

建筑技术

综合蓄热法在地铁车站混凝土 冬期养护中的应用研究

马明波¹ 乔 雄² 柳之森³

(西安市地下铁道有限责任公司¹,西安 710018;兰州理工大学土木工程学院²,兰州 730050;中铁十四局集团有限公司³,济南 250014)

摘 要 对综合蓄热法的概念及相应施工要求、养护热工计算进行了阐述,并以哈尔滨地铁一号线哈尔滨东站为工程依托,针对城市地铁明挖车站冬期施工特点,在设计及施工中采用综合蓄热法养护技术,以测温数据指导施工,确保混凝土养护期间不受冻害影响,实现了车站主体结构冬期施工安全、质量达标的目标。并得出如下结论:1)采用综合蓄热的养护方法,经测温显示当大气温度最低为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土温度为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,棚架内温度为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,当大气温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,棚架内温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$;2)浇注完成,现场留设同条件养护试件3组,经试压,在此条件下养护3 d时的混凝土强度可达到抗冻临界强度要求(设计强度的30%);3)采用上述养护方法可满足大气温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的混凝土养护。可为类似工程提供借鉴。

关键词 城市地铁 冬期施工 混凝土 综合蓄热法

中图法分类号 TU47; **文献标志码** A

随着我国基础建设的不断发展,寒冷地区的经济技术开发建设项目日益增多,混凝土冬季施工愈来愈受到人们的重视。因为在寒冷地区,混凝土浇注后强度还比较低的情况下衬砌结构如果受到冻害作用,会形成收缩裂缝^[1]。如果施工、养护不当就会引发一系列的病害^[2],从而影响到施工工期及建筑物的运营使用。相关规范^[3]中对冬期混凝土施工养护做了明确规定。而在寒冷地区冬期混凝土施工养护常采用的方法为综合蓄热法^[4-7]。此种方法已在房建工程中得到了大量的应用^[8-10],但在地铁车站的施工中应用较少,为此,以哈尔滨地铁一号线哈尔滨东站为依托,开展综合蓄热法的具体应用研究。

1 综合蓄热法

1.1 定义

综合蓄热法就是通过高效能的保温围护结构,使混凝土加热拌制所获得的初始热量缓慢冷却,并充分利用水化热和掺用相应的外加剂或者进行短时加热等综合措施,使混凝土温度在降至冰点前达到允许受冻临界强度或者承受荷载所需的强度^[11]。

1.2 蓄热法养护材料及厚度的确定

混凝土养护的保温材料种类、厚度及构造需同时满足大体积混凝土抗裂性以及冬季施工对混凝土保温层的要求,应先通过蓄热法养护热工计算确定保温层的厚度,然后再用大体积混凝土的热工计算验算该厚度的保温层能否满足大体积混凝土抗裂性的要求。

1.3 混凝土拌制及运输要求

(1) 冬期施工混凝土选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,水泥标号不应低于425号,最小水泥用量

2011年8月25日收到

第一作者简介:马明波(1979—),男,陕西大荔人,工程师,研究方向:隧道工程的技术管理。E-mail:85742134@qq.com。

不少于 300 kg/m³,水灰比不大于 0.6。

(2) 混凝土所用骨料必须清洁,不得含有冰、雪等冻结物及易冻裂的矿物质。

(3) 冬施期间拌制混凝土优先采用加热水的方法,水的温度不得高于 80 ℃,搅拌时间较常温施工延长 50%,当加热水不能满足要求时,再对骨料进行加热,骨料的加热温度不得高于 60 ℃,并且骨料不得在钢板上灼炒,任何情况下都不得对水泥进行加热,形成假凝,投料时先投入骨料和水,最后投入水泥。

(4) 冬施期间,运输混凝土的罐车外罩保温套,防止混凝土在运输过程中受冻。

1.4 综合蓄热法养护热工计算思路

当施工条件确定以后,先初步选定保温材料的种类、厚度和构造,然后计算出混凝土冷却到 0 ℃的延续时间和混凝土在此期间的平均温度。据此再估算出混凝土温度降为 0 ℃时混凝土可能获得的强度,验证此强度是否达到临界强度;如果所得结果达不到抗冻临界强度值要求,则修改保温层设计,再进行计算,直至符合要求为止。

