

Analysis on Control Points of Concrete Crack and Temperature in Construction of Tunnel Mass Concrete

Liang Wang

Suzhou Jiada Concrete Products Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 2150007, China

Abstract

Mass concrete construction is the key content in tunnel construction, and its construction quality will have a direct impact on the construction effect of the whole project, so it should be controlled in construction. Because of the influence of many factors, cracks will appear in concrete members, which will affect their beauty and stability, which is not conducive to the operation and use of the project. Especially, unreasonable temperature is the main factor leading to concrete cracks, which should be controlled in construction to promote the improvement of construction quality and efficiency. This paper analyzes the key points of crack control in the mass concrete of the main structure of the Jinji Lake Tunnel in Suzhou, China, to explore the key points of concrete crack control in the mass concrete construction of the tunnel, and provide references for future work.

Keywords

tunnel; mass concrete construction; crack; temperature control; key points

隧道大体积混凝土施工中混凝土裂缝和温度的控制要点分析

王亮

苏州市嘉达混凝土制品有限公司, 中国·江苏·苏州 2150007

摘要

大体积混凝土施工是隧道建设中的关键内容,其施工质量会对整个工程的建设成效产生直接影响,因此在施工当中应该予以针对性掌控。由于多种因素的影响,会导致混凝土构件中出现裂纹,影响其美观性与稳定性,不利于工程的投运使用。尤其是温度不合理是导致混凝土裂缝的主要因素,应该在施工中予以重点掌控,促进施工质量与效率的提高。论文针对中国苏州金鸡湖隧道主体结构大体积混凝土裂缝控制要点进行分析,来探索隧道大体积混凝土施工中混凝土裂缝控制要点,为今后的工作提供参考。

关键词

隧道; 大体积混凝土施工; 裂缝; 温度控制; 要点

1 工程概况及特点

中国苏州金鸡湖隧道工程自西向东经过星海街,沿着新大道穿过金鸡湖,到达南施街的西侧,全长大约 6.04km,主线全长 5.4km,其中湖中段长约 3km,设计道路为双向 6 车道,设计速度主线 50km/h,匝道为 40km/h。金鸡湖隧道作为苏州市“八纵八横”板块间主干路系统和园区“十三横十二纵”主干路系统的重要组成部分,其建设对于缓解东西向跨湖交通压力、提升园区整体交通承载能力、加强湖西湖东 CBD 的联系、方便出行具有重要意义。

就本工程而言,隧道主体结构为箱形四孔一管廊横断面

布置,其中湖中段底板厚度主要有 1.1m、1.2m、1.3m、1.4m、1.5m 和 1.6m,侧墙厚度主要有 0.8m、1.0m、1.2m 和 1.4m,顶板厚度主要有 1.1m、1.2m、1.3m、1.4m 和 1.6m,设计强度等级为 C35P8。从上述结构形式和断面尺寸来看,隧道主体结构属超长强约束大体积混凝土结构,早期收缩开裂风险较高。

2 隧道大体积混凝土施工中混凝土裂缝的成因

2.1 混凝土材料影响

现代水泥细度较高、早期水化速度明显加快,虽然提升了早期强度,却导致早期的放热速率及放热量的急剧增加,水泥水化会导致大量热量的产生,使大体积混凝土内部的温度快速提升,而表面温度要大大低于内部温度,在较大的温

【作者简介】王亮(1985-),男,中国江苏苏州人,中级职称,从事混凝土、水泥稳定碎石专业研究。

差下产生压应力与拉应力。如果混凝土极限抗拉强度低于拉应力,那么就会导致裂缝的出现。大体积混凝土的表面积较大,因此水化热导致的裂缝问题也会更加显著。在混凝土的硬结过程中发生体积收缩,这也是引起裂缝问题的关键因素^[1]。尤其是钢筋和支承条件的影响,会导致巨大拉应力的产生,进而引发裂缝。

