超大厚度黄土地区钻孔灌注桩承载力与沉降研究

邓美林[1]， 王晋伟[2]， 杨 鑫[2]， 彭新新[2]， 薛凯丽[1]
（1. 山西大学土木工程系，030013，太原；2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心，730050，兰州）

摘 要：通过对庆阳某超高层建筑 6 根钻孔灌注桩进行大吨位静载试验，对比分析 6 根长短灌注桩的承载力与沉降性能，结果表明设计混凝土灌注桩竖向抗压极限承载力不大于 14 000 kN 时，与短桩相比，长桩对提高承载力、减少沉降的效果不明显，从而体现了试桩的重要性；在预估桩身沉降计算中，存在一个引起桩端土体压缩的临界荷载，只有当加载大于临界荷载时才需考虑桩端土体的压缩；采用简化方法计算桩身压缩量反推出长桩和短桩的综合系数分别为 0.48 和 0.46，故规范推荐的系数 0.5 偏大。

关键词：超大厚度黄土地区；灌注桩；极限承载力；桩身沉降
中图分类号：TU 528.572 **文献标志码**：A **文章编号**：1000–4726(2019)02–0132–04

EXPERIMENTAL STUDY ON BEARING CAPACITY AND SETTLEMENT OF BORED PILES IN LARGE THICKNESS LOESS REGION

DENG Mei-lin[1], WANG Jin-wei[2], YANG Xin[2], PENG Xin-xin[2], XUE Kai-li[1]
(1.Department of Civil Engineering Shanxi University, 030013, Taiyuan, China; 2.Northwest Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, University of Technology, 730050, Lanzhou, China)

Abstract: Through the large tonnage static load tests of the 6 bored piles of a super high-rise buildings in Qingyang area, comparing the results of the bearing capacity and settlement performance of the six long piles and short piles, the results shows that the effect is not obvious to improve the bearing capacity and reduce settlement through increasing the pile length, when the vertical compressive ultimate bearing capacity is less than 14 000 kN, so test pile is very important; In the process of calculating the settlement of pile body, the compression of pile endpoint soil should be considered only when the load is greater than the critical load; the composite coefficient of long pile and short pile were 0.48 and 0.46 by using simplified methods for calculating the pile body compression, so the standardized coefficient 0.5 is larger.

Keywords: large thickness of loess region; bored piles; ultimate bearing capacity; settlement of pile body

我国分布着大面积黄土，其地域性导致工程性质差异较大。甘肃省庆阳市属我国黄土分区的Ⅱ区（陇东－陕北－晋西地区），位于黄土高原－董志塬上。董志塬由地壳裂变挤压隆起和黄土移动堆积形成，距今已有 200 多万年，该地原黄土层厚可达 200~300 m，湿陷性黄土层厚一般为 10~15 m，其下土层主要为 Q2 离石黄土，地下水位埋深一般超过 60 m[1]。

近年来，在我国不同地区、不同地质情况下，对灌注桩的现场试验研究很多，黄土地区灌注桩的研究也得到了一些进展。费鸿庆等[2]通过对黄土地基中超长钻孔灌注桩竖向承载力静载试验，探讨高层结构黄土地基中超长钻孔灌注桩的承载性状，得出了桩身轴力传递规律和侧阻力发挥受施工质量影响较大的结论；冯世进等[3]对西安黄土地区 6 根大直径超长钻孔灌注桩进行单桩静载试验，认为桩端阻力和桩侧阻力并非同时发挥作用；朱彦鹏、黄雪峰等[4,5]也均对此进行研究，但对庆阳大厚度黄土层上桩基性能研究却非常匮乏，朱彦鹏等[6]虽对当地超大厚度黄土场地进行了单桩承载力试验，但预先开挖的地基深度仅为 10 m，且荷载最大仅 8 000 kN，并未进行大吨位下的研究。

本文依托庆阳市某超高层建筑进行大吨位下钻孔灌注桩静载试验，得到较完整的数据，对比分析 6 根长短灌注桩的承载力与沉降性能，并解决了试桩过程中的难点，可供该地后续超高层建筑设计与施工参考。

1 地质概况

拟建大楼位于庆阳市西峰区，总建筑面积 66 821.2 m^2，采用框架－核心筒结构，钻孔灌注桩设计单桩承载力特征值为 10 000 kN。主楼地下 4 层，地上 38 层，总高 164 m，地下室底板埋深 21.1 m。

