

刘觅,高亮.地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性分析[J].地震工程学报,2018,40(4):665-670.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.665

LIU Mi,GAO Liang. Composite Mechanical Characteristics of Reinforced Concrete Box Girders in Earthquake Environments [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):665-670.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.665

地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性分析

刘 觅¹, 高 亮²

(1. 四川建筑职业技术学院土木工程系, 四川 德阳 618000; 2. 赤峰学院建筑与机械工程学院, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要: 利用传统有限元分析法对地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性分析时,采用专家经验进行配筋,存在较强的主观意识,导致获取的复合受力特性分析结果存在偏差。根据以往的实验研究参数结合国家对混凝土桥梁参数的限制条件,构建地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力实验模型。设定实验模型尺寸,根据模型尺寸选择模型材料,采用圆钢与角钢搭建跨梁连续支座,融合反力架与千斤顶设计实验加载方案;根据方案中得出的配筋计算结果,获取地震环境下钢筋连续箱梁复合受力实验模型的科学配筋方案。实验结果表明,该实验模型可对地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性进行全面、准确分析。

关键词: 地震环境; 钢筋混凝土; 实验模型; 箱梁; 复合受力特性; 配筋

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0665-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.665

Composite Mechanical Characteristics of Reinforced Concrete Box Girders in Earthquake Environments

LIU Mi¹, GAO Liang²

(1. Department of Civil Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, China;

2. School of Architectural and Mechanical Engineering, Chifeng University, Chifeng 024000, Neimenggu, China)

Abstract: Expert experience is required to determine reinforcement distribution when the traditional finite element analysis method is used to analyze the composite stress characteristics of reinforced concrete box girders in earthquake environments. However, such an approach is highly subjective and will cause the deviation of the analytical results of the obtained composite force characteristics. Therefore, an experimental model of the composite force of reinforced concrete box girders under earthquake conditions is constructed. In this work, the size of the experimental model is set in accordance with previously established experimental parameters and the national restrictions on the parameters of concrete bridges. The experimental model material is selected. The continuous support of the span beam is built with round steel and angular steel, and the experimental loading scheme is designed. Then, a scientific reinforcement scheme for the experimental model of the composite force of reinforced continuous box girders in an earthquake en-

收稿日期:2017-08-20

基金项目:四川省自然科学基金(14ZB0267);四川省教育厅重点项目(SCKY2015-04)

第一作者简介:刘 觅(1982-),男,硕士,讲师,研究方向为土木工程施工技术。E-mail:liumi@126.com。

vironment is obtained. Experimental results show that the experimental model can comprehensively and accurately analyze the composite force characteristics of reinforced concrete box girders in an earthquake environment.

Keywords: earthquake environment; reinforced concrete; experimental model; box girder; composite stress characteristics; reinforcement

0 引言

近几年全球地震频发,人们对高层建筑物、交通桥梁的抗震性以及牢固程度越来越关注^[1]。钢筋混凝土箱梁结构在桥梁中的使用频率日益增加,为全面掌握钢筋混凝土箱梁桥梁抗震性能以及桥梁使用的安全性,对地震环境下的钢筋混凝土复合受力特性进行研究,该研究对于改善钢筋混凝土箱梁桥梁的抗震性能具有重要意义。

以往国内外相关专家对钢筋混凝土箱梁复合受力特性进行分析的结果如下:胡少伟等^[2]对预应力钢-混凝土组合箱梁弯扭全过程进行研究,详细分析了钢筋混凝土箱梁的弯扭情况,虽然能够获取钢筋混凝土箱梁复合受力弯扭曲线,但未进行准确配筋,获取的复合受力特性分析结果略有偏差;项贻强等^[3]进行钢筋混凝土构件弯剪扭复合受力分析时,未考虑混凝土与钢筋的基本力学参数,导致钢筋混凝土的箱梁复合受力分析结果不准确,难以改善钢筋混凝土箱梁的安全性及抗震性;崔路苗等^[4]对主体采用碳纤维增强聚合物加固的钢筋混凝土箱梁进行了性能实验研究,着重碳纤维增强聚合物的保护性能研究,具有局限性;Abbasi 等^[5]考虑了与地震、结构几何和材料有关的不确定性,研究了一种多框架钢筋混凝土箱梁的地震行为,从规律到极不规律,采用脆性曲线表示,着重研究了局部脆弱位置,不具有代表性。

