

武汉某摩擦型灌注桩后注浆单桩竖向承载力试验研究

孙凤玲, 刘焕存, 刘 涛

(中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098)

摘要:武汉市某项目典型二元结构地层, 稳定砂层平均埋深约 50 m, 合理桩长范围内无较好持力层, 灌注桩沉渣控制困难、成桩工效低。选择深度 >30 m 的粉细砂夹粉质粘土层为桩端持力层, 通过 14 根、2 组不同桩径及桩长的试桩验证成桩工艺, 对比 2 组试桩的承载特性, 提出按规范经验参数取值的不足, 以综合性价比和承载稳定性推选直径 800 mm、桩长 30 m 的后注浆摩擦型灌注桩为工程桩参数, 为桩基设计优化提供依据及类似工程提供参考。

关键词:摩擦型灌注桩; 后注浆技术; 静载试验; 单桩竖向极限承载力

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)05-0063-04

Experimental Study on Vertical Compressive Bearing Capacity of Single Pile with Post Grouting Technology in Wuhan/
SUN Feng-ling, LIU Huan-cun, LIU Tao (AVIC Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100098, China)

Abstract: The paper presents a project with typical dualistic-structural stratum in Wuhan, the average buried depth of the continuous sand layer is about 50m with no proper bearing layer for reasonable pile length, which makes cast-in-place pile sediment control difficult with low pile completion efficiency. More than 30m - depth fine sand with silty clay soil layer is selected as pile end bearing layer, the pile completion technology is verified through 2 separate groups of 14 testing piles with different pile diameters and pile lengths, comparing the load-bearing characteristics of these 2 groups, the shortage of value drawing according to standard empirical parameters is put forward, the post-grouting friction cast-in-place pile, 800mm in diameter and 30m in length, is selected as engineering pile parameter based on the comprehensive cost performance and bearing stability, which can provide the basis for pile foundation design optimization and can be the reference for the similar projects.

Key words: friction cast-in-place pile; post grouting technology; static load test; ultimate vertical bearing capacity of single pile

0 引言

灌注桩后注浆技术, 通过浆液的劈裂、渗透、填充、压密、固化等多种作用形式组合, 改变桩侧或桩端与岩、土之间的边界条件, 固化桩侧泥皮、消除桩端虚土及沉渣隐患, 从而提高桩的承载力以及减少桩基的沉降量。桩侧阻力提高与桩端土支撑刚度增强有匹配关系, 提高桩端支撑刚度, 既可提高端阻力, 又可增强侧阻力, 减少沉降。选择较硬土层作为桩端持力层、严控孔底沉渣或采用后注浆增强等措施具有重要的工程意义^[1-3]。

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[1]给出了后注浆灌注桩的单桩极限承载力计算公式, 其中侧阻力和端阻力的增强系数根据数十根不同地层的后注浆灌注桩与未注浆灌注桩静载对比试验给出, 具指导性和局限性。

武汉市基本属于长江 1 级阶地, 基岩(志留系)埋深平均约 50 m, 局部超过 60 m, 上覆盖层主要由第四系全新统冲积层和第四系晚更新统冲洪积层组成, 并由粘性土过渡到砂性土, 土颗粒逐渐变粗, 钻孔灌注桩多以卵石层或基岩为持力层^[4-9]。而本项目位于武汉市东西湖区, 勘察钻孔 70 m 深度内无稳定的卵石层和基岩层, 场地内存在深厚砂质粘性土层, 桩身受力主要以桩侧摩擦力为主。要获得较大单桩承载力, 扩大桩径增加桩长是基本思路, 但桩身穿越深厚粘土夹砂层时沉渣控制等施工难度大, 相应工期长、造价高, 通过试桩工作验证持力层选择为粉细砂夹粉质粘土为摩擦桩桩端持力层, 经复式后注浆处理后的单桩抗压承载力特征值, 为优化桩基设计提供依据及类似工程提供技术参考。

收稿日期: 2018-04-07

作者简介: 孙凤玲, 女, 汉族, 1985 年生, 硕士, 岩土工程专业, 主要从事地基处理、桩基优化、基坑支护及边坡支挡设计及相应的施工技术工作, 北京市海淀区知春路 56 号院, sun_fengling@126.com。

