

CT 技术在超长桩后压浆效果检测中的应用研究

黄生根¹, 张 健¹, 龚维明²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘 要: 超声波 CT 检测的主要物理量是超声波速度, 可以区分加固体的强度和密度; 电磁波 CT 检测的物理量是吸收系数, 可以区分注浆体的分布。采用 CT 检测技术, 对苏通大桥主墩群桩的后压浆效果进行了评价。根据取芯结果和 CT 检测成果的对比分析, 综合应用超声波 CT 和电磁波 CT 技术对超长桩压浆效果进行检测是可行的。

关 键 词: 后压浆; CT; 超声波速度; 吸收系数

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Study on a application of CT to grouting effect test of overlength piles

HUANG Sheng-gen¹, ZHANG Jian¹, GONG Wei-ming²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The wave velocity is the main physical parameter of ultrasonic wave CT test, it can distinguish the change of strength and density in reinforced section. The absorption coefficient is the main physical parameter of electromagnetic CT; it can determine the distribution of the reinforced section. CT has been applied to evaluate the grouting effect of group piles in Su-Tong Bridge. According to the results of coring and CT test, it is practicable to apply ultrasonic wave CT and electromagnetic CT synthetically to test the grouting effect of overlength piles.

Key words: post-grouting; CT; ultrasonic wave velocity; absorption coefficient

1 工程概况

苏通大桥主桥采用 1 088 m 的双塔斜拉桥, 主墩采用 131 根直径 2.8 m/2.5 m(钢护筒内径 2.8 m)、长度 120 多 m 的钻孔灌注桩群桩基础。在前期经过压浆试验取得可靠数据的基础上, 主墩部分采用 U 管桩端后压浆技术, 桩端持力层选在上更新统 8 层粗砂夹细砂层。

桥位区共分为 22 个工程地质层, 各层主要特征如下: (1) 全新统 (Q₄) 分为 4 层: 第 1 层为砂或亚黏土夹粉砂; 第 2 层为亚黏土; 第 3 层为淤泥质亚黏土或粉砂夹层; 第 4 层为亚黏土或亚黏土与粉砂互层。(2) 上更新统 (Q₃) 分为 4 层: 第 5 层粉砂为主; 第 6 层粗砂含砾; 第 7 层细砂、粉砂; 第

8 层粗砂夹细砂。(3) 中更新统 (Q₂) 分为 7 层, 为粉、细砂层、黏性土。(4) 下更新统 (Q₁)、上第三系顶板埋深在 200 m 以上, 分为 7 个工程地质层。

苏通大桥为取得可靠的工艺参数和设计参数, 在工程桩施工前, 共进行了 4 次试桩试验, 主要试验内容包括自平衡静载试验和压浆效果的 CT 检测^[1]。主桥工程桩施工完后, 对部分桩进行了压浆效果的跨孔 CT 检测。

2 U 管后压浆技术的原理与特点

2.1 U 管后压浆技术的原理

后压浆的加固原理包括充填、挤密、劈裂和胶结等多种作用, 浆液不仅对桩端进行加固, 对桩侧也产生明显的作用。

U 管桩端压浆系统由进口管、出口管和桩端注浆装置组成一个循环系统,与传统的单向压浆法相比,可多次进行压浆,压浆次数可在一个较大的范围内进行调节。对 U 管压浆技术,在压浆初始阶段以充填为主,随着压力增大,浆液对沉渣进行置换和压密;后续压浆以压密和劈裂为主,每一次劈裂和压密都使土中主应力有所增大,压浆所需压力也相应增大,使压浆的影响范围增大^[2]。

根据前期试桩得到的对比结果,U 管压浆的效果明显好于传统的压浆方法,其固结体的均匀程度和整体影响范围更大。

2.2 U 管后压浆技术的特点

概括起来 U 管后压浆技术的主要特点为:

(1) 可控性好。桩端压浆装置可根据要求进行多个循环的压浆。

(2) 桩端浆液分布均匀。由于 U 管后压浆施工工艺分多次对桩端进行压浆,可对桩端沉渣进行充填和混合,并对桩端土层中局部薄弱面进行充填,使浆液在压力作用下对桩端土层进行挤密,避免无效扩散,将加固区限定在一定范围内。

