

文章编号: 1001-4632 (2003) 05-0040-04

低应变反射波法在青藏铁路基桩质量检测中的应用及分析

董承全, 邵丕彦, 谷 牧

(铁道科学研究院 铁建所, 北京 100081)

摘 要: 介绍低应变反射波法检测基桩完整性原理, 通过对青藏铁路基桩质量检测, 发现在高原冻土环境下, 基桩的质量问题主要是扩颈。产生桩身扩颈的原因是: 施工期进入6月以后, 气温相对升高, 冻土层在机械施工扰动下, 破坏了原来冻土环境, 造成冻土融化后形成扩孔。根据有关冻土资料表明, 地基土的冻胀力取决于地基土的冻胀性, 基础底板受法向冻胀力随基础埋深的增加而减小; 切向冻胀力在桩身缺陷处, 会产生应力集中, 使桩身破坏。对于扩颈桩, 由于扩颈处桩周侧面积增大而使切向冻胀力增大对桩产生不利影响。针对冻土区冻胀力对基桩的危害, 提出了改善基桩施工质量的措施。

关键词: 青藏铁路; 基桩检测; 反射波法; 应用分析

中图分类号: U419.92; TU473.16 **文献标识码:** A

1 前 言

由于青藏铁路高原冻土区具有独特的冰缘干寒气候特征, 气候多变, 高寒缺氧, 气压低, 给施工带来一定困难。特别是冻土区桥梁基桩施工, 桩周土多为含冰土层或饱冰土层, 钻孔施工过程中由于施工机械扰动, 改变原冻土层地温, 致使冻土层融化形成塌孔、扩孔, 造成清底困难, 容易形成扩颈缺陷桩。为此开展基桩质量检测尤为必要。

2 低应变反射波法检测原理

低应变反射波法检测桩身完整性的基本原理是: 通过在桩顶施加激振信号产生应力波。该应力波沿桩身传播过程中, 遇到不连续界面(如蜂窝、夹泥、离析、断桩等缺陷)及截面发生变化(如扩颈、缩颈)和桩底时, 由于波阻抗发生变化, 将产生反射波。检测分析反射波的时程、幅值和波形特征, 就能判定桩的完整性情况。

假定桩为一维弹性杆(如图1), 其长度为 L , 横截面积为 A , 弹性模量为 E , 质量密度为 ρ , 弹

性波速为 c ($c^2 = E/\rho$)。

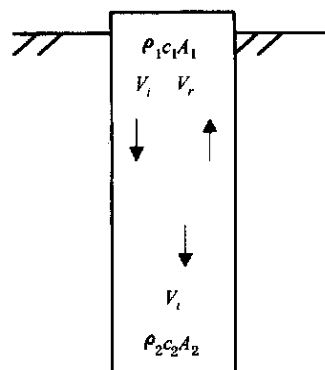


图1 桩中应力波传播示意图

推导可得桩的一维波动方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

方程的解为:

$$u(x, t) = f(x - ct) + q(x + ct)$$

式中, c ——波传播速度;

$f(x - ct)$ ——下行波;

$q(x + ct)$ ——上行波。

根据桩材界面处速度和力的连续条件及力的平衡定律, 得入射波与反射波、透射波质点速度之间

收稿日期: 2003-04-28

作者简介: 董承全 (1951—), 男, 湖北宜都人, 高级工程师。

的关系:

$$V_r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i \quad (2)$$

$$V_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i \quad (3)$$

式中, V_i ——入射波;

V_r ——反射波;

V_t ——透射波;

Z_1 ——介质 1 的波阻抗, $Z_1 = \rho_1 c_1 A_1$;

Z_2 ——介质 2 的波阻抗, $Z_2 = \rho_2 c_2 A_2$ 。

令:

$$F = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

则式 (2)、式 (3) 变为:

$$V_r = F V_i \quad (4)$$

$$V_t = T V_i \quad (5)$$

式中, F ——反射系数;

T ——透射系数。

下面将 F 的正负值结合桩的缺陷情况讨论如下:

