到两坝间河段流速分布的实测资料,只有水面线实测资料^[6],因此,文中仅

对水面线进行验证。验证结果表明,计算水面线与实测水面线的误差较小,在 ± 3 cm 以内,可采用该模型研究两坝间河段的通航水流条件(表 1)。另外,由表 1 可看出,两坝间河段的水面比降在洪水期间与中枯水期间相差明显。例如,在流量 $Q = 50\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,其水面比降为 0.016 3%; $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,其水面比降仅为 0.000 64%。由此可看出两坝间河段在洪、枯水期间表现为天然河道与水库的双重特性。

三维水流数学模型的建立与验证见文献[7-8]。

2 两坝间河段通航水流条件

两坝间河段地形复杂,在枯水期处于葛洲坝库区,通航条件主要受三峡电站日调节的控制。在洪水期具有山区河道的特性,在大流量情况下仍会出现多处滩险流急的情况,不能满足大吨位船舶的通航。因此,两坝间河段通航水流条件分别按枯水期日调节与洪水期进行研究。其中,枯水期日调节通航水流条件采用二维非恒定水流数学模型进行计算,洪水期通航水流条件采用三维水流数学模型进行计算。

2.1 枯水期日调节通航水流条件

一般情况下,葛洲坝水利枢纽的库水位在 63.00 ~ 66.00 m 范围内,其调节库容约为 0.86 亿 m^3 。枯水期间与三峡电站联合运行后,利用两坝间水库进行航运反调节,可使三峡电站在调峰

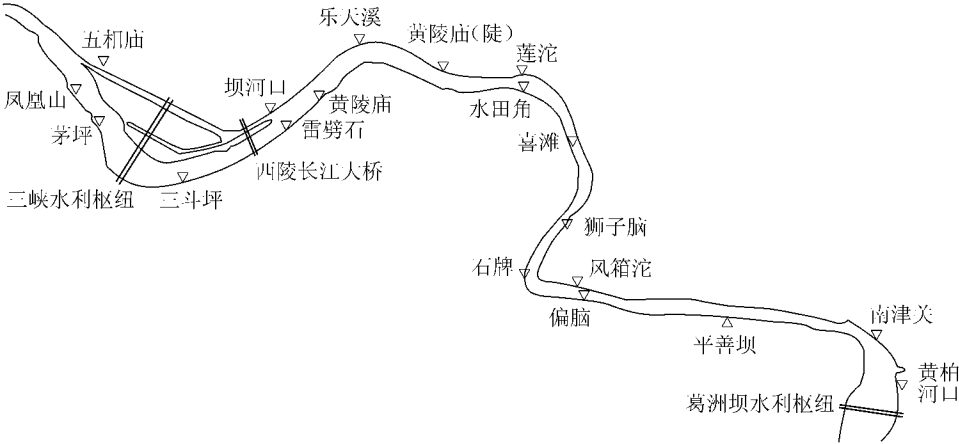


图 1 两坝间河段河势示意图

表 1 各级流量下的计算水面线与实测水面线的对比

水位站	起点距/ km	$Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$			$Q = 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$			$Q = 50\,000\text{ m}^3/\text{s}$		
		实测 水位/m	计算 水位/m	误差/m	实测 水位/m	计算 水位/m	误差/m	实测 水位/m	计算 水位/m	误差/m
黄陵庙	0	64.40	64.43	0.03	65.65	65.68	0.03	68.42	68.45	0.03
莲 沱	3.12	64.33	64.36	0.03	65.39	65.42	0.03	67.54	67.52	-0.02
石 牌	11.72	64.31	64.32	0.01	65.13	65.15	0.02	66.15	66.17	0.02
平善坝	16.43	64.26	64.27	0.01	64.96	64.94	-0.02	65.31	65.34	0.03
南津关	24.22	64.24	64.24	0	64.68	64.68	0	64.35	64.35	0

时保障葛洲坝水利枢纽上下游的航运安全。

三峡电站负荷日调节的水流特性采用二维非恒定流的水流数学模型进行研究。在两坝间河段二维非恒定流计算中,进口条件根据三峡电站负荷日调节条件给定的流量过程,出口水位过程为实体模型的试验结果,试验条件见图 2^[9]。

