

# 深厚淤泥地区基桩低应变检测若干问题探析

王昆伟<sup>1,2</sup>, 刘江平<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 广东省珠海市金湾区建设工程质量监督检测站, 广东 珠海 519045)

**摘 要:**对桩身极浅部缺陷判断和灌注桩缺陷判断的低应变测试热点和难点, 结合深厚淤泥的地区特点和施工状况, 采用低应变法、钻芯法和开挖验证, 对大量的实测曲线和详实资料分析研究, 得出: 频率匹配好坏决定了低应变测试效果的好坏, 以及对于超长桩和大直径灌注桩采用低应变法检测意义不大等结论。

**关键词:**深厚淤泥; 预应力管桩; 极浅部缺陷; 桩身缺陷; 低应变测试

**中图分类号:** TU471.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)03-0408-08

房地产热促成了遍地开花的基建热潮, 市场需要使基桩检测技术日新月异的出现<sup>[1]</sup>, 也出现了为数不少的工程质量事故<sup>[2]</sup>. 对于南方沿海淤泥厚度达 30~40 m(桩长达 60~70 m), 桩与深基础是基础工程的主要基础形式<sup>[3]</sup>, 大量的深基坑开挖和地铁隧道等地下空间开发, 要求桩基更加精细化的设计以避免对既有桩基础的影响<sup>[4-5]</sup>, 同时基桩(坑)的施工监测、检测及测试数据处理技术方面也显得愈来愈重要<sup>[6]</sup>. 另一方面, 良莠不齐的人员水平、基础施工和质量问题的复杂性, 使该行业出现一些混乱现象和认识误区。

目前, 低应变测试法是检测桩长和桩身完整性应用最多的方法, 其理论基础是一维弹性杆纵波理论<sup>[7-8]</sup>. 本文笔者在多年实践中, 积累了丰富的经验和大量的实例, 文章采用大量的实测曲线和较少的文字, 对低应变测试中检测热点和难点进行分析, 对比了几种主要检测方法并介绍了自己经验。

## 1 基桩极浅部缺陷的检测和判别

极浅部指 1~2 倍桩径约 2 m 范围内, 由于极浅部在理论上存在一个检测的盲区, 以及极浅部地质复杂、桩头处理差、灌注桩尺寸和材料的非均匀性等原因, 基桩极浅部缺陷的检测和判别一直是部分检测人员的难点, 甚至一些工作多年的检测人员也对这个问题感到棘手, 加上现在的检测人员没有早期的工程物探人员的多解性、正反演的知识背景, 部分检测人员只是简单的依据曲线去判断, 唯曲线是之, 实际工程中就经常容易出现误判现象. 举例如下:

某冲孔灌注桩 11-63 号桩(见图 1): 上面的曲线为力棒激发信号, 为宽频冲击入射信号叠加了部分高频信息, 但高频信息的成因非唯一难判断. 需要变换高频小锤进一步甄别测试, 变化高频小锤的到的信号如下面曲线, 依据规范<sup>[9-10]</sup>判断: 可以清晰的看到浅部缺陷的位置为测试面下 1.0 m, 与力棒曲线反映的深度 1.0 m 相同, 该缺陷开挖后得到了验证。

如某机电工程厂房 2 的 15 号和 48 号桩、综合楼 59 号桩, 都是出现浅部缺陷迹象, 其中 48 号桩如图 2, 力棒曲线(上部曲线)反映极浅部有高频信息, 更换高频小锤后(中间曲线)反映出测试面下 2 m 处有缺陷, 但更浅部还隐含反射信息迹象, 在用笔者用直径 22 mm 钢筋自制的微型锤激发后, 得到下部曲线, 从曲线上可以清晰的看出极浅部 0.94 m 处还有一个缺陷, 开挖后也得到了验证. 同工地另两条桩也开挖接桩, 缺陷也得到验证, 不过综合楼 59 号桩报告提的位置与开挖相差 0.09 m. 对于浅部来说属于比较大了。

