

含扩径桩的群桩基础竖向承载性状数值分析

王成华, 安建国

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 为探讨扩径缺陷桩对竖向荷载作用下群桩基础工作性状的影响, 建立了一个群桩基础数值分析模型。采用三维非线性有限元/无限元方法对正常桩基础及含有浅部或深部扩径缺陷桩的群桩基础进行了一系列对比分析。分析结果初步揭示了竖向荷载作用下含扩径缺陷桩的桩基础基本工作特性, 得出了扩径缺陷对群桩各桩间轴力分布及承台弯矩分布影响的基本规律性。研究成果不仅有助于认识和合理判断扩径桩的工作机制, 而且对评价有扩径缺陷的桩基承载性状、选择缺陷处理技术及桩与承台的结构设计都具有重要的实际意义。

关 键 词: 缺陷桩; 桩基础; 扩径; 数值分析; 承载性状

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Numerical analyses of vertical bearing capacity of foundations with enlarged pile group

WANG Cheng-hua, AN Jian-guo

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the defective piles with stem enlargement on the working behavior of pile foundations under vertical loadings, a numerical model was set up for the analysis of group piled foundations. A series of contrastive analyses were made to a group piled foundation including a pile with defect of stem enlargement in a shallow or a deeper depth and a pile foundation with normal piles with a three dimensional nonlinear finite-infinite element method. The basic working behavior of the pile foundation with a defective pile of stem enlargement was initially revealed by the results of the analyses; and the basic rules of the affects of pile stem enlargement defects on the distribution of axial forces among piles and the bending moments in pile caps were obtained. The results of this research are not only helpful for the understanding and rational judgment of the working mechanism, but also of practical important significance in the assessment of the bearing behavior of pile foundations including defective piles with stem enlargements and in the structural designs of piles and pile caps.

Key words: defective piles; pile foundations; stem enlargement; numerical analysis; bearing behavior

1 前 言

扩径是指在灌注桩施工中, 由于施工工艺和现场土质等因素造成的桩孔坍塌或软土受浇注混凝土侧向挤压而形成某一桩段直径扩大的现象, 如天津蓟港铁路穿越软土地区, 桥梁桩基采用的钻孔灌注桩, 桩径为 1.0 m, 而由于地质条件及施工原因造成有些桩在身浅部扩径达 1.6~4.0 m, 中深部也出现程度不同的扩径现象^[1]。扩径是一种常见的桩身质量缺陷^[2], 出现这些现象的桩称为扩径缺陷桩。

对于桩身扩径的性质和作用, 目前尚缺乏较全面和深入的认识, 甚至存在误解。误解的主要观点之一是认为桩径扩大后, 桩侧壁与土体的接触面增大, 也有观点认为扩径处相当于挤扩支盘桩^[3]的支盘, 都会使得桩的竖向承载力提高。单从扩径的尺寸效应上来讲, 扩径是有利于桩承担竖向荷载的。但是, 从土与结构物相互作用的角度来看, 一方面这种在施工过程中被动条件下造成的扩径, 与人为主动对桩孔挤扩形成的支盘是不同的, 扩径部分的混凝土材料、周边土体的扰动, 对扩径桩的承载性

状的到底有什么样的影响尚缺乏认识。另一方面,即使扩径桩对单桩承载性状是有利的^[4],但在群桩因扩径缺陷桩的承载性状与正常桩不同,扩径现象对群桩基础的荷载沉降整体性状及承台内力分布有哪些影响尚缺乏基础性研究。因此,对含有扩径缺陷桩的桩基础整体工作性状和扩径桩的桩-土相互作用机制的研究有重要的理论与实际意义。

对于扩径缺陷桩,国内外的研究较少。许少军等^[4]曾采用非线性有限单元法对断桩、缩径与扩径缺陷单桩的承载性状进行了初步的计算分析。张美娜^[5]则对扩径与缩径情况的接触单元设置于分析做了有益的探讨。王成华等^[6]对含有断桩的群桩基础进行了初步分析,探讨了断桩缺陷对群桩荷载-沉降性状。但是,在扩径缺陷桩单桩及群桩基础承载性状方面,国内外的文献还很少见,研究尚处于初步探讨阶段,还有大量的工作有待于开展。