1) 当 $\rho_1 c_1 A_1 > \rho_2 c_2 A_2$, $F > 0$ 时, 反射波与入射波同相位。若 $A_1 = A_2$, 即桩身截面无变化, 则有 $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$, 相当于应力波从高阻抗材料向低阻抗材料传播, 类似断桩、离析桩或摩擦桩底的反射; 若 $A_1 > A_2$, $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$, 即桩材料质量不变化, 应力波由大截面传至小截面, 类似于缩颈桩的反射。

2) 当 $\rho_1 c_1 A_1 < \rho_2 c_2 A_2$, $F < 0$ 时, 反射波与入射波反相位。对于 $F < 0$, 可以是 $A_1 = A_2$, $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$, 即杆件截面无变化, 应力波从低阻抗材料向高阻抗材料传播; 也可以是 $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_1$, $A_1 < A_2$, 即材料不变, 应力波由小截面传至大截面。前者类似于嵌岩桩底反射情况, 后者类似于扩颈桩情况。由反射波与入射波关系式 (2)、式 (4) 和反射系数 F 的正负值、结合地质情况及施工情况综合分析可判定桩的缺陷性质及缺陷程度。缺陷位置 L_x 由下式确定:

$$L_x = \frac{ct_x}{2} \quad (6)$$

式中, c ——桩平均波速, $c = \frac{2L}{t}$, t 为桩顶至桩底反射时间;

t_x ——桩顶至缺陷处反射时间。

3 检测实例分析

截止到 2002 年年底, 青藏铁路格尔木至唐古拉山北段全面开工, 绝大部分桥梁基桩已完工。在抽检的 32 座桥梁, 312 根基桩中, 扩颈桩 191 根, 占抽检桩数的 61%。典型工程实例及开挖验证如下。

3.1 完整桩检测

如图 2 所示某特大桥 G2 号钻孔灌注桩, 桩长 16.1 m, 桩直径 1.25 m, 混凝土强度等级 C₂₅。桩周土由上而下主要为砾砂土、粉砂 (少冰 + 多冰) 和黑色粉土 (少冰 + 多冰)。由实测波形可看出, 桩底反射清楚, 桩身无明显缺陷反射, 波传播速度 3 500 m·s⁻¹, 属完整桩。

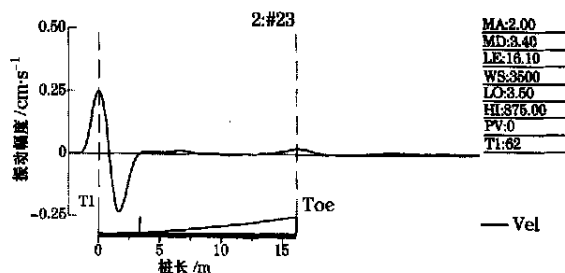


图 2 实测完整桩波形

3.2 扩颈桩的检测

根据现场检测结果分析, 桩身存在扩颈现象的桩。主要在桩顶下 5 m 至 10 m 以内冻土层里, 如某大桥, 地处青藏高原冻土北界, 西大滩与昆仑山口之间, 中心里程 DK975 + 433。采用钻孔灌注桩基础, 设计桩长 25 m 左右, 桩周土层由上而下主要为砾砂土、粉土 (含冰)、角砾土 (富冰)、干枚岩 (含冰)。18-2 号桩, 现场检测结果表明, 桩顶以下 1 m 处扩颈, 2 m 处缩颈, 6 m 处严重扩颈。

如图 3 所示, 2 m 处缩颈反射强烈, 且有 2 次以上反射, 并伴有“低频振荡”。经现场开挖验证了实测结果, 如图 4, 桩顶以下 1 m 至 2 m 段扩颈, 周边扩颈达 20 cm。由于施工时下护筒的直径为 1.35 m, 实际扩颈处直径达 1.75 m, 相对扩颈 68% (截面积比), 在 2 m 处缩颈至 1.25 m 直径, 相对缩颈 49%。致使波在该处产生多次反射。造成桩身扩颈的主要原因是施工期进入 6 月以后气温相对升高, 冻土层在机械施工扰动下, 破坏了原来冻

