

公路桥梁钻孔灌注桩组合压浆设计与应用

刘世臣

(山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘要:桩基组合压浆是在桩端桩侧注入高压力水泥浆,通过浆液在土体中渗透、劈裂等作用,有效消除传统钻孔灌注桩桩底沉渣及桩身泥皮等固有缺陷,并强化桩端及桩侧土体强度,从而提高桩基承载力及减小桩基沉降。该文采用有限元软件对组合压浆桩基和不压浆桩基进行数值分析,对比组合压浆对桩基承载力及沉降的影响,并以JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》对桩基压浆技术参数规定为设计指导,分析确定设计采用的桩端桩侧摩阻力增强系数及理论压浆量等参数,进行组合压浆设计。采用组合压浆桩基试验对设计成果进行试验验证,保证设计的可靠性,研究成果可为公路桥梁采用组合压浆设计与应用提供参考。

关键词:桩基组合压浆; 桩基承载力; 桩基沉降; 数值分析; 试验验证

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

钻孔灌注桩具有施工工艺成熟、施工周期短、对地层扰动较小的优点,在土建工程中应用广泛。但钻孔灌注桩也存在一些固有缺陷,例如在施工中采用的泥浆护壁工艺会产生桩身泥皮及桩底沉渣,降低了桩基承载力,影响了桩基稳定性^[1]。

祝经成,刘金励等研发了桩端桩侧压浆专利技术^[2-3],有效消除了钻孔灌注桩的固有缺陷,该专利技术于1998年通过部级鉴定,2005年被交通部列为建筑业10项新技术中的第一项。桩基压浆技术适用范围广,施工操作便捷,作用效果显著,在工程中得到了广泛采用。经过实践证明,钻孔灌注桩组合压浆技术可以大幅提高桩基承载力,从而降低桩基规模,节约桩基成本25%~40%,并可使桩基沉降均匀,桩基沉降量减小30%左右,保证桩基质量^[4-5]。

该文依托山东省董家口至梁山高速公路滞洪区兼京杭运河特大桥,桩基础均为钻孔灌注桩,所处地基土质均匀,多为粉土、粉砂等颗粒土类,组合压浆技术对此类土体强度提升效果显著。由于该桥梁桩基规模巨大,采用组合压浆技术可大幅缩减桩基长度,产生较大的经济效益,并可以降低桩基沉降量,保证桩基质量。JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》对桩基压浆技术的桩端桩侧摩阻力增强系数给出了取值范围,并对浆液水灰比、压浆压力、压浆量等参数作出了规定,桥梁设计根据工程实际情况,对规范中规定参数进行合理取用,并采用组合压浆桩基试验对设计成

果进行验证,以保证设计的可靠性。

1 钻孔灌注桩组合压浆作用机理

钻孔灌注桩组合压浆作用机理有浆液的固结挤密、劈裂加筋、扩底扩径及化学胶结等作用^[6]。图1为桩端桩侧压浆效果示意图。

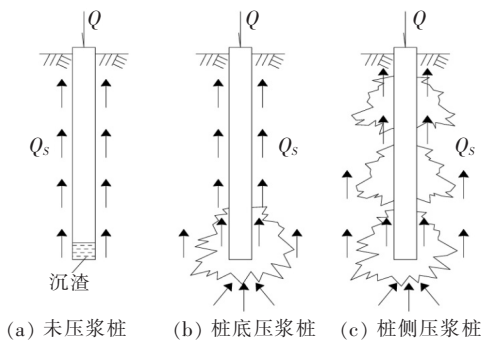


图1 桩端桩侧压浆效果示意图

(1) 固结挤密作用是通过浆液进入桩侧土体,增加了土体密度,并且固结成为具有一定强度的结石体,从而增大桩侧摩阻力。

(2) 劈裂加筋作用是通过浆液在桩侧土中形成网状结石,增加了桩周土的抗剪强度,从而增大桩侧摩阻力。

(3) 扩底扩径作用是由于桩周被浆液包裹,浆液固化后在桩周形成一层混凝土层,增大了桩基直径,并

且在桩端形成一个扩大头,增大了桩基承载力。

(4) 此外,组合压浆还具有化学作用,浆液可以与砂土进行离子交换,使砂土的强度增加,从而使砂土的整体性得到加强。

钻孔灌注桩组合压浆通过其物理与化学作用机理,大大提高了桩基承载力,并有效地降低了桩基沉降^[7-8]。

2 组合压浆灌注桩数值分析

2.1 有限元模型的建立

有限元分析软件可以进行较为精确的数值模拟分析,运用大型有限元分析软件 Ansys 建立组合压浆灌注桩模型。为了提高有限元计算的速度,建立了 1/4 桩—土模型。模型中的桩体、桩侧土、桩端土取用 Solid45 实体单元,该单元具有弹塑性、应力强化、大变形和大应变的能力。桩体与土体间相互作用取用 Conta173 和 Tager170 面—面接触单元^[9]。

