

装配式剪力墙灌浆饱满度定量控制施工工艺

李胡兵^{1a}， 肖同亮^{1a,2}， 刘 贺^{1a}， 偶伟冰^{1a}， 黄理想^{1b}， 陈必勇²

(1. 南京工程学院 a. 建筑工程学院; b. 能源与动力工程学院, 江苏 南京 211167;
2. 南京栖霞建设股份有限公司, 江苏 南京 210037)

摘 要: 钢筋套筒灌浆饱满度是评价钢筋套筒灌浆质量的重要指标, 决定着装配式结构的整体可靠性。传统施工中, 采用橡胶塞封堵注浆与出浆孔的预制剪力墙, 常存在浆料不饱满的现象, 且具有灌浆质量难以检验的特点。鉴于施工技术和检测手段的局限, 本文在微重力流补浆观察管结构基础上, 提出一种剪力墙灌浆饱满度定量控制的施工工艺, 以保证灌浆质量和改善施工环境。通过一种灌浆泵车设置时间与流量参数, 输出一定的灌浆料; 在剪力墙注浆口设置一种灌浆控制管, 及时封堵注入剪力墙的灌浆料; 在出浆口设置一种透明储浆观察筒, 通过筒内浆料的高度可了解剪力墙内部是否存在缺陷, 得到套筒灌浆施工质量的定量控制。最后分析了液面高度产生偏差的原因并补充了相应解决措施。

关键词: 装配式剪力墙; 套筒灌浆; 饱满度; 定量控制; 施工工艺

中图分类号: TU755.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0168-06

Construction Technology of Quantitative Control of
Grouting Plumpness of Prefabricated Shear Wall

LI Hu-bing^{1a}, XIAO Tong-liang^{1a,2}, LIU He^{1a}, OU Wei-bing^{1a}, HUANG Li-xiang^{1b}, CHEN Bi-yong²
(1. a. School of Architecture Engineering; b. School of Energy and Power Engineering,
Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. Nanjing Chixia Development Co Ltd, Nanjing 210037, China)

Abstract: Plumpness is an important index for evaluating the quality of steel sleeve grouting, which determines the overall reliability of the prefabricated structure. In the traditional construction, the prefabricated shear wall which uses rubber plug to block the grouting and grout hole often has the phenomenon that the grout is not full and the grouting quality is difficult to test the grouting quality. In view of the limitation of construction technology and detection means, this paper proposes a construction technology of quantitative control of grouting plumpness of shear wall on the basis of micro gravity flow grouting observation pipe structure to ensure the grouting quality and improve construction environment. This technology can output certain grouting slurry through setting time and flow parameter of a grouting pump truck. A grouting control pipe is set at the grouting port of the shear wall to block the grouting slurry injected into the shear wall in time. A kind of transparent slurry storage observation cylinder is set at the slurry outlet. Through the height of slurry in the cylinder, we can know whether there is any defect in the shear wall, and get the quantitative control of the construction quality of sleeve grouting. Finally, the causes of the deviation of the liquid level are analyzed and the corresponding solutions are added.

Key words: prefabricated shear wall; sleeve grouting; plumpness; quantitative control; construction technology

收稿日期: 2019-08-09 修回日期: 2019-11-27

作者简介: 李胡兵 (1997-), 男, 江苏连云港人, 研究方向为预制装配式混凝土结构 (Email: 911157690@qq.com)

通讯作者: 肖同亮 (1982-), 男, 江苏连云港人, 博士, 副教授, 研究方向为预制装配式混凝土结构、新型结构材料抗震 (Email: xtl@njit.edu.cn)

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金 (17KJB560005); 南京工程学院创新基金重大项目 (CKJA201806); 南京工程学院大学生科技创新基金 (TB20190961)

装配式建筑具有提高劳动效率、环保节能等优点,适应我国当前劳动力成本攀升、环保压力加大的国情,是建筑业转型的发展方向^[1]。预制装配式剪力墙结构在建造过程中竖向构件安装往往采用湿式连接,即在约束边缘构件和预制剪力墙连接处采用现浇混凝土连接,而剪力墙竖向钢筋一般采用套筒连接,并在现场对接后注入无收缩灌浆材料作为连接钢筋的粘结材料,保证荷载传递的连续性。然而,在实际的施工中,由于施工工艺的复杂性和套筒连接数量较多,在套筒的灌浆质量上难以确保所有套筒的饱满度都能达到规范要求,在灌浆施工过程中时常发生漏浆的情况,导致纵向受力钢筋的连接质量不能得到保证,从而影响整个结构的受力性能和抗震性能^[2,3]。