本工程地处陕甘宁盆地南部，地势较平坦，地层分布较简单，地貌单元属典型陇东黄土塬侵蚀地貌，该区黄土总厚度可达 150 m，湿陷性黄土层厚 10~15 m，基底以下黄土不具湿陷性，地下水位埋深 62.5~63.2 m，且为赋存于午城黄土层上部的上层滞水。

收稿日期：2018–11–26
基金项目：甘肃省建设科技攻关基金项目（JK2014-34）
作者简介：邓美林（1986—），女，山西繁峙人，讲师，e-mail：545109361@qq.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　竖向静载试验

2.1　试桩难点及解决方案

施工单位在 ±0.000 以下 15 m 开始采用旋挖钻机成孔，在完成长 42 m 的锚桩后进行第 1 根试桩（55 m）钻孔，钻至地下 60 m 时钻进较困难，揭露该层地基土含较多“姜石”（钙质结核，对应于地勘 19 层，属午城黄土 3 段），厚 2~4 m，钻至地下 63 m 后含水量突增，地基土逐渐饱和，钻至地下 68 m（孔深 53 m）后，因孔内涌淤现象严重停止钻进，终孔 8 h 后桩孔深度 48.2 m，塌孔严重。

经论证后调整试桩桩长（表 1）。调整后长桩桩底位于 19 层粉质粘土（午城黄土 3 段），短桩桩底位于 16 层粉质粘土（古土壤 8 段）。考虑到当地缺水且基坑较深，坑内积水较多不利于安全，同时考虑湿作业钻进不利于发挥上部土层侧摩阻力，决定采用干作业钻孔。

表 1　试桩桩长调整

阶段		试桩桩长 /m		数量
		钻孔深度（钻探工作面地下 15 m）	载荷试验有效桩长（试验工作面地下 17.5 m）	
S1 S2 S3	原方案	55	52.5	3
	调整后	46	43.5	3
S4 S5 S6	原方案	45	42.5	3
	调整后	39	36.5	3

2.2　试桩参数及方案

静载试验采用锚桩 – 横梁反力装置，共 6 根试桩，12 根锚桩，设计参数见表 2，单桩竖向静载试验平面如图 1 所示，加载方式为慢速维持荷载法，按现行规范 [7]，每级荷载施加后，5, 10, 15（min）各测读 1 次，之后每 15 min 测读 1 次，累计 1 h 后每 0.5 h 读 1 次，记录桩顶沉降及相关数据。

表 2　试锚桩设计参数

类型	编号	试验有效桩长 /m	相对于筏形基底以下桩长 /m	配筋
长试桩	S1~S3	43.5	40	上部 25m：32 ⌀ 32； 下部 15m：16 ⌀ 32
短试桩	S4~S6	36.5	33	上部 25m：32 ⌀ 32； 下部 11.5m：16 ⌀ 32
锚桩	M1~M12	42.0	—	上部 28m：26 ⌀ 32； 下部 14m：13 ⌀ 32

注：桩径均为 10.0 m，混凝土强度等级均为 C45。

试验前对 6 根试桩进行低应变、成孔和声波检测，结果表明孔径、孔深、垂直度及孔底沉渣厚度等相关指标均满足规范要求。6 根试桩混凝土纵波波速介于 3 056~4 000 m/s 之间，12 根锚桩混凝土纵波波速介于 3 000~4 000 m/s 之间，试锚桩均为 Ⅰ 类桩。