针对这些问题,本文设计新的地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力实验模型,对实验模型尺寸、实验模型材料、跨梁连续支座与加载方案设计、连续箱梁复合受力实验模型的科学配筋方案进行设置与设计^[6],对地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力的特性进行分析。

1 地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力实验模型设计

1.1 实验模型尺寸设定

以往关于地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力实验的研究,箱梁尺寸的设定各有不同^[7]。令单箱单室截面矩形箱梁的宽高比趋于 2、跨高比在 13~

30 内的做法应用较广泛;国外比较权威的实验中,腹板的厚度与宽度的比值一般为 1/7,翼缘厚度同宽度比为 0.1;国内对于承受扭曲压力下混凝土桥梁参数有详细的限制条件^[8],腹板厚度同梁高的比值应大于或等于 0.1,底板厚度同梁宽的比值同样应大于或等于 0.1。

本文实验模型的横断面尺寸如图 1 所示。其中,340 mm 为模型的整体高度,1 500 mm 为模型的总宽度,350 mm 为模型的翼缘宽度。模型内部顶板的中心厚度、底板厚度、跨中处腹板厚度、支座处腹板厚度分别为 60 mm、75 mm、85 mm、120 mm,这样的数据设置能够保证获取高质量的浇灌混凝土^[9],同时符合双层钢筋的参数标准。

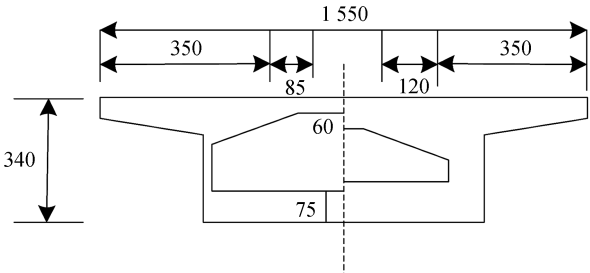


图 1 实验模型的横断面尺寸(单位:mm)
Fig.1 Cross section size of the experimental model (Unit:mm)

大部分钢筋混凝土箱梁桥的跨度为 20 m,箱梁顶板的宽度阈值上限保持在 8 m 左右,宽跨比在 0.4 以上,基于这些条件的限制进行模型设计^[10],获取 8.4 m、6.4 m 不同宽跨比类型的钢筋混凝土双跨连续箱梁模型,该模型将 0.3 m 的实心段设计在桥梁模型的两段部分与中间部分,详细情况用图 2 描述。

2.2 实验模型材料选择

C31 为实验模型采用的混凝土等级,实验室获取的混凝土力学相关参数如表 1 所示。在分析实验模型实际情况的基础上,为浇筑高质量的混凝土,将 C31 等级的混凝土、5~20 mm 的骨料作为本次实验模型的材料。

H124Φ8 为模型使用的钢筋型号,从中挑选 4 根 500 mm 的钢筋小样进行力学相关参数的测量,获取的结果用表 2 描述。

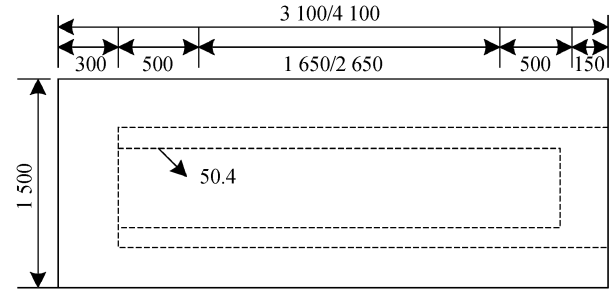


图 2 不同宽跨比类型的钢筋混凝土双跨连续箱梁模型

Fig.2 Reinforced concrete double-span continuous box girder model with different width span ratio