(1) 混凝土蓄热养护开始到任一时刻 t 的温度 T ,计算公式为:

$$T = \eta e^{-\theta v_{ce} t} - \varphi e^{-v_{ce} t} + T_{m,a} \tag{1}$$

式(1)中, T 为混凝土蓄热法养护开始到任一时刻 t 的温度(℃); θ 、 φ 、 η 为综合参数,按下式计算:

$$\theta = \frac{\omega KM}{v_{ce} C_c \rho_c} \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{v_{ce} Q_{ce} m_{ce}}{v_{ce} C_c \rho_c - \omega KM} \tag{3}$$

$$\eta = T_3 - T_m + \varphi \tag{4}$$

$$M = \frac{A}{V} \tag{5}$$

$$K = \frac{3.6}{0.04 + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \tag{6}$$

$$T_3 = \frac{C_c m_c T_2 + C_f m_f T_f + C_s m_s T_s}{C_c m_c + C_f m_f + C_s m_s} \tag{7}$$

M 为结构表面系数(m⁻¹); e 为自然对数底,取 2.72; v_{ce} 为水泥水化速度系数(h⁻¹); t 为混凝土蓄

热法养护开始到任一时刻的时间(h); $T_{m,a}$ 为混凝土蓄热法养护开始到任一时刻 t 的平均气温(℃); ω 为透风系数; K 为结构围护层的总传热系数(kJ/(m²·h·K)); C_c 为混凝土的比热容(kJ/(kg·K)); ρ_c 为混凝土的质量密度(kg/m³); Q_{ce} 为水泥水化积累最终放热量(kJ/kg); m_{ce} 为每立方米混凝土水泥用量(kg/m³); T_3 为考虑模板和钢筋吸热影响,混凝土成型完成时的温度(℃); T_m 为混凝土蓄热法养护开始到任一时刻 t 的平均温度(℃); A 为混凝土结构表面积(m²); V 为混凝土结构的体积(m³); d_i 为第 i 层围护层的厚度(m); λ_i 为第 i 层围护层的导热系数[W/(m·K)]8; T_2 为混凝土拌和物运输到浇筑时的温度(℃),取 12 ℃; T_f 为模板的温度,未预热时采用当时的环境温度,取 -10 ℃; T_s 为钢筋的温度,未预热时采用当时的环境温度,取 -10 ℃; C_s 为钢筋的比热容(kJ/(kg·K)); C_f 为模板的比热容(kJ/(kg·K)); m_c 为每 m³ 混凝土的重量(kg/m³); m_f 为每 m³ 混凝土相接触的模板重量(kg),取顶板 65.2 kg; m_s —每 m³ 混凝土相接触的钢筋重量(kg),取为 280 kg,式中个别系数的取值可从表 1—表 4 中查得。

(2) 混凝土蓄热养护开始到任一时刻 t 的平均温度 T_m ,计算公式为:

$$T_m = \frac{1}{v_{ce} t} \left(\varphi e^{-v_{ce} t} - \frac{\eta}{\theta} e^{-\theta v_{ce} t} + \frac{\eta}{\theta} - \varphi \right) + T_{m,a} \tag{8}$$

表 1 水泥水化积累最终放热量 Q_{ce} 和水化速度系数 v_{ce}			
水泥品种及强度等级	$Q_{ce}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$V_{ce}/(\text{h}^{-1})$	
52.5 号硅酸盐水泥	400	0.013	
52.5 号普通硅酸盐水泥	360		
42.5 号普通硅酸盐水泥	330		
42.5 号矿渣、火山灰、粉煤灰硅酸盐水泥	240		

表 2 透风系数 ω			
围护层种类	透风系数		
	小风	中风	大风
围护层由透风材料组成	2	2.5	3
易透风保温材料外包不易透风材料	1.5	1.8	2
围护层由不易透风材料组成	1.3	1.45	1.6

