

DOI: 10.11779/CJGE201812003

基于沉降控制的组合后压浆灌注桩承载力计算研究

戴国亮^{1, 2}, 万志辉^{*1, 2}, 龚维明^{1, 2}, 王磊³

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 江苏 南京 210089; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210089;
3. 南京东大自平衡桩基检测有限公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 以沉降控制标准为原则来确定后压浆灌注桩的承载力有着重要的实际意义。基于石首长江公路大桥工程开展的6根大直径钻孔灌注桩现场静载试验, 通过对比分析桩端桩侧组合压浆桩压浆前后的试验结果, 研究了组合后压浆对深厚细砂层钻孔灌注桩承载变形性状的影响, 在此基础上通过统计得出了在不同桩顶沉降条件下桩端阻力增强系数、桩侧阻力增强系数的取值范围, 并给出了一种基于沉降控制标准的组合后压浆桩承载力设计方法, 最后通过工程实例验证了该设计方法的合理性。结果表明, 组合后压浆条件下的深厚细砂层钻孔灌注桩承载变形性能显著提升, 且承载力提高幅度随着桩顶沉降的增加逐渐增大; 组合后压浆桩加载至极限状态时, 其极限承载力至少提高66%, 且能有效地控制桩基沉降量; 同时组合压浆后能有效地改善桩端支承性能与桩侧受力特性, 显著提高桩端阻力和桩侧摩阻力, 并对桩基的荷载传递特性产生明显影响。此外, 设计计算方法能较好地给出组合后压浆桩荷载沉降关系的范围, 可保守地将计算结果的下限作为工程设计使用。

关键词: 深厚细砂层; 组合后压浆桩; 静荷试验; 桩阻力; 沉降控制; 增强系数

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)12-2172-10

作者简介: 戴国亮(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学和科研工作。E-mail: daigil@seu.edu.cn。

Calculation of bearing capacity for combined post-grouting bored piles based on settlement control

DAI Guo-liang^{1, 2}, WAN Zhi-hui^{1, 2}, GONG Wei-ming^{1, 2}, WANG Lei³

(1. MOE Key Laboratory for RC and PRC Structure, Nanjing 210089, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210089, China; 3. Nanjing Dongda Self-Balance Pile Foundation Inspection Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

Abstract: It is of great practical significance to determine the bearing capacity of post-grouting piles on the basis of the principle of settlement control. Based on the field static load tests on six large-diameter cast-in-situ bored piles of Shishou Yangtze River Highway Bridge project, the influences of combined post-grouting on the bearing and deformation behaviors of cast-in-situ bored piles in deep fine sand layer are studied by comparing the field test results before and after combined post-grouting. The range of improvement coefficient for the tip resistance and shaft resistance under different pile head settlements is obtained through statistical analysis on the basis of the field test results, and a design method for the bearing capacity of combined post-grouting pile based on settlement control criterion is presented. Finally, a case history is cited to demonstrate the validity of the design method. The results show that the bearing capacity of cast-in-situ bored pile in deep fine sand layer is significantly improved under the combined post-grouting, and the improved range of bearing capacity increases with the increasing settlement of the pile head. Moreover, the ultimate bearing capacity of combined post-grouting pile is increased by at least 66% under the ultimate loading, and the settlement of pile head can be controlled effectively. Meanwhile, the bearing performances of the pile tip and mechanical characteristics of the pile side can be improved effectively, the tip resistance and side resistance are significantly improved by the combined post-grouting, and the load transfer characteristics of the pile have a significant impact. Additionally, the proposed method can well give the range of load-settlement relationship of combined post-grouting pile. It is suggested that the calculated lower bound should be used conservatively in engineering design.

Key words: deep fine sand layer; combined post-grouting; static load test; pile resistance; settlement control; improvement coefficient

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478109, 51678145); 国家重点研发计划专项项目(2017YFC0703408); “六大人才高峰”高层次人才选拔培养资助项目(XNY-047)

收稿日期: 2017-11-20

***通讯作者** (E-mail: seuwanzhihui@163.com)

0 引言

后压浆技术已广泛的应用于钻孔灌注桩的设计与施工中^[1], 大量研究表明^[2-7], 注入的压力浆液不仅影响桩端支承性能, 而且因端阻力与侧阻力相互增强效应及浆液对桩侧受力性状产生影响, 其对桩端阻力与桩侧阻力的发挥、荷载传递变化规律及桩基承载性状亦产生明显的影响。目前, 后压浆技术按压浆部位主要分为桩端后压浆、桩侧后压浆及桩端桩侧组合后压浆三大类, 其中桩端后压浆技术在 1958 年开始应用于工程实践中, 之后在世界各地得到了广泛的应用与发展^[8-11]。而桩侧后压浆技术相比桩端后压浆技术起步稍晚, 该技术因能有效地改善桩侧与土体的边界条件、增强桩侧摩阻力进而大幅度提升水平力和抗拔力, 因而在大型桥梁、高速铁路、高耸塔型建筑、港口码头及海上石油平台等工程中逐渐被应用^[12-15]。然而, 桩端桩侧组合后压浆的理论方面研究及工程实践应用相比桩端后压浆或桩侧后压浆都较为复杂, 使得关于桩端桩侧组合后压浆技术的报道较少, 相应的承载性能研究也较少, 因而研究桩端桩侧组合后压浆桩的承载性状有着重要的意义。

随着上部结构对基础沉降要求的提高, 后压浆技术不仅作为提升承载力的措施, 还逐渐成为沉降控制的手段。房凯等^[16]在统计的基础上给出了在不同位移条件下卵砾石层的后注浆桩承载力提高系数, 通过正态分布函数拟合并得出基于变形控制的后注浆承载力预测方法。戴国亮等^[17]基于现场静载试验结果分析了后压浆桩的荷载沉降传递特性, 并在后压浆桩增强效应作用机制的基础上, 给出了一种后压浆桩荷载沉降关系的计算方法。上述给出的方法仅针对于桩端后压浆桩, 而关于组合后压浆桩的设计方法还未见报道。因此有必要研究不同沉降控制标准的组合后压浆桩设计方法, 在此基础上完善后压浆桩的沉降设计方法对后压浆技术的应用有着重要的实际意义。

