

后压浆钻孔灌注桩单桩竖向承载力特性研究*

胡春林¹ 李向东¹ 吴朝晖²

(¹武汉理工大学岩土与环境工程研究所 武汉 430070) (²武汉市建工质量监督站 武汉 430022)

摘要 基于72个工地186根静载试桩的统计资料,分析了桩端、桩侧压浆对钻孔灌注桩的增强加固机理,深入研究了后压浆钻孔灌注桩单桩竖向承载力特性。利用静载试桩结果,统计出后压浆桩极限承载力增幅值及极限端阻力增强系数的频数分布规律,提出了后压浆桩单桩极限承载力的实用计算公式。

关键词 钻孔灌注桩,后压浆,竖向承载力,统计分析

分类号 TU 413, TU 473.11

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)04-0546-05

1 引言

钻孔灌注桩后压浆技术是在成桩过程中,在桩底或桩侧预置压浆管路,待桩身混凝土初凝后、终凝前用高压注浆泵对桩底或桩侧注入特殊配方的浆液(水泥或其他浆液),浆液渗透到地层(或沉渣)的孔隙、裂隙中,与桩底沉渣或地层介质的颗粒混合固结,在桩底挤密桩周土,在桩侧充填桩身与桩周土体间的间隙,像树根伸入土中,达到清除泥皮对摩阻力影响的效果。

由于后压浆技术可以大幅度提高钻孔灌注桩单桩承载力,因此受到普遍欢迎。然而,由于其理论上的不完善,所以该方法仍停留在一个摸索应用阶段^[1~3]。本文分析了后压浆钻孔灌注桩桩端压浆及桩侧压浆的增强机理,对186根后压浆桩静荷载试验资料进行了统计分析,对施工经验进行了总结,对后压浆桩单桩极限承载力的提高幅度进行了评价,探讨了后压浆桩竖向承载力计算的实用方法。

2 钻孔灌注桩后压浆增强机理

2.1 桩端压浆的增强机理

(1) 桩端压浆,浆液首先充填或渗透到最疏松的桩端的残渣间隙中,与残渣胶结固化,形成了强度较高的胶结体,从而消除了桩底沉渣的影响。

(2) 随着桩端压浆压力的增加,水泥浆液充满残渣间隙后,继续充填由于在灌注桩身混凝土时因混凝土离析而形成的“虚尖”、“干渣石”等,增加了桩端混凝土的强度。

(3) 随着压浆量的增加及注浆压力的提高,水泥浆液不断地向由于受泥浆浸泡而松软的桩端持力层中渗透,水泥浆与持力层土体相胶结,在桩端形成胶结梨形体,从而增加了桩端的承压面积,提高了钻孔灌注桩的桩端承载力。

(4) 注浆压力对桩端持力层起压密的作用,提高了桩端土体的承载力,特别是由于桩端土层受到挤密预压,桩端阻力得以提前发挥出来,对应的单桩沉降量大大减小。

(5) 当桩底注浆量不断增加、注浆压力不断升高时,浆液会沿桩侧壁向上渗透,充填桩侧与桩周土体间的间隙,同时向松散的土层、孔隙较大的砂砾层、卵石层和裂隙岩层渗透胶结。对粘土及粉土层,浆液的劈裂路线呈纵横交叉的脉状网络,土体的强度得到提高。

2.2 桩侧压浆的增强机理

(1) 桩侧压浆是在钻孔灌注桩桩身(或桩侧土中)通过预先埋置的压浆管将水泥浆压入桩侧土中,浆液充填桩侧混凝土与桩周土体间的间隙,提高了桩侧混凝土与桩周土体间的粘结力,从而提高了桩侧摩阻力。

(2) 桩侧压浆可以消除孔壁泥皮对桩侧摩阻力

2000年11月6日收到初稿,2000年11月27日收到修改稿。

* 湖北省建设科技攻关(G200013, G9907)资助项目。

作者 胡春林 简介:男,1961年生,1982年毕业于武汉工业大学结构工程专业,现任武汉理工大学副教授,研究生导师,主要从事岩土工程、结构工程方面的研究与教学工作。

的影响。由于压浆是在基桩完工后3~10 d内进行的,此时泥皮性能不稳定,在压力的扰动下,不稳定的泥皮被破坏,和浆液一起形成水泥粘土浆,而后重新胶结成型,形成了抗剪强度较高、与桩身牢靠粘结的环形固体。

