

不同长度单桩桩端压浆效果有限元分析

刘颖¹, 张立明², 郑刚²

(1. 天津城投建设有限公司, 天津 300050; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 近年来, 桩端压浆技术在工程中的应用非常广泛, 但桩端压浆对不同长度单桩加固效果研究较少。基于试桩实测试验验证的有限元参数, 并考虑注浆部分的加固作用, 研究了进行桩端压浆的不同长度单桩的承载性能。计算结果表明, 对于长度为 20~100 m 的单桩, 极限荷载可以提高 25%~71%。桩端压浆对短桩效果非常明显, 而对超长桩的加固效果远不及短桩, 尤其是对桩端承载力的提高作用。桩端压浆有利于桩顶荷载向桩身下部传递, 利于下部侧阻以及桩端阻力的发挥。

关键词: 超长桩; 后压浆; 有限元

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0088-07

作者简介: 刘颖(1977-), 女, 高级工程师, 从事交通枢纽、地铁、市政工程的设计和管理的工作。E-mail: angle7733@sina.com。

Finite element analysis of single piles with different lengths after grouting

LIU Ying¹, ZHANG Li-ming², ZHENG Gang²

(1. Tianjin Urban Infrastructure Investment & Construction Co., Ltd., Tianjin 300050, China; 2. Department of Civil Engineering/MOE Key Laboratory of Coast Civil Structures and Safety, Tianjin 300072, China)

Abstract: Pile tip grouting has been widely adopted in engineering in recent years. However, the improvement effect on piles with different lengths is rarely studied. Based on the parameters verified by finite element of a project in Tianjin and considering the enhancement of grouting, the bearing capacity of piles with different lengths is analyzed. The finite element analysis shows that the ultimate load raises 25%~71% for single piles with length of 20~100 m after grouting. The improvement effect of grouting is very significant for short piles, while that for super-long piles is not the same as that for short piles especially on tip resistance. Tip grouting is propitious to the load transformation to the lower part of the pile, and it is also helpful for the exerting of the tip resistance and the shaft resistance of the lower part of the pile.

Key words: super-long pile; post-grouting; finite element

0 引言

近年来, 随着我国经济发展, 超长钻孔灌注桩在高层建筑以及大跨度桥梁中应用非常广泛。但是由于钻孔灌注桩成桩工艺的缺陷, 桩端沉渣很难完全清除, 导致单桩承载力显著降低, 后压浆技术很好地解决了这个问题。

很多学者采用现场试桩试验对超长桩的后压浆效果进行研究^[1-6], 通常认为, 桩端后压浆对于消除施工造成的不利影响、提高超长桩的承载力、改善超长桩的荷载传递特性具有非常明显的效果。且后压浆不仅对桩端承载力有一定的提高, 对于桩侧阻也具有一定的强化作用。

文献[7]对黏土中压密注浆及劈裂注浆的效果进行室内试验, 分析了黏土中劈裂注浆的过程及机理,

并通过显微镜研究了注浆后土体的微观结构的变化。

文献[8]对桩端后注浆上返高度进行理论研究, 分析了注浆压力、桩埋深、桩径等因素对上返高度的影响, 并结合工程实例对理论进行验证。

文献[9](2007)采用有限元方法结合实测资料研究了后压浆对大直径超长桩承载性能的影响, 认为压浆后, 桩周土变形模量提高幅度为 33%~67%, 平均侧阻提高幅度为 30%~40%。

工程中通常在桩基础的端部进行压浆, 不仅会对桩端部起到加固作用, 浆液沿桩身上返还会对桩端附近的侧阻起到一定的强化作用。但对于短桩和超长桩

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078263); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB732106)