由于套筒灌浆属于隐蔽工程,目前其饱满度检测的方法大都采用破坏性抽查检测,即将灌浆位置切开,直接观察套筒内浆料的饱满度。而在无损检测方面目前针对部分工况虽然可以得出一些结论^[4,5],但在复杂工况下的工程实用性一直受到技术、经济等多方面的制约,无法推广普及,因此还没有较为通用且可靠的检测手段。便携式 X 射线方法可有效检测单排设置钢筋套筒灌浆接头且较小厚度(≤230 mm)的混凝土构件,但对于双排放置套筒的连接节点或较厚(>230 mm)的单排放置套筒连接节点,需进行微破损措施后方可解决问题^[6]。扫描式冲击回波法在一些仅有单一测试面的装配式混凝土结构中实用性很强,因结构的多样性及金属波纹管的复杂性仍需大量研究分析^[7]。

钢筋连接套筒灌浆的质量问题一直是装配式建筑研究的焦点,现有检测技术常存在局限性,控制灌浆质量主要靠灌浆工艺改进和过程监测。但目前仍缺乏控制施工质量的规范和标准,且人为因素影响较大,往往难以保证套筒灌浆连接质量。因此本文在对现有施工技术及理论的思考下提出一种灌浆定量控制的施工工艺以保证灌浆质量,同时可得到对施工质量的评价指标。

1 传统技术

常见预制剪力墙设有两排孔道,灌浆施工须在规定时间内完成,且应分区依次进行灌浆。先用橡胶塞封堵下排注浆孔,留出 1 个插入灌浆泵嘴进行注浆,上排出浆孔全部处于打开状态,待浆料从上方出浆孔流出时,逐个封堵,灌浆过程中不能中断^[8]。灌浆结束后及时拔出灌浆泵嘴,用胶

塞塞住注浆孔,半个小时后检查灌浆情况,如存在灌浆不饱满的情况,需采用手动二次灌浆后方可进行封堵记录。

现有工程实际及试验^[9,10]表明,顶部出浆孔位置常有浆料不饱满现象发生。若灌浆泵嘴拔出前持压不充分,浆料未灌满剪力墙中缝隙,则灌浆结束后浆料继续流动至填满缝隙,顶部灌浆料发生回流沉降导致缺陷。各套筒出浆口浆料回流与空隙特征有关,具有随机性。灌浆结束后从注浆孔拔出灌浆泵嘴时,若封堵注浆口不及时导致漏浆较多,同样会导致套筒内浆料回流^[11]。如图 1,即使在灌浆结束的第一时间用锤子将事先准备的胶塞砸入注浆与出浆口,但仍有一部分浆料漏出。



图 1 胶塞封堵注浆、出浆孔

2 微重力流补浆观察管结构

在前述剪力墙结构灌浆缺陷问题的基础上,郭正兴等^[12]提出一种微重力流补浆观察管结构,如图 2 所示。于出浆口上方设置不封堵的补浆观察管,同时管内液面应设置高于出浆孔液面一段距离以形成浆液微重力流。

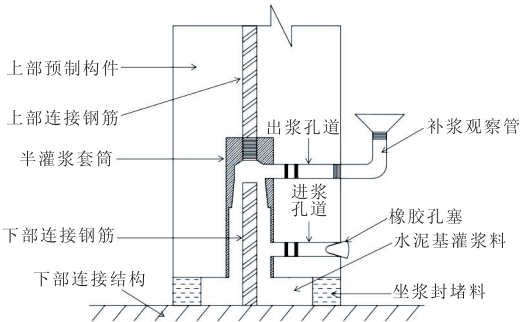


图 2 微重力流补浆观察筒结构

灌浆完成后,灌浆料在短时间内仍保有一定流动度,在自身压力作用下沉降,在灌浆套筒顶部液面下降时观察管结构可完成自我补浆,同时观测管内较出浆口高的液面方便工人观察和补浆,确保灌浆密实度和饱满度。微重力流补浆观察管

是一种灌浆质量无损检测手段,只要在灌浆施工过程中观察补浆观察管液面,就能间接了解内部灌浆质量,保证套筒灌浆的饱满度,同时也是一种适用于工地的可靠灌浆质量检测手段。图 3,4 为在大地建设集团参观拍摄,所示剪力墙即应用了补浆观察管结构。