表 1 混凝土基本力学指标			
Table 1 Basic mechanical indexes of concrete			
等级	棱柱体抗压强度 f_c /MPa	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	弹性模量/ ($\times 10^4$ MPa)
C31	18.86	28.7	2.86

表 2 钢筋基本力学指标			
Table 2 Basic mechanical indexes of steel bars			
类别	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量/ ($\times 10^5$ MPa)
H124	235.03	304.21	2.86

2.3 实验模型的支撑与加载方案设计

实验模型的支座设计用图 3 描述,在综合分析实验模型支座真实尺寸与承载能力的情况下,使用圆钢与角钢搭建跨梁连续支座^[11],将双点圆钢支撑利用在桥梁的两端部分,将单点角钢支撑利用在桥梁的中支点部分^[12],以此代替真实桥梁中的独柱支

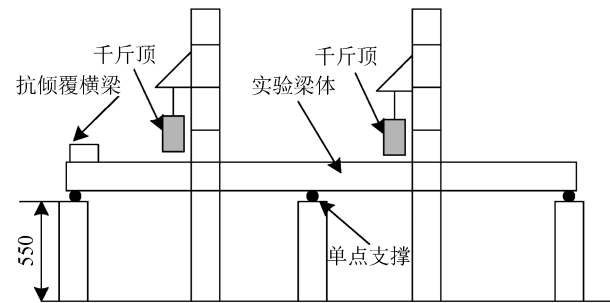


图 3 实验模型支座设计

Fig.3 Support design of experimental model

表 4 连续箱梁复合受力实验模型的配筋方案						
Table 4 Reinforcement scheme for the composite stress experimental model of continuous box girder						
长度/m	方法	底板(底层与顶层)	$A_{S,de}/A_{S,ca}$	顶板(顶层与底层)	箍筋(双层)	$(A_{VS,de}/S)/(A_{VS,ca}/S)$
5	A	13Φ8+13Φ8	1307/1461	21Φ8+19Φ8	Φ8@160/110	0.66/0.63
	B	13Φ10+13Φ10	1429/1582	21Φ10+19Φ8	Φ8@160/110	0.75/0.72
	C	13Φ10+13Φ10	2078/1815	21Φ10+19Φ8	Φ8@160/110	1.12/0.93
	D	13Φ10+13Φ10	1963/1754	21Φ10+19Φ8	Φ8@110/90	1.35/1.02

撑形式。

分析实验室反力槽布置的基础上,实验的加载功能通过反力架与千斤顶相结合的方式实现^[13],具体的布置用图 4 描述。实验的加载方式为单点偏心加载,于两跨中的同一侧腹板顶面进行,模型主要考虑箱梁复合受力的特性,忽略箱梁全部侧翻的情况^[14],提高了实验模型的安全性,将横梁与锚杆结合的抗扭转限制方式应用在模型的两端。

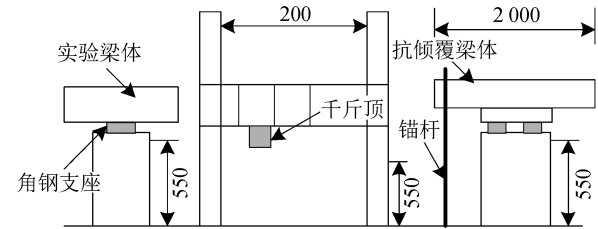


图 4 加载装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of loading device

2.4 实验模型配筋方案

根据国家对桥梁的限制条件与标准,对地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力分析实验模型进行对称配筋^[15],将 20 mm 作为混凝土的安全层厚度, H124 为选用的钢筋型号。本文实验模型选取 Φ8、Φ10 两种直径的钢筋,使材料获取与实验模型的制作更加简单^[16-17]。表 3 描述了本文实验模型 A、胡少伟等^[2]模型 B、项贻强等^[3]模型 C 和崔路苗等^[4]模型 D 四种配筋在同一种施工状况下的配筋计算结果,参考表 3 中的数据,连续箱梁复合受力实验模型的配筋方案用表 4 描述。