为此, 本文基于石首长江公路大桥工程的 6 根大直径钻孔灌注桩, 在组合压浆过程中采用自动控制系统并对组合压浆桩进行现场静载试验, 通过对比分析组合压浆桩压浆前后的试验结果, 研究组合后压浆对深厚细砂层钻孔灌注桩承载变形特性的影响规律, 并在此基础上通过统计得出在不同桩顶沉降条件下桩端阻力增强系数、桩侧阻力增强系数的取值范围, 进而研究基于沉降控制标准的组合后压浆灌注桩承载力设计方法, 最后通过工程算例验证该设计方法的合理性。本文研究成果可为深化深厚细砂层组合后压浆桩承载特性的认识及设计计算提供参考。

1 工程地质和试桩概况

石首长江公路大桥工程位于湖北省南部, 横跨长江, 路线全长为 39.723 km。其中主桥总长 1.45 km, 南北引桥总长 8.079 km, 主引桥基础均采用大直径钻孔灌注桩。根据浅层反射波法地震勘探结果, 桥址区基岩埋深在 250 m 以下, 且地质钻探结果显示, 勘探至 180 m 未见基岩, 揭露的地层均为第四系松散沉积物, 浅层为全新统黏土、淤泥质土, 深部均为全新统细砂土。由于细砂地层厚, 地质条件较为单一, 主塔基础设计桩长达 120 m, 而引桥基础设计桩长达 54 m。为了提升桩基承载力, 优化指导基础设计, 对该桩基工程开展桩端桩侧组合后压浆技术的研究。

为研究深厚细砂地层后压浆灌注桩的承载特性, 开展了南北岸引桥 4 个场地共 8 根试桩的现场静载荷试验。其中北岸引桥试桩 SZY01—SZY04 采用回旋钻反循环成孔工艺, 南岸引桥试桩 SZY05—SZY08 采用旋挖钻成孔工艺, 且试桩 SZY02—SZY06、SZY08 采用桩端桩侧组合后压浆技术, 而试桩 SZY01、SZY07 采用桩侧后压浆技术。本文仅研究桩端桩侧组合后压浆对深厚细砂地层钻孔灌注桩承载性状的影响, 因此选取试桩 SZY02—SZY06、SZY08 为研究对象。由于墩高和跨径的不同, 且地层具有差异性, 从而导致不同墩位基桩的设计尺寸不一致。6 根试桩基本概况见表 1。试桩桩长范围内土层分布剖面图如图 1 所示。

表 1 试桩概况

Table 1 Overview of the test piles

试桩编号	桩径/m	桩长/m	桩顶标高/m	桩端持力层	测试模式
SZY02	2.0	50	33.8	细砂	压浆前、后
SZY03	2.0	52	32.8	细砂	压浆前、后
SZY04	2.0	52	32.8	细砂	压浆前、后
SZY05	1.8	54	30.3	细砂	压浆前、后
SZY06	1.8	54	30.3	细砂	压浆前、后
SZY08	1.5	40	32.4	细砂	压浆前、后

2 现场试验概况

2.1 静载试验

根据试桩长度范围内土层分布、设计桩长及设计桩径等参数估算得到部分试桩压浆后极限承载力超过 40000 kN, 若采用传统静载试验方法不仅受到了试验场地的限制, 还增加了试验的时间及成本, 因此本次工程试桩采用自平衡测试法。并为了通过试桩试验提出土层的极限摩阻力和桩端极限承载力, 及确定组合后压浆对增强桩端承载力、桩侧摩阻力的作用, 本次试桩试验采用双荷载箱自平衡测试法。而采用双荷载箱自平衡测试法的优点如下: ①能有效应用于超长桩

承载力测试,避免了单个荷载箱受限千斤顶布置大小的缺陷;②能有效应用于测试压浆前和压浆后桩基的承载力,避免了单荷载箱只能测出某一段极限承载力的缺陷;③可根据工程地质条件,灵活调整上下荷载箱加载顺序,分别测试得到不同段桩的承载力。因而根据设计参数将2个荷载箱设置于桩身内,将桩体自上而下分为上、中及下3段,具体布置位置如图1所示。

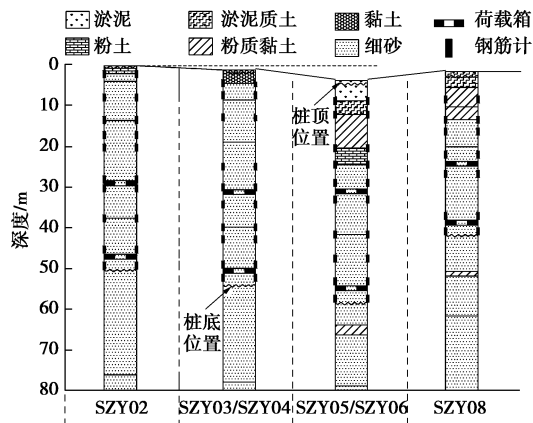


图1 试验场地土层分布剖面图及钢筋计布置图

Fig. 1 Distribution profile of soil layers of test site and shaft instrumentation

为了研究组合后压浆工艺对深厚细砂地层钻孔灌注桩承载性能的影响,在各试桩内布置钢筋应力计,在桩身内的钢筋笼主筋上沿桩周对称地安装4个钢筋应力计。钢筋计的布置应根据土体分布情况和桩长综合确定,各试桩的具体布置情况如图1所示。并采用长距离位移传感器测试位移,在桩顶及上、下荷载箱上分别安装2只位移传感器量测试桩顶位移及荷载箱的上、下位移。

