



基于混凝土水化热的灌注桩成桩质量评价方法及应用^{*}

吕述晖^{1,2,3}, 苏世定^{1,2,3}, 张博^{1,2,3}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 针对如何基于灌注桩水化热温度场准确评价桩身质量的问题, 利用与桩身横截面中心径向距离大于 0.5 倍桩半径范围内, 混凝土水化热温度随径向距离的变化近似线性的特征, 建立根据钢筋笼上对称两测点的水化热温度计算钢筋笼偏位的方法。结合缺陷灌注桩的水化热仿真分析, 系统分析缺陷几何特征和热工参数变化对灌注桩水化热温度场的影响规律, 提出根据沿钢筋笼主筋布置水化热温度测点获得的温度-深度曲线特征, 判断缺陷存在并分析缺陷空间分布位置的方法。结合现场试验及与低应变、跨孔超声波检测结果的对比, 验证了该方法的可行性。

关键词: 灌注桩; 水化热; 桩身缺陷; 钢筋笼偏位

中图分类号: U655.55; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0173-10

Quality evaluation method of cast-in-place pile based on heat of concrete hydration and its application

LYU Shuhui^{1,2,3}, SU Shiding^{1,2,3}, ZHANG Bo^{1,2,3}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Key Laboratory of Environment Protection and Safety of Transportation Foundation Engineer of CCC, Guangzhou 510230, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Aiming at the problem of evaluating the quality of the pile body accurately based on the temperature field of the hydration heat of the cast-in-place pile, we use the characteristics of the concrete hydration heat temperature changing approximately linear with radial distance (from the center of the pile cross-section) within the range of the radial distance greater than 0.5 times the pile radius, and build the method for calculating the deviation of the reinforcement cage based on the temperature of two symmetrical measuring points on the reinforcement cage. Combining with the simulation analysis of the hydration heat of the defective pile, we systematically analyze the influence of the geometric characteristics of the defect and the change of thermal parameters on the temperature field, and propose the method for judging the presence of defects and analyzing their spatial distribution position based on the characteristics of the temperature-depth curve obtained from temperature measurement points along the main reinforcements. Combining field tests and comparison with low-strain and cross-hole ultrasonic testing results, we verify the feasibility of the method.

Keywords: cast-in-place pile; heat of hydration; pile defect; deviation of reinforcing cage

收稿日期: 2023-07-26

*基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)河口海岸与岛礁工程创新团队建设项目(311020009)

作者简介: 吕述晖 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水工结构与地基基础、土工测试技术研究。

灌注桩是工业与民用建筑、市政交通等基础设施建设大量使用的基础形式之一，随着海洋工程建设以及超高层建筑、超大型港口、码头、桥梁等工程对桩基承载能力要求的提高，超长、大直径灌注桩被广泛使用。灌注桩的施工质量是决定上部建筑结构物使用和安全性能的关键因素，灌注桩质量检测是控制工程质量的重要环节。由于成桩工艺特点及地质条件的复杂性，灌注桩的成桩质量不易控制和保证，容易在灌注混凝土过程中，出现断桩、缩颈、离析、露筋和夹泥等现象，对灌注桩成桩质量进行评估十分必要。传统的灌注桩质量检测手段如低应变反射波法、跨孔超声波法、抽芯法一般仅能检测灌注桩钢筋笼内的混凝土质量，对钢筋笼外侧的混凝土质量的检测尚缺乏可靠手段。而外侧混凝土作为钢筋保护层，其质量缺陷将对钢筋笼的耐久性以及灌注桩的长期服役性能产生不利影响，尤其是对于近岸和离岸海工结构的高桩基础，氯盐腐蚀环境以及恶劣海洋环境荷载耦合影响下，灌注桩保护层混凝土的质量保障更加重要^[1-3]。此外，上述3种检测手段均需要在桩身混凝土达到一定强度后方能进行(一般不少于7 d)，因此对于检测探明的缺陷，特别是深部缺陷的处理很难实现。针对传统方法的不足，Mullins等^[4-5]提出一种基于混凝土水化热的灌注桩质量检测新方法，由于混凝土水化热温度场与整个桩身及桩周土相关，采用该方法理论上可以全面分析灌注桩身质量(包括钢筋笼内、外的混凝土质量)，同时，温度数据采集及分析一般可以在浇筑混凝土后的48 h内完成，因此可以尽早探明缺陷便于处理。Sellountou等^[6]、Bixler等^[7]后续在实际工程中应用该方法进行灌注桩桩身完整性测试并与常规方法对比，以验证其测试结果的准确性。

尽管该方法优势明显，但相对于传统方法而言，其实际应用仍不成熟。美国材料与试验协会ASTM于2014年出台了相应的检测规范(ASTM D7949-14)^[8]，

但该规范主要针对现场实施技术，未涉及数据分析处理方法等核心技术内容，也未明确缺陷程度及桩完整性的判断方法和标准，且国外实际应用的相关案例报道较少，在国内该方法的研究和应用则刚刚起步。本文在既有研究的基础上，提出根据灌注桩水化热温度场的特征量化分析钢筋笼偏位(保护层厚度)的理论方法，系统分析缺陷特征对灌注桩水化热温度场的影响规律并总结依据温度分布特征获得缺陷特征的方法，结合现场试验及不同检测手段对比，验证该方法的可行性。本文成果可为该方法的进一步工程应用和研究提供借鉴。

1 基于混凝土水化热的灌注桩成桩质量分析方法

现浇桩的桩身混凝土在凝固过程中会产生热化学反应，产生热量的多少及散热比例取决于桩身混凝土量的多少、桩身形状与尺寸。为此，利用MIDAS FEA软件建立完整灌注桩有限元模型进行水化热仿真分析。模型参数如下。

