

隧道锚锚塞体大体积砼水化热分析

许鹏

(贵州交通建设集团有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 以某悬索桥锚碇锚塞体大体积砼浇筑为工程背景, 根据锚塞体的异形结构, 考虑周边围岩的环境影响, 优化砼原材料和配合比, 布置冷却水管, 建立锚塞体水化热三维实体模型, 分析大体积砼锚塞体内部温度和温度应力变化历程, 获得锚塞体三维温度场和温度应力场变化规律, 并进行现场温度测试, 典型工况温度实测数据与理论数据的时程变化基本吻合, 锚塞体的水化热在可控范围内。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 大体积砼; 锚塞体; 水化热

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0121-04

在山区建设悬索桥时, 有时为充分利用当地地质条件, 减小锚碇的体积, 降低工程造价, 采用隧道锚作为锚碇形式。隧道锚通常由前锚室、锚塞体和后锚室三部分组成, 其中锚塞体是承担索缆的核心受力构件。锚塞体结构尺寸较长, 砼浇筑方量大, 且施工周期长, 经历复杂的环境温度, 大体积砼浇筑完成后由于水化热反应使结构整体温度变化引起体积变化, 在受到边界约束时会产生温度应力, 当该温度应力超过砼的抗拉强度时易导致锚塞体大体积砼出现裂缝, 进而影响结构的使用功能, 降低结构的刚度和耐久性。而目前针对隧道锚锚塞体大体积砼水化热的研究偏少。该文以某悬索桥隧道锚锚塞体大体积砼工程为例, 运用 MIDAS/FEA 有限元软件建立三维实体模型进行水化热仿真分析, 为工程施工提供指导。

1 工程概况

某主跨为 1 100 m 的双塔单跨钢桁梁悬索桥, 其中一侧为隧道锚形式, 采用框架式前锚室及支墩与隧道锚锚塞体结合的结构方案。隧道锚碇利用锚址区附近的围岩对锚塞体大体积砼形成锁止结构, 将缆索拉力通过锚固系统传递给更深层次的岩体。隧道锚洞的开挖深度为 73 m, 前锚室深 34 m, 锚塞体长度 36 m, 后锚室长度 3 m。锚塞体中心线倾角为 36.2° , 前锚面尺寸为 $13.5\text{ m} \times 15.587\text{ m}$, 后锚面尺寸为 $17.5\text{ m} \times 29.06\text{ m}$ 。

2 砼的裂缝控制

大体积砼出现裂缝的因素众多, 裂缝产生的原

因也错综复杂, 但均可归结为胶凝材料与水发生化学反应释放大量热量所产生温度的急剧变化导致温度应力和收缩应力超过其自身极限值而使砼结构出现裂缝。因此, 对于砼的裂缝控制主要是对大体积砼结构进行合理的分层浇筑, 对原材料进行优选并优化配合比设计, 控制砼的绝热温升, 同时辅以良好的冷却水管布置。

2.1 原材料优选及配合比优化

合理的原材料和配合比设计对于提高大体积砼结构的抗裂性能是一个有效且重要的手段, 可从源头降低砼本身因水化热反应引起的温度升高。砼的水化反应主要是由于水泥这一类胶凝材料与水进行反应释放出大量热量导致结构温度不断上升形成不稳定的温度场, 砼配合比设计中应在考虑满足砼强度的基础上尽量减少水泥用量。按照这种原则进行原材料选择和配合比设计, 可在一定程度上降低砼的绝热温升和砼开裂风险。

该桥隧道锚锚塞体施工周期长, 经历寒冷和高温时期, 施工环境变化大, 为节省工期, 减少温度对施工的影响, 将原浇筑层高设计为 2 m 的锚塞体更改成 3 m 一层, 共 12 层浇筑体, 并对原材料和配合比重新进行设计和优化。在原材料选择方面加大粉煤灰比例并掺入聚丙烯纤维, 降低砼的绝热温升, 提高砼的抗裂和防渗性能。经过反复试配, 锚塞体采用 C40 微膨胀聚丙烯合成纤维抗渗砼, 其设计配合比见表 1。

