



中美欧规范水运工程基桩完整性 试验检测之比较^{*}

桑登峰, 娄学谦, 吕述晖, 苏世定, 王 幸, 胡兴昊

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要:近年来,我国的企业在“一带一路”沿线国家承揽了较多水运工程桩基项目,但因对国外规范了解不够深入,给桩基完整性试验检测的开展带来很大困扰。以中国《水运工程地基基础试验检测技术规程》和美国 ASTM (D5882、D4945、D6760、D7949)、欧洲标准(EN1997、EN1536、EN12699)为例,详细比较中国、美国、欧洲 3 套现行规范在水运工程桩基完整性试验检测中部分条款之差异,主要结果有:1)中国规范规定了完整性试验检测的比例并将桩的完整性分为 4 类。2)美国规范包括了热异常法,丰富了检测方法。3)美国规范只规定了如何进行试验,一般不规定如何使用试验结果。4)欧洲规范仅提及了完整性检测可采用的方法,并未进行具体规定,一般均按所在地国家标准进行。

关键词:水运工程;中美欧规范;桩基础;完整性试验;比较

中图分类号: TU 473; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0187-07

Comparison of integrity tests of port and waterway pile foundations in codes of China, America, and Europe

SANG Deng-feng, LOU Xue-qian, LYU Shu-hui, SU Shi-ding, WANG Xing, HU Xing-hao
(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd, Guangzhou 510230, China)

Abstract: In recent years, Chinese enterprises have contracted many pile foundation projects of port and waterway in the “One Belt and One Road” countries, but due to the lack of understanding of foreign codes, it has brought some troubles for the pile integrity tests. Taking Chinese code *Technical specification for testing and inspection of port and waterway engineering foundation*, American codes ASTM (D5882, D4945, D6760, D7949), and European codes (EN1997, EN1536, EN12699) as examples, the differences of pile foundation integrity tests in port and waterway engineering according to the three sets of current codes in China, America, and Europe in terms are compared, and the main results include: 1) The Chinese code specifies the proportion of integrity test and divides the integrity of pile into four levels. 2) The American codes include thermal analysis, which enriches the testing method. 3) The American codes are only specified how the tests are to be carried out, but generally are not specified how the test results are to be used. 4) The European codes only provide the method for integrity testing without specific provisions, and the use is generally according to the local national requirements.

Keywords: port and waterway engineering; codes of Chinese American and European; pile foundation; integrity test; comparison

欧洲岩土工程设计规范 Eurocode7, 是欧洲标准化委员会(CEN)发布的建筑和土木工程设计 10 套统

一欧洲规范之一, 包括基本规定(EN1997-1)^[1]、工程勘察和测试(EN1997-2)^[2]。除此之外, CEN 还发布

收稿日期: 2020-06-29

*基金项目: 广州市珠江科技新星专项资助项目(201806010164); 广州市珠江科技新星专项资助项目(201906010023)

作者简介: 桑登峰(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路及水运工程检测、评估与维修加固的研究。

了 13 个岩土工程执行标准，其中一些在 EN 1997-1 中被提及，灌注桩施工主要参考 EN 1536^[3]、打入桩施工主要参考 EN 12699^[4]、微型桩施工主要参考 EN 14199^[5]，这些规范均提及了基桩完整性试验检测所采用的方法，但暂无可指导基桩完整性试验检测的欧洲规范。基桩完整性相关的美国规范为 ASTM D5882^[6]、ASTM D4945^[7]、ASTM D6760^[8]、ASTM D7949^[9]。

已有学者对中美欧规范在水运工程基桩设计方面开展了比较研究^[10-11]，关于中美欧规范在水运工程基桩完整性试验检测方面的比较尚未见报道。了解《水运工程地基基础试验检测技术规程》^[12]与美国和欧洲规范在基桩完整性试验检测

