

淮安某立交地涵温控防裂措施仿真分析

闪黎,吴健,张勇

(水利部淮河水利委员会治淮工程建设管理局,安徽蚌埠 233001)

摘要 为解决立交地涵施工期混凝土的温控防裂问题,用三维温度场和应力场有限元法对淮安某立交地涵工程混凝土结构进行施工期的仿真计算分析,对结构施工分层、设置后浇带、部分整体浇筑和多种保温等混凝土防裂措施进行了计算和比较,了解这些防裂措施的效果,进而找出最有效的防裂措施,为工程混凝土结构的施工提供科学指导.

关键词 立交地涵 混凝土裂缝 有限元 施工分层 整体浇筑 后浇带 保温措施

中图分类号 :U449 ;O241.82 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2004)05-0041-04

立交地涵是实现两条不同河道交叉运行的立体交叉建筑物.大型立交地涵具有工程量大、施工时间长、复杂度高的特点.近几年来,我国已有许多大型工程需建立立交地涵,如淮河入海工程、南水北调工程等.因立交地涵混凝土浇筑量大、结构形式复杂以及纵横向尺度大等,施工期被嵌固于底板之上的墩墙混凝土结构容易产生裂缝.裂缝的存在不但削弱了墩墙的整体性,引起应力重分布,影响安全运行,而且有时还会引起各种工程问题,如渗漏(边墙处)、不均匀沉陷、钢筋锈蚀等.因此,预防混凝土裂缝将是立交地涵建设和运行的关键课题.防止混凝土裂缝的产生和发展目前已有许多工程措施,如分缝(或设置后浇带)、保温和优化配合比等.但是,这些工程措施对防裂的影响大多是定性的,在立交地涵工程中鲜有定量分析.本文利用三维温度场和应力场有限元仿真程序,精细模拟各种施工因素、环境条件和防裂措施等,定量地探讨各种影响因素对淮安某立交地涵裂缝产生和防止的具体作用,为工程设计和施工提供具体依据和指导.

1 仿真计算原理

1.1 温度场计算原理

据变分原理,三维非稳定温度场问题的求解^[1]可取如下泛函:

$$I(T) = \iiint_{R_t} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) T \right\} dx dy dz +$$

$$\iint_{s_t^3} \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{T}{2} - T_a \right) T ds \tag{1}$$

式中: R_t 为计算域; T 为温度; a 为导温系数; λ 为导热系数; β 为表面散热系数; T_a 为环境温度; t 为时间; τ 为混凝土龄期; s_t^3 为第三类边界条件,边界表面的热辐射量与内外温差成比例.

由泛函的驻值条件 $\frac{dI}{dT} = 0$ 和时间差分,可得向后差分的温度场仿真计算递推方程:

$$\left(H + \frac{1}{\Delta t_n} R \right) T_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n} R T_n + F_{n+1} = 0 \tag{2}$$

式中: H 为热传导矩阵; R 为热传导补充矩阵; T_n 和 T_{n+1} 为结点温度列阵; F_{n+1} 为结点温度载荷列阵.

1.2 徐变应力场计算原理

根据弹性徐变理论,可用增量初应变方法计算施工期和运行期由混凝土的自生体积变形、变温和干缩等因素引起的混凝土结构应力.应变增量为

$$\Delta \epsilon_n = \Delta \epsilon_n^e + \Delta \epsilon_n^c + \Delta \epsilon_n^T + \Delta \epsilon_n^s + \Delta \epsilon_n^0 \tag{3}$$

式中: $\Delta \epsilon_n^e$ 为弹性应变增量; $\Delta \epsilon_n^c$ 为徐变应变增量; $\Delta \epsilon_n^T$ 为温度应变增量; $\Delta \epsilon_n^s$ 为干缩应变增量; $\Delta \epsilon_n^0$ 为自生体积应变增量.其中徐变应变增量 $\Delta \epsilon_n^c$ 由下式计算:

$$\Delta \epsilon_n^c = \eta_n + C(t_n, \tau_n) Q \Delta \sigma_n \tag{4}$$

其中
$$\eta_n = \sum_s (1 - e^{-r_s \Delta \tau_n}) \omega_{sn} \tag{5}$$

$$\omega_{sn} = \omega_{s,n-1} e^{-r_s \Delta \tau_{n-1}} + Q \Delta \sigma_{n-1} \Psi_s(\tau_{n-1}) e^{-0.5 r_s \Delta \tau_{n-1}} \tag{6}$$

作者简介 闪黎(1963—),男(回族),安徽淮南人,高级工程师,从事水工混凝土防裂研究.

$$C(t_n, \tau_n) = \sum_s \Psi_s(\tau) [1 - e^{-r_s(t-\tau)}] \quad (7)$$

徐变应变增量法计算的详细过程见文献[1,2].

