

南水北调工程下穿高速公路暗涵施工控制技术

李文江, 朱永全, 贾晓云, 朱正国

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:南水北调是国家重点工程,下穿既有结构物的大型暗涵是南水北调工程中一种比较典型的结构形式。下穿段浅埋暗挖施工过程中洞内安全和地面环境问题突出;对于大型钢筋混凝土结构而言,施工中防温裂技术难度大,影响因素错综复杂,一旦控制不当,容易造成结构裂缝超限,严重影响暗涵结构的耐久性和使用功能。论文以南水北调中线古运河枢纽工程下穿石太高速公路段为背景,对既有高速公路路面沉降和箱涵结构混凝土限裂温控标准进行了分析研究。研究认为,施工过程中既有路面沉降应控制在100 mm以内、结构混凝土内部降温应控制在54.4℃以下,并在此基础上,提出了双中洞多分部开挖技术、一次性施作长管棚结合小导管注浆超前预支护技术、设置遮阳棚和地垫储料保温措施等综合施工技术,确保了施工过程中既有高速公路的运营安全和暗涵结构的工程质量。

关键词:南水北调工程;下穿暗涵;路面沉降;温度裂缝;控制标准

中图分类号:U451 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0098-06

0 引言

南水北调中线古运河枢纽工程是石京段应急供水工程的起点,位于古运河与太平河汇合口下游约50 m处。其中,DK237+442.6~DK237+522.6下穿既有石太高速公路,下穿段全长80 m,覆土最大埋深9.8 m,采用暗挖法施工。暗涵过水断面为三孔联拱结构,开挖宽度25.6 m,开挖高度11.6 m。衬砌厚度1.2~1.6 m不等,为C30自防水钢筋混凝土结构。下穿段暗涵上游与明挖暗涵古运河段衔接,下游为枢纽出口检修闸室。在勘探深度范围内为第四系松散地层,具体地层分布如图1所示。暗挖隧洞施工过程中容易发生洞室失稳、地表沉降过大和衬砌结构温度裂缝超限等现象,施工安全、周边环境控制以及施工质量等问题均十分突出。

1 地表沉降控制标准的建立

1.1 周边环境特点

该暗挖区段除穿越的石太高速公路外,临近无重要地面建筑物、地下管线和地中埋设物。因此,在隧道施工过程中允许地表沉降仅受控于上方高速公路的运营要求。

1.2 高速公路允许不均匀沉降分析

土质路基上的高等级公路,不可避免会产生一定的不均匀沉降,为满足运营等级标准,其变坡、平整度等的变化,不应超出公路等级规定的技术标准:

(1)纵坡要求。按照现行《公路工程技术标准》,各公路等级之间纵坡标准仅相差1%。因此,在本工程中,为避免降低公路等级,由暗涵施工引起的路面纵坡变化不应超过1%。

(2)平整度要求。我国在20世纪80年代才开始建设高等级公路,有关技术标准尚有待补充和完善。从“平战”结合方面考虑,并结合国外高速公路建设经验,可以利用机场跑道的平整度指标作为高等级公

收稿日期:2010-04-12

作者简介:李文江,男,1970年出生,副教授。研究方向:隧道及地下工程稳定性,隧道及地下工程施工环境及控制技术。发表学术论文30余篇,其中11篇被EI收录。获省部级科技进步一等奖1项,二等奖2项,三等奖2项。

路的平整度指标^[1]。根据《民用航空运输机场飞行区技术标准》,道面的平整度用3 m直尺进行检查:对已使用的道面,直尺与道面间隙应不大于10 mm,且不得积水,因此,对于本工程,从既有高速公路路面平整度要求出发,其纵向变坡不应大于0.46%。

(3)路面结构强度安全要求。路面不均匀沉降会使路面结构内部产生附加应力,一旦这种附加应力与车轮荷载产生的荷载应力之和大于路面结构层材料的强度,路面的结构将会破坏。借鉴文献[2]的相关研究成果,对于国内常规的高速公路路面结构,当不均匀沉降引起的变坡小于0.4%时,不会对路面结构产生损坏。