1) 灌注桩混凝土的密度 $\rho_c = 2\ 400\ kg/m^3$ ，导热系数 $\lambda_c = 2.7\ W/(m \cdot K)$ ，比热 $c_c = 970\ J/(kg \cdot K)$ ；使用的水泥类型为普通硅酸盐水泥，水泥含量 $390\ kg/m^3$ ；灌注桩的长度 $L = 10\ m$ ，桩径 $D = 1.0\ m$ 。

2) 地基土的密度 $\rho_s = 1\ 800\ kg/m^3$ ，导热系数 $\lambda_s = 1.7\ W/(m \cdot K)$ ，比热 $c_s = 1\ 500\ J/(kg \cdot K)$ 。

3) 混凝土及地基土初始温度 $20\ ^\circ C$ ，地基土侧边界及底边界固定温度 $20\ ^\circ C$ ，地基土及桩顶面与空气热对流，表面放热系数 β 均取 $80\ kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ ，空气温度 $20\ ^\circ C$ ^[9]。

通过灌注桩混凝土水化热仿真分析，获得沿钢筋笼主筋位置混凝土水化热温度随深度的典型分布规律见图1，桩横截面上温度随径向距离(相对桩中心)的典型分布规律见图2。由图1、2可知，钢筋笼位置尤其是桩周边位置的温度要低于桩身中心的温度，因为越靠外的热量向周边环境(如土壤、岩石、水或者空气)散发速度越快。如

果钢筋笼与桩身轴线偏离, 那么靠近桩周边的钢筋笼位置温度较低, 这时相应也会存在一个较高的温度。越靠近桩中心的部分温度越高。如果桩身存在缺陷, 如孔洞、缩颈、夹泥或者混凝土质量差, 则缺陷附近的混凝土产生的热量就会少于正常混凝土; 相反, 如果桩身存在扩径, 则扩径部位附近温度就会较高, 因此可以通过测得的温度曲线识别潜在的混凝土缺陷。

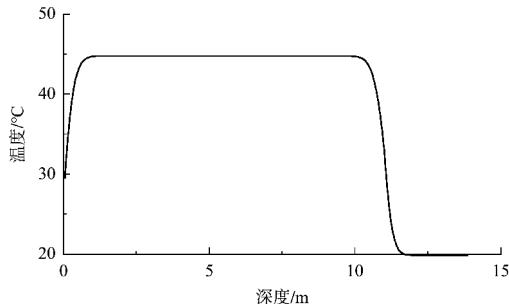


图1 典型温度-深度分布曲线

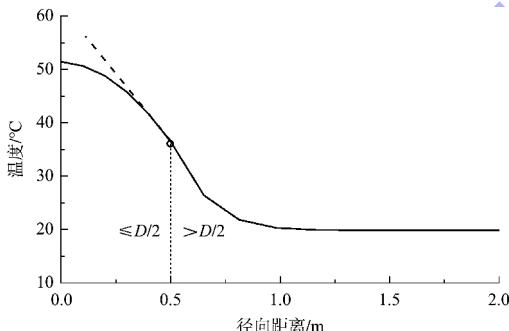


图2 典型温度-径向距离分布曲线

除了通过温度异常直观判断混凝土质量缺陷, 还可以根据灌注桩水化热温度场的特征按下列方法量化分析钢筋笼偏位(保护层厚度)。假设灌注桩截面及钢筋笼截面均为圆形, 设计钢筋保护层混凝土厚度为 a_s , 纵向主筋直径为 d_s 。可计算钢筋笼直径 d (按对称纵向主筋中心距计算)为 $D-2a_s-d_s$ 。理想情况下, 钢筋笼截面(纵向主筋中心环向连线)与桩孔截面(灌注桩截面)的圆心重合。当钢筋笼存在横向偏位(不考虑钢筋笼侵入桩孔壁)时, 钢筋笼截面与桩孔截面圆心之间的偏差 d_b (简称中心偏差)介于 $0 \sim (a_s+d_s/2)$ 。

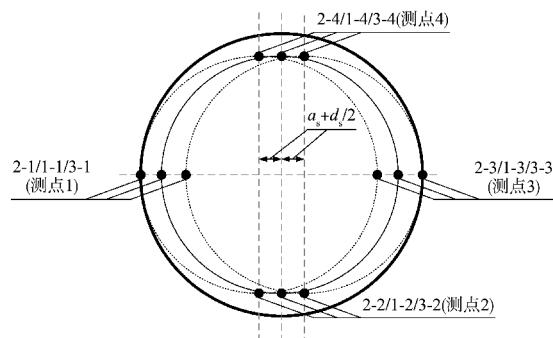


图3 灌注桩孔内钢筋笼偏位

以钢筋笼纵向主筋侧(温度测点位于同一钢筋笼截面圆上)对称布置的4个温度测点为研究对象(假设测点1与桩孔孔壁距离最近), 见图3。设桩径 $D=1.5\text{ m}$, 钢筋保护层混凝土厚度 $a_s=50\text{ mm}$, 纵向主筋直径 $d_s=40\text{ mm}$ 。由上述参数可计算钢筋笼直径(按对称纵向主筋中心距计算) $d=1.36\text{ m}$, 中心偏差可能在 $0 \sim 70\text{ mm}$ 。当该偏差最大时, 测点2、4与桩孔截面圆心的距离和中心偏差为0时差值为 $\sqrt{1+(2d_b/d)^2}-1 (=0.005$, 无量纲)。可见, 当灌注桩钢筋笼保护层厚度与设计偏差不大时, 钢筋笼偏位对测点2和4与桩孔中心距离的影响较小。