本文在前期缺陷桩研究工作^[4-6]的基础上,采用三维非线性数值方法分析含有扩径桩的桩基础竖向承载性状及桩身与承台的内力特性。

2 数值分析方法

2.1 分析策略

为了研究扩径缺陷桩对群桩基础承载性状的影响,先进行正常桩即不含缺陷桩的桩基础的数值模拟,然后用同样的计算方法、模型和参数分别模拟含有浅部扩径桩和深部扩径桩的群桩基础。通过这些计算结果的对比,分析含有扩径桩的桩基础与正常桩基础的工作机制与性状的异同,并讨论扩径位置深度对桩基础承载性状影响的规律性。

2.2 结构模型与数值技术

计算结果为均质地基上含 4 根灌注桩的低承基础。如图 1 所示,计算规定竖向以承台底面为 ± 0.000 ,水平向以承台底面中心点为 x 向和 y 向的 ± 0.000 ,坐标系正方向遵循右手定则确定。

对竖向厚度为 30 m、长与宽各 9 m 范围内的桩基础结构、土体及承台采用有限元模拟,而水平方向上无限元采用为模拟远场^[7]。30 m 厚土层底面假定为不可变形的坚硬岩层顶面,作为竖向计算边界。

承台位于地表,其下计算域内土体假定为均质土,桩顶与承台连接方式为刚性连接;桩长 18 m,计算域内桩端下土体厚 12 m。正常桩径为 1.0 m。为方便计,规定对 4 桩编号如图 1 所示。

除正常桩基础外,对含扩径桩的桩基础,桩 P_3 为扩径桩。表 1 列出了扩径桩中扩径的位置和尺寸。

表 1 桩身扩径位置及其尺寸

Table 1 The position and dimensions of the enlargements in pile stem

桩直径 d/m	扩后桩直径 d_e/m	扩径桩段长 l_e/m	浅部扩径位置 z/m	深部扩径位置 z/m
1.0	1.9	1.0	-6~-7	-12~-13

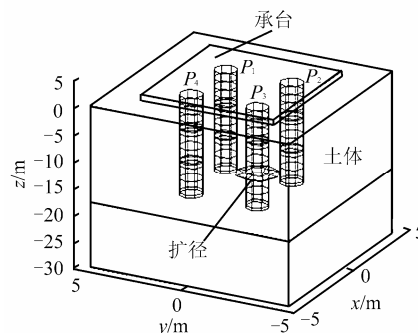


图 1 桩身有限元模型及桩的位置

Fig.1 The finite element model and the arrangement of the piles

2.3 单元类型与网格划分

有限元计算域内桩身、承台及土体的有限元计算的网格划分如图 2 所示。对桩体、土体及承台采用三维 8 节点实体单元。桩长范围内,竖向划分成 12 层单元。

桩身以 4 单元组成的八边形模拟桩的圆形截面;桩土接触界面采用 GOODMAN 单元^[7]。

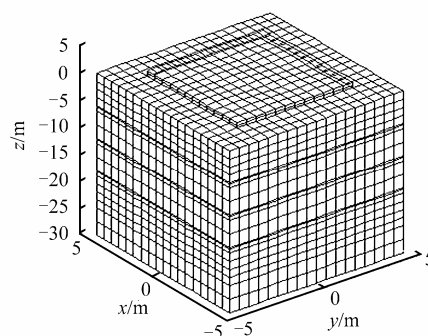


图2 承台和土体有限元模型

Fig.2 Finite element mesh for pile cap and the soil mass

2.4 材料模型及计算参数

在数值计算模型中,不考虑成桩工艺和地下水的影响。地基土为黏性土,采用 Duncan-Chang 本构模型,其主要参数见表 2。桩体与承台材料为钢筋混凝土,采用线弹性本构模型。桩型及桩身材料参数见表 3,承台尺寸及计算参数见表 4。