2.2 边界条件和接触面的处理

根据桩基与土体间实际相互作用,在有限元模型中,分别约束了桩侧土体单元的 X、Y 方向上的自由度以及土体范围内底端的全部自由度,对土体范围内顶端的自由度不进行任何约束。桩侧注浆通过提高桩与土之间的摩擦系数模拟,桩端注浆通过改变桩底 3 倍桩径范围内的土体模量模拟^[10]。

2.3 计算工况

选取代表性桩基作为研究对象,建立两个有限元模型分别模拟压浆灌注桩及不压浆灌注桩,对比说明组合压浆桩性能。此桩基的单桩设计承载力为 8 500 kN,对桩顶施加 2 倍设计承载力即 17 000 kN 竖向力。

2.4 桩顶沉降分析

对两个有限元模型桩顶施加 17 000 kN 竖向力时,不压浆模拟桩桩顶沉降量为 28.17 mm,压浆模拟桩桩顶沉降量为 16.38 mm。根据不压浆试桩 443[#]-1 的单桩竖向抗压静载试验报告中 Q-s 曲线可见,当施加 17 000 kN 竖向力时,累计沉降为 22.7 mm;根据压浆试桩 443[#]-2 的单桩竖向抗压静载试验报告中 Q-s 曲线可见,当施加 17 000 kN 竖向力时,累计沉降为 13.2 mm。

有限元模拟结果与试桩结果相差不大,说明有限元模型的有效性。压浆模拟桩比不压浆模拟桩的沉降减少了 42%,表明组合压浆技术可以减少桩顶沉降,提高承载力。

3 钻孔灌注桩组合压浆设计

3.1 工程概况

滞洪区兼京杭运河特大桥为山东董梁山高速公路上一座特大桥,该桥完全跨越东平湖新湖区,为全线路的控制性工程。该特大桥全长 21 586 m,桥面宽度 26.5 m,上部结构采用现浇预应力混凝土悬浇箱梁、预制预应力混凝土小箱梁,桥墩采用柱式墩与薄壁墩,桥台采用肋板台,墩台采用桩基础。全桥共有钻孔灌注桩 2 996 根,桩基直径为 1.2 m、1.4 m、1.6 m、1.8 m,桩基总长度共 150 344 m。

3.2 地质条件

根据滞洪区兼京杭运河特大桥地质勘查确定,桥址区地貌形态属冲积湖积平原亚区,地势较为平坦,勘探深度范围内地层主要为冲洪积粉质土,上部覆盖约 0.3 m 的黄河冲淤土,其下分布有粉土、砂土及黏土。粉土土质较均匀,切面光滑,韧性及干强度中等;砂土砂质较纯,颗粒均匀,成分主要为石英长石;黏土土质较均匀,切面光滑,黏性和韧性较好,干强度较高,含螺壳碎屑或姜石。

3.3 设计公式及压浆增强系数

依照 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》中组合压浆钻孔灌注桩单桩承载力计算公式进行设计^[11]:

$$[R_a] = \frac{1}{2} u \sum_{i=1}^n \beta_{si} q_{ik} l_i + \beta_p A_p q_r \quad (1)$$

式中:[R_a]为单桩轴向承载力(kN); u 为桩身周长(m); β_{si} 为第*i*层土的侧阻力增强系数; β_p 为端阻力增强系数; l_i 为承台底面或局部冲刷线以下各土层的厚度(m); q_{ik} 为与 l_i 对应的各土层与桩侧的摩阻力标准值(kPa); A_p 为桩端截面面积(m²); q_r 为修正后的桩端土承载力特征值(kPa)。