由图2的斜向虚线可知, 临近桩孔轮廓一定的距离内(即钢筋笼主筋位置附近)的混凝土温度 T 随径向距离 r (即测点与桩横截面中心的距离)的变化曲线可近似为直线, 假设拟合直线为:

$$T=A_1r+B_1 \quad (1)$$

式中: A_1 、 B_1 为拟合参数。于是可计算出测点1和3的温度 T_1 、 T_3 及平均值 T_{AVG} 分别为:

$$T_1=A_1\{D/2-\left[(a_s+d_s/2)-d_b\right]\}+B_1 \quad (2)$$

$$T_3=A_1\{D/2-\left[(a_s+d_s/2)+d_b\right]\}+B_1 \quad (3)$$

$$T_{AVG}=\frac{T_1+T_3}{2}=A_1[D/2-(a_s+d_s/2)]+B_1 \quad (4)$$

由式(4)可知, 在测点1和3连线上的温度-径向距离近似线性范围, T_{AVG} 几乎恒定, 不随 d_b 变化。

通过对不同径向距离范围的曲线数据(节点温度为散点数据, 拟合范围为拟合直线覆盖的数据点)采用式(1)的线性函数拟合, 结果如图4所示,

得到的系数 A_1 、 B_1 以及反映拟合质量的校正决定系数见表 1。结合数据分析可知, $r=r_2/2$ ($r_2=D/2$) 基本对应于 r 在 $0 \sim r_2$ 范围内温度-径向距离曲线的转折点, r 在 $r_2/2 \sim r_2$ 范围线性拟合时可达到较高的拟合质量, 即在这一径向距离范围, 温度的变化正比于径向距离的变化。通过进一步分析水泥含量、混凝土导热系数以及比热不同的工况, 曲线特征仍基本符合上述规律。

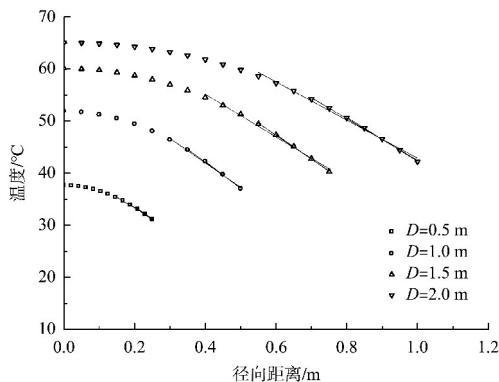


图 4 温度-径向距离曲线局部线性拟合结果对比

表 1 温度-径向距离曲线局部线性拟合结果

拟合径向距离范围	桩径 D/m	$B_1/^\circ\text{C}$	$A_1/(^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1})$	校正决定系数
$r_2/2 \sim r_2$	2.0	79.51	-36.64	0.993 1
	1.5	71.54	-40.92	0.992 7
	1.0	60.77	-46.95	0.994 6
	0.5	41.50	-40.81	0.994 0

值得注意的是, 线性拟合参数 A_1 、 B_1 对于桩径变化的敏感性不同, 当桩径在有限范围内变化时, 引起 A_1 的变化相对较小, 而 B_1 变化更为显著。 A_1 可以通过实测与桩顶距离达到 D 以下的任一截面温度-径向距离曲线获得。进一步结合式(2)~(4)可得:

$$d_b = -(T_1 - T_{AVG})/A_1 \quad (5)$$

$$d_b = (T_3 - T_{AVG})/A_1 \quad (6)$$

$$A_1 = 0.5(T_1 - T_3)/d_b \quad (7)$$

若已知钢筋笼半径 $r_1 = d/2 = (D - 2a_s - d_s)/2$, 可进一步计算得到:

$$B_1 = T_1 - A_1(r_1 - d_b) \quad (8)$$

由此可知, 当测点 1 和 3 的温度已知且 A_1 经实测或类似经验确定时, 即可计算中心偏差值。当然, 某一测点刚好是钢筋笼环向上与桩孔轮廓最近的点仅是一种特殊情况。当钢筋笼环向的温度测点

是否符合上述特殊情况未知时, 可按对称布置的 4 个测点计算中心偏差(由于温度测点沿桩纵向连成的温度测线需与钢筋笼主筋绑扎, 一般无法满足完全对称布置的条件, 但仍可考虑测点 1 和 3 对称, 测点 2 和 4 对称)。

2 缺陷特征对灌注桩水化热温度场影响数值分析

为进一步揭示不同缺陷特征对灌注桩水化热温度场特别是对钢筋笼位置(温度采集位置)处温度的影响规律, 为根据温度数据分析缺陷特征提供依据, 本文进一步建立缺陷灌注桩有限元模型进行水化热仿真分析。缺陷参数设置为: 圆柱体缺陷, 其纵轴线与桩纵轴线平行, 长度 $L_d = 1.0$ m, 直径 $D_d = 0.4$ m; 缺陷材料密度 $\rho_d = 1800 \text{ kg/m}^3$, 导热系数 $\lambda_d = 0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热 $c_d = 784 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 考虑为疏松多孔的砂。

2.1 缺陷几何参数的影响

2.1.1 缺陷直径的影响

缺陷直径不同时 $r=0.4$ m 位置的温度-深度曲线见图 5。可以看出, 随着缺陷直径的增大, 缺陷内部温度与混凝土差异愈加显著, 但在深度方向上的影响范围基本限制在缺陷顶以上和缺陷底以下的 1 倍缺陷直径范围, 因此, 该影响范围也不超过 1 倍的桩径, 当缺陷横截面积占桩横截面比例(影响截面比例)较小时, $r=0.4$ m 位置缺陷中心深度对应测点温度与最高温度差值 ΔT 较小。当影响截面比例超过 15% 时, 温度差值超过 5%。绘制的 $D_d-\Delta T$ 曲线见图 6, 可知二者关系与指数函数比较吻合。