收稿日期: 2011-08-19

来讲, 其承载机理差别较大, 同样在桩端进行注浆对于不同长度的工程桩的加固效果也不相同。

本文采用实测验证的有限元参数, 对比压浆前后单桩的承载性状, 分析了桩端压浆改善单桩承载性状的机理, 以及桩端压浆对不同长度单桩承载性状改善的效果。

1 有限元参数验证

1.1 现场试桩资料及土层参数

天津某高层建筑基础采用钻孔灌注桩, 该工程试桩桩长 60 m, 直径 1.0 m, 桩身混凝土标号为 C30, 试桩采用慢速维持荷载法, 锚桩反力方式。该工程场地内土层分布及物理力学参数如表 1 所示。土层 1 无试验资料, 有限元模型中以土层 2 参数代替; 69.2 m 以下无试验资料, 均按土层 8 参数计算。

1.2 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 进行建模与分析, 将单桩载荷试验简化为轴对称模型, 桩土均采用轴对称实体单元。模型尺寸沿桩径方向取 30 m, 竖向长度取 2 倍桩长。桩采用四节点轴对称减缩积分单元, 土体采用四节点轴对称单元。模型几何参数见图 1。

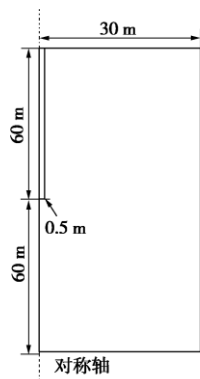


图 1 试桩模型

Fig. 1 Simplified model of test pile

有限元计算中桩采用弹性材料进行模拟, 桩身弹性模量 $E=3.0 \times 10^4$ MPa; 土体本构模型采用修正的剑桥模型。

桩、土之间的接触通过接触对实现, 采用库仑摩擦模型描述接触面之间的相互作用, 为使摩擦接触分析容易收敛以及简化分析, 桩、土接触对采用一个综合摩擦系数, 通过对载荷试验结果模拟反演得到接触面间的综合摩擦系数为 0.35。实测资料表明, 土层主要为黏土和粉质黏土的深厚软土层地区极限桩侧阻为 80 kPa 左右^[8], 有限元模型中限制极限侧摩阻力值为 80 kPa。

1.3 计算结果与实测对比

图 2 为现场单桩静载试验成果与有限元结果的对比, 图中可见二者吻合较好。说明有限元模型中所取的桩土接触面参数、土体及桩身材料参数及有限元网格划分合理, 能够较好地模拟现场试桩过程。

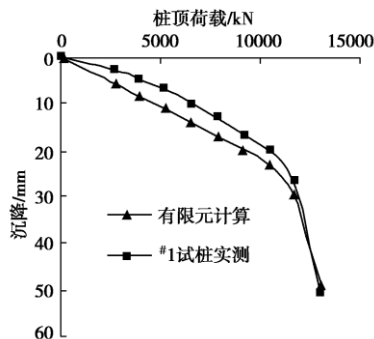


图 2 有限元计算与实测对比

Fig. 2 Results of finite element analysis and measured data

2 后压浆试桩有限元模型

2.1 后压浆效果模拟

由前人研究可知, 桩端压浆可以提高桩端和桩侧的承载力。在有限元模型中可以通过提高桩端土弹性模量模拟压浆对桩端的加固效果; 对于桩端附近浆液上返部分的桩侧阻, 可以采用提高该部分土体侧压力系数和摩擦系数的方法进行模拟, 压浆后试桩模型见图 3。

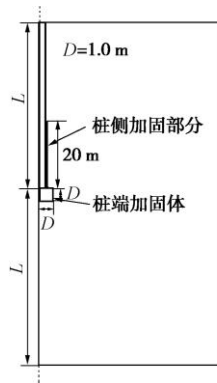


图 3 桩端压浆简化模型

Fig. 3 Simplified model of single pile after grouting

为模拟压浆对桩端的加固效果, 将桩端下高度为 D 、直径为 $2D$ 的土体采用摩尔库伦模型进行模拟。根据文献[9]有限元结果和文献[10]试验结果, 加固部分土体参数取 $E=400$ MPa, $c'=100$ kPa, $\varphi'=30^\circ$ 。

天津站后广场试桩实测资料表明, 在桩端进行压浆有效的上返高度在 20 m 左右, 压浆后极限侧阻值为 160 kPa 左右, 为简化分析本文中对不同长度的单桩上返高度均取 20 m。