试验采用慢速维持荷载法,荷载加卸载方法的具体细则按照《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》(JGJ/T 403—2017)^[18]。试桩静载荷试验分为压浆前后两个阶段,第一阶段:在成桩后桩身混凝土强度达到要求后对试桩进行压浆前的静载荷试验;第二阶段:在压浆结束且经养护水泥浆液强度达到要求对试桩进行压浆后的静载荷试验。实践研究表明^[18-20],压浆经过不少于20 d的休止时间后,土体可完全恢复且水泥浆液的增强反应能基本完成,因此可以认为第一阶段静载试验对第二阶段静载试验的影响较小或忽略不计。试桩压浆前后每级加载为预估加载值的1/15,第一级按两倍荷载分级加载;而每级卸载量为3个加载级的荷载值。

2.2 组合后压浆施工

桩端压浆装置采用直管法,设置3根 $\Phi 30$ mm壁厚大于2.5 mm的压浆钢导管;桩侧压浆装置采用环

管法,设置2道压浆环管,且桩侧纵向压浆导管采用外径为30 mm的钢管。在浇筑混凝土后,桩身强度满足要求即可进行压浆前静载荷试验,待压浆前静载荷试验结束后可立刻进行桩端桩侧组合后压浆施工工艺。针对组合压浆顺序先桩侧后桩端,多断面桩侧压浆先上后下的原则,且桩侧与桩端压浆间隔时间不宜小于2 h。后压浆浆液采用P.O42.5普通硅酸盐水泥配制,水灰比为0.5。在压浆施工过程中,采用自主研发的自动控制器及数据采集系统对压浆施工过程中的压浆参数进行动态监测(笔者将另文详述压浆自动控制系统),得到了试桩各压浆导管施工过程中的压浆压力、压浆流量和压浆水泥用量等关键参数随时间变化的关系曲线如图2所示(仅选取试桩SZY04进行分析)。

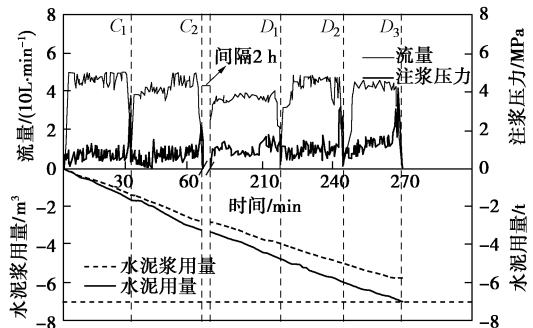


图2 试桩SZY04压浆关键参数随时间变化曲线

Fig. 2 Variation of grouting parameters with time for test pile SZY04

由图2可知,压浆流量、压浆压力随时间发生动态变化,且可了解压浆过程中压浆压力与压浆量随时间变化的规律。最终压浆水泥用量为7.0 t,同施工所用水泥量相同;桩侧、桩端压浆终止压力为2.2~4.2 MPa;流量变化范围为35~50 L/min,压浆参数均满足实际要求。因此,压浆过程中采用自动控制系统对压浆参数进行动态监测,能够准确地把握受压地层的条件情况,能快速地评价压浆效果,从而合理地改变压浆压力、压浆流量和水灰比等参数,使压浆施工工艺更加合理、规范。各试桩压浆关键参数见表2。

表2 压浆参数

Table 2 Grouting parameters

试桩 编号	压浆水泥用量 /t		终止压力 /MPa		环管距桩端 距离/m C_1, C_2
	桩侧	桩端	桩侧	桩端	
SZY02	3.0	4.0	2.7	4.2	30, 15
SZY03	3.4	3.6	2.8	4.3	30, 15
SZY04	3.4	3.6	2.9	4.2	30, 15
SZY05	3.2	2.8	4.2	5.5	30, 15
SZY06	3.2	2.8	4.8	5.7	30, 15
SZY08	2.4	2.4	3.1	3.5	24, 12

注:桩侧终止压力仅给出了第二道桩侧环管的压浆压力; C_1, C_2 分别表示第一、二道环管距桩端的距离。

表 3 不同位移下试桩压浆前后的荷载值及其提高幅度

Table 3 Loading values and corresponding increase ranges of test piles before and after grouting under different displacements

试桩 编号		s=5mm		s=10mm		s=15mm		s=20mm		极限	
		Q_{cr} /kN	提高 幅度/%	Q_{cr} /kN	提高 幅度/%	Q_{cr} /kN	提高 幅度/%	Q_{cr} /kN	提高 幅度/%	Q_{cr} /kN	提高 幅度/%
SZY02	压浆前	8977		14088		17281		19034		21046	
	压浆后	10729	19.52	18206	29.23	24554	42.08	29101	52.89	36513	73.49
SZY03	压浆前	9132		14662		18635		20631		22676	
	压浆后	12491	36.78	20329	38.65	26725	43.52	31292	51.68	37648	66.03
SZY04	压浆前	9609		14361		18148		20339		22676	
	压浆后	13338	38.80	21117	47.05	26414	45.55	30396	49.45	37648	66.03
SZY05	压浆前	7777		11730		14017		15387		16905	
	压浆后	10927	40.51	18076	54.10	23301	66.23	25565	66.14	28291	67.35
SZY06	压浆前	7883		12495		14819		16054		16905	
	压浆后	10685	35.54	18439	47.58	23520	58.71	25860	61.08	29091	72.09
SZY08	压浆前	6415		9190		9925		10358		10195	
	压浆后	8557	33.39	12938	40.79	16054	61.74	18315	76.81	20023	96.40