事实上, 低应变测试只要把仪器参数设置、锤击选择、桩头处理和资料分析等整个测试系统的频率

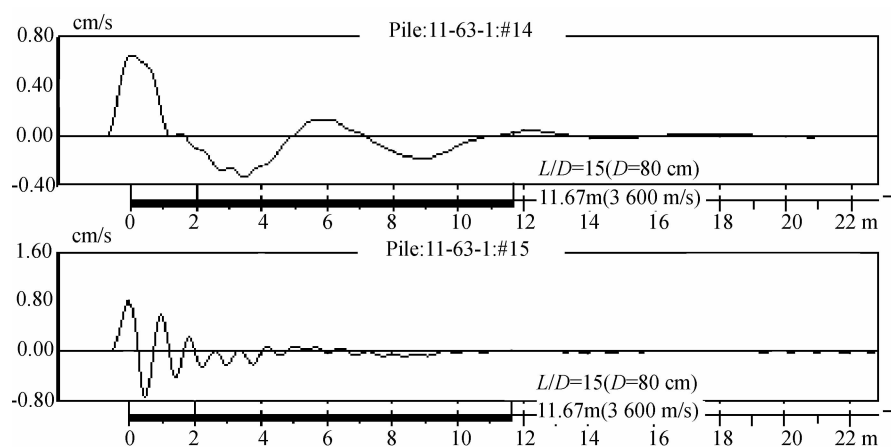


图1 11-63号桩实测曲线图

Fig. 1 The measured curve of pile 11-63

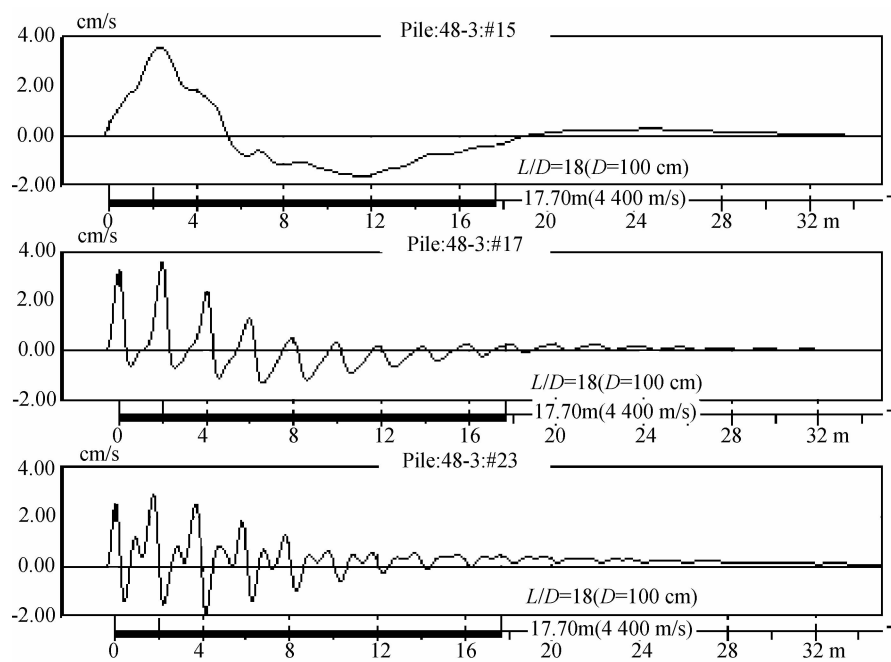


图2 48号桩实测曲线图

Fig. 2 The measured curve of pile 48

特性和频响反应匹配得好,一般情况下,都能得到信噪比高的正确的信号,得到好的测试效果.

笔者认为:低应变测试的核心和关键是频率匹配问题,匹配好坏直接决定测试效果好坏.

## 2 灌注桩曲线判断存在的问题

众所周知,由于灌注桩存在材料的非均匀性、物理尺寸的非标准性、桩径大难以严格满足一维杆件的假设、桩头测试面处理差以及桩中心串筒浇注存在的薄弱部位等原因,通常得到的低应变曲线都比较复杂,许多人员对灌注桩的判断存在不少问题,有许多似是而非的判断,篇幅关系部分选部分有特点的介绍如下.