表 3 同一施工状况下的配筋计算结果					
Table 3 Calculation results of reinforcement in the same construction condition					
设计荷载 /kN	方法	正弯矩侧		负弯矩侧	
		A_s /mm ²	A_{sv}/S /(mm ² ·mm ⁻¹)	A_s /mm ²	A_{sv}/S /(mm ² ·mm ⁻¹)
200	A	1 460	0.72	1 242	0.75
	B	1 440	0.81	1 266	0.83
	C	1 815	0.91	1 784	0.93
	D	1 800	0.81	1 752	0.83

3 实验分析

采用本文构建的地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力实验模型,对某建筑钢筋混凝土箱梁复合受力特征进行实验分析,进而验证本文实验模型的性能。

3.1 荷载-垂直位移曲线分析

为清晰表达地震波环境下某建筑钢筋混凝土箱梁跨中截面荷载-垂直位移曲线对比情况,变换纵向配筋率、箍筋配筋率、宽跨比数据设置,将各种参数设置下获取的数据制成曲线图,如图 5 所示,此过程中不考虑支座变形产生的干扰。

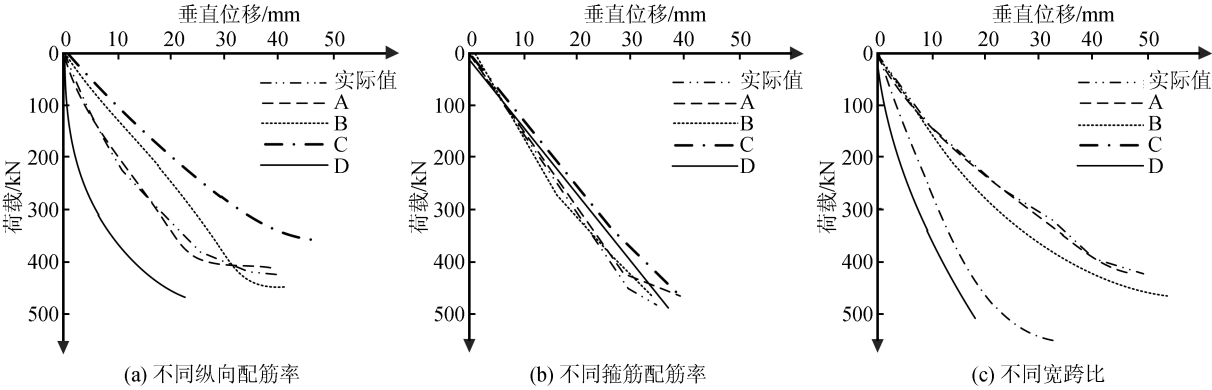


图 5 变换参数设置获取的箱梁构件跨中截面荷载-垂直位移曲线对比

Fig.5 Comparison between load-vertical displacement curves of mid-span section of box girder members by changing the parameters

分析图 5(a)能够看出,曲线的后半部分与极限位移明显受到来自纵向配筋率的干扰,曲线走向呈陡峭的趋势;在箱梁底板混凝土完全开裂的情况下,纵筋数量与纵筋拉应变成反比,纵筋量增加相应的拉应变减小,所以获取的界面曲率较低,致使位移降低;在混凝土未完全开裂时期以及构建弹性工作时期,也就是曲线的前半部分,钢筋应变不明显,相应获取的构件截面曲率与垂直位移受到配筋量的干扰较小,尚未凸显。分析图 5(b)能够看出,曲线的走势平稳,说明地震波下箱梁构件的抗弯刚度受到箍筋配筋率的干扰较小,不需要考虑。分析图 5(c)能

够看出,采用相同的配筋率,本文设计模型 A 相较于 B、C、D 而言构件的跨径上涨幅度更接近实际值。实验结果表明,本文实验模型能够准确获取地震波环境下钢筋混凝土箱梁的荷载-垂直位移曲线,获取有效分析结果。