3 组合后压浆桩静载试验结果分析

3.1 等效桩顶荷载 - 沉降特性分析

在成桩后 20 d 左右对试桩进行压浆前静载试验, 荷载箱加载顺序为先下后上; 而压浆完成后 30 d 左右对试桩进行压浆后静载试验, 荷载箱加载顺序同压浆前一样。因此, 将压浆前后两次双荷载箱自平衡静载测试结果等效转换为传统静载试验的桩顶荷载 - 桩顶沉降曲线, 具体细节可详见《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》(JGJ/T 403—2017), 得到压浆前后各试桩等效转换曲线如图 3 所示。

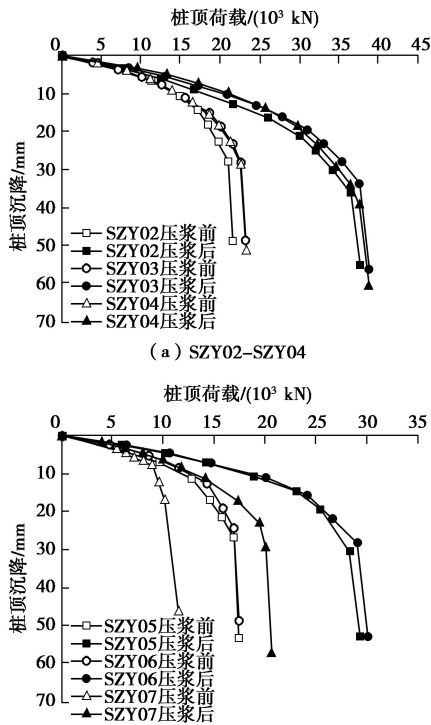


图 3 试桩等效的桩顶荷载 - 桩顶沉降曲线

Fig. 3 Curves of equivalent pile head load-settlement for test piles

从图 3 可以看出, 组合压浆后试桩的承载性能明

显优于压浆前试桩。在加载初始阶段, 组合压浆后试桩的承载力就表现出大于压浆前试桩的承载力; 随着加载等级的增加, 试桩等效桩顶荷载 - 沉降曲线关系呈非线性, 且压浆前后试桩承载性能的差异逐渐增大; 继续增加荷载, 压浆前试桩的等效桩顶荷载 - 沉降曲线出现拐点, 而此时压浆后试桩的等效桩顶荷载 - 沉降曲线仍较为缓变, 表明组合压浆效果非常显著。此后在相同沉降量下, 压浆后试桩的承载力显著大于压浆前, 这是由于组合后压浆改变了桩基荷载传递特性所引起的。也进一步表明, 在该地区采用桩端桩侧组合后压浆有非常显著的提升作用。

根据等效转换的桩顶荷载 - 沉降曲线, 当位移 s 为 5, 10, 15, 20 mm 时, 压浆后试桩的荷载值及其相比于压浆前的提高幅度见表 3。由表 3 可见, 随着位移的增加, 承载力逐渐提高且其提高幅度也逐渐增大, 显示了组合后压浆桩具有强劲的后继作用效应, 可增强桩基强度的安全储备能力。在压浆桩达到极限状态时, 极限承载力的提高幅度至少 66%, 表明桩端桩侧组合后压浆工艺应用于深厚细砂地层能有效的提升基桩极限承载力, 同时沉降量也能得到有效的控制。

3.2 组合后压浆对桩阻力发挥特性分析

为了研究组合后压浆对深厚细砂地层钻孔灌注桩桩端承载能力和变形特性的影响规律, 利用桩身布置的钢筋应力计测试所得的实测数据可以转换为桩身轴力, 再根据桩身轴力、桩身自重可以求得不同截面的桩侧摩阻力。桩端阻力可通过下荷载箱向下荷载减去下段桩侧摩阻力得到, 而桩端位移根据下荷载箱向下位移减去下段桩的桩身压缩量求得。因此将 6 根试桩压浆前后的桩端力对面积进行归一化处理, 并对桩端阻力 - 桩端位移的试验结果进行统计分析, 得到了压浆前 59 个、压浆后 53 个桩端阻力 - 桩端位移 (q_b, s_b) 数据点, 如图 4 所示。

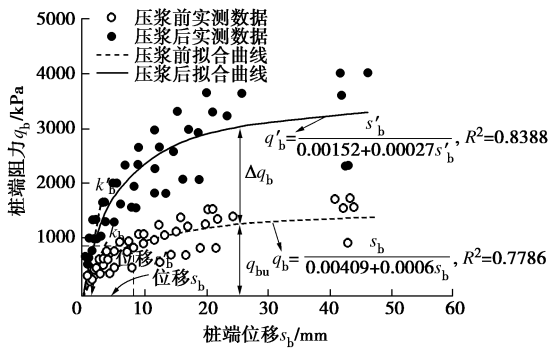


图4 压浆前后 $q_b - s_b$ 数据点的双曲线拟合

Fig. 4 Fitted hyperbolic curves of $q_b - s_b$ data before and after grouting

从图4可知,组合压浆前后的 $q_b - s_b$ 关系采用双曲线函数模型都可以较好地拟合,而压浆后双曲线函数模型的拟合精度 $R^2=0.8388$ 高于压浆前双曲线函数模型的拟合精度 $R^2=0.7786$,表明通过后压浆改善了桩端持力层性状,增加了桩端承载力发挥的稳定性。在相同的桩端承载力作用下,压浆后的 s_b' 要明显小于压浆前的 s_b ,且较小的桩端位移就能发挥较大的桩端阻力。与压浆前的桩端刚度 k_b 相比,由于压力浆液有效地加固了桩端土层、桩端沉渣,压浆后的 k_b' 明显增大,使压浆后的 q_b' 远大于压浆前的 q_b ,压浆后桩端阻力增量值为 Δq_b ,则压浆后极限端阻力 q_{bu}' 等于压浆前 q_{bu} 与 Δq_b 之和,表明组合后压浆能显著增强桩端承载变形性能与支承刚度,并对桩端承载变形特性产生明显影响。此外,由于本次试验采用的是双荷载箱自平衡测试法,其下荷载箱加载的下段桩能较好地反映桩端阻力实际发挥情况。从图4可知,在极限状态条件下,压浆前后试桩的桩端阻力完全发挥所需的位移约为13.4~25.7 mm (0.9% D ~1.5% D ,其中 D 为桩径),该结果小于O'Neill^[21]认为的极限桩端阻力充分发挥所需位移为5% D 的结果,主要是由桩径大小及桩端持力层的差异造成。