(3) 桩侧压浆,浆液充填了桩周土层中的孔隙,挤压密实了由于成孔时受泥浆浸泡而松软的桩周土,提高了土的抗剪强度。浆液和桩周土混合,形成了一层复合型桩身,模糊了原桩身与桩周土的界线,相当于增大了桩径,增大了桩侧摩阻力的作用面,从而提高了总侧摩阻力。

(4) 随着注浆压力的增大,浆液横向向较弱的桩周土体中渗透,起渗透劈裂作用,浆脉则象树根一样横向伸入土中,从而改善了桩土的受力状态。

(5) 桩侧压浆起挤密桩侧土体作用,使桩周土侧压力增大,这对于摩擦角较大的砂类土,抗剪强度会增大。

(6) 高压注浆可能对质量事故桩进行补强加固,浆液以充填、渗透和挤密的方式,取代事故段或缺陷部位孔隙内的水分和空气,使原来松散的部位被水泥浆胶结固结,并与完好桩身胶结形成一个整体,起到惰性充填作用和化学胶结作用。

3 钻孔灌注桩后压浆技术要点

3.1 施工工艺流程

后压浆钻孔灌注桩施工的主要工艺流程为:

- (1) 钻机成孔与清孔;
- (2) 下钢筋笼和预埋压浆管;
- (3) 为减小桩底沉渣厚度进行二次清孔;
- (4) 桩身混凝土灌注;
- (5) 待桩身混凝土养护3~10 d后压注水泥浆液。

桩底压浆管的底部可设置单向压浆阀或在出浆口包数层纱网和牛皮纸,也可将出浆口预先堵塞,压浆前用钻机钻穿出浆口。

3.2 浆液的配制

浆液一般采用水泥浆液。水泥浆的结石强度是随着水灰比的降低而提高的,但是如果水灰比过小,浆液的流动性差,既难于泵送,又不易渗透到较致密的砂层中。因此,浆液的水灰比需要根据地层条件的不同而改变。总结浆液配方试验得出结论如下:

(1) 对渗透性较强的地层(如松散的砂土及软粘土等),桩端压浆的水灰比为0.4~0.5,桩侧压浆为0.5~0.7。一般采用普硅525#水泥或425#水泥。

(2) 对渗透性较弱的地层(如较密实的砂土、卵石等),桩端压浆的水灰比为0.5~0.7,桩侧压浆为0.6~0.8。

(3) 在水泥浆液中掺加外加剂,如:FDN 5‰(或UDF23‰),NaCl 3‰~5‰,三乙醇胺0.5‰。

(4) 对渗透性很大的地层,宜在浆液中加入一定量的速凝剂及粉煤灰,对孔隙率较大的土层,可采用水泥砂浆,配合比可为水:水泥:砂=0.7:1.0:0.5,砂料粒径应视卵石粒径而定,太细易随水沿孔隙流失,太粗则易堵塞孔隙,达不到加固效果。在饱水的土层中,水泥浆的水灰比应尽量取较小值。

3.3 灌浆压力与压浆灰量

后压浆桩的灌浆压力控制是关键技术之一,决定灌浆压力的因素很多,且非常复杂。实际工程中,往往根据灌浆前的注水试验的数据和以往的施工经验确定。

(1) 对渗透性较强的砂土、软粘土,稳定灌浆压力一般控制在0.4~1.2 MPa,高时达2.0 MPa,稳压时间不少于5 min。

(2) 对渗透性较弱的密实砂土、卵石等,灌浆压力在0.5~1.8 MPa,最大压力控制在3.0 MPa左右。对深层灌浆,最大压力不超过4.0 MPa,稳压时间不小于5 min。

(3) 对较长的嵌岩桩,可采用高压桩底压浆,压力控制在4.0~6.0 MPa,当灌浆量不能满足设计要求时,压力可提高至8 MPa,稳压时间为5~8 min。

灌浆压力采用由小到大逐级增加的原则,对于上层桩侧压浆,压力取较小值,压浆节奏较慢;对于桩底压浆,压力可稍加大。

终止压浆的标准为:

- (1) 灌浆压力达到终压值;
- (2) 在终压条件下压浆灰量或浆液体积达到了设计要求;
- (3) 达到了要求的稳定压浆时间;
- (4) 地面冒浆或邻孔串浆等。

前3个条件应综合考虑缺一不可。

武汉某工程,桩径为1 000 mm,桩长为40 m,卵石持力层,其终止压浆标准为:

- (1) 终压值 ≤ 3 MPa;
- (2) 桩侧压水泥量1.5 t,桩端压水泥量2.5 t(为了确保单桩承载力的提高,压浆灰量均比设计计算值提高了20%);

(3) 若灌浆压力 > 3 MPa,压浆灰量达到上述标准的80%,则视为合格。

在已实施的压浆工程中，每根桩的压浆灰量大体为 800~5 000 kg 的水泥量。汉口地区 24 个工地的后压浆桩(桩长 25~49 m，桩径 0.7~1.0 m)的压浆灰量平均为 3 800 kg，其中桩端压浆 2 400 kg，桩侧压浆 1 400 kg。对于单桩承载力增幅要求较大的情形，应根据现场压浆试验适当增加压浆灰量。

3.4 桩端持力层的选择

后压浆钻孔灌注桩的桩端持力层一般应选择渗透性较强的地层中，渗透性较强的砾石(砂)、卵石层、碎石土层、中粗砂层是最理想的桩端持力层。当桩的设计承载力不够大时，也可选择渗透性较强的细砂层作为桩端持力层。对于桩端持力层为强风化岩、粉(砂)质粘土层的情形，采用后压浆也能起到一定的加固作用。

在选择桩端持力层时，要特别注意下卧软弱层。如果存在下卧软弱层，需要进行固结沉降验算。

4 试验研究与统计分析

对 186 根后压浆桩的静载试验资料进行归纳总结和统计分析，选择有代表性的典型情形讨论如下。

4.1 静载试验确定单桩承载力

汉口同一根试桩压浆前后的 Q-S 曲线如图 1 所示。该试桩长为 48 m，桩径为 800 mm，桩端持力层为中粗砂。未压浆前进行了第一次静载试验，单桩竖向极限承载力为 7 200 kN。实施桩底、桩侧后压浆(压入水泥灰量 3.5 t)后，第二次静载试验(与第一次试验间隔了 43 d)测得后压浆桩极限承载力为 12 000 kN，比未压浆桩提高幅值达到 66.6%。可见，后压浆技术明显地提高了单桩承载力。

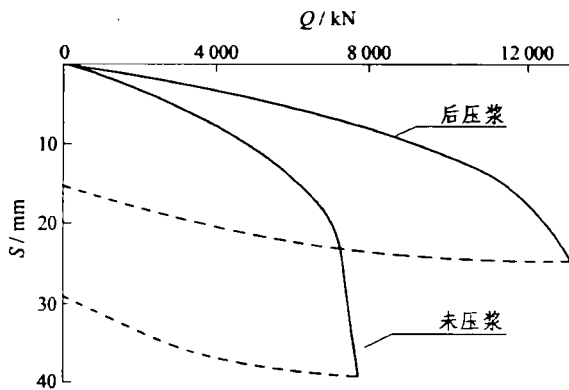


图 1 同一根桩压浆前后静载 Q-S 曲线
Fig. 1 Q-S curves of the same pile before and after grouting

4.2 桩的侧摩阻力与端阻力分布

汉口某试桩桩长 49 m，桩径 800 mm。场地主要土层自上而下分别为：粘性土(厚 10.0m)；粉土粉砂(厚 15.0 m)；粉细砂(厚 15.0 m)；中粗砂(桩进入该层 9.0 m)。在试桩的典型截面埋设钢弦式钢筋应力计及钢弦式压力盒，直接测定桩端阻力和桩侧摩阻力的分布规律。未压浆前进行静载试验，测定的桩极限侧摩阻力和桩极限端阻力分布如图 2 中划线条的阴影所示。图 2 中划网格的阴影部分是实施桩底、桩侧后压浆后，实测的后压浆桩极限侧阻、端阻增量分布曲线。桩底压浆 2.0 t，极限端阻力由 2.0 MPa 增加到 6.3 MPa，是未压浆桩的 3.15 倍。桩侧压浆孔主要布置在粉细砂层，压浆 1.6 t，粉细砂层的极限侧阻力由 60 kPa 增加到 120 kPa，是未压浆桩的 2.0 倍。粉砂层的极限侧阻力由 50 kPa 增加到 100 kPa。粘土层离压浆孔较远，侧阻增加不大。

