

钢管顶升混凝土配合比设计与施工技术研究

焦晓光¹, 郭向柯^{2a,b}, 李元可^{2a,b}, 梁金科^{2a,b}, 杜康武³

(1.甘肃第六建设集团股份有限公司,甘肃 兰州 730046;

2.兰州理工大学 a.甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室;b.西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050;

3.甘肃省建设投资(控股)集团总公司,甘肃 兰州 730050)

摘 要: 针对不同地区混凝土原材料的差异性,结合钢管混凝土运用泵送顶升浇筑法,提出基于甘肃地区原材料得到适合兰州地区的高强度自密实混凝土配合比。结合实际的工程案例,结果表明:自密实混凝土具有良好的可泵送性、较高的流动性和自密实性,能够满足钢管混凝土的施工要求;矩形钢管柱泵送顶升截至阀的设计,保证钢管混凝土连续、高效、快捷的施工;自密实混凝土和钢管可以有有效的结合在一起,从而保证了钢管内混凝土的密实性以及钢管与混凝土连接的可靠性。

关键词: 自密实混凝土;施工技术;钢管顶升;质量控制;工艺评价

中图分类号: TU528.062 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2018)12-0144-04

Study on mixture ratio design and construction technology of steel pipe lifting concrete

JIAO Xiaoguang¹, GUO Xiangke^{2a,b}, LI Yuanke^{2a,b}, LIANG Jinke^{2a,b}, DU Kangwu³

(1.Gansu Construction Group Co., Ltd. Lanzhou 730046, China;

2a.Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province;

b.Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education,

Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050, China;

3.Gansu Construction Investment (Holdings) Corporation Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the difference of concrete raw materials in different regions and the application of pumping top-rising pouring method for concrete filled steel tube (CFST), a new high-strength self-compacting concrete mixture based on the raw materials in the Gansu region was proposed. Combining with the practical engineering case, the results show that self-compacting concrete has good pumpability, high fluidity and self-compactness, which is meet the requirements of CFST construction. Rectangular steel column pumping up to the valve design to ensure continuous, efficient and efficient construction of CFST. Self-compacting concrete and steel pipe can be effectively combined. Thus ensuring the compactness of the concrete in the steel pipe and the connection of the steel pipe and the concrete.

Key words: self-compacting concrete; construction technology; pipe jacking; quality control; process evaluation

0 引言

钢管混凝土结构是在钢管内浇筑混凝土,将钢管与混凝土两种性质不同的材料组合形成的一种新型组合结构^[1-2]。随着施工技术的不断发展、施工经验的不断积累,钢管混凝土的施工工艺和施工方法日臻完善,钢管混凝土结构越来越多的应用到实际工程中去^[3-5]。但钢管内混凝土浇筑方法、柱内混凝土的强度、密实性也成施工中不可忽视的问题。

对于自密实混凝土,一些学者进行了相关的研究。吕兴军^[6]基于自密实混凝土技术规范,总结了国内外现有的配合比设计方法;汶向前^[7]在此基础上选择固定的材料、体积和强度对自密实混凝土相关性能进行研究,其具有一定的借鉴意义;冯庆华^[8]应用全计算方法修正原有的自密实

混凝土配合比,结果表明优化后的混凝土具有明显的抗渗性能;俞然刚^[9]在全计算方法的基础上,运用正交试验进一步研究胶凝材料、集料和外加剂等相关因素对自密实混凝土的性能影响,从而进一步优化配合比设计;陈波^[10]在正交试验的基础上,基于乌鲁木齐地区混凝土原材料配制自密实混凝土,结果得出适合本地区的自密实混凝土配合比。

然而,对于强度要求高的自密实混凝土,其对配合比、原材料及施工工艺都有较高的要求。我国地域辽阔,各地的混凝土原材料在一定程度上存在地区差异,而甘肃地区的混凝土原材料,例如兰州地区的天然砂具有潜在的碱活性,其性能具有一定的不稳定,这增加了实际工程施工过程中的不确定性。因此基于甘肃地区的高强度自密实混凝土的研究,具有一定实际意义。

