

# 基于振动台试验在役连续刚构桥抗震性能分析

童申家<sup>1</sup>, 张 优<sup>1</sup>, 黄 勇<sup>2</sup>, 李红涛<sup>2</sup>, 宋 杰<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 山西省祁临高速公路有限责任公司, 山西 祁县 030904)

**摘要:** 为研究服役期内产生材料性能劣化的连续刚构桥地震响应, 以某在役高墩三跨连续刚构桥为对象, 考虑氯离子侵蚀作用下材料性能劣化, 基于相似原理构建实体模型进行振动台试验, 得出模型桥梁在三向地震激励作用下结构的地震响应规律. 三向地震波激励下跨中挠度受地震波影响程度较大, 随着地震强度的增加, 桥墩在横桥向更易受损. 在实际工程中, 应着重考虑对桥墩处进行加固处理.

**关键词:** 在役连续刚构桥; 材料性能劣化; 相似原理; 振动台试验; 地震响应

中图分类号: U422.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0626-07

## Seismic performance analysis of continuous rigid frame bridges in service based on shaking table test

TONG Shenjia<sup>1</sup>, ZHANG You<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>2</sup>, LI Hongtao<sup>2</sup>, SONG Jie<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shanxi Qilin Expressway Limited Liability Company, Qixian 030904, China)

**Abstract:** To study the seismic response of a continuous rigid frame bridge that produces material degradation during service, Taking a high-rise three-span continuous rigid frame bridge in service, considering the deterioration of material properties under the action of chloride ion erosion, a solid model is built based on the similar principle for the shaking table test. The seismic response law of the model bridge under the excitation of three-way earthquake is obtained. The mid-span deflection under the excitation of the three-way seismic wave is greatly affected by the seismic wave. As the seismic intensity increases, the pier is more vulnerable to damage in the transverse bridge. In actual engineering, the reinforcement of the pier should be considered.

**Key words:** in-service continuous rigid frame bridge; material performance degradation; similar principle; shaking table test; seismic response

随着我国经济的快速发展, 桥梁对于我国的现代化进程起着不可替代的作用. 目前, 我国的水泥混凝土连续刚构桥已达到桥梁总数的 50% 以上<sup>[1]</sup>. 由于不利环境所造成的钢筋混凝土劣化问题日趋严重, 已对在役桥梁结构的抗震性能造成严重影响.

地震具有不确定性、不可预测性和破坏性. 我国位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 同时也受到来自太平洋板块、印度板块和菲律宾板块的挤压, 因此地震带十分活跃. 另一方面, 现如今随着桥梁运营时间的不断增加以及因桥梁耐久性降低而产生了各类病害<sup>[2-5]</sup>, 在役连续刚构桥抗震性能是否能满足要求受到越来越多人的重视.

同时, 近年来研究发现, 连续刚构桥对地震

动的频谱特性十分敏感, 地震响应差异较大, 且桥墩墩底较墩梁固结处对行波效应更为敏感<sup>[6-8]</sup>. 但是, 大多数试验研究是在新建桥梁的基础上实现的, 很少考虑因为耐久性损伤而给桥梁带来的材料性能劣化, 通过振动台试验研究在役连续刚构桥发生材料性能劣化后的地震响应是非常必要的<sup>[9-11]</sup>.

因此, 本文以一在役高墩三跨钢筋混凝土连续刚构桥为对象, 考虑氯离子侵蚀作用下材料性能劣化, 基于相似原理构建缩尺比为 1:20 实体模型进行振动台模拟实验, 并按水平 X: 水平 Y: 竖向 Z 以 1:0.85:0.65 的形式进行三向地震波激励, 主要研究模型桥梁在三向地震激励作用下桥墩处的地震响应规律, 对今后如何确定在役连续

收稿日期: 2019-09-12

修改稿日期: 2020-09-15

基金项目: 交通运输部西部建设科技项目(20113187721260); 山西省交通运输厅科技计划项目(SJ-2016-16)

第一作者: 童申家(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为桥梁与隧道工程. E-mail: 13991336070@163.com

通信作者: 张 优(1993—), 男, 硕士生, 研究方向为桥梁与隧道工程. E-mail: 771322\_300@qq.com.