方面的差异，是跨国项目基桩施工质量验收的关键。

1 检测方法

欧洲规范 EN 1997-1 未就基桩完整性检测方法提出具体要求。欧洲执行规范如 EN 12699 第 9.3.3.1 条、EN 1536 第 9.2.3.1 条均指出，在没有欧洲规范可用前，基桩完整性检测应符合国家标准和/或使用地有效的规定。根据笔者海外工作的经验，一般在非洲国家可参考 ICE^[13] 和 CIRIA Report 144^[14] 进行，因此本节及其他节将引入其部分说明。适用于水运工程的中、美、欧规范中关于基桩完整性检测的相关规定见表 1。

表 1 中、美、欧基桩完整试验检测方法

规范	低应变法	高应变法	声波透射法	钻芯法	热异常法
中国规范	适用,JTS 237—2017	适用,JTS 237—2017	适用,JTS 237—2017	适用,JTS 237—2017	无规定
美国规范	适用,ASTM D5882	适用,ASTM D4945	适用,ASTM D6760	适用,无规范	适用,ASTM D7949
欧洲规范	适用,无执行规范	适用,无执行规范	适用,无执行规范	适用,无执行规范	无规定
CIRIA Report 144	适用,有很细的说明	适用,有很细的说明	适用,有很细的说明	适用,有很细的说明	无规定

2 方法介绍

2.1 低应变试验

2.1.1 试验应用

试验用途见表 2。建议工程技术人员在使用规

范条款时要注意其局限性，国内规范没有规定时，可以适当参考国外规范或者国内外的专业书籍，避免造成方法误用和缺陷误判。

表 2 试验用途

规范	应用范围	局限性说明
《水运工程地基基础试验检测技术规程》	可用于检测混凝土预制桩、灌注桩的桩身完整性,判定桩身缺陷的程度及位置(6.3.1)	其有效检测桩长范围应通过现场试验确定(6.3.2)
ASTM D5882	适用于长结构单元(如打入桩、螺旋桩或钻孔桩),无论其安装方法如何,只要它们能够接受低应变冲击测试(1.1) 这些数据有助于评估桩的横截面积和长度,桩的完整性和连续性,以及桩材料的一致性,尽管这些评估是近似的(4.1)	在钢管桩、H 型钢桩或钢板桩上的应用有限。这种测试方法不会给出关于桩承载力的信息(4.1) 第 6.6.5 条也指出了低应变完整性测试的局限性,如:该方法一般不适用于钢板桩、H 型钢桩或未灌芯的管桩的检测
EN 1997-1	第 7.9(8)条:动力低应变完整性试验可用于对可能存在严重缺陷或在施工过程中可能导致土体强度严重损失的桩进行整体评价	第 7.9(8)条:影响桩长期性能的混凝土质量和混凝土覆盖层厚度等缺陷,往往不能通过动力试验和其他试验(如声波试验)发现,而在监测施工时,可能还需要振动试验或取芯等试验
CIR I A Report 144	低应变完整性试验可适用于所有类型的桩和在所有类型的地基上形成的桩,前提是能够到达桩顶(3.1,5)	第 3.1.6 条指出了可以通过低应变完整性测试进行检测的 8 种桩身特征,和不适宜的 7 种特征(如保护层局部缺失)。第 5.4 条详细说明了限制因素

2.1.2 检测比例

《水运工程地基基础试验检测技术规程》第 6.3.3 条规定了低应变法检测比例,如:对单节预制混凝土桩,不低于总桩数的 10%,且不得少于

10 根;对多节预制混凝土桩,不低于总桩数的 20%,且不得少于 10 根;对混凝土灌注桩,当采用低应法时,应全部检测。第 6.3.4 条规定,对于沉桩中发生贯入度过大等异常情况或存在其他

影响桩身结构可靠性因素的桩, 应进行检测, 检测数量不计入正常抽检比例内。美、欧规范均未规定检测比例, CIRIA Report 144 第 10.5 条对检测数量有指导说明。