1 工程概况与试桩方案

1.1 工程与地质概况

项目场地位于武汉市东西湖区,该项目主要由变形敏感、抗抗震要求的多栋厂房组成,无地下室,桩顶标高为现有地面,单柱最大轴力达 42200 kN,基础埋深约 2.5 m,地质构造为汉口-新界复式背斜的核部。

勘察揭露 67.0 m 深度范围内的地层由上至下

为:表层人工填土、一般第四系成因的粘性土及砂类土、志留系泥岩,土层及参数见表 1,试桩范围内典型地质土层分布及特点见图 1。场地内地下水类型主要为上层滞水、承压水、基岩裂隙水。上层滞水主要赋存于人工填土及沟塘底部,以大气降水渗水为主要补给方式,以蒸发为主要排泄方式;承压水主要赋存于粉细砂夹粉质粘土④₁层及其下的砾砂层中,与区域承压含水层连通,由层间侧向迳流补给。

表 1 场地内地层参数

地层代号	土层名称	状态	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量/MPa	揭露厚度/m	层顶标高/m	f_s/kPa	f_p/kPa
②	粉质粘土	可塑	19.4	6	0.4~6.7	14.4~27.3	27	
③ ₁	粉质粘土	可塑—硬塑	19.6	11			34	500
③ ₂	粉质粘土	可塑—硬塑	20.1	12	12.5~35.0	13.7~26.0	38	600
③ ₃	粉质粘土	可塑—硬塑	19.6	9			32	400
③ ₄	粉质粘土	可塑—硬塑	18.2	8			30	300
④ ₁	粉细砂夹粉质粘土	中密—密实	19.5	9			28	450
④ ₂ ~④ ₆	细砂、砾砂、粗砂	中密—密实	20.3~20.8	12~18	0.5~30.1	-7.2~17.1	30~65	500~1000
⑤ ₁	细砂	中密—密实	20.2	14			35	550
⑤ ₂	粉质粘土	可塑—硬塑	19.8	15	最大 22.3	-30.0~1.3	42	600
⑤ ₃	粗砂	中密—密实	20.4	17			48	1100
⑥ ₁	泥岩	强风化	20.2		最大 12.4	-44.0~-12.0	42	800
⑥ ₂	泥岩	强风化	20.0				38	650
⑦ ₁	泥岩	中风化	23.5		最大 9.5	-40.3~-17.8	80	1600

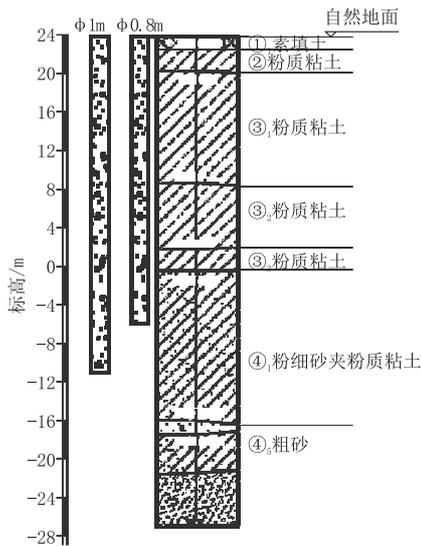


图 1 试桩地层剖面

1.2 试桩方案及施工参数

试桩参数:采用旋挖成孔、泥浆护壁、水下灌注工艺,桩身混凝土等级 C40,以④₁层粉细砂夹粉质粘土为持力层;第一组试桩直径 800 mm、桩长 30 m;第二组试桩直径 1000 mm、桩长 35 m。

注浆参数:桩端设置注浆管 2 根,桩侧在④₁层顶部设置 1 根;注浆水泥标号 P.O.42.5,水灰比为

0.5~0.6,注浆压力控制在 3~4 MPa,第一组后注浆灌注桩桩侧注浆量 ≤ 0.8 t,桩端注浆量 ≤ 1.2 t;第二组后注浆灌注桩桩侧注浆量 ≤ 1.0 t,桩端注浆量 ≤ 1.5 t。