2.2 结构形式影响

隧道主体结构厚度大,早期水化热不易散出,导致结构温升高;底板、顶板结构暴露面积较大,容易在凝结硬化之前由于失水而产生塑性收缩裂缝。

2.3 施工工艺影响

本工程为明挖法隧道,先浇筑底板,其后浇筑侧墙和顶板。其中,侧墙结构除了受温降速率及温度梯度影响之外,其温降收缩和自收缩还受其前期浇筑的底板的约束,极易出现竖向、平行分布的贯穿性开裂渗漏。

2.4 外界环境影响

本项目工程量大、施工时间长,金鸡湖地区夏季温度较高,且商砼不具备控温条件,导致混凝土入模温度超出规范要求,水泥水化速率显著加快,结构温升增加,温降收缩加大容易导致裂缝,外界环境的气温也会对施工造成影响,当环境温度骤降时,则会导致温度应力增大,温度收缩导致裂缝,此外,混凝土的干缩也会由于湿度下降而出现,引发干燥收缩导致裂缝。

3 金鸡湖隧道大体积混凝土施工中混凝土裂缝和温度的控制要点

3.1 材料的选择

为实现上述隧道主体结构混凝土抗裂性能控制指标,混凝土原材料应符合如表1所示的要求^[2]。

3.2 混凝土配合比

应用于金鸡湖隧道工程主体结构的C35混凝土胶凝材料总量不小于400kg/m³,其中水泥用量不高300kg/m³,细集料采用II区中砂要求的河砂,砂率为38~44%,粗集料采用连续级配碎石,比例根据实际情况调整,满足最小堆积空隙率要求。在混凝土中掺入适量活性矿物掺合料如优质粉煤灰、矿粉具有提高混凝土保水性、流动性,减少水泥用量,使混凝土硬化后结构密实,提升后期强度、改善抗渗、抗冻等耐久性能的优势,但不利于混凝土抗碳化的性能,且与普通硅酸盐水泥混凝土相比,大掺量矿渣混凝土粘性增加,坍落度和扩展度降低,还存在自收缩大的问题,导致混凝土结构抗裂性与工作性下降。因此,考虑到本工程混凝土的抗碳化、工作性与抗裂需求,需控制矿物掺合料的最大掺量,宜单掺粉煤灰,不掺或少掺(不超过10%)矿粉,对于开裂风险高的侧墙结构,宜单掺粉煤灰,不掺或少掺矿粉。结合类似工程经验,侧墙混凝土开裂风险最高,顶板次之,底板开裂风险最小,因此对于侧墙、顶板与底板结构混凝土在采用较低水胶比、掺加优质掺合料的基础上分别掺入8%、6%与4%的HME[®]-V混

表1 混凝土原材料性能控制指标

序号	原材料	性能控制指标
1	水泥	选用品质稳定的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。符合GB175《通用硅酸盐水泥》的要求。比表面积宜≤380m ² /kg,宜≤350m ² /kg,碱含量应≤0.6%,C ₃ A含量应≤8%。本工程混凝土选用常州盘固水泥PO42.5。
2	粉煤灰	符合GB/T1596《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》中II级及以上标准,需水量比宜≤100%,不使用脱硝未尽含氮残留的粉煤灰。本工程混凝土选用的粉煤灰为常熟苏虞天润粉煤灰有限责任公司所生产的II级粉煤灰
3	矿粉	符合GB/T18046《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣微粉》中S95级及以上的要求,比表面积宜≤450m ² /kg。本工程混凝土选用张家港恒昌新型建筑材料有限公司生产的S95级矿粉。
4	细骨料	符合GB/T14684《建设用砂》的要求。细度模数为2.3~3.0,符合II区颗粒级配。砂中含泥量≤2.0%,泥块含量≤0.3%。不使用海砂、山砂及风化严重和多孔砂,不使用具有碱活性的细骨料。本工程混凝土采用的黄砂产地江西赣江砂。
5	粗骨料	符合GB/T14685《建设用卵石、碎石》的规定,级配良好,最大粒径不大于31.5mm,建议粒径5~25mm。碎石中氯离子含量≤0.02%,含泥量≤0.7%,泥块含量≤0.3%,针片状含量≤7%,压碎值≤10%,表观密度>2500kg/m ³ ,松散堆积密度>1350kg/m ³ ,空隙率宜≤45%,不使用具有碱活性的粗骨料。本工程混凝土采用的碎石为浙江湖州产花岗石子。
6	减水剂	符合GB8076《混凝土外加剂》、GB50119《混凝土外加剂应用技术规范》中聚羧酸高性能减水剂的规定,收缩率比≤100%。本工程混凝土采用江苏苏博特新材料股份有限公司产PCA-9聚羧酸高效减水剂。
7	抗裂剂	符合GB/T23439-2007《混凝土膨胀剂》的规定,本工程混凝土采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产具有温升抑制与微膨胀功能的HME [®] -V型抗裂剂。
8	水	本工程混凝土采用河水,检测结果符合JGJ63《混凝土用水标准》的技术要求。