2.1.3 检测装置

检测装置包括冲击装置、传感器(速度/加速度、力)、连接固定(耦合剂、螺丝等)、传输电缆及用于记录、还原和显示数据的装置等。

《水运工程地基基础试验检测技术规程》第 6.3.5.3 条和 6.3.8.4 条对冲击装置, 第 6.3.8.1 条和 6.3.8.3 条对连接固定装置, 第 6.3.5.1 条和 6.3.5.2 条对记录、还原和显示数据的装置有简单的规定。

ASTM D5882 第 5.1.1 条对冲击装置, 第 5.2.1 条对速度或加速度传感器, 第 5.2.2 条对力

传感器, 第 5.2.3 条对连接固定装置, 第 5.3 条对传输电缆, 第 5.4.1~5.4.4 条对记录、还原和显示数据的装置等作有详细的规定。

比较而言, 中国规范对检测装置的规定较为简单, 在对数据准确性尤为重要的传感器方面, 建议在修订规范时加以补充。

2.1.4 检测程序

关于检测程序相关差异的比较见表 3。

比较而言: 1) 中国规范附录 C 是既用于高应变又用于低应变的桩头处理的规定, 不够合理; 2) 美国规范未对低应变完整性结果进行分类, 且试验报告中不需要进行合格性判定, 评估桩的可接受程度时, 考虑了较多因素; 3) CIRIA Report 144 将实测信号分类, 须注意并不是桩的类别。

表 3 中美规范低应变检测程序差异比较

项目	《水运工程地基基础试验检测技术规程》	ASTM D5882	欧洲规范、CIRIA、ICE
一般规定	第 6.3.7 条就测试参数设定有具体规定	将至少 3 次合适的锤击的信号平均, 并对平均记录进行必要的放大。然后可以对平均的、放大的记录进行完整性评估(6.1)	-
检测前准备	第 6.3.6 条: 1) 检测桩桩身强度应不低于设计强度的 70%, 且不小于 15 MPa; 2) 检测桩的桩头处理应符合附录 C(混凝土桩桩头处理)的要求 第 6.3.8.2 条: 对实心桩, 激振点宜选择在桩中心, 检测点宜在距桩中心 2/3 半径处; 对空心桩, 激振点和检测点宜选择在桩壁厚的 1/2 处; 对直径大于 1.0 m 的桩, 激振点不宜少于 4 处。激振点与传感器的距离不宜小于 100 mm, 并应避开钢筋笼的主筋影响, 激振应沿轴向进行	第 6.2 条: 对于现浇混凝土桩或填充混凝土管桩, 应在浇筑后不少于 7 d 或混凝土强度达到设计强度的至少 75% 后(以较早者为准)进行完整性检测。对于直径大于 500 mm 的桩, 应至少在 3 个位置安装加速度计, 以便对桩的每个局部截面在桩头附近进行完整性评价。放置施加冲击力的装置, 使冲击力于桩轴向施加, 且与加速度计的距离不大于 300 mm	一般来说, 根据混凝土外加剂的不同, 试验前宜至少 5 d 龄期(ICE, C13.4)
现场记录	无相关规定	第 6.3 条就现场记录有详细规定, 如: 混凝土总体积、公称或实际直径与长度关系、永久或临时套管、钢筋等	-
测量	每个检测点记录的有效信号不宜少于 3 锤(6.3.9.3)	如果只记录每次锤击的单个的响应, 确保仪器能记录、还原和显示数据至少 10 条单独的响应(6.4)	-
数据质量检查	不同检测点或多次实测时域信号一致性较差时, 应分析其原因, 选择有代表性的时域信号进行分析(6.3.9.1)	如果记录不可重复, 则不要使用数据(6.5)	-
测量分析	第 6.3.10 条就桩身应力波波速平均值的确定方法、第 6.3.11 条就桩身缺陷的断面位置计算方法等, 分别作有详细的规定 第 6.3.12 条规定, 桩身完整性应根据实测信号的波形、波速、相位、振幅和频率等特征, 结合地质情况和施工过程进行综合评价, 并制定有桩身完整性评价标准表, 将桩的完整性分为 I(完整桩)、II(基本完整桩)、III(明显缺陷桩)、IV(严重缺陷桩或断桩)类 桩身完整性类别为 III 类桩、IV 类桩应判定为不合格桩(6.3.13) 对桩身截面多变且变化幅度较大的灌注桩, 应采用其他方法辅助验证低应变法检测的有效性(6.3.14) 对于嵌岩桩, 桩底时域反射信号为单一反射波且与锤击脉冲信号同向时, 应采取钻芯法、静载试验或高应变法核验桩端嵌岩情况(6.3.15)	第 6.6.3 条: 分析的结果可能包括对桩完整性的定量评估。这些数据的进一步使用和解释是工程判断和经验的问题 第 6.6.4 条: 在该领域有专业经验的工程师将进行最终的完整性评估。结合桩的成桩程序、观测记录、土体信息、荷载要求等等, 评估桩的可接受程度。低应变冲击完整性试验评价不宜作为确定基桩验收或拒收的唯一因素。宜制定应急计划, 以便工程师在进行低应变冲击完整性测试之前, 在发现严重缺陷的情况下, 可能进行进一步的测试或要求进行桩的修复或更换 第 6.6.6 条: 对于阻抗变化较小的桩, 工程师宜考虑荷载向邻近桩的重分布、荷载向缺陷上部土的传递、安全系数、结构荷载要求等因素, 对桩的可接受性进行判断	根据试验得到的信号响应曲线的性质, 将桩的信号响应分为 3 类(CIRIA Report 144, 第 9.1 条): 0 型信号: 信号穿透深度内阻抗无变化 1 型信号: 一次清晰阻抗变化 2 型信号: 不止一个阻抗变化

