

大体积非杆系混凝土承载板的配筋

何学,汪基伟,冷飞

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要:以实际工程为背景,采用模拟施工法和叠合梁法计算大体积非杆系混凝土承载板的应力,讨论两种方法所得结果的区别及不同弹性模量随时间变化的计算公式对计算结果的影响,再按应力图形法进行承载力配筋,并采用钢筋混凝土有限元法进行裂缝验算。计算结果表明:采用模拟施工法计算时,不同弹性模量随时间变化的计算公式对最大主拉应力与关键截面的主拉应力影响不大;虽然模拟施工法得到的拉应力最大值大于叠合梁法,但两者所得应力分布规律相同,关键截面的主拉应力和承载力所需的配筋量相近;按应力图形法所配钢筋能满足裂缝宽度的要求;大体积非杆系混凝土承载板的配筋设计可采用简单的叠合梁法计算应力分布,按应力图形法配筋,除特别重要的结构外一般可不用钢筋混凝土有限元法进行裂缝宽度计算。

关键词:大体积混凝土;结构配筋;模拟施工法;叠合梁法;应力图形法;有限元法

中图分类号:TU375.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)01-0058-04

Reinforcement of massive non-member concrete bearing plate//HE Xue, WANG Jiwei, LENG Fei (College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The stress of massive non-member concrete bearing plate is calculated based on a practical project by means of the simulating construction method and the composite beam method. The differences between their calculated results as well as the influences of different formulae for the variation of elastic modulus with time are discussed. The reinforcement of bearing capacity is determined by use of the stress graphic method, and the crack width is verified by means of the reinforced concrete finite element method (RCFEM). The results show that the maximum tensile principal stress and tensile force of the key cross section are not obviously affected by the formula for the variation of elastic modulus with time by applying the simulating construction method. Although the maximum tensile principal stress yielded by the simulating construction method is larger than that by the composite beam method, the distribution laws of their calculated stresses are the same, and their tensile forces and reinforcements of bearing capacity of the key cross section are very close. The reinforcement according to the stress graphic method can meet the requirements of crack width control. The distribution of stress of massive non-member concrete bearing plate can be calculated by means of the simple composite beam method, and the reinforcement can be determined by use of the stress graphic method. It is not necessary to employ RCFEM to verify the crack width for similar structures except special ones.

Key words: massive concrete; structural reinforcement; simulating construction method; composite beam method; stress graphic method; finite element method

工程中处理水电站坝基内深槽的一般方法是先用混凝土替换,再浇筑坝体。某工程为加快施工进度,提出采用钢筋混凝土承载板洞挖全置换混凝土方法处理深槽,具体为:①横跨深槽设置厚13.5m的钢筋混凝土承载板;②坝前设置防渗体;③浇筑上部坝体混凝土,同时挖除承载板下方深槽内的砂卵石;④深槽内回填混凝土并灌浆。在这种处理方式中,承载板承担了上部两个坝段的自重,并将其传递至深槽两边的基岩之上,是关键承重结构,因此承

载板的配筋设计是置换混凝土法成功的关键。

承载板属于大体积非杆系混凝土结构,一般按应力图形法进行配筋,对重要的非杆系混凝土结构还宜采用钢筋混凝土有限元法进行裂缝控制验算^[1-2]。

按应力图形配筋首先要合理确定承载板的最不利应力分布,因此本文采用模拟施工法和叠合梁法对承载板的应力分布进行计算,讨论两种方法及不同弹性模量随时间变化计算公式对计算结果的影

响;再采用钢筋混凝土有限元法模拟施工过程,计算裂缝开展,进行裂缝宽度验算。

1 计算模型与计算条件

选取最危险剖面,按平面应变问题进行计算,剖面尺寸见图1。承载板分5层浇筑,其高度分别为6.0 m、1.5 m、2.0 m、3.0 m和3.0 m;坝体碾压混凝土以每层高度3.0 m浇筑,有14层,即承载板加坝体共分19层浇筑。线性与非线性计算均模拟分层浇筑的施工过程。