桩土接触面的法向刚度系数 k_n 根据计算经验取

值, 而切向刚度系数 k_s 采用弹性理想塑性模型^[8], 其刚度与强度参数见表 5。

表 2 土体 Duncan-Chang 模型参数

Table 2 Parameters of Duncan-Chang's model of soil

重度	黏聚力	摩擦角	泊松比	关系指数	破坏比	模量系数
$\gamma_s/(\text{kN/m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	ν	n	R_f	k_i
19.5	32	24.4	0.35	0.5	0.75	200

表 3 桩型及材料参数

Table 3 Parameters of material of the piles

桩径	桩间距	桩长	重度	弹性模量	泊松比
ϕ/m	S_a/m	L/m	$\gamma_s/(\text{kN/m}^3)$	E/kPa	ν
1.0	3	18	24	2.1×10^7	0.15

表 4 承台材料及相关参数

Table 4 Parameters of material of the pile cap

长	宽	厚	重度	弹性模量	泊松比
l/m	w/m	h/m	$\gamma_s/(\text{kN/m}^3)$	E/kPa	ν
6	6	1	24	2.1×10^7	0.15

表 5 桩土接触面模型参数

Table 5 Parameters of material of the pile cap

法向刚度系数	黏聚力	摩擦角	泊松比	关系指数	破坏比	模量系数
k_n	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	ν	n	R_f	k_i
1.0×10^6	16	16	0.30	1.0	0.75	100

2.5 荷载条件

在桩基承台上施加最大值为 27 MN 的竖向荷载, 共分 15 级, 每级为 1.8 MN, 均布于承台顶面。

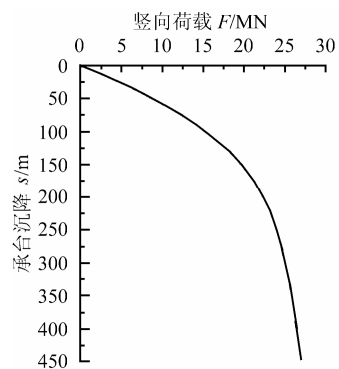
3 计算结果及分析

3.1 桩基础荷载-沉降关系

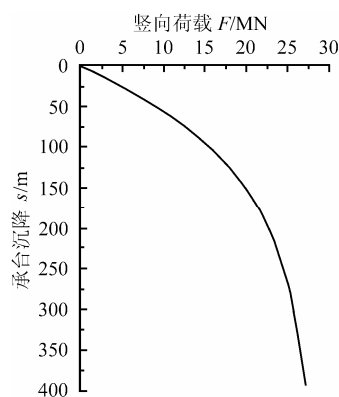
图 3 为各种情况下桩基承台顶面特征点 (4 个桩位点及承台中心点) 的荷载-沉降曲线。图 3(a) 为正常桩基础承台上 5 个特征点的荷载-沉降曲线, 图 3(b) 为桩 P_3 在浅部扩径的桩基础承台上 5 个特征点的荷载-曲线, 图 3(c) 为桩 P_3 在深部扩径的桩基础承台上 5 个特征点的荷载-沉降曲线。由图 3(b) 可见, 在浅部扩径情况下, 承台上表面五个特征点的荷载-沉降曲线几乎重合; 通过分析计算数据发现, 最终第 15 级荷载时承台中点沉降量约为 383 mm, 承台最大差异沉降不足 5 mm。

在深部扩径的情况下, 整个承台产生倾斜虽浅部扩径情况大些, 但是绝对倾斜量还是较小。由图 3(c) 能明显看出, 承台 5 个特征点的荷载-沉降曲线几乎重合, 即使在承载后期, 承台沉降量随荷载增大而迅速增加, 但承台差异沉降值的增长缓慢, 在最终 15 级荷载作用下承台总沉降为 362 mm, 而