2 仿真计算结果及分析

淮安某立交地涵顺水流方向长 108.604 m,垂直水流方向长 122.48 m,采用钢筋混凝土上槽下洞立体结构型式,洞身为三孔一联的钢筋混凝土箱形结构,结构最长段为 31.272 m,宽 24.4 m(图 1).施工模板为竹胶模板,厚 1.2 cm.

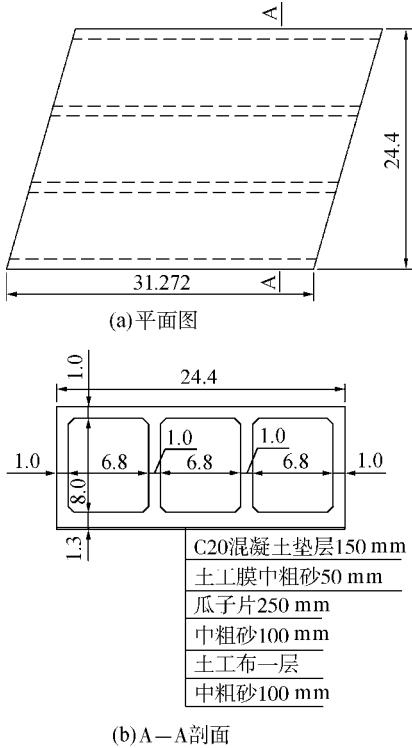


图 1 立交地涵平面图和剖面图(单位:m)

计算时取三孔一联结构的一半作为计算域,连同一定大小的地基,共划分结点 31 284 个,单元 24 848 个,图 2 为网格透视图.计算所需的热力学参数如下:导热系数为 $0.004\ 15\ \text{m}^2/\text{h}$,导热系数为 $9.43\ \text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$,表面散热系数(有模)为 $20.44\ \text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$,表面散热系数

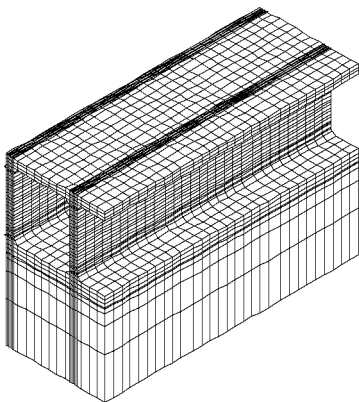


图 2 立交地涵网格透视图

(无模)为 $36.68\ \text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$,绝热温升为 $31.6\tau/(0.97 + \tau)^\circ\text{C}$.地涵混凝土力学特性参数如下:热膨胀系数为 $0.933 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,泊松比为 0.18,弹性模量 $E = 32.04\exp(-2.26\tau^{-1.26})\text{GPa}$,体积收缩变形量 $\epsilon = 1\ 72\exp(-1.48\tau^{-0.71}) \times 10^{-6}$ (包含了混凝土的自生体积变形和干缩变形),抗拉强度 $R_L = 2.37\exp(-6.19\tau^{-1.23})\text{MPa}$.

计算步骤严格按照施工过程进行,共划分了 232 个时步,做到施工期间每 2 h 计算 1 次,施工后每 4.8 h 计算 1 次.由于气温日变化难以确定,计算时采用日平均气温拟合曲线.为使结果具有可比性和可靠性,选取 4 个特征点进行温度、应变和应力的对比计算和分析,这 4 个点的位置见图 3.