综上所述,对于高速公路,当不均匀沉降小于0.4%时,既不会造成路面功能性损坏,也不会使路面结构发生解体而破坏。因此在本工程中,可将0.4%的变坡作为既有路面不均匀沉降的控制指标。

1.3 暗涵施工地表沉降槽宽度分析

(1)经验估算结果。根据经验,地表沉降规律(横向)可以采用墨西哥学者Peck和英国学者Reilly提出的符合正态概率曲线的观点进行分析。横向沉降Peck曲线方程为

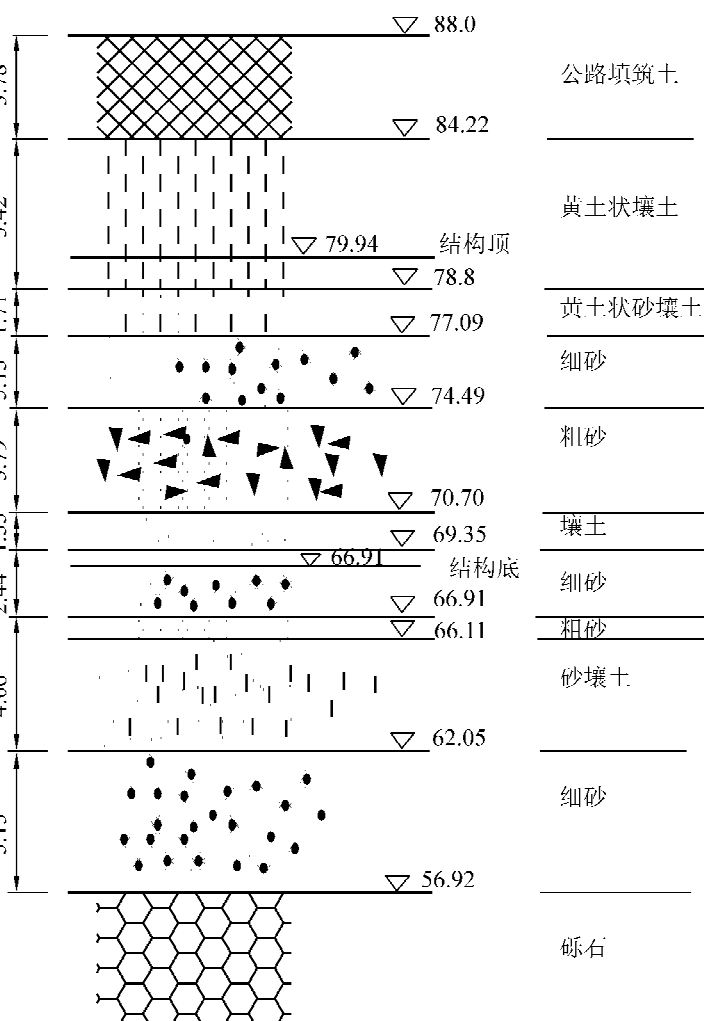


图1 下穿高速公路段地质柱状示意(单位:m)

$$S = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中, x 为距隧道中心线的距离; S 为距隧道中心线为 x 的地表沉降量; $S_{\max}$ 为隧道中心线处最大沉降量; i 为沉降槽宽度系数,可由下列经验公式计算

$$i = \frac{H + R}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

式中, H 为覆土厚度; R 为隧道水力半径。

若设 W 为沉降槽宽度,Cording(美国)等人根据莫尔-库仑理论,推导出 W 与 i 满足 $W = 5i$ 的关系。根据本工程的实际情况,暗涵的水力半径 R 为11.12 m,地层的加权内摩擦角为 24.5° ,由式(2)得沉降槽系数 $i = 13.0$ m,则沉降槽宽度 $W = 65$ m。