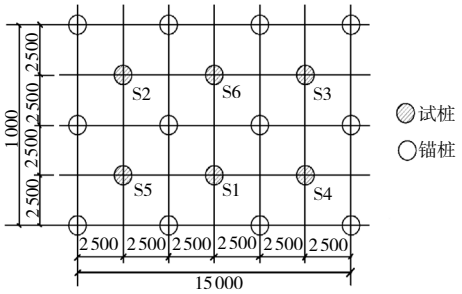

图 1　单桩竖向静载试验平面示意

3　竖向静载试验结果分析

3.1　荷载沉降分析

对 6 根试桩进行单桩竖向抗压承载力试验，*Q-s* 曲线如图 2 所示。

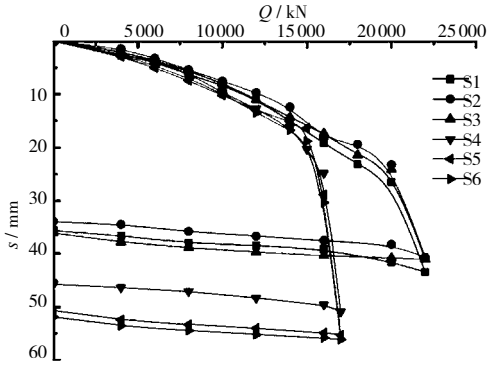

图 2　单桩竖向静载试验的 *Q-s* 曲线

由图 2 可知：试桩 S1~S6 最大加载荷载依次为 22 000, 22 000, 22 000, 17 000, 17 000, 17 000（kN）；桩顶最大沉降依次为 43.48, 40.68, 41.06, 50.91, 55.28, 56.16（mm）；卸载后回弹量依次为 7.84, 6.78, 4.96, 5.12, 4.58, 5.24（mm）；回弹率依次为 18.0%, 16.6%, 12.1%, 10.0%, 8.3%, 7.5%，所有桩均由于沉降过大而停止加载。分析 *Q-s* 曲线的斜率变化，验证了试桩桩体竖向刚度 K_O（$K_O=Q/s$）与桩顶位移成反比的结论 [8]。加载小于某一荷载时，试桩 S1~S6 的 *Q-s* 曲线走势呈缓变形态，承载性能相对稳定，沉降量也非常小；而超过某一荷载后沉降突然增大，曲线出现明显拐点。黄明聪等 [9] 认为应以控制最大沉降来确定桩的极限承载力。冯世进等 [3] 提出综合考虑 *Q-s* 曲线、*s*-lgt 曲线及桩顶沉降来确定极限承载力。本试验依据规范 [10]：对陡降型 *Q-s* 曲线，取其发生明显陡降的起始点所对应的荷载值。因此，长桩 S1, S2, S3 竖向抗压极限承载力为 20 000 kN，短桩 S4, S5, S6 为 14 000 kN。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加载小于 14 000 kN 时，6 根试桩的 *Q-s* 曲线变化差别不大，曲线走势均呈缓变形态且基本相同，所以该地区建造类似工况下的建筑，设计混凝土灌注桩竖向抗压极限承载力不大于 14 000 kN 时可参考本研究，且可看出此时与短桩相比，长桩对提高承载力、减少沉降的效果不显著，故建议施工前进行试桩，在保证质量的前提下减小桩长，以节约投资。加载大于 14 000 kN 后，长桩 S1~S3 和短桩 S4~S6 的曲线走势相离越来越远，直至均发生明显拐点，且极限承载力长桩高于短桩。

3.2 桩身压缩分析

简化方法是我国预估单桩沉降普遍采用的方法，该法认为单桩的沉降可分为桩本身的弹性压缩 S_s 和桩端下土体的压缩 S_b（桩侧摩阻力向下传递和桩端荷载引起）。该法给出了桩身压缩量的计算表达式：

$$S_s = N\frac{PL}{E_c A} \qquad (1)$$

式中：S_s 为桩身压缩量（mm）；P 为桩顶荷载（kN）；L 为桩长（m）；E_c 为桩材料的弹性模量（Pa）；A 为桩的横截面积（m^2）；N 为综合系数（打入桩 N=2/3，钻孔灌注桩 N=1/2，柱桩 N=1）。

采用式（1）计算试桩的桩身压缩量时，为避免桩身混凝土弹性模量直接按规范查表造成的误差，采用文献 [11] 的公式直接计算，计算表达式为：

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7 / f_{cu,k}} \qquad (2)$$

试桩混凝土强度等级为 C45，由式（2）得到混凝土弹性模量为 3.36×10^4 Pa，不同加载条件下试桩计算桩身压缩量与桩顶沉降的关系如图 3 所示，试桩计算桩身压缩量见表 3,4。