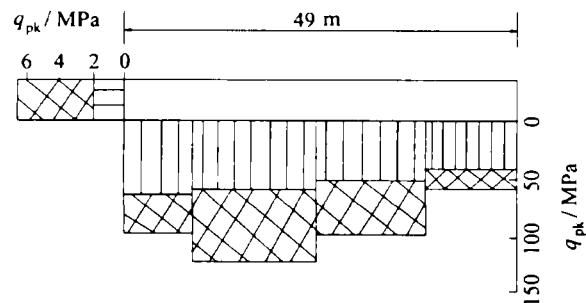


图 2 某后压浆桩侧阻、端阻增量分布曲线
Fig. 2 Strengthening distribution curves of q_{sk} and q_{pk} of a postgrouting pile

4.3 桩侧摩阻力与桩周土之间的相对位移

实测结果表明，在极限荷载下，虽然从整体上看，桩侧摩阻力得到了发挥，并达到最大值即总极限桩侧阻力，但并非所有土层的桩侧摩阻力均能得到充分发挥。某一土层的桩侧摩阻力的发挥值不仅与土的性质有关，而且与土层的分布深度有关。将桩顶沉降量减去桩顶到某土层之间桩段的弹性压缩量，得到该土层桩土间的相对位移 S_r 。由图 3 可见，深 10 m 内的第 I 层粘土，当相对位移为 12 mm 时，摩阻力达到最大，继续加载后，摩阻力反而减小。深 10~25 m 的粉砂(第 II 层)和深 25~40 m 的粉细砂(第 III 层)，在极限荷载下，桩侧摩阻力能得到充分发挥。深 40~49 m 的第 IV 层中粗砂，在极限荷载下，相对位移只有 11 mm，摩阻力显然未得到充分发挥。

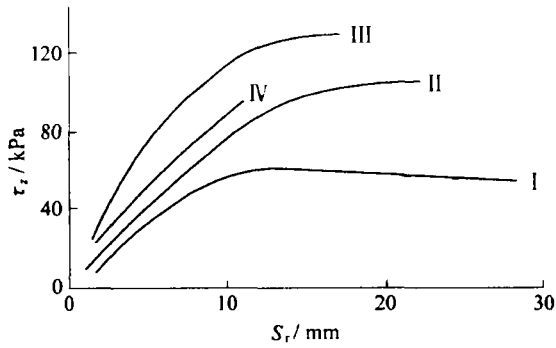


图3 桩土间相对位移与侧摩阻力的关系曲线
Fig.3 Relationship between lateral resistance and relative displacement

4.4 桩端阻力与桩端位移

由图4可见,对中粗砂持力层的后压浆桩,当桩端位移接近3mm时,桩端阻力就迅速提高,这是因为后压浆对桩底土层渗透固结,桩端土受挤密预压,使桩端阻力得以提前充分发挥出来。

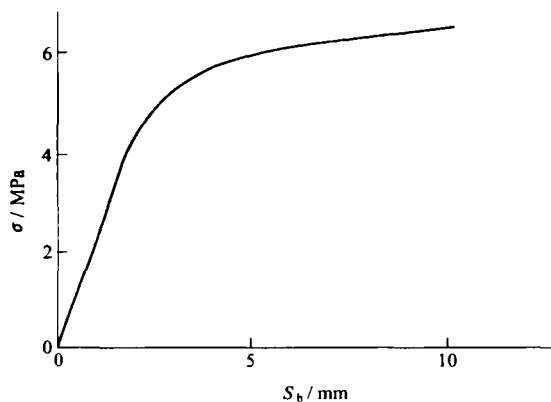


图4 桩端阻力与桩端位移的关系曲线
Fig.4 Relationship between resistance and displacement at pile end