### 2.1 高频小锤信号对灌注桩浅部缺陷的判断未必最适用

一般情况下,教科书和通常都认为高频小锤信号对浅部缺陷的判断有利,但这并非唯一,笔者认为对灌注桩应更多的依据曲线形态和曲线变化趋势,结合桩基实际来进行判断,而不能简单机械的认为高

频小锤的信号对浅部缺陷判断较准,在灌注桩大直径的情况下尤甚。

如图3的8-18号桩,检测人员按下面小锤曲线判断5 m处轻微缺陷,结合地质和灌注桩充盈系数1.6的实际,笔者认为按上面的力棒曲线判为3.8 m处扩径似乎更贴近实际和更有说服力.该缺陷在后期地下室开挖时得到了验证。

同理对于图4的14-14号桩,笔者却按下面的小锤曲线判断3.8 m处扩径而不是按上面的力棒曲线判2.5 m处缺陷,这里又采信高频小锤曲线,说明了依据曲线形态和曲线变化趋势判别的重要性.该缺陷在后期地下室开挖时得到了部分验证,不过扩径程度一般罢了。

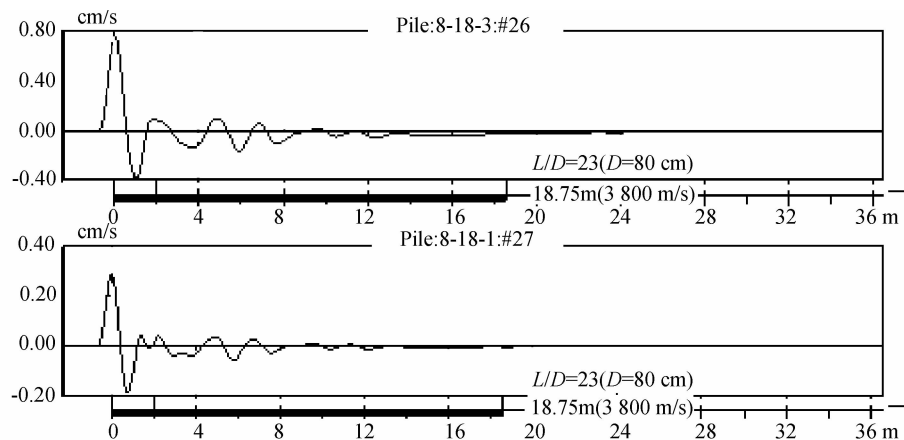


图3 8-18号桩实测曲线图

Fig. 3 The measured curve of pile 8-18

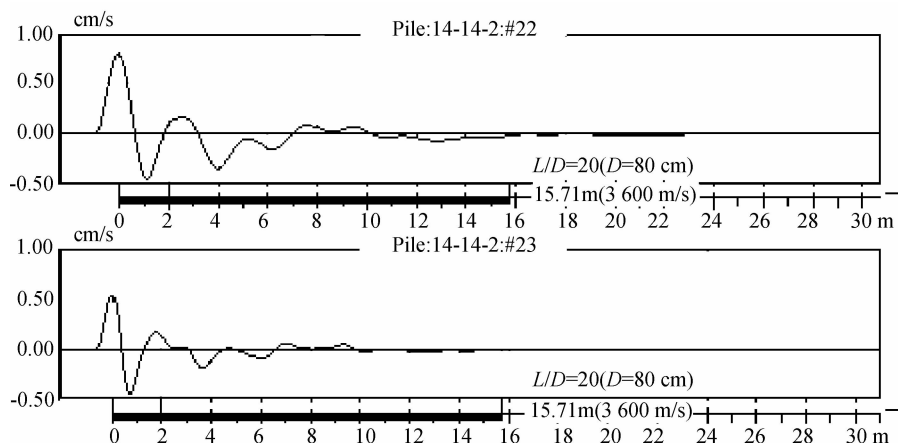


图4 14-14号桩实测曲线图

Fig. 4 The measured curve of pile 14-14

## 2.2 扩径的起跳判缺陷未必妥当,扩径的二次反射易误判缺陷

如图5的14-17号桩,检测人员判3.2 m和8.1 m缺陷,笔者认为应判为3.9 m扩径,而8.1 m应为该扩径的二次反射.遗憾的是位于基坑边没能深挖验证,经查阅(下同)该桩充盈系数1.4。

如图6的7-3号桩,检测人员判1.9 m和6.5 m缺陷,笔者认为1.9 m处这么大幅值这么浅的缺陷居然无二次反射似乎说不过去,判断很牵强,而6.5 m处应为前面3.3 m出扩径的二次反射.开挖后1.9 m并非缺陷而3.1 m就已扩径,经查阅(下同)该桩充盈系数1.4,该桩对正钻孔39号揭露3.1 m见淤泥,8.7 m见强风化砂岩(孔口高程已换算,下同)。

此处反映出检测者没能依据曲线形态和曲线变化趋势判别,同时更没有扩径的二次反射为正的 basic 概念。

同理,图7的18-60号桩的判为2.1 m和5.6 m缺陷,笔者认为5.6 m处不属缺陷应为扩径的恢

复,而该桩桩长同样报大(143条钻芯桩中,大部分桩存在报大数,最大者钻芯桩长比施工桩长短3.37m),该桩桩底为缓缓扩大的扩底桩.该桩充盈系数1.6.