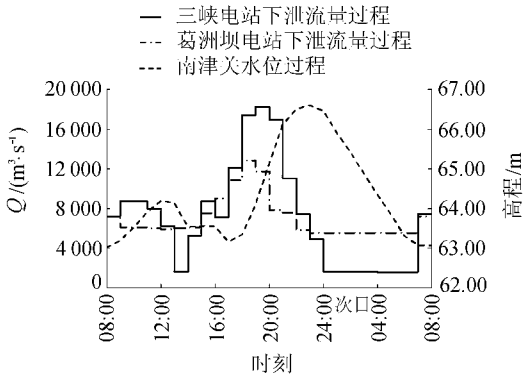


图 2 三峡电站负荷日调节流量与水位过程线

监测断面水位随时间变化的结果表明,两坝间河段水位日变幅在 3.23 ~ 3.49 m 之间,水位最大小时变率为 1.00 m,发生在 19:00—20:00 之间,主要原因是两坝间河段进出流量在该时段内相差最大,从而导致两坝间水量变化较大,引起水位小时变率最大,在各监测断面中,水位日变幅与小时变幅最大值均出现在偏脑断面。

图 3 为不同时刻的沿程水面线。由图 3 可知,受三峡电站调峰与葛洲坝水利枢纽反调节的影响,两坝间河段水流表现出明显的非恒定性,沿程水位随时间变化较大,如进口段水位变化范围为 63.40 ~ 66.57 m,而三峡电站下引航道的底板高程为 56.50 m,下引航道最小通航水深可保证不小于 6.90 m,故三峡电站调峰不影响三峡电站下引航道的通航。出口南津关的水位均在 63.00 m 以上,能保证葛洲坝上游引航道的水深在 6.00 m 左右,故三峡电站负荷日调节也不影响葛洲坝上游引航道的通航。受三峡电站调峰的影响,两坝间河段的水面比降随时间变化较大,主要与进出口流量过程以及流量小时变化率等因素有关。计算结果表明,在三峡

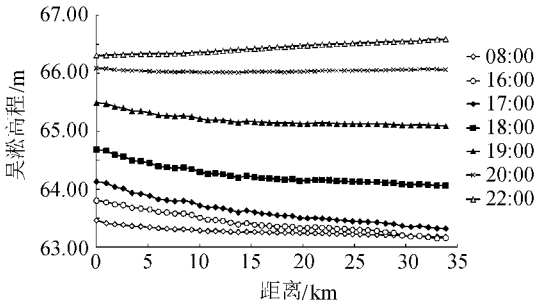


图 3 两坝间河段不同时刻沿程水面线变化

电站负荷日调节期间,最大水面比降发生在 17:00—18:00 之间,其比降值约为 0.005 2‰,其他时刻的水面比降均小于此值,有时出现倒比降。一般情况下,当进口流量大于出口流量时,河道水面比降相对较大,且上游段的比降大于下游段的比降;当进出口流量相差不大时,水面比降相对稳定,比降大小主要与流量有关;当上游进口流量随时间减小时,河道局部位置可能出现倒比降。

图 4 为各监测断面在不同时刻最大表面流速的变化过程。由图 4 可看出,三峡电站调峰的日调节过程中,最大表面流速均没有超过 2.5 m/s,最大表面流速值位于水田角监测断面,为 2.1 m/s,发生时刻为 18:15。根据万吨级船队允许最大流速和比降搭配与计算结果分析可知,在三峡电站调峰的日调节过程中,两坝间河段的水面比降和流速变化均不影响两坝间河段万吨级船队的航行条件。

由上述分析可知,两坝间河段在三峡电站调峰(11 月份)期间,尽管流量日变幅较大,最大相差 12 500 m³/s,但通过葛洲坝水利枢纽的反调节作用,两坝间河段的流速、水面比降、水位日变幅和小时变幅均能满足万吨级船队的通航要求。