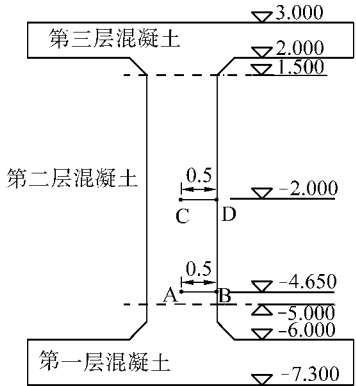


图 3 计算结果特征点布置示意图(单位:m)

对地涵等大体积混凝土常用的防裂措施有:①掺加粉煤灰,减少水泥用量,降低混凝土的绝热温升;②实施降温措施,降低混凝土入仓温度和内部温度峰值;③分缝或设置后浇带;④保温措施,如挂草袋、铺保温被、贴聚乙烯泡沫塑料板等;⑤缩短间歇期;⑥整体浇筑或部分整体浇筑;⑦添加微膨胀剂,以补偿温度收缩变形;⑧多用常态混凝土,少用泵送混凝土,降低混凝土的收缩和徐变变形量.由于立交地涵为薄壁结构且载荷较大,水泥用量较多,因而降低混凝土的绝热温升受到一定的限制;由于混凝土浇筑量不是很大且不具备连续浇筑条件,降低入仓温度势必投入过大而不现实;另外,缩短间歇期也因为钢筋和模板工程工期较长而潜力较小.相对来说,分缝或设置后浇带、保温和部分整体浇筑对施工影响不大,易于实现,成为立交地涵防裂措施的首选.下面通过计算和分析,定量地考察这 3 种工程措施对地涵混凝土防裂的影响.因垂直水流方向和竖向的应力较小,只取顺水流方向(y 轴坐标向)的应力(σ_y)进行分析.

2.1 典型工况

典型工况的施工分 3 层进行,如图 3 所示.第一和第二层间歇约 10 d,第二层和第三层间歇约 15 d;

第一层混凝土包括底板和底板上 1.0 m 的墩墙;普通洒水养护. 计算结果如图 4 所示.

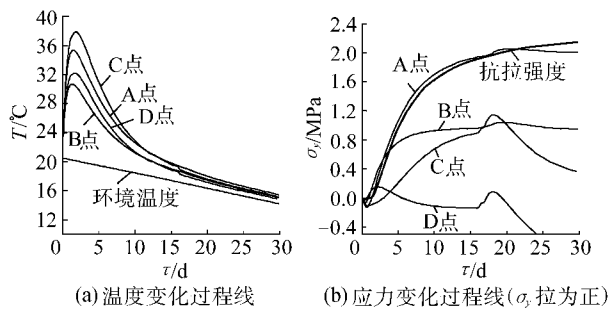


图 4 典型工况 A~D 点的温度和应力

由图 4 可以看出,墩墙混凝土的最高温度达到 38℃,位于墩墙中部的中心处,表面最高温度为 32℃.墩墙最大拉应力为 2.13 MPa,位于第二层混凝土墩墙的底部.其中 A 点和 B 点混凝土的早期特别是前 5 d 的拉应力均略高于混凝土当时的抗拉强度,对混凝土的防裂不利,应该引起适当重视.

2.2 分缝或设置后浇带

分缝和设置后浇带的效果是一样的,都是缩小墩墙顺水流方向的长度,削弱底板对墩墙的约束.计算时考虑不分后浇带、分 1 条后浇带(后浇带宽 2.0 m,和第三层混凝土一起浇筑)和分 2 条后浇带 3 种情况,计算结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出,后浇带的设置对计算结果有一定影响,但是设置 1 条后浇带(墩墙长 15 m)和不设置后浇带的结果相差甚小,特别是对应力较大的 A 点,在早期拉应力几乎相等,且都超过了当时混凝土的抗拉强度.

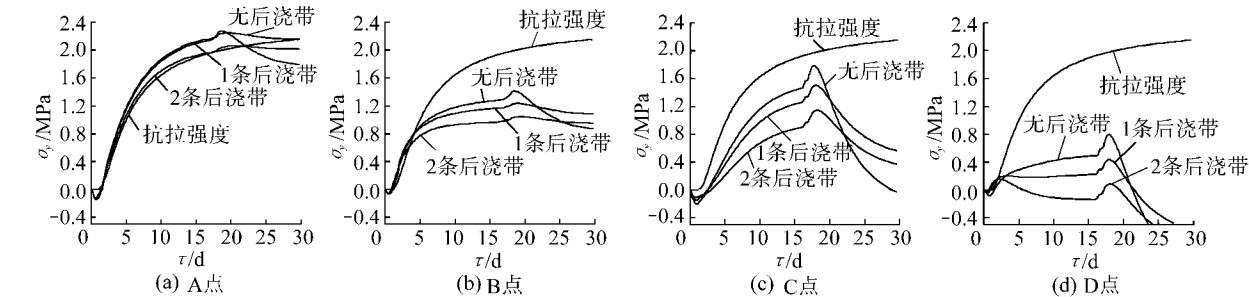


图 5 3 种后浇带设置方式的结果对比(σ_y 拉为正)