2.2 绝热温升

根据相关规范, 砼绝热温升的计算步骤如下: 先计算每千克砼中水泥的水化热总量, 再依据粉煤灰

表1 C40微膨胀聚丙烯合成纤维抗渗砼的配合比

材料名称	材料用量/(kg·m ⁻³)	相对用量/%	材料名称	材料用量/(kg·m ⁻³)	相对用量/%
水泥	280.00	11.54	粉煤灰	135.00	5.56
砂	837.00	34.50	减水剂	4.45	0.18
碎石	983.00	40.51	膨胀剂	30.00	1.24
水	156.00	6.43	聚丙烯纤维	0.90	0.04

掺量所对应的水化热调整系数计算胶凝材料的水化热总量,最后得出砼的绝热温升。水泥的发热量为391.3 kJ/kg,C40微膨胀聚丙烯合成纤维抗渗砼的绝热温升为:

$$T_{\max} = Q_0 \times (W + kF) / (c\rho) \times \xi \quad (1)$$

式中: Q_0 为砼在龄期为无穷大时的累积水化热(kJ/kg); W 为水泥用量(kg); k 为折减系数, $k=0.25$; F 为混合料用量(kg); c 为砼的比热容,取0.97 kJ/kg; ρ 为砼的密度,取2400 kg/m³; ξ 为降温系数,取0.68。

根据式(1)计算得C40微膨胀聚丙烯合成纤维抗渗砼的绝热温升 $T_{\max} = 35.88$ °C。

2.3 冷却水管布置

在大体积砼结构浇筑中,合理的冷却水管布置能大大降低砼整体温度,避免温度过高引起砼结构开裂。该桥锚碇浇筑厚度为3 m,内部共布置2层冷却水管,2层水管交错布置形成网格,并在每层各布置2个进水口和2个出水口,避免因冷却水管过长导致冷却效果不佳,同时减小砼内部温度梯度。冷却水管水平方向间距为1 m,铅垂方向间距分配为0.5:1:1:0.5。冷却水管的相关参数见表2。

表2 冷却水管的相关参数

项目	参数值
直径/mm	42
对流系数/[W·(m ² ·K) ⁻¹]	380.8
比热/[kJ·(kg·°C) ⁻¹]	4.187
入口温度/°C	18
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2.17

2.4 热工参数

热工参数的合理设定对于计算结果精确化具有重要的意义。该桥锚碇水化热计算热工参数见表3。

3 水化热仿真分析

3.1 模型建立

采用MIDAS/FEA建立1/2模型进行锚碇体水化热分析。因隧洞为半封闭环境,洞内空气对流

表3 计算参数

项目	参数值	
	围岩	锚塞体
比热/[kJ·(kg·°C) ⁻¹]	0.88	0.97
比重/(kg·m ⁻³)	1800	2426
热传导率/[W·(m·K) ⁻¹]	1.65	2.43
对流系数/	土工布	25.603
[W·(m ² ·K) ⁻¹]	岩棉被	1.638
大气温度/°C	20	
浇筑温度/°C	20	
热膨胀系数/×10 ⁻⁵	1.00	1.00
泊松比	0.15	0.20

较小,为准确分析围岩对锚塞体热传递及受力的影响,避免计算过程中热边界和应力边界的确定问题,将锚塞体周围围岩与锚塞体建立在同一计算模型中。图1为围岩整体模型,图2为围岩内锚塞体模型,其中锚塞体共26047个单元、34780个节点。



图1 1/2围岩整体水化热模型



图2 1/2锚塞体水化热模型(12层浇筑)

3.2 温度场有限元模拟分析

考虑冷却水管的布置,通过有限元模拟分析,得隧道锚碇体砼的温度分布见图3,各层内部最高

温度见表 4。

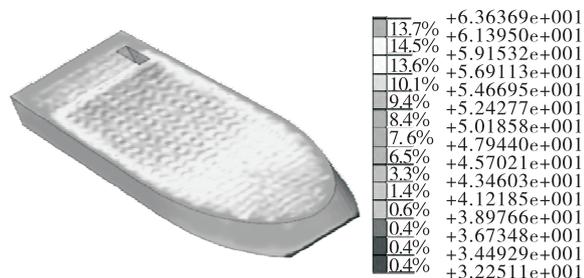


图 3 隧道锚锚塞体温度云图(单位:℃)

表 4 砼内部最高温度计算结果

浇筑层	最高温度/℃	浇筑层	最高温度/℃
1	52.3	7	57.9
2	54.2	8	63.6
3	55.1	9	61.2
4	54.3	10	56.5
5	58.6	11	53.1
6	59.1	12	50.3