(2)数值计算结果。为详细分析暗涵施工过程中上方既有公路路面的沉降分布规律,建立了三维数值模型,采用FLAC3D程序对施工实际过程进行了模拟分析^[1,3]。根据计算结果,隧道施工结束后沉降槽分布规律符合正态概率曲线分布,如图2所示,沉降槽影响宽度约70 m。

1.4 下穿段暗涵施工地表沉降控制标准的建立

根据经验,距隧道一定距离以外的沉降曲线可以认为是一条直线,其斜率可近似表述为

$$f = 2S_{\max}/W \quad (3)$$

如允许的路面沉降变坡为 $[f]$, 则地表最大允许沉降值可表示为

$$[S_{\max}] = W[f]/2 \quad (4)$$

如前所述,取路面允许沉降变坡为 0.4%,根据经验公式和数值模拟计算结果,隧道开挖过程中,路面沉降槽宽度为 65~70 m。则根据式(4),暗涵施工中允许的高速公路路面最大沉降量为 130~140 mm。考虑到既有高速公路的修建年限、地层条件以及既有路面的初始平顺程度,实际施工中,取既有路面允许最大沉降值为 100 mm。

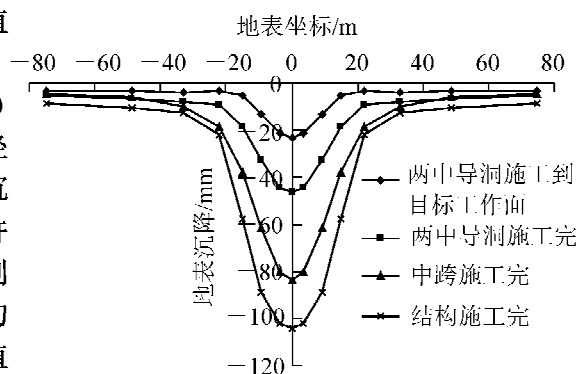


图 2 典型施工步完成后地表沉降槽曲线

2 地表沉降施工控制技术

2.1 双中洞、多分部施工技术

根据本工程具体的地层条件、工程规模和周边工程环境,通过数值试验分析^[1],最终确定采用双中洞、多分部的开挖施工方法。其主要施工步骤如图 3 所示。

2.2 超长管棚结合小导管注浆的综合超前支护技术

本段暗涵主要穿越细、粗砂层,地层开挖后自稳能力差,掌子面容易发生塌滑现象。为此,拱部采用大管棚结合小导管注浆的联合超前支护,以保证开挖后掌子面稳定,减少施工位移和地表沉降。同时为减少管棚施作对周边地层的扰动次数,将地层损失降到最低,大管棚采用一次施作完成,即利用下游闸室基坑作为大管棚施工作业面,沿三联拱开挖线上方施作长 80 m、间距 33 cm 的 $\Phi 108$ 大管棚,全长单向一次施作。考虑施工误差的要求,始端开挖线外放 10 cm,末端开挖线外放控制在 40 cm 以内。小导管采用 $\Phi 42$ 无缝焊管加工而成,单根长度 3.5 m,环向间距 33 cm,外插角 10° ,浆材为水泥单浆液,注浆压力为 1 MPa 左右。

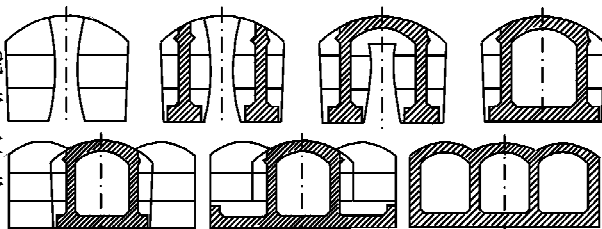


图 3 施工步骤示意

2.3 控制效果分析

施工过程中,对暗涵上方既有路面进行了系统的沉降监控量测。施工结束后地面沉降槽形态如图 4 和图 5 所示。根据监测结果,既有路面最大沉降为 91 mm,各测线测试数据均小于控制标准值 100 mm,暗涵施工过程中既有路面沉降得到了较好的控制。