表 3 保温材料的导热系数 λ

材料名称	导热系数/ [W · (m · K) ⁻¹]	材料名称	导热系数/ [W · (m · K) ⁻¹]
水	0.58	矿棉、岩棉沥青矿棉毡	0.013 ~ 0.065
木模板	0.23	泡沫塑料	0.035 ~ 0.047
草袋子	0.14	膨胀珍珠岩	0.019 ~ 0.065

表 4 各种材料的比热容 C_e

材料名称	比热/[kJ · (kg · K) ⁻¹]
新捣实混凝土	1.05
硬化的混凝土	0.84
珍珠岩混凝土	0.84
加气混凝土	0.84
泡沫混凝土	0.84
木材	2.51
钢板	0.63

2 工程概况

2.1 概况

哈尔滨东站位于哈尔滨市道外区桦树街下、哈尔滨东站广场西侧,横跨北棵头道街和北棵街;为地下二层岛式车站,单柱双跨框架结构。车站主体结构内包尺寸长 332.7 m,宽度 17.8 m,结构高 12.33 m。车站基坑开挖深度约 17 m,围护结构为 800 mm 厚地下连续墙加 $\Phi 609$ mm 钢管内支撑的支护体系。

为确保车站主体结构耐久性,根据设计要求,结构混凝土中严禁掺加早强剂、抗冻剂等外加剂,同时为确保施工期间混凝土不受冻,混凝土入模温度不得低于 12℃。因此,本工程中采用对混凝土中除水泥外的其它组分进行加热,混凝土浇注成型后,在充分利用水泥水化热基础上,对混凝土进行保温养护,使混凝土达到抗冻临界强度的方法。

2.2 气候特征

哈尔滨地处松花江中游,属中温带大陆季风气候,冬季漫长寒冷干燥,多西北风,夏季短暂温热多

雨,春季多风,秋季凉爽。全年平均气温 3.5℃,一月最冷,七、八月最热,历史最高气温 41℃,最低气温 -41.4℃,全年无霜期 150 d 左右,结冰期 190 d 左右。年平均降雨量 530 mm,多集中在七、八两个月。多年平均蒸发量 1 501.4 mm,季节性冻土发育,每年十月末开始结冻,至翌年三月中旬开始融化,六月初化透,最大冻结深度 2 m。

哈尔滨地区冬季严寒而漫长,冬期施工如何做到经济、安全,又能够保证工程质量,是需要着重研究和探索的课题。

3 综合蓄热法养护的热工计算过程

在哈尔滨明挖工程施工中,设定养护期间的大气平均温度为 -10℃,混凝土的入模温度为 12℃,混凝土采用等级强度为 PO.42.5 的普通硅酸盐水泥拌制,水泥用量为 300 kg/m³,混凝土质量密度取 2 500 kg/m³。保温材料选用电热毯和毡毯,混凝土表面铺设塑料薄膜。

3.1 估算混凝土的平均温度

影响较大的主体结构顶板作为计算对象,25 m 一个流水段,根据上述公式以及设定的施工、养护条件,计算如下:

相关参数的取值如下: $T_s = T_f = T_{m,a} = -10℃$; $\rho_c = m_c = 2\ 500\text{ kg/m}^3$; $m_{ce} = 300\text{ kg/m}^3$; $Q_{ce} = 330\text{ kJ/kg}$; $\omega = 1.5$; $C_e = 0.97\text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; $C_f = 2.51\text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; $C_s = 0.63\text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; $e = 2.72$; $d = 0.02\text{ m}$; $v_{ce} = 0.013\text{ h}^{-1}$; $\lambda = 0.14\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; $T_2 = 12℃$; $A = 475\text{ m}^2$; $V = 380\text{ m}^3$ 。

将这些值分别代入式(1)一式(8)中,可得 $M = 1.25\text{ m}^{-1}$; $K = 6.512\text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k)}$; $T_3 = 9.2944℃$; $\theta = 0.387$; $\varphi = 66.632$; $\eta = 85.926$;
 $T = \eta e^{-\theta v_{ce} t} - \varphi e^{-v_{ce} t} + T_{m,a} = 85.926 \times 2.72^{-0.387 \times 0.013 \times t} - 66.632 \times 2.72^{-0.013 \times t} - 10 = 85.926 \times 2.72^{-0.004914t} - 66.632 \times 2.72^{-0.013t} - 10$ 。