刚构桥抗震加固区域、工法和材料有一定的参考价值,促进研究发展与实际应用。

## 1 桥梁原型工程概况

桥梁原型为一座跨径布置为 20 m+40 m+20 m 的连续刚构桥,桥墩为实心矩形墩,墩高为 24 m,两边墩墩顶布置有固定支座,两主墩墩梁固结。上部结构和立柱采用 C50 混凝土。下部桥墩纵筋和箍筋采用 HRB335,其中纵筋直径为 25 mm,箍筋直径为 12 mm。纵筋保护层厚度为 50 mm,箍筋保护层厚度为 38 mm。纵筋的初始屈服强度和直径分别为:  $f_y = 335$  MPa,  $d_0 = 25$  mm。箍筋的初始屈服强度和直径分别为:  $f_y = 335$  MPa,  $d_s = 12$  mm。

该桥已服役 20 a,氯离子侵入钢筋表面会导致钢筋和混凝土的腐蚀,进而造成钢筋混凝土材料力学性能的劣化<sup>[12]</sup>。基于 Fick 第二定律的氯离子扩散模型<sup>[13]</sup>计算钢筋初始锈蚀时间,公式如式(1)所示。

$$C(x, t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{k_{ie} k_t k_c D_0 (t_0)^n (t)^{1-n}}} \right] \quad (1)$$

式中:  $C_s$  为混凝土表面氯离子浓度(%),取 0.3%;  $x$  为距混凝土表面的距离,mm;  $D_0$  为氯离子扩散系数,取  $220.9 \text{ mm}^2/\text{a}$ ;  $t_0$  为基准时间,取 28 d,约 0.076 7a;  $t$  为服役时间,a;  $n$  为时间衰减系数;  $k_{ie}$  为环境影响修正系数,  $k_{ie} = 0.845$ ;  $k_t$  为试验方法的修正系数,  $k_t = 0.832$ ;  $k_c$  为养护条件的修正系数,  $k_c = 0.8$ ; erf 为误差传递函数。

计算得到纵筋初始锈蚀时间为 21.2 a,箍筋初始锈蚀时间为 8.97 a。氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀以后,钢筋凹凸不平的表面会出现应力集中现象,从而导致钢筋力学性能发生变化<sup>[14]</sup>。计算得到原桥服役 20 a 后纵筋强度为 335 MPa、纵筋直径为 25 mm;箍筋强度为 257 MPa、箍筋直径为 11 mm。

混凝土内部自身的微观裂隙在锈胀力的作用下将会扩展成宏观裂缝,从而导致混凝土开裂和脱落<sup>[15]</sup>。随着氯离子浓度和侵蚀时间的增大,保护层混凝土的强度不断降低<sup>[16]</sup>,经计算得到服役 20 a 后该桥梁结构混凝土强度退化至 30.5 MPa。

## 2 试件模型设计及试验方案

本试验将其缩尺为 1:20 比例的三跨连续刚构桥模型,如图 1 所示。本模型桥梁跨径布置为 1 m

+2 m+1 m,墩高布置为 1.2 m。桥梁上部主梁截面为单箱单室变截面箱梁,桥墩为矩形实心墩。1#、4#两边墩设置有隔震橡胶支座,2#、3#墩与主梁固结。各墩墩底设有统一钢筋混凝土底座,底座与振动台台面可靠连接。模型桥梁主梁截面和桥墩截面见图 2、图 3 所示。

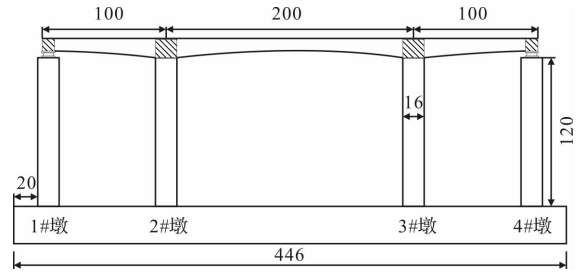


图 1 模型桥结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model bridge structure