施工采用二次清孔处理,采用声波法做桩身完整性检测,桩身质量良好、完整无缺陷。单桩静载荷试验采用慢速维持荷载法,加载反力装置采用压重平台反力装置。

2 试桩结果分析

2.1 单桩静载荷试验曲线特征

将本场地 14 根试桩的单桩静载荷试验结果汇总整理于表 2。对比分析可知。

(1)摩擦型灌注桩经后注浆后, $Q-s$ 曲线由陡降型变为缓变型,见图 2 和图 3。

(2)摩擦型灌注桩经后注浆处理后,单桩竖向承载力提高明显;综合考虑施工因素、地层差异、注浆效果、桩径、桩长等影响,800 mm 直径、30 m 桩长的灌注桩经后注浆后单桩竖向承载力特征值建议取值(设计值)3500 kN,1000 mm 直径、35 m 桩长的灌注桩经后注浆后单桩竖向承载力特征值建议取值 4200 kN。

表 2 试桩荷载沉降结果

组别	桩号	最大加载/kN	最大沉降量/mm	单桩极限承载力/kN	推荐单桩承载力特征值/kN	推荐单桩承载力沉降量/mm	注浆
第一组	SZ1	7500	9.96	7500	3500	5.0	是
	SZ2	7500	7.67	7500	3500	2.7	是
	SZ3	7500	27.87	5005			否
	SZ4	7500	10.08	7500	3500	2.0	是
	SZ5	10000	24.28	7000	3500	5.0	是
	SZ6	7500	23.28	5005			否
第二组	SZ7	10200	10.39	10200	4200	2.5	是
	SZ8	9600	8.91	9600	4200	5.2	是
	SZ9	9600	6.45	9600	4200	1.9	是
	SZ10	10200	46.50	6804			否
	SZ11	13600	27.34	8160	4200	6.0	是
	SZ12	9600	9.32	8535	4200	3.3	是
	SZ13	10200	14.53	9068	4200	3.5	是
	SZ14	7470	48.03	6405			否

注:试桩 SZ-3、SZ-5、SZ-6、SZ-10、SZ-11、SZ-14 发生极限破坏。

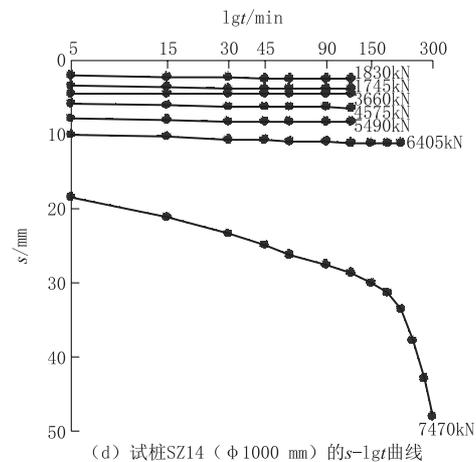
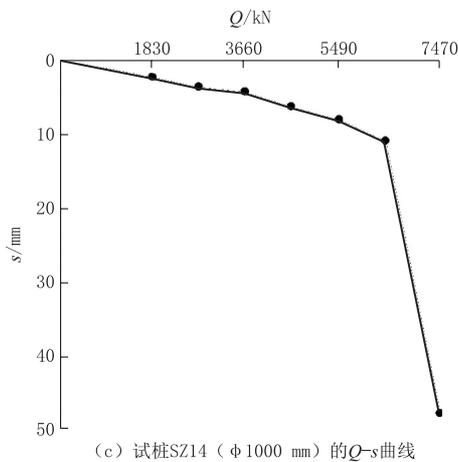
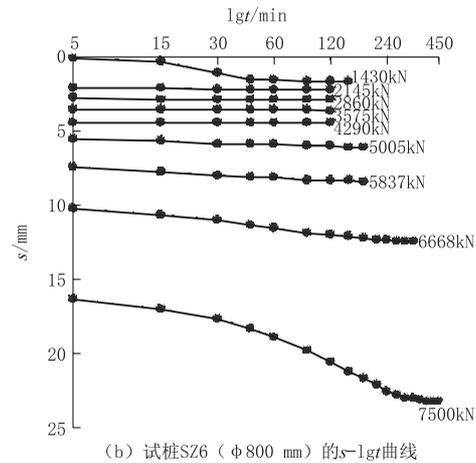
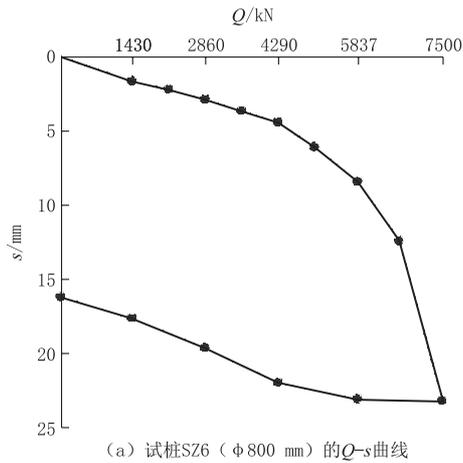


