

碾压与常态混凝土组合的某升船机上闸首结构配筋方案

马亚岑,汪基伟,冷飞

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对既要控制裂缝宽度又要控制裂缝长度的碾压与常态混凝土组成的某升船机上闸首整体坞式结构,通过对比不同配筋方案的钢筋混凝土非线性有限元计算结果,提出以材料强度标准值所得裂缝长度和宽度进行底板裂缝控制从而确定底板常态混凝土最小厚度,以材料强度平均值所得裂缝长度确定钢筋布置范围的计算原则;同时给出了符合限裂设计要求的底板常态混凝土最小厚度和配筋方案,并探讨了缝面水压的不同施加方式对裂缝的影响。计算结果表明,当缝面水压按全水头分布施加时,若裂缝长度超过钢筋布置范围,则裂缝会不断扩展,引起结构失效;缝面水压按渗透压力分布和三角形分布施加时,裂缝扩展能够收敛,且前者所得的裂缝宽度和长度均大于后者。

关键词:钢筋混凝土;上闸首结构;升船机;配筋方案;裂缝宽度;裂缝长度;有限元分析

中图分类号:U642;TV332 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0065-05

Determination of structural reinforcement schemes for upper lock head of a ship lift made of RCC and normal concrete//MA Yacen, WANG Jiwei, LENG Fei (College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is necessary to control crack width and crack length for the upper lock head of a ship lift, which is generally a dock-type structure made of roller compacted concrete (RCC) and normal concrete. Based on the comparison of the nonlinear finite element calculation results of reinforced concrete with different structural reinforcement schemes, a calculation principle was proposed. According to this principle, concrete standard strength is used to control crack width and crack length in the bottom slab and to determine the minimum thickness of normal concrete of the bottom slab. The crack length, determined by average strength of concrete, is used to determine the scope of reinforcement. The minimum thickness and the structural reinforcement scheme of normal concrete bottom slab were suggested. The influence of applying ways of water pressure on the crack surface on cracks was analyzed. The results showed that when the water pressure on the crack surface was full water head, the cracks expanded until it exceeded the reinforcement scope, which caused structural failure. When the water pressure was seepage pressure and it was applied in a triangular distribution, the cracks was steady; both crack width and crack length obtained in the scenario with full water head are larger than that in the scenario with seepage pressure.

Key words: reinforced concrete; the upper lock head structure; ship lift; reinforcement schemes; crack width; crack depth; finite element analysis

1 工程概况

某升船机上闸首兼有挡水坝段及升船机通航闸首的双重功能,是该水利枢纽工程中的一个重要建筑物。该上闸首是由两种不同材料组合而成的整体坞式结构,其中425.0 m以下为碾压混凝土实体重力坝,上部航槽段为整体呈“U”形的常态混凝土结构。上闸首结构总长80.0 m,总宽42.0 m,坝高

117.7 m,航槽净宽12.0 m,两侧混凝土边墩底宽15.0 m;初步设计时,常态混凝土底板厚度取10.0 m,如图1所示。

上闸首的正常蓄水位为458.0 m,设计洪水位为461.3 m,校核洪水位为463.1 m。上闸首配筋设计的难点为底板配筋,它为限裂设计的非杆系混凝土结构,在运行期允许开裂,但如果裂缝过宽,高压水可能会渗透到裂缝面以致加剧裂缝的开展,甚至发

作者简介:马亚岑(1988—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事混凝土结构研究。E-mail:mayacen88@126.com

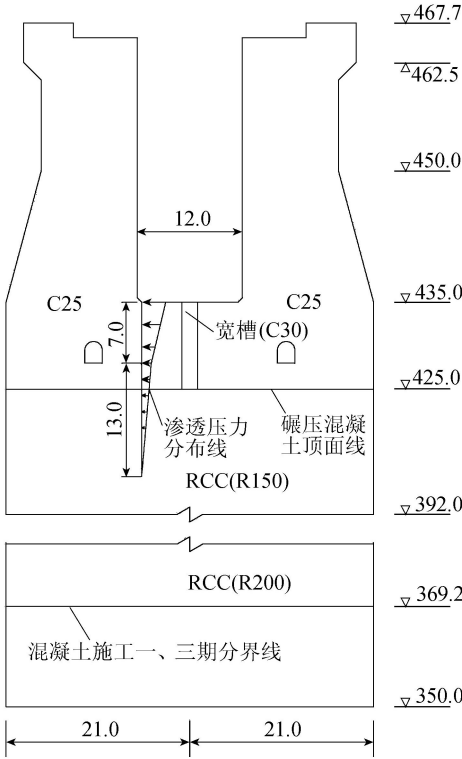


图1 上闸首结构剖面示意图(单位:m)