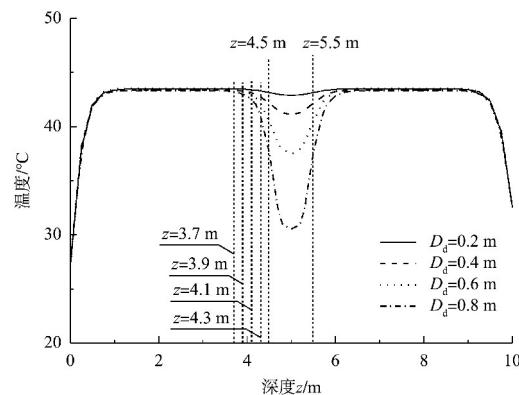


图 5 缺陷直径不同时 $r=0.4$ m 位置节点温度随深度的变化曲线

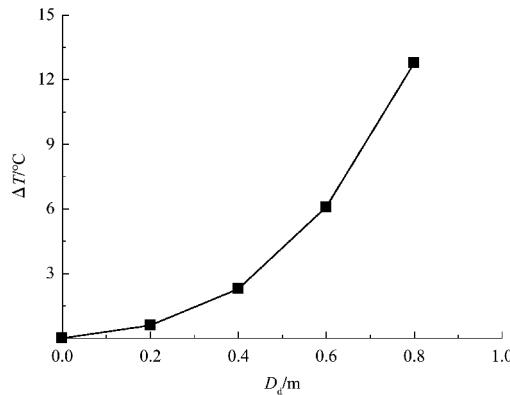


图 6 $r=0.4\text{ m}$ 位置缺陷中心温度与最高温度差值随缺陷直径的变化规律

2.1.2 缺陷高度的影响

$D_d=0.4\text{ m}$ 、缺陷高度不同时 $r=0.4\text{ m}$ 位置温度随深度的变化曲线对比见图 7, 考虑缺陷高度变化时, 固定缺陷底所处的深度, 改变缺陷顶深度。可以看出, 缺陷高度的改变基本对缺陷底以下的曲线无影响, 即缺陷影响的深度延伸范围基本不受缺陷高度影响。缺陷中心对应深度的温度谷值随缺陷高度增加进一步降低。

绘制了缺陷高度 L_d 与 $r=0.4\text{ m}$ 位置缺陷中心深度对应测点温度和最高温度差值 ΔT 关系曲线见图 8。可以看出, 当缺陷高度超过 1 倍半径时, 缺陷中心对应深度 $r=0.4\text{ m}$ 位置温度的降低程度基本不再增加, 反映到 $r=0.4\text{ m}$ 位置的温度-深度曲线上, 可以看到温度基本保持一致的直线段。

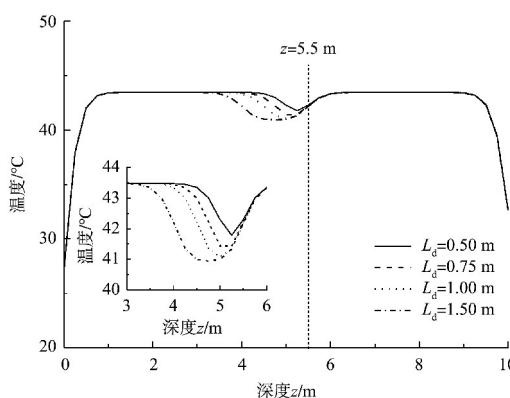


图 7 缺陷高度不同时 $r=0.4\text{ m}$ 位置节点温度随深度的变化曲线

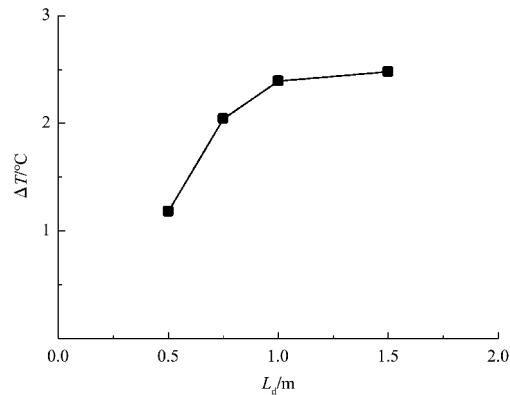
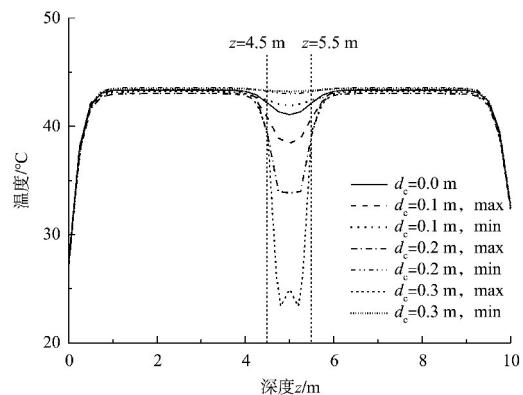


图 8 $r=0.4\text{ m}$ 位置缺陷中心温度与最高温度差值随缺陷高度的变化规律

2.1.3 缺陷平面位置的影响

缺陷平面位置不同时 $r=0.4\text{ m}$ 位置温度随深度的变化曲线对比见图 9, 缺陷位置的变化以圆柱形曲线中轴线偏离桩中轴线的距离 d_c 表示, max 表示离缺陷最近测点位置的温度, min 则反之。可以看出, 缺陷平面位置的变化将引起近侧和远侧 $r=0.4\text{ m}$ 测线温度-深度曲线的显著差异, 特别是当测线通过缺陷内部时, 由于缺陷内部不产热, 且导热能力较差, 对应测线段的温度显著降低, 但相对侧测线温度的变化将趋于不明显, 因此, 可以通过缺陷深度范围内多根测线的温度差异判断缺陷在桩径向平面的位置。此外, 缺陷平面位置改变, 缺陷影响的深度延伸范围基本不受影响。