收稿日期:2018-01-22

基金项目:甘肃省建设厅科研专项基金资助项目(JK2015-12);甘肃第六建设集团股份有限公司科研专项基金

为此,本试验采用兰州地区的混凝土原材料,结合钢管混凝土运用泵送顶升筑法,得到适合兰州地区的高强度自密实混凝土配合比,结合实际的工程施工案例,结果表明基于甘肃地区的原材料配制的自密实混凝土,具有自密实性高、微膨胀、良好的可泵性和流动性,从而保证矩形钢管混凝土柱内混凝土顺利浇筑、钢管柱内混凝土的密实性及混凝土与钢管的有效连接。

1 原材料与配合比设计

1.1 原材料

要保证钢管混凝土的顺利浇筑及施工质量,首要的是混凝土必须具有良好的可泵送性、较高的流动性、自密实性、较小的黏度和较长的缓凝时间,并防止出现离析泌水现象的发生,同时为了保证混凝土与钢管的有效连接,要求混凝土具有微膨胀性,确保钢管和混凝土联合形成一个整体受力构件。考虑实际工程的特点和施工要求,结合甘肃省混凝土原材料性能稳定性较差特点,因此其原材料经过合理的筛选。水泥采用祁连山生产的普通硅酸盐水泥(P·O 42.5),其比表面积小于 $350 \text{ m}^2/\text{kg}$,水泥矿物组成中 C_3A (铝酸三钙)含量小于 8%,碱含量 $<0.06\%$,氯离子含量 $<0.03\%$ 。粗骨料采用临洮粒径为 5~20 mm 连续级配且含泥量小于 1%的卵石,骨料的抗压强度不小于混凝土强度标准值的 1.3 倍。粗骨料针、片状颗粒含量不大于 10%,压碎指标值不大于 12%;细骨料使用颗粒外形状态接近圆形的中砂,且宜为质地坚硬、级配良好的临洮河砂,细度模数为 2.8,含泥量小于 1%,砂符合 GB/T 14684《建筑用砂》中 II 类砂的技术要求,掺合料采用兰州西固电厂生产的 II 级优质粉煤灰,以提高流动性,改善新拌混凝土和硬化后混凝土的各项性能,减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,减水率约为 24%,以改善高强混凝土的体积稳定性要求,膨胀剂采用 HPE 高效膨胀剂,以确保混凝土具有微膨胀的性能,水采用兰州地区的日常饮用水,符合 JGJ 63—2006《混凝土拌合用水标准》所规定的要求。

1.2 配合比设计

自密实混凝土配合比在确定前,参考相关文献 [11-15] 进行大量的关于外加剂和掺合料的试配工作,其中聚羧酸高性能减水剂及 HPE 高效膨胀剂引入,使混凝土具有补偿收缩性能。配合比试配试验严格按照钢管混凝土和自密实混凝土技术规程进行试配,通过优化原材料选择、合理确定砂率、水胶比,保证自密实混凝土具有较高的流动性和良好的可泵性,同时为了防止混凝土出现离析泌水的现象。因此需要在混凝土试配过程中,严格测量其各项指标,如图 1、2 所示。对于不符合要求的配合比给与剔除。课题组前期进行了 50 多组试配试验,根据试验结果与相关规范要求,选出其中 6 组混凝土配合比,如表 1 所示,实测不同配合比混凝土试验的相关参数见表 2。

钢管混凝土要求混凝土不仅能与钢管的有效连接,形成一个整体的受力体,而且要混凝土具有良好的性能。对于选出的 6 组混凝土配合比,对不同时段,扩展度都做了相

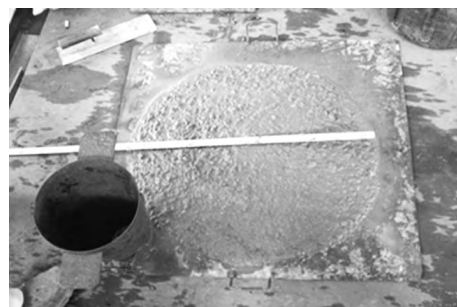


图 1 扩展度试验



图 2 坍落度试验

表 1 混凝土配合比

试件	水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料	水	减水剂	膨胀剂
X1	364	146	852	847	168	13.16	31.87
X2	364	146	832	867	168	13.16	31.87
X3	364	146	812	887	165	13.50	31.87
X4	375	141	822	867	168	13.16	32.14
X5	375	141	812	877	168	13.50	32.14
X6	375	141	842	857	168	13.50	32.14