生劈裂破坏,影响结构安全。因此,上闸首底板结构配筋除需满足极限承载力要求外,还必须满足裂缝宽度要求。按现行水工混凝土结构设计规范,上闸首底板裂缝宽度限值可取0.25 mm,但大型上闸首底板实际设计时一般取0.20 mm。

由于碾压混凝土凝结时释放的水化热少,绝热温升明显低于常态混凝土,而且可采用振动碾压的方法施工,施工速度比常态混凝土快很多^[1-2]。因此,设计时希望尽量抬高碾压混凝土的高程,减小常态混凝土的厚度,达到加快施工进度目的。但碾压混凝土采用分层碾压的方法施工,抗渗性能差,若裂缝延伸到碾压混凝土会发生渗漏,因此上闸首底板配筋设计时不仅要限制裂缝宽度,还要尽量减小裂缝长度。

上闸首结构裂缝出现后应力状态不会出现显著的改变,按应力图形法计算钢筋用量就可满足其承载力要求^[3-4]。这类结构的裂缝开展不但与钢筋用量有关,更主要和钢筋的布置(钢筋间距与直径)有关。一个好的配筋方案应该是在满足承载力的条件下,通过合理的钢筋布置来减小裂缝宽度与长度,满足正常使用要求,而不是一味增加钢筋用量。由于目前尚无可计算非杆系混凝土结构裂缝宽度和长度的公式,本文采用钢筋混凝土非线性有限元方法来计算底板的裂缝宽度和长度,并对配筋方案进行研究^[5-6]。

2 计算模型

在上闸首标准段截取剖面按平面应变问题计算,见图1。计算采用的是自行研制的钢筋混凝土平面非线性有限元程序 HohaiRCFE-P,其中混凝土采用4~8 结点平面等参单元、等效单轴应变本构模型、Kupfer 强度准则、片状裂缝模型^[7];底板横向钢筋采用分离式单元模型,钢筋与混凝土之间的黏结滑移采用双弹簧单元、Houde 黏结滑移公式^[7];航槽角部的斜向钢筋无法放置在混凝土单元结点上,故采用有黏结的埋置式单元模型^[8],其中黏结滑移关系仍采用 Houde 黏结滑移公式。

为减小温度应力,该结构的常态混凝土在横向分2 块浇筑,底板中部设置宽槽,用于对接底板左右浇筑块的纵向受力钢筋,当底板温度下降到准稳定温度场时回填宽槽混凝土,使结构形成整体。计算模拟了这种施工过程,包括两个模型,模型1 为宽槽回填前,只有自重作用;模型2 为宽槽回填后,有自重和水压作用,共分10 个步骤施加荷载,其中第1~9 步为自重加航槽水压,第1 步水头为20 m,第2~6 步水头增量为1.0 m,第7~9 步水头增量分别为0.5 m、0.5 m 和0.3 m,第10 步是在第9 步荷载基础上再叠加缝面水压。

为明确裂缝分布进而求得裂缝宽度,除采用每次迭代只允许一个单元开裂的迭代流程^[9]外,在预计出现裂缝区域划分较细网格,其中沿水平向的网格尺寸小于100 mm。模型底部固结,共划分22 052 个单元。

3 配筋方案

3.1 计算工况

本文按应力图形法^[3]计算了满足承载力要求所需的钢筋用量。为满足限裂要求,在保持钢筋用量基本不变的前提下,通过调整钢筋直径和钢筋的布置,设计了5 种配筋方案(表1),其中方案I~IV 钢筋用量相同,方案V 的钢筋用量略大一些;各方案钢筋的水平间距均为200 mm,5 种配筋方案的主要