注: $L_d=1.0\text{ m}$, $D_d=0.4\text{ m}$ 。

图 9 缺陷水平位置不同时 $r=0.4\text{ m}$ 位置节点温度随深度的变化曲线

进一步比较了缺陷直径不同时，缺陷位置对 $r=0.4\text{ m}$ 位置最低水化热温度的影响见图 10a)。可以看出，缺陷越是偏离桩中心轴线，温度差异越加明显，且差异程度随偏离距离近似指数增长。在图 10a) 曲线的基础上，将纵轴改变为 $\Delta T/D_d$ ，重新绘制曲线如图 10b) 所示。可以看出，对于相同的 d_c ，不同直径缺陷的 $\Delta T/D_d$ 的比值(图 10b)中方框内的数值)基本等于 D_d 的比值，即：

$$\Delta T_1/\Delta T_2 = (D_{d,1}/D_{d,2})^2 \quad (9)$$

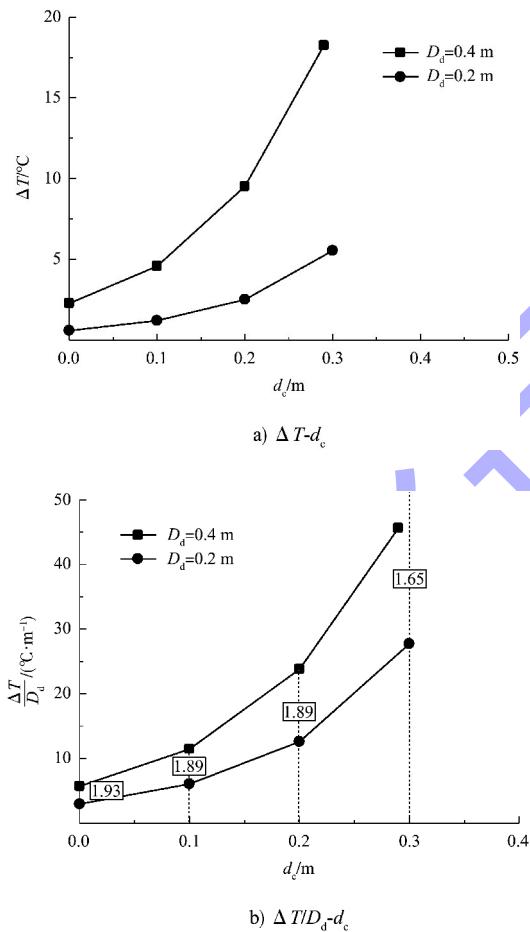


图 10 $r=0.4\text{ m}$ 位置缺陷范围最低温度与缺陷影响范围外测点温度差值随缺陷位置的变化

2.2 缺陷热工参数的影响

设置缺陷材料的热工参数时，主要考虑灌注桩成桩过程可能出现的缺陷类型，例如桩身夹泥缺陷，则缺陷的材料一般为黏土等；桩身混凝土离析缺陷，则缺陷的材料一般为粗细集料如砂、

砾石。实际缺陷的材料组成比较复杂，可能有多种材料、孔隙组成，热工参数将介于表 2、3 所列举的数值之间。本文分析主要针对表 2、3 列出的几种具有代表性的参考材料及一般热工参数值^[10]。

表 2 计算对比参考材料及导热系数值

导热系数 $\lambda_d / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	参考材料
0.1(或<0.1)	保温材料、泡沫、硅藻土
0.5	建筑用砂、轻质黏土
1.0	夯实黏土、水泥砂浆
2.0	砾石、石灰岩

表 3 计算对比参考材料及其比热容值

比热容 $c_d / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	参考材料
1.0	混凝土、水泥砂浆、建筑用砂、轻质黏土、夯实黏土
1.5	加气混凝土砌块
2.0	木材

2.2.1 缺陷材料导热系数的影响

缺陷材料的导热系数影响水化反应产热在灌注桩内部及周围环境的传递，对于 $r=0.4\text{ m}$ 位置的温度测线，缺陷导热系数的影响与缺陷和温度测线相对的位置相关，鉴于此，对比分析时考虑 d_c 为 0、0.29 m 两种工况。

绘制了采用不同缺陷导热系数模拟得到的 $r=0.4\text{ m}$ 温度测线温度-深度曲线见图 11。由图 11a) 可以看出， $d_c=0\text{ m}$ 时，缺陷位置中心对应的 $r=0.4\text{ m}$ 温度测线的最低温度随缺陷导热系数增大略有降低，但当 λ_d 介于 0.5~2.0 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时，差异不明显；由图 11b) 可看出， $d_c=0.29\text{ m}$ 时，缺陷位置中心对应的 $r=0.4\text{ m}$ 温度测线的最低温度随缺陷导热系数增大显著提高，提高幅度则有所趋缓。此外，对应于缺陷的顶、底深度，温度-深度曲线出现转折点。缺陷顶、底深度区间外，温度-深度曲线受缺陷导热系数的影响较小，当由转折点进入该区间，缺陷导热系数的影响将逐渐增大，且在由转折点进入该区间的一定深度范围