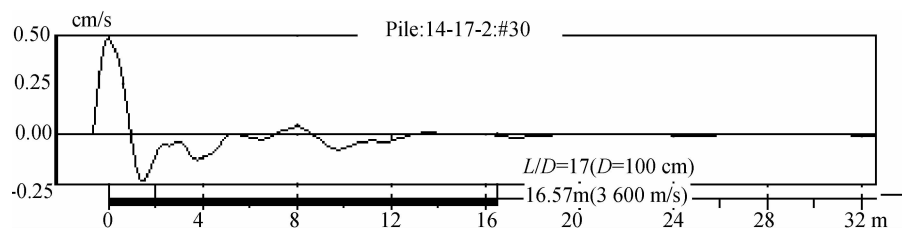


图5 14-17号桩实测曲线图

Fig. 5 The measured curve of pile 14-17

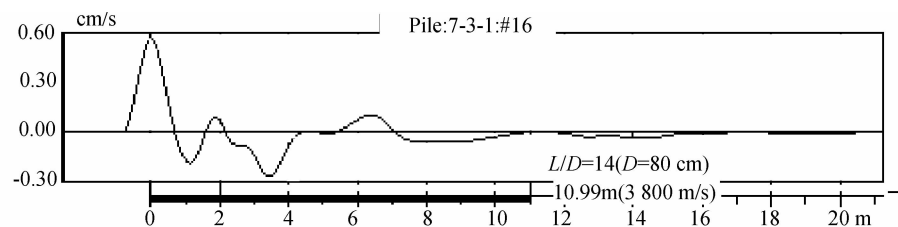


图6 7-3号桩实测曲线图

Fig. 6 The measured curve of pile 7-3

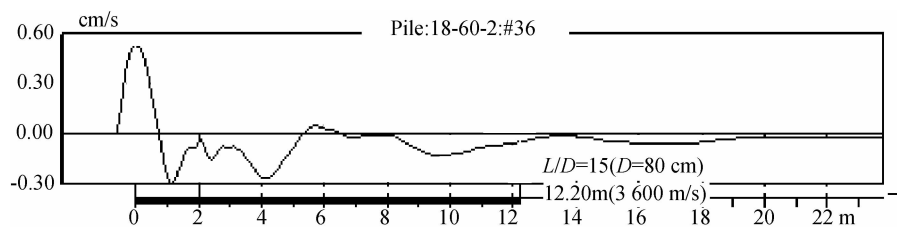


图7 18-60号桩实测曲线图

Fig. 7 The measured curve of pile 18-60

### 2.3 未按设计尺寸施工成的扩径也应定为“缺陷”桩,其常常隐含着基桩尺寸和混凝土密实度的不确定性

图8的5-67号桩,桩身除扩径外并无缺陷,桩底有部分扩大,但钻芯强度代表值为16.1 MPa远达不到C30的设计值.该桩充盈系数1.4.对正钻孔J30号揭露4.2m见淤泥,7.9m见强风化砂岩.同理5-53号桩,桩身出现两个扩径,除第一扩径前有一轻微缺陷外桩身并无其他严重缺陷,但钻芯强度代表值为21.0 MPa远达不到C30的设计值.

说明桩只出现扩径的未施工成设计尺寸的情况下,可以确定的是由于施工的不确定性常常隐含着基桩尺寸和混凝土密实度的不确定性,扩径是否也应定为“缺陷”桩呢?值得引起重视.