2.1.5 报告

《水运工程地基基础试验检测技术规程》第 6.3.16 条对低应变法检测报告的内容有相应规定,要求进行:1)桩身完整性描述、缺陷的位置及桩身完整性类别确定;2)出具检测桩合格性判定结论。

ASTM D5882 第 7 节对低应变法检测报告的内容有相应规定,但未要求进行合格性判定。

欧洲规范 EN 1536 第 9.2.3.2 条和 EN 12699 第 9.3.3.2 条均规定报告应包括桩完整性结论,但并不是合格性判定。

CIRIA Report 144 第 9.4 规定:通常情况下,测试专家提交的测试报告包含事实数据,识别测试中获得的信号响应的注意点,并解释这些特征与桩体的关系。建议这些报告至少应包括:1)真实数据;2)信号响应分析;3)信号响应解释;4)实测数据表示(信号曲线、相关信息等)。

2.2 高应变法

2.2.1 适应范围

《水运工程地基基础试验检测技术规程》第

6.2.1 条规定,高应变法可用于检测混凝土预制桩、灌注桩、钢桩以及组合桩的单桩轴向桩身完整性。ASTM D4945 第 4.1 规定,工程师可以利用工程原理和判断对获得的数据进行分析,以评价桩的完整性。EN 1997-1 第 7.5.3 条(3)规定,动力荷载试验也可作为桩的一致性指标,用于检测软弱桩。

2.2.2 评价标准

《水运工程地基基础试验检测技术规程》规定,桩身完整性评价可采用 β 法,制定定量指标,并在 6.2.14.1 条规定使用时应结合桩身性状综合判断,在第 6.2.14.2 条给出了桩身完整性系数和桩身缺陷断面位置计算公式。在第 6.2.14.3 ~ 6.2.14.4 条给出了一些注意事项。ASTM D4945 虽提及可以用高应变法评价桩的完整性,但并未规定评价方法。欧洲规范未就完整性检测的相关方法提出具体要求,一般在非洲地区可参考 CIRIA Report 144 第 7.1.6 条进行。建议工程技术人员在通过 β 法判断桩身完整性时结合国内外规范、专业书籍、区域经验。