内, 温度-深度曲线近似直线。上述分析结果也进一步说明, 可以一定程度上通过明确该转折点(直接判断或通过直线拟合直线段)判断缺陷所处位置。

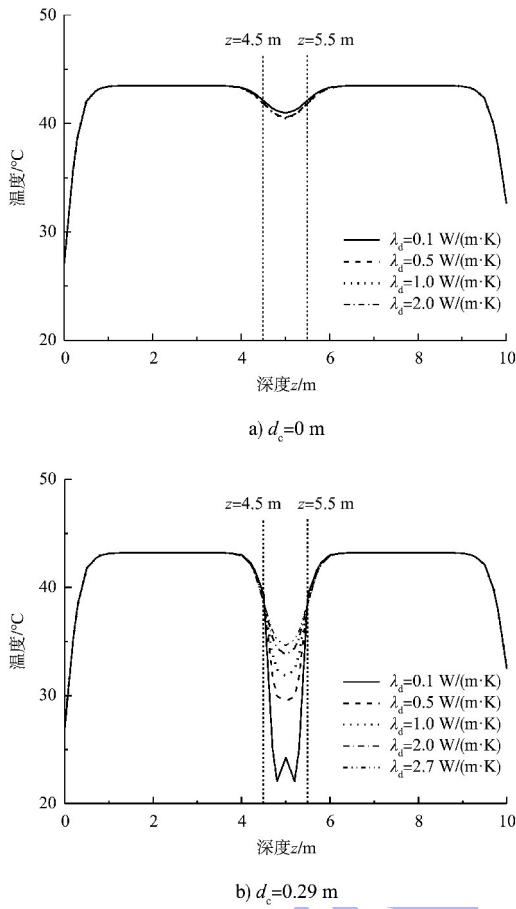


图 11 缺陷导热系数不同时 $r=0.4\text{ m}$ 位置节点温度随深度的变化曲线

2.2.2 缺陷材料比热

不同缺陷材料比热、不同缺陷位置工况下的温度场对比见图 12。可以看出, 缺陷材料比热对 $r=0.4\text{ m}$ 位置节点温度-深度曲线的影响同样与缺陷位置有关。无论缺陷处于何位置, 缺陷位置中心对应的 $r=0.4\text{ m}$ 温度测线的最低温度均随缺陷材料比热增大而降低, 但相对于 $d_e=0\text{ m}$ 的工况, $d_e=0.29\text{ m}$ 时的降低幅度相对更加明显。同样, 缺陷材料比热的影响基本反映在缺陷深度范围内。

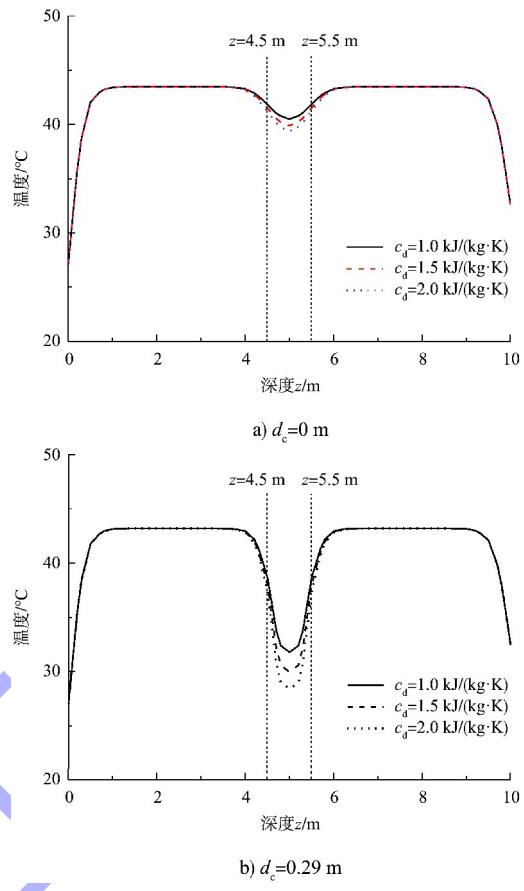


图 12 缺陷料比热不同时 $r=0.4\text{ m}$ 位置节点温度随深度的变化曲线

3 工程应用

通过前述的分析可知, 依据钢筋笼位置处混凝土水化热温度-深度曲线可以计算钢筋笼偏位, 分析是否存在缺陷并判断缺陷的空间位置。因此, 可以在钢筋笼上沿若干主筋布设温度测点形成不少于 4 条温度测线(每条温度测线上的温度测点等间隔布置), 采集混凝土浇筑后水化反应过程中的温度数据, 以分析灌注桩的成桩质量。

3.1 试验桩概况

现场试验依托某新建集装箱码头工程开展, 该集装箱码头采用高桩梁板式结构, 其中桩基础采用钻孔灌注桩。试验灌注桩的参数见表 4。温度电缆与声测管布置见图 13, 通长布置 4 条温度电缆和 4 根声测管, 每条温度电缆串联 0.3 m 等间隔布置的埋入式数字温度传感器。

表 4 试验桩参数

设计桩顶高程/m	设计桩底高程/m	设计桩径/mm	钢筋笼直径/mm	混凝土强度等级	桩孔底高程/m	泥面高程/m	护筒顶高程/m	护筒长度/m	护筒直径/mm
2.6	-58	1 300	1 100	C40	-58.78	-12.08	5.42	28	1 500

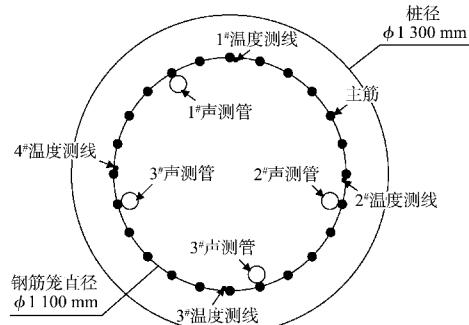


图 13 温度电缆与声测管布置

3.2 试验结果及分析

试验桩 4 根温度测线采集的温度数据随深度

的变化曲线见图 14。通过分析可知，距桩顶 10.9~12.8 m 深度范围内混凝土质量存在明显异常。对比该深度范围内相同深度处 4 根温度测线所测得的数据可知，温度由小到大依次为 2#、1#、3#、4# 温度测线，因此桩身异常处偏近于 2# 温度测线位置。根据建立的三维桩身模型分析可知，0~50 m 深度范围内，平均有效半径基本不小于 650 mm，但 26.2~31.4 m 深度范围内，2#、3# 温度测线侧的计算有效半径小于 650 mm 但大于 614 mm；50 m 至桩底桩身的平均有效半径小于 650 mm 但大于 600 mm。