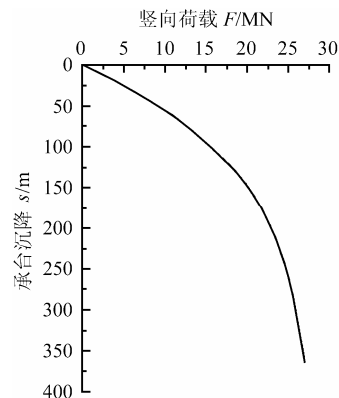
承台最大差异沉降亦在 5 mm 以内。



(a) 正常桩



(b) 含浅部缺陷桩



(c) 含深部缺陷桩

图 3 桩基础荷载与沉降关系曲线

Fig.3 The load-settlement curves of the pile foundations

图 4 中, 上下两条曲线分别为正常桩承台中心点沉降与深、浅部扩径情况承台中心点沉降之差 (简称差异沉降) 随荷载变化的关系曲线。由图可见, 当荷载未超过最大荷载 1/2 时, 两种扩径桩情况下承台的差异沉降值都很小, 不足 5 mm。其后随着荷载增加, 差异沉降增加较快。在 15 级荷载作用下浅部扩径情况的差异沉降量约为 83 mm, 深部扩径情况的差异沉降量约为 32 mm。由此可以预

测, 在承台刚度足够大的前提下群桩内出现少数扩径桩且桩身扩径出现 1/3 桩深以下范围内时, 在工作荷载作用下含扩径桩桩基础与正常桩基础的整体工作性状差别不明显。

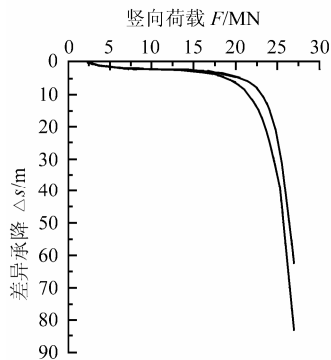


图 4 正常桩与扩径桩基础承台荷载与差异沉降曲线
Fig.4 The curves for load-settlement differences the normal piled foundation over the foundations with a pile that has an enlargement in pile stem

3.2 桩身轴力

为探讨相同荷载作用下含有扩径桩的桩基础与正常桩基础桩身轴力的分布, 图 5 为在第 2 级荷载作用下 3 种桩基础中各桩的轴力沿桩身分布情况。正常桩基础中各桩轴力的大小和轴力的分布情况几乎相同, 而含有扩径的桩基础中各桩轴力的大小和轴力的分布则有一定的差别。在各级荷载作用下, 含有扩径桩的桩基础中的桩 P_1 和桩 P_4 的轴力分布情况与正常桩基础中相应桩的轴力分布的相似, 但轴力值相对较小。

相比之下, 桩 P_2 的轴力分布也与正常桩基础中桩 P_2 的轴力分布相似, 而轴力值则较桩 P_1 与桩 P_4 较大, 而相对正常桩基础中桩 P_2 的轴力也大些。桩 P_3 的桩轴力分布情况比较特殊, 扩径以上部分的轴力值要比另外 3 根桩大。

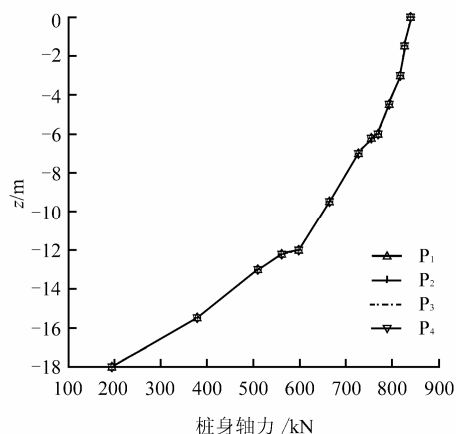
3 种情况下桩顶分担的荷载随着荷载的增大差别越来越明显。其中, 正常桩基础中桩顶荷载总值最小, 浅部扩径桩和深部扩径桩差别不是很明显, 但是都比正常桩基础的要大, 并且竖向荷载值越大, 这种现象就越明显。