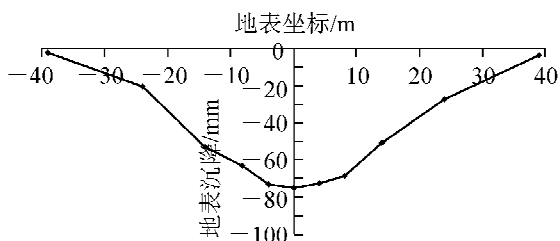


图 4 道路中心线各测点地表沉降分页

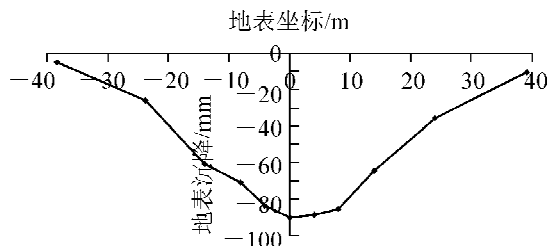


图 5 路肩测线各测点地表沉降分布

3 大跨暗涵衬砌混凝土温度裂缝控制技术

隧道衬砌混凝土浇筑时,水泥释放出大量的水化热,致使其内部温度在一定时间内不断上升,随着混凝土内部水化热的不断释放,内部温度达到一定数值后开始逐渐下降。由于隧道衬砌是一个多次超静定结构,结构温缩受限会产生收缩拉应力,当温度应力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土结构将产生裂缝。研究表明^[4],配筋虽然不能防止温缩裂缝的发生,但可以把无筋混凝土时的单个宽裂缝分散成许多条细

微裂缝。裂控配筋就是通过限制钢筋拉应力以将混凝土温度变形裂缝或荷载外力裂缝的宽度控制在允许的程度以内。本工程衬砌厚度大,混凝土一次浇注量大,因此,结构的限裂设计和优化施工是确保工程质量的关键。

3.1 暗涵混凝土在设计配筋和裂缝限宽条件下允许的最大温降

对于钢筋混凝土构件,最大温度裂缝宽度设计值(ω_k)可表示为

$$\omega_k = \beta S_m \varepsilon_{sm} \quad (5)$$

式中, β 为最大裂宽(ω_k)依从于平均裂宽(ω_m)的系数,对于混凝土收缩裂缝可按1.3考虑; S_m 为裂缝平均间距, $S_m = 50 + k_1 k_2 d_b / (4\rho_r)$,其中, d_b 为钢筋直径(mm), k_1 为考虑钢筋粘结特性的系数,对于收缩裂缝,螺旋钢筋取0.64,但对于矩形截面,当截面高度大于0.8 m时要乘以0.5, k_2 为考虑应变图形的系数,对于纯弯情况取0.5,轴拉情况取1.0, ρ_r 为钢筋比,定义为 $\rho_r = A_s / A_{cef}$, A_{cef} 是混凝土在将要出现裂缝截面的有效受拉面积, A_s 是布置在这个面积内的钢筋面积; ε_{sm} 为钢筋的平均拉应变,对于收缩裂缝,由于混凝土在相邻两裂缝之间的拉应变已经很小,可忽略不计,则钢筋的平均拉应变就相当于混凝土自由干缩应变(ε_f)与混凝土温降应变($\Delta T \alpha_t$)之和,即

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_f + \Delta T \alpha_t \quad (6)$$