3.2 荷载-水平位移曲线分析

为清晰表达地震波环境下,实验建筑钢筋混凝土箱梁不同构件水平跨中位移同荷载之间的关系,变换纵向配筋率、箍筋率、宽跨比数据设置,将各种参数设置下获取的数据制成曲线图,如图 6 所示,此过程中水平位移处不考虑支座变形产生的干扰。由

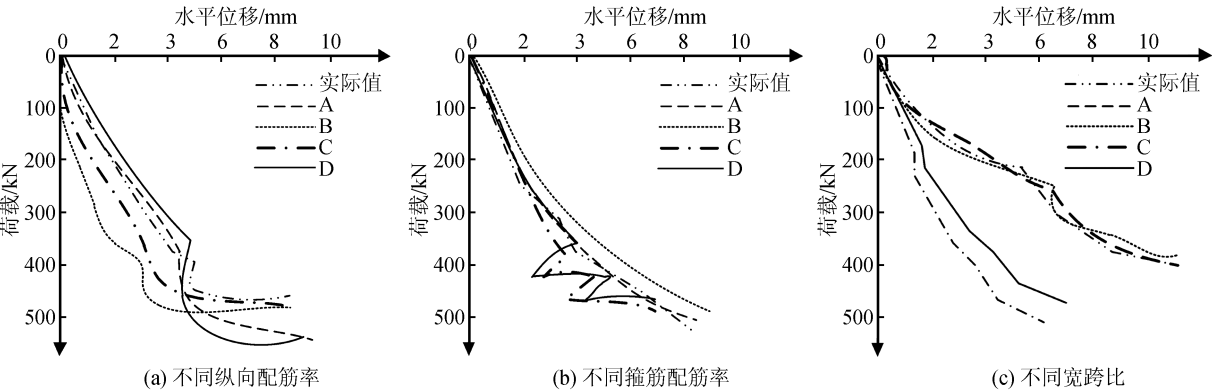


图 6 变换参数设置获取的箱梁构件跨中截面荷载-横向位移曲线对比

Fig.6 Comparison between load-transverse displacement curves of mid-span section of box girder members by changing the parameters

于实验过程中竖向相对刚性的限制标准存在差异,因此图 6 曲线不像图 5 曲线一样圆滑上升,中途存在跳跃的趋势。抗扭横梁同箱梁构件产生摩擦力对构件形成水平的约束限制,跨中水平位移的变化往往是由空隙压缩、瞬时水平滑动引起的。

分析图 6(a)、(b)能够看出,在不同的纵向配筋率、箍筋配筋率的参数设置下,获取的构件跨中截面荷载-横向位移曲线总体来说呈平稳发展的趋势,不同曲线间的差距较小,由此可得,地震波环境下箱梁构件横向抗弯刚度受到来自纵向配筋率、箍筋配筋率的干扰较小;分析图 6(c)能够看出,跨度与横向位移成正比,跨度上涨的同时,相应的横向位移同样

呈上涨趋势,本实验设计模型 A 测得的实验结果更加接近实际值。实验结果表明,本文实验模型能够准确获取地震波环境下钢筋混凝土箱梁的荷载-水平位移曲线,对纵向配筋率、箍筋配筋率与荷载-水平位移曲线的关系进行有效分析。

3.3 扭矩-扭率曲线分析

为清晰表达地震波环境下,实验建筑钢筋混凝土箱梁不同构件横向跨中截面扭矩-扭率的对比情况,即单位长度扭转角的对比情况,变换纵向配筋率、箍筋率数据设置,获取的实验结果用图 7 描述。在忽略箱梁畸变干扰的情况下,利用截面两侧腹板的竖向位移获取扭率。