图 3 集中约束搭接连接剪力墙



图 4 在观察管下方用筒接住溢出的浆料

但是该结构仅考虑了剪力墙内部灌浆料的饱满度,不能确定内部是否存在缺陷;注浆口采用传统胶塞封堵,容易流失浆料;需时刻观察出浆口来判断是否完成灌浆;施工环境仍待优化,施工过程受人为因素影响较大。

3 灌浆饱满度定量控制

基于微重力补浆技术并经过改进,本文提出了一种灌浆饱满度定量控制装置与施工检验方法。

3.1 灌浆饱满度定量控制结构

如图 5~7 所示,通过螺纹连接,在剪力墙注浆口设置一种灌浆控制管,其内部外侧构造为内小外大的圆台且与泵嘴适配,泵嘴管道末端越过垂直挡板靠近剪力墙。管身侧面设有阻断板,存放时阻断板旋进管道,滑动条移至滑动槽使其固定在内侧。灌浆时旋出阻断板,灌浆泵车泵嘴推入泵嘴管道将浆料注入,阻断板可置于泵嘴边缘,待灌浆结束拔出泵嘴后将其旋进管道封堵灌浆料,最后利用滑动条固定阻断板即可。

利用螺纹同时在剪力墙出浆口设置一透明储浆观察筒(图 8),灌浆后剪力墙溢出多余的灌浆料储存于筒内。此时先记下停止灌浆后筒内液面

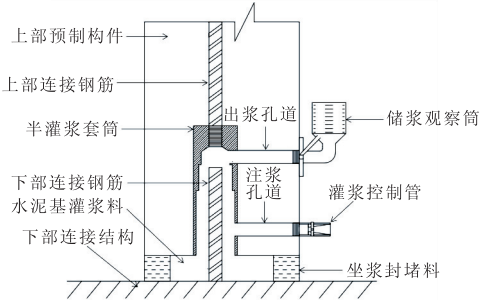


图 5 定量灌浆控制结构

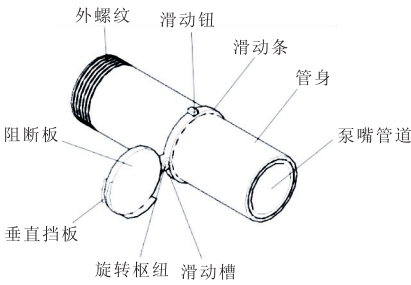


图 6 一种灌浆控制管

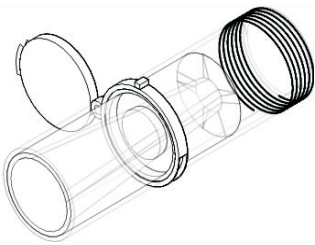


图 7 一种灌浆控制管透视结构图

高度的刻度值,待沉降回流结束后再次读取其液面高度数据,通过计算出回流灌浆料的体积,反映灌浆料的饱满度、剪力墙内部是否存在缺陷等指标,从而了解施工质量并根据其采取相应措施。

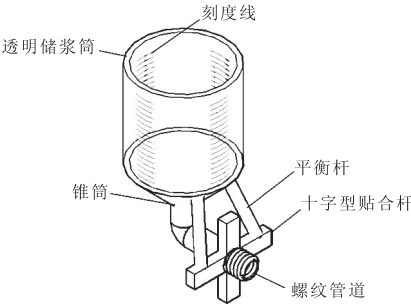


图 8 一种储浆观察筒

3.2 灌浆饱满度定量控制施工方法

使用一种可定时变流调节灌浆泵车,对一种特定的剪力墙灌浆时,需提前对其进行预灌浆试验,根据套筒灌浆饱满时所需灌浆料的理论体积 V_0 结合预灌浆结束灌浆泵车时间 t 的流量参数 Q ,确定合理的灌浆泵车输出参数。

理想状态下输出量 V :

$$V=Qt$$
 (1)

在流量和时间一定时,灌浆泵车输出灌浆料

体积 V 确定,要求剪力墙灌浆达到饱满后溢出多余浆料至储浆观察筒,以供灌浆料沉降补浆并作为灌浆施工质量的评价指标。

$$V=V_0+V_1+V_2 \tag{2}$$

式中: V_0 为剪力墙内部灌浆料体积; V_1 为剪力墙外部除观察筒内的灌浆料体积; V_2 为观察筒内灌浆料体积, $V_2=(\pi d^2/4)h$, d 为观察筒的内直径, h 为筒内液面高度。