表 4 桩身完整性评价标准

规范	$\beta=1.0$	$0.8\leq\beta<1.0$	$0.6\leq\beta<0.8$	$\beta<0.6$
《水运工程地基基础试验检测技术规程》	I 类桩,完整桩	II 类桩,基本完整桩	III 类桩,明显缺陷桩	IV 类桩,严重缺陷桩或断桩
CIRIA Report 144	-	-	桩体损坏	桩体破坏

注:对中国规范,桩身完整性类别为 III 类和 IV 类桩应判定为不合格(6.2.15)。

2.3 钻芯法

关于钻芯法,《水运工程地基基础试验检测技

术规程》第 6.7 节有详细的规定,而美欧规范仅提及,并无具体规定。

表 5 钻芯法主要规定

规范	适用性	检测比例	钻孔/钻头直径
《水运工程地基基础试验检测技术规程》	钻芯法可用于检测混凝土灌注桩的混凝土强度、桩身完整性、桩长、沉渣厚度,判定或鉴别桩端持力层岩土性状。受检桩径宜大于或等于 800 mm,长径比不宜大于 30(6.7.1)	无规定	钻头外径不宜小于 100 mm(6.7.4)
ASTM D6760	第 5.1 条:如通过超声波法发现有缺陷,则宜视情况通过开挖或混凝土取芯进一步验证,或进行其他测试,如静载、高应变、低应变,并在确认有缺陷时,采取措施对结构进行修补	无规定	无规定
欧洲规范、CIRIA Report 144	EN 1997-1 第 7.9(8)条:混凝土质量和混凝土覆盖层厚度等缺陷,往往不能通过动力试验和其他试验(如声波试验)发现,而在监测施工时,可能还需要振动试验或取芯等试验 EN 1536 第 9.2.3.1 条,注 2:有 2 种方式测试混凝土的完整性(低应变或取芯) CIRIA Report 144 第 2.4.1 条:钻孔方法通常用于直径大于 600 mm、长度与直径之比小于 10:1 至 15:1 的打入或钻孔现浇混凝土桩	无规定	CIRIA Report 144 第 2.4.1 条:薄壁钻:钻头直径通常 75~200 mm;旋转裸眼钻:孔径通常为 75~100 mm;旋转岩心钻:旋转岩心样品的直径通常为 50~75 mm;旋转冲击钻:钻孔尺寸通常为 40~100 mm,但 150 mm 是常见的,这取决于钻机和钻头的可用性

2.4 声波透射法

2.4.1 试验用途

中美欧规范相关差异见表 6。建议工程技术人

员在使用规范条款时要注意其局限性, 国内规范没有规定时, 可以适当参考国外规范或者国内外的专业书籍, 避免造成方法误用和缺陷误判。

表 6 声波透射法试验用途

规范	应用范围	局限性说明
《水运工程地基基础试验检测技术规程》	可用于混凝土灌注桩的桩身完整性检测,判定桩身缺陷的位置、范围和程度(6.8.1)	无说明
ASTM D6760	可用于评估探头之间混凝土的均匀性和完整性。数据用于确定混凝土质量是否合格或确定质量差的区域(5.1)	没有给出缺陷的确切类型(例如,夹杂物、蜂窝化、水泥颗粒的缺乏等),而是只给出缺陷的存在(1.8)
欧洲规范	无规定	EN 1997-1 第 7.9 条(8): 混凝土质量和混凝土覆盖层厚度等缺陷,往往不能通过声波试验发现
CIRIA Report 144	最常用的是在灌注桩内使用预制管道。桩的最小直径通常为 600 mm(3.2.1)	无法检测钢筋笼外的混凝土保护层缺陷及可能的桩中心混凝土缺陷(3.2.1)