由图 3、表 4 可知:每层新浇筑砼的最高温度出现在结构中心位置,为 50.3~63.6℃,其中第 8 层中心处温度最高,为 63.6℃,小于规范允许值 75℃,温峰出现在砼浇筑完成 2~3 d 后;各浇筑层内部温度梯度呈线性变化,表明砼内部温度场较均匀,

不会因温度梯度过大而发生温度应力裂缝。

3.3 温度应力有限元模拟分析

通过裂缝比率或最小抗裂安全系数判断结构是否存在水化热拉应力超过砼强度允许应力。根据有限元仿真分析得出锚塞体的整体最小裂缝比率见图 4。砼抗拉强度和防裂性能计算公式分别见式(2)、式(3),各浇筑层应力计算结果见表 5。

$$f_{tk}(t) = f_{tk}(1 - e^{-t}) \quad (2)$$

$$\sigma_z = f_{tk}/K \quad (3)$$

式中: $f_{tk}(t)$ 为龄期 t 时砼的抗拉强度标准值(MPa),C40 砼 28 d 抗拉强度为 2.39 MPa; K 为防裂安全系数,取 1.15。

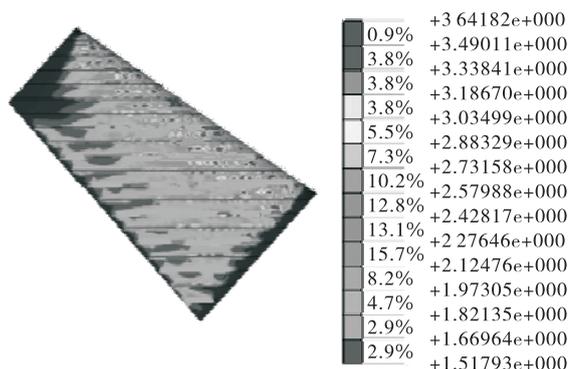


图 4 隧道锚锚塞体最小裂缝比率(法向)

表 5 隧道锚锚塞体温度应力场分析结果

龄期/ d	各浇筑层的温度应力/MPa												最小防裂 安全系数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
3	0.79	0.82	0.86	0.84	0.91	0.88	0.96	1.16	1.14	1.05	1.03	0.96	1.27
7	0.61	0.65	0.71	0.78	0.82	0.98	1.12	1.26	1.15	1.12	1.05	1.10	1.66
28	1.35	1.52	1.65	1.70	1.78	1.89	1.75	1.88	1.71	1.78	1.62	1.51	1.26

由图 4 可知:该桥隧道锚锚塞体最小法向裂缝比率为 1.52,法向裂缝比率大于 1,表明锚塞体砼各处随龄期变化发生的抗拉强度小于砼龄期为 t 时的抗拉强度标准值,结构在理论上不会发生开裂。

由表 5 可知:该桥隧道锚锚塞体各浇筑层不同龄期最小防裂安全系数为 1.26,满足最小防裂安全系数 1.15 的技术要求,表明结构在理论上不会发生开裂现象。

4 现场试验验证

根据计算分析结果,按照砼设计配合比及冷却水管布置方案组织施工,每层埋设温度传感器,布置测试系统。选取第 6 层具有代表性的测点 1#、5#、11#、15# 进行分析,其中 1#、11# 测点温度代表锚塞

体基础表面温度,5#、15# 测点温度代表支墩基础内部温度。支墩基础内、外温度变化见图 5,砼特征点内表实测温度与温度场理论值对比见图 6。

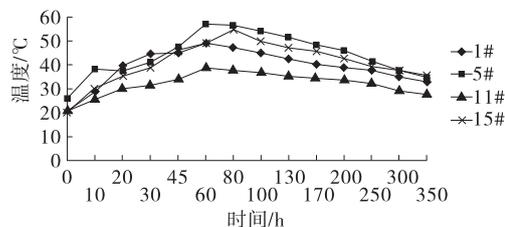


图 5 实测砼特征点内、外温度变化曲线

由图 5、图 6 可知:该桥隧道锚锚塞体第 6 层最高温度出现在第 60~80 h,最高温度为 57.5℃,低于允许值 75℃;内外温差为 0~16.9℃,符合内外温差指标要求;从开始浇筑至 45h 温升较快,至约