根据实测资料及文献[9]结果, 本文将上返浆液部

分摩擦系数提高为 0.4，极限侧阻值取值 160 kPa。

2.2 后压浆计算模型简介

表 1 土层分布及物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers and soil distribution											
序号	土层名称	层底深度/m	$\gamma /(\text{kN m}^{-3})$	λ	κ	M	μ	e	$w/\%$	I_p	I_L
1	素填土	2.1	19.1								
2	淤泥质粉质黏土	6.2	18.7	0.089	0.013	0.43	0.34	0.9	38.8	16.9	1.13
3	粉质黏土	10	20.2	0.076	0.0064	0.46	0.30	0.8	21.2	10.2	0.67
4	淤泥质黏土	16.3	17.9	0.0792	0.0065	0.46	0.32	0.85	43.2	19.5	1.05
5	粉质黏土	24.3	20.6	0.032	0.0041	0.91	0.30	0.72	28.0	15.6	0.62
6	粉砂	51.5	20.1	0.0221	0.0035	1.21	0.28	0.62	21.3		
7	粉土	55	20.3	0.0267	0.0038	1.19	0.28	0.64	15.9	9.1	0.55
8	粉质黏土	69.2	21.1	0.0334	0.0048	0.80	0.29	0.75	23.2	14.9	0.62

基于实际工程验证的有限元参数，计算桩径为 1.0m，长度为 20~100 m（每增加 20 m 一个模型）的单桩压浆前后的载荷试验。

为避免土层分布的影响及简化计算和分析，模型中采用单一土层，土层参数选用表 1 中第 5 层粉质黏土参数，桩身材料参数及单元类型均与验证模型中相同，模型中后压浆处理按 2.1 节中参数考虑。

3 压浆后试桩结果分析

3.1 桩顶荷载 - 沉降曲线分析

图 4 为长度 20~100 m 的单桩进行桩端压浆前后的 $Q-s$ 曲线，由图中可以观察到：

（1）桩端压浆后，不同长度的单桩极限荷载均有

Fig. 4 Load-settlement curves of pile top before and after grouting 较大幅度的提高， $Q-s$ 曲线沿压浆未发生陡降曲线继续发展，随着桩顶荷载的增加沉降逐渐增加，发生陡降时桩顶荷载及桩顶沉降均较压浆前更大。

（2）压浆后极限荷载增大，同时对应的桩顶沉降也增大，对于超长桩在发生陡降前桩顶沉降值已非常大。如长度为 100 m 压浆后的单桩，陡降前桩顶沉降已经超过 100 mm。工程应用中压浆后超长桩的实际承载能力较难完全发挥。

3.2 极限荷载分析

图 5 为单桩在桩端压浆后极限荷载的提高幅度随桩长变化曲线，从图 5 可以观察到，压浆后不同长度的单桩极限荷载均有所提高，但提高的幅度随桩长的增长而减小，且基本上呈线性分布。桩长由 20 m 增长到 100 m，极限荷载提高了 25%~85%。