当 $T = 0$ 时,解得: $t \approx 434\text{ h}$ 即:养护 434 h 后混凝土的温度降为 0℃。

由此可得混凝土平均温度 T_m 为 13.157℃。

3.2 估算混凝土的强度

根据计算,混凝土温度降至 0℃ 的延续时间为 434 h(约 18 d),此时混凝土平均温度为 13.157℃,本工程采用的混凝土为普通硅酸盐混凝土,查图 1 强度增强曲线可知:当平均温度为 15℃ 时,第 5 天的混凝土强度约为 40%,即为 $30 \times 40\% = 12(\text{MPa})$,大于混凝土的临界强度(9 MPa),可以确定在 13.175℃ 的养护温度下养护 5 d 可以满足混凝土冬施要求。

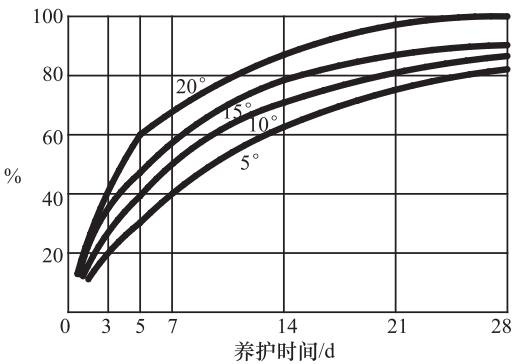


图 1 强通硅酸盐混凝土度增强曲线

混凝土侧墙及柱养护:内衬墙浇注成型后,在内衬墙端支架上悬挂毡毯及彩条布制成的保温层,其与板上的覆盖保温层连为一体,形成保温暖棚,棚内根据测温数据启用热风幕进行加热。如图 2 所示。

4 混凝土测温

4.1 测温点的布置

测温孔留设在温度变化大、热量容易散失或易于遭受冻结的部位,其中底板及顶板平面按不少于 50 m²/孔的原则布置,沿板的高度可分为表面测温点、中部测温点,表面测温点的高度为表面标高下返 50 mm;中部测温点的高度为表面标高下返 1/2 板厚,表面测温点和中部测温点间隔布置;墙体测温点布置于墙体上口、中间、下口(距迎土面 0.3 m)部位,其中中间为中部测温点,上口和下口为表面测温点。

4.2 测温孔的预留及测温方法

使用温度计测温时,预先按照测温点布置图埋好一端封闭的 φ14 mm 的 PVC 管,测温时将管内注水并将温度计放入,端口用岩棉塞住,3 min 以后读数。

4.3 测温注意事项

严密监测混凝土的温升情况,根据温度记录,增减保温材料厚度或层数。控制混凝土中心温度与表面温度之差小于 20℃,拆模后的混凝土表面温度与环境温度之差小于 20℃。当混凝土中心温度与表面温度之差超过 20℃ 时,可增加保材料厚度或层数。

每天应测量当天最高、最低温度,大气温度每天至少测量 4 次,分别是早晨 8 点、晚 8 点、下午 2 点和凌晨 2 点,以便于了解混凝土外界的温度变化,及时采取措施确保混凝土质量。测温由 11 月 1 日至冬期结束。当混凝土中心温度与大气最低温度之差连续 3 d 小于 20℃,并且混凝土的强度大于临界强度后,可停止保温、测温。但突然降温时仍应继续保温。

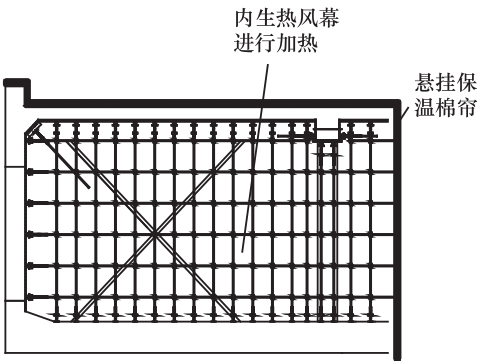


图 2 混凝土侧墙及柱养护示意图

根据上述计算,混凝土浇注施工前,在板钢筋上焊接马蹬筋,上铺木方做为跳板,马蹬筋采用 Φ22 钢筋制作,纵向间距 150 cm,上铺 5 cm × 10 cm 厚木方,跳板间距 2 m,浇注混凝土时,控制浇注顺序从板的一端向另一端浇注,边浇注边收面,收面完成后,施工人员站在跳板上及时对浇注完成的混凝土面覆盖塑料薄膜、毡毯等进行保温养护,为防止天气突变,在薄膜之上覆盖一层电热毯以防止混凝土受冻,整个养护期间,安排专人负责测温,根据测温所得数据采取是否加热等措施。