结合式(1)(2)有:

$$Q_t=V_0+V_1+V_2 \tag{3}$$

$$G=V-V_1=Q_t-V_1=V_0+V_2 \tag{4}$$

式中: G 为定值。

预灌浆结束后,记录灌浆泵车工作参数,对正式灌浆中相同规格的剪力墙,可参考之前的试验数据,保证泵车输出相同体积的灌浆料。

灌浆时,设置灌浆泵车参数,将泵嘴伸入控制管,开始灌浆,设定时间结束后灌浆泵车停止工作,拔出泵嘴,旋转阻断板封堵内侧灌浆料。

由式(4)可知 G 一定时, V_0 、 V_2 成负相关,剪力墙内部灌浆料体积 V_0 变化的同时将对 V_2 产生影响, V_2 的变化表现为观察筒内液面高度的改变。

$$\Delta V_0+\Delta V_2=0,\Delta V_0=-\Delta V_2 \tag{5}$$

施工质量通过观察筒内液面高度 h 反映,灌浆结束应记录液面数据,与预灌浆进行对比若与预期相差较大,需查明原因并处以相应措施;待灌浆料停止沉降,记录回流后数据,通过对比两次记录可计算出回流灌浆料的体积。与此前剪力墙灌浆的最终数据进行对比,若差值在一定范围内则满足要求,否则施工存在问题,应及时解决。

预制剪力墙的灌浆须一次性完成,不可间断。由于溢出的灌浆料被储存,施工现场环境得到改善,同时避免了灌浆料的浪费。

4 偏差原因分析与解决措施

但在实际施工中,由于人为因素、施工环境及灌浆措施等原因,观察筒内液面高度常存在偏差 Δh 。

$$\Delta h=\Delta V/(\pi d^2/4)=4\Delta V/(\pi d^2) \tag{6}$$

若偏差范围较小,可不予考虑;若出现较大浮动,则表明存在不符规范的施工或存在质量隐患的情况。以下分别讨论灌浆料体积表现偏差的几种成因并提出了相应措施。

4.1 观察筒数据偏差原因分析

取观察筒内标准高为 h_0 ,则观察筒数据偏差 h_n 为:

$$h_n=h-h_0 \tag{7}$$

式中: h 为灌浆后观察筒内液面高。

(1)剪力墙内部存在缺陷引起的偏差 h_1

剪力墙内部可能存在凹凸不平等缺陷造成观察筒内液面高度变化。构件出厂及进场时应仔细检查验收,不符合要求的不予接收。

(2)剪力墙内部存在灰渣、石子等杂物引起的偏差 h_2

剪力墙内部存在灰渣、石子等杂物,表现为观察筒内液面上升,由式(6)得 $h_2=4V_3/(\pi d^2)>0$,其中 V_3 为灰渣、石子的体积。

须采用前馈控制,构件出厂检查和进场验收时,检查套筒内部是否有堵塞,如发现堵塞及时清除。构件吊装就位前仔细检查连通腔位置是否有杂物,连通腔周边封堵前再次检查连通腔内是否有杂物。灌浆前借助空压机全数通气检查最后确认套筒内部是否存在堵塞。

(3)剪力墙内部缝隙未被浆料填满引起的偏差 h_3

灌浆结束前,若灌浆泵嘴拔出前持压不充分,剪力墙内部缝隙未被浆料填满,表现为观察筒内液面上升, $h_3>0$ 。持压不充分,内部缝隙未填满造成数据偏差的情况,可通过储浆观察筒内的灌浆料在自身压力作用下实现回流补浆,对灌浆质量影响不大,可等待沉降回流后检测偏差是否满足在一定范围内。

(4)灌浆结束后因灌浆装置构造发生回流沉降引起的偏差 h_4

$h_4=4V_4/(\pi d^2)>0$, V_4 为灌浆控制管回流体积。

(5)灌浆结束后从注浆孔拔出灌浆泵嘴时,封堵注浆口不及时导致漏浆较多引起的偏差 h_5

灌浆结束后从注浆孔拔出灌浆泵嘴时,封堵注浆口不及时将导致漏浆较多,表现为观察筒内液面下降, $h_5<0$ 。应改进封堵方法及加强对灌浆技术人员的交底工作,在施工过程中进行监督确保及时封堵浆料。

(6)剪力墙底部封堵不密实,灌浆过程中漏浆引起的偏差 h_6

剪力墙底部封堵不密实,灌浆过程中漏浆,表现为观察筒内液面下降, $h_6<0$ 。发现灌浆料泄露的情况应及时封堵漏浆口,检查观察筒内液面高度,若较一般情况下降较多应往筒内填补灌浆料,并后续持续观察其状态。