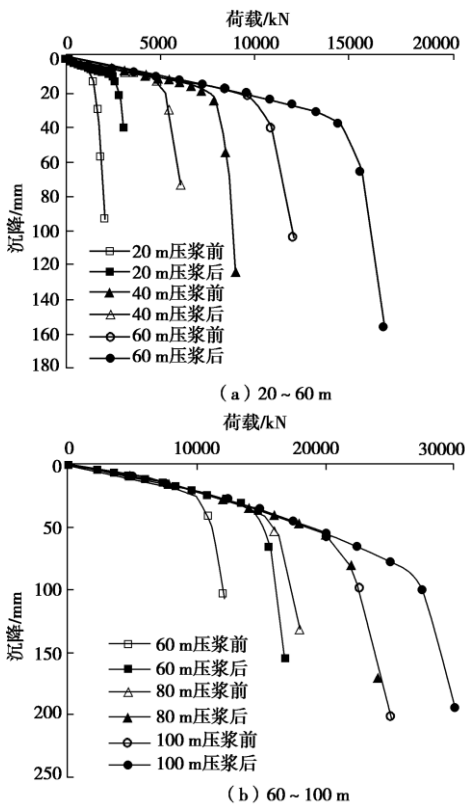


图 4 压浆前后 $Q-s$ 曲线

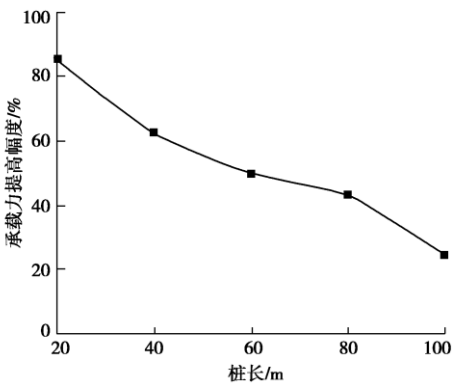


图 5 压浆后极限承载力提高

Fig. 5 Increment of bearing capacity after grouting

其原因是在桩端进行压浆，可以对桩端以及桩侧进行加固。对于短桩浆液可以覆盖到桩身的大部分范围，甚至浆液可以上返到地面，即桩身大部分范围得到加固。而对于长度较大的桩，一方面浆液只能够上返至桩端以上一部分范围，且桩越长浆液可以覆盖的范围对于整体来讲比例越小，另一方面桩越长桩端承

载力越不易发挥。所以极限荷载提高的幅度随着桩长的增长而逐渐变小。

3.3 桩端荷载 - 沉降曲线分析

图 6 为不同长度的单桩在桩端压浆前后桩端的荷载 - 沉降曲线, 从图 6 可以观察到, 桩越长 (桩端埋深越大), 桩端的承载能力越大, 但发挥较大桩端阻力的同时桩端沉降也较大。桩端压浆后, 不同长度的单桩桩端阻力均有所提高, 且压浆后的桩端荷载沉降曲线的斜率明显减小。

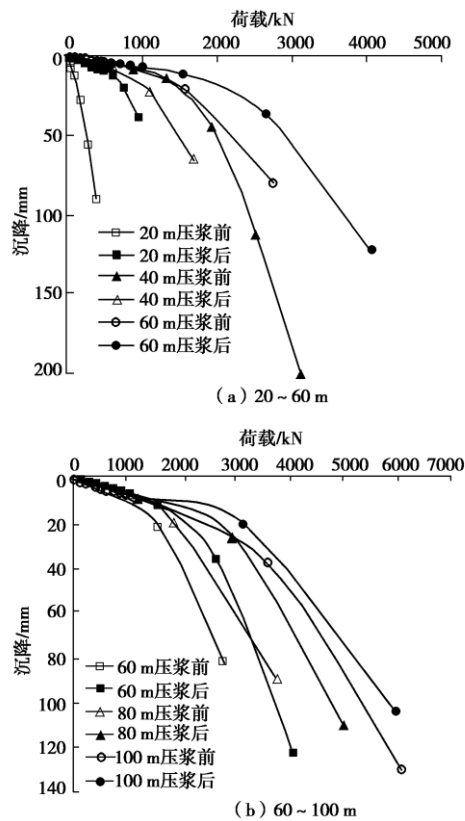


图 6 压浆前后 Q_b-s_b 曲线

Fig. 6 Load-settlement curves of pile tip before and after grouting

3.4 桩端承载力分析

图 7 为极限荷载下不同长度单桩在压浆后桩端承载力提高的幅度随桩长变化曲线。图中可见, 桩端压浆对单桩端阻力提高幅度大约为 26%~582%。桩长为

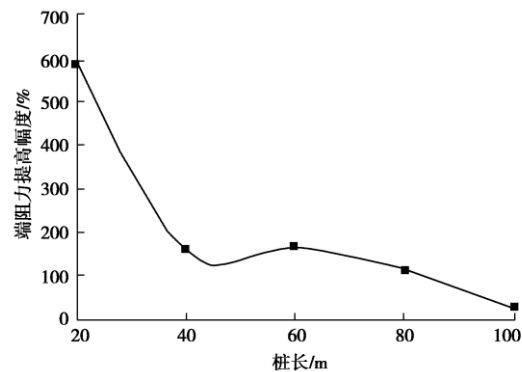


图 7 压浆后桩端承载力提高

Fig. 7 Increment of tip resistance after grouting

20 m 时桩端承载力提高了 4 倍, 而当桩长为 40 m 时提高幅度急剧减小, 之后随着桩长的增加桩端承载力提高幅度逐渐减小, 当桩长为 100 m 时, 提高幅度仅为 26% 左右。

