

交叠车站下穿段 MJS 加固及水化热温度 实测研究

杨平¹, 孙成刚¹, 赵红光², 周子朋¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京地铁集团建设公司, 江苏 南京 210008)

摘要 目的 研究 MJS 加固区温度场变化规律, 给出并实施交叠车站下穿段 MJS 加固方案, 为南京地铁 7 号线中胜站下穿工程选择冻结开始时机提供依据。方法 通过埋设内测温孔, 对 MJS 加固体水化热温场进行实测, 得出 MJS 加固体水化热温度的变化规律。结果 MJS 桩体产生的水化热大部分已在桩体施工完成后 10 d 内释放完毕, 且在 10 d 内达到最高温度; 加固体内部温度呈负指数幂函数形式下降, 降温速率先快后慢; 交界面处与加固体内部的温差先减小后增大, 且温差始终保持在 10 ℃ 以上; “山” 字形加固体最高温度处于中间竖墙顶部。MJS 桩布置越密集、施工完成时间越接近, 加固范围越大, 在群桩加固体中心产生的温度就越高, 自然降温条件下前期降温速率越缓。结论 MJS 加固完成后第 60 天为最佳开冻时机。

关键词 MJS 加固; 水化热; 温度; 降温速率; 实测

中图分类号 TU445

文献标志码 A

Research on MJS Reinforcement and Temperature Measurement of Hydration Heat in the Underpass Section of Overlapping Water-Rich Sand Station

YANG Ping¹, SUN Chenggang¹, ZHAO Hongguang², ZHOU Zipeng¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, 210037; 2. Nanjing Metro Group Construction Corporation, Nanjing, China, 210008)

Abstract: To study the change law of temperature field in the MJS reinforcement area, give and implement the MJS reinforcement scheme for the underpass section of the interlocking station, and provide a basis for selecting the freezing start time for the underpass project of Zhongsheng Station of Nanjing Metro Line 7. By burying internal temperature measurement holes, the temperature field of MJS plus solid hydration heat was measured in real time, and the variation law of MJS plus solid hydration heat temperature was derived. Most of the hydration heat generated by the MJS pile was released within 10 d after the completion of the pile construction, and the maximum temperature

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709088)

作者简介: 杨平(1964—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事环境岩土与地下工程等方面研究。

was reached within 10 d. The internal temperature of the plus solid decreased in the form of negative exponential power function, and the cooling rate was first fast and then slow; the temperature difference between the intersection and the internal temperature of the plus solid decreased and then increased, and the temperature difference was always maintained above 10 °C. The denser the MJS piles are, the closer the construction completion time is, and the larger the reinforcement area is, the higher the temperature generated in the centre of the cluster pile reinforcement, and the slower the cooling rate in the early stage under natural cooling conditions. It is concluded that the best time to open the freeze is on day 60 after the completion of the MJS reinforcement.

Key words: MJS reinforcement; heat of hydration; temperature; cooling rate; actual measurement

随着我国轨道交通建设快速发展,更多新建线路需要穿越已建线路,往往会遇到在复杂工程地质与水文地质条件下新建车站下穿既有车站的复杂问题。南京地铁7号线中胜站下穿十号线运营车站工程,处于全断面承压富水地层,在承压富水砂层中,车站密贴下穿工程容易出现坍塌和涌水,并引起既有车站大量沉降,施工难度极大,全方位高压喷射注浆工法(Metro Jet System, MJS)水泥土桩水平加固效果好,可抑制地层冻胀融沉变形,同时采用人工冻结法在富水砂层中进行止水,可大大降低坍塌和涌水的风险^[1-6]。而 MJS 桩水泥掺量较高,一般在 40% 以上,热物理特性与常规土体差异较大,且由于水泥导热性能较差,大体积 MJS 桩水泥水化放热使桩内外形成温差和温度应力,易对加固结构造成不利影响,且温度过高将影响人工冻结效果。掌握其加固后温度变化规律,寻求合理地温下开始冻结的时机成为该联合加固必须解决的技术问题。

目前针对普通水泥土的特性研究广泛^[7-13],如基本物理特性、热物理特性、抗压抗折强度特性及水化热温度特性,但是对 MJS 水泥土的特性尤其是水化热温度特性研究较少。基于此,笔者通过工程现场实测,对 MJS 水泥土加固区水化热温度场发展规律进行研究,获得 MJS 桩体施工完成后达到最高温度的时间,以及达到最高温度后 MJS 桩体整体温度下降规律,给出 MJS 加固完成