(3) 提高桩的承载力和可靠性。通过调整循环次数,可调节浆液压力和压浆量,同时压力的提高不仅有助于增大端承力,还有助于提高桩侧摩阻力,从而提高桩的承载力。

3 CT 检测技术原理与适应性分析

3.1 测试原理

CT 是计算机层析成像技术的简称,它通过检测测试对象物体内部特定物理量的分布状况,用计算机反演生成图像,借以显示检测对象的内部结构。用来参加反演的物理量可以是声波、超声波、电磁波、电阻率和电场等,不同物理量采用的信号检测方法不同,但计算机反演成像的过程是基本相同的。图 1 为 CT 检测系统示意图,图 2 为 CT 检测分析原理图。

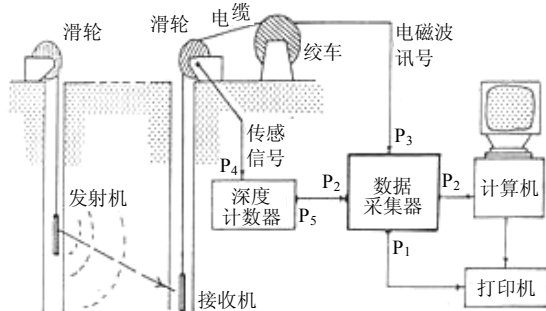


图 1 CT 检测系统示意图
Fig.1 Diagram of CT test system

3.1.1 电磁波 CT 层析成像技术原理

高频电磁波在介质中传播时,其能量将产生衰减,介质物性不同,其对高频电磁波的吸收也不一样,不同介质对高频电磁波的吸收强弱可用介质的吸收系数来表示。有关理论和实践均证明,吸收系数与介质的磁导率、电阻率、介电常数以及电磁波的频率有关^[3, 4],由于不同介质对电磁波的吸收存在差异,当电磁波穿越不同的地下介质,或者层析介质不均匀时,其电阻率、介电常数、磁导率等均发生变化,吸收系数就呈现异常,在电磁波层析成像中,可以利用这些差异来推断目标体的结构与形状等。电磁波 CT 层析成像是采用电磁波传播路径中介质吸收系数作为物探的参量,采用井间跨孔观测方式,通过计算分析介质吸收系数的大小来描述不同物性介质的空间分布情况。因为电磁波工作频率高,能反映小尺度的介质异常。

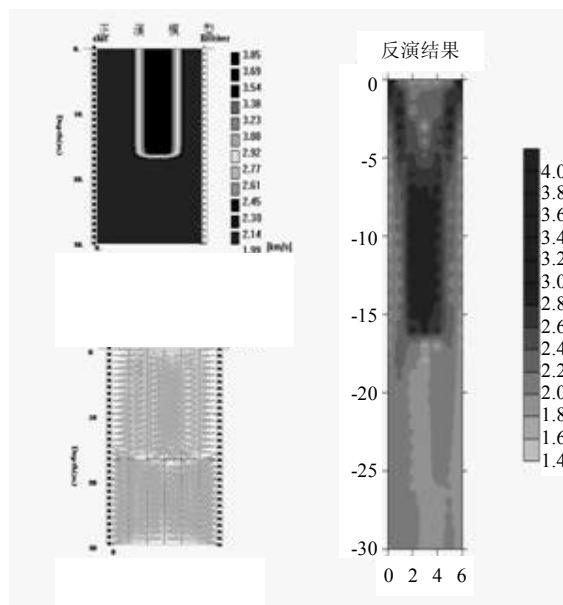


图 2 CT 检测原理图
Fig.2 The mechanism figure of CT test

3.1.2 超声波 CT 层析成像技术原理

根据波动理论,描述介质的物理参数如泊松比、弹性参量、密度等,可以通过测试其纵波速度、横波速度计算出来,即速度是一个能反映介质物理性质的重要参量。超声波 CT 层析成像技术就是采用超声波在介质中传播速度作为参量,采用井间跨孔观测,通过分析超声波速度的空间分布结构来描述介质的空间分布特征。相对来讲,超声波 CT 层析成像能反映较大距离范围内较小尺度的异常体^[5]。