注: ASTM D6760 及 CIRIA Report 144 均叙述了单孔声波测试法, 本文与中国规范一致, 仅对跨孔声波测试法进行比较。

2.4.2 检测比例

中、美、欧规范均未规定检测比例, CIRIA Report 144, 10.5 对检测数量有指导说明, 可供国外项目借鉴。一般均通过合同或设计要求进行一定比例的声波透射法检测。

《水运工程地基基础试验检测技术规程》第 6.8.4 条对通道, 第 6.8.2 条对探头, 第 6.8.3 条对记录仪器有较详细的规定。

2.4.3 检测装置

检测装置包括内部检查设备(通道)、测定物理试验参数的装置(深度测试用探头、罗盘仪)、测量装置(探头、信号传输电缆、深度测量装置)、记录及处理和显示数据的装置(记录仪器、测量数据显示装置、数据处理装置)等。

ASTM D6760 第 6.1 条对通道, 第 6.2.1 条对深度测试用探头, 第 6.2.2 条对罗盘仪, 第 6.3.1~6.3.4 条对探头, 6.3.5 条对传输电缆, 第 6.3.6 条对深度测量装置, 第 6.4.1~6.4.4 条对记录及处理和显示数据的装置作有详细的规定。

2.4.4 检测程序

中美欧规范相关差异见表 7。

表 7 检测程序

规范	声测管安装	一般测试程序	用仪器进行测量(跨孔)	数据质量检查	完成测试	测量结果分析
《水运工程地基基础试验检测技术规程》	第 6.8.4 条为声测管埋设应符合的规定 声测管埋设数量应符合下列规定(6.8.5): 1) $D \leq 800\text{ mm}$, 不少于 2 根; 2) $800\text{ mm} < D \leq 1\text{ }600\text{ mm}$, 不少于 3 根; 3) $D > 1\text{ }600\text{ mm}$, 不少于 4 根; 4) 当桩径 $D > 2\text{ }500\text{ mm}$ 时, 增加数量	检测剖面组编号时, 可按正北方向顺时针旋转依次编号(6.8.6) 现场检测时, 受检桩混凝土强度应达到设计强度的 70%, 且不小于 15 MPa 时(6.8.7)	对平测和斜测应符合规定(6.8.8): 如斜测时, 两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 30° ; 声测线间距不应大于 100 mm, 提升过程中应根据桩的长短进行 1~3 次换能器高差校正, 提升速度不宜超过 0.5 m/s	-	6.8.9: 在桩身质量可疑的声测线附近, 应采用增加声测线或采用扇形扫测、交叉斜测、CT 影像技术等方式进行复测和加密测试, 进一步确定缺陷的位置和空间分布范围。采用扇形扫测时, 两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 40°	6.8.10~6.8.21 条对测量结果分析方法和要求有具体规定。规定的主要判据有声时、声速、波幅、主频、PSD 等。6.8.21 条规定: 桩身完整性类别应结合桩身缺陷的数量、缺陷处声测线的声学特征、缺陷的空间分布范围进行综合判定, 并给出了完整性类别判断表, 分为 I、II、III、IV 类