表 2 混凝土的相关参数

试件	膨胀率 /‰	施工前扩展度 /mm	2 h 扩展度 /mm	离析率 /‰
X1	0.21	730	10	10
X2	0.23	720	5	5
X3	0.19	680	15	15
X4	0.23	700	15	10
X5	0.21	750	15	20
X6	0.20	740	20	15

应的测定,保证了到达现场的混凝土扩展度控制在 660~755 mm,2 h 扩展度损失小于 10 mm。在施工过程中,进场混凝土无泌水分层现象,其流动性、均质性、稳定性、保塑性能良好,限制膨胀率控制在 0.2‰~0.3‰之间,保证了自密实式混凝土自身及与钢管柱壁之间的密实性。由表 1、2 可知,X2 组混凝土的膨胀率与扩展度均符合要求,且其离析率最小。因此可以认为,X2 组混凝土为本次试验的最优配合比。

自密实混凝土试配结束后,对 X2 组试件测定其 7、28、60 d 的抗压强度,分别为 37.8、49.5、58.2 MPa。对于本次钢管混凝土结构,考虑到混凝土与钢管的密实性,要求此次的混凝土前期水化热作用较小,并且有一定的微膨胀效果。由 28 d 抗压强度为 49.5 MPa,60 d 强度为 58.2 MPa 可知,此次设计的 X2 组自密实混凝土在前期水化作用较小,能后满

足施工的要求,为钢管混凝土的结合及后期混凝土的微膨胀提供了可能。后期(28 d 点后)强度还在提高,最终其满足 C50 混凝土的抗压强度等级要求,因此可以认为本次自密实混凝土的配合比是合适的。

2 施工技术

2.1 主要技术路线

本研究结合具体的施工工程,考虑钢管混凝土特点,其主要施工技术路线为:收集相关资料积累→确定混凝土施工方法(泵送顶升)→通过试配进行高强自密实混凝土配合比的设计→钢管柱内设计内隔板及屈曲约束支撑节点的优化研究→进行工艺试验、确定泵送顶升工艺参数→设计加工泵送顶升截止阀→泵送顶升施工工艺研究及工艺优化(布管优化、施工组织、顶升监控、质量控制、质量检测)→成果验证及顶升工艺总结。

结合矩形钢管柱及屈曲约束支撑节点内部构造,研究矩形钢管柱内部构造节点优化,并通过试验确定泵送顶升混凝土工艺参数、加工设计泵送顶升截止阀、优化泵送顶升布管、压力及视频监控等措施,以解决矩形钢管柱泵送顶升施工技术难题及混凝土与钢管界面密实性技术难题。

2.2 施工技术比选

甘肃科技馆建设项目主体结构采用钢梁-钢管混凝土混合框架-屈曲约束支撑结构,建筑总长度为 168 m,宽度为 81 m,建筑总高度为 37.4 m,每层竖向支撑体系由 86 根矩形钢管混凝土柱组成。其中圆形钢管柱,矩形钢管柱内部节点复杂多变,且矩形钢管柱本身抵抗侧向变形能力较差,对柱内混凝土浇筑技术要求相对较高。根据本工程设计文件钢管混凝土采用 C50 自密实补偿收缩混凝土,然而在施工过程中,如何保证矩形钢管混凝土柱内混凝土顺利浇筑、确保钢管柱内混凝土的密实性,并掌握有屈曲约束支撑节点的大截面矩形钢管柱混凝土施工技术是目前阶段施工面临的最紧要问题。