其原因是, 一方面随着桩长的增加桩端承载能力也在增加, 压浆的加固效果不明显, 另一方面桩长增加, 桩端承载力不易充分发挥, 导致了桩越长提高幅度越小的现象。

3.5 桩侧承载力分析

图 8 为极限荷载下不同长度单桩在压浆后桩侧阻力提高的幅度随桩长变化曲线。图中可见, 桩端压浆对桩侧阻提高幅度为 25%~52%。桩长较小时, 侧阻力提高幅度较大, 当桩长为 20 m, 压浆后极限荷载下侧阻提高了 52%, 随着桩长的增加侧阻的提高幅度整体呈减小趋势, 但桩长为 80 m 前减小较慢, 而桩长为 100 m 时提高幅度大幅降低。

其原因是随着桩长的增加桩侧由于压浆而加固的部分所占整体比例减小, 侧阻提高的幅度也随之减小。

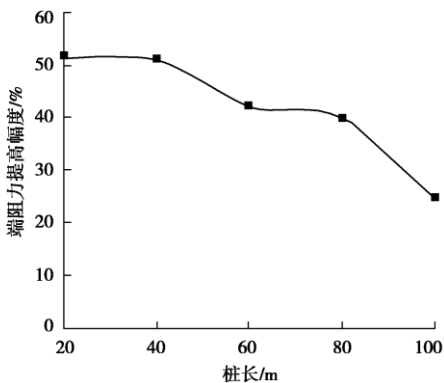


图 8 极限荷载下不同长度单桩压浆后桩侧摩阻力提高

Fig. 8 Increment of shaft resistance after grouting

3.6 轴力分布

图 9~10 为压浆前后不同长度单桩工作荷载和极限荷载下轴力归一化曲线。从图 9 和图 10 中可以观察到:

(1) 工作荷载和极限荷载下, 由短桩过渡到超长桩, 桩身轴力分布均呈现出了主要轴力承担部分由桩身下部向桩身中上部转移的现象。即短桩的轴力主要由桩身下部承担, 而超长桩轴力主要由桩身中上部承担。

(2) 对于各不同长度的单桩, 压浆后的轴力归一化曲线均较压浆前在桩身上部更陡而在桩身下部更缓, 且桩越长这种现象越明显。说明桩端压浆可以更充分地发挥单桩的承载能力, 尤其是对于超长桩, 更有利于桩身下部侧摩阻力的发挥。