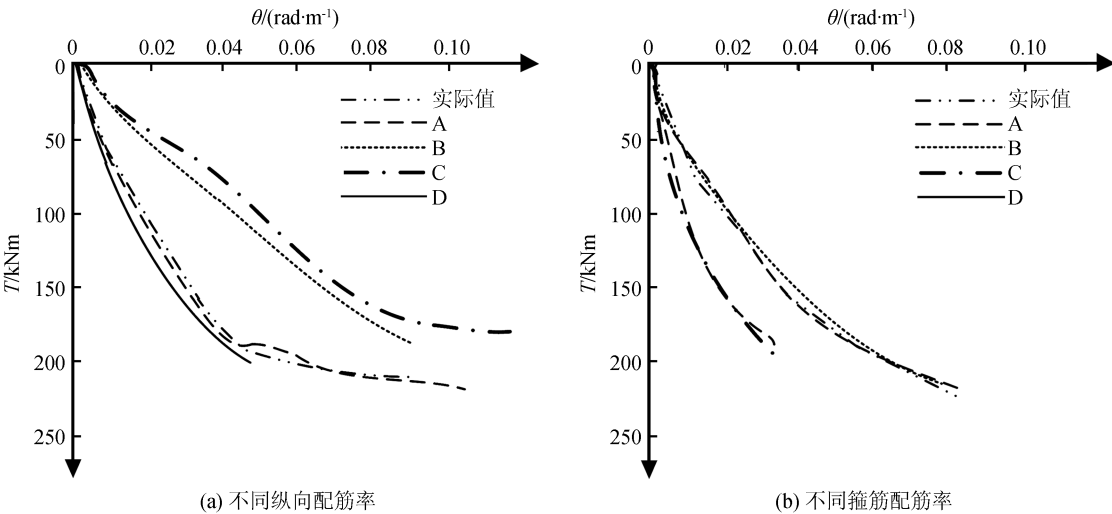


图 7 变换参数设置获取的箱梁构件跨中截面扭矩-扭率曲线对比

Fig.7 Comparison between torque-torsion curves of mid-span section of box girder members by changing the parameters

分析图 7(a)、(b)能够看出,地震波环境下实验建筑钢筋混凝土箱梁构件的扭转形变受到来自纵筋配筋率与箍筋配筋率的干扰较大,两种变量之间成反比关系,纵筋配筋率与箍筋配筋率不断上涨获取的扭转角不断下降,本文设计模型获取的扭矩-扭率曲线与实际值的曲线更加贴合。实验结果表明,本文实验模型能够准确获取地震波环境下钢筋混凝土箱梁的扭矩-扭率曲线,并对纵筋配筋率与箍筋配筋率同扭矩-扭率曲线之间的关系进行准确描述。

4 结论

为实现地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性的全面、准确分析,设计实验模型,根据以往的实验研究参数结合国家对混凝土桥梁参数的限制条件,设定实验模型尺寸,确保这样的数据设置既能浇

筑高质量的混凝土又能符合双层钢筋的参数标准;在分析混凝土与钢筋的基本力学参数基础上选择实验模型材料;采用圆钢与角钢搭建跨梁连续支座,将反力架与千斤顶相结合实现加载方案设计,模型的两端采用横梁与锚杆结合的抗扭转限制方式;根据不同施工状况下的配筋计算结果,获取科学的实验模型配筋方案。实验结果表明,所设计实验模型可对地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性进行全面、准确分析,对于钢筋混凝土桥梁安全性、抗震性的改善具有积极作用。

参考文献(References)

[1] 曹伟军,欧曼丽,蒋隆敏.火灾后钢筋混凝土结构强度性能测量方法研究[J].计算机仿真,2012,29(12):419-422.
CAO Weijun, OU Manli, JIANG Longmin. Strength Performance Measurement Method of Reinforced Concrete Structure after Fire[J]. Computer Simulation, 2012, 29(12): 419-422.