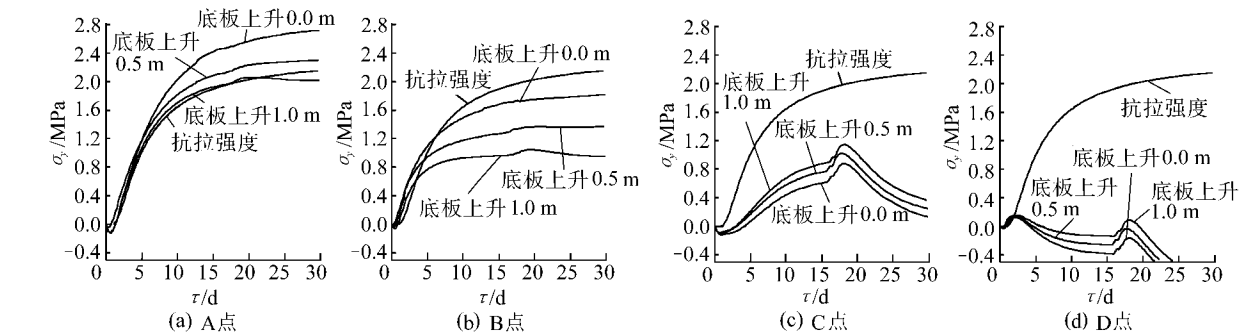


图 6 3 种浇筑方式的结果对比(σ_y 拉为正)

土的抗拉强度. 因此,从数值计算结果来看,设置 1 条后浇带对墩墙的防裂作用不大. 设置 2 条后浇带后对拉应力的改善相对较为明显,拉应力较大的 A 点的拉应力和混凝土当时的抗拉强度较为接近,辅以其其他的防裂措施,就可以满足不裂的要求. 为何设置 1 条后浇带和设置 2 条后浇带所产生的结果有如此大的差别呢? 究其原因,是因为墩墙高度为 8 m,设置 1 条后浇带后顺水流向墩墙长仍达 15 m,是高度的近 2 倍,底板的约束仍相当大,一般来说,长度是高度的 2 倍以上时底板对墩墙的约束效果基本一致. 而设置 2 条后浇带后,顺水流向墩墙长只有 9 m,结构长高比约为 1,底板的约束大为削弱,所产生的拉应力较小. 因而,对于此工程而言,设置 2 条后浇带才能较好地发挥分缝防裂的作用.

2.3 底板和部分墩墙整体浇筑

部分整体浇筑有多种方案,可有底板和部分墩墙同时浇筑、底板和全部墩墙同时浇筑、墩墙和全部顶板同时浇筑等,考虑到问题的关键因素、实际施工条件和难度,计算采用底板和部分墩墙、墩墙、顶板 3 期浇筑,其中第一期混凝土分底板、底板和 0.5 m 高墩墙、底板和 1.0 m 高墩墙 3 种施工方案进行对比计算,结果如图 6 所示.

据图 6,底板、底板和 0.5 m 高墩墙、底板和 1.0 m 高墩墙 3 种浇筑方案的计算结果相差很大,这证明了底板对墩墙的约束是导致墩墙开裂的主要因素之一. 浇筑底板后间歇导致浇筑墩墙时底板对墩墙的约束最大,限制了墩墙的变形,从而产生了较大的拉应力

(最大达 2.74 MPa),并且在大多数时间内拉应力都超过了混凝土当时的抗拉强度.底板和 0.5 m 高墩墙一起浇筑时墩墙内的拉应力较小,但也有超过了混凝土抗拉强度的时刻出现.底板和 1.0 m 高墩墙一起浇筑时墩墙内的拉应力最小,和混凝土抗拉强度相差不大,防裂效果最好.因此,底板和部分墩墙一起浇筑对混凝土的防裂有很大的作用,墩墙愈高,效果愈好,且对施工的干扰不大,应该推广应用.

