

# 基于超声波透射法的大直径桩基缺陷检测研究

向子明

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 随着桥梁跨径的增大,桥梁桩基直径和数量均增加,大直径桩基的缺陷检测尤为重要。文中阐述超声波透射法在桥梁大直径桩基完整性检测中的应用,引入有效接收声场的概念,通过对各声测剖面的声速、波幅、频率等声学参数的变化进行综合分析,定性确定桩身可能存在缺陷的位置;提出基于声速判据、声幅判据及 PSD 判据的 3 种桩基缺陷判别方法,对实际工程检测结果的各项判据进行分析和对比,结合工地现场的水文地质情况、施工工艺、桩基的浇筑环境及砼灌注记录等对桩基存在的缺陷进行综合判定。

**关键词:** 桥梁;大直径桩基;超声波透射法;桩身缺陷;完整性检测

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)05-0129-05

桥梁桩基础施工中,受施工现场环境、施工工艺和施工机具等因素影响,桩身易出现各种缺陷,影响结构的安全和使用。桩基完整性检测方法主要有高应变法、低应变法、钻芯法和超声波透射法等。对于桩长较大的桩基,高、低应变法因能量的损耗和扩散等原因,通常无法得到较理想的结果。利用低应变法对大桩径桩基进行检测,因检测所用锤的重量有限,无法满足桩顶处较长持续时间的荷载作用需求,使声波无法达到桩底处充分发挥土阻力所需的位移量。钻芯法是有损检测,可能会对桩基砼造成局部损伤。超声波透射法属于无损检测,也不会受到桩长、桩径的影响。该文结合工程实践,研究基于超声波透射法的桥梁大直径桩基础缺陷检测技术。

## 1 超声波透射法的原理

超声波透射法通过换能器之间发射并接收超声波脉冲,由于超声波在不同介质中传播时声速、声幅等性质会发生变化,据此判断桩身是否存在缺陷并辨别缺陷类别。实际操作中需在桩基砼浇筑前在桩内部预埋一定数量的声测管作为检测通道,并在管内注满清水作为耦合剂。再将换能器分别置于声测管底部或顶部,在同一高度同步、匀速移动。根据所得超声波脉冲的声幅、声速、频率、时程等对桩基进行综合判定(见图 1)。

## 2 超声波透射法确定桩基缺陷的方法

超声波透射法的基本判断依据为声速、声幅和波形 PSD,根据 3 种判据形成 3 种判别桩基缺陷形

式的方法。

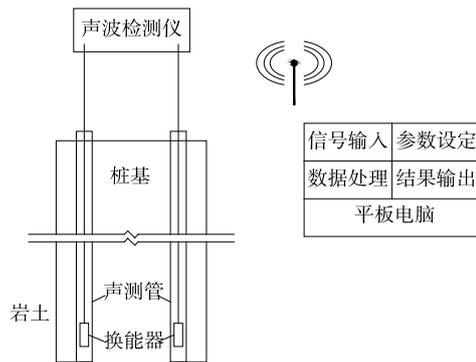


图 1 桩基超声波透射法现场检测示意图

(1) 概率法。该方法主要利用检测所得声速、波幅值绘制声速—深度、波幅—深度曲线,运用数理统计的方法确定声速的临界值。计算公式如下:

$$v_0 = v_m - \lambda \cdot s_x \quad (1)$$

$$v_m = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} v_i \quad (2)$$

$$s_x = \left[ \frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^{n-k} (v_i - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $v_0$  为临界点声速值; $v_m$  为  $n-k$  个数据的平均值; $\lambda$  见表 1; $s_x$  为  $n-k$  个数据的标准差; $n$  为测点数; $k$  为将全部测点的声速值由小到大依次排列,去掉明显不合理的低声速值后的数据个数。