续表 7

规范	声测管安装	一般测试程序	用仪器进行测量 (跨孔)	数据质量检查	完成测试	测量结果分析
ASTM D6760	对圆柱形深基础，通常每 0.25 ~ 0.30 m 的直径布置一个导管，最少 3 根，最多 8 根，沿圆周等距布置。但对于直径约 0.5 m 或更小的深基础，需要用波速小于深基础材料的 PVC 等材料制成的单管通道(7.1.1) 第 7.1.2 ~ 7.1.3 条就预埋管道准备和接长、第 7.2 条就管道安装和记录、第 7.3 条就钻孔通道等分别有详细的规定。如：通道的最小混凝土保护层应为 1 倍管直径	除非经批准，测试应在浇筑后的 3~7 d 内进行，具体时间取决于混凝土强度和桩径(较大直径的桩可能需要近 7 d)。如果是塑管通道，应尽快完成测试(7.4.2) 第 7.4.3 ~ 7.4.6 条分别对测试通道准备、通道记录、探头准备、设备功能检查有详细规定	第 6.4.1 条规定：脉冲的速率应至少为每个所需的深度间隔产生 1 个超声脉冲，通常为 50 mm 或以下。 第 7.5 条对跨孔声波测试有具体规定，无定量规定	第 7.7.1 ~ 7.7.3 条分别对瀑布图质量、超声剖面长度、数据的标记信息等的检查有具体规定	第 7.8.1 条：如果超声剖面显示异常，则可以通过特殊的测试程序，如扇形测试、交叉测试或其他层析技术，进一步调查可疑的异常区域。探头应放至异常下方至少 1 m 的深度，并提升至异常上方至少 1 m 的深度	第 7.9.1 条：分析结果应包括超声脉冲的首次到达时间(FAT)和相对能量(RE)随基础深度变化的关系。通常采用合适的算法来确定首波到达时间 第 7.9.4 条：任何进一步的解释都是定性的，并且可能与特定的深基础材料、施工特点和所使用的设备有关。因此，解释必须包含适当的工程判断和经验。任何完整性的评估都是由在该领域具有专业经验的工程师进行的，这超出了本测试方法的范围
欧标/ CIRIA/ICE	CIRIA Report 144 第 6.3.5 条：对直径为 600 ~ 750 mm 的桩，需安装 3 根声测管；对直径 > 750 mm 的桩，需安装 4 根声测管	CIRIA Report 144 第 6.6.4 条：与所有声学类型的测试一样，随着混凝土强度的增加，信号的传输时间预计会随着时间的推移而减少。在比较一个场地上的桩测试结果时，宜考虑到这一点 ICE B13.4 条：现浇混凝土桩试验时的龄期应达到技术规格书的规定要求。宜至少 5 d(ICE C13.4)	CIRIA Report 144 第 6.4 条：声测线间距 10 ~ 20 mm ICE B13.3 条(d)：声测线间距应不大于 25 mm	-	-	CIRIA Report 144 第 10.4, 5(c)：与低应变完整性测试一样，通常测试专家对测试结果提供解释性报告。完整的报告宜包括实测数据、数据分析和解释、结论和建议 ICEC13.2(c)：采用超声脉冲的首次到达时间(FAT)和相对能量(RE)判断异常

2.4.5 报告

《水运工程地基基础试验检测技术规程》第 6.8.22 条对声波透射法检测报告的内容有相应规定，主要提供：1) 声速-深度曲线；2) 波幅-深度曲线，并将相应判据临界值所对应的标志线绘制于同一个坐标系；3) 各检测剖面实测波列图。

ASTM D6760 第 8 节对声波透射法检测报告的内容有相应规定，主要是提供首波到达时间和相

对能量与深度关系图、瀑布图。

欧洲规范无相关规定。

2.5 热异常法

2.5.1 试验用途

目前，只有美国规范有热异常法，因此，本文不作为重点阐述，仅简要介绍，以供探讨和借鉴，见表 8。

表 8 ASTM D7949 热异常法

项目	解释说明
试验用途	第 1.1 条规定,养护混凝土引起的热剖面可用于评价深基础单元内混凝土质量的均匀性和完整性 第 5.1 条规定,通过放入通道中的热探头或沿长度分布的嵌入式热传感器的温度,可用于评估钢筋笼内外的以及笼架中心位置的混凝土的均匀性和完整性