凝土(温控、防渗)高效抗裂剂,拟在获得良好工作、力学与耐久性能的同时,具有符合要求的抗裂性能。具体的混凝土配合比如表2所示,由苏州嘉达混凝土制品有限公司提供。

表2 隧道主体结构 C35P8 混凝土配合比 (kg/m³)

结构部位	水泥 P·O42.5	粉煤灰 II级	矿粉 S95	砂 中河砂	石子 级配碎石	抗裂剂 HME-V	水 饮用水	减水剂 PCA
侧墙	300	68	0	745	1045	32	160	1.2%
顶板	300	76	0	745	1045	24	160	1.2%
底板	270	84	30	745	1045	16	160	1.2%

3.3 混凝土入模温度控制

高温季节施工时,苏州市嘉达混凝土制品有限公司提供的混凝土降温措施包括原材料降温、加冰拌合、运输过程中的保温、合理的浇筑时间选取等,以满足入模温度控制要求。

采购的骨料提前入场入库储存,在砂石遮阳棚的基础上,采用喷淋和雾炮机对料场内的砂石料进行喷水和喷雾降温,冷水温度不超过10℃,每日喷淋2至3次。混凝土采取了制冰机制取冰片,使用了片冰代替部分拌合用水加入搅拌机,单方混凝土片冰用量不少于40kg,且根据气温及混凝土入模温度实测结果调整加冰量。嘉达混凝土制品有限公司在专罐储存金鸡湖隧道所使用的粉料的基础上,对进站高温粉料进行提前储存并设置中间仓储存倒运,同时在储罐表面涂刷隔热涂层材料且在搅拌机棚内安装降温喷雾设备,将棚内温度控制在25℃以下。运输车采用隔热布包裹,并喷洒冷水对罐体及泵管进行降温。施工现场设置调度人员,根据浇筑情况调配两侧罐车卸料次序及嘉达混凝土拌合站是否搅拌,避免混凝土因罐车在现场停留时间过长而升温。应对施工进度提前计划安排,选取合理的浇筑时间,选择在夜间气温比较低的时段(夏季施工时取当日晚20:00至次日早8:00)浇筑,避免白天高温天气。充分考虑运输、泵送对混凝土温度的影响,根据工艺试验确定运输、泵送对混凝土温度的影响,结合实际条件采取必要措施以满足设定的人模温度要求。若某项原材料温度较难控制时,可加强其他方面的温控措施,最终达到入模温度控制要求;其他季节砂石骨料温度有所下降,经试验入模温度超出控制要求时,仍应采用冷水拌合或加入冰屑。

冬期施工时,混凝土入模温度应满足行业标准JGJ/T 104《建筑工程冬期施工规程》的有关规定。

3.4 冷却水管设置

当气温较高且入模温度无法满足要求时,应在厚度为1.2m、

1.4m的隧道主体结构侧墙中设置冷却水管,具体措施如下。

(1)采用管径不小于40mm、壁厚2~3mm的铁管。

(2)水管厚度方向单根布置,竖向间距不大于1m,且表层水管距离混凝土表面不小于0.5m,单根冷却水管累计长度不大于200m。

(3)每个管路进行单独编号,设置独立的开关、流量计,以便于开关冷却水、调整流量。冷却水采用季节常温水,通水过程中控制水温与混凝土温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ 。