图 2 未注浆试桩典型 Q-s 和 s-lgt 曲线

结合 14 根试桩临近钻孔地层资料,按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[1]中经验公式,分别

(3)静载慢速加载工况下,两种桩型在建议单桩竖向承载力特征值下的变形值约 2.0~6.0 mm,长期荷载作用下的安全可靠率高。

(4)太沙基和 ISSMFE 指出,桩基沉降量达到桩径的 10%时才可能出现极限荷载,对于本场地的粉细砂夹粉质粘土持力层,端阻充分发挥所需的桩端位移为桩径的 5%,即 40~50 mm,而静载试验慢速加荷下的变形量约 2.0~6.0 mm,即后注浆后单桩承载力发挥仍以侧阻力为主,试桩桩身轴力分布及桩侧阻和端阻的承载分担比证实了这一普遍规律,限于篇幅,不作具体展开。

(5)后注浆有效控制了因施工工艺带来的沉渣、泥皮等不利因素,实施的必要性充分且工程意义重大。

2.2 经验值与实测值比较

对 14 根试桩进行未注浆与后注浆工况下的单桩竖向承载力计算,系数选用:(1)考虑大直径尺寸效应

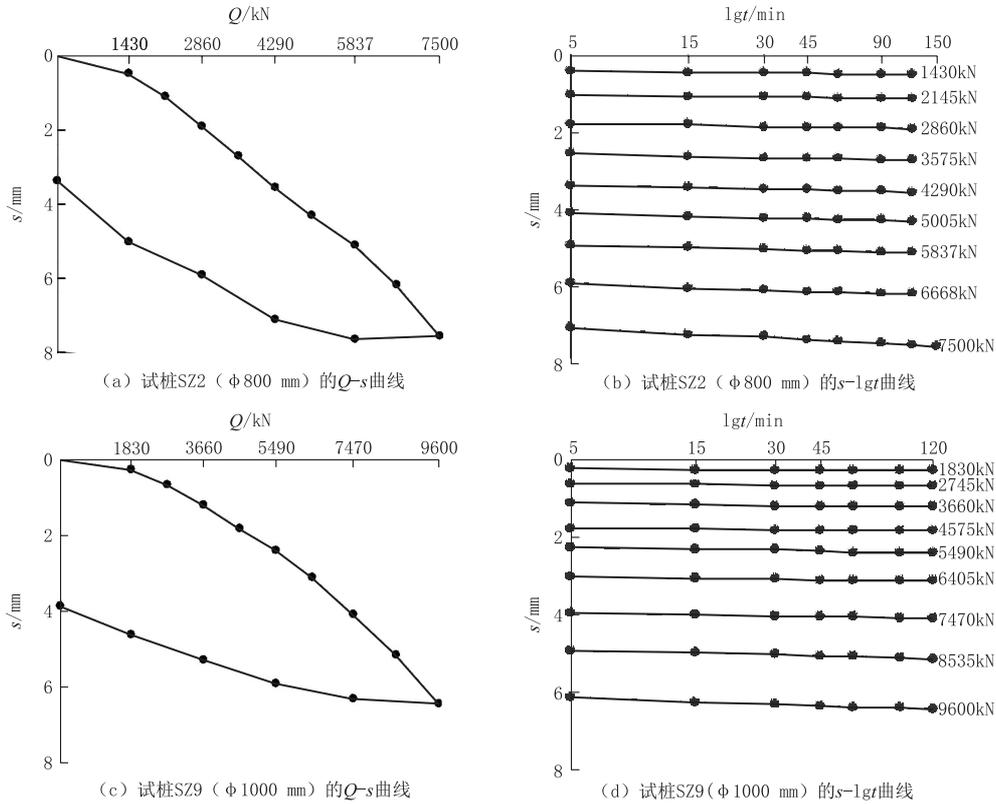


图3 后注浆试桩典型 Q-s 和 s-lgt 曲线

对灌注桩的桩侧阻力和桩端阻力的影响;(2)后注浆侧阻力增强系数 β_{si} 和端阻力增强系数 β_p 按粘性土一粉土类别选取, β_{si} 和 β_p 的建议值为 1.4~1.8、2.2~2.5, 计算统一取低值, 即 β_{si} 取 1.4, β_p 取 2.2。

计算每根试桩的竖向抗压承载力特征值, 与实测值进行比较, 结果见表 3。

表3 经验计算值与静载实测值比较

组别	桩号	理论计算值/kN		试桩实测值/kN		实测值-理论值/kN		百分比/%	
		未注	后注	未注	后注	③-①	④-②	③-①	④-②
		浆①	浆②	浆③	浆④	①	②	①	②
第一组	SZ1	2582	3235	3750		515		15.92	
	SZ2	2615	3282	3750		468		14.27	
	SZ3	2640	3298	2502		-138		-5.24	
	SZ4	2565	3223	3750		527		16.36	
	SZ5	2623	3277	3500		223		6.81	
	SZ6	2512	3145	2502		-10		-0.40	