4.2 观察筒数据偏差可能的原因

上述的 6 项偏差,它们有的只发生在灌浆结

束后,有的两个阶段均有。

取灌浆结束后液面高 h' , 沉降回流后液面高 h'' , 则 $\Delta h' = h' - h_0$, $\Delta h'' = h'' - h_0$, $\Delta h \propto d^{-2}$ 。 ΔV 一定时, Δh 与 d 成负相关, 可通过改变 d 来调节观测精度。

为了便于分析与查明原因, 将各种情况列于表 1。

表 1 各阶段偏差可能性

阶段	液面高度偏差	因素	表现
灌浆结束后 (第一阶段)偏差	$\Delta h' > 0$	h_1, h_2, h_3, h_4	$\Delta h' > 0$
	$\Delta h' < 0$	h_1, h_5, h_6	
沉降回流后 (第二阶段)偏差	$\Delta h'' > 0$	h_1, h_2	$ \Delta h'' \leq \delta$
	$\Delta h'' < 0$	h_1, h_5, h_6	

注: δ 为 h 允许波动范围, 应根据剪力墙规格、施工要求及观测精度确定; $h_1 \sim h_6$ 中 h_5, h_6 为灌浆料损失影响, 确定了该值即可通过式(6)计算出损失量 V

灌浆结束后(第一阶段)由于 $h_3, h_4, \Delta h'$ 通常表现为 > 0 (高出标准高); 第一阶段仅作参考, 应以第二阶段数据为施工质量评价指标, 即要求满足 $|\Delta h''| \leq \delta$ 。

根据两阶段观察筒内液面高度的数据, 若有偏差, 可分别判断产生的原因, 从后向前逐一排查。通常偏差是一种或几种因素的组合, 应选择主要因素作为对象处以相应措施。若在第二阶段, 发现 $\Delta h'' < 0$, 可能为 h_1, h_5, h_6 中某一种因素或几种因素组合的结果, 也可能为 h_1, h_5, h_6 与 h_2 综合组合的结果。但主要影响因素应为 h_1, h_5, h_6 中一种或几种。首先检查 h_6 , 是否存在产生 h_6 的底部漏浆情况, 若未发生泄露, 可排除; 再检查 h_5 , 封堵浆料不及时, 观察注浆口处情况。若后两种均未发生, 则可判定为 h_1 影响, 其他阶段发生的情况可类比此排除法检查判定。

5 结 论

本文针对剪力墙灌浆施工质量存在的主要问题, 分析传统施工中存在的缺点, 在微重力流补浆结构的基础上进行改进, 并提出灌浆饱满度定量控制的措施。通过对注浆口、出浆口及灌浆泵车的控制, 进而对灌浆料进行定量控制, 可检测灌浆饱满度及施工是否存在缺陷等情况。

(1) 在传统灌浆施工过程中, 由于需要泵嘴完全拔离注浆口后方可塞入胶塞, 易流失灌浆料。采用橡胶塞封堵注浆、出浆孔的结构下方流失灌浆料后, 易在出浆口顶部形成缺陷, 需要二次补灌, 施工复杂, 对灌浆质量影响较大; 采用微重力

流补灌观察管结构, 在一定程度上解决了传统出浆孔顶部出现的缺陷, 但不易控制输出的浆料量或易造成浪费。

(2) 在灌浆施工中用可定时变流调节灌浆泵车实现对灌浆料的定量控制, 灌浆完成后通过灌浆控制管可快速封堵浆料, 观察筒储存溢出剪力墙的多余浆料可用作后续回流补浆。通过观察筒内液面高度数据可有效排查剪力墙内部是否存在缺陷、了解封堵注浆孔流失灌浆料体积等情况, 可分析判断灌浆施工质量并根据其采取相应措施。

(3) 本文提出的灌浆控制管通过旋转阻断板的方式迅速封堵注浆孔, 可在一定程度上抑制浆料流失。但因其在于泵嘴拔出后阻断灌浆料存在先后差, 仍受人为因素影响。因剪力墙规格及形式不同, 观察筒数据需确定与之对应的施工质量规范 and 标准, 在保证灌浆质量的前提下应允许筒内液面高度在一定范围 δ 内波动。

(4) 饱满度控制装置为现有工程实践的应用及改进, 归纳现有施工现象及饱满度的影响因素, 通过理论分析做出总结并为施工提供了参考分析。后续研究应结合各种具体实践中将剪力墙的灌浆施工模块化, 不断完善改进。

参 考 文 献

[1] 张 健, 陶丰烨, 苏涛永. 基于 BIM 的技术装配式建筑集成体系研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(1): 97-102.