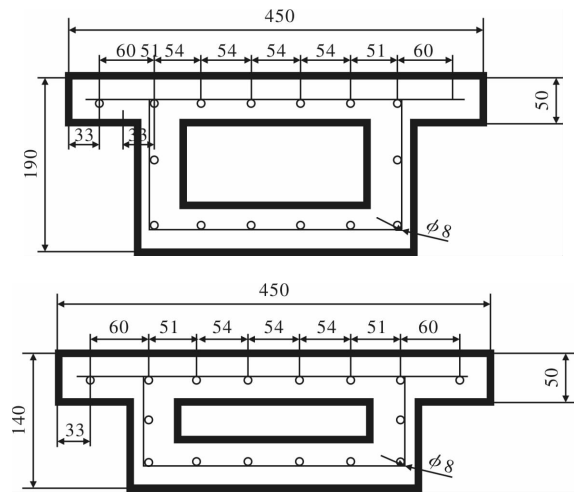


图 2 模型桥梁主梁截面图(单位: mm)

Fig. 2 Sectional view of the main beam of the model bridge (unit: mm)

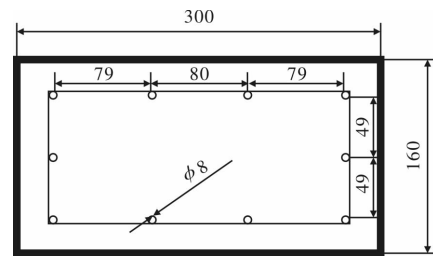


图 3 模型桥墩截面图(单位: mm)

Fig. 3 Sectional view of the model pier (unit: mm)

为了使模型结构能够真实反应原型结构的动力特性,本文按照相似理论设计试验模型,原型与模型的重力、惯性力和恢复力满足柯西条件<sup>[17]</sup>,如式(2)所示。

$$\frac{S_E}{S_\rho S_a S_l} = 1 \quad (2)$$

式中:  $S_E$  为弹性模量相似比;  $S_a$  为重力加速度相

似比； $S_\rho$ 为密度相似比； $S_l$ 为几何尺寸相似比。

结合地震模拟振动台设备的最大工作输出峰值加速度，取试验加速度相似比  $S_a$  为 2.5。限于桥梁主梁顶板平面空间限制，在进行振动台试验

时配重的人工质量不能完全放置，因而需对结构进行欠配重设置。表 1 给出了结构模型的基本参量相似比关系。全部完成安装成的桥照片如图 4 所示。

表 1 模型相似比关系

Tab. 1 Model similarity relationship

物理性能	物理量	相似常数符号	关系式	相似比
几何性	长度	$S_L$	$S_L$	1/20
	面积	$S_A$	$S_L^2$	1/400
材料性能	应变	1	$S_\sigma/S_E$	1
	弹性模量	$S_E$	$S_E = S_\sigma$	$6.377e^{-1}$
	应力	$S_\sigma$	$S_\sigma$	$6.377e^{-1}$
	阻尼	$S_c$	$S_\sigma \cdot S_L^{1.5} \cdot S_a^{-0.5}$	$4.509e^{-3}$
动力性能	周期	$S_T$	$S_L^{0.5} \cdot S_a^{-0.5}$	$1.414e^{-1}$
	加速度	$S_a$	$S_a$	2.5
	重力加速度	$S_g$	$S_g$	1



图 4 模型桥照片

Fig. 4 Model bridge photo

通过综合考虑模型的动力抗震性能，选取 II 类场地地震波 El Centro 波，III 类 Taft 波。试验按

从小到大的顺序输入地震波峰值加速度，依次对结构模型施加 125~1 000 gal 的峰值加速度来对应实际地震烈度的 6(0.05 gal)~9 度(0.4 gal)，并进行三向地震波激励，按水平 X：水平 Y：竖向 Z 以 1：0.85：0.65 的形式进行输入。试验加载工况如表 2 所示。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 墩顶加速度峰值响应分析