作为较为成熟的施工技术,钢管混凝土浇灌方法可分为以下 3 种:

- (1) 泵送顶升浇灌法。
- (2) 立式手工振捣法。
- (3) 高位抛落无振捣法。

3 种方法的适用范围及优缺点各不相同,其中高位抛落法具有施工效率较高无振动无噪音的优点,其钢管分段浇筑,利用混凝土从高位顺钢管下落时产生的动能,进而达到振实混凝土的效果,但其占用塔吊,与钢结构吊装作业冲突,高抛下落高度不能过大(规范要求不超过 9 m),因混凝土材料因素影响,在设计内隔板底部施工质量不易保证,混凝土不易密实,手工振捣法作为传统的作业方式,施工效率较低,且其质量受振捣操作人员影响,因此逐渐被现代施工技术所取代,泵送顶升浇筑法,是利用混凝土输送泵的泵送压力将自密实混凝土由钢管柱底部灌入,从上向下流动,直至注满整根钢管柱的一种混凝土免振捣施工方法,质量有保障,不占用塔吊的优点。结合本工程

设计文件、钢管柱内具体节点构造特征及甘肃地区材料特性,为确保柱内混凝土的顺利浇筑,保证柱内混凝土密实性,有屈曲约束支撑截面矩形钢管柱混凝土浇筑须采用自密实混凝土泵送顶升施工技术。

2.3 泵送机械、混凝土运输车辆配备

根据本工程的实际情况,同时考虑泵管的尺寸与布置、均匀流动所需克服的阻力、泵送的速度、混凝土特性等选择泵送机械,既要满足以上泵送距离要求,又要合理配制资源。最终选用中联重工生产的 HBT5121 高压混凝土车载柴油泵进行混凝土顶升施工,泵管选用直径为 125 mm 的高压泵管,理论混凝土输送压力为 6~12 MPa。浇筑前计算好每个单元柱混凝土量,所需混凝土运至施工现场后方可顶升,保证柱内混凝土顶升施工的连续性,防止混凝土在运输过程中耽搁造成顶升中断,且现场混凝土罐车不能积压过多。

2.4 矩形钢管柱泵送顶升截止阀设计

为防止钢管柱内混凝土顶升施工完成时,在拆除输送管时混凝土出现回流现象,按照工艺标准应在钢管柱外侧焊接截止阀,一端伸入钢管柱内与钢管柱焊接,另一端与输送泵管连接。但是该工艺对混凝土浪费较大,且施工速度较慢^[16-18]。通过相关研究,在距钢管柱底 500 mm 高侧壁,开设 $\phi 125$ mm 的进料孔,在进料口与泵输送管之间通过螺栓连接,安装一个由项目部自行设计加工可周转的闸板式截止阀,以防止在拆除输送管时混凝土回流。为防止在混凝土泵送顶升浇筑过程中闸板缝漏气,需用黄油涂缝,或者加设一个密封圈垫在闸板缝内,如图 3 所示。混凝土泵送顶升浇筑结束后,控制泵压 2~3 min,然后略松闸板的螺栓,关闭止流闸板,即可拆除混凝土输送管,转移到另一根钢管柱浇筑。其中钢管内核心混凝土强度达设计值的 70% 后切除连接短管,并补焊洞口管壁,补洞用的钢板采用原开洞时切下的。最后进行表面相关磨平并补漆。



图 3 钢管混凝土顶升截止阀

3 施工质量控制

3.1 自密实混凝土控制

顶升前,必须对到场的每车混凝土进行和易性检查,测定混凝土坍落度、扩展度。避免混凝土在搅拌合物运输过程中导致外沿泌浆和中心骨料堆积现象,出现离析、泌水和分层等现象,因此施工前对混凝土坍落度和扩展度进行检测,要求入泵坍落度在 25~27 cm 和扩展度在 60~755 mm 之间,同时在顶升入口处扩展度不低于 650 mm,对于检查不合格混凝土要坚决退场处理。