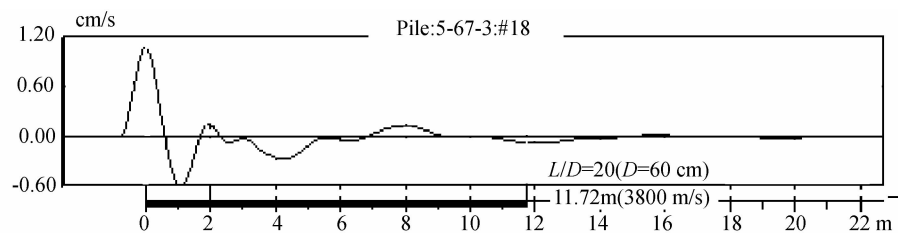


图8 5-67号桩实测曲线图

Fig. 8 The measured curve of pile 5-67

## 2.4 扩径和回复常常隐盖了缺陷的反射,使缺陷反射难分辨

图9为14-81号桩,桩身4.2 m处扩径的回复隐盖了缺陷的反射,且该缺陷出现三次反射.遗憾的是没能深挖验证,该桩充盈系数1.4.对正钻孔94号揭露2.9 m见淤泥,11.2 m见强风化砂岩.同理7-10号桩,桩身在6 m附近的扩径回复隐盖了缺陷的反射.

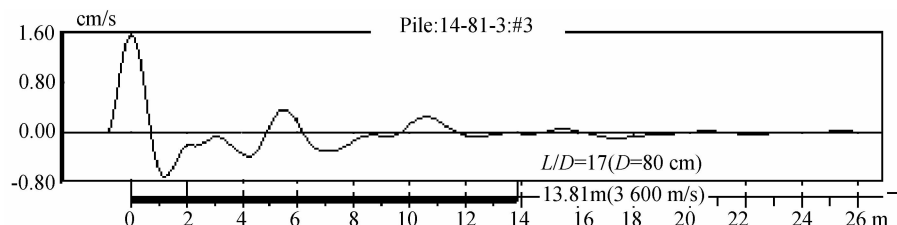


图9 14-81号桩实测曲线图

Fig. 9 The measured curve of pile 14-81

## 2.5 在桩长报大严重且无法验证的情况下,桩底反射易误判为缺陷反射,桩易判为问题桩

图10为10-2号桩,桩身12.5 m处判为明显缺陷定为三类桩,可钻芯桩长14.44 m比施工桩长短3.0 m,12.5 m处实际为桩底反射,施工方桩长报大比较厉害.同理8-65号桩的11.6 m处也应为桩底反射.这种情况很多不累述.

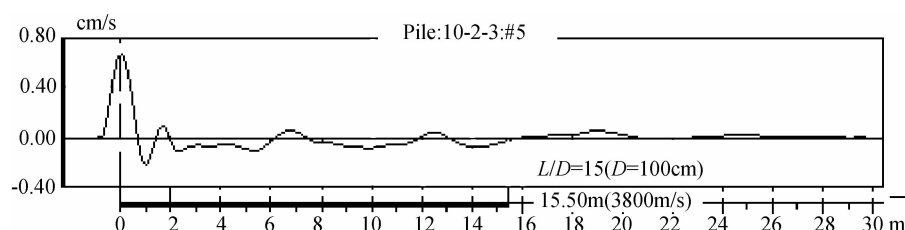


图10 10-2号桩实测曲线图

Fig. 10 The measured curve of pile 10-2

## 2.6 多个扩径和缺陷出现时,判断缺陷要慎重

图11为22-12号桩,检测人员误判2.1 m处轻微缺陷,笔者认为应该判为3.7 m和5.1 m处的小扩径形成一个大扩径,而缺陷应该判在8.8 m处出现.该桩开挖后3.4 m处开始扩大得到部分验证,该桩充盈系数1.7.

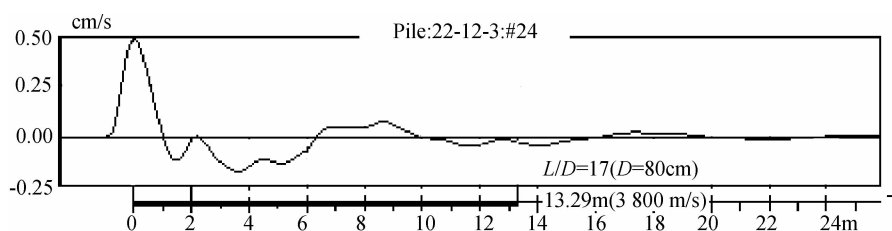


图11 22-12号桩实测曲线图

Fig. 11 The measured curve of pile 22-12

## 2.7 扩径和缺陷叠加出现时,极少数情况下能分辨出来,且扩径的二次反射易判为缺陷

图12为23-27号桩,桩身8 m处被判为缺陷,实际上8 m处应该为4 m处扩径的二次反射,而在该扩径开始扩大前的2.8 m处带一轻微缺陷.可惜未能开挖验证,该桩充盈系数1.5.