研究表明^[4],干缩大多只是影响混凝土表层,故对于厚度较大的结构来讲可不考虑干缩的影响。结合本工程的结构特点,式(6)中可不计自由干缩应变 ε_f 。

对于本工程,钢筋直径拱部内侧为25 mm、外侧28 mm,边墙内侧22 mm、外侧25 mm,底板内外均为28 mm,主筋间距均为125 mm;混凝土热膨胀系数为 $8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,考虑混凝土徐变影响,按0.8倍取值;若忽略防水层对衬砌变形的约束影响,则衬砌在横断面收缩变形中可近似假定为轴向受拉状态,故 $k_2 = 1.0$, $k_1 = 0.8 \times 0.5$ 。根据文献^[5],混凝土最大允许宽度为0.25 mm。由式(5)~式(6),得结构最大允许温降为54.4 $^\circ\text{C}$ (由边墙设计参数所控制)。

3.2 暗涵钢筋混凝土工程温控措施

南水北调中线古运河枢纽项目,属于大型一级工程,混凝土浇筑方量大、质量要求等级高。为防止混凝土温缩裂缝超限现象的发生,工程中因地制宜,采取了一些科学、合理的控制措施,从而实现了大体积混凝土施工质量的有效控制。

(1)优化混凝土配比,降低水泥用量。降低水泥用量可有效减少水化热的生成、释放量,降低混凝土温升,从而达到有效预防混凝土温度裂缝的目的。经过混凝土配比优化设计,在保证混凝土强度的前提下,将暗涵混凝土单位水泥用量由原来的420 kg/m^3 降到350 kg/m^3 。

(2)掺入适量粉煤灰,提高混凝土早期抗裂性能。为了延缓峰值温度和最大温差的出现时间,减小最大温差,本工程施工时在混凝土中掺入适量的粉煤灰(58 kg/m^3)。这样有利于提高混凝土的早期抗裂性能。

(3)建造温控储料仓,控制混凝土入模温度。为了防止冬季施工混凝土的温度过低,以及夏季施工混凝土的温度过高,建造了一个长 $\times$ 宽 $\times$ 高=40 m $\times$ 34 m $\times$ 2 m的储存料仓,该仓一次储存砂、石料2 700 m^3 ;储料仓下设地垄,上设遮阳棚。

地垄是利用地层恒温对混凝土材料进行保温,从而实现对混凝土材料、混凝土拌合温度以及混凝土入模温度的有效控制。本工程中采用连拱式地垄,地垄单拱尺寸为:44 m、3 m、3.7 m(长、宽、高)。

在夏季施工时,遮阳棚对降低混凝土的入仓温度、减少混凝土裂缝有着重要的作用。根据储料仓的大小在其上建造长 $\times$ 宽 $\times$ 高=40 m $\times$ 16 m $\times$ 9 m的遮阳棚。试验测试表明,采取上述措施后,混凝土的入模温度可控制在:冬季5 $^\circ\text{C}$ 以上,夏季25 $^\circ\text{C}$ 以下,春秋季节15 $^\circ\text{C}$ 左右。

3.3 温控条件下混凝土结构温度场数值模拟

3.3.1 计算模型和计算参数

计算范围:水平方向长150 m;竖向取暗涵底部以下15 m,上边界取近似地表的自由边界。模型左、右、下部和地表边界均施加温度约束,其中,左、右和下部约束温度数值取初始地温值,上部约束温度数值

取浇筑混凝土时期的外界温度,混凝土与空气接触部分施加热转移系数。计算采用大型有限元程序 ANSYS10.0 进行,计算物理力学参数如表 1 所示。

表 1 计算物理力学参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	热转移系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
钢筋混凝土	2 500	1.74	0.92	8.72
土壤	1 800	0.93	1.01	—

根据本工程的实际特点,衬砌内部最高、最低温度应分别发生在夏季施工阶段和暗涵过水前的冬季。首先以夏季为环境背景,对暗挖段在温控措施条件下的混凝土施工过程进行了仿真分析;同时,根据石家庄地区的气象统计资料,对暗涵过水前可能经历的极端低温准静态温度场进行了模拟,进而对上述温控措施的可行性进行了理论验证。计算中,夏季可能最高气温按 35℃考虑、初始地温取 20℃、混凝土入模温度取 25℃;冬季大地温度取 10℃,极端气温按 -10℃考虑。