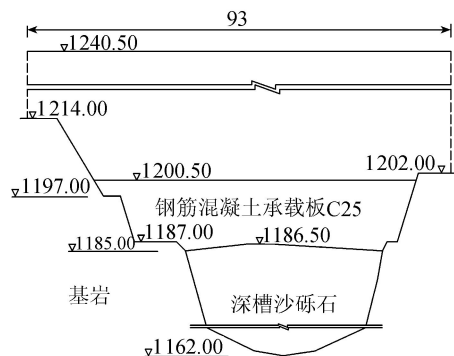


图1 计算剖面示意图(单位:m)

模型取1 m宽,基础深取承载板底高程向下86 m,基础宽取从承载板底部向左右各延长120 m。基础的底部、左右侧均布置法向链杆支座。

计算采用汪基伟等^[3]自行研制的钢筋混凝土有限元软件 HohaiRCFE-P,该程序已应用于较多工程的配筋研究^[4-6]。承载板、坝体与基岩均采用4~8结点等参单元,本文需计算裂缝宽度,承载板的网格,特别是裂缝出现区域划分得很密,考虑到裂缝垂直方向出现,因此水平方向单元尺寸不大于65 mm,在垂直方向大一些,不大于100 mm。

非线性计算时,考虑钢筋的作用,主要受力钢筋采用分离式单元模型计算,其中钢筋采用杆单元,黏结单元采用双弹簧单元;其他钢筋采用带黏结滑移埋置式单元^[7-8]。承载板采用等效单轴应变本构模型^[9-11]模拟;钢筋采用带硬化段的弹塑性模型模拟;钢筋与混凝土黏结滑移曲线采用 Houde 公式^[12]计算,并筋钢筋的表面积乘0.5的系数;基岩、坝体混凝土、砂砾石仍按线性材料计算。

坝体混凝土28 d弹性模量28 GPa,泊松比0.16,密度2500 kg/m³;基岩弹性模量14 GPa,泊松比0.26,在承载板浇筑前基岩沉降已完成,故不考虑自重;砂砾石弹性模量80 MPa,泊松比0.30,不考虑自重。

承载板混凝土按C25计算,28 d弹性模量 $E_c(28)=28$ GPa。混凝土弹性模量随时间的变化分别采用式(1)和式(2)计算,以分析弹性模量随时间

变化采用不同公式计算对应力的影响,其中式(1)为SL191—2008《水工混凝土结构设计规范》中的公式;式(2)为经验公式。

$$E_c(t) = 1.44[1 - \exp(-0.41t^{0.32})]E_c(28) \quad (1)$$

$$E_c(t) = 4.3 \times 10^4 \frac{t}{1.21 + t} \quad (2)$$

式中: t 为龄期。

非线性计算时材料强度取标准值,承载板混凝土28 d抗拉强度标准值 $f_{tk}(28)=1.78$ MPa,28 d抗压强度标准值 $f_{ck}(28)=16.70$ MPa;钢筋采用HRB335,弹性模量 $E_s=200$ GPa。

2 线性计算

2.1 模拟施工法计算

模拟施工法是模拟分层浇筑的施工过程,并考虑弹性模量随时间变化的计算方法。每浇筑层间隙时间为7 d,计算步长取1 d,弹性模量取该时段的平均值。计算起点为第1浇筑层浇筑的第1天,计算终点为最后浇筑层浇筑后第28天。

第1层混凝土浇筑后,承载板底部(A区)、上部肩部(B区、C区)受拉,而且上部肩部的主拉应力大于底部(图2(a))。第2层混凝土浇筑后,承载板底部的主拉应力已大于上部肩部的主拉应力(图2(b))。此后,各层混凝土浇筑后,主拉应力最大值均出现于承载板底部,见图2(c)。

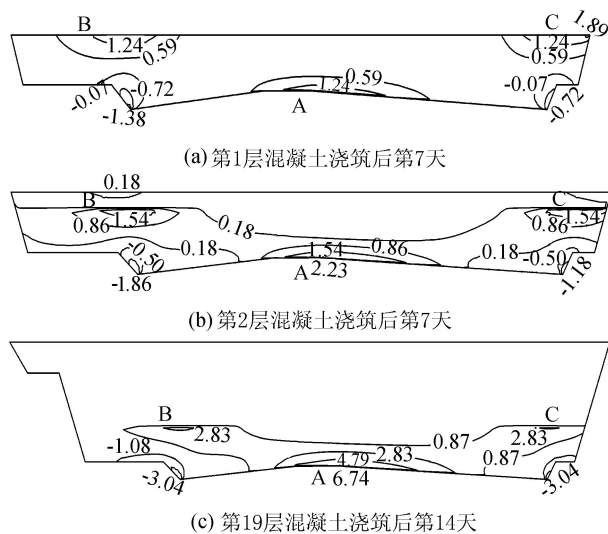


图2 模拟施工法得到的承载板主拉应力等值线(单位:MPa)