3.2 矩形钢管柱混凝土泵送顶升施工及质量控制

钢管柱混凝土泵送顶升施工前需完成钢柱验收合格,并办理相关交接手续,清除钢柱顶升腔内杂物;平板式截止阀安装完毕,泵管铺设就位并进行密封性检查。每次浇筑前先对管线的布置做严密性检查,尽量减少泵管弯头的数量和接头处的漏浆、漏气现象,以减少压力损失。浇筑时,首先计算好每个单元柱混凝土量,待所需混凝土全部运至施工现场后方可顶升,防止混凝土在运输过程中耽搁造成顶升中断。在混凝土输送管与截止阀连接前,先泵送砂浆进行润滑,待砂浆泵送完毕,泵管口流出混凝土后再把泵管与截止阀用套箍连接好。混凝土顶升到位后,先让混凝土自由下沉 2~3 min 左右,及时关闭截止阀。经过回抽后再拆除截止阀后靠近混凝土泵端的输送管,待混凝土终凝后再拆除截止阀。每段钢管柱的混凝土浇筑到离钢管顶端 500 mm 处,以防止接柱对接时,焊接高温影响柱内混凝土的质量。每节钢管柱浇筑完毕,应清除表面的浮浆,待混凝土初凝后灌水养护,用塑料布将管口封住,并防止异物掉入。非特殊要求的钢管柱内混凝土不需振捣,以防堵管,进料短管管口以下部分混凝土靠自由下落填满,可在钢管柱外部振捣以保证混凝土自然密实,时间控制在一分钟以上。

在泵送顶升过程中,严禁反泵,在更换车辆时要保证泵压连续。泵送时,料斗内混凝土不得少于其容量的 2/3,以免在泵送过程中吸入空气。同时,顶升速度控制在 0.5 m/min 左右,该速度与钢管柱尺寸和泵的排量有关。顶升的速度不宜过快,应根据排气孔的出浆情况控制顶升速度。根据工艺试验泵送压力控制在 6~12 MPa 左右。

4 施工工艺评价

本工程所在地钢管混凝土浇筑类似施工经验相对较少,且各地区混凝土原材料性能存在一定的差异,施工前项目部了解相关工艺标准及省内同类工程的相关案例,提前掌握各项操作要点、关键控制点,为正式施工做好各项技术准备。在钢管柱混凝土正式浇筑之前,首先进行顶升工艺评定试验,以确定泵速、流量、泵压,并对柱内混凝土顶升采用摄像头及笔记本电脑全过程监控,如图 4 所示,以确保实际施工中通过工艺控制保证内部混凝土密实度。在顶升施工过程中专人记录输送泵的压力情况,与理论计算值进行比对,为后续施工提供经验数据。

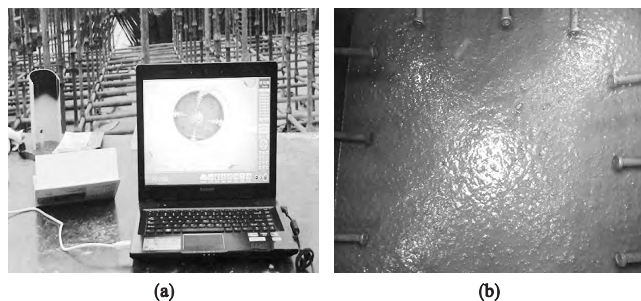


图 4 混凝土泵送监控视频

钢管柱内混凝土的浇筑为隐蔽工程,对其工艺进行评价,一是敲击法全面检测。敲击法是利用敲击钢管外壁,根

据声音的不同进行判断,该方法简单,但也十分有效;二是对敲击有异议的局部钻孔检测,确定缺陷程度。这是最为直观的方法,可以直接观察到钢管壁与混凝土的黏结情况及混凝土内部是否密实;三是超声波无损检测,钢管混凝土浇筑完成并待混凝土达到一定强度后,方可进行超声波检测。