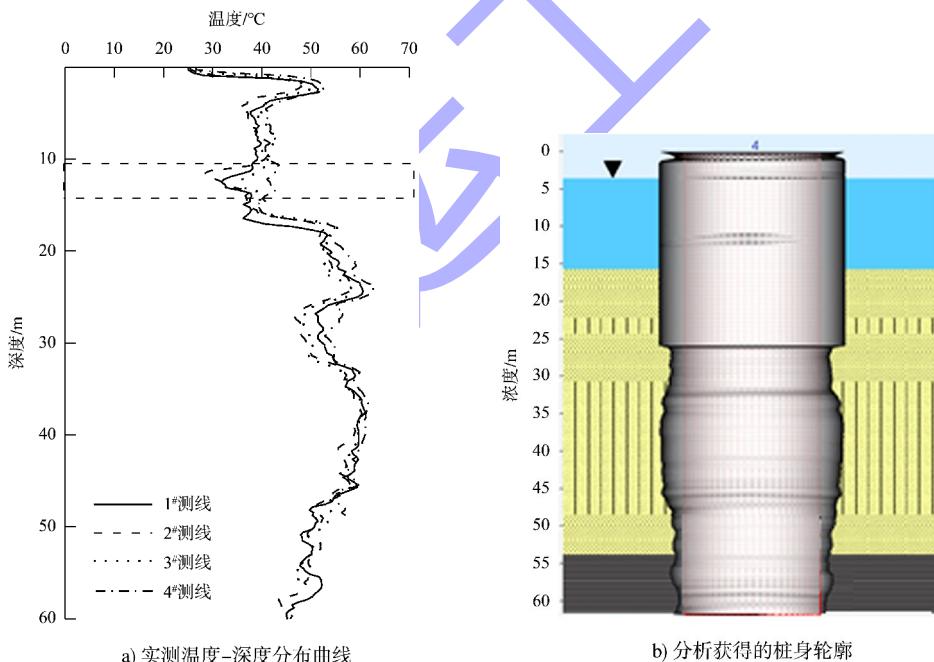


图 14 采集的温度数据及分析结果

声波透射法检测结果见图 15(剖面 1-2 即为 1# 与 2# 声测管连线的剖面，以此类推)，低应变检测结果见图 16。可以看出，距设计桩顶高程 8.96~11.59 m(即距检测时实际桩顶高程 10.98~12.61 m) 深度范围处桩身存在明显异常，其中声波透射法

检测结果表明，2# 声测管附近该异常相对更为明显。对比可知，上述结果与基于水化热温度的检测结果显示的桩身异常深度范围及异常程度径向分布情况一致。

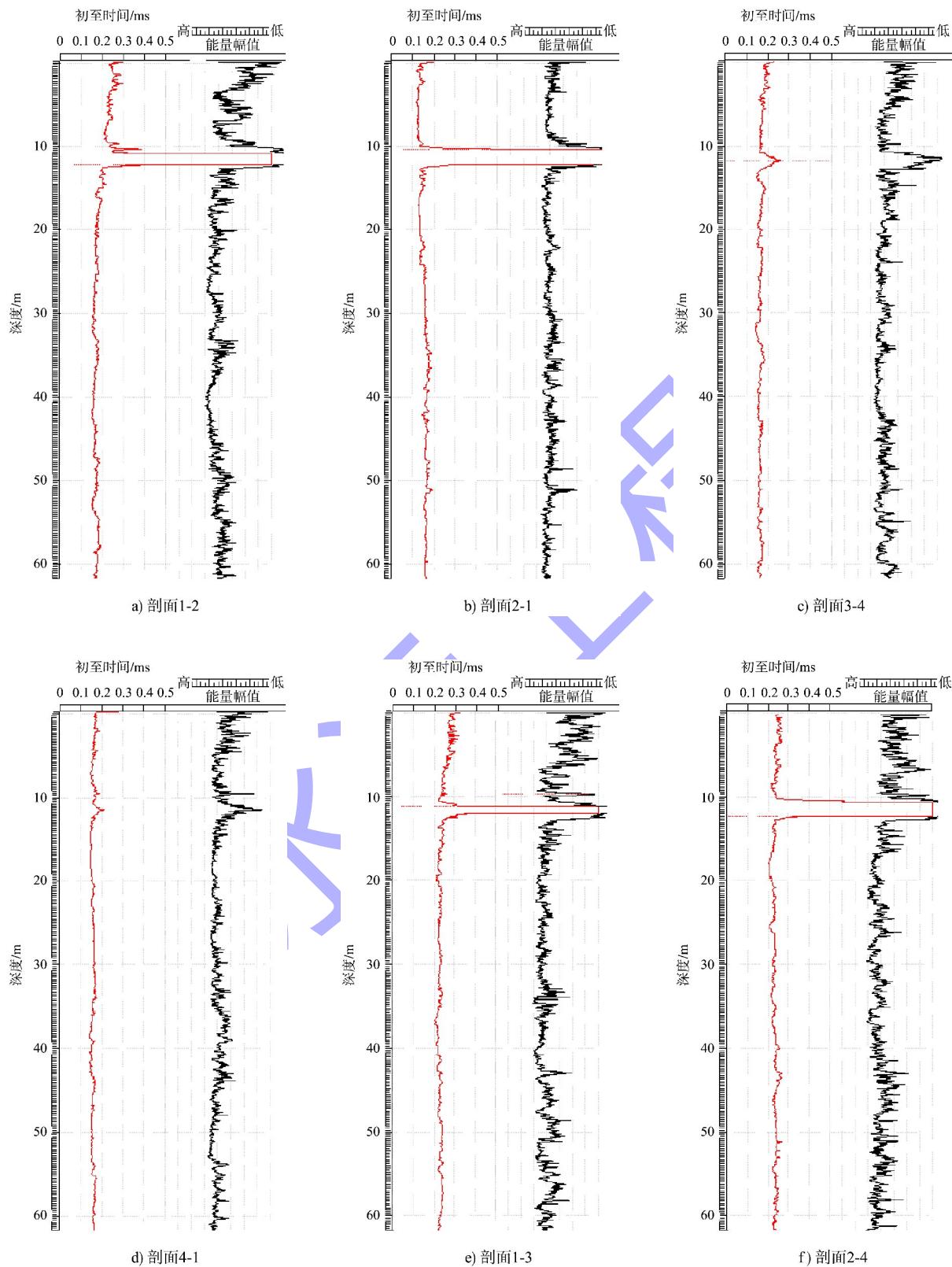
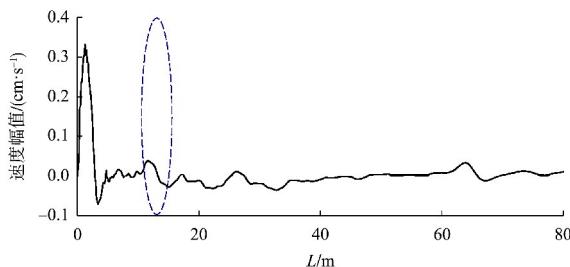