(4)在混凝土升温阶段,尽快带走热量,削减温度峰值,因此控制升温阶段冷却水流量不低于1m/s。在降温阶段,通过降低冷却水进水流量直至关闭,来控制降温速率,使内部缓慢匀速降温,冷却水流量宜不超过0.5m/s,具体流量应根据降温速率监测情况进行控制,注意防止温度回升。根据实体监测结果,总结形成相关工艺参数,在二次监测验证反馈的基础上,形成最终冷却水管技术工艺,用于后续施工。

(5)选择合适的冷水水管接头工艺,采取套丝连接(水管转弯处采用带垫圈的弯头连接)或全焊接工艺,防止混凝土在浇筑振捣时出现冷却水管漏水及泥浆渗入水管而无法正常工作^[9]。

(6)采用扎丝等可靠措施将冷却水管与钢筋绑扎牢固,防止受其他因素影响导致移位。混凝土浇筑时应采取合理的布料方式,确保冷却水管不发生移位。

(7)为保障冷却水管技术效果,按照高度方向从下到上的次序设置冷却水入口、出口。

(8)应按要求提前准备好包括水泵、蓄水池、分流器在内的冷却循环水系统。

(9)冷却水管安装完成后立即进行水压试验,检验是否存在漏水及阻水现象。在混凝土正式浇筑前提前至少2h再次通水,以检查由于钢筋绑扎等因素造成冷却水管有无漏水。在混凝土浇筑前或浇筑过程中启用冷却水管并通水,一方面,通水时间越早冷却水管降温效果越好,若待混凝土凝结后再进行通水,此时混凝土已开始进入快速升温阶段,导致冷却水管最终降温效果有限。另一方面,若冷却水管采取PE管时,由于其刚度不足,若不提前通水充盈则可能被周围浇筑的混凝土压瘪,容易出现阻水情况,最终导致冷却水管无法正常工作。

(10)混凝土浇筑后,如因特殊原因,出现冷却水管不能及时通水或中断后再通水的情况,为避免冷却水突然对内部混凝土造成冷击,冷却水与混凝土内部的温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ 。

(11)水冷却降温结束后,冷却水管应及时进行压浆封堵,压浆材料应采用不低于混凝土强度等级的微膨胀砂浆或净浆。

3.5 混凝土浇筑

混凝土浇筑是整个施工当中的重点环节,为减少裂缝,要对重点施工结构部位、施工工艺等制定针对性施工方案,具体如下。

(1)按照规范检测频率对混凝土进行坍落度测定并制作混凝土试块,观察混凝土的和易性要符合要求。混凝土浇筑时入模坍落度宜控制在160~190mm,含气量控制在 $(2.5 \pm 0.5)\%$ 。

(2)减小已浇筑完成的混凝土对新浇筑的混凝土收缩的约束。利用混凝土“干缩湿胀”的特性,在上部分侧墙及顶板混凝土浇筑前,对已浇筑的下部混凝土上表面采用清水浸泡处理,使混凝土充分吸水湿胀,从而达到减小对新浇筑混凝土收缩约束的目的^[4]。

(3)混凝土自由倾落高度如大于2m时,宜采用串筒、溜管或者振动溜管等辅助工具,避免混凝土出现离析。在串筒出料口的下面,混凝土堆积的高度不宜超过1m,且严禁用振动棒来分摊混凝土。浇筑底板时,将串筒用钢丝绳固定在底板钢筋上不用提升,当浇筑墙体时,可适时提升串筒,以保持混凝土倾落高度不超过2m。

(4)混凝土拌合物分层浇筑,单层浇筑厚度为300~500mm,分层间隔浇筑的时间不超过混凝土的初凝时间。

(5)底板浇筑采用斜面分层、自然流淌、薄层浇捣、连续浇筑等方法。浇筑时由底板较低部位的中间位置向两侧浇筑,逐渐向较高一端进行浇筑。从一头浇筑严格控制浇筑的间隙,间隙时间不大于1.5h。