2.2 叠合梁法计算

叠合梁法仍模拟分层浇筑的施工过程,但不考虑弹性模量随时间的变化。假定承载板的第1层自重全部由岩基均匀承担,不在本层内产生应力。计算开始于第2层浇筑后,这时第1层的弹性模量取为28 d的弹性模量,第2层的自重按作用于第1层

顶面的分布荷载施加;第3层浇筑后,第2层的弹性模量取为28d的弹性模量,第3层的自重按作用于第2层顶面的分布荷载施加;其他各层,以此类推。

第1层浇筑、将第2层自重作为分布荷载施加后,承载板底部、上部肩部受拉,而且上部肩部的主拉应力大于底部。第2层浇筑、将第3层自重作为分布荷载施加后,承载板底部的主拉应力已大于上部肩部的主拉应力,这时应力最大值出现位置和模拟施工法相同。图3为第1层浇筑、将第2层自重作为分布荷载施加后,第18层浇筑、将第19层自重作为分布荷载施加后的承载板主拉应力等值线图。

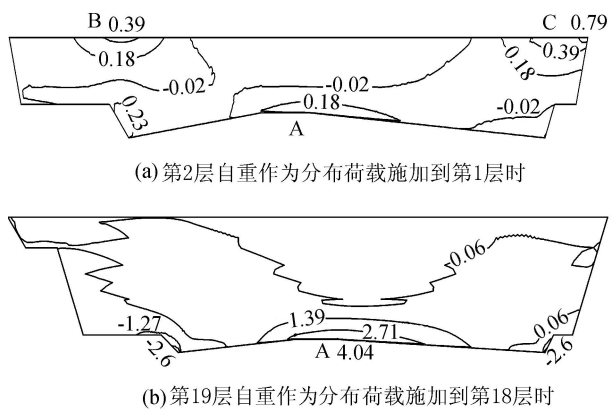


图3 叠合梁法得到的承载板主拉应力等值线(单位:MPa)

2.3 线性计算结果分析

表1给出了分别按模拟施工法和叠合梁法得出的各层浇筑完后承载板的最大主拉应力及其发生的位置和主拉应力在配筋方向投影形成的合力,其中,

模拟施工1的弹性模量采用式(1)计算,模拟施工2的弹性模量采用式(2)计算。由表1可以看出:

a. 第3层浇筑完成后,按上述3种方法进行线性计算得出的承载板最大主拉应力出现的位置相同,均出现于底拱中心附近,数值随着浇筑高程的增加而增大,即主拉应力分布规律与变化规律相同。

b. 当浇筑相同的混凝土层时,模拟施工1与模拟施工2得出的最大主拉应力相差都在10%以内,关键截面主拉应力在配筋方向投影形成的合力相差也都在10%以内。当混凝土浇筑完成后,主拉应力值更为接近,分别为6.74 MPa与6.27 MPa,相差7%;合力也更为接近,分别为10543.6 kN与10396.6 kN,相差1.4%。因此,弹性模量计算公式不同对承载板的应力影响不大。

c. 叠合梁法得到的主拉应力最大值明显小于模拟施工法,叠合梁法与模拟施工1相比,在浇筑承载板各层时,两者的主拉应力值相差60%左右;而在浇筑坝体时,两者的主拉应力值相差也在40%左右;在坝体浇筑完成后,两者相差42%。但关键截面主拉应力在配筋方向投影形成的合力大小较为接近,在浇筑承载板各层时,相差20%左右;而在浇筑坝体时,相差6%左右;在坝体浇筑完成后,只相差4.2%。叠合梁法计算简便,用于配筋的合力计算和模拟施工法相差很小,可以代替模拟施工法。