桩 P_3 的轴力是 4 根桩中最大的, 并且桩身扩径位置以上的轴力大于其他 3 根桩, 而扩径位置以下的轴力大小则与另外 3 根桩没有明显的差别。

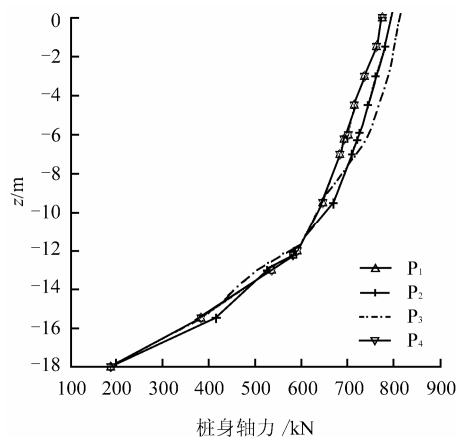
无论是浅部扩径还是深部扩径情况, 在出现扩径位置以上的轴力分布与正常桩相似, 但轴力值相对较大。在扩径位置以下轴力分布则基本上与其他桩相同。原因是扩径部位桩身混凝土在荷载的作用

下受到附近土体的摩阻力较大, 从而会出现扩径以上部分的轴力较大的现象。

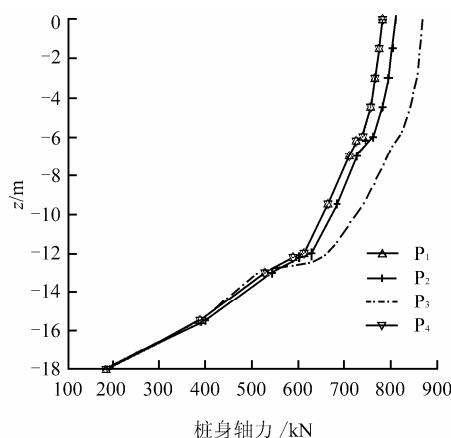
在扩径部位以下由于扩径桩与其他各桩受到的土体的反力没有明显的差别, 所以此段桩身轴力的大小及分布情况也没有出现明显的差别。



(a) 正常桩



(b) 含浅部缺陷桩

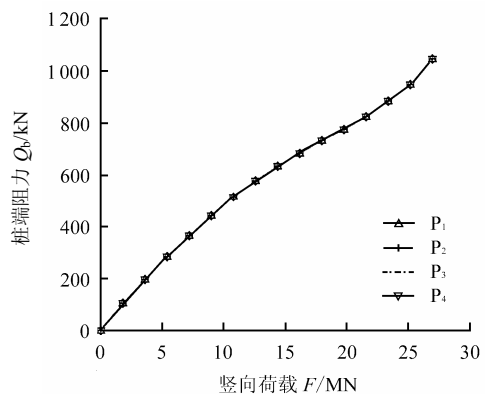


(c) 含深部缺陷桩

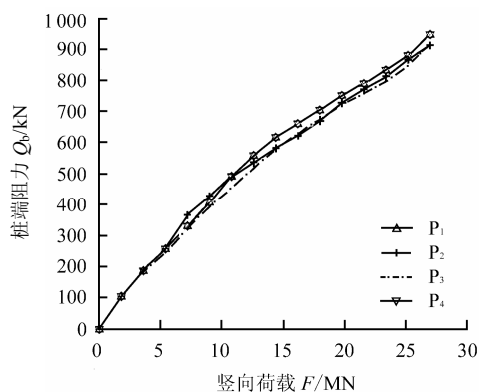
图 5 第 2 级荷载下桩基础各桩身轴力分布
Fig.5 The distribution of axial force in piles under the 2nd steps of loading on the foundations

3.3 桩端阻力

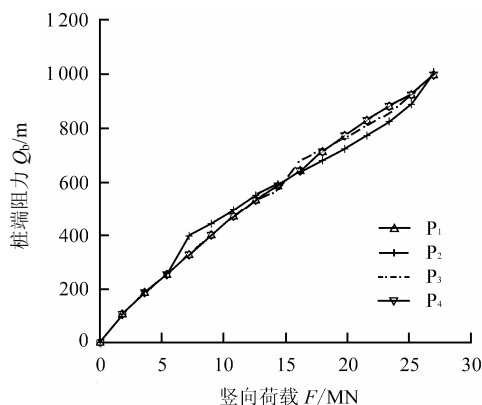
图 6 为在 15 级荷载作用下 3 种桩基础中各桩的端阻力随荷载变化。正常桩基础中各桩端阻力在各级荷载下的大小几乎相同, 含有扩径桩的桩基础中各桩端阻力在各级荷载下的大小也相差不大。