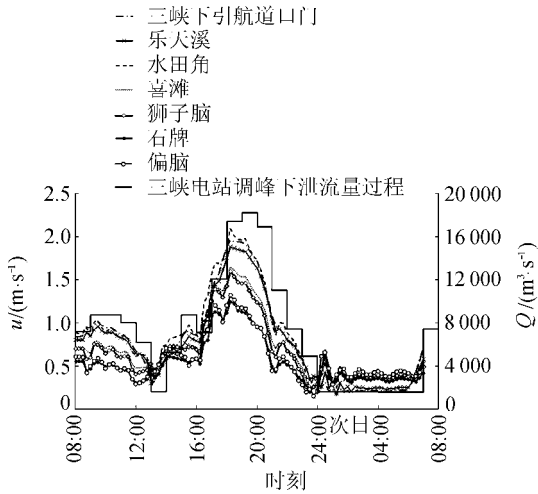


图 4 两坝间监测断面最大表面流速 u 随时间的变化

2.2 洪水期通航水流条件

洪水期采用三维水流数学模型计算分析两坝间河段的通航水流条件,进口按恒定流量考虑,出口按照葛洲坝水利枢纽坝前水位不变考虑。考虑到两坝间河段的流量不超过 20 000 m³/s 时能满足万吨级船队的通航要求,因此洪水期通航水流条件研究仅考虑 20 000 m³/s 以上流量级,葛洲坝坝前水位按 66.00 m 控制,共进行了 7 级流量(25 000 m³/s, 30 000 m³/s, 35 000 m³/s, 40 000 m³/s, 45 000 m³/s, 50 000 m³/s, 56 700 m³/s)条件下两坝间河段的三维流场计算,根据计算结果求出表层 3.5 m 水深处的平均流速场,用以分析本河段的通航水流条件和适

航区域。为了比较葛洲坝水利枢纽坝前不同水位运用对通航水流条件的影响,考虑葛洲坝水利枢纽水位按 63.00 m 控制,又进行了 4 级流量(30 000 m³/s , 35 000 m³/s 45 000 m³/s 56 700 m³/s)下两坝间河段的三维流场计算。

根据现有内河航道通航水流条件的标准,万吨级船队通航尺度为 3.5 m × 100 m × 1 000 m(水深 × 航宽 × 弯曲半径),通航水流条件一般要求最大局部比降 $J < 0.01\%$,航行区域内适航流速不大于 2.5 m/s^[10]。根据两坝间河段的实测地形资料分析,通航尺度除石牌弯道的弯曲半径(约 750 m)不能满足万吨级船队通航弯道的弯曲半径要求外,其他位置的通航尺度均能满足要求,但通航水流条件在不同流量情况下不一定能满足通航要求。

计算结果表明,当 $Q = 30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,局部河段如水田角附近流速大于 2.5 m/s 的主流带较宽,但在近岸两侧仍具备通航条件,因此通过合理调度,万吨级船队可在两坝间通航。当 $Q = 35\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水田角河段已形成对峙卡口而不能满足万吨级船队的通航要求,但其他河段仍可通航。当 $Q = 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,两坝间河段主流带的流速基本在 2.5 m/s 以上,并在水田角、喜滩上下、石牌等处形成通航卡口,多个河段都不满足万吨级船队的通航要求,见图 5 图中 H 为水位。图 5 中位于河道中间的阴影区域流速大于 2.5 m/s,该区域为不适合大吨位船舶航行的区域。当 $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,碍航河段