(3) 在不同荷载水平下, 不同长度单桩的端阻比

均有所提高,说明桩端压浆更利于桩端阻力的发挥,更利于桩顶荷载向下传递。

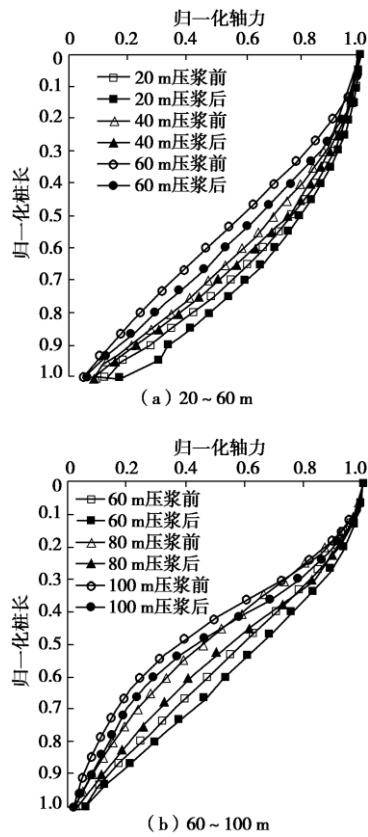


图9 工作荷载下归一化轴力

Fig. 9 Normalized axial force of piles under working load

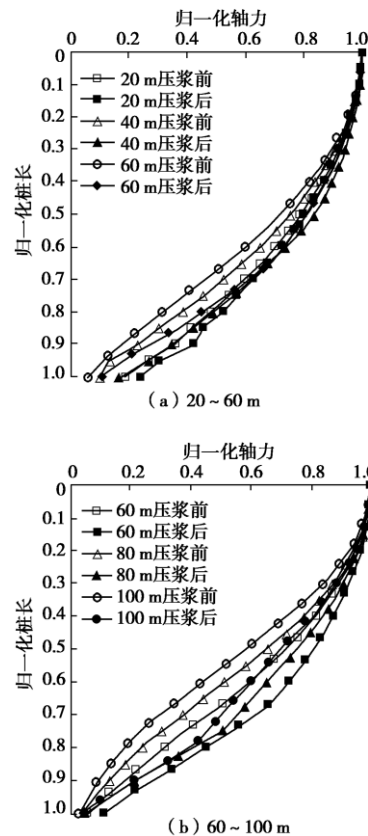


图10 极限荷载下归一化轴力

Fig. 10 Normalized axial force of piles under ultimate load

3.7 侧阻分布

图11~12为压浆前和压浆后典型短桩和超长桩的侧阻分布曲线。

图11中可以观察到,典型的短桩和典型的超长桩侧阻分布具有明显的区别。短桩在各荷载水平下侧阻均呈三角形分布;而超长桩侧阻在加载初期呈先随深度增大后随深度减小的分布形式,极限荷载下呈上部随深度增加,下部基本保持不变的分布形式。

图12为压浆后典型短桩和典型超长桩的侧阻分布曲线。图中可见压浆后短桩侧阻整体提高,但分布形式与压浆前相同,仍呈三角形分布。

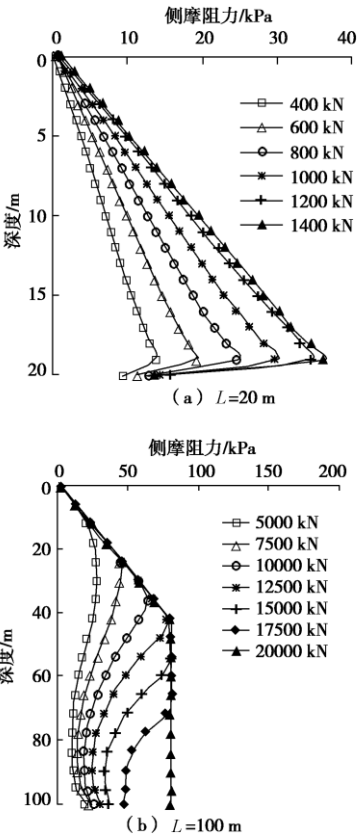


图11 压浆前侧阻分布

Fig. 11 Shaft resistance before grouting

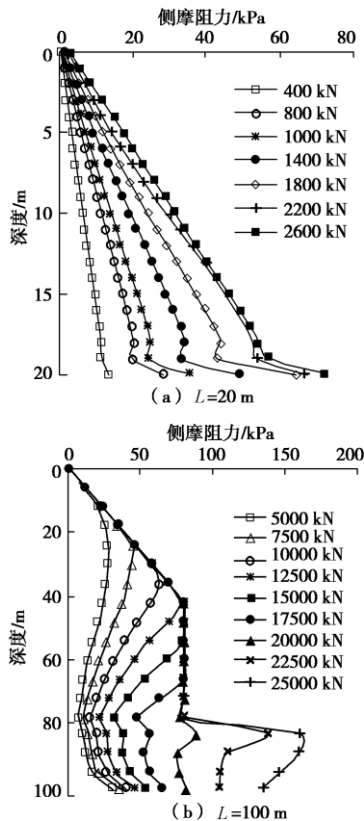


图 12 压浆后侧阻分布

Fig. 12 Shaft resistance after grouting

长度为 100 m 的超长桩在压浆后侧阻分布与压浆前有较大的区别, 加载初期桩身侧阻呈先随深度增加后随深度减小, 至注浆上返位置处, 侧阻开始随深度继续增大。当加载接近极限时, 浆液上返位置以上侧阻分布与压浆前相同, 浆液上返部分的侧阻大幅度提高。