后可实施冻结的最佳时机,为南京地铁中胜站下穿工程 MJS 加固 + 冻结法施工的冻结方案设计提供依据。

1 工程背景

南京地铁7号线中胜站位于泰山路与河西大街交叉口,南北向布置,既有10号线中胜站则沿河西大街南侧东西向布置。结合既有10号线中胜站现状,最终确定7号线中胜站与既有10号线中胜站采用“厅~台式”换乘方案,近穿段与既有站底板底仅0.6 m,施工风险巨大。

7号线中胜站位于南京河西地区,地下水主要为潜水及承压水,承压水水头埋深在地面下2.60~3.20 m,承压含水层常年有水。近穿段地层由上至下均为承压水含水层,其渗透性、富水性好。为有效防止涌水同时控制既有车站的沉降,确保10号线既有中胜站营运安全,经方案比选确定下穿段采用“山”字形水平 MJS 加固 + 水平冻结止水 + CRD 暗挖法密贴施工的方案。

2 MJS 水泥土桩加固方案与工艺参数

针对该承压富水砂层交叠下穿工程,采用 MJS + 水平冻结加固技术进行加固施工,当 MJS 加固施工完成后,水泥土加固区温度场变化规律将直接影响冻结温度场的发展,水泥土加固引起的水化热及温度成为冻结设

计的重要依据。

新建七号线中胜站下穿暗挖段 MJS 加固拟采用 92 根水平 MJS 桩进行加固,MJS 加固体桩设计抗压强度不小于 1 MPa,以形成一个“山”字形 MJS 加固区域,“山”字形

两侧及底部加固区域厚度为 2 m,中部加固区域厚度为 3.4 m,水平加固长度贯穿整个交叠车站下穿段,为 17.0~27.0 m。MJS 工法桩设计加固区域如图 1 所示。

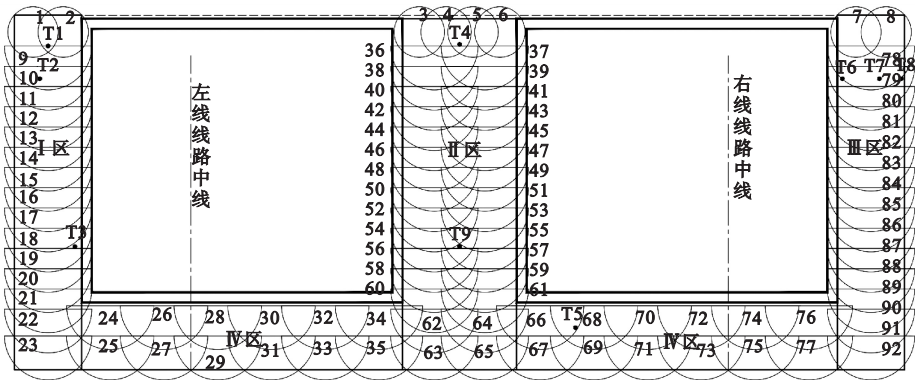


图 1 MJS 工法桩位置示意图

Fig. 1 MJS method pile location diagram

根据试桩研究成果^[14]确定具体加固范围及参数:①为最大限度形成封闭帷幕,靠近既有线底板位置处采用全圆加固,全圆桩桩径为 1.5 m,水泥质量分数为 55%,共计 8 根;②为保证现场实际施工过程中 MJS 桩位的搭接,降低不均匀加固概率,防止开挖过程

中基底突涌,除既有线底板位置处,“山”字形 MJS 加固区域两侧、底部及中间部分加固区域采用直径 2.6 m 半圆,搭接长度 2 m,桩心间距 0.6 m,水泥质量分数为 60%,共计 84 根。主要工艺参数见表 1,浆液配比水泥与水质量比为 1:1。

表 1 MJS 工法桩施工主要工艺参数

Table 1 Main process parameters for MJS method pile construction

水灰质 量比	泥浆体积 质量/(g·cm ⁻³)	水泥浆 压力/MPa	主空气 压力/MPa	主空气 流量/(m ³ ·min ⁻¹)	倒吸水 压力/MPa	倒吸水 流量/(L·min ⁻¹)
1:1	1.5±0.05	40±2	0.5~1	0.8~1.0	1~10	15~45
成桩水平 度误差	削孔水 压力/MPa	提升速度/ (min·m ⁻¹)	水泥浆浆液 流量/(L·min ⁻¹)	步距 行程/mm	转速/rpm	地内压 力系数
≤1/150	10	25~45	80~110	25	3~4	1.3~1.6