- [2] 胡少伟,赵克宇,喻江.预应力钢-混凝土组合箱梁弯扭全过程研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(3):1-6.
HU Shaowei, ZHAO Keyu, YU Jiang. Whole-course Study on Bending-torsion Behavior of Prestressed Steel-concrete Composite Box-beam[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(3): 1-6.
- [3] 项贻强,程坤,吴强强.钢筋混凝土构件弯剪扭复合受力分析与进展[J].中国公路学报,2014,27(4):46-54.
XIANG Yiqiang, CHENG Kun, WU Qiangqiang. Research and Development on Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Combined Bending, Shear and Torsion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(4): 46-54.
- [4] 崔路苗,郭志宇.地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分析[J].地震工程学报,2018,40(1):54-59.
CUI Lumiao, GUO Zhiyu. Test and Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Residential Building Steel Structures in Seismic Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 54-59.
- [5] ABBASI M, ZAKERI B, AMIRI G G. Probabilistic Seismic Assessment of Multiframe Concrete Box-Girder Bridges with Unequal-Height Piers[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(2): 1-9.
- [6] 闫晓宇,赵卓,闫维明.行波激励下大跨度桥梁考虑SSI效应的地震响应分析[J].工程抗震与加固改造,2014,36(6):66-74.
YAN Xiaoyu, ZHAO Zhuo, YAN Weiming. SSI Effect on Seismic Response of a Long-span Bridge under Traveling Wave Excitation[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(6): 66-74.
- [7] ZAKERI B, PADGETT J E, AMIRI G G. Fragility Assessment for Seismically Retrofitted Skewed Reinforced Concrete Box Girder Bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(2): 1-11.
- [8] 李碧雄,田明武,莫思特,等.地震中钢筋混凝土短柱的成因及震害分析[J].工程抗震与加固改造,2014,36(3):120-127.
LI Bixiong, TIAN Mingwu, MO Site, et al. Investigation to the Origin and Damages of RC Captive Columns During Earthquakes[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(3): 120-127.
- [9] 付建.随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J].地震工程学报,2018,40(2):241-245.
FU Jian. Research on Seismic Performance Testing Method of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Columns under Random Vibrations [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 241-245.
- [10] 骆欢,杜轲,孙景江,等.地震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌全过程振动台试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(12):49-56.
LUO Huan, DU Ke, SUN Jingjiang, et al. Shaking Table Test on Complete Collapse Process of RC Frame Structure Subjected to Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12): 49-56.
- [11] 方志,曹清,郑辉.钢筋混凝土箱梁顶板横向受力有效分布宽度的塑性分析[J].中国公路学报,2017,30(10):45-52.
FANG Zhi, CAO Qing, ZHENG Hui. Plastic Analysis of Transverse Effective Width of Top Slabs in Reinforced Concrete Box-girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 45-52.
- [12] BAGHERIFAEZ M, BEHNIA A, MAJEED A A, et al. Acoustic Emission Monitoring of Multicell Reinforced Concrete Box Girders Subjected to Torsion[J]. The Scientific World Journal, 2014(3): 1-13.
- [13] 祝明桥,汪建群,王凡,等.双层均布荷载作用腹板开孔混凝土简支箱梁模型试验研究分析[J].土木建筑与环境工程,2014,36(6):29-33.
ZHU Mingqiao, WANG Jianqun, WANG Fan, et al. Experimental Analysis of Simply-supported Concrete Box Girder with Web Openings Model under Double Uniformly Distributed Load[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014, 36(6): 29-33.
- [14] 郭院成,张景伟,周同和.竖向与水平复合荷载作用下后注浆灌注桩承载性能试验研究[J].世界地震工程,2013,29(4):38-45.
GUO Yuancheng, ZHANG Jingwei, ZHOU Tonghe. Experimental Study on Bearing Capacity of Post-grouting Bored Piles under Vertical and Lateral Composed Load[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(4): 38-45.
- [15] 王锦力,牟善鑫,刘海卿.SMA-叠层橡胶复合隔震支座耗能能力的影响因素研究[J].地震研究,2017,40(1):70-74.
WANG Jinli, MOU Shanxin, LIU Haiqing. The Performance Contrast Research between SMA Wire and SMA Strands Lamine Rubber Bearing [J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(1): 70-74.
- [16] YANG M L, LI Z H, ZHONG Y, et al. Safety Analysis of Bracket Structure for Main Beam 0~#1~# Segment Construction of Concrete Box Girder Bridge [J]. Journal of Changan University, 2014, 34(1): 64-69.
- [17] 丛苏莉.多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌仿真分析[J].地震工程学报,2018,40(1):41-47.
CONG Suli. Simulation Analysis of Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures under Multi-dimensional Earthquake Action [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 41-47.