以上 3 种方法各有优劣,钢管混凝土浇筑质量可以采用敲击钢管的方法进行初步检测,若有异常,应采用超声波检测手段,对于不密实的部位,应采用钻孔补浆的方法进行补强,然后将钻孔补焊封闭。对于本次钢管混凝土结构,实际的工程需要采用超声波无损检测。钢管混凝土浇筑完成一段时间后,由甘肃土木工程研究院进行超声波无损检测,发现首波未发现畸变现象,波形良好且较为完整。结果表明混凝土与钢管结合良好,柱内密实性满足要求,即钢管与柱内混凝土有效的连接在一起。因此可以认为本次采用的自密实混凝土配合比与施工技术能够很好的融合起来,从而为自密实混凝土的配制及钢管混凝土施工提供一定借鉴意义。

5 结论

本研究基于甘肃地区的混凝土原材料,基于钢管混凝土运用泵送顶升浇筑法,结合实际的工程施工技术,其主要结论如下:

(1) 基于甘肃地区混凝土材料的特性,通过对自密实混凝土的配合比研究,得到各项工作性能良好,满足泵送顶升施工要求的自密实混凝土。

(2) 结合钢管混凝土的特点及实际施工需求,解决了有屈曲约束支撑的大截面矩形钢管柱混凝土的浇筑方案的比选问题,同时,矩形钢管柱泵送顶升截止阀的设计,避免了钢管柱内混凝土顶升施工完成时出现回流现象,从而确保钢管柱混凝土泵送顶升施工连续、高效、快捷施工。

(3) 通过对施工质量的控制,积累钢管混凝土泵送顶升施工工艺经验,同时对顶升施工工艺进行了改进(优化矩形钢管柱内部节点、试验确定泵送顶升工艺参数、自主设计工具式可周转泵送顶升截止阀、设置柱侧壁浇筑观测孔),有效的保证有屈曲约束支撑节点的大截面矩形钢管柱混凝土泵送顶升施工技术的可控制性、可操作性,保证了柱内混凝土的密实性、与钢柱连接的可靠性。

(4) 基于无损检测对钢管混凝土进行检测,首波未发现畸变现象,波形良好且较为完整,表明本次采用的自密实混凝土与施工技术能够很好的融合起来,从而为自密实混凝土的配制及钢管混凝土施工提供一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 向琴琴,凌辉强,董超,等.钢管混凝土结构钢管选用和适用标准研究[J].工业建筑,2016(增刊 II).
- [2] 王世伟.钢管混凝土结构的特性和研究现状[J].安徽建筑,2003,10(3):64-66.
- [3] 杨勇,龚志超,邓辉,等.钢管混凝土十字形截面柱耐火性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(12):88-96.

·下转第 152 页

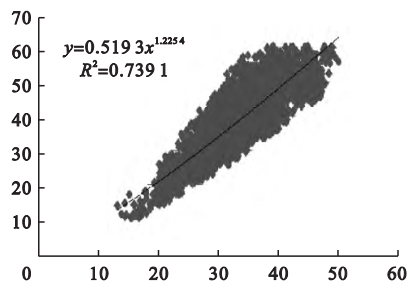


图5 本研究建议方法拟合曲线

表7 规程法和本研究建议方法拟合的强度推定值与实际试压强度相对误差和相关系数

比较内容	相对误差 /%	相关系数
规程法	10.380 0	0.748 6
本文建议方法	10.440 0	0.739 1

数形式相同。

(2)两种方法得到的拟合曲线相关系数较大,且非常接近。

(3)两种方法拟合曲线得到的强度推定值与实际试压强度的平均相对误差均在11%以内,且二者也极为接近。

5 结论

(1)对已有标准试验试件的16个回弹值取前10、后10、中10个,从中剔除1个较大值、1个较小值,剩余8个有效回弹值取平均的回弹代表值与规程法的回弹代表值的相对误差平均值均较小,基本在2.1%以内。