续表 8

项目	解释说明
局限性说明	第 1.7 条:该方法不会给出缺陷的确切类型(例如,夹杂物、凸起物、蜂窝、缺少水泥颗粒等),而只是指出存在缺陷。该方法主要限于混凝土在早期养护过程中的测试
试验装置	内部检查装置(通道):方法 A(6.1):内部检查装置(通道)的公称内径应为 38~50 mm(38 mm 是首选)。 物理试验参数确定装置:配重卷尺和磁罗经(6.2.1~6.2.2) 测量仪器(6.3):方法 A:测温探头、信号传输电缆、探头测深装置、储水容器;方法 B:采用嵌入式热传感器,并应将嵌入式热传感器按 3.2.2 和 7.3.1 规定的指定测试位置
数据记录、处理和显示装置	第 6.4.1 条:记录仪器应以不大于 500 mm 的深度间隔记录来自每个测试管道或一组嵌入式热传感器的深度和温度数据 第 6.4.2 条:处理数据的设备应是一台计算机或微处理器,能够图形化地显示每个测量位置的平均温度与深度的结果
试验程序	预制通道的安装(方法 A,见 7.2.1~7.2.4)或嵌入式热传感器安装(方法 B,见 7.3.1、7.4.1~7.4.9)→仪器测量(方法 A 见 7.4.1~7.4.9;或方法 B 见 7.5.1~7.5.2)→数据质量检查(7.6.1~7.6.2)→测量结果的表示(见 7.7.1)。详见规范第 7 节
报告	见规范第 8 节

该方法适用的基础形式较为广泛,且可以检测钢筋笼外混凝土的均匀性和完整性,这对于特殊土层中(如软土、结构性土等)的灌注桩施工工艺验证是非常有用的一种方法,建议工程技术人员可根据具体情况适当采用热异常法,并积累中国经验。

3 结语

1)中、美、欧规范的主要差异主要体现在:
①只有中国规范规定了试验检测的比例并对桩的完整性进行分类;
②只有美国规范有热异常法;
③中国规范要求试验检测报告中,对桩的合格性进行判断。美国规范主要是对试验检测操作的规定,一般没有关于如何使用试验结果的规定,不用进行合格性判断。欧洲规范仅提及了完整性检测可采用的方法,暂无具体执行规范,一般均按所在地国家标准进行。

2)中国规范对试验检测方法的局限性说明较少,建议工程技术人员在使用规范条款时要加以注意,国内规范没有规定时,可以适当参考国外规范或者国内外的专业书籍。

3)中国企业在国外开展基桩工程时,工程技术人员应注意几套规范之间的差异,避免试验检测方法的误用和误判。

4)热异常法是一种新的基桩完整性检测方法,建议工程技术人员可根据具体情况适当采用,并积累中国经验。

参考文献:

[1] European Committee for Standardization. BS EN 1997-1: 2004. Eurocod 7: Geotechnical Design-Part1: General rules[S]. London: BSI, 2004.

[2] European Committee for Standardization. BS EN 1997-2: 2007. Eurocode7: Geotechnical Design-Part2: Ground investigation and testing[S]. London: BSI, 2007.

[3] European Committee for Standardization. BS EN 1536: 2010+A1. Execution of special geotechnical work-Bored piles. [S]. London: BSI, 2015.

[4] European Committee for Standardization. BS EN 12699: 2015. Execution of special geotechnical work-Displacement piles. [S]. London: BSI, 2015.

[5] European Committee for Standardization. BS EN 14199: 2015. Execution of special geotechnical work-Micropiles. [S]. London: BSI, 2015.

[6] ASTM D5882-16, Standard test method for low strain impact integrity testing of deep foundations[S]. West Conshohocken: IHS, 2016.

[7] ASTM D4945-17. Standard test method for high-strain dynamic testing of deep foundations[S]. West Conshohocken: ASMT, 2017.

[8] ASTM D6760-16. Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic crosshole testing[S]. West Conshohocken: ASMT, 2016.

[9] ASTM D7949-14. Standard test methods for thermal integrity profiling of concrete deep foundations[S]. West Conshohocken: IHS, 2014.

(下转第 215 页)