3.3.2 计算结果

(1)施工过程中衬砌结构最高温度。计算结果表明,受水泥水化热的影响,衬砌最高温度发生在边跨混凝土浇筑过程中,即当边跨混凝土浇筑 5 d 时,结构内部温度达到最高,其数值为 55.3℃,以后由于水化热逐渐减少,温度逐渐降低。施工各阶段,衬砌典型位置温度时程曲线如图 6 所示。边跨拱墙混凝土浇筑 5 d 时,结构内温度场分布见图 7。

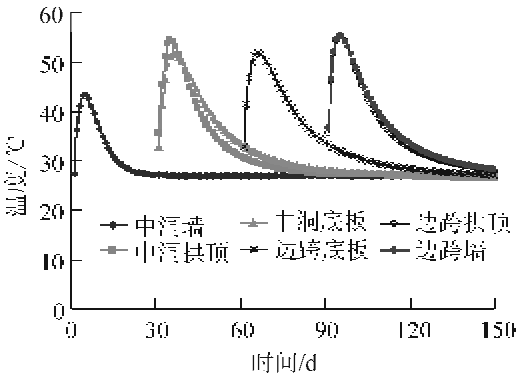


图 6 衬砌不同部位温度变化曲线

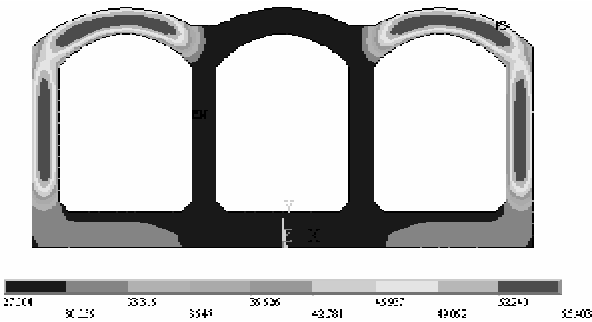


图 7 两边跨拱、墙混凝土浇筑 5 d 温度场

(2)冬季极端气温下衬砌结构准温度场分布。衬砌结构在计算条件下,冬季低温准稳定温度场分布如图 8 所示。

(3)温控效果分析。根据上述数值计算的结果,施工阶段和后期使用阶段的温度计算结果列于表 2 中。从表中可以看出,采取温控措施后,衬砌内部各部位最大温降均小于允许温降值 54.4℃。

表 2 温控效果对比分析汇总

位置	施工阶段温度场变化情况/℃			冬季结构准温度场情况/℃		允许最大温降/℃
	最高温度	浇筑 30 d 温度	施工温降	冬季准稳定温度	预计最大温降	
中隔墙	43.29	27.14	16.15	0.00	43.29	54.4
中洞拱顶	54.50	30.87	23.63	1.59	52.91	54.4
中洞底板	51.74	33.39	18.35	2.01	49.73	54.4
边跨底板	51.79	33.62	18.17	2.36	49.43	54.4
边跨拱顶	55.40	32.52	22.88	3.00	52.40	54.4
边跨侧墙	55.30	33.49	21.81	2.44	52.86	54.4

3.3.3 混凝土内部温度监测结果

根据实测结果,混凝土在浇注后最高温度以及施工期间的温降幅值与计算结果相近,且在温控允许范围之内。施工阶段,暗涵典型测点(边墙测点)实测曲线如图 9 所示。截至目前为止,新建暗涵结构未见有可见裂缝发生,结构表面平整光滑,表明钢筋混凝土衬砌温度裂缝得到了较好的控制,混凝土质量满足技术要求。