侧阻力增强系数、端阻力增强系数见表 1。

对稍密和松散状态的砂、碎石土可取较高值,对密实状态的砂、碎石土可取较低值。

3.4 浆液水灰比

依照 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》附录 K 中对桩基压浆技术参数规定:浆液水灰比应根据土的饱和度和渗透性确定。对饱和土宜为 0.5~0.7,对非饱和土宜为 0.7~0.9(松散碎石土、砂砾宜为 0.5~0.6)。该项目地下水位较浅,土层含水率较高,设计浆液水灰比采用 0.5。

表 1 侧阻力、端阻力增强系数		
土层	增强系数	
	侧阻力	端阻力
黏土、粉质黏土	1.3~1.4	1.6~1.8
粉土	1.4~1.5	1.8~2.1
粉砂	1.5~1.6	1.9~2.2
细砂	1.6~1.7	2.0~2.3
中砂	1.7~1.9	2.0~2.3
粗砂	1.8~2.0	2.2~2.4

3.5 单桩压浆量

依照 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》附录 K 中对桩基压浆技术参数的规定:单桩压浆量应根据桩径、桩长、桩端桩侧土层性质、单桩承载力增幅等因素确定,可按式计算:

$$G_c = \sum_{i=1}^m a_{si}d + a_p d \tag{2}$$

式中: G_c 为单桩压浆量(t); a_{si} 、 a_p 分别为第 i 压浆断面处桩侧压浆量经验系数、桩端压浆量经验系数(t/m); m 为桩侧压浆横断面数; d 为桩径(m)。

根据压浆量公式,计算出各桩压浆量,该桥单桩压浆量计算值为 5.2~11.29 t。

3.6 压浆压力

依照 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》附录 K 中对桩基压浆技术参数的规定:桩端压浆终止压力应根据土层性质及压浆点深度确定。对风化岩、非饱和黏性土及粉土,压浆压力宜为 3~10 MPa,对饱和土层压浆压力宜为 1.2~4 MPa,软土宜取低值,密实土宜取高值;桩侧压浆终止压力宜为桩端压浆终止压力的 1/3~1/2。

根据该桥土层性质及压浆点深度,桩端压浆终止压力为 1.8~2.6 MPa,桩侧压浆终止压力为 0.7~1.3 MPa。

3.7 桩长计算

根据地勘资料中各土层类别及土质稀密情况,选取规范对应的侧摩阻力增强系数 β_s 及端阻力增强系数 β_p ,对各土层桩侧摩阻力标准值 q_k 、承载力基本容许值 $[f_{a_0}]$ 进行修正,计算出满足设计承载力所需的桩基长度。以 443# 桩基为例,各参数取值及计算结果见表 2、3。

表 2 桩长计算参数取值									
设计桩长/m	清底系数 m_0	修正系数 λ	修正系数 k_2	桩端以上土重度/(kN·m ⁻³)	桩身周长/m	桩截面积/m ²	桩基体积/m ³	桩端承载力特征值 $[f_{a_0}]$	q_r /kPa
31	0.82	0.85	2	10	5.655	2.545	78.9	420	683.1

表 3 桩长计算结果				
层号	土层厚/m	桩侧摩阻力标准值 q_k /kPa	承载力基本容许值 $[f_{a_0}]$ /kPa	各土层提供的桩侧承载力/kPa
1	2.7	48	200	325.2
2	4.5	58	220	669.3
3	2.5	66	297	428.4
4	3.1	74	234	601.3
5	2.7	82	280	584.8
6	4.7	90	320	1 124.3
7	2.5	96	340	640.4
8	3.0	104	360	836.4
9	3.3	110	400	976.0
10	2.0	114	420	614.1
单桩轴向承载力 $[R_a]$ /kN			8 539	

设计承载力 8 500 kN,满足设计需要。

3.8 压浆管布置

依照 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》中对水泥浆流动范围的说明:在饱和土层中桩端或桩侧压浆时,对压浆断面以上 10.0~12.0 m 范围内的桩侧阻力可进行增强修正。

根据上述原则,对压浆管布置位置进行了设计:桩长小于等于 30 m 时,采用两道桩侧压浆装置,桩长自 30 m 算起,每增加 10 m,增加一道桩侧压浆装置。

压浆管采用低压液体输送管制作,质量应符合 GB/T 3091—2008《低压流体输送用焊接钢管》的规定,压浆管材质为钢管,外径 32 mm,壁厚 2.75 mm。