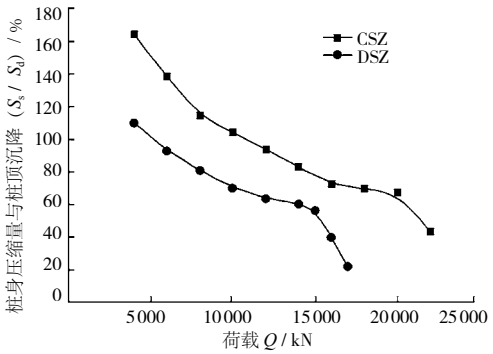

图 3 不同加载条件下计算桩身压缩量与桩顶沉降曲线

由表 3 可知，当长桩荷载不大于 10 000 kN 时，$S_s/S_d > 1$，说明试桩沉降由桩身压缩引起，不必考虑桩端沉降（即由桩端土体压缩导致的桩身沉降）。此时结合实测试桩沉降值和式（1）反推得

表 3 长试桩 CSZ 的桩身压缩量

桩型	荷载 /kN	计算桩身压缩量 S_s /mm	S1,S2,S3 桩顶沉降平均值 S_d /mm	S_s/S_d / %
长桩 CSZ L=43.5m A=0.7854m^2	4 000	3.30	2.01	164
	6 000	4.95	3.58	138
	8 000	6.59	5.78	114
	10 000	8.24	7.90	104
	12 000	9.89	10.55	93.7
	14 000	11.5	13.89	82.8
	16 000	13.2	18.28	72.2
	18 000	14.8	21.33	69.4
	20 000	16.5	24.64	67.0
	22 000	18.1	41.74	43.4

表 4 短试桩 DSZ 的桩身压缩量

桩型	荷载 /kN	计算桩身压缩量 S_s /mm	S4,S5,S6 桩顶沉降平均值 S_d /mm	S_s/S_d /%
短桩 DSZ L=36.5m A=0.7854m^2	4 000	2.77	2.51	110
	6 000	4.15	4.48	92.6
	8 000	5.53	6.85	80.7
	10 000	6.92	9.91	69.8
	12 000	8.30	13.04	63.6
	14 000	9.68	16.04	60.3
	15 000	10.4	18.51	56.2
	16 000	11.1	28.05	39.6
	17 000	11.8	54.12	21.8

到综合系数为 0.48，说明小荷载下简化方法中规范推荐的系数 0.5 偏大。当荷载不小于 10 000 kN 时，$S_s/S_d < 1$，说明随荷载增大，桩侧摩阻力和桩端荷载引起桩端土体压缩，导致桩端沉降，故采用简化方法预估单桩沉降时，小荷载下只需考虑桩身压缩量，且式（1）中系数需适当减少；大荷载下不能只计算桩身压缩量，而应计入桩端土体的压缩。表 4 说明短桩也有相同的规律，加载小于 4 000 kN 时试桩沉降由桩自身压缩引起，反推综合系数为 0.46，超过 4 000 kN 时桩顶沉降就需考虑桩端土体的压缩。综上所述，长短桩均存在一个临界荷载，加载小于该临界荷载时，桩顶沉降主要由桩自身压缩引起；加载超过该临界荷载时，桩端土开始逐渐被压实，预估单桩沉降时就需考虑桩端土体的压缩。

由图 3 可知，随荷载增加桩身压缩量占桩顶沉降的比例越来越小，即桩端沉降逐渐增加直至加载结束。曲线走势可分为先陡后平缓最后又变陡 3 段。第一阶段主要是由于按简化方法计算桩身压缩量时采用的综合系数偏大造成 $S_s/S_d > 1$；第二阶段主要是加载力较小时桩顶荷载主要由桩侧阻力承担，桩端阻力发挥作用较小，桩顶沉降主要由桩身压缩引起；第三阶段中随荷载增加，桩端阻力发挥的作用逐渐增大，桩身压

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

独立基础采用刚性桩复合地基的受力研究

王世岐
（建设综合勘察研究设计院有限公司，100007，北京）

摘 要：独立基础在建筑工程中应用广泛，是一种比较简单的基础形式，但当地基土承载力不足，设计人员采用刚性桩地基进行处理后，对独立基础的补充受力计算却很少进行对比，对比通过实际案例的计算和分析提出采用刚性桩地基进行处理，并强调对独立基础进行补充设计计算的重要性。

关键词：独立基础；刚性桩；复合地基
中图分类号：TU 311 **文献标志码**：A **文章编号**：1000–4726(2019)02–0135–03

FORCE STUDY ON INDEPENDENT BASE WITH RIGID PILE COMPOSITE FOUNDATION

WANG Shi-qi
(CIGIS (China) Limited, 100007, Beijing, China)

Abstract: Independent base is a relatively simple foundation form and is comprehensively used in building projects. However, designers rarely make comparison about the supplement force calculation of independent base after the independent base is treated by using rigid pile foundation. Through comparison and analysis of practical cases, this paper proposed to use rigid pile foundation to treat the independent base and empasized the importance of the supplement design calculation of independent base.