(2)取测区上的16个回弹值、规程法回弹值和本文建议方法的回弹值,三者回弹值数据的正态分布曲线的形状基本一致,均值和标准差极为接近。

(3)规程法和本研究建议方法得到的拟合曲线形式一致,相关系数基本相同,强度推定值与实测强度值的平均

相对误差基本相同。

基于上述结论,本研究建议在实际应用超声回弹综合法检测混凝土强度时,将现行规程CECS 02:2005《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》中回弹的取值规定改为:每个测区测点数降低至10个回弹值,从中剔除1个较大值、1个较小值,剩余8个有效回弹值取平均值,这样不仅能保持监测精度,还能降低现场工作量,提高综合法检测混凝土强度的操作性。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会标准.超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程 CECS 02:2005[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.回弹法检测混凝土抗压强度技术规程 JGJ/T 23—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 张显军.超声回弹综合法评定构件混凝土强度的研究[D].黑龙江:东北林业大学,2007:1-8.
- [4] 佟成娥.超声回弹综合法在结构混凝土检测中的运用[J].无损探伤,2008,32(3):45-46.
- [5] 罗春玲.正态分布的性质及运用[J].科技天地,2010:64-66.
- [6] 于文学,刘洋.超声回弹综合法检测混凝土抗压强度曲线的建立[J].黑龙江交通科技,2007,12(92):54.

第一作者:杨梦虹(1993-),女,硕士研究生,研究方向:建设工程安全性能检测鉴定及加固。

联系地址:云南省昆明市呈贡区景明南路727号昆明理工大学建筑工程学院(650500)

联系电话:14787832327

通讯作者:刘利先(1971-),女,副教授,主要研究方向:建设工程安全性能检测鉴定及加固。

联系电话:18787480092

工业建筑,2012,42(1):144-148.

[13]张海伟,李统彬,蔡庆晓.矿粉和粉煤灰在超高层泵送混凝土中的应用[J].广东建材,2008(12):42-44.

[14]孙庆巍,周梅,陈健.减水剂的品种和掺量对预拌混凝土坍落度/扩展度经时损失的影响[J].硅酸盐通报,2012,31(2):469-474.

[15]黄舜杰.混凝土外加剂配合比的设计分析[J].混凝土,2013,10(2):133-135.

[16]邓伟华,武超,周杰刚,等.武汉中心混凝土超高泵送关键施工技术[J].施工技术,2015,44(23):23-26.

[17]梁谦,李小飞,程建萍,等.不同掺量粉煤灰对泵送混凝土性能影响的研究[J].河西学院学报,2015,31(2):133-135.

[18]蒋正武,潘微旺,李享涛,等.泵送顶升钢管拱自密实混凝土施工技术[J].建筑技术,2011(2):134-137.

第一作者:焦晓光(1967-),男,高级工程师。

联系地址:甘肃省兰州市七里河区兰西湖街道工坪287号兰州理工大学(730050)

联系电话:17739339344

·上接第147页

[4] 项凯,潘雁种,赵璧,等.受火冷却后钢管混凝土叠合短柱轴压力学性能试验研究[J].西南交通大学学报,2017(6).

[5] PARK J H, JO B W, YOON S J, et al. Experimental investigation on the structural behavior of concrete filled FRP tubes with/without steel re-bar[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2011, 15(2): 337-345.

[6] 吕兴军,丁言兵,曹明莉.自密实混凝土配合比设计研究进展[J].混凝土,2013(8):105-109.

[7] 汶向前,王稷良,单俊鸿,等.自密实混凝土配合比设计方法的对比试验研究[J].混凝土,2011(12):103-105,115.

[8] 马庆华,程刚,马慧娟.自密实高性能混凝土配合比优化设计及计算探讨[J].混凝土,2017(10):131-134.

[9] 俞然刚,陈金平,肖光辉,等.自密实混凝土配合比设计及其正交试验研究[J].工业建筑,2005(S1):691-694.

[10] 陈波,刘清,何原野.乌鲁木齐地区C30自密实混凝土配合比的正交试验研究[J].工业建筑,2013,43(3):93-96.

[11] 程伟峰,何金荣,林星平.长时间运输高性能泵送混凝土配合比优化措施研究[J].武汉大学学报,2014,47(1):59-64.

[12] 叶琼,何亚伯.某超高层建筑C60高性能混凝土超高泵送参数[J].