(a) 正常桩



(b) 含浅部缺陷桩



(c) 含深部缺陷桩

图 6 桩基础各桩桩端阻力随荷载变化

Fig.6 The variations of tip resistance of the piles with loadings

3 种情况下每级荷载下的桩端阻力总值, 在荷载不是很大时, 基本上相等, 随着荷载的增大, 还是有一定的差别, 其中正常桩基础中各桩的桩端阻

力总值最大, 浅部扩径桩的相对正常桩的较小, 而深部扩径桩的相对最小, 并且荷载值越大, 这种差别就越明显。

结合对桩身轴力分布情况的分析, 对于含有扩径桩的桩基础来说, 桩侧土体所分担的荷载相对正常桩基础要大, 而且随扩径位置加深而愈加明显。

3.4 承台弯矩

图 7 为浅部扩径桩基础承台在 $x=-1.5$ m 处弯矩随沿 y 坐标的分布情况。由图可见, 承台弯矩分布呈驼峰状, 即在 $y=-1.5$ m 处即在扩径桩位达到最大值 M_1 , 而在 $y=1.5$ m 处达到一个极大值 M_2 。

表 5 为在第 2、4、6、8 荷载下正常桩、浅部及深部扩径桩基 3 种承台在 $x=-1.5$ m 处弯矩峰值的对比情况。由表可见, 正常桩基础承台弯矩呈驼峰状对称分布, 两峰是对称的; 而深部缺陷桩基础承台的弯矩分布与浅部承台弯矩分布相似, 只是两峰差别稍小。

含有扩径桩的桩基础承台弯矩要比正常桩基础承台弯矩大得多, 但受扩径深度位置的影响不敏感。

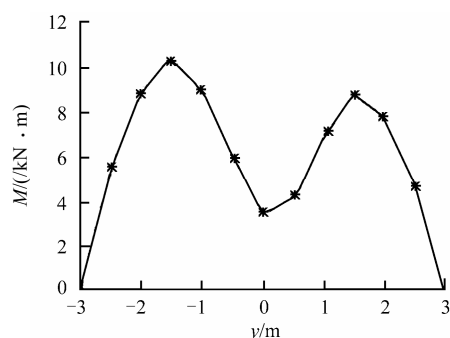


图 7 第 2 级荷载作用下浅部扩径桩基础承台弯矩分布
Fig.7 The distribution of bending moments in pile cap under the 2nd stages of loading on the foundation with a pile stem enlargement in a shallow depth

表 5 桩土接触面模型参数

Table 5 Parameters of material of the pile-soil interface

桩基类型	承台弯矩	荷载级别			
		第 2 级	第 4 级	第 6 级	第 8 级
含正常桩	$M_0/(\text{kN} \cdot \text{m})$	14.6	28.5	44.0	56.0
	$M_1/(\text{kN} \cdot \text{m})$	21.0	34.0	48.0	62.0
含浅部扩径桩	$M_2/(\text{kN} \cdot \text{m})$	13.0	30.0	46.0	60.0
	M_1/M_2	1.61	1.13	1.04	1.03
含深部扩径桩	$M_1/(\text{kN} \cdot \text{m})$	17.5	31.5	45.0	59
	$M_2/(\text{kN} \cdot \text{m})$	14.5	29.0	43.0	58
	M_1/M_2	1.20	1.09	1.05	1.02

3 种桩基后期承台弯矩在第 11~12 级荷载时达到峰值, 其后因承台下土体所分担的荷载增加相对较快, 承台弯矩值不增反降。

4 若干讨论

上述对含扩径桩的桩基础的分析实际基于一个简单概化结构模型, 与复杂的工程实际情况还有一定的差距, 所得成果还只是很初步的, 还有很多问题值得深入探讨, 在此简要讨论。