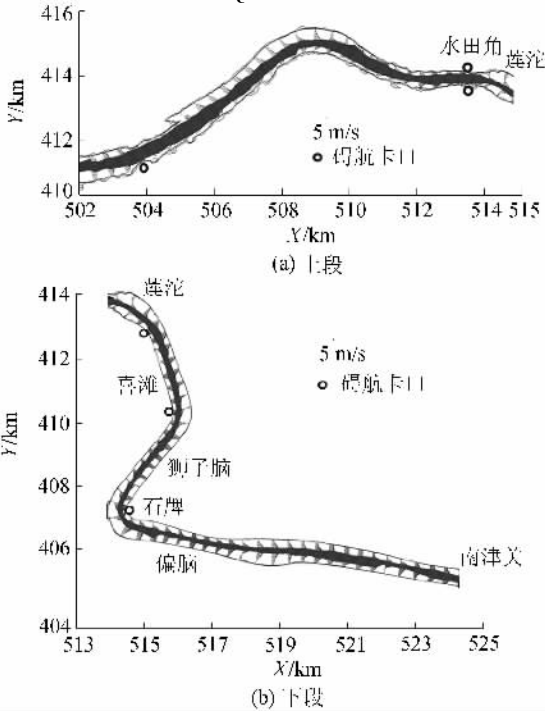


图 5 两坝间河段表层流场与适航区域分布
($Q = 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H = 66.00\text{ m}$)

更多,南津关以上的河段均难以满足万吨级船队的通航要求。

当葛洲坝水利枢纽坝前水位由 66.00 m 降至 63.00 m 时,在相同进口流量条件下两坝间通航条件将发生相应的变化,因水位降低引起河宽与过水断面面积减小、流速增加,导致适航区域范围减小。例如,当 $Q = 45\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,两坝间河段平均过水断面面积由 66.00 m 水位下的 18 180 m² 减小至 63.00 m 水位下的 16 620 m²,过水断面面积减小约 9%。因此,相同流量情况下水位的降低直接影响航运安全。当 $Q = 30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,葛洲坝水位在 66.00 m 情况下可满足万吨级船队的通航要求,但当水位为 63.00 m 时就不满足万吨级船队的通航要求,见图 6 图中 h 为水深, v 为流速。由图 6 可知,此时水田角 1 号断面的适航区域太小,河道左侧仅有 63.2 m 的宽度,不能满足万吨级船队 100 m 航宽的通航要求。

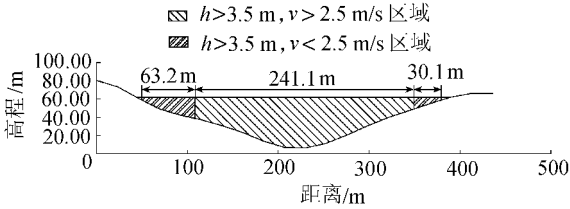


图 6 水田角 1 号断面水深和流速分布
($Q = 30\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H = 63.00\text{ m}$)

若考虑改进船型、船队性能及减载减载措施,可将实际通航水流的限制流速提高到 3.5 m/s。图 7 为水田角 1 号断面的水深和流速分布。由图 7 可知,当适航限制流速提高至 3.5 m/s 时,在莲沱弯道上下段主流带仍存在流速大于 3.5 m/s 的区域,特别是水田角附近,超过 3.5 m/s 流速的河宽所占比例较大,但在河道左侧仍有 107.5 m 的宽度可满足万吨级船队的通航要求,但当 $Q = 45\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时水田角附近已不能满足万吨级船队的通航要求。因此,当通航水流的限制流速提高到 3.5 m/s 时,两坝间河段万吨级船队的通航流量可提高至 40 000 m³/s。

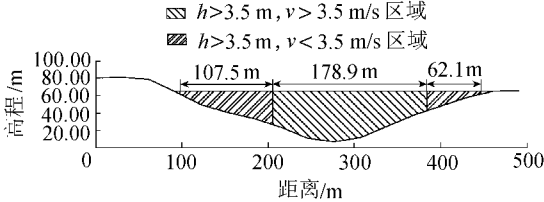


图 7 水田角 1 号断面水深和流速分布
($Q = 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H = 66.00\text{ m}$)

3 结 论

在三峡电站枯水季节的日调节期间,由于葛洲

坝枢纽工程的反调节作用,三峡大坝至葛洲坝两坝间河段的水位日变化率、小时变化率、流速大小及水面比降均满足万吨级船队的航行条件。

洪水期两坝间碍航段主要位于水田角、莲沱弯道、喜滩、狮子脑、石牌弯道及偏脑等处。在现有 2.5 m/s 航速的通航标准及葛洲坝坝前水位 66.00 m 的情况下,水田角河段的通航限制流量约为 30 000 m³/s,当葛洲坝坝前水位降至 63.00 m 运用时,通航流量减小到 25 000 m³/s。对于单船上行限制流速 3.5 m/s 的情况,两坝间通航限制流量可提高到 40 000 m³/s。