第二组	SZ7	3789	4886	5100		214		4.18	
	SZ8	3638	4452	4800		348		7.47	
	SZ9	3641	4633	4800		167		3.43	
	SZ10	3551	4582	3402		-149		-4.18	
	SZ11	3649	4485	4080		-405		-8.62	
	SZ12	3617	4421	4267		-154		-3.33	
	SZ13	3620	4357	4534		177		3.87	
	SZ14	3487	4292	3202		-285		-8.18	

对比经验计算值和实测值, 可以发现:

(1)两种桩型的未注浆单桩承载力实测值与理论值均呈负偏差, 但偏差较小, 表明本场地的地勘报告提供的地层参数基本准确;

(2)直径 800 mm、桩长 30 m 的后注浆单桩承载力实测值与理论值均呈正偏差, 偏差均值约 15% 且后注浆处理后单桩承载力综合提高系数达 1.40, 表明直接按经验取值保守且此桩型经后注浆后综合性价比高;

(3)直径 1000 mm、桩长 35 m 的后注浆单桩承载力实测值与理论值相差小, 但正负偏差都存在, 承载力发挥稳定性相对差, 单桩竖向承载力综合提高系数约 1.20;

(4)在地勘参数准确的条件下, 侧阻和端阻增强系数选规范建议区间的最小值计算, 两组试桩的实测值与经验值比较, 第一组的经验值偏保守, 第二组的吻合度相对较高, 经对比发现第一组试桩参数的综合性价比, 经过试桩试验推选直径 800 mm、桩长 30 m 为工程桩参数。

(下转第 70 页)

期间,晚上 22:00 至早 6:00 不能施工,只能白天施工,而且施工中又频繁出现漏浆、塌孔、埋钻等问题,前期施工进度十分缓慢,钻探效率很低,30 m 的钻孔遇到复杂地层一天难以完成,每天累计完成钻探工作量不足 600 m,单机效率仅达 20 m/台天。为确保工期,后来现场又增加 18 台钻机同时施工,针对地层复杂钻孔过程中发生的问题,采取了上述行之有效的处理措施,取得了非常明显的技术效果,单机效率高达 90 m/台天,一台钻机一天可完成 2~3 个钻孔,外业工作时间累计用时 56 d,圆满按合同工期要求完成了勘察钻探任务,实际完成勘探孔 800 多个,钻探进尺 27741 m,得到了业主的高度好评。