Keywords: independent base; rigid pile; composite foundation

随着建筑规模逐渐加大，刚性桩复合地基的应用也越来越广泛。一般基础形式设计往往先由结构工程师完成，再对地基条件提出承载力、沉降及差异沉降等要求；而地基处理方案则由岩土工程师制订，若满足对地基的要求就认定完成任务。但不同的地基处理方案确定后应对基础是否会产生不利影响或是否进行

收稿日期：2018–11–26
作者简介：王世岐（1975—），男，黑龙江哈尔滨人，高级工程师，e-mail：1413890399@qq.com.

缩虽依旧增加，但占桩顶沉降的比例逐渐减小，最终由于桩端沉降突然增大而停止加载。其原因是成孔质量的影响，由于成孔时间较长导致桩侧土产生松弛效应或由于施工等因素桩底沉渣厚度大。所以成孔质量对灌注桩的工程性能影响很大。

4 结论

（1）在庆阳大厚度黄土地区地质条件下，超长钻孔灌注桩具有较高的承载力，其沉降均匀且沉降量小，是超高层建筑基础的首选。（2）在该地区建造类似工况的建筑，设计混凝土灌注桩竖向抗压极限承载力不大于 14 000 kN 时与短桩（36.5 m）相比，采用长桩（43.5 m）提高承载力、减少沉降的效果不显著，故建议施工前进行试桩，在保证工程质量的前提下减少桩长，以节约投资。（3）结合实测桩顶沉降值和本文式（1）反推得出综合系数为长桩 0.48，短桩 0.46，故目前综合系数规范建议的系数 0.5 偏大。（4）预估单桩沉降时存在一个是否需考虑桩端土体压缩的临界荷载，当荷载小于临界荷载时单桩沉降主要由桩身压缩引起，否则需考虑桩端土体压缩。（5）比较分析桩顶沉降数据，可看出随荷载增加桩身压缩量占桩顶沉降的比例越来越小，引起桩顶突降的主要原因是桩端土体的压缩，故施工时应特别重视成孔质量和桩孔孔底沉渣的清理检测。

参考文献

[1] 工程地质手册 [M]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,2007.
[2] 费鸿庆 , 王燕 . 黄土地基中超长钻孔灌注桩工程性状研究 [J]. 岩土工程学报 ,2000,22(5):576–580.
[3] 冯世进 , 柯瀚 , 陈云敏 , 等 . 黄土地基中超长钻孔灌注桩承载性状试验研究 [J]. 岩土工程学报 ,2004, 26(1):110–114.
[4] 朱彦鹏 , 赵天时 , 陈长流 . 桩基负摩阻力沿桩长变化的实验研究 [J]. 岩土力学 ,2013, 34(S1):265–272.
[5] 黄雪峰 , 陈正汉 , 哈双 , 等 . 大厚度自重湿陷性黄土中灌注承载性状与负摩阻力的试验研究 [J]. 岩土工程学报 ,2007,29(3): 338–346.
[6] 朱彦鹏 , 董芸秀 , 包泽学 , 等 . 超大厚度 Q2 黄土场地单桩承载力试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2014,33(S2):4375–4383.
[7] 建筑地基基础设计规范 :GB 50007—2011[S].
[8] 潘石声 , 侯学渊 . 桩的刚度计算 [J]. 岩土工程学报 ,1996,18(1): 1–6.
[9] 黄明聪 , 龚晓南 , 赵善锐 . 钻孔灌注长桩试验曲线型式及破坏机制探讨 [J]. 铁道学报 ,1998,20(4): 94–98.
[10] 建筑基桩检测技术规范 :JGJ 106—2014[S].
[11] 混凝土结构设计规范 :GB 50010—2010[S].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net