土环境,造成冻土融化后形成扩孔。加之施工单位未按设计要求下够 5 m 深护筒,实际下护筒 1 m,造成护筒底部和粉砂与千枚岩交界处(6 m 处)形成扩颈。

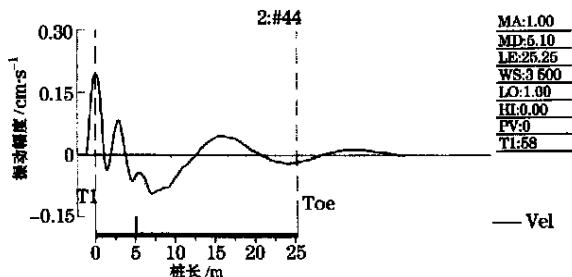


图3 扩颈桩检测波形



图4 18-2号桩开挖照片

3.3 断桩检测与开挖验证

某桥 G3 号桩,检测时桩长 13.0 m,桩直径 1.25 m,钻孔灌注桩,桩周土 0~5.68 m 为圆砾土,5.68 m 以下至桩底为砾岩。检测发现距桩顶 1 m 左右断桩,波形特征如图 5,图上反映在断桩处出现多次同向反射。经开挖验证,桩在该处夹泥严重,形成断桩,断裂面积占桩身截面积 2/3 以上。经对上部断桩处理以后,对其下部桩身复测,桩身断裂缺陷消除,波形特征如图 6。