2.4 按应力图形法配筋

由表1所列主拉应力在配筋方向的合力值,按DL/T 5057—2009《水工混凝土结构设计规范》规定的应

表1 线性计算结果

浇筑层	模拟施工1			模拟施工2			叠合梁法		
	最大主拉应力/MPa	位置	合力/kN	最大主拉应力/MPa	位置	合力/kN	最大主拉应力/MPa	位置	合力/kN
1	1.89	C	1838.1	1.80	C	1753.2			
2	2.23	A	2159.6	2.23	C	1946.8	0.79	C	1699.2
3	2.79	A	2828.8	2.56	A	2696.9	0.92	A	2274.3
4	3.36	A	3749.4	3.09	A	3583.6	1.55	A	3011.8
5	3.81	A	4371.2	3.52	A	4211.6	1.98	A	3846.9
6	4.19	A	4997.2	3.87	A	4759.5	2.30	A	4419.4
7	4.51	A	5513.4	4.18	A	5299.1	2.56	A	5006.6
8	4.79	A	6139.8	4.45	A	5931.2	2.77	A	5792.1
9	5.05	A	6646.4	4.69	A	6483.1	2.96	A	6228.4
10	5.27	A	7118.7	4.90	A	6942.5	3.12	A	6733.8
11	5.48	A	7473.7	5.09	A	7183.9	3.26	A	7015.2
12	5.66	A	7896.9	5.26	A	7651.8	3.39	A	7484.9
13	5.83	A	8229.2	5.42	A	8016.2	3.51	A	7830.2
14	5.99	A	8644.1	5.57	A	8449.1	3.61	A	8285.1
15	6.13	A	8956.8	5.70	A	8806.7	3.71	A	8541.6
16	6.27	A	9209.7	5.83	A	9037.5	3.80	A	8893.2
17	6.39	A	9530.6	5.95	A	9304.8	3.89	A	9211.5
18	6.51	A	9936.3	6.06	A	9769.4	3.96	A	9619.4
19	6.74	A	10543.6	6.27	A	10396.6	4.04	A	10102.9

力图形法进行配筋计算,其中强度设计值 $f_y=300\text{ MPa}$ 。按模拟施工1所得的配筋用量为 $48\,325\text{ mm}^2/\text{m}$,模拟施工2为 $47\,648\text{ mm}^2/\text{m}$,叠合梁法为 $46\,305\text{ mm}^2/\text{m}$ 。按3种方法计算得出的配筋面积相差不大,按叠合梁法得出的钢筋用量选配筋如图4所示。

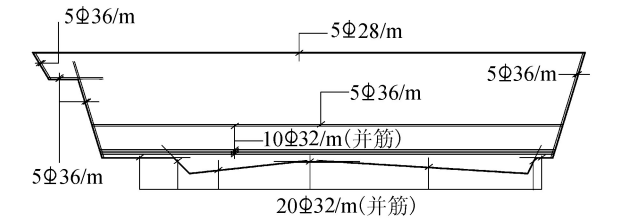


图4 配筋示意图

3 非线性计算

在第1层混凝土浇筑后,承载板底部主要裂缝为2条,最大裂缝宽度表面为 0.09 mm ,内部为 0.17 mm ;承载板上部左肩部也出现垂直裂缝,由于该处没有配筋,裂缝开展很深;承载板右侧沿基岩出现滑移。第2层混凝土浇筑后,在原底部裂缝的左侧又出现1条主要裂缝,承载板底部主要裂缝从2条增加到3条,最大裂缝宽度表面 0.11 mm 、内部 0.21 mm 。第7层混凝土浇筑后,在原底部裂缝的右侧又出现1条主要裂缝,承载板底部主要裂缝增加到4条,最大裂缝宽度表面 0.20 mm 、内部 0.44 mm 。最后一层混凝土浇筑后,主要裂缝为5条,最大裂缝宽度表面 0.34 mm 、内部 0.54 mm 。图5给出了施工过程中的承载板裂缝分布。