3.2 适应性分析

根据后压浆的作用原理及桩端土层为粗砂夹细

砂的特点, 压浆前期, 由于压力不大, 浆液在砂层中以渗透为主, 浆液与砂粒混合在一起逐渐产生胶结作用; 压浆后期, 随着压力增大, 浆液对土层的作用以挤密和劈裂为主。并且, 在整个压浆过程中, 一部分浆液在压力作用下顺着桩身往上运动, 对桩土接触面和桩侧土体具有加固作用。在浆液多种机理的综合作用下, 桩端土层和桩侧一定范围内的土层在成分上会发生变化, 密度、强度有所提高, 并且加固效果与成分、强度和密度的变化是成正比的。

根据井间电磁波 CT 层析成像技术原理, 物质的成分发生了变化, 则物质对电磁波的吸收系数存在一定的差异。原状土层与掺入了浆液的土层以及土层中浆液含量不同, 则其吸收系数必然存在一定的差异, 因此利用吸收系数的差异来反演桩端及桩侧土体的物质结构, 其地球物理条件成立。

对于超声波探测技术, 物质波阻抗差异的大小决定了方法是否可行。波阻抗为密度与速度的乘积, 密度增大、强度增高都将使波阻抗值变高。在被测介质中, 只要存在波阻抗差异, 超声波在动力学与运动学参数上就会发生变化, 波阻抗差异越大, 则变化越大, 超声波检测效果就越好; 波阻抗差异越小, 则检测的效果就越差。压浆后, 加固范围内土体的密度、强度必然发生变化, 且越靠近桩端变化越大, 因此, 利用波阻抗的差异来反映压浆加固效果, 其地球物理条件也是成立的。

超声波 CT 检测的主要物理量是被测介质的超声波速度, 可以区分注浆体的固结程度或强度, 电磁波 CT 检测的物理量是被测介质的吸收系数, 其主要与介质的成份和结构有关, 可以区分注浆体的分布, 检测过程中采用超声波 CT 和电磁波 CT 两种检测方法相互验证和补充, 以真实反映注入桩底的浆液分布状况和加固体的固结程度。

4 CT 在桩端压浆效果检测中的应用

4.1 苏通大桥二期试桩 CT 检测

二期试桩总压浆量设计值为 10.5 t, 压浆分三次循环。压浆量分配: 第一循环: 40%; 第二循环: 40%; 第三循环: 20%。试桩有关参数及实际压浆量见表 1。

表 1 试桩有关参数

Table 1 Parameters of tested piles

编号	直径/m	桩长/m	压浆量/t
SZ2	2.5	125	8.6
SZ3	2.5	106	11
SZ4	2.5	125	10.3

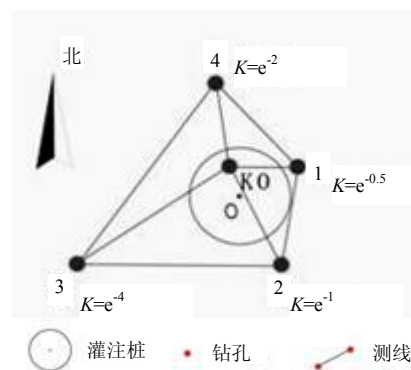
二期试桩对三根桩进行了自平衡静载测试, 其中对 SZ4 进行了压浆前后测试, 桩的极限承载力见表 2。对 SZ2、SZ3 进行了取芯和 CT 检测。

表 2 桩的极限承载力

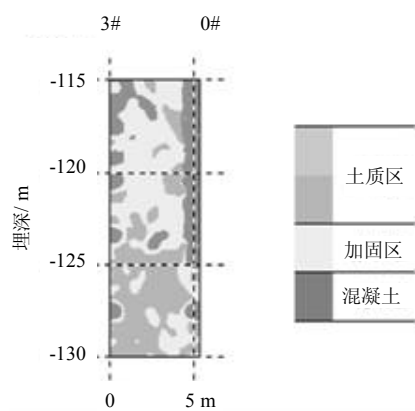
Table 2 Ultimate capacities of piles

桩号	极限承载力 /kN	桩端阻力 /kN	桩端阻力所占比例 /%
sz2	96 481	14 656	15.19
sz3	96 746	30 761	31.8
sz4	压浆前 59 638	8 485	14.23
	压浆后 100 538	33 375	33.2