表1 上闸首底板配筋方案

方案	钢筋排数	自底板表面向下配筋		每米混凝土厚度上钢筋截面面积/mm ²
I	7	7 排	36@100mm	35 625
II	7	4 排	36@100mm+3 排 36@200mm	35 625
III	7	7 排	36@200mm	35 625
IV	7	4 排	36@200mm+2 排 36@400mm +1 排 36@500mm	35 625
V	8	4 排	36@200mm+2 排 36@400mm +2 排 32@500mm	38 580

区别是钢筋在沿底板厚度方向的布置不同。

现行水工混凝土结构设计规范^[34]规定,采用有限元进行裂缝控制验算时材料强度采用标准值,混凝土初始弹性模量可查规范取用,因此首先对上述5种配筋方案按标准值进行计算,计为工况1~工况5,这时 Houde 黏结滑移公式中的轴心抗压强度也取标准值。为预测上闸首结构实际裂缝开展状态,对其中2种较优方案按材料强度平均值进行计算,计为工况6和工况7,这时 Houde 黏结滑移公式中的轴心抗压强度也取平均值。

C25 混凝土轴心抗拉和轴心抗压强度标准值分别为 1.78 MPa 和 16.70 MPa,初始弹性模量为 28 GPa。对比 C15 混凝土和 R150 碾压混凝土 28d 龄期试块所测强度值和弹性模量发现,R150 碾压混凝土可近似按 C15 常态混凝土取值,轴心抗拉和轴心抗压强度标准值分别为 1.27 MPa 和 10.00 MPa,初始弹性模量为 22 GPa。取 C25 混凝土的变异系数为 0.16,可得 C25 混凝土轴心抗拉和轴心抗压强度平均值分别为 2.42 MPa 和 22.67 MPa。

按设计要求,计算时在主要裂缝面施加如图 1 所示的渗透压力,并以设计洪水水位作为裂缝控制水位。

3.2 计算结果

表 2 给出了各工况的裂缝计算结果,表中缝长为主要裂缝的长度,缝宽为最大裂缝宽度。图 2 为设计洪水水位下方案Ⅳ按弧度标准值计算得到的裂缝分布。从表 2 和图 2 可以看出,当混凝土强度采用标准值时:①正常蓄水位作用下,由于裂缝长度很小,不同配筋方案对裂缝结果没有影响。②设计洪水水位作用下,不考虑渗透压力时只出现一条主要裂缝(裂缝 1),见图 2(a);考虑渗透压力时,在裂缝 1 所在位置施加图 1 所示的渗透压力,即按渗透压力分布施加缝面水压,仍只出现一条主要裂缝,裂缝长度增大许多,但小于渗透压力分布长度,见图 2(b)。③设计洪水水位作用下,不考虑渗透压力时,方案Ⅰ~Ⅴ的缝长分别为 6.1 m、6.0 m、5.7 m、2.2 m、2.5 m,

表面裂缝最大宽度分别为 0.14 mm、0.14 mm、0.14 mm、0.11 mm、0.11 mm。考虑渗透压力后,所有方案的裂缝长度和宽度均增大,方案Ⅰ~Ⅴ的缝长分别为 16.4 m、15.9 m、15.0 m、7.0 m、6.1 m,表面裂缝最大宽度分别为 0.20 mm、0.19 mm、0.19 mm、0.15 mm、0.14 mm。④方案Ⅳ和方案Ⅴ的裂缝长度和宽度明显小于其他方案,可作为备选方案。

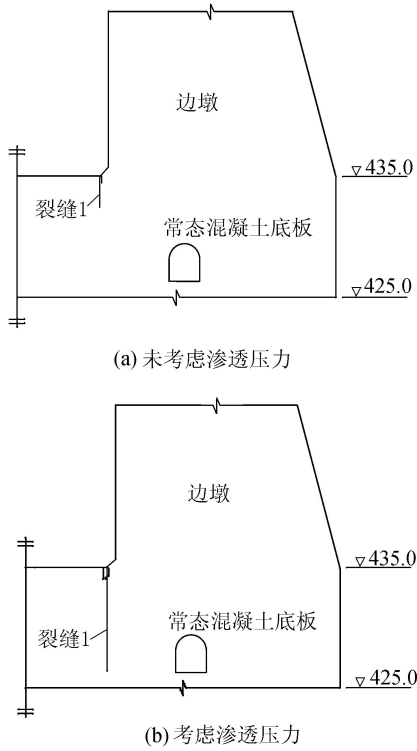


图 2 设计洪水水位下配筋方案Ⅳ按弧度标准值计算得到的裂缝分布(单位:m)