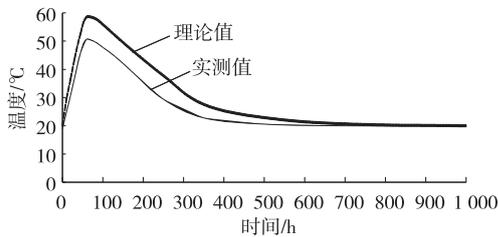


图6 砼内表温度实测值与理论值对比

60 h 温升有所减缓;开始降温至 172 h 的降温速率为 0.1~0.2 °C/h,172 h 后降温速率低于 0.1 °C/h,符合降温速率指标要求。温度实测值与理论值的时程变化基本吻合,锚塞体的水化热在可控范围内。整个浇筑过程未出现开裂现象,达到了温度控制要求,满足工程需要。

5 结论

(1) 大体积砼锚塞体最高温度为第 8 层中心处的 63.6 °C,小于规范允许值 75 °C,法向裂缝比率和防裂安全系数均表明锚塞体砼各处的抗拉强度小于砼容许抗拉强度标准值,优化砼配合比和冷却水管布置,2 m 变 3 m 浇筑层高在技术上可行。

(2) 典型工况温度实测数据与理论数据的时程变化基本吻合,锚塞体的水化热在可控范围内,整个浇筑过程未发生开裂现象,满足温度控制要求和工程需要。

参考文献:

[1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].第2版.北京:中国水利水电出版社,2012.
 [2] MALHOTRA V M.High-performance high-volume fly ash concrete[J].Concrete International,2002,24(7):30

(上接第 120 页)

参考文献:

[1] 邵淑营.灌浆波纹管连接装配式桥墩抗震性能研究[D].福州:福州大学,2018.
 [2] 葛继平,夏樟华,江恒.灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验[J].中国公路学报,2018,31(12):221-230+266.
 [3] 郑永峰,郭正兴.变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J].建筑结构学报,2016,37(3):94-102.
 [4] 唐黎明,严升威,曹政,等.基于反应谱法的高墩连续刚构桥地震响应特性分析[J].中外公路,2017,37(2):98

-34.
 [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.大体积混凝土施工标准:GB 50496-2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
 [4] 刘琳莉.桥梁大体积混凝土水化热施工控制研究[D].成都:西南交通大学,2012.
 [5] 李航.悬索桥锚碇大体积混凝土水化热分析[D].成都:西南交通大学,2017.
 [6] 杨秋玲,马可栓.大体积混凝土水化热温度场三维有限元分析[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(2):261-263.
 [7] 刘杰,赵超.缺水山区大体积混凝土温控技术[J].中外公路,2015,35(3):188-191.
 [8] 张湧,刘斌,贺拴海.桥梁大体积混凝土温度控制与防裂[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(3):43-46.
 [9] 牛建丰.高墩大跨桥梁大体积混凝土水化热分析研究[D].重庆:重庆大学,2013.
 [10] MALKAWI A H,MUTASHER S A,QIU T J.Thermal-structural modeling and temperature control of roller compacted concrete gravity dam[J].Journal of Performance of Constructed Facilities,2003,17(4):177-187.
 [11] 朱晓川.坞墩大体积混凝土温度场应力场研究[D].南京:河海大学,2008.
 [12] 王桂玉.大体积混凝土温度应力问题研究分析[D].郑州:郑州大学,2015.
 [13] 刘长海.大体积混凝土水化热温度试验与仿真分析[J].广东土木与建筑,2018,25(7):67-70.
 [14] 占玉林,段增强,张强.承台大体积混凝土水化热及温度控制措施研究[J].世界桥梁,2018,46(3):45-49.

收稿日期:2020-03-17

-101.
 [5] 蔡小培,谭茜元,刘万里,等.无砟轨道简支梁桥墩纵向刚度限值研究[J].铁道工程学报,2019,36(11):38-44.
 [6] 樊泽,曾明辉,胡志坚.预制拼装桥墩连接构造抗震性能分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(2):357-362.
 [7] 舒亮.高速铁路简支梁桥墩顶纵向刚度差研究[J].湖南交通科技,2019,45(1):133-137.
 [8] 刘建磊.不同形式桥墩基础的动静刚度模型试验研究[J].铁道建筑,2018,58(6):36-39+52.

收稿日期:2020-03-14