(2) 半波幅法。该方法结合波幅—声速曲线,利用声幅值大小判别有无缺陷。林唯正教授经试验对比,提出声波下降至一半是确定砼有无缺陷的临界值。公式如下:

$$A_{P_i} < A_m - 6 \text{ dB} \quad (4)$$

表1 统计数据个数  $n-k$  与对应的  $\lambda$  值

$n-k$	$\lambda$										
20	1.64	38	1.94	56	2.10	74	2.21	92	2.29	125	2.41
22	1.69	40	1.96	58	2.11	76	2.22	94	2.30	130	2.42
24	1.73	42	1.98	60	2.13	78	2.23	96	2.31	135	2.43
26	1.77	44	2.00	62	2.14	80	2.24	98	2.32	140	2.45
28	1.80	46	2.02	64	2.15	82	2.25	100	2.33	145	2.46
30	1.83	48	2.04	66	2.17	84	2.26	105	2.34	150	2.47
32	1.86	50	2.05	68	2.18	86	2.27	110	2.36	160	2.50
34	1.89	52	2.07	70	2.19	88	2.28	115	2.38	170	2.52
36	1.91	54	2.09	72	2.20	90	2.29	120	2.39	180	2.54

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{P_i} \quad (5)$$

式中： $A_{P_i}$  为声幅判定异常值； $A_m$  为所有测点波幅的平均值。

(3) 斜率法，又称 PSD 法。该方法由吴慧敏教授提出，用于针对实际施工中可能存在的声测管不平行而出现误判的情况。PSD 实际为声时—深度曲线中异常处曲线的斜率和时间差的乘积，即：

$$PSD = K \cdot \Delta t = \frac{(t_a - t_{a-1})^2}{z_a - z_{a-1}} \quad (6)$$

### 3 桩基缺陷位置的定性确定

实测数据中出现的异常值是判定桩基缺陷的依据，桩基缺陷位置的确定与声测管数量及布置有一定关系。

#### 3.1 声测管埋设数量

桩基所需声测管数量与桩径的关系为：

(1) 根据 JGJ/T 106—2003《建筑桩基检测技术规范》，桩径 800 mm 以下(含 800 mm)埋设 2 根声测管，桩径 800~2 000 mm 埋设 3 根声测管，桩径 2 000 mm 以上埋设 4 根声测管。

(2) 根据 JTG/T F81—01—2004《公路工程桩基动测技术规程》，桩径 1 000 mm 以下埋设 2 根声测管，桩径 1 000~1 500 mm 埋设 3 根声测管，桩径 1 500 mm 以上埋设 4 根声测管(见图 2)。

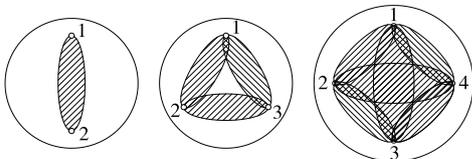


图2 声测管布置示意图(单位:根)

#### 3.2 波幅参量确定缺陷位置

引入有效接收声场的概念。对于发射换能器，

假设被测介质为均匀体，发射换能器的声场可视为以换能器为中心的半球面或球面(图 3 中以  $O$  点为中心)，同理接收换能器的接收灵敏度指向性也能看作是以换能器为中心的同心圆(图 3 中以  $O'$  为中心)， $O$ 、 $O'$  点的同心圆相交点的连线便为接收换能器的有效接收声场。各相交点连线满足椭圆公式：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (7)$$

式中： $a$ 、 $b$  分别为以  $O$ 、 $O'$  为焦点的椭圆的长半轴及短半轴。

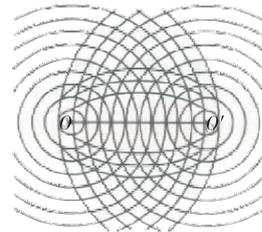


图3 有效接收声场示意图

当发射换能器和接收换能器处于某同一高度时，缺陷位置与有效接收声场可能有 3 种情况：处于  $OO'$  连线上(图 4 中  $C$  处)时，波幅明显降低，声时增长；处于图 4 中  $B$  处时，声幅有所降低，声时不变；处于有效接收声场之外(图 4 中的  $A$  点)时，声幅和声时均不发生变化。