4.5 后压浆单桩极限承载力提高幅度

后压浆桩单桩极限承载力增幅 β 定义为

$$\beta = (Q'_{uk} - Q_{uk}) / Q_{uk} \quad (1)$$

式中: Q_{uk} 为未压浆桩单桩竖向极限承载力标准值(kN); Q'_{uk} 为后压浆桩单桩竖向极限承载力标准值(kN)。

对186根后压浆桩的随机变量 β 进行概率统计分析,式(1)中的 Q'_{uk} 值全部由静载试验方法确定。 Q_{uk} 的确定有下列3种情况:(1)有12根桩是在未压浆前进行了静载试验;(2)有43根桩是根据同一桩型(桩长、桩径相同)、同一施工工艺、在同一场地的其他试桩结果确定;(3)其余是根据桩型、地质资料及施工工艺,由国家规范^[4]中的方法计算确定的。

分析可知, β 值为0~150%。把 β 值的范围分成15个小区间,取区间长度 $\Delta\beta = 10\%$, 求出组中值,画出186根后压浆桩极限承载力增幅值的频数分布图如图5所示。 β 值基本上符合正态分布规律,经计算, β 的平均值 $\bar{\beta} = 62.43\%$, 均方差 $S_{\beta} = 26.46\%$, 变异系数 $C_{\beta} = 0.42$ 。

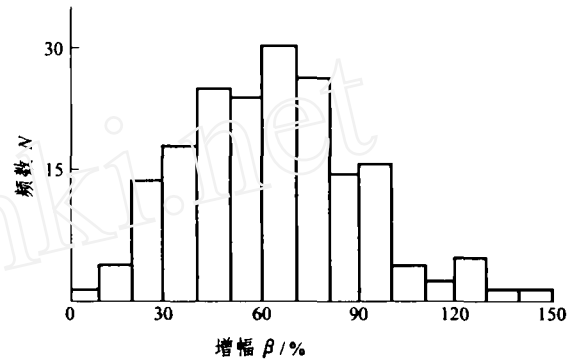


图5 186根后压浆桩 β 值的频数分布图
Fig.5 Frequency distribution curves of β for 186 postgrouting piles

根据数理统计中的抽样估计的原理和使工程偏于安全的原则,在后压浆桩设计中,可取如下值作为 β 值的控制指标:

$$[\beta] = \bar{\beta} - t_0 S_{\beta} / \sqrt{n} \quad (2)$$

式中:桩总数 n 为186;当给定置信率后, t_0 可从标准正态分布表中查得。若取 $t_0 = 4$, 则 $[\beta] = 54.67\%$ 。换言之,为了有足够的可靠度以保证桩基工程的安全,对后压浆桩单桩承载力增幅的期望值可为54.67%。

后压浆桩在容许荷载下所对应的沉降量为0.9~17.0mm,平均值 $\bar{S}_a = 6.20$ mm,均方差 $S_s = 2.45$,变异系数 $C_s = 0.39$, S_a 值的控制指标 $[S_a] = 5.48$ mm。在依据静载试验 $Q-S$ 曲线确定单桩容许承载力后,建议校核该容许承载力所对应的沉降量是否小于5.48mm;若是,则偏于安全。

4.6 后压浆桩的极限端阻力增强系数

后压浆桩的极限端阻力增强系数定义为

$$\zeta_p = Q'_{pk} / Q_{pk} \quad (3)$$

式中: Q_{pk} 为未压浆桩的总极限端阻力标准值(kN); Q'_{pk} 为后压浆桩的总极限端阻力标准值(kN)。按类似于上节的统计方法得到186根后压浆桩极限端阻力增强系数的频数分布图如图6所示。经计算, ζ_p 的平均值 $\bar{\zeta}_p = 3.21$, 均方差 $S_{\zeta} = 0.79$, 变异系数 $C_{\zeta} = 0.25$, ζ_p 取值的控制指标 $[\zeta_p] = 2.98$ 。