SZ2 桩共打 5 个钻孔, 桩长 125 m, 实测结果表明, 试桩注浆后, 水泥浆分布较为集中, 大量水泥浆分布于 -126 m 至 -120 m 附近, 明显形成了一个向上弧形扩大头型水泥浆影响区, 水泥浆局部可上串至 -115 m。SZ3 共打 5 个钻孔, 桩长 106 m, 水泥注浆后, 在桩侧局部形成扩大头。注浆主要集中于桩底下 1 m (深 107 m) 以上部位, 注浆在桩壁附近上窜高度达 10 m 以上 (深 96 m)。图 3 和图 4 分别为 SZ2、SZ3 的 CT 剖面位置布置图和部分成像图, 取芯结果和 CT 检测结果基本吻合。



(a) CT 剖面位置图



(b) 0-3 剖面 CT 成像图

图 3 SZ2 试桩 CT 检测结果

Fig.3 CT test results of pile SZ2

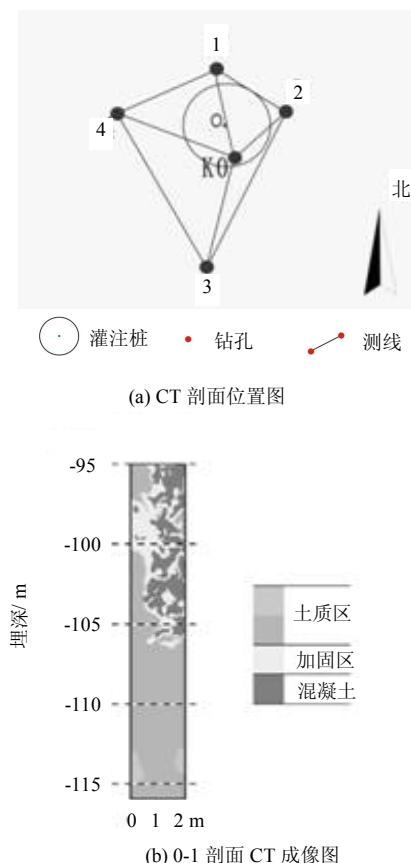


图4 SZ3 试桩 CT 检测结果

Fig.4 CT test results of pile SZ3

4.2 主墩群桩加固效果检测

6 号主墩群桩的桩底设计标高-105 m, 上部 50 m 桩径为 2.8 m, 下部桩径为 2.5 m。桩基施工完后, 应用 CT 技术对相邻的 8[#], 15[#], 16[#], 17[#]和 24[#] 桩进行压浆效果检测。以 16[#]桩为中心, 与其相邻 4 根桩组成辐射状的 4 个 CT 剖面; 为了解 16[#]桩注浆扩散情况, 在外围 4 根桩之间组成 4 个 CT 联络剖面, 图 5 为 CT 剖面布置情况。

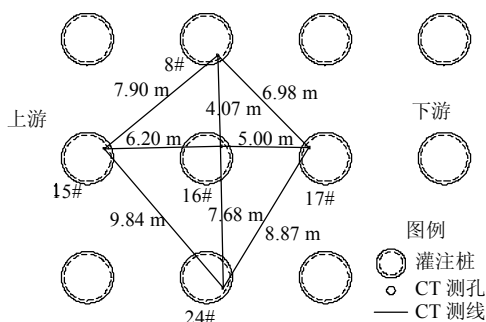


图5 CT 剖面布置图

Fig.5 Layout of CT sections

在需 CT 检测的桩中预埋了 $\phi=110$ mm 的测试

钢管, 待注浆后一段时间, 由钻机打开预埋管的下封口, 向下钻 6 m 并取芯, 然后下 PVC 套管, 保证套管下到指定位置并保持套管内畅通, 确保仪器在套管中上下自如。进行检测时, 首先进行钻孔中的电磁波单孔测试; 再利用取芯孔作为发射孔和接收孔, 进行超声波 CT 探测。图 6 为部分 CT 检测成果图。