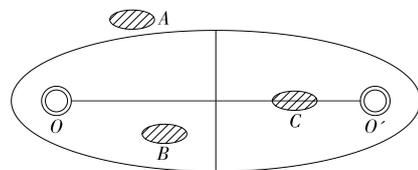


图4 缺陷可能存在的不同位置

根据有效接收声场的原理，可通过声幅参量判断桩基缺陷的具体位置。图 5 为四川峨汉(峨眉—汉源)高速公路项目某桩基的实测数据，从中可见，

1-2、2-3 剖面在 7.2 m 处声幅明显下降,判断该范围内存在缺陷。

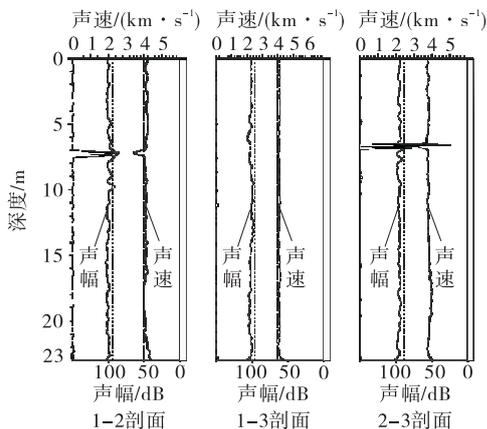


图 5 现场实测数据

### 3.3 桩基完整性分类

根据各声学参量判别桩基缺陷,需对桩基的完整性进行评价。JGJ/T 106-2003《建筑桩基检测技术规范》中桩身完整性分类见表 2。

表 2 桩身完整性分类

完整性等级	检测情况	桩身状况
I	各检测剖面的声学参数均无异常,无声速低于低限值异常	桩身完整
II	某一检测剖面个别测点的声学参数出现异常,无声速低于低限值异常	桩身有轻微缺陷,不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III	某一检测剖面连续多个测点的声学参数出现异常;2 个或 2 个以上检测剖面在同一深度的声学参数出现异常;局部声速低于低限值异常	桩身有明显缺陷,对桩身结构承载力有影响
IV	某一检测剖面连续多个测点的声学参数出现明显异常;2 个或 2 个以上检测剖面在同一深度的声学参数出现明显异常;桩身声速普遍低于低限值异常或无法检测首波或声波接收信号严重畸变	桩身出现严重畸变

各剖面的声波分析结果通过声速、声幅、频率随深度的变化及现场采集波形的畸形程度综合评定(见表 3)。

表 3 桩身剖面的声波分析

砼质量	声速	声幅	频率	波形
良好	均匀无突变	振幅衰减不明显	高频成分多	波形规则
离析	增大	衰减	高频衰减	出现畸变
断桩或严重缺陷	明显增大	明显衰减	频率低	严重畸变或无法采集到波形

超声波透射法和其他物理检测方法一样存在多解性,仅凭声速、声幅等参量无法判断桩基缺陷类型,还应结合工地现场的水文地质情况、施工工艺、桩基浇筑环境及砼灌注记录等综合判断。

## 4 实例分析

以四川峨汉高速公路上桥梁工程为例,阐述各种桩基缺陷性质的辨别和确定。

### 4.1 完整工程桩的检测实例

根据 JGJ/T 106-2003《建筑桩基检测技术规范》,检测数据中各检测剖面的声学参数均无异常,无声速低于低限值异常或某一检测剖面个别测点的声学参数出现异常,无声速低于低限值异常的情况下,该桩基从整体评价可判定为完整桩。

某钻孔灌注桩,桩径 1 500 mm,设计桩长 21.8 m,实测桩长 21.8 m,桩身埋设 3 根声测管,呈等边三角形分布。每个测面每隔 500 mm 进行逐点检测,声测管编号以正北方向顺时针开始第一根管记为 1,1-2、1-3、2-3 距离分别为 880、920、1 120 mm。其超声波透射法检测结果见图 6。