侧压浆第 i 段桩的极限侧阻力增强系数定义为

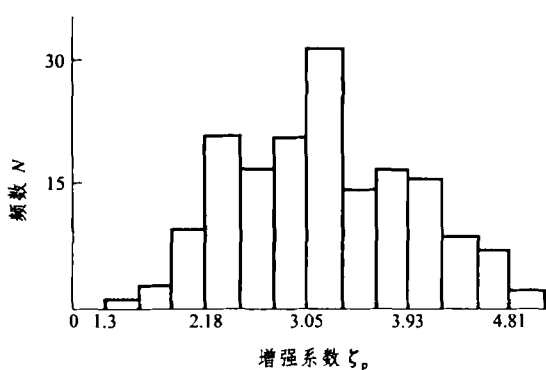


图 6 186 根后压浆桩 ζ_p 的频数分布图

Fig. 6 Frequency distribution curves of ζ_p for 186 postgrouting piles

$$\zeta_{si} = Q'_{sik} / Q_{sik} \quad (4)$$

式中: Q_{sik} 为第 i 段未压浆桩总极限侧阻力标准值 (kN); Q'_{sik} 为第 i 段后压浆桩总极限侧阻力标准值 (kN)。统计分析可知, ζ_{si} 为 1.3~2.2。汉口地区的侧压浆段主要位于细砂、中砂层, ζ_{si} 值多分布在 1.5 和 1.9 之间。

4.7 后压浆桩竖向极限承载力的计算

建议后压浆桩竖向极限承载力 Q'_{uk} 计算公式为

$$Q'_{uk} = \lambda_m (u \sum_{i=1}^n \zeta_{si} q_{sik} l_i + \zeta_p q_{pk} A_p) \quad (5)$$

式中: u 为桩身周长; l_i 为桩穿越第 i 层土的厚度; A_p 为未压浆桩的桩端面积; q_{sik} 为未压浆桩桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值; q_{pk} 为未压浆桩极限端阻力标准值, 在无当地经验值时, q_{sik} 和 q_{pk} 可按文[4]表 5.2.8-1 和表 5.2.8-2 取值; λ_m 为实际压浆灰量与合理压浆灰量之比, 且 $\lambda_m \leq 1$ 。 ζ_{si} 及 ζ_p 应根据工程地质勘察报告、当地同类工程经验及静载试桩统计

分析资料等加以确定。表 1 列出了汉口地区 ζ_{si} 及 ζ_p 的建议值。

表 1 汉口地区后压浆桩的侧阻力增强系数 ζ_{si} 和端阻力增强系数 ζ_p 的建议值

Table 1 Suggested parameters for lateral and end resistances of postgrouting bored piles in Hankou area

土类型	ζ_{si}	ζ_p	土类型	ζ_{si}	ζ_p
淤泥质土	1.1~1.2		中砂	1.6~1.9	2.0~2.8
粘性土	1.2~1.5	1.2~1.7	细砂、砾砂	1.7~2.2	2.2~2.9
粉土	1.3~1.5	1.4~1.8	砾石、卵石	1.7~2.2	2.2~3.0
粉细砂	1.5~1.9	1.8~2.5			

5 结 论

(1) 后压浆钻孔灌注桩的施工工艺简单、可靠性好、单桩承载力增幅大, 值得大力推广。

(2) 统计分析结果表明, 当实际压浆灰量达到了合理压浆灰量时, 后压浆钻孔灌注桩单桩极限承载力增幅 β 达到 54.67% 的可能性很大。

(3) 后压浆单桩极限承载力宜根据静载试验和由式(5)来综合分析确定。表 1 给出的建议值, 对其他地区的同类工程也有较大的参考价值。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 胡春林, 赵 勤. 钻孔灌注桩后压浆增强机理分析[J]. 武汉大学学报, 1999, 21(增): 72~74
- 3 龚维明, 吕志涛. 桩底压浆灌注桩[J]. 工业建筑, 1996, 26(3): 32~37
- 4 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范(JGJ 94-94)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995

STUDY OF VERTICAL BEARING CAPACITY FOR POSTGROUTING BORED PILE

Hu Chunlin¹, Li Xiangdong¹, Wu Zhaohui²

(¹ Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China)

(² Wuhan Constructional Engineering Quality Supervision Centre, Wuhan 430022 China)

Abstract Based on the statistical data from the static load tests for 186 piles in 72 construction sites, the reinforcement mechanism of bored piles by postgrouting at pile end and pile lateral is analyzed, and the characteristics of vertical bearing capacity of postgrouting bored pile are studied. By using the static load testing results, the frequency distribution curves of the increased value of limiting bearing capacity and the strengthening parameters of the limiting end resistance of piles are obtained. At last, a practical formula is proposed to calculate the vertical limiting bearing capacity of this kind of piles.

Key words bored pile, postgrouting, bearing capacity, statistical analysis