一般来说,桩侧摩阻力所占单桩承载力比例较高,且其受力特性对单桩承载变形性能的发挥有直接影响。考虑到组合压浆对桩侧土体有较大的影响,参考文献[17]对桩侧摩阻力与桩土相对位移的实测数据进行统计分析,并对比分析组合压浆前后桩侧摩阻力及其相应的桩土相对位移,以探究组合后压浆对深厚细砂地层钻孔灌注桩桩侧受力特性的影响规律。其中桩侧摩阻力可通过布置在桩身不同位置的钢筋应力间接获得,而桩土相对位移可按下式计算^[17]:

$$s_i = s_t - \sum_{j=1}^i \frac{L_j(P_i + P_{i+1})}{2E_p A_p}, \quad (1)$$

式中, s_i 为第 i 层土的桩土相对位移, s_t 为荷载箱的向上(下)位移, L_i 为第 i 层土的厚度, P_i 为第 i 层土上

部桩身轴力, P_{i+1} 为第 i 层土下部桩身轴力, E_p 为桩身弹性模量, A_p 为桩的截面积。

因此对本工程中6根组合压浆前后和2根桩侧压浆前后试桩桩侧摩阻力-桩土相对位移的试验结果进行统计分析,考虑压浆对桩身全范围内细砂层的摩阻力影响,得到了压浆前809个、压浆后883个桩侧摩阻力-桩土相对位移(τ, s)数据点,如图5所示。

从图5可知,压浆前后的 $\tau - s$ 关系采用双曲线模型也达到了较好的拟合效果,压浆前后双曲线模型的拟合精度分别为 $R^2=0.8416$ 、 $R^2=0.9049$ 。由于桩侧注入的水泥浆液填充了桩侧土体的孔隙及桩土接触面的缺陷,浆液固结后形成强度较高的水泥结石体,使得桩身一定长度范围内的桩径和桩侧面积增大,并增大了桩侧剪切界面阻力和粗糙度,有效地改善了桩侧受力特性,从而提高了桩侧摩阻力发挥水平。因此压浆后的桩侧土初始刚度 k_s' 要大于压浆前的 k_s ,压浆后的 τ' 大于压浆前的 τ ,压浆后桩侧阻力增量值为 $\Delta\tau$,则压浆后极限端阻力 τ_f' 等于压浆前 τ_f 与 $\Delta\tau$ 之和,表明桩侧压浆对桩的荷载传递特性会产生明显影响。

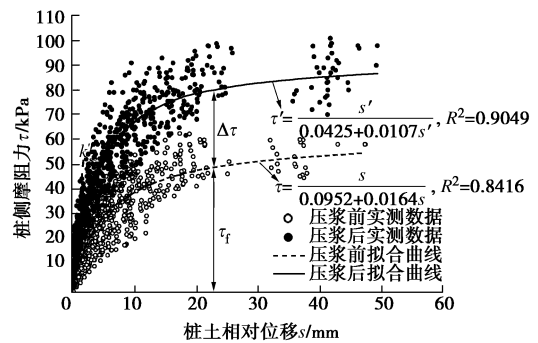


图5 压浆前后 $\tau - s$ 数据点的双曲线拟合

Fig. 5 Fitted hyperbolic curves of $\tau - s$ data before and after grouting

综上所述,组合后压浆对深厚细砂地层钻孔灌注桩桩端及桩侧阻力发挥特性有显著的影响。桩端压力浆液通过加固桩端土层、桩端沉渣,能显著增强桩端承载变形性能与支承刚度;而桩侧压力浆液通过消除桩侧泥皮、加固桩侧土体,能提高桩侧与土体的相互作用性能。因此,组合压浆后增强了桩端土和桩侧土的初始刚度,并提高了桩端阻力与桩侧阻力,使得组合压浆桩相比未压浆桩不仅具有更高的承载性能,而且在较小沉降变形下表现出更高的承载能力,或在相同荷载作用下表现出更高的沉降变形控制能力。

4 基于沉降控制的组合后压浆灌注桩承载力计算

4.1 基于沉降标准的后压浆桩阻力增强系数定义

随着上部结构对基础沉降控制的要求越来越严

表5 不同桩顶沉降条件下桩端阻力增强系数 β_b

Table 5 Improvement coefficients of tip resistance under different settlements

项目	0.25%D	0.5%D	0.75%D	1%D	1.25%D	1.5%D	1.75%D	2%D	2.25%D	2.5%D	2.75%D	3%D
最小值	1.61	1.89	1.94	1.88	1.90	1.97	2.12	2.24	2.25	2.26	2.25	2.25
最大值	2.91	3.32	3.52	3.44	3.42	3.61	3.71	3.82	3.77	3.69	3.64	3.58
平均值	2.23	2.44	2.48	2.46	2.43	2.48	2.58	2.61	2.60	2.58	2.58	2.57
变异系数	0.24	0.22	0.24	0.23	0.21	0.22	0.20	0.21	0.21	0.20	0.19	0.18