参考文献:

[1] 舒荣龙,陈桂馥,杜宗伟.提高三峡-葛洲坝两坝间通航能力试验研究[J].人民长江,2005(7):31-33.
[2] 舒荣龙,周小平,杜宗伟.三峡-葛洲坝两坝间河段通航技术研究[J].水运工程,2005(3):62-65.
[3] 潘家铮.三峡工程从根本上改变了川江航运面貌[J].中

国三峡建设,2004(4):10-12.

[4] 姚仕明,张超,王龙,等.分汊河道水流运动特性研究[J].水力发电学报,2006,25(3):49-52.
[5] 姚仕明.三峡葛洲坝通航水流数值模拟及航运调度系统研究[D].北京:清华大学,2006.
[6] 王远航.两坝间长河段冲淤过程数值模拟[D].北京:清华大学,2005.
[7] 姚仕明,王兴奎,张超,等.曲线同位网格的三维水流数学模型[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(3):336-340.
[8] 姚仕明,王兴奎,张超,等.两坝间河段通航水流条件的三维数值模拟[J].水科学进展,2007,18(3):374-378.
[9] 孙尔雨,李发政.三峡工程提前兴建地下电站日调节运行对两坝间及葛洲坝下游通航的影响试验报告[R].武汉:长江科学院,1997.
[10] 西南水运工程科学研究所,长江科学院.两坝间(葛洲坝—三峡)通航水流技术标准试验研究[C]//水利部科技教育司.长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题研究报告集.武汉:武汉工业大学出版社,1993.

(收稿日期:2010-01-23 编辑:骆超)

(上接第 32 页)

由式(9)可以看出,决定收缩变形过程的是指数函数 $1 - e^{-bt}$,且参数 b 与构件尺寸和形状无关。因此,即便通过各项修正系数进行修正,其收缩过程线的形状也均为指数函数,同时最终收缩持续时间也相同。可见,仅就断面尺寸而言,如实际构件断面尺寸与标准状态的 20 cm × 20 cm 相差越大,其计算结果与实际相比相差越大。有的涵闸工程用这类公式对涵闸底板和闸墩进行计算,由于其断面尺寸均在 1 ~ 2 m 范围,甚至更大,因此计算结果会有较大误差。

b. 即使对于断面尺寸为 20 cm × 20 cm 的构件,其断面上的湿度和干缩变形分布也是不均匀的,式(9)的计算结果实际上代表构件断面上的平均干缩变形,利用这个结果只能做一些外界约束应力的简单计算分析。由于没有进行湿度场分析,不能反映构件内湿度的不均匀分布,也就不能确切地说明由于构件自身约束产生的干缩应力,不能解释混凝土表层干缩受到内部约束而产生的干缩应变和表面裂缝现象。

参考文献:

[1] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等.水工混凝土结构的温度应力和温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976:373-376.
[2] CARLSON R W. Drying shrinkage of large concrete member

[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1937, 35(1): 327-336.

[3] BAZANT Z P, WANG T S. Spectral analysis of random shrinkage in concrete structure[J]. J of the Eng Mech Division, ASCE, 1984, 110(2): 173-186.
[4] 王同生.混凝土结构的随机温度应力[J].水利学报,1985(1):23-30.
[5] 王同生.混凝土结构的干缩应力[J].土木工程学报,1985,18(1):16-28.
[6] 刘勇军.水工混凝土温度与防裂技术研究[D].南京:河海大学,2000.
[7] 马跃先,陈晓光.水工混凝土的湿度场及干缩应力研究[J].水力发电学报,2008,27(3):38-42.
[8] 南京水利科学研究院材料结构研究所.淮河入海水道近期工程二河枢纽工程混凝土试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院材料结构研究所,2000.
[9] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工程出版社,1997:20-25.

(收稿日期:2009-11-20 编辑:骆超)