(1) 地基模型

采用均质地基模型所得出的认识不能完全代表成层土中桩基础的承载性状。扩径缺陷处于不同深度的规律性会受到软硬土层相对分别情况的影响。这一方面尚需进一步研究。

(2) 扩径特性

本文仅对一组扩径特性参数几何参数的扩径缺陷进行了模拟。实际上, 扩径缺陷的其他深度位置、扩径大小、长度范围及形状等对扩径桩及桩基础性状是有影响的。另外, 桩上的缺陷类型及数量的组合情况尚也是影响桩基础承载性状的重要因素。

(3) 桩基规模

桩基础中的基桩数量、桩长、桩径及桩间距等因素以及群桩中含有扩径桩的数量及桩位会对桩基础的荷载沉降性状、桩身及承台内力分布有影响。

(4) 成桩效应

作为初步研究, 未考虑成桩施工过程及施工工艺对土的扰动土体影响及可能存在的扩径部分桩身材料性质问题。这些问题尚有待于深入认识和研究。

(5) 研究建议

在扩径缺陷桩研究方面, 尚有不少其他值得深入研究的问题。建议通过现场实测、现场试验、室内模型试验、理论研究等深化对扩径缺陷桩的研究。

5 结 论

(1) 扩径是桩基施工中常遇到的一种桩身缺陷形式。扩径对桩承载性状的影响未必是正面的; 群桩中扩径缺陷对单桩的影响大于其对群桩的影响。

(2) 在本文数值分析的条件下, 含有扩径桩的桩基础, 在竖向工作荷载作用下不会产生明显的倾斜。竖向荷载作用下含有扩径桩的桩基础的沉降比正常桩基础的沉降值小。扩径桩对整个桩基础工作性状的影响与扩径特性有关。

(3) 含有扩径桩的桩基础中各桩轴力进行了重新分布。在扩径部位以上, 扩径桩的轴力最大, 在扩径部位以下, 扩径桩轴力的分布和相邻桩轴力分布差别不大。含扩径桩的桩基础中各桩桩顶所分担

的荷载大于正常桩基础中各桩桩顶的荷载。

(4) 含有扩径的桩基础承台的弯矩分布比正常桩基础承台弯矩分布更不均匀, 尤其扩径桩位处承台的弯矩值明显大于相应的正常桩基础情况。

上述成果不仅有助于认识和合理判断扩径桩的工作机制, 且对评价有扩径缺陷的桩基承载性状、选择缺陷处理技术及基桩与承台的结构设计都具有重要的实际意义。

参 考 文 献

- [1] 张刚. 低应变反射波法检测扩径桩问题探讨[J]. 铁道勘察, 2008, (4): 54—56.
ZHANG Gang. Discussion on testing expanded diameter piles with low strain reflection wave method[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2008, (4): 54—56.
- [2] 罗骥先. 桩基工程检测手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 史鸿林, 胡林忠, 王维雅, 等. 新型挤压分支桩的计算与试验研究[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(1): 49—54.
SHI Hong-lin, HU Lin-zhong, WANG Wei-ya. Calculation and experimental research on bearing capacity of a new type compaction pile with expanded branches[J]. *Journal of Building Structures*, 1997, 18(1): 49—54.
- [4] 许少军, 王成华. 缺陷桩荷载沉降性状的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 1999, 20(9): 72—77.
XU Shao-jun, WANG Cheng-hua. Nonlinear FEM analysis of the load transfer character of the piles with various defectiveness[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(9): 72—77.
- [5] 张美娜. 桩身缺陷对桩竖向承载性状影响的非线性有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] 王成华, 安建国. 含有缺陷桩的桩基础竖向承载性状的三维有限元分析[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(6): 90—93.
WANG Cheng-hua, AN Jiang-uo. Three dimensional finite element analyses of the behavior of pile foundation with defective piles under vertical loadings[J]. *Sichuan Building Science*, 2007, 33(6): 90—93.
- [7] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [8] DESAI C S, CHRISTIAN J T. Numerical methods in geotechnical engineering[M]. New York: Mcgraw-hill Book Company, 1977.