形成夹泥断桩的原因一般是由于导管拔管速度过快,造成导管埋入混凝土深度不够所致。

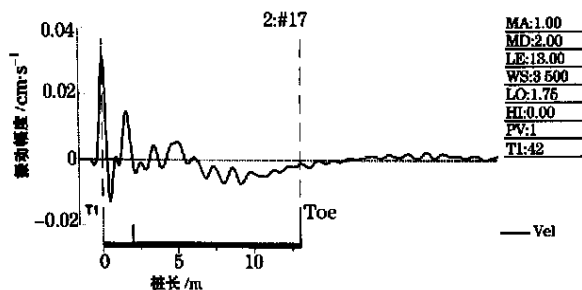


图5 断桩波形图

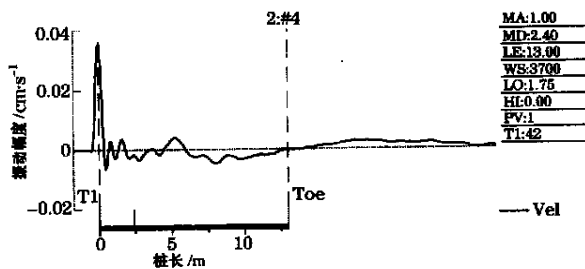


图6 断桩处理后复测波形

4 冻胀力对桩基质量安全影响及对策讨论

根据文献 [1] 有关冻土资料表明,冻胀力可分为沿桩基础侧面向上作用的切向冻胀力,垂直于桩基础底面的法向冻胀力,作用于桩基础侧面的水平冻胀力(如图 7)。

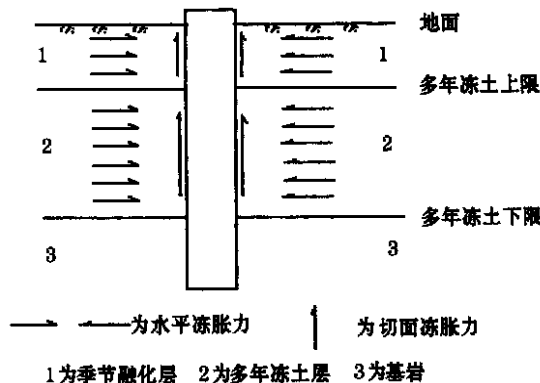


图7 冻胀力对基桩作用示意图

切向冻胀力基本值 为 $50 \text{ kPa} < < 80 \text{ kPa}$ (冻胀) 或 $80 \text{ kPa} < < 120 \text{ kPa}$ (强冻胀); 水平冻胀力标准值 H_0 为 $70 \text{ kPa} < H_0 < 120 \text{ kPa}$ (冻胀) 或 $120 \text{ kPa} < H_0 < 200 \text{ kPa}$ (强冻胀)。地基土的法向冻胀力大小取决于地基土本身的冻胀性,基础底板受到法向冻胀力随基础埋深的增加而减小。当基础底埋深至 $1/2 \sim 1/3$ 最大冻胀深度时,法向冻胀力值可减少 85 % 左右。桩基一般都穿越冻土层将桩底设置在基岩上。而切向冻胀力是不可忽视的因素。经粗略验算,若冻深下限在 6 m 左右,其冻胀力可达 $1\,000 \text{ kN} \sim 2\,000 \text{ kN}$ 。当桩身存在缺陷时,由于桩周向上作用的切向应力会在缺陷处产生应力集中,使桩身破坏。对于扩颈桩,由于扩颈处侧壁面积增大,相应地作用在扩颈处的切向冻胀力也增大而对桩身产生不利影响。因而采用可行的施工方法将冻胀力危害性降低到最小程度是必要的。为

此,提出以下几点建议供参考:

1) 选择低温天气施工,根据青藏铁路基桩检测结果分析,发现4月、5月施工的基桩完整性普遍较好,而6月份以后施工的基桩,地表下10 m以内桩周土为粘土、砂、砾石类冻土的桩不同程度存在扩颈,这可能与6月份以后气温升高有关。因此,桩基施工最好选择4月、5月份进行。

2) 在气温相对较高季节,气温在0℃以上时施工,应采取防护措施。如在冻土层施工的灌注桩加钢护筒,以减少扩颈,同时在护筒壁与混凝土之间采取一些必要措施以降低冻胀力特别是切向冻胀力对桩身的影响。

3) 对于扩孔严重的桩孔,可先灌注低标号砂浆^[2],待砂浆初凝后再复钻,然后进行灌注施工,可保障桩身的完整性,同时由于砂浆作为冻土与桩身之间的过渡带,可有效降低冻胀应力对桩身的影响。

4) 也可采用钻孔插入桩施工^[3],这样既解决了钻孔灌注桩桩身质量难于保证的问题,又解决了打入桩由于冻土坚硬不易施打的困难。

5 结束语

通过低应变反射波法检测基桩完整性的理论与方法在青藏铁路基桩施工质量的检测实践,证明该方法在对高原冻土环境中施工的基桩质量控制是一种简便可行方法。同时针对冻土环境中基桩质量缺陷的形成原因进行了浅析,讨论了冻胀力对桩基安全的影响,当桩身存在扩颈时,由于扩颈处桩周侧面积增大而使冻胀力对桩身安全影响增大,因而减少或消除缺陷桩及扩颈桩很有必要,进而提出了改善施工质量、降低冻土对桩基质量稳定性影响的建议,供建设、设计、施工单位参考。

参 考 文 献

- [1] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程地质手册 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [2] 涂 东. 灰岩地区钻孔灌注桩施工技术的应用 [J]. 岩土工程界, 2000, (9).
- [3] 冉 理. 青藏高原铁路的设计与研究 [J]. 中国铁道科学, 2001, 22 (1): 16—23.

Application of Low Strain Reflection Wave Method to Qinghai-Tibet Railway Pile Quality Test and Its Analysis

DONG Cheng-quan, SHAO Pi-yan, GU Mu

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper introduces the test integrity rationale of the low strain reflection wave method. Through the quality test of Qinghai-Tibet Railway piles, it is found that expanding neck is the main problem of the pile quality under the environment of permafrost plateau. The cause that leads to the expanding neck is that the weather becomes warmer after June and the frost stratum is disturbed by movement of the construction machineries. The original permafrost environment is damaged. After the thawing process, there forms the expanded hole. According to frost soil data, the normal frost-heaving stress depends on the frost-heaving property of the foundation soil. The normal stress decreases with the increase of the depth of foundation. The tangent frost heaving stress will generate stress concentration at the pile defects, thus damaging the pile body. As for the pile with the expanding neck, the tangent stress grows due to the increased area around the pile's side, which is detrimental to the pile body. Due to the threat of the frost-heaving stress in the frost region against the pile, the paper suggests the measures for the improvement of the quality of the piles.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; Pile test; Reflection wave method; Application and analysis

(责任编辑 贺振中)