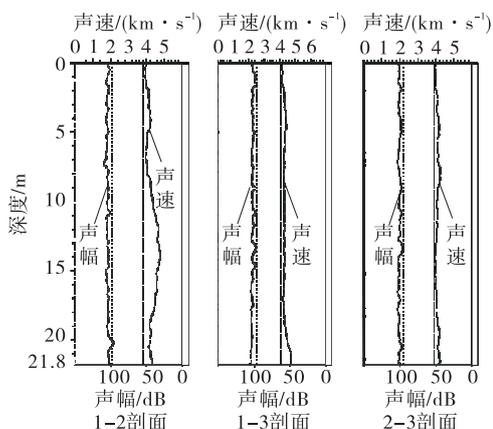


图 6 21.8 m 完整桩实例

由图 6 可知:该桩 3 个声测剖面的声速曲线均没有超过声速值临界点。深度 8.1 m 以下,1-2 剖

面中声速逐渐增大,2-3剖面中声速逐渐降低;到13.2 m左右时,1-2剖面中声速开始逐渐降低,2-3剖面中声速开始逐渐增大,该区段内1-3剖面声速没有发生明显变化,说明2号声测管有朝向1号声测管与2号声测管连线的外侧倾斜的现象,从8.1 m处向里渐弯,到13.2 m处向外渐弯。从波幅曲线分析,1-2剖面20.2 m处、2-3剖面13.3 m处波幅存在异常并超出临界值,判断该处可能存在砼交接不良或有少量沉渣。从整体上评价,该桩可判定为完整桩。

#### 4.2 桩底存在沉渣的检测实例

某钻孔灌注桩,桩径1 500 mm,设计桩长35 m,实测桩长35 m,桩身埋设3根声测管,呈等边三角形分布。每个测面每隔500 mm进行逐点检测,声测管编号以正北方向顺时针开始第一根管记为1,1-2、1-3、2-3距离分别为890、1 080、1 050 mm。其超声波透射法检测结果见图7。

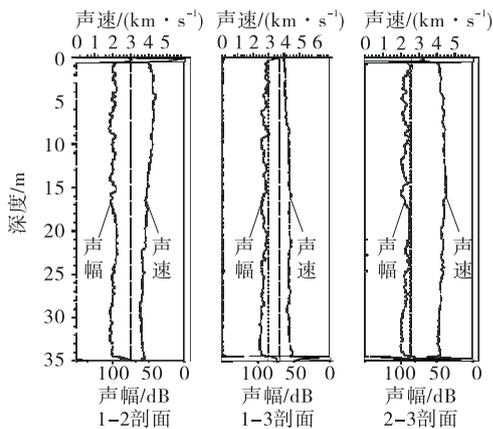


图7 35 m存在低强度区和沉渣的桩基实例

由图7可知:在沉渣部位,3个声测剖面的声速值和声幅值均超过临界点。要求施工方对各声测管内可能存在的泥浆砂土通水清理后进行复测,结果仍没有变化。因此,判定该桩桩底存在0.8 m左右沉渣。

#### 4.3 桩顶低强度区的检测实例

由图7可知:该桩除存在桩底沉渣外,桩身部分完整。但桩顶部分存在波幅值超过临界点、声速值无异常的现象。受长期阴雨的影响,工地现场泥泞,作业环境很差,且调查得知该桩浇筑时并未为之后破除桩头留下足够桩长。因此,判断桩顶砼不完整,存在部分浮浆、沉渣、砼混合物,为桩顶低强度区。

#### 4.4 桩身存在夹泥缺陷检测实例

某钻孔灌注桩,桩径1 500 mm,设计桩长31.9

m,实测桩长31.9 m,桩身埋设3根声测管,呈等边三角形分布。每个测面每隔500 mm进行逐点检测,声测管编号以正北方向顺时针开始第一根管记为1,1-2、1-3、2-3距离分别为1 000、9 600、1 010 mm。其超声波透射法检测结果见图8。