力增强系数、桩侧阻力增强系数呈先增大后趋于稳定，且桩侧阻力增强系数变化相对平稳，增加速率明显小于桩端阻力。当桩顶沉降小于 0.5%D 时，桩端阻力增加迅速，主要由于桩端压浆对桩端土体产生了预压作用，在桩顶荷载作用下桩端阻力提前参与了作用，使压浆桩能在较小的沉降变形下表现出较高的桩端阻力；随着桩顶荷载的增加，桩顶沉降继续增大，桩侧阻力增加速率变缓并趋于稳定，而桩端阻力有所降低，由于未压浆桩的端阻力逐渐发挥，导致桩端阻力增强系数略有降低；当桩顶沉降大于 1.75%D 时，桩侧阻力增强系数维持在一定值，表明压浆前后桩侧阻力均达到了极限，而桩端阻力增强系数仍有所降低并未稳定于一定值。根据前述的试验结果分析可知，压浆前后桩端阻力 - 端位移关系可由双曲线函数较好地拟合且函数形式仍呈增长趋势，说明压浆前后桩端阻力 - 端位移曲线后阶段呈塑性硬化关系，此结论与文献[22]给出的桩端荷载传递函数模型结论一致。

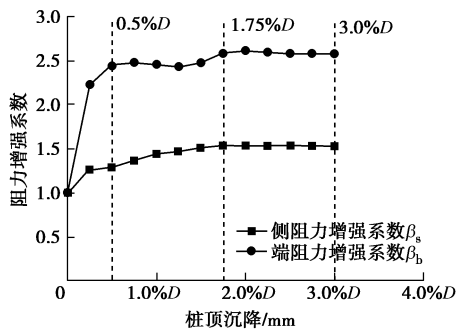


图7 不同桩顶位移条件下压浆桩阻力的增强系数平均值

Fig. 7 Average values of improvement coefficient of pile resistance for grouted piles under different settlements

4.3 以沉降控制为原则的组合后压浆灌注桩承载力计算方法

目前后压浆桩的设计方法主要是基于单一经验系数且不考虑桩基阻力发挥过程的计算方法，因此，根据现有的计算方法仅能得到后压浆桩承载力标准值或特征值，而不能得到其承载力与桩顶沉降的关系。然而，工程设计中不仅要关注承载力的极限状态，还需考虑正常使用的极限状态^[23]，因此提出考虑不同沉降控制标准的后压浆桩承载力计算方法更符合设计要求。

根据上述统计给出的不同桩顶沉降标准的桩基阻力增强系数，将桩顶沉降为 1%D 条件下的压浆前桩端阻力 $Q_{b未}$ 、桩侧阻力 $Q_{s未}$ 乘以相应的桩端阻力增强系数 β_b 、桩侧阻力增强系数 β_s 即可得到在该桩顶沉降条件下压浆后桩端阻力 $Q_{b压}$ 、桩侧阻力 $Q_{s压}$ ，进而可以得到在该桩顶沉降条件下组合压浆后桩的承载力 $Q_{压, 1\%D}$ (图8)。按上述方法，其他桩顶沉降条件下组合压浆后桩的承载力也可以相应的获得，因此可以得到组合压浆桩桩顶荷载 - 沉降的关系曲线。

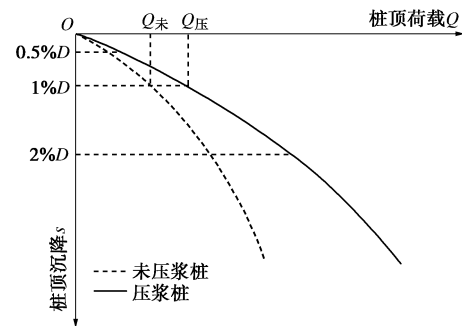


图8 不同桩顶沉降条件下压浆桩与未压浆桩承载力对比

Fig. 8 Comparison of bearing capacities between grouted and ungrouted piles under different settlements

5 工程算例验证

为了验证本文方法的合理性，选用石首长江公路大桥主桥试桩 SZ05 为算例。试桩 SZ05 的基础型式为大直径超长钻孔灌注桩，桩径为 2.0 m，桩长为 110 m，采用 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥配制浆液进行桩端桩侧组合后压浆技术，试桩桩长范围内主要分布的土层为细砂层，详细地质资料和试验概况见文献[24]。

采用本文的基于沉降控制标准的组合后压浆灌注桩设计方法，按照上述方法对试桩 SZ05 组合压浆后的荷载沉降关系进行计算，可分别得到组合压浆桩在桩基阻力增强系数最大值、平均值及最小值时的荷载沉降关系曲线，并与实测值进行对比，如图9所示。

从图9可以看出，组合后压浆桩荷载沉降关系的实测结果在计算结果的区间范围内，并与采用的桩基阻力增强系数的平均值计算结果较为接近，虽然本文方法不能精确地计算给出组合后压浆桩的荷载沉降关系曲线，但作为一种设计方法还是能够满足工程需求。

因此通过本文方法得到的计算区间能给出组合后压浆桩荷载沉降关系的范围, 且从设计角度考虑, 可以保守地将计算结果的下限作为工程设计使用。

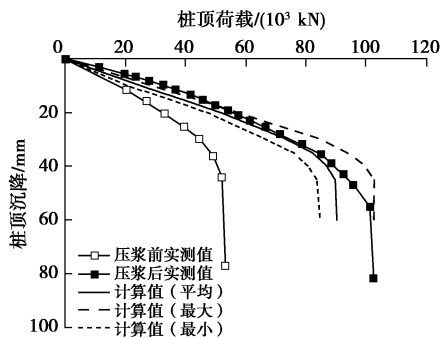


图 9 后压浆桩 SZ05 荷载沉降关系计算值与实测值对比

Fig. 9 Comparison between calculated and measured load-settlement behaviors of grouted pile SZ05

为了进一步说明本文方法的适用性, 以石首长江公路大桥主桥试桩 SZ04 为算例进行计算与对比分析。试桩 SZ04 的基础型式亦为大直径超长钻孔灌注桩, 桩径为 2.2 m, 桩长为 120 m, 同时采用 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥配制浆液进行桩端桩侧组合后压浆技术, 试桩分布在超厚细砂地层中, 桩身范围内夹有大约 2 m 的卵石层, 详细地质资料和试验概况见文献[24]。