当方案Ⅳ和方案Ⅴ的混凝土强度采用平均值计算时:①正常蓄水位作用下,方案Ⅳ和方案Ⅴ均未开裂。②设计洪水水位作用下,不考虑渗透压力时方案Ⅳ和方案Ⅴ的缝长相同,考虑渗透压力后分别为 2.1 m 和 2.2 m。

3.3 计算结果分析

a. 当裂缝长度大于钢筋沿底板厚度方向布置范围时,钢筋布置的范围越大,裂缝长度越小。

表 2 上闸首底板裂缝计算结果

计算 工况	配筋 方案	底板 厚度 /m	混凝土 强度	正常蓄水位			设计洪水水位			设计洪水水位+渗透压力		
				缝长/m	表面缝宽/mm	内部缝宽/mm	缝长/m	表面缝宽/mm	内部缝宽/mm	缝长/m	表面缝宽/mm	内部缝宽/mm
1	I	10	标准值	0.2	0.05	<0.05	6.1	0.14	0.20	16.4	0.20	0.79
2	II	10	标准值	0.2	0.05	<0.05	6.0	0.14	0.17	15.9	0.19	0.72
3	III	10	标准值	0.3	0.05	<0.05	5.7	0.14	0.15	15.0	0.19	0.57
4	IV	10	标准值	0.3	0.05	<0.05	2.2	0.11	0.06	7.0	0.15	0.21
5	V	10	标准值	0.3	0.05	<0.05	2.5	0.11	0.06	6.1	0.14	0.15
6	IV	10	平均值	未开裂	未开裂	未开裂	0.5	0.08	0.05	2.1	0.10	0.07
7	V	10	平均值	未开裂	未开裂	未开裂	0.5	0.08	0.05	2.2	0.10	0.07
8	IV	8	标准值	0.3	0.05	<0.05	2.2	0.11	0.06	7.3	0.17	0.25
9	IV	8	平均值	未开裂	未开裂	未开裂	0.5	0.08	0.05	2.1	0.10	0.07

b. 按材料强度标准值得到的裂缝长度和宽度均远大于按平均值算得的结果,这是因为标准值具有 95% 保证率,按标准值算得的裂缝长度和宽度小于实际裂缝宽度和长度的可能性很小;而材料强度平均值接近实际强度,按平均值算得的裂缝长度和宽度接近实际出现的裂缝长度和宽度。因此,从设计的可靠性出发,应该采用材料强度标准值进行裂缝宽度验算,根据强度标准值得到的裂缝长度来确定常态混凝土底板的最小厚度,而不是采用平均值。

c. 由表 2 看到,采用强度标准值计算时方案 V 的裂缝长度和宽度总体上最小,方案 V 较方案 IV 好,这是因为方案 V 钢筋沿底板厚度方向布置的范围最大,而且钢筋全部布置在裂缝长度范围内。但同时看到,采用强度平均值计算时,在设计洪水位+渗透压力作用下方案 V 的裂缝长度反而大于方案 IV,这因为方案 V 是将方案 IV 的最底部 1 排 36@ 500 mm 变为 2 排 32@ 500 mm,增加的一排钢筋已超出了开裂范围,对限制裂缝不起作用,而原来位置上的钢筋直径减小,使得方案 V 的裂缝长度反而比方案 IV 的长。此时,方案 IV 优于方案 V。