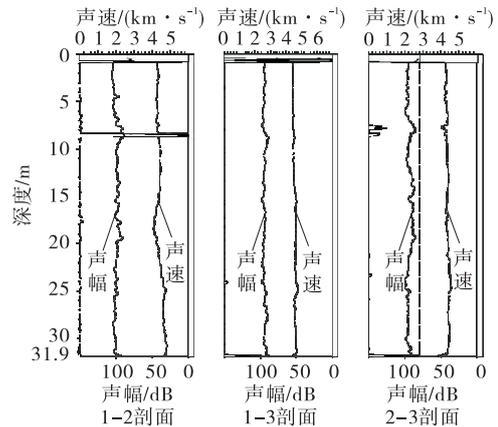


图8 31.9 m桩身存在夹泥缺陷的桩基实例

由图8可知:1-2剖面8.5 m左右声速、波幅异常。对现场地质状况、成孔方式、砼浇筑记录等进行调查,得知在砼浇筑过程中曾出现过泥浆护壁坍塌的情况。因此,判断该处可能存在夹泥缺陷。

#### 4.5 桩身存在离析缺陷的检测实例

某钻孔灌注桩,桩径2 200 mm,设计桩长40 m,实测桩长40 m,桩身埋设4根声测管,呈正方形分布。每个测面每隔500 mm进行逐点检测,声测管编号以正北方向顺时针开始第一根管记为1,1-2、1-3、2-3、1-4、2-4、3-4距离分别为1 400、1 900、1 400、1 400、2 000、1 300 mm。其超声波透射法检测结果见图9、图10。

由图9、图10可知:1-3、2-3、2-4、3-4剖面在27.5 m左右的声参量出现异常,声速值和声幅值

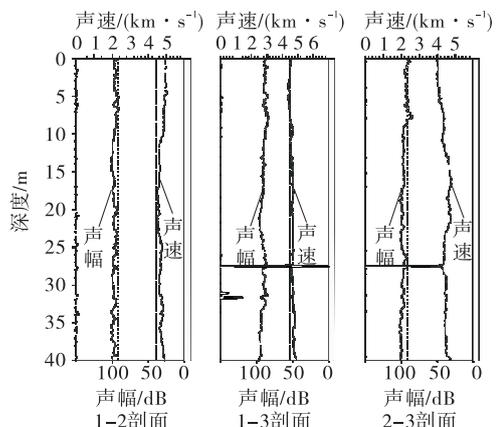


图9 40 m桩身存在离析缺陷的桩基实例(1)

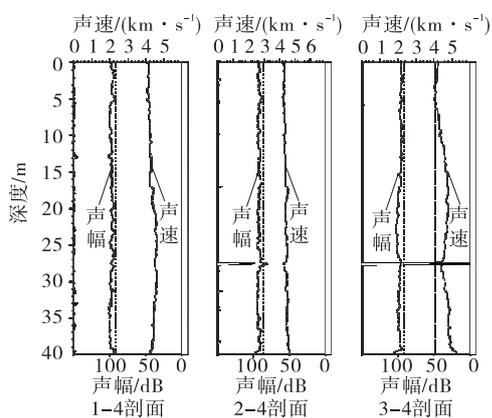


图 10 40 m 桩身存在离析缺陷的桩基实例(2)

均超过临界值。结合施工实际情况及地质情况,得知该桩临近河流,成孔期间曾遇到汛期,出现过坍塌现象,虽在浇筑前得到及时清理,但该处土质含水量较高。因此,判断该处可能存在离析缺陷。

4.6 断桩的检测实例

某钻孔灌注桩,桩径 1 500 mm,设计桩长 27 m,实测桩长 27 m,桩身埋设 3 根声测管,呈等边三角形分布。每个测面每隔 500 mm 进行逐点检测,声测管编号以正北方向顺时针开始第一根管记为 1,1-2、1-3、2-3 距离均为 1 000 mm。其超声波透射法检测结果见图 11。由图 11 可知:3 个声测剖面在 22.3 m 左右的声速、波幅异常,均超过临界值。经过复测后检测结果依旧如此。结合地质状况、成孔方式、砼浇筑记录及现场情况,判断该处可能存在断桩现象。