3 MJS 加固体水化热温度实测研究

3.1 测温孔及测点布置

为掌握下穿段 MJS 加固体的温度场变化规律,并结合其他现场测温工程经验,测温孔位置布置原则:测温孔的整体布置方案应能反映整个待测区域的温度场变化;对不同散热条件位置处均应布置多个测温孔;对相

同散热条件位置可适当精简测温孔及测点数量;为掌握关键位置处的温度变化情况,应在关键位置布置多组不同测温孔,如改变测温孔的深度、角度、测点位置等;为掌握待测区域温度场变化的全过程,测温孔应在相应工程施工完成后尽快打设并进行测温。针对下穿段“山”字形 MJS 加固区,划分为 4 块区域(见图 1)。MJS 水化热测温孔共布置 9 个,编号为 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8、T9,其分布位置如

图 1 所示。

T1 位于 I 区中轴线 1#号 MJS 桩体内,距既有车站底板 0.913 m;T2 位于距 I 区中轴线 250 mm 处 10#号 MJS 桩体内,距既有车站底板 1.882 m;T3 位于距 I 区中轴线 800 mm 处 18#号 MJS 桩体内;T4 位于 II 区中轴线 4#、5#号 MJS 桩体搭接处,距既有车站底板 0.863 m;T5 位于距 IV 区加固体顶部边界 650 m 的 66#、68#号 MJS 桩体搭接处;T6、T7、T8 均位于 79#号 MJS 桩体内,且位于同一水平线上,距既有车站底板 1.882 m,T7 距 III 区中轴线 250 mm,T6 与 T7 间隔 1100 mm,T8 与 T7 间隔 650 mm;T9 位于 54#、55#、56#、57#号 MJS 桩体搭接处,

位于 II 区中轴线处。笔者以 T1 测温孔深度位置为例(见图 2),各测温孔参数及测点位置参数见表 2。

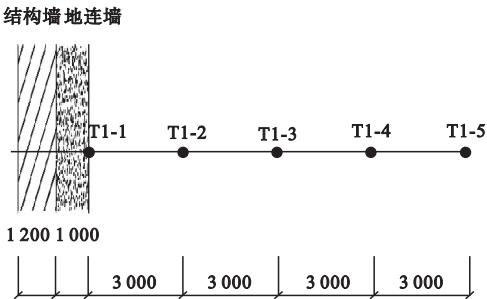


图 2 MJS 测温孔深度示意图

Fig. 2 Diagram of the depth of the MJS temperature measurement holes

表 2 测温孔测点位置统计表

Table 2 Location statistics for temperature measurement holes

编 号	测点数量/个	测点入土深度/m				
		测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
T1	5	0	3	6	9	12
T2	5	0	1	2	3	4
T3	5	0	3	6	9	12
T4	4	0	3	6	9	—
T5	4	0	3	6	9	—
T6	2	0	1.5	—	—	—
T7	2	0	1.9	—	—	—
T8	4	0.9	4.9	7.9	10.9	—
T9	4	1.7	4.7	7.7	10.7	—

3.2 MJS 加固体水化热温度实测分析

3.2.1 水泥土水化热发展规律

研究发现^[15-16],硅酸盐水泥水化放热曲线分四个阶段(见图 3): I 预诱导期,II 水化诱导期,III 加速期,IV 后加速期。不同水泥质量分数下水泥土的水化放热趋势大致相同(见图 4),水化前两阶段的持续时间较短,在水化开始的几分钟内完成。诱导期后水泥水化反应速率加快,反应放热迅速提高,在达到最大放热速率后开始下降,此时水泥水化反应速率降低,进入后加速期。随水泥质量分数增大,水泥土水化放热速率的峰值提高。不同水泥质量分数下水泥土水化放热速率到