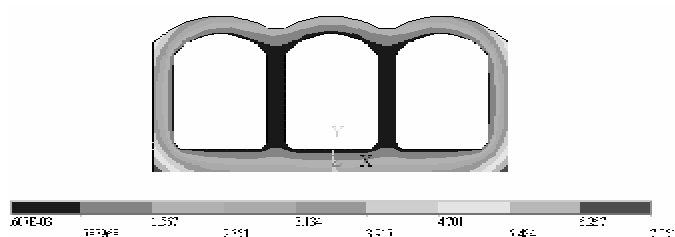


图8 过水前混凝土结构稳定温度场分布

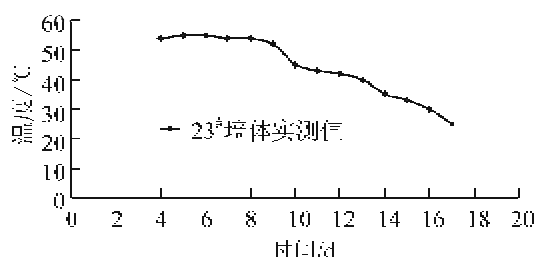


图9 第23节管涵侧墙温度实测结果

4 结论

(1) 借鉴国内外研究成果,以高速公路路面允许的不均匀沉降为基础,结合暗涵工程特点,研究下穿高速公路段暗涵施工所允许的地表沉降值的确定方法,提出本工程允许地表沉降控制标准为 100 mm。

(2) 针对本工程的环境复杂、地层松散、埋深浅、结构规模大、既有路面施工控制要求高等特点,研究采用了双中洞、多分部开挖并结合超长管棚预支护的暗挖施工方法,经施工实践证明该方法可将路面沉降控制在允许的范围之内,能够满足隧道施工安全和环控要求。

(3) 采用理论分析和数值计算的方法,建立了南水北调暗渠衬砌结构施工过程中钢筋混凝土内部温降的控制标准,即混凝土内部温降不应超过 54.4 ℃,为选取合理的温控措施提供了依据。

(4) 针对下穿段暗涵的地形条件、结构特点,并充分考虑工期和气候特点,采用降低水泥用量、遮阳棚和地垄等储料保温措施,将施工过程中混凝土结构的内部温度变化控制在允许的范围之内,成功解决了大体积混凝土施工过程中由于温度变化所带来的温度裂缝问题,保证了结构工程的施工质量。

参 考 文 献

- [1] 李文江,朱永全.大型水利涵渠下穿高速公路浅埋暗挖综合施工技术[R].石家庄:石家庄铁道学院土木工程分院,2009.
- [2] 周虎鑫,陈荣生.高等级公路工后不均匀沉降指标研究[J].东南大学学报,1996,26(1):54-56.
- [3] 朱正国,贾晓云,李文江.暗渠下穿高速公路施工过程的数值模拟及工程应用[J].岩土力学,2009,30(6):1831-1836.
- [4] 富文权,韩素芳.混凝土工程裂缝预防与控制[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [5] 中国水利水电科学研究院.SL279—2002 水工隧洞设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2002.

Construction Control Technology of Underdrain Beneath Existing Expressway in South-to-North Water Transfer Project

Li Wenjiang, Zhu Yongquan, Jia Xiaoyun, Zhu Zhengguo

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The large-scale culvert under-crossing existing structure is a typical structure in South-to-North water transfer project, a national major project in China. The control technology of ground surface settlement and structure temperature crack is complex during tunneling in the under-crossing segment. The Guyunhe underdrain project is a main section of the middle route project of South-to-North water diversion, in which the culvert crosses under the Shi-Tai expressway near the city of Shijiazhuang. Some problems about the constructing control standards are discussed based on this project in this paper. The results suggest that the existing road surface subsidence should be controlled within 100 mm and the temperature decrease of structural concrete should be controlled within 54.4 ℃ to fulfill requirement of the construction environment and structural temperature crack limit. On this basis, the corresponding control measures, such as Multi-hole pairs of partial excavation technology, long pipe roof with a small tube grouting technology, sun-shading awning and material storage barn insulation technology, are put forward to ensure the project quality and the operation safety of existing expressway.

Key words: South-to-North Water Transfers Project; under-crossing culvert; road surface subsidence; temperature crack; control standards