(6)根据混凝土的拌合物特性以及混凝土结构来选择适当的振捣方式和振捣时间。竖向浇筑式结构采用插入式振捣器进行振捣,插入的间距不大于振捣棒振动作用半径一倍,插入的深度要穿透浇筑厚度至下层混凝土约0.5m处,与侧模保持0.5~1m的距离。表面振动器移位间距,应使振动器平板能覆盖已振实部分1m左右为宜。根据混凝土坍落度和振捣的部位,振捣时间宜控制在10s~30s内,做到快插慢拔,避免漏振、过振。加强对倒角结构部位的振捣,延长振捣时间至30s左右,同时慢慢拔出振捣棒,拔到一半时停留几秒,将气泡引出,然后继续拔出振捣棒,保证拆模后的混凝土的

外观,随着混凝土浇筑的工作向前推进,振捣也相应跟上,确保混凝土的质量。

(7)浇筑的混凝土部位振动时,振动到该部位混凝土密实为止,密实标志为混凝土停止下沉,不再冒气泡,表面平坦、泛浆。

(8)浇筑底板结构时,每台混凝土泵车出料口要配3台以上振捣棒,分三道布置:第一道布置在出料点,让混凝土形成自然流淌坡度;第二道布置在坡脚处,让混凝土下部密实;第三道布置在斜面中部,斜面上各点严格控制振捣的时间、移动的距离和插入的深度。

(9)顶板浇筑时混凝土纵向浇筑顺序与底板墙身相同,顶板混凝土横向浇筑顺序为先将剩余墙身浇筑完成,之后按每层300~500mm厚分层浇筑。

(10)为控制顶板面层的标高和坡面的平整度,采用标高控制条进行控制。浇筑混凝土前,应复核标高控制条标高,进行浇筑,标高控制条应在混凝土平仓后取出,并立即逐条收面平整。

(11)中管廊横隔板混凝土全断面应一次性浇筑到位。浇筑时,采用地泵泵送工艺,施工工艺及要点与底板混凝土浇筑相同。

(12)振捣混凝土时,振捣棒不得碰撞模板,更不得卡住钢筋进行振捣,注意避开冷却水管以及相关监测元件。

(13)对浇筑后的混凝土进行二次振捣,排除混凝土因泌水在粗集料、水平钢筋下部形成的水分和空隙,提高混凝土和钢筋的握裹力,使结构混凝土的抗拉强度提升,从而提高抗裂性。二次振捣的恰当时间为混凝土振捣后尚能恢复到塑性状态的时间,实际施工中可将运转着的振捣棒靠其自身重力逐渐插入混凝土中进行振捣,混凝土在振捣棒慢慢拔出时能自行闭合,不会在混凝土中留下孔穴,此时施加二次振捣是宜最的^[5]。

(14)混凝土浇筑过程中,应采取措施防止受力钢筋、定位筋、预埋件等位移和变形,并及时清除混凝土表面的泌水。

(15)底板、顶板混凝土表面宜在初凝后终凝前进行二次抹压,减少表层由于水分蒸发导致的塑性收缩裂纹。

4 混凝土养护与监测

4.1 混凝土养护

养护措施的应用,能对大体积混凝土的内外温差加以控

制, 确保温差符合设计要求, 这也是提高施工质量的关键环节, 在完成混凝土的浇筑和振捣后, 及时拆模以及养护处理, 金鸡湖隧道的主体结构拆模时间应根据混凝土的强度和温度历程发展综合进行确定, 墙体结构宜在混凝土达到温峰后的 1 d 内拆模, 随后立即采取外保温养护措施, 控制降温速率 $\leq 3^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 拆除外保温措施时混凝土中心温度与环境温度之差不超过 15°C 。顶板拆模时混凝土强度应达到设计强度的 100%。针对立面混凝土难以有效保温和保湿养护, 可采取如图 2 所示的自粘式养护材料。该材料由防护层、保温层、保湿层以及自粘材料构成, 可根据实体结构散热条件进行定制, 并且可以多次重复利用。混凝土拆模后, 可自由贴合于混凝土表面, 实现混凝土温降速率的有效控制^[6]。