达峰值的时间较为接近,为水化 15 h 左右。

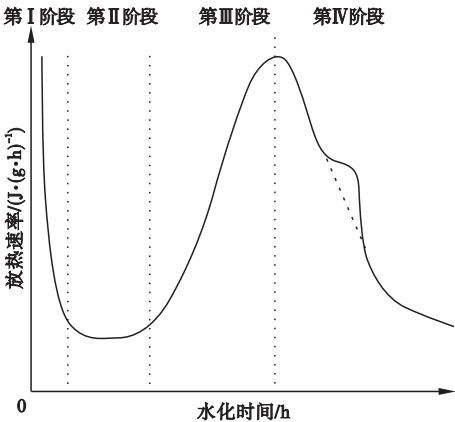


图 3 典型硅酸盐水泥水化放热曲线

Fig. 3 Typical silicate cement hydration exothermic curves

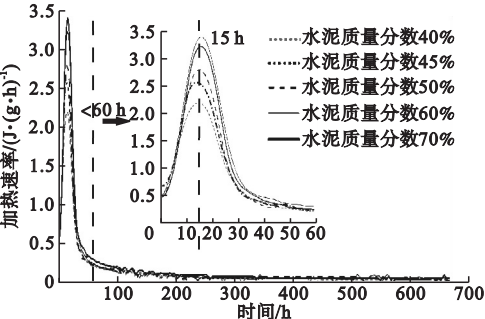


图4 不同水泥质量分数下水化放热速率与龄期关系
Fig.4 Age dependence of hydration exotherm rate for different cement incorporation ratios

3.2.2 水化热温度实测分析

本工程水平冻结加固于2021年1月5日开机冻结,故MJS水化热温度实测数据截止到2021年1月4日。各测温孔水化热温度时间曲线如图5所示,因工程现场施工导致T7-2测点遭到破坏且无法恢复,故T7-2测点位置MJS桩体水化热温度变化曲线未能给出,因T7-1测点与T6-1测点同样位于79#MJS桩内,故T7-1测温孔曲线图合并于T6测温孔曲线图中。