采用本文的基于沉降控制标准的组合后压浆桩设计方法, 且按照前述的方法对试桩 SZ04 组合压浆后的荷载沉降关系进行计算, 可得到其计算的最大值、平均值及最小值与实测值对比如图 10 所示。由图可知, 组合后压浆桩荷载沉降关系的实测结果亦在计算结果的区间范围内, 并与采用的桩基阻力增强系数的平均值计算结果比较接近。因此, 通过本文的基于沉降控制标准的组合后压浆灌注桩设计方法能较好的给出荷载沉降关系的范围, 该方法能够满足工程需求, 若保守设计, 可将计算结果的下限应用于工程。

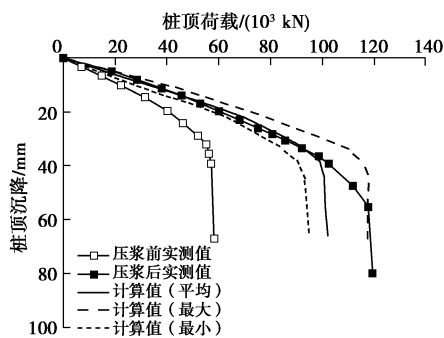


图 10 后压浆桩 SZ04 荷载沉降关系计算值与实测值对比

Fig. 10 Comparison between calculated and measured load-settlement behaviors of grouted pile SZ04

6 结 论

本文基于石首长江公路大桥工程的 6 根大直径钻孔灌注桩, 通过对压浆过程采用自动控制系统的组合后压浆桩进行现场静载试验, 研究了组合后压浆对深厚细砂层钻孔灌注桩的承载变形特性的影响规律, 并在此基础上研究了基于沉降控制标准的组合后压浆灌注桩承载力设计方法, 最后通过工程算例验证了该方法的合理性, 得出了以下结论:

(1) 组合后压浆桩随着桩顶沉降的增加, 承载力提高幅度逐渐增大, 表明组合后压浆桩具有强劲的后继作用效应, 可增强桩基强度的安全储备能力; 同时组合后压浆技术应用于细砂地层的钻孔灌注桩且加载至极限状态时, 其极限承载力至少提高 66%, 且能有效地控制桩基沉降量。

(2) 基于现场静载试验结果, 采用双曲线函数能较好地拟合压浆前后桩端阻力 - 桩端位移、桩侧阻力 - 桩土相对位移的关系, 并分析了桩阻力的发挥特性, 组合压浆后改善了桩端支承性能与桩侧受力特性, 使桩端阻力和桩侧摩阻力得到了大幅度提高, 并对桩基的荷载传递特性产生了明显的影响。

(3) 考虑组合压浆对桩基阻力的影响, 研究了基于沉降控制标准的组合后压浆桩承载力设计方法, 并在统计的基础上给出了桩基阻力增强系数的取值范围, 通过该方法可确定组合后压浆桩荷载沉降关系的范围。

(4) 工程实例分析表明本文计算给出的组合后压浆桩荷载沉降关系曲线范围的方法具有可行性与合理性, 并从设计角度考虑, 建议采用计算结果的下限作为工程设计使用。

本文给出的基于沉降控制标准的组合后压浆桩承载力设计方法简单实用, 能满足工程设计的需求, 但未统计压浆对各土层桩侧摩阻力, 而是简化为压浆对桩身总侧阻力的影响, 且统计得到的桩基阻力增强系数受限于试桩数量及局部地区情况, 尚难以直接推广至任意地区。仍需进一步积累现场实测结果并进行归纳统计分析, 以完善基于沉降控制标准的后压浆桩设计计算方法, 为其经济合理地应用于工程实际提供参考。

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. (ZHANG Zhong-miao. Post-grouting technology of bored piles and engineering application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in

- Chinese))
- [2] MULLINS G, WINTERS D, STEVEN D. Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesionless soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(4): 478 - 487.
- [3] 张建新, 吴东云. 桩端阻力与桩侧阻力的相互作用研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(2): 541 - 544. (ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun. Research on interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(2): 541 - 544. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 李永辉, 朱翔, 周同和. 桩端后注浆对大直径灌注桩影响的现场对比试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(增刊 2): 388 - 396. (LI Yong-hui, ZHU Xiang, ZHOU Tong-he. Experimental study of effects of pile tip post grouting on bearing characteristics of large-diameter bored pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(S2): 388 - 396. (in Chinese))
- [6] 黄生根, 张晓炜, 曹辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(2): 251 - 254. (HUANG Sheng-gen, ZHANG Xiao-wei, CAO Hui. Mechanism study on bored cast-in-place piles with post-grouting technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(2): 251 - 254. (in Chinese))
- [7] 刘念武, 龚晓南, 俞峰. 大直径钻孔灌注桩的竖向承载性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, **49**(4): 763 - 768. (LIU Nian-wu, GONG Xiao-nan, YU Feng. Vertical bearing capacity of large-diameter bored pile[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, **49**(4): 763 - 768. (in Chinese))
- [8] BRUCE D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. *Ground Engineering*, 1986, **19**(4): 9 - 15.
- [9] DUAN X, KULHAWY F H. Tip post-grouting of slurry-drilled shafts in soil: Chinese experiences[C]// *Contemporary Topics in Deep Foundations*, ASCE. Orlando, 2009: 47 - 54.
- [10] DAI G, GONG W, ZHAO X, et al. Static testing of pile-base post-grouting piles of the Suramadu bridge[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, **34**(1): 34 - 49.
- [11] THIYAKKANDI S, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesionless soils[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, **9**(3): 439 - 454.
- [12] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 桩侧注浆抗拔桩的试验研究与工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(增刊 2): 284 - 289. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun. Full-scale tests and application of side-grouting uplift piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(S2): 284 - 289. (in Chinese))
- [13] 王卫东, 吴江斌, 王向军, 等. 桩侧后注浆抗拔桩技术的研究与应用[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 2): 437 - 445. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun, et al. Study and application of side-grouting uplift piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S2): 437 - 445. (in Chinese))
- [14] 钱建国, 马宵, 李伟伟, 等. 桩侧注浆抗拔桩离心模型试验与原位测试分析[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(5): 1241 - 1246. (QIAN Jian-gu, MA Xiao, LI Wei-wei, et al. Centrifuge model test and in-situ observation on behavior of side-grouting uplift pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(5): 1241 - 1246. (in Chinese))
- [15] 李洪江, 童立元, 刘松玉, 等. 后注浆超长灌注桩水平承载特性现场试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, **37**(6): 204 - 211. (LI Hong-jiang, TONG Li-yuan, LIU Song-yu, et al. Experimental study on lateral bearing behavior of post-grouting super-long bored pile[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, **37**(6): 204 - 211. (in Chinese))
- [16] 房凯, 张忠苗, 刘兴旺. 基于沉降标准的卵砾石层后注浆桩承载力预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(6): 1178 - 1183. (FANG Kai, ZHANG Zhong-miao, LIU Xing-wang. Prediction of bearing capacity of post grouting pile in gravel layer based on settlement criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(6): 1178 - 1183. (in Chinese))
- [17] 戴国亮, 万志辉. 后压浆桩增强效应作用机制及荷载沉降关系研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(12): 2235 - 2244. (DAI Guo-liang, WAN Zhi-hui. Study on enhanced mechanism and load settlement relationship of post grouting pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(12): 2235 - 2244. (in Chinese))
- [18] JGJ/T 403—2017 建筑基桩自平衡静载试验技术规程[S]. 2017. (JGJ/T 403—2017 Technical specification for static loading test of self-balanced method of building foundation