# 3 低应变法与其他方法的比较

## 3.1 低应变法与高应变法的比较

二者都可测桩身完整性,低应变对浅部缺陷较敏感,对深部缺陷和桩底沉渣难反映;低应变无法识

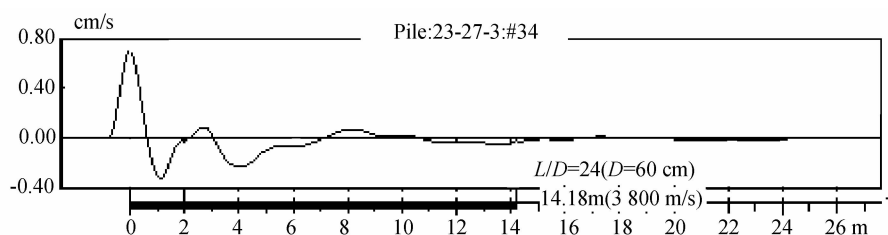


图12 23-27号桩实测曲线图

Fig. 12 The measured curve of pile 23-27

别纵向裂缝,对水平裂缝和接缝能反映但难定量;高应变和静载可以使这些裂缝闭合后继续传递竖向荷载,因此对裂缝桩是否为合格桩的判定低应变法与高应变和静载的结果不一致。

高应变具有激励能量和检测有效深度大的优点,能判明桩身水平整合型缝隙、预应力管桩接头等缺陷,并在查明这些“缺陷”是否影响桩的竖向承载力的基础上,合理判定缺陷程度,但和低应变一样对缺陷性质一般不宜判明。

高应变锤击的荷载上升时间一般不小于2 ms,因此高应变对浅部缺陷的判定存在盲区。对常用的波速3 800~4 500 m/s来说,盲区深度一般3.8~4.5 m。同时在锤击力波上升非常缓慢时还大量耦合有土阻力波的影响,因此,对高应变盲区深度范围和桩浅部缺陷的判定,宜采用低应变。

一般有以下认识:

(1)对于预应力管桩的接缝(或桩身浅部水平裂缝),由于不同能量的脉冲在接缝处的传递性状差别较大,因此高、低应变在评价预应力管桩的完整性时有时会有较大差别。

(2)由于混凝土本构关系的非线性,桩的波阻抗是应力水平的函数,桩身完好系数 $\beta$ 与试验应力水平相关。当混凝土灌注桩桩身某一截面上下的混凝土强度存在差异时,该差异值会随着应力水平的增大而增大,这就是高、低应变在判别桩身强度降低导致的缺陷时产生较大差别的本质原因。此时用接近工程桩承载极限状态的高应变试验评价桩身完整性更合理。

(3)对预应力管桩,接缝使低应变穿透性大大降低,且低应变冲击能量沿桩身衰减比高应变明显,使低应变对长摩擦桩,尤其是多节预应力管桩的中下部缺陷不敏感。另一方面,考虑到桩土刚度比,低应变最大检测深度一般30倍桩径(少数可达50倍),而对珠三角普遍桩径400~600 mm桩长40~70 m来说,一般能查明10 m多的缺陷。因此,笔者认为:

采用低应变检测超长预应力管桩完整性意义不大,条件允许时应更多的采用高应变法。

另外,笔者认为:由于高应变法对桩身有一定损伤,建议三类桩最好不要判定承载力,以避免承担不必要的风险。

### 3.2 低应变法与静载的比较

低应变法在判断桩是否合格时,并不详细考虑桩侧土和桩端土与桩的相互作用,且只能定性判断缺陷程度、对沉渣厚度和扩底桩情况无法准确判断,因此,低应变结果可能会与承载力试验(静载和高应变)结果不一致:

(1)桩身存在严重缺陷低应变判的不合格桩,如果设计承载力保守,承载力试验仍然能通过判合格桩;(2)桩身完好低应变判的合格桩,如果桩端未到持力层或持力层下有软弱夹层,承载力试验则不能通过要判不合格桩;(3)对水平裂缝桩低应变判不合格桩,但静载和高应变试验时闭合了裂缝可能判合格桩;(4)对泥皮厚的钻孔灌注桩:低应变无法反映会判合格桩,但静载承载力不够或沉降超标会判不合格;另一情形,持力层承载力够,如桩身某段强度偏低低应变可能判合格桩,而静载承载力不够会判不合格;(5)对吊脚桩和有沉渣的桩:低应变无法反映会判合格桩。

静载时最大极限荷载下,如果侧摩擦力发挥不充分端阻力未发挥沉降较小会判合格桩;如果侧摩擦力和端阻力发挥充分沉降超规范会判合格桩。

当高应变第一锤测得的桩不合格(刚好把桩底打闭合了),可能第二锤测的结果为是合格的,对此种

情况,笔者认为:报告应按第一锤的结果出结论“桩承载力达不到设计要求,应处理(复打等)”。

### 3.3 低应变法与钻芯法的比较

低应变法与钻芯法也多不一致,主要因为:(1)钻芯是桩横截面质量的局部反映,而低应变法是全断面反映桩的质量;(2)桩身混凝土强度缓慢变化或局部较低时,低应变反映不明显可能判合格,但钻芯反映强烈,依规范只要钻芯混凝土强度代表值低于设计值就可以判该桩不满足设计要求;(3)水平裂缝对二者的影响相同:低应变反映很明显可以判不合格桩,依规范钻芯对水平裂缝应判为三类桩(但笔者认为:如水平裂缝在嵌岩段,不影响水平荷载,设计验算后也可使用);(4)低应变判的桩身缺陷为缩径,对大范围渐变的蜂窝离析情况特别是当这种缺陷位于桩身中下部位时,低应变较难准确分析判断;对大直径的灌注桩,当同一桩钻三个孔时,由于行业标准不够细无法解释,所以笔者建议钻芯法采用广东省《建筑地基基础检测规范》DBJ15-60-2008。

另外,很多设计喜欢用中风化岩作持力层,而钻芯法很难取到中风化岩的芯样,因此,笔者认为:对采用中风化岩作持力层的桩钻芯法风险很大,这个风险对做不到静载和高应变的大直径桩尤甚。

## 4 低应变法的定位浅议和经验

多年工作令笔者感觉到,业界对低应变法期许太大、定位过高,殊不知低应变法有很多局限性和适宜条件,笔者认为:低应变法应作为一种快速普查、无缝隙全面检查手段,对发现问题的桩采用高应变做桩身完整性和承载力判定,同时辅于规范规定的静载试验验证,应该是一种比较可取的做法,供同行讨论。

对于超长预应力管桩和大直径灌注桩,采用低应变法检测意义不大。条件允许时,对超长预应力管桩应更多的采用高应变法,对大直径灌注桩应采用高应变法并辅于钻芯法、声波透射法。

另人欣慰的是广东省《建筑地基基础检测规范》DBJ15-60-2008已意识到这个问题,对低应变法的应用范围做了部分限制:

规范第3.3.5条第3款:“对于直径大于等于1500mm的端承型混凝土灌注桩,经工程质量各方责任主体共同确认……应进行桩身完整性检测和桩端持力层鉴别,检测方法应选择钻芯法、声波透射法、高应变法。”(无低应变法,笔者注)。

规范第3.3.6条第3款:“对本条第2款规定以外的预应力管桩工程(不做静载的,笔者注),应采用高应变法同时进行桩身完整性检测和单桩竖向抗压承载力检测……”(无低应变法,笔者注)。

笔者应用低应变法的部分经验:(1)桩不太长,认真按规范做,无缺陷反射波,测不到桩底反射波,可认为桩无太大问题;(2)桩不太长,有缺陷反射波,有桩底反射波,可定二类桩;(3)桩不太长,有缺陷反射波,反复做均测不到桩底反射波,可定三类桩;(4)曲线上,桩底有问题,持力层为微风化,可定三类桩。