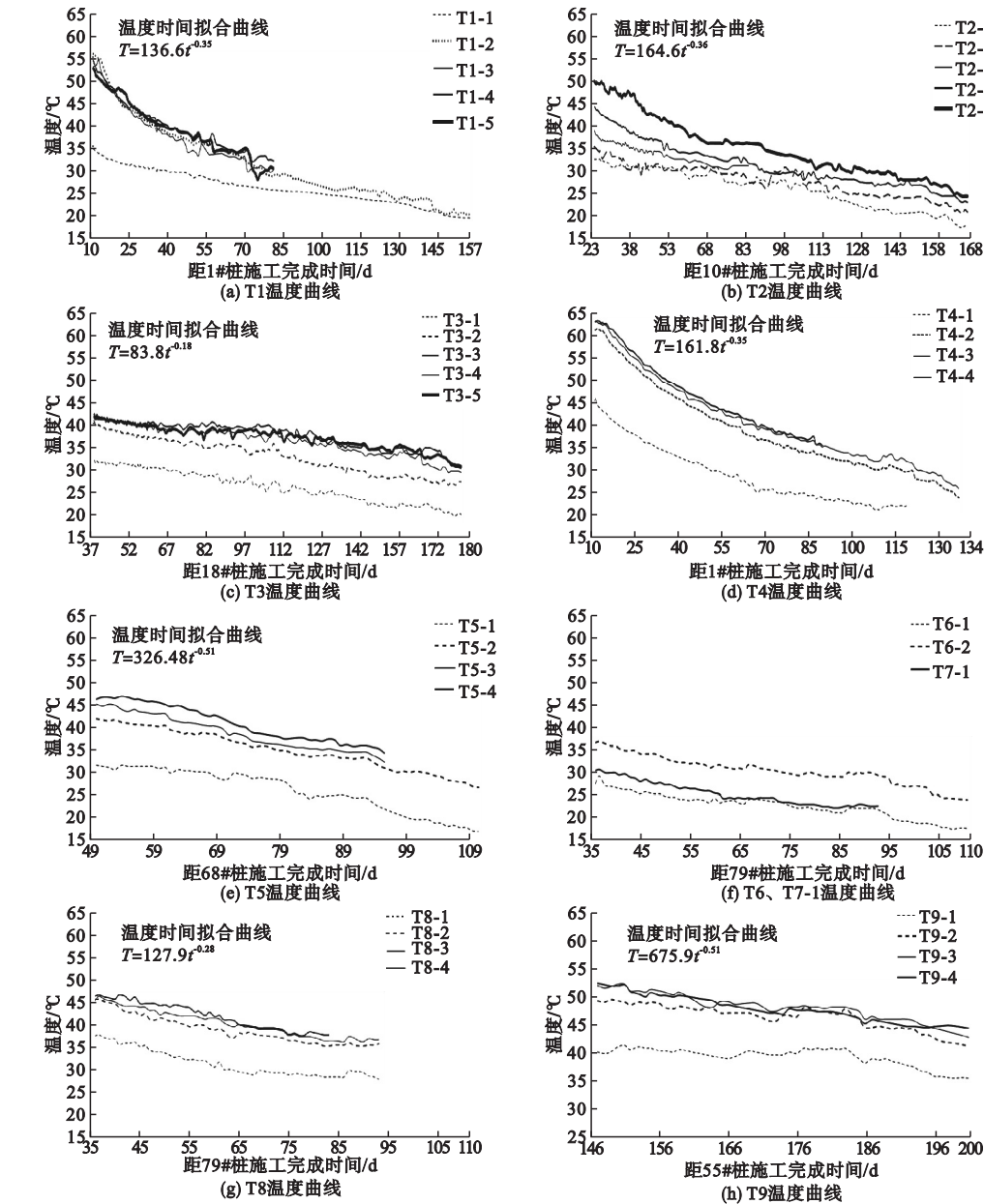


图5 T1~T9测温孔水化热温度时间曲线

Fig.5 Time curves of heat of hydration temperature for T1~T9 measuring holes

由图 5 可知,各测点的温度整体均呈下降趋势,温度下降平缓,在距地连墙大等于 3 m 部分的 MJS 加固体散热条件基本相同,温差较小,最大平均温差位于 T1 测温孔,仅 2.9℃,且距离加固体与土层交界面处越深加固体温度越高。为便于研究水化热的降温规律,将整个实测水化热发展划分为 3 个阶段,其中 MJS 完成后第 10 天~第 30 天为前期,第 30 天~第 90 天为中期,90 天之后为后期。

在整个测温过程中,T1~T5 测得加固体内部最高温度分别为 55.8℃、49.8℃、42.3℃、62.8℃、46.0℃,地连墙与加固体交界面处最高温度分别为 34.6℃、32.2℃、31.7℃、45.5℃、31.3℃,且测得时间分别处于相应 MJS 桩体施工完成的第 10 天、第 23 天、第 37 天、第 10 天、第 49 天。T1 处加固体最高温度测得时间处于 1#MJS 桩体施工完成的第 9 天,整个测温过程中温度呈平缓下降趋势,故可以推断 MJS 桩体水化热将在施工完成后 10 d 内温度达到最高。T4 处加固体最高温度测得时间同样处于 5#MJS 桩体施工完成的第 9 天,故可进一步证明 MJS 桩体水化热将在施工完成后 10 d 内温度达到最高。T6~T8 测温孔所处位置接近,同位于 79#MJS 桩体中,测得加固体内部最高温度为 46.3℃,时间为 79#MJS 桩体施工完成的第 35 天,此时交界面处温度在

27.1℃~30.0℃。T9 测得加固体内部最高温度为 52.4℃,距地连墙与加固体交界面 1.7 m 处最高温度为 40.1℃,时间为 55#MJS 桩体施工完成的第 146 天。

3.2.3 MJS 加固区实测温度场综合分析

(1)MJS 加固体内部温度整体变化

根据该工程水化热温度实测数据及水化热温度监测时间范围(桩体施工完成后第 10 天~第 200 天),可得出如下规律:

①MJS 桩体所产生的大量水化热大部分已在桩体施工完成后 10 d 内释放完毕,且在 10 d 内达到最高温度。

②MJS 加固体内部距离地连墙与加固体交界面大等于 3 m 处的温度变化趋势基本保持一致,且相互之间温差较小,不受地墙外界温度影响。

③MJS 加固体内部温度在开始水化放热后的第 10 天~第 200 天,均呈负指数幂函数形式下降,降温速率先快后慢。MJS 施工完成 60 d 时,温度在 35℃~40℃,根据冻结法施工经验,温度在 40℃左右可实施冻结,故建议在 MJS 全部施工完成 60 d 后即可开始进行冻结加固。