[2] Huang Y, Zhu Z, Naito C J, et al. Tensile behavior of half grouted sleeve connections: experimental study and analytical modeling[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 96-104.

[3] Xu F, Wang K, Wang S, et al. Experimental bond behavior of deformed rebars in half-grouted sleeve connections with insufficient grouting defect[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 264-274.

[4] 姜绍飞, 蔡婉霞. 灌浆套筒密实度的超声波检测方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 43-49.

[5] 陈文龙, 李俊华, 严 蔚, 等. 基于压电阻抗效应的套筒灌浆密实度识别试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(23): 11-16.

[6] 郭 辉, 徐福泉, 代伟明, 等. 便携式 X 射线检测钢筋套筒灌浆连接密实度试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(22): 40-43.

[7] 蒋 昊, 孙正华, 付 磊, 等. 冲击回波法检测装配式混凝土结构浆锚搭接灌浆饱满度的应用研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(23): 28-32.

[8] 郑 羽, 翁 雯. 钢筋套筒灌浆密实度质量控制措施研究[J]. 工程质量, 2018, 36(1): 62-64.

[9] 孙 彬,毛诗洋,王 霓,等. 预成孔法检测装配式结构套筒灌浆饱满度的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(23): 7-10.

[10] 李向民,高润东,许清风,等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 52-56.

[11] 高润东,李向民,许清风. 装配整体式混凝土建筑套筒灌浆存在问题与解决策略[J]. 施工技术, 2018, 47(10): 1-4.

[12] 郭正兴,颜 文. 装配式混凝土结构套筒灌浆连接灌浆料饱满度试验研究[J]. 江苏建筑, 2018,(3): 4-8.

(上接第 140 页)

[9] 秦顺全. 斜拉桥安装无应力状态控制法[J]. 桥梁建设, 2003, (2): 31-34.

[10] 王 桢,罗 波,吴海军,等. 大跨径自锚式悬索桥几何非线性行为分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 1-6.

[11] Jung M R, Min D J, Kim M Y. Nonlinear analysis methods based on the unstrained element length for determining initial shaping of suspension bridges under dead loads[J]. Computers and Structures, 2013, 128: 272-285.

(上接第 146 页)

[5] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].

[6] 李小珍,洪沁烨,雷虎军,等. 地震动输入方向对铁路部分斜拉桥地震响应的影响[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 26-32.

[7] 孙佳音. 近断层地震动输入方向对刚构桥地震反应影响[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.

[8] 顾红飞. 斜交箱梁桥地震响应特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

[9] 廖 兴. 斜交连续梁桥地震反应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

[10] 郭劭钦. 基于不同输入方向的斜交桥最不利地震动响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[11] Deepu S P, Prajapat K, Ray-Chaudhuri S. Seismic vulnerability of skew bridges under bi-directional ground motions [J]. Engineering Structures, 2014, 71: 150-160.

[12] Han Q, Chen J Y, Du X L, et al. Nonlinear seismic response of skewed highway bridges subjected to bidirectional near-fault ground motions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 04017032-1-14.

[13] Maleki S, Bisadi V. Orthogonal effects in seismic analysis of skewed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1): 122-130.

[14] Bisadi V, Head M. Evaluation of combination rules for orthogonal seismic demands in nonlinear time history analysis of bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(6): 711-717.

[15] 项海帆. 高等桥梁结构理论(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[16] 王军文,湛 敏,邓 琴,等. 三跨斜交简支梁桥地震旋转机理及斜度影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1357-1362.

[17] Xiang N L, Li J Z. Effect of exterior concrete shear keys on the seismic performance of laminated rubber bearing-supported highway bridges in China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 112: 185-197.

(上接第 161 页)

[13] Abdeljaber O, Avci O, Kiranyaz M S, et al. 1-D CNNs for structural damage detection: verification on a structural health monitoring benchmark data[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 1308-1317.

[14] Abdeljaber O, Avci O, Kiranyaz S, et al. Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 388: 154-170.

[15] Hoang D T, Kang H J. Rolling element bearing fault diagnosis using convolutional neural network and vibration image[J]. Cognitive Systems Research, 2019, 53: 42-50.