5 结论

在地铁主体结构混凝土冬期养护工程中,采用不添加防冻剂的综合蓄热法进行混凝土的施工与养护,取得了良好的效果:

(1) 采用上述养护方法,经测温显示当大气温度最低为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土温度为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,棚架内温度为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,当大气温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,棚架内温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 浇注完成,现场留设同条件养护试件 3 组,经试压,在此条件下养护 3 d 时的混凝土强度可达到抗冻临界强度要求(设计强度的 30%)。

(3) 采用上述养护方法可满足大气温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的混凝土养护。

本文所得结论可为类似工程混凝土的冬期施工提供借鉴。

参 考 文 献

- 1 廖 宏,孙鑫鹏,李益进. 隧道衬砌混凝土非结构性裂缝分析及对策. 隧道建设,2009;29(1):7—13,27
- 2 张 丽. 合武铁路桥梁工程大体积混凝土裂缝产生的原因与预防措施. 隧道建设,2007;27(增刊):47—48,82
- 3 建筑工程冬期施工规程(JGJ 104—1997). 中华人民共和国建设部,1997
- 4 吴敬桢. 混凝土冬期施工技术措施. 科技信息,2011;(5):295
- 5 杨赵军. 高寒地区混凝土施工技术. 中国水运(下半月刊),2010;10(10):247—248
- 6 王禄民. 浅谈综合蓄热法在冬期混凝土施工中的应用. 施工技术,2010;39(增刊):212—215
- 7 李俊明. 冬期混凝土综合蓄热法养护施工实例分析. 科技情报开发与经济,2010;20(8):163—165
- 8 卢予蔚. 综合蓄热法及混凝土泵送技术在高层建筑冬期施工的方法. 福建建材,2008;(2):77—78
- 9 韩爱中. 综合蓄热法在包头站房工程中的应用. 内蒙古科技与经济,2007;(20):70—73
- 10 辛玉山,辛玉凤. 综合蓄热法在混凝土冬季施工中的应用. 林业科技情报,2006;38(3):43—45
- 11 仁 月. 综合蓄热法简介. 市政技术,1988:44—45

The Application Research on Comprehensive Thermos Method Used in Winter Construction of Subway Station Concrete

MA Ming-bo¹, QIAO Xiong², LIU Zhi-sen³

(Xi'an Metro Co. Ltd.¹, Xi'an 710018, P. R. China; School of Civil Engineering, Lanzhou

University of Technology², Lanzhou 730050, P. R. China;

China Railway 14th Bureau Group Co. Ltd.³, Ji'nan 250014, P. R. China)

[Abstract] The concept of comprehensive thermos method, the corresponding construction requirements and the conservation thermal calculation are elaborated. Rely on East Station of the Harbin Subway line one, for the features of open cut construction in subway during winter, for conservation is applied during design and construction, the construction is guided by temperature data, to ensure the frost damage is avoided during the concrete curing. The goal which main structure of the station in winter construction safety and quality standards is achieved. And the following conclusions is reached: 1) The comprehensive thermos method is used, the temperature displays, when the air temperature as low as $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the concrete temperature is $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, the scaffolding temperature is $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, when the air temperature as low as $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, the concrete temperature is $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, the scaffolding temperature is $14\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) When casting complete, leaving 3 groups specimen with the same conditions, after pressure test, under these conditions, conservation of the third day of the antifreeze critical strength of the concrete strength requirements can be achieved (30% of design strength); 3) The conservation methods could meet the concrete curing when the air temperature between $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$. It also can provide a reference for similar projects.

[Key words] subway winter construction concrete comprehensive thermos method