从上面讨论可知,从减小裂缝长度的角度出发,钢筋沿底板厚度方向布置的范围越大越好,但超过混凝土实际开裂范围的钢筋不起作用,由于开裂范围内钢筋用量减少,结构实际裂缝长度反而增大。因此,对于碾压与常态混凝土组合上闸首结构,在采用钢筋混凝土有限元进行裂缝控制验算和配筋方案选择时,采用“以材料强度标准值所得裂缝长度和宽度进行底板裂缝控制,确定底板常态混凝土最小厚度,以材料强度平均值所得裂缝长度确定钢筋布置范围”的计算原则比采用“以材料强度标准值进行裂缝控制验算”更为合理。根据该计算原则,方案 IV 既满足裂缝长度和宽度要求,裂缝不会贯穿底板常态混凝土,而且钢筋都布置在实际裂缝长度范围内,正常运行时所有钢筋都能起作用,较方案 V 更好。

在设计洪水位+渗透压力作用下方案 IV 按材料标准值计算得到的裂缝长度为 7.0 m,考虑温度作用等因素,偏安全地取常态混凝土底板厚度为 8 m,比初步设计的厚度减小 2 m。

常态混凝土底板厚度减小 2 m 后,结构的材料分区有所变化,因此对配筋方案 IV 按新的常态混凝土厚度重新计算,计算结果也列于表 2,见工况 8 和工况 9。对比工况 8 和工况 4、工况 9 和工况 6 的计算结果,表明底板厚度减小 2 m 后计算结果变化很小。

4 缝面水压施加方式对裂缝长度与宽度的影响

如果裂缝过宽,高压水可能会渗透到裂缝面,加剧裂缝的开展,设计常要求裂缝计算时考虑缝面水压的作用。缝面上水压的施加范围以及如何取值,目前尚无明确的结论,李宗利等^[10-11]认为在恒定高水头作用下,当裂缝宽度大于 0.02 mm 时,缝面水压基本上呈全水头水布,同时又指出缝面水压分布与缝面的粗糙程度有关,但没有给出影响程度的具体结论。

在实际计算中,缝面水压取值常根据设计要求选用不同的分布,如全水头分布、三角形分布和按渗透压力分布等。本节对选定后的配筋方案(方案 IV)再按全水头和三角形分布来计算裂缝宽度和长度,以讨论不同缝面水压施加方式对裂缝长度和宽度的影响,见表 3 中的工况 10 和工况 11。

缝面水压采用全水头和三角形分布时,水压分布高度与裂缝长度相同,同时考虑缝面水压与裂缝之间的耦合作用,即施加缝面水压力后,若裂缝继续开展则在新的缝面上重新施加缝面水压力,直至裂缝稳定为止。

表 3 给出了方案 IV 在设计洪水位+缝面水压作用下的底板裂缝宽度和长度,材料强度均采用标准值,为了便于和缝面水压按渗透压力分布的计算结果比较,将工况 4 结果也列于表 3。从表 3 看出:

a. 工况 10 缝面水压按全水头施加,在前一次计算得到的主裂缝缝长范围施加全水头水压后,裂缝长度和宽度都有大幅增长,第 3 次计算得到的裂缝长度已达 13.5 m,若继续施加缝面水压,裂缝会无限地开展下去,即裂缝开展不收敛。这是因为,当缝面水压为全水头分布时,裂尖水压最大,应力集中严重;而在设计洪水位作用下不考虑缝面水压时,裂缝

表 3 缝面水压作用下上闸首底板裂缝计算结果

计算 工况	底板 厚度/ m	缝面 水压力分布	第 1 次			第 2 次			第 3 次		
			缝长/m	表面缝宽/mm	内部缝宽/mm	缝长/m	表面缝宽/mm	内部缝宽/mm	缝长/m	表面缝宽/mm	内部缝宽/mm
10	10	全水头分布	5.1	0.14	0.11	7.3	0.16	0.23	13.5	0.25	0.44
11	10	三角形分布	2.2	0.11	0.06						
4	10	渗透压力分布	7.0	0.15	0.21						

注:①“第 1 次”表示设计洪水位下混凝土开裂后第 1 次在主裂缝面上施加缝面水压;“第 2 次”表示在第 1 次基础上,在新的主裂缝面上施加缝面水压,以此类推。②工况 11 和工况 4 第 2 次和第 3 次计算结果无数据,因为在第 1 次施加缝面水压后裂缝已稳定,不再进行第 2 次和第 3 次的计算。