图 15 跨孔超声波检测结果



注: $L = vt/2$, 其中 v 为纵波波速, t 为时间。

图 16 低应变检测结果

4 结论

1) 与桩身截面中心径向距离大于 0.5 倍桩半径范围内, 混凝土水化热温度随径向距离近似线性变化, 由此可以结合温度-径向距离变化特征, 根据钢筋笼上对称两测点的水化热温度计算钢筋笼偏位, 进而分析保护层厚度情况。

2) 灌注桩缺陷的存在将引起钢筋笼位置处混凝土水化热温度-深度曲线的突降, 通过沿钢筋笼主筋布置水化热温度测点获得温度数据并绘制温度-深度曲线, 根据曲线特征可以判断缺陷是否存在并分析缺陷空间分布位置。

3) 由于灌注桩水化热温度场全桩身分布, 桩内任何位置的混凝土质量缺陷均会引起一定范围内的温度场异常, 因此可以用于钢筋笼内、外侧缺陷的分析, 特别是异型灌注桩钢筋笼外侧扩孔混凝土质量的判断。此外, 该技术也可以尝试用于其他类型现浇混凝土深基础的质量检测。

- (上接第 125 页)
- [4] 李顺超, 邓涯, 何熙, 等. 岷江下游中枯水碍航浅急滩段航道整治方案[J]. 水运工程, 2022(12): 158-163.
 - [5] 李顺超, 李欢. 山区河流弯曲分汊型河段航道整治方案[J]. 水运工程, 2023(S1): 34-42.
 - [6] 钟亮, 许光祥, 周鑫靖. 长江上游胡家滩航道整治数值模拟研究[J]. 水运工程, 2015(5): 153-160.
 - [7] 许光祥, 段周平, 胡小庆. 急滩消滩指标的分析与运用[J]. 水运工程, 2015(7): 108-113.
 - [8] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2007(8): 78-81, 92.
 - [9] 胡小庆. 长江宜宾—重庆河段急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2012(10): 77-80.
 - [10] 洪毅. 松花江白玉通浅滩航道整治工程措施探讨[J]. 水运工程, 2000(2): 30-33.
 - [11] 赵世青, 鞠文昌. 松花江三姓浅滩二期航道整治工程效果分析[J]. 水运工程, 2000(S1): 93-95.
 - [12] 王义安, 陆永军. 二维泥沙数学模型在松花江五股流航道整治中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2002(2): 61-65.

参考文献:

- [1] TURNER M J. Integrity testing in piling practice: Report 144 [M]. London: Construction Industry Research and Information Association, 1997.
- [2] 吕述晖, 苏林王, 苏世定. 考虑信号衰减及叠加修正的反射波曲线分析方法[J]. 水运工程, 2023(4): 26-31, 83.
- [3] 吴斌杰, 王奎华, 童魏烽, 等. 基桩完整性检测中的尺寸效应及桩身阻抗变化效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3229-3237.
- [4] MULLINS G, KRANC S. Thermal integrity testing of drilled shafts: BD544-20 [R]. Tampa: Florida Department of Transportation, 2007.
- [5] MULLINS G. Thermal integrity profiling of drilled shafts[J]. The journal of the Deep Foundations Institute, 2010, 4(2): 54-64.
- [6] SELLOUNTOU E A, AVAREZ C. Thermal integrity profiling: a recent technological advancement in integrity evaluation of concrete piles[C]//CIAS. Proceedings from the First International Conference, Seminar on Deep Foundations. Bolivia: CIAS, 2013.
- [7] BIXLER M, BELARDO D, PISCSALKO G. Case histories utilizing thermal integrity profiling for foundation quality assurance[C]//GeoVancouver. Proceedings of the 69th Canadian Geotechnical Conference. Vancouver: GeoVancouver, 2016: 1-7.
- [8] American Society for Testing Materials. Standard test methods for thermal integrity profiling of concrete deep foundations: ASTM D7949-14 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [9] 张光辉, 张晗, 高纯. 大体积混凝土水化热温度场仿真分析[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(19): 85-87.
- [10] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (本文编辑 王璁)

(本文编辑 王传瑜)