6 结语

(1)针对青岛世界博览城项目详细勘察钻探过程中出现的漏浆、埋钻、卡钻等异常现象,结合钻探现场实际,分析原因并采取了相应的处理措施,提高了钻探效率,降低了成本,减少了孔内事故发生,从而提高了岩土勘察质量,保证了工期,取得了较好经济和社会效益。

(上接第 66 页)

3 结论

(1)后注浆摩擦型灌注桩应用于武汉市典型的二元结构地层技术可行,避免桩身穿越深厚粉砂层,成桩工效高、桩身质量有保证,经济合理性好。

(2)本场地的地勘参数准确度高,直径 800 mm、桩长 30 m 的试桩单桩承载力发挥稳定,综合提高系数大,综合性价比优,推选直径 800 mm、桩长 30 m 的后注浆灌注桩为工程桩参数。

(3)经荷载-变形分析,摩擦型灌注桩经后注浆处理后单桩承载力发挥仍以侧阻力为主,但经后注浆处理后,解决了施工工艺带来的沉渣、泥皮等不利影响,单桩抗压承载变形由陡降形变为缓变形,沉降控制好,工程意义重大,实施的必要性充分。

(4)规范中的后注浆灌注桩单桩抗压极限承载力计算公式是经验公式,后注浆侧阻力增强系数 β_{si} 和端阻力增强系数 β_p 未按地区分类且取值区间大,取值依据相关项主要为成孔工艺和土层名称,经验参数匹配度相对低,桩基后注浆技术规范推广已达 10 年,该技术仍为建筑业 10 项新技术(2017 版)之

(2)野外钻探过程遇到复杂地层发生异常现象,可结合物探方法综合判定地层条件,进一步提高勘察成果的准确性,为基坑开挖支护设计和岩土利用、整治和改造方案分析与建议提供准确的岩土参数。

(3)本文总结的复杂地层岩土工程勘察钻探问题处理方法,对于在同类地层中勘探作业具有借鉴和参考作用。

参考文献:

- [1] 杜金云.泥晶灰岩地层孔壁坍塌掉块现象及处理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(8):51-52.
- [2] 常士骧,张苏民.工程地质手册(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [3] 李先经.滨海潮间带海上钻进冲孔与护壁技术措施[M].探矿工程,2001,(2):21-22.
- [4] JGJ 83—2011,软土地区岩土工程勘察规程[S].
- [5] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [6] 李先经,刘心起.滨海潮间带复杂地层条件下冲击成孔灌注桩塌孔事故的预防及处理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(8):35-35,50.
- [7] 崔文泰,等.中铁青岛世界博览城项目岩土勘察报告[R].青岛地矿岩土工程有限公司,2017.
- [8] JGJ/T 87—2012,建筑工程地质勘探与取样技术规程[S].
- [9] GB 51004—2015,建筑地基基础工程施工规范[S].

—^[10],倡议业界共享试桩成果及工程桩的静载验收成果,大数据背景下进一步开展区域性统计分析具有重要意义。

参考文献:

- [1] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
- [2] 刘金砺,等.建筑桩基技术规范应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 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.
- [4] 杜峰,王爱勋.武汉国际会展中心后压浆钻孔灌注桩施工[J].施工技术,2003,32(1):16-18.
- [5] 靳皓宇.钻孔灌注桩后压浆技术在武汉地区的应用[D].浙江舟山:浙江海洋大学,2017.
- [6] 陈飞.钻孔灌注桩后压浆技术的研究和应用[D].上海:同济大学,2007.
- [7] 陈飞,段新胜,方青春,等.钻孔灌注桩桩侧桩端后压浆技术在武汉瑞通广场的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1):29-31.
- [8] 吴文,刘跃峰,姜清华.武汉市桩基工程若干特征及试验研究[J].土工基础,2005,19(3):38-42.
- [9] 周伟,李惠强.钻孔灌注桩后压浆技术应用试验研究[J].华中科技大学学报,2001,29(7):115-117.
- [10] 王曙光,高文生,李耀良,等.《建筑业 10 项新技术(2017 版)》地基基础和地下空间工程技术综述[J].建筑技术,2018,49(3).