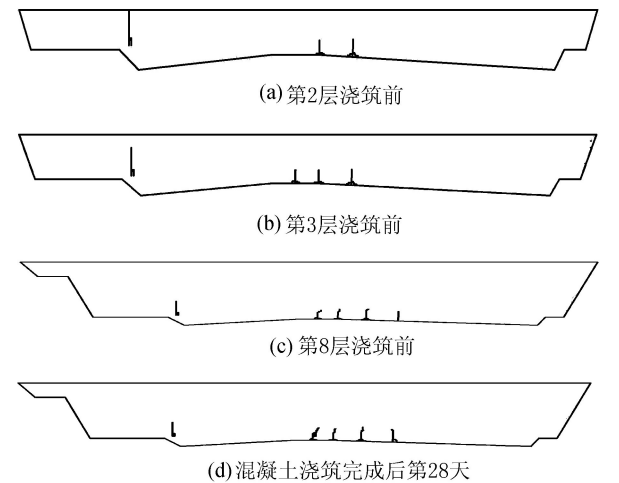


图5 承载板的裂缝分布

表2给出了各层浇筑后、下一层浇筑前的裂缝宽度。从表2可以看出,裂缝宽度呈表面小、内部大的形态,内部最大裂缝宽度出现于承载板底面第1排与第2排钢筋之间,最大裂缝宽度表面为 0.34 mm 、内部为 0.54 mm 。最大表面宽度略大于 0.30 mm 限值,可以认为配筋满足裂缝宽度的要求。

表2 各层浇筑后的最大裂缝宽度

浇筑层	最大裂缝宽度/mm		浇筑层	最大裂缝宽度/mm	
	表面	内部		表面	内部
1	0.09	0.17	11	0.24	0.44
2	0.11	0.21	12	0.25	0.46
3	0.13	0.26	13	0.26	0.48
4	0.15	0.31	14	0.28	0.48
5	0.17	0.36	15	0.29	0.51
6	0.19	0.40	16	0.30	0.51
7	0.20	0.44	17	0.31	0.52
8	0.28	0.40	18	0.33	0.53
9	0.22	0.42	19	0.34	0.54
10	0.23	0.43			

4 结 论

- a. 按不同弹性模量公式计算得出的承载板主拉应力值及其在配筋方向投影形成的合力大小都较接近,即弹性模量计算公式不同对承载板应力影响不大。
- b. 虽然叠合梁法得到的承载板主拉应力最大值比模拟施工法小许多,但两者所得应力分布规律相同,且关键截面主拉应力在配筋方向投影形成的合力大小和承载力所需的配筋量都比较相近。
- c. 按应力图形法所配钢筋能满足裂缝宽度的要求。
- d. 此类承载板的配筋设计可采用简单的叠合梁法计算应力分布,按应力图形法配筋,除特别重要的结构外一般可不用钢筋混凝土有限元法进行裂缝宽度计算。

参考文献:

[1] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].
[2] DL/T 5057—2009 水工混凝土结构设计规范[S].
[3] 汪基伟,张雄文. 水工钢筋混凝土结构有限元设计计算原则[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(5): 44-47. (WANG Jiwei, ZHANG Xiongwen. Calculation principle for finite element design of hydraulic reinforced concrete structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(5): 44-47. (in Chinese))
[4] 吴胜兴,汪基伟,朱虹. 三峡升船机塔柱筒体结构温度配筋研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1998, 26(2): 21-25. (WU Shengxing, WANG Jiwei, ZHU Hong. A study on temperature reinforcement of tube-structure of ship lift for the Three Gorges Project[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1998, 26(2): 21-25. (in Chinese))
[5] 汪基伟,钮新强,杨本新. 三峡升船机上闸首结构配筋方案研究[J]. 人民长江, 2001, 32(11): 8-10. (WANG Jiwei, NIU Xinqiang, YANG Benxin. Study on structural reinforcement for the upper lock head of ship lift for the Three Gorges Project[J]. Yangtze River, 2001, 32(11): 8-10. (in Chinese)) (下转第94页)