MJS 加固体内部温度及降温规律对比结果见表 3、表 4。表 4 中降温趋势呈幂函数 $T=a \cdot d^b$,其中指数 a 表示对应测温孔位置处的温度高低程度,指数 b 表示在同一时间段内的降温幅度。

表 3 MJS 加固体内部温度实测数据对比表

Table 3 Comparison table of measured internal temperature data for MJS plus solids

编 号	MJS 桩完成后不同时间下加固体内部温度/℃						冻结初始 温度/℃
	10 d	23 d	35 d	37 d	49 d	146 d	
T1	52.4~55.8	43.9~46.9	38.3~40.5	37.8~40.3	34.2~36.7	20.2~21.8	20.0~20.3
T2	—	44.2~49.8	39.3~46.9	38.1~47.1	36.2~40.8	26.5~27.6	22.6~23.9
T3	—	—	—	40.5~42.3	37.6~40.2	28.2~34.2	27.0~30.3
T4	60.8~62.8	52.6~55.4	46.6~49.2	45.6~48.3	41.0~43.9	—	23.3~25.4
T5	—	—	—	—	41.6~46.0	—	26.3
T8	—	—	45.1~46.1	44.9~45.8	41.0~44.2	—	32.5
T9	—	—	—	—	—	49.2~52.4	41.1~44.3

表4 MJS 加固体内部温度降温规律对比表

Table 4 MJS plus solid internal temperature cooling pattern comparison table

编 号	a	b	平均降温速率/(℃·d ⁻¹)			自然降温至初始地层温度 (20℃)推算所需天数/d
			前期	中期	后期	
T1	136.6	-0.35	0.64	0.22	0.11	155
T2	164.6	-0.36	0.39	0.22	0.10	190
T3	83.8	-0.18	—	0.08	0.08	300
T4	161.8	-0.35	0.62	0.27	0.18	160
T5	326.4	-0.51	—	0.27	0.14	160
T8	127.9	-0.28	—	0.22	0.13	175
T9	675.9	-0.51	—	—	0.14	360

由表4可知,本次测得“山”字形 MJS 加固体区域最高温度位于Ⅱ区加固体顶部。而对比不同位置处的内部温度可知,MJS 加固体内部最高温度位于Ⅱ区加固体中部,这是因为Ⅱ区加固体中部仅与其两侧开挖区土体进行热交换,且加固区范围也最大。

(2)MJS 加固体竖向温度变化

由表4可知,分别对比Ⅰ区(T1、T2、T3)及Ⅱ区(T4、T9)内施工完成后同一时间下的加固体内部温度,可以推断加固体内部温度越靠近既有车站底板温度越低,竖向加固区的最高温度最终应出现在各竖向加固区的中心位置。这是因为越靠近既有车站底板,受上部结构与外界热对流影响越大,加固体散热越快,且既有站底板处半圆桩 MJS 水泥土桩水泥掺量(55%)相较其他部位掺量(60%)低,水化热也相对较小;MJS 竖向加固区施工顺序为由下往上,底部散热时间更长,故底部较中心位置温度低。

对比Ⅰ区、Ⅱ区同深度、同一时间下的加固体内部温度可知,Ⅱ区加固体内部温度始终高于Ⅰ区加固体。这是因为Ⅱ区水泥加固范围(4 m)较Ⅰ区(2 m)更大,且Ⅱ区两侧均为开挖区,土体散热条件更差。故 MJS 水泥加固范围越大,水化热产生的温度越高。

(3)MJS 加固体横向温度变化

由于施工现场在加固体内部无法布设横向测点,故 MJS 加固体对外界温度的横向影

响范围及其温度变化规律难以通过现场实测分析,还需利用数值模拟进行对比研究。但通过分析 T8 测点温度及测点位置可知,由于该孔向外偏斜打设,T8-3、T8-4 分别位于 MJS 加固体边界以外 0.1 m、0.3 m 处,同时 T8-2、T8-3、T8-4 测点温度变化趋势均保持一致,且相互之间温差较小,最大平均温差仅 2.2℃。故可以推断 MJS 水泥土水化热对加固区外一定范围内的土体温度产生影响。

(4)地连墙附近 MJS 加固体纵向温度变化

主要研究距地连墙与加固体交界面 0~3 m 内的加固体温度变化。由于 T2 及 T6~T8 在距交界面 0~3 m 内的测点较多,故仅绘制两组数据的纵向温度变化趋势(见图6)。