2.4 保温

保温往往也是防裂措施的重要手段,其目的是减小早期混凝土的内外温差,待混凝土具有一定强度时进行降温,以抵抗混凝土的变形.计算时考虑两种保温措施:一种是阻止空气流动,让风速为零;另一种是模板内侧贴 2 cm 厚聚苯乙烯泡沫塑料保温板.计算结果如图 7 所示.

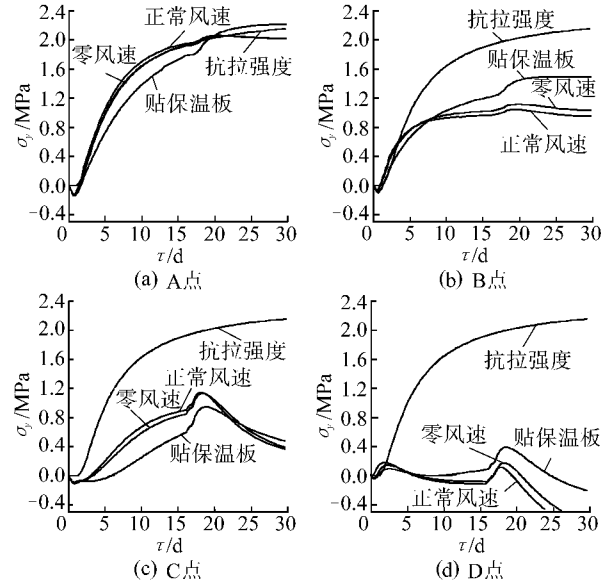


图 7 不同保温方式的结果对比(σ_y 拉为正)

从图 7 可以看出,保温对混凝土应力影响明显,两种保温方式中贴泡沫塑料保温板对降低混凝土拉应力特别有效,尤其是在抗拉强度较低时的混凝土早期,降低表面拉应力对混凝土的防裂非常有利.保温板的作用主要体现在早期减缓混凝土的表面散热,减小混凝土的内外温差,并大大推迟混凝土的降温时间,使混凝土降温收缩时有足够的强度来抵抗温度收缩.但是,贴保温板后散热减缓,导致混凝土温度峰值较高,达到 44℃.因最终墩墙混凝土降温到只受环境气温的影响,前后温差加大,拉应力也随之增大(特别是在结构的中心部位).采取一定的措施,让环境风速为零,对降低混凝土的拉应力也有一定的作用,而且经济,但是效果相对较差.

3 结 语

计算结果表明,对较长的地涵结构,设置后浇带

过少对防裂作用不大.底板和部分墩墙一同浇筑有明显的防裂效果.如果保温效果非常好,对混凝土结构的早期防裂也能起到积极的作用.对于结构形式复杂的立交地涵,也可以采用水管通水降温措施,能有效及时地控制混凝土结构的内外温差(特别是施工早期混凝土中的内外温差).

笔者在河海大学朱岳明教授等人的协助下,利用本文和相关研究成果^[2~5],对目前业已建成的淮安某立交地涵工程进行了工程应用研究,取得令人满意的结果,该工程已经正式投入运行 2 a 多,没有出现 1 条结构性裂缝.

参考文献:

[1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
[2] 朱岳明,黎军,刘勇军.石梁河新建泄洪闸闸墩裂缝成因分析[J].红水河,2002,21(2):44~47.
[3] 朱岳明,刘勇军,谢先坤.确定混凝土温度特性参数的试验与反演分析[J].岩土工程学报,2002,29(2):175~177.
[4] 曹为民,谢先坤,朱岳明.过渡单元和层合单元在混凝土三维温度场仿真计算中的应用[J].水利水电技术,2002,33(4):1~4.
[5] 曹为民,吴健,閃黎.水闸闸墩温度场及应力场仿真分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):48~52.
(收稿日期 2004-06-16 编辑 高建群)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32-1521/C, ISSN1671-4970, 季刊, 自办发行)

本刊以马列主义、毛泽东思想和邓小平理论为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务.

本刊为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、史学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章.本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考.本刊为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊.

本刊由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行,每本定价 5 元,每本邮费 1 元,全年订费 24 元.欢迎广大读者直接向编辑部订阅.联系地址:南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部,邮政编码:210098.联系电话:(025) 83786376.