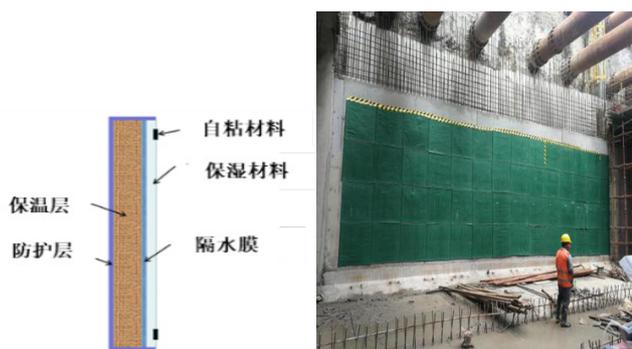


图 2 自粘式保温保湿养护材料示意图及应用效果图板式结构 (含大体积侧墙顶部)

混凝土浇筑完成后应立即进行抹面, 在初凝前, 宜喷雾或喷水蒸发抑制剂养护, 不应进行洒水、蓄水养护。混凝土终凝后可采取覆盖、蓄水等养护措施 (冬季施工时不能直接蓄水), 控制混凝土内外温差 $\leq 15^{\circ}\text{C}$, 养护水温与混凝土表面温度之差 $\leq 15^{\circ}\text{C}$, 养护时间不少于 14d。应关注混凝土养护过程中的气温骤降情况, 根据温度历程监测结果, 及时采取必要的保温措施, 预防冷击裂缝。

4.2 混凝土监测

应对结构混凝土收缩变形、温度等性能进行实体结构温度监测, 一方面对结构混凝土抗裂性进行有效评估, 另一方面指导精细化施工 (如拆模时间、保温措施等), 最终实现设计、材料、施工等的闭环控制。混凝土浇筑体内监测点的布置, 应真实地反映出混凝土浇筑体内最高温升、里表温差、降温速率、环境温度及混凝土变形。

实体结构混凝土温度与变形的监测, 应根据工程进展需

求确定, 对于典型工况条件下的施工 (如首件施工、设置冷却水管等) 应加强测点布置, 具体如下。

(1) 在单个隧洞底板、顶板的中心沿厚度方向, 上、下表面各布置 1 个温度计、厚度中心位置布置 1 个应变计。

(2) 墙体长度方向 1/2 处沿高度方向在底部中心、中部中心、顶部中心沿长度方向各布置 1 个应变计, 在中部中心对应的内、外面各布置 1 个温度计。

(3) 当设置冷却水管时, 高度方向上下层冷却水管中心布置 1 个应变计, 在循环水入口及出口处各布置 1 个温度计。

当工艺参数固定、开始规模化施工时, 可按如下方案布置测点: ①在单个隧洞底板、顶板的中心沿厚度方向, 上表面布置 1 个温度计, 厚度中心位置布置 1 个应变计; ②墙体长度方向 1/2 处沿高度方向在中部中心沿长度方向布置 1 个应变计, 在对应的外面布置 1 个温度计; ③当设置冷却水管时, 高度方向上下层冷却水管中心布置 1 个应变计, 在循环水入口及出口处各布置 1 个温度计。

此外, 温度传感器是温度监控中的关键设备, 应提供必要的通电、监测设备保护等措施。

5 结语

通过金鸡湖隧道主体结构大体积混凝土施工裂缝控制要点进行分析, 我们应该从施工开始到结束的全过程当中采取针对性措施, 加强对裂缝和温度的控制, 落实混凝土施工的相关规定及标准, 确保隧道工程建设的顺利实施。

参考文献

- [1] 江花平. 对桥梁施工大体积混凝土裂缝成因与防治研究 [J]. 四川水泥, 2020(10):42-43.
- [2] 赵勇祥. 风冷却技术在大体积混凝土温度裂缝控制中的应用 [J]. 中国住宅设施, 2020(08):48-49.
- [3] 陆林. 公路桥梁大体积混凝土常见裂缝与施工控制工艺 [J]. 智能城市, 2020(11):219-220.
- [4] 夏辉. 桥梁承台大体积混凝土施工温度控制研究与应用 [J]. 四川水泥, 2020(05):54.
- [5] 李涛. 桥梁大体积混凝土裂缝成因及控制措施 [J]. 交通世界, 2020(14):142-143.
- [6] 毛寿红. 桥梁大体积混凝土裂缝原因及控制措施分析 [J]. 科技视界, 2020(08):177-179.