压浆钢导管应竖直固定在钢筋笼上,与钢筋笼的加劲筋点焊并绑扎紧密牢固,且与钢筋笼一起下孔;压浆管之间的连接采用套筒螺纹连接或焊接,应确保不渗水不漏浆。

桩端压浆装置低于桩底标高 5 cm,插入桩端持力

由表 3 可得:当桩长为 31 m 时,单桩承载力超过

层,并在桩端钢筋笼处固定牢固。桩侧压浆装置绑扎在钢筋笼外侧,固定牢固,保证压浆口对着桩侧土层。压浆口采用定制单向阀,单向阀的出浆口直径为 10 mm。压浆阀能承受的压力应大于压浆终止压力;压浆阀外部保护层应能抵抗砂石等硬质物的刮撞而不致使管阀受损。

桩侧压浆管安装过程中,做好标识,同时在钢筋笼安装完成后,在桩顶做好标记,保证在压浆时区分每层桩侧压浆管。具体布置如图 2 所示。

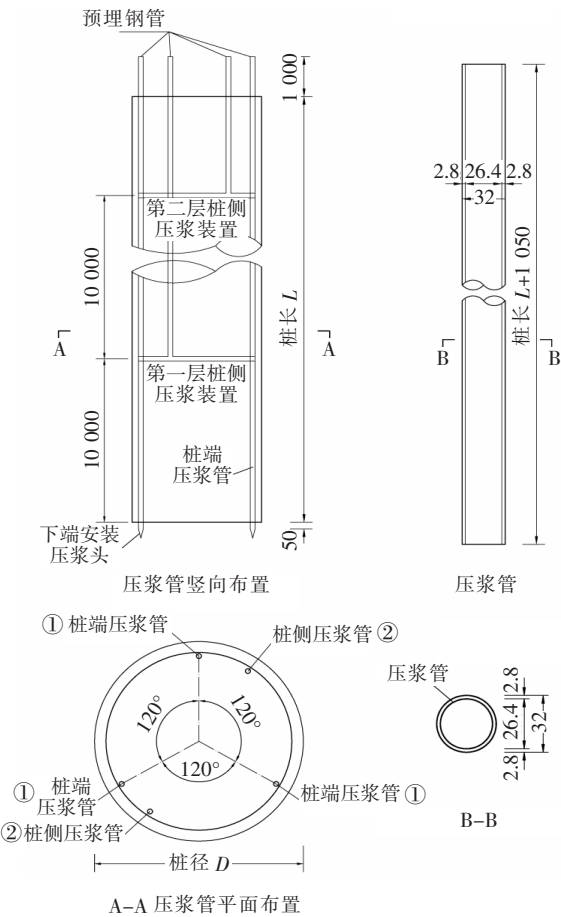


图 2 压浆管布置图(单位:mm)

3.9 压浆设计成果

原设计桩长总长为 150 344 m,采用桩基组合压浆后桩基总长为 112 196 m,桩基总长度缩短 38 148 m,占总桩长的 25.4%。具体工程数量变化见表 4。

桩径/ m	桩基长度/m			减少率/ %
	未组合压 浆设计	组合压 浆设计	减少量	
1.2	680	520	160	23.5

续表 4

桩径/ m	桩基长度/m			减少率/ %
	未组合压 浆设计	组合压 浆设计	减少量	
1.4	3 024	2 304	720	23.8
1.6	98 814	73 557	25 257	25.6
1.8	47 826	35 815	12 011	25.1
合计	150 344	112 196	38 148	

4 钻孔灌注桩组合压浆试验

试验选取了具有代表性的 6 根桩基作为试验桩,试验桩情况见表 5。

采用设计浆液水灰比、压浆量及终止压浆压力等参数,对试验桩进行了桩端桩侧组合压浆施工,并运用自平衡法对试验桩进行了桩基承载力检测。

表 5 试验桩情况

桩号	桩径/ m	原桩长/ m	试验桩 长/m	压浆方式
57#-4	1.6	48	33	组合压浆
126#-1	1.6	51	36	组合压浆
130#-3	1.6	49	34	组合压浆
443#-1	1.8	46	46	不压浆
443#-3	1.8	46	31	组合压浆
446#-1	1.8	50	35	组合压浆