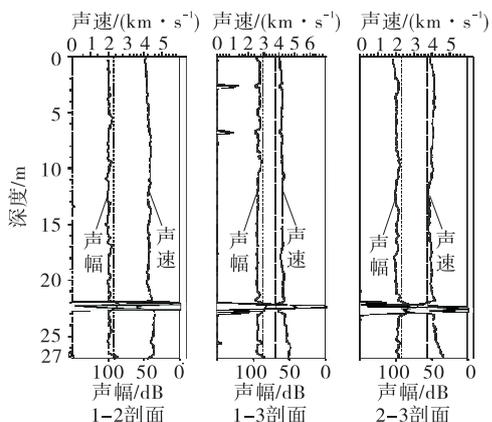


图 11 27 m 桩身存在断桩缺陷的桩基实例

某钻孔灌注桩,桩径 1 500 mm,设计桩长 50 m,实测桩长 50 m,桩身埋设 3 根声测管,呈等边三角形分布。每个测面每隔 500 mm 进行逐点检测,声测管编号以正北方向顺时针开始第一根管记为 1,1-2、1-3、2-3 距离分别为 1 100、1 050、1 020

mm。其超声波透射法检测结果见图 12。由图 12 可知:在 30 m 左右位置 3 个声测面的声参数均出现异常。考虑到当时因汛期原因导致检测环境恶劣,在施工方对现场进行清理并重新在声测管内注满清水后再进行复测,结果见图 13。由图 13 可知:原缺陷部位声参数均正常,考虑到复测前现场降水量较大,等汛期过后对该桩进行第三次检测。第三次检测结果与第一次的结果一致,推断该桩在 30 m 左右位置存在断桩缺陷。第二次检测结果时因大量降水使断桩部位有水充填,导致检测结果与实际情况大相径庭。

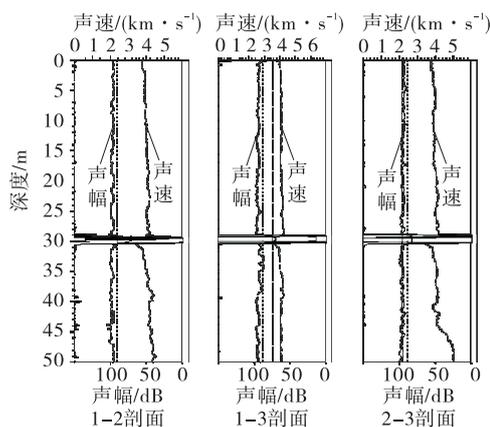


图 12 50 m 桩身存在断桩缺陷的桩基实例(1)

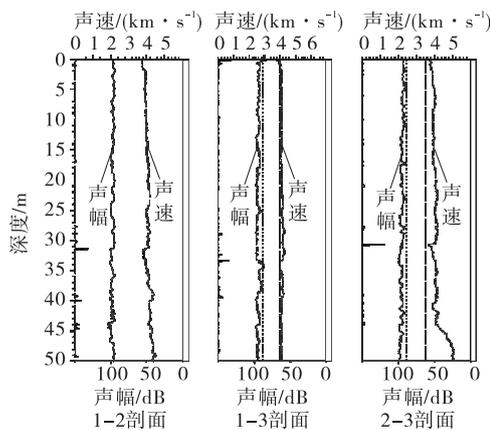


图 13 50 m 桩身存在断桩缺陷的桩基实例(2)

5 结语

引入有效接收声场的概念,在实际工程中利用超声波透射法对桥梁桩基进行检测,结合现场的水文地质情况、施工工艺、桩基浇筑环境及砼浇筑记录等综合判断桩身的完整性。工程实例检测结果表明,针对桩径大、深度大的桥梁桩基完整性检测,超

(下转第 144 页)

间,及时封闭成环;断面之间的变化尽量优化至最优,利用机械作业减少人工作业强度,加快施工进度、降低安全风险。

(4) 利用渐变施工分岔大跨段,拱架尺寸多,加工及施工过程中常出现乱用现象,后期如何做好加工及安装的准确把控是关键。

(5) 隧道小净距、大跨度、变断面处施工风险较高,易发生围岩失稳滑塌现象,施工前需加强超前支护,做好各项围岩加固措施。

(6) 在围岩破碎或稳定性较差时,超前帷幕注浆如何做到最优,需后续结合不同地质情况及断面布置形式进行考虑。

参考文献:

[1] 王建.大跨度公路隧道交叉分岔段施工方案研究[J].公路交通技术,2009(1):98-101.