总之,笔者感觉:其他情况相同的情况下,低应变看测试水平,高应变看分析水平。

## 5 结 语

(1)低应变测试的核心和关键是频率匹配问题,匹配好坏直接决定测试效果好坏;(2)笔者认为:对于超长桩( $>40$  m)和大直径灌注桩,采用低应变法检测意义不大。条件允许时,对超长预应力管桩应更多的采用高应变法,对大直径灌注桩应采用高应变法并辅于钻芯法、声波透射法;(3)笔者认为:由于高应变法对桩身有一定损伤,建议三类桩最好不要判定承载力,以避免承担不必要的风险;(4)当高应变第一锤测得的桩不合格(刚好把桩底打闭合了),可能第二锤测得的结果为合格的,对此种情况,笔者认为:报告应按第一锤的结果出结论“桩承载力达不到设计要求,应处理(复打等)”;(5)由于钻芯法很难取到中风化岩的芯样,笔者认为:对采用中风化岩作持力层的桩钻芯法风险很大,这个风险对做不到静载和高应变的大直径桩尤甚;(6)对大直径的灌注桩,当同一桩钻三个孔时,由于行业标准不够细无法解释,所以笔者建议钻芯法采用广东省《建筑地基基础检测规范》DBJ15-60-2008;(7)高频小锤信号对灌注桩浅部缺陷的判断未必最适用,在灌注桩大直径的情况下尤甚;(8)未按设计尺寸施工成的扩径也应定为“缺陷”桩,其常常隐含着基桩尺寸和混凝土密实度的不确定性;(9)在桩长报大严重且无法验证的情况

下,桩底反射易误判为缺陷反射,桩易判为问题桩。

## 参考文献 References

- [1] 王昆伟. 岩土基础工程中工程物探效果分析[J]. 岩土工程学报, 1998(5):44-49.  
WANG Kun-wei. Applications of the geophysical prospecting method on geotechnical foundation engineering. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(5):44-49.
- [2] 管延淮,王昆伟. 深厚淤泥地区基桩质量事故初析[J]. 工程质量专刊, 2007(6):38-42.  
GUAN Yan-huai, WANG Kun-wei. Preliminary analysis of deep silt foundation pile quality accident[J]. special issue of "engineering quality", 2007(6):38-42.
- [3] BOTTIAU Maurice. Recent evolutions in deep foundation technologies[C]//Proceedings of 10th International DFI Conference, Amsterdam, 2006: 46-83.
- [4] POULOS Harry G. Ground movements-A hidden source of loading on deep foundation[C]//Proceedings of 10th International DFI Conference, Amsterdam, 2006: 2-19.
- [5] KATZENBACH Rolf, BACHMANN Gregor, GUTBERLET Christian, et al. Present developments in the design of deep foundations[C]//Proceedings of 10th International DFI Conference, Amsterdam, 2006:32-43.
- [6] HOLEYMAN Alain E. Pile monitoring, testing, and data processing: New developments and remaining issues[C]//Proceedings of 10th International DFI Conference, Amsterdam, 2006: 86-100.
- [7] FINNO R J, GASMAN S L. Impulse evaluation of drilled shafts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(10): 965-975.
- [8] HEARNE T M, STOKOE K H, REESE L C. Drilled-shaft integrity by wave propagation method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 107(10): 1327-1344.
- [9] 中华人民共和国建设部. JGJ106-2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.  
The ministry of construction of the People's Republic of China. JGJ106-2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2003.
- [10] 广东省建设厅. DBJ15-60-2008 建筑地基基础检测规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.  
Guangdong Provincial Department of Construction. DBJ15-60-2008 Code for Testing of Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

## Probes into problems with pile low strain detection in deep silt zone

WANG Kun-wei, LIU Jiang-ping

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

2. Construction Quality Supervision Station of Jinwan District Zhuhai City, Zhuhai 519045, China)

**Abstract:** In view of the hot spot and difficult point about the estimate of the superficial part defect and bored concrete pile defect, and combined with the regional characteristics of deep mud and construction conditions, this article used the low strain method and drilling core method and the excavation on researching a large number of measured curve and detailed data analysis. The conclusion arrived at states that the frequency matching, determines the low strain test result. Large diameter and super-long pile piles with low strain gauge makes little sense to test results, etc. It also introduced some of our own experience.

**Key words:** deep silt; prestressed concrete pipe pile; defect in pile shaft; bored concrete pile defect; low-strain test