采用自平衡法,在桩底附近安设荷载箱,沿垂直方向加载,即可以同时测得荷载箱上、下部桩身各自的承载力。该方法利用桩的侧阻与端阻互为反力,可清楚地得到侧阻力与端阻力分布和各自的荷载-位移(Q-s)曲线,进而求得桩基承载力^[12]。6 根试验桩的静载试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知:

(1) 桩基的竖向位移发生大幅增加时,表征其承载力接近极限承载力。5 根进行组合压浆的桩基竖向位移 s 值发生大幅度增加时,Q 值均超过 20 000 kN,表征极限承载力均超过 20 000 kN,大于设计承载力的 2 倍,验证了设计成果的可靠性。

(2) 未进行组合压浆的 443#-1 号桩基极限承载力为 17 000 kN,进行组合压浆的桩基比不进行压浆

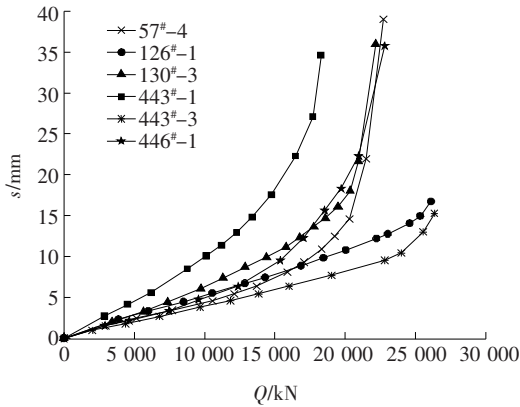


图 3 Q-s 转换曲线

的桩基承载力提高了 21%~44%，提高效果明显；且设计承载力的桩基沉降量较未压浆桩基也明显减小。

5 结论

对钻孔灌注桩组合压浆技术进行了简要说明，采用有限元模型数值分析与试验桩结果进行对比，验证了组合压浆技术的作用效果，然后对组合压浆设计过程进行了详细阐述，得到如下结论：

- (1) 采用钻孔灌注桩组合压浆技术能够明显提高桩基承载力，并有效降低桩基沉降^[13]。对于高速公路桩基规模巨大的特大桥梁，可产生较为明显的经济效益，并可以提高桩基的工程质量。
- (2) 组合压浆设计中相关公式及参数的选取，主要依据规范规定及工程实际情况进行取用，并通过试验验证了设计的可靠性，其研究成果可为公路桥梁采用组合压浆设计与应用提供参考^[14]。

参考文献：

[1] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.

[2] 祝经成. 饱和土中长灌注桩桩端压浆与超声检测结合的工艺：CN,94222930.4[P]. 1995-7-19[2020-5-5].

[3] 刘金砺，祝经成. 泥浆护壁灌注桩桩侧压浆装置：CN,95207690.X[P]. 1998-1-14[2020-5-5].

[4] 于志华，刘炎炎，宋建，等. 钻孔灌注桩桩端后压浆技术及工程应用[J]. 水利与建筑工程学报，2011,9(3):40-43.

[5] 刘建梅. 桥梁钻孔灌注桩后压浆技术应用研究[D]. 西安：长安大学，2014.

[6] 龚维明，戴国亮，黄生根. 大型深水桥梁钻孔桩桩端后压浆技术[M]. 北京：人民交通出版社，2009.

[7] 张瑞坤，石名磊，倪富健，等. 黏性土中大直径超长钻孔灌注桩承载性状及单桩沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报，2013,32(S2):4190-4198.

[8] 姚建平，蔡德钧，朱健，等. 后压浆钻孔灌注桩承载特性研究[J]. 岩土力学，2015,36(S1):513-517.

[9] 乔道勇. 钻孔灌注桩桩底后注浆数值模拟研究[D]. 吉林：吉林大学，2014.

[10] 郑楷，赵大军. 灌注桩后注浆对沉降影响的数值分析[J]. 施工技术，2016,45(7):2-3.

[11] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范：JTG 3363-2019[S]. 北京：人民交通股份有限公司，2019.

[12] 程晔，龚维明，张喜刚，等. 超长大直径钻孔灌注桩桩端后压浆试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2013,29(S2):3885-3892.

[13] 布克明，殷坤龙，龚维明. 钻孔后压浆技术在苏通大桥基础工程中的应用[J]. 岩土力学，2008(6):1697-1700.

[14] 王树峰，张日红. 复合配筋预应力混凝土桩桩身性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品，2013(8):36-39.