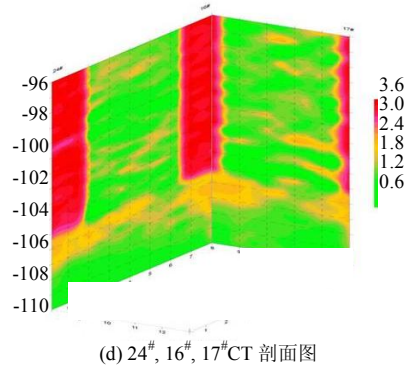
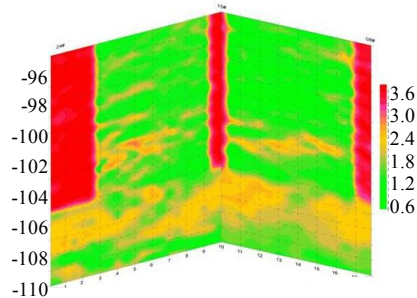
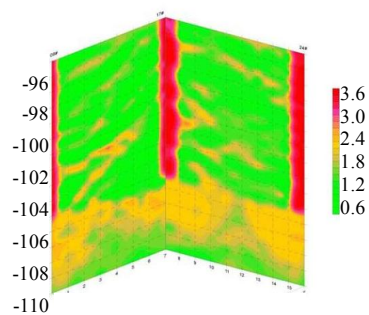
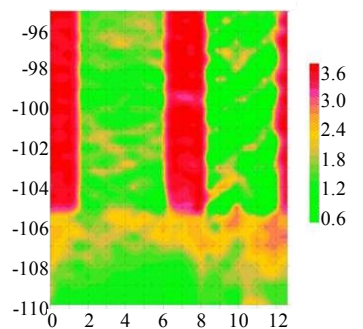


图6 部分 CT 检测成果图

Fig.6 Apart of CT test results

根据 CT 检测结果, 水泥浆集中分布于桩底下 2~4 m 深度范围内, 其向上局部分布, 呈不规则形态, 在桩底向上 4-10 m 范围内局部有水泥浆分布。加固体分布的范围与桩底附近土质紧密程度、水压水流方向以及注浆管的畅通情况有较大的关联。

5 结 语

(1) 根据 CT 检测技术原理及后压浆的作用机理, 采用 CT 技术对超长桩进行检测是可行的。从而为超长桩后压浆的效果检测提供了一种新途径。

(2) 采用超声波 CT 和电磁波 CT 两种检测方法相互验证和补充, 可以真实反映注入桩底的浆液分布状况和加固体的固结程度。根据取芯结果和 CT 检测结果, 两者基本吻合。

(3) 根据主墩群桩 CT 检测结果, 水泥浆集中分布于桩底下 2~4 m 深度范围内, 在桩底向上 4~10 m 范围内局部有水泥浆分布。加固体分布的范围与桩底附近土质紧密程度、水压水流方向以及注浆管的畅通情况有较大的关联。

参 考 文 献

- [1] 黄生根, 龚维明. 苏通大桥一期超长直径试桩承载特性分析. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 370—3 375.
- [2] 黄生根, 龚维明. 超长直径桩压浆后的承载性能研究. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 113—117.
HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Analysis of bearing behavior of 1-stage super long-large diameter testing piles in SuTong bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3 370—3 375.
- [3] 李晓军. CT 技术在土体结构性分析中的应用初探. 岩土力学, 1999, 20(2): 62—66.
LI Xiao-jun. Application of CT in Analysis of Structure of Compacted Soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 62—66.
- [4] 李才明, 王良书, 钟锴. 电磁波层析成像在钻孔灌注桩质量检测中的应用[J]. 高校地质学报, 2003, 9 (3): 467—472.
- [5] 白冰, 周健, 徐建平. 计算机透析成像技术在岩土工程中的应用. 力学与实践, 2001, 23 (1): 14—19.
BAI Bing, ZHOU Jian, XU Jian-ping. The applications of CT to geotechnical engineering[J]. **Mechanics and Applications**, 2001, 23 (1): 14—19.