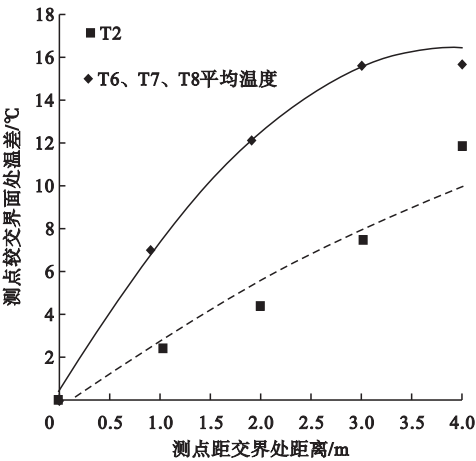


图6 同一时间部分测点纵向温度变化趋势

Fig. 6 Longitudinal temperature trends at selected measurement points at the same time

由图 6 可知,测点温度随测点距交界面距离的增大而升高,但升温幅度逐渐减小,在距交界面大等于 3 m 后逐渐趋于稳定并保持不变。故可进一步证明地墙外界温度主要对距地墙 0~3 m 内的加固体水化热产生影响,且越靠近交界面处影响越大,水化热散热越快;加固体内部与交界面处的温差均保持在 10℃ 以上。

(5) MJS 加固体最高温度推算

硅酸盐水泥水化放热可分为 4 个阶段,由图 4 可知,不同水泥掺量水泥土水化放热速率到达峰值的时间较为接近,为水化 15 h

左右,5 d 后水泥土水化放热速率较小,进入后加速期,此后水泥水化一直处于后加速期。

本工程因场地条件所限,MJS 桩体施工后水泥土尚未达到一定强度不能直接钻孔,同时钻孔布设测温管需安装脚手架等原因,MJS 桩体施工完成 10 d 时才埋设测点测温,为更好地研究 MJS 加固体的水化热温度变化规律,故需对实测数据进行拟合,MJS 加固体内部最高温度拟合结果见表 5。由表可知,拟合得到的最高温度为 60.2~76.3℃,发生在 MJS 施工完后 5~6 d,最高温 76.3℃ 发生在Ⅳ区中部。

表 5 MJS 加固体内部最高温度拟合统计表

Table 5 MJS plus maximum internal temperature fitting statistics for solids			
编 号 推算最高温度/℃		到达最高温度时距对 应桩体施工完成时间/d	对应 MJS 加固体位置
T1	61.4	5	I 区顶部(靠近既有车站底板)
T3	67.8	5	I 区中部
T4	69.9	4	II 区顶部(靠近既有车站底板)
T5	60.2	6	II 区中部
T9	76.3	5	IV 区中部

4 结 论

(1) MJS 桩体在施工完成后 10 d 内达到最高温度,且桩体所产生的大量水化热大部分已在桩体施工完成后 10 d 内释放完毕。测得“山”字形加固体内部(距地连墙与加固体交界面大等于 3 m)温度最高为 60.8~62.8℃,位于中间竖墙顶部。而拟合推算得到的最高温度为 60.2~76.3℃,发生 MJS 施工完后 5~6 d,最高温度 76.3℃ 发生在Ⅳ区中部。

(2) MJS 桩体施工完成 10 d 后,距界面 0~3 m 内加固体温度呈线性下降,加固体内部温度呈负指数幂函数下降,降温速率先快后慢;加固体内部与交界面处的温差均保持在 10℃ 以上。

(3) “山”字形 MJS 加固体中间竖墙整体温度高于左右两侧竖墙,加固范围越大,水

化热产生的温度越高;竖向加固区越靠近既有车站底板温度越低;加固体最高温度首先出现各桩施工完成处,最终出现在整个加固体中间竖墙中部。

(4) 建议本工程及今后类似工程,在 MJS 加固完成后第 60 天为最佳开冻时机。

参考文献

[1] 刘欣,杨平,王怀东,等.冻结 MJS 水泥土强度与冻融特性研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(12):3088-3096.
(LIU Xin, YANG Ping, WANG Huaidong, et al. Study on the strength and freeze-thaw characteristics of frozen MJS cement soil [J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(12): 3088-3096.)