- piles[S]. 2017. (in Chinese)
- [19] WAN Z, DAI G, GONG W. Full-scale load testing of two large-diameter drilled shafts in coral-reef limestone formations[J]. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2017(10): 1 - 17.
- [20] 张帆, 龚维明, 戴国亮. 大直径超长灌注桩荷载传递机理的自平衡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 464 - 469. (ZHANG Fan, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang. Experimental research on the load transfer mechanism of super-long large diameter bored pile with the self-balanced load test method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 464 - 469. (in Chinese))
- [21] O'NEILL M W. Side resistance in piles and drilled shafts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 1 - 16.
- [22] 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 基于自平衡法后压浆灌注桩荷载传递函数的变化分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(8): 98 - 104. (WAN Zhi-hui, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, et al. Analysis on the load transfer function of post-grouting bored pile based on self-balanced method[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(8): 98 - 104. (in Chinese))
- [23] 杨敏. 基于变形控制设计原则的减少沉降桩基础研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 481 - 486. (YANG Min. Study of reducing settlement pile foundation based on controlling settlement principle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 481 - 486. (in Chinese))
- [24] 龚维明, 戴国亮. 桩承载力自平衡测试技术研究与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (GONG Wei-ming, DAI Guo-liang. Research and application of self-balanced loading test technique for pile bearing capacity[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))

中国土木工程学会第十三届全国土力学及岩土工程学术大会 (第一号通知)

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位: 天津大学, 天津城建大学, 天津建筑学会岩土力学与地下工程专业委员会

4年一度的中国土木工程学会全国土力学及岩土工程学术大会是我国岩土工程领域历史最为悠久、影响最为深远的学术会议之一。第十三届全国土力学及岩土工程学术大会将于2019年7月在天津召开。当前是中国基础设施工程建设飞速发展的时期, 伴随着高速轨道交通、高速铁路、高速公路、城市地铁、超高超限建筑、海洋资源开发等重大工程, 提出了许多新的土力学及岩土工程问题。第十三届学术大会将以“岩土工程品质提升与可持续发展”为主题, 对中国近年来土力学与岩土工程领域的最新研究进展进行广泛的学术交流。

征文内容: 会议主要研讨岩土工程的理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿, 大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容包括以下12个方面。①岩土的基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价技术; ③基础工程与地基处理; ④地下工程及深基坑工程; ⑤岩土工程数值仿真与信息化技术; ⑥土动力学与岩土地震工程; ⑦特殊土与边坡工程; ⑧环境岩土工程; ⑨岩土工程中的新技术与新材料; ⑩地质灾害预警与防治; ⑪重大岩土工程实录; ⑫岩土工程机械设备与施工技术。

投稿要求: 大会组委会于2018年7月31日开始接受论文投稿。应征论文须符合上述征文内容要求且未公开发表。投稿时须向会务组提交全文电子文件(投稿邮箱附后), 论文请按《岩土工程学报》期刊格式撰写, 论文模板请登录《岩土工程学报》网站下载中心下载, 来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail及联系电话。

本次会议是四年一届的学术大会, 对应征论文的学术水平与写作质量均有严格要求。每篇论文由两位专家评审, 决定是否录用。根据被录用论文的研究内容与学术水平, 分别推荐论文由《土木工程学报》(增刊)、《岩土工程学报》(增刊)、《岩土力学》(正刊、增刊)、《中国公路学报》(专刊)、《地下空间与工程学报》(正刊、增刊)、《工程地质学报》(正刊)、《防灾减灾工程学报》(专刊)、《地震工程学报》(正刊、增刊)等近十个国内高水平期刊以正刊、专刊或增刊形式发表, 其中多本期刊的专刊或增刊可被EI检索。热忱欢迎岩土工程勘察、设计、检测监测、科研教学、设备和施工领域的科技工作者踊跃投稿。

联系方式: 雷华阳(13512418728), 刘畅(13821202109), 程雪松(13821807355), 张雪莲(13011392385); 天津市津南区海河教育园雅观路135号天津大学北洋园校区, 第43教学楼建工学院土木工程系(300350), cismge2019@163.com, 022-27400843。

(大会组委会 供稿)