长度已达 2.2 m,超出钢筋的布置范围,施加缝面水压后裂尖应力集中得不到有效控制,导致裂缝进一步扩展,新开裂的裂缝尖端产生更大的水头,如此循环使裂缝开展不能收敛。因此,应严格按规范要求控制表面裂缝宽度,避免裂缝面上出现全水头分布水压。

b. 工况 11 缝面水压为三角形分布,第 1 次施加缝面水压后,裂缝长度和宽度不变,表明裂缝已稳定。说明裂尖水压为零时,不存在应力集中,即使裂尖超出钢筋布置的范围,裂缝扩展仍能稳定。

c. 工况 4 缝面水压按渗透压力施加,裂缝扩展时裂尖水压随着裂缝长度的增大越来越小,裂缝扩展能够稳定。由于渗透压力分布长度大于工况 11 的缝面水压分布长度,因此计算得到的裂缝长度和宽度都大于三角形分布。

5 结 论

a. 对于既要控制裂缝宽度又要控制裂缝长度的碾压与常态混凝土的某升船机上闸首结构,可以采用“以材料强度标准值所得裂缝长度和宽度进行底板裂缝控制,确定底板常态混凝土最小厚度,以材料强度平均值所得裂缝长度确定钢筋布置范围”的计算原则来进行有限元裂缝控制验算。采用该原则,可得到符合设计要求的底板常态混凝土最小厚度和配筋方案,既加快了施工进度,又满足裂缝宽度要求,避免裂缝延伸到碾压混凝土引起渗漏。

b. 方案 IV 是该结构比较合适的配筋方案,在此配筋下常态混凝土底板厚度可比初步设计减小 2 m。

c. 缝面水压按渗透压力施加所得的裂缝长度和宽度大于按三角形分布所得结果。当缝面水压按全水头分布施加时,若裂缝长度超过钢筋布置范围,则裂缝会不断扩展,引起结构失效,因此应严格按照规范要求控制表面裂缝宽度,避免裂缝面上出现全水头分布水压。

参考文献:

[1] 秦明慧. 碾压混凝土与普通混凝土异同探讨[J]. 红水河,2008,27(1):54-57. (QIN Minghui. The similarities and differences explore between roller compacted concrete and normal concrete[J]. Hongshui River,2008,27(1):54-57. (in Chinese))

[2] 石妍. 碾压混凝土强度特性的研究[J]. 水力发电学报,2006,25(1):85-89. (SHI Yan. Research on strength of roller compacted concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2006,25(1):85-89. (in Chinese))

[3] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].

[4] DL/T 5057—22009 水工混凝土结构设计规范[S].

[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. The study on structural reinforcement schemes of the upper lock head of Three Gorges ship lift[J]. Yangtze River,2001,32(11):8-10. (in Chinese))

[6] 何学,汪基伟,冷飞. 大体积非杆系混凝土承载板的配筋[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):58-61. (HE Xue, WANG Jiwei, LENG Fei. Reinforcement of massive non-member concrete bearing plate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(1):58-61. (in Chinese))

[7] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.

[8] 汪基伟,张雄文,林新志. 考虑粘结滑移的组合式单元模型研究与应用[J]. 工程力学,2005,25(1):95-102. (WANG Jiwei, ZHANG Xiongwen, LIN Xinzhi. Research and applications of a plane embedded combined element model considering bond and slip[J]. Engineering Mechanics,2005,25(1):95-102. (in Chinese))

[9] 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))

[10] 李宗利,王亚红,王正中. 恒定水头岩体混凝土裂纹水入侵过程分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(4):13-17. (LI Zongli, WANG Yahong, WANG Zhengzhong. Process analysis of water infusion in rock mass or concrete fracture under constant water head[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2010,42(4):13-17. (in Chinese))

[11] 李宗利,任青文. 自然营造力作用下岩体混凝土水力劈裂分析与探讨[J]. 岩土力学,2008,29(8):2121-2125. (LI Zongli, REN Qingwen. Analysis and discussion on rock and concrete material hydraulic fracturing under natural power[J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(8):2121-2125. (in Chinese))

(收稿日期:2013-06-19 编辑:骆超)