[2] 赵良云,张运涛.暗挖隧道下穿既有地铁站变形控制及影响分析[J].西安科技大学学报,2020,40(5):878-886.
(ZHAO Liangyun, ZHANG Yuntao. Deformation control and influence analysis of underground tunnel passing through existing subway station [J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2020, 40(5): 878-886.)

- [3] SUN Gaochen, ZHANG Jianming, DANG Yingsheng, et al. Microstructure and strength features of warm and ice-rich frozen soil treated with high-performance cements [J]. Journal of mountain science, 2019, 16(6): 1470 - 1482.
- [4] TOUNSI H, ROUABHI A, TIJANI M, et al. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: application in mining engineering [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2019, 52(10): 3889 - 3907.
- [5] 杨平, 刘欣, 余才高, 等. 富水地层地下隧道下穿敏感管线对接既有结构 MJS + 人工冻结联合加固方法 [P]. CN111593726A, 2020 - 08 - 28.
(YANG Ping, LIU Xin, SHE Caigao, et al. MJS + Artificial freezing joint reinforcement method for connecting existing structure with sensitive pipeline in underground tunnel of water-rich stratum [P]. CN111593726A, 2020 - 08 - 28.)
- [6] 陈仁朋, 张品, 刘湛, 等. MJS 水平桩加固在盾构下穿既有隧道中应用研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(7): 103 - 110.
(CHEN Renpeng, ZHANG Pin, LIU Zhan, et al. Application study of MJS horizontal column reinforcement in shield tunneling [J]. Journal of Hunan university (natural science), 2018, 45(7): 103 - 110.)
- [7] 谭广柱, 刘书贤, 张弛, 等. 大体积混凝土温度应力场变化分析 [J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30(1): 20 - 24.
(TAN Guangzhu, LIU Shuxian, ZHANG Chi, et al. Analysis on temperature stress field change of mass concrete [J]. Journal of civil engineering and management, 2013, 30(1): 20 - 24.)
- [8] 曹园章, 郭丽萍, 薛晓丽. NaCl 和 Na₂SO₄ 对水泥水化机理的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 712 - 719.
(CAO Yuanzhang, GUO Liping, XUE Xiaoli. Effects of sodium chloride and sodium sulfate on hydration process [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2019, 49(4): 712 - 719.)
- [9] 杨平, 陈驰, 张存, 等. MJS 加固水泥土热物理特性研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 661 - 669.
(YANG Ping, CHEN Chi, ZHANG Cun, et al. Study on thermal properties of MJS cement soil [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(4): 661 - 669.)
- [10] ZHAO Jiling, YANG Ping, LI Lin. Investigating influence of metro jet system hydration heat on artificial ground freezing using numerical analysis [J]. KSCE journal of civil engineering, 2020, 25(2): 724 - 734.
- [11] 周朋. MJS 工法在砂卵石地层盾构近距离下穿运营地铁隧道的应用 [J]. 都市快轨交通, 2018, 31(6): 122 - 128.
(ZHOU Peng. Application of MJS method in traversing under the operating metro line near the sand gravel layer [J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(6): 122 - 128.)
- [12] 王许诺, 杨平, 彭玉龙. 水泥土冻结温度及热物理参数试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6): 96 - 100.
(WANG Xunuo, YANG Ping, PENG Yulong. Test research to freezing point and the thermal physical parameters of freezing cement soil [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34(6): 96 - 100.)
- [13] 薛素铎, 康广博, 李雄彦, 等. 大尺寸混凝土构件硬化期水化热温度场 [J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(2): 147 - 153.
(XUE Suduo, KANG Guangbo, LI Xiongyan, et al. Hydration temperature field of large-size concrete member during hardened period [J]. Journal of Beijing university of technology, 2020, 46(2): 147 - 153.)
- [14] 郑盛. 富水砂层暗挖车站 MJS 加固及其温度场变化规律研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
(ZHENG Sheng. Research on MJS reinforcement and temperature field variation law of subsurface excavation station in water-rich sand layer [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.)
- [15] 李思齐. MJS 水泥土水化热及热物理力学特性研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
(LI Siqi. Study on heat of hydration heat and thermal physical and mechanical properties of MJS cement soil [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.)
- [16] 丁向群, 周向荣, 罗超. 超细矿物对水泥土力学性能的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 899 - 905.
(DING Xiangqun, ZHOU Xiangrong, LUO Chao. The influence of superfine mineral powder on mechanical properties of cement soil [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 899 - 905.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)