4 结 语

本文通过实试验证的有限元模型及参数, 分析了后压浆提高单桩承载性状的机理, 并对比了不同长度单桩压浆前后承载性状, 基于本文计算条件, 得出了如下结论:

(1) 桩端压浆可以提高单桩极限荷载, 提高幅度为 25%~85%, 对于短桩效果明显, 超长桩效果较差, 且压浆后的超长桩极限荷载下会产生较大的桩顶沉降。

(2) 桩端压浆后, 桩端荷载增幅为 26%~582%, 对于短桩桩端承载力的提高幅度非常大, 但随着桩的增长提高幅度逐渐减小。桩端压浆对侧阻提高的幅度为 25%~52%, 强化效果同样是对短桩较好, 对超长桩较差。

(3) 桩端压浆更利于桩身轴向向下传递, 特别是对超长桩效果更明显, 且压浆后端阻比均比压浆前有

所提高。

(4) 桩端压浆有利于超长桩下部侧阻发挥, 侧阻分布形式与压浆前差别较大, 压浆后桩身下部侧阻大幅度提高。

参考文献:

- [1] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代, 等. 软土地基灌注桩、挤扩支盘桩和注浆桩应用效果分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 709 - 711. (ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, XIA Tang-dai, et al. Analysis on effect of grouting pile, squeezed branch pile and bottom grouting pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 709 - 711. (in Chinese))
- [2] 张忠苗, 吴世明, 包 风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 681 - 686. (ZHANG Zhong-miao, WU Shi-ming, BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 681 - 686. (in Chinese))
- [3] 张忠苗, 辛公锋. 不同持力层钻孔桩桩底后注浆应用效果分析[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 85 - 94. (ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng. The application effect analysis of post-grouting under bored piles with different bearing strata[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 85 - 94. (in Chinese))
- [4] 黄生根, 龚维明. 超长直径桩压浆后的承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 113 - 117. (HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Study on bearing behavior of super long-large diameter piles after grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 113 - 117. (in Chinese))
- [5] 戴国亮, 龚维明, 薛国亚, 等. 超长钻孔灌注桩桩端后压浆效果检测[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 849 - 852. (DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, XUE Guo-ya, et al. Effect examination for a base post-grouted overlength drilling pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 849 - 852. (in Chinese))
- [6] 戴国亮, 龚维明, 程 晔, 等. 自平衡测试技术及桩端后压浆工艺在大直径超长桩的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 690 - 694. (DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, CHEGN Ye. Application of self-balanced testing and post grouting to large diameter and super-long piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 690 - 694. (in Chinese))
- [7] 张忠苗, 邹 建, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆

- 室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1818 - 1824. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian, HE Jing-yi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1818 - 1824. (in Chinese))
- [8] 张忠苗, 邹健, 刘俊伟, 等. 桩端后注浆浆液上返高度的理论研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2535 - 2540. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian, LIU Jun-wei, et al. Theoretical study of climbing height of grout in pile-bottom base grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2535 - 2540. (in Chinese))
- [9] 黄生根, 龚维明. 大直径超长桩压浆后承载性能的试验研究及有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(2): 297 - 301. (HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Test study and finite element analysis of bearing behavior of large diameter overlength piles after grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(2): 297 - 301. (in Chinese))
- [10] 马军庆, 王有熙, 李红梅, 等. 水泥土参数的估算[J]. 建筑科学, 2009, **25**(3): 65 - 67. (MA Jun-qing, WANG You-xi, LI Hong-mei, et al. Study on the relations of cement-soil parameters with compressive strength[J]. Building Science, 2009, **25**(3): 65 - 67. (in Chinese))

(本文责编 明经平)