- Systems. Toronto: Computational Hydraulics International, 1999: 141-160.
- [5] National Climatic Data Center (NCDC). Climate maps of the united states: mean daily average temperature (annual) [R]. Washington D. C. : National Oceanic and Atmospheric Association, 2005.
- [6] HERB W R, JANKE B, MOHSENI O, et al. Thermal pollution of streams by runoff from paved surfaces [J]. Hydrological Processes, 2008, 22 (7) : 987-999.
- [7] VAN BUREN M A, WATT W E, MARSALEK J. Thermal enhancement of stormment runoff by paved surfaces [J]. Water Research, 2000, 34 (4) : 1359-1371.
- [8] ROSSI L, HARI R E. Screening procedure to assess the impact of urban stormwater temperature to populations of brown trout in receiving water [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2007, 3 (3) : 383-392.
- [9] U. S. Environmental Protection Agency. EPA region 10 guidance for pacific northwest state and temperature water quality standards [R]. Seattle: Region 10 Office of Water, 2003.
- [10] THOMPSON A M, KIM K, VANDERMUSS A J. Thermal characteristics of stormwater runoff from asphalt and sod surfaces [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44 (5) : 1325-1336.
- [11] BARBIS J, WELKER A L. Stormwater temperature mitigation beneath porous pavements [C] // RICHARD N. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. Providence: American Society of Civil Engineers, 2010: 3971-3979.
- [12] HERB W R, POSSLEY NELSON T M, CHAPMAN K A. Modeling the thermal impact of land use change in the Vermillion River trout stream watershed, MN [C] // KENNETH W. Watershed Management 2010. Madison: American Society of Civil Engineers, 2010, 1328-1339.
- [13] HERB W R, JANKE B, MOHSENI O, et al. Runoff temperature model for paved surfaces [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14 (10) : 1146-1155.
- [14] JONES M P, HUNT W F. Bioretention impact on runoff temperature in trout sensitive waters [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135 (8) : 577-585.
- [15] JONES M P, HUNT W F. Effect of storm-water wetlands and wet ponds on runoff temperature in trout sensitive waters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010, 136 (9) : 656-661.
- [16] WINSTON R J, HUNT W F, LORD W G. Thermal mitigation of urban storm water by level spreader-vegetative filter strips [J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137 (8) : 707-716.
- [17] ROSEEN R M, DIGENNARO N, WATTS A, et al. Preliminary results of the examination of thermal impacts from stormwater BMPs [C] // RICHARD N. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. Providence: American Society of Civil Engineers, 2010: 3424-3451.
- [18] GB 3838—2002 地表水环境质量标准 [S].
- [19] 户园凌. 低影响开发雨水系统综合效益的分析研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011.

(收稿日期: 2012 - 04 - 28 编辑: 熊水斌)

(上接第 61 页)

- [6] 汪基伟. 船闸裂缝成因及加固措施的研究 [J]. 水利水电技术, 2001, 32 (9) : 5-9. (WANG Jiwei. Study on cause of cracking and improvement measures of a lock [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32 (9) : 5-9. (in Chinese))
- [7] 汪基伟, 张雄文, 林新志. 考虑黏结滑移的平面组合式单元模型研究与应用 [J]. 工程力学, 2008, 25 (1) : 97-102. (WANG Jiwei, ZHANG Xiongwen, LIN Xinzh. Research and applications of a plane embedded combined element model considering bond and slip [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (1) : 97-102. (in Chinese))
- [8] 龙渝川, 张楚汉, 周元德. 钢筋混凝土嵌入式滑移模型 [J]. 工程力学, 2007, 24 (增刊 1) : 41-45. (LONG Yuchuan, ZHANG Chuhan, ZHOU Yuande. Embedded slip model for analyzing reinforced concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (Sup1) : 41-45. (in Chinese))
- [9] DARWIN D, PECKNOLD D A. Non-linear bi-axial stress-strain law for concrete [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977, 103 (2) : 229-241.
- [10] 汪基伟, 朱虹, 王红. 平面应变状态混凝土等效单轴应变本构模型研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30 (1) : 6-10. (WANG Jiwei, ZHU Hong, WANG Hong. Equivalent uniaxial constitutive model of concrete in plane strain [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30 (1) : 6-10. (in Chinese))
- [11] 汪基伟, 陈玉泉. 平面应变混凝土强度变形试验与等效单轴应变本构模型 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35 (5) : 775-779. (WANG Jiwei, CHEN Yuquan. Strength-deformation test and equivalent uniaxial constitutive model of concrete in plane strain [J]. Journal of Southeast University: Nature Sciences, 2005, 35 (5) : 775-779. (in Chinese))
- [12] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

(收稿日期: 2012 - 04 - 22 编辑: 熊水斌)