[2] 李新刚.大跨度交岔点快速施工技术[J].矿山压力与顶板管理,2004,21(1):40-41.  
[3] 胡云鹏.大跨度小净距分岔隧道双向施工关键技术研究[J].铁道建筑技术,2018(12):77-80.  
[4] 毕强,吴金刚.大跨分岔式隧道结构设计关键技术研究[J].隧道建设,2011,31(6):668-677.  
[5] 林立华.分岔隧道大拱段衬砌结构受力分析[J].土工基础,2007,21(6):64-66.  
[6] 荆永军,樊至,欧阳刚杰,等.长沙营盘路湘江隧道分岔大跨施工技术[J].隧道建设,2013,33(3):231-236.  
[7] 尚江鹏.大跨分岔隧道分岔段施工方法优化[J].建筑工程技术与设计,2019(16):1620-1621.  
[8] 蔡东明.大跨分岔隧道分岔段施工方法研究[C]//中国公路学会隧道工程分会.2015年全国公路隧道学术年会论文集.重庆:重庆大学出版社,2015:349-358.

收稿日期:2020-06-10

\*\*\*\*\*

(上接第 133 页)

声波透射法相较于其他方法具有一定优越性,对桩基检测能起到指导作用。

参考文献:

[1] 方锐.超声波透射法在基桩完整性检测中的应用[J].西南公路,2014(3):75-78.  
[2] 苏忠高.低应变法动测判断基桩桩端性状初探[J].公路交通科技(应用技术版),2010(4):112-114.  
[3] 尹秀杰,杨万里,鲍琪祥.声波透射法与低应变反射法检测基桩完整性的对比研究与统计分析[J].公路交通科技(应用技术版),2018(3):288-290.  
[4] 李鲁忠.采用钻芯法检测端承型大直径灌注桩承载力的探讨[J].建筑科学,2014,30(9):103-106.  
[5] 肖春喜.超声波透射法在检测大直径灌注桩完整性中

的应用[J].岩土力学,2003(增刊1):169-171.  
[6] 黄海珍.声波透射法桩基检测在高速公路中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018(4):243-244.  
[7] 胡运兵,宋劲,徐宏武.声波透射法在桥桩安全检测中的应用[J].地下空间与工程学报,2005,1(5):800-803.  
[8] 李廷,徐振华,罗俊.基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J].岩土力学,2010,31(10):3165-3172.  
[9] 吴庆曾.论声参量波幅的应用[J].岩土工程界,2000(8):9.  
[10] 郑明燕,孙洋波.声波透射法在灌注基桩完整性检测中的应用研究[J].铁道建筑,2010(10):137-139.

收稿日期:2019-11-27

\*\*\*\*\*

(上接第 139 页)

[10] 王立新,汪珂,李储军.黄土地区地铁盾构隧道近距离下穿既有有线影响规律及控制标准研究[J].铁道标准设计,2019,63(10):124-130+158.  
[11] 徐伟忠,刘树佳,廖少明.盾构埋深对软土土拱效应影响分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):111-118.  
[12] 姜辉.横琴隧道主洞与匝道施工相互影响研究[J].公路与汽运,2020(2):147-150+155.  
[13] 刘五一,张健,周中.土仓压力对隧道近接既有隧道盾

构施工影响分析[J].公路与汽运,2018(4):145-149+171.  
[14] 仇文革.地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D].成都:西南交通大学,2003.  
[15] 李军,吕婧,刘瑞.新建隧道施工对近距离既有隧道的影响及安全风险评估[J].公路与汽运,2017(5):183-187.  
[16] 闻毓民.两孔平行盾构隧道近接施工的力学行为分析[D].成都:西南交通大学,2005.

收稿日期:2020-03-31