不同工况条件下，对桥梁模型结构进行三向地震波激励时，对 1#墩顶、2#墩顶加速度响应进行分析研究。加速度响应值见表 3，加速度数值分析见图 5。

表 2 试验加载工况

Tab. 2 Test loading condition

工况	地震波	加速度峰值/gal			备注
		X 向	Y 向	Z 向	
1	El Centro 波	0.125	0.106 25	0.081 25	6 度(0.05 gal)
2	Taft 波	0.125	0.106 25	0.081 25	
3	El Centro 波	0.25	0.212 5	0.162 5	7 度(0.1 gal)
4	Taft 波	0.25	0.212 5	0.162 5	
5	El Centro 波	0.5	0.425	0.325	8 度(0.2 gal)
6	Taft 波	0.5	0.425	0.325	
7	El Centro 波	0.75	0.637 5	0.487 5	8 度(0.3 gal)
8	Taft 波	0.75	0.637 5	0.487 5	
9	El Centro 波	1	0.85	0.65	9 度(0.4 gal)
10	Taft 波	1	0.85	0.65	

表 3 三向地震波输入时桥墩加速度峰值

Tab. 3 Peak acceleration of bridge pier when inputting three-way seismic wave

工况	地震波	1# 墩顶			2# 墩顶		
		X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向
1	El Centro波	340.06	183.46	522.36	371.94	448.07	91.27
2	Taft 波	444.90	140.00	365.44	519.26	373.87	102.03
3	El Centro波	504.24	399.10	951.25	636.23	897.77	261.32
4	Taft 波	613.84	321.37	773.60	785.98	773.01	272.08
5	El Centro波	983.36	534.09	968.59	1 145.38	990.32	558.80
6	Taft 波	888.06	627.70	840.43	1 203.25	940.17	634.14
7	El Centro波	1 336.86	647.34	1 122.97	1 501.54	1 230.06	726.70
8	Taft 波	1 463.35	658.63	1 534.09	1 522.58	1 514.23	703.45
9	El Centro波	1 807.74	973.31	1 544.67	1 903.83	1 481.20	1 074.98
10	Taft 波	2 541.15	1 099.10	3 250.06	1 692.57	2 031.20	1 181.31

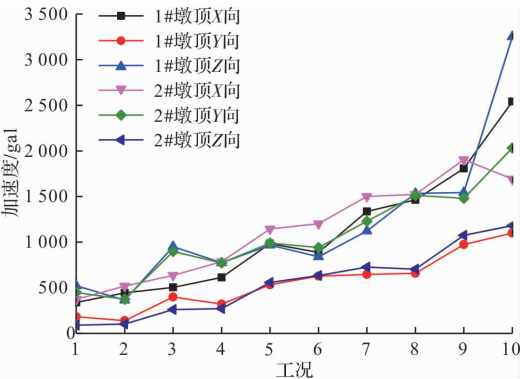


图 5 三向激励墩顶加速度峰值对比

Fig. 5 Three-way excitation peak acceleration peak comparison

从以上图表可以看出:

三向地震波激励作用中, 墩顶加速度峰值整体呈增长趋势, 但增长幅度有所差异. 工况 1~9 中, 无论纵桥向与横桥向, 2# 墩顶加速度峰值大概率大于 1# 墩顶, 此工况下 2# 墩受到的影响更大. 在竖桥向 1# 墩顶加速度峰值大于 2# 墩顶, 其中, 1# 墩顶从工况 9 至工况 10 的加速度峰值增幅达到 110.40%, 此时 1# 墩可能已进入塑性铰阶段.

3.2 墩顶位移峰值响应分析

不同工况条件下, 对桥梁模型结构进行三向地震波激励时, 对 1# 墩顶、2# 墩顶位移响应进行分析研究. 墩顶位移响应值见表 4, 墩顶位移数值分析见图 6.

表 4 三向地震波输入时墩顶位移峰值

Tab. 4 Peak displacement of the pier top with three-way seismic waves put in

工况	地震波	1# 墩顶		2# 墩顶	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向
1	El Centro波	1.50	1.27	1.46	1.23
2	Taft 波	1.15	0.89	1.04	0.80
3	El Centro波	1.94	1.80	2.18	2.02
4	Taft 波	1.79	1.58	1.69	1.49
5	El Centro波	4.00	3.15	4.18	3.29
6	Taft 波	3.46	3.29	3.15	3.00
7	El Centro波	5.19	3.99	5.60	4.30
8	Taft 波	4.61	4.53	4.56	4.48
9	El Centro波	7.77	7.30	7.98	7.50
10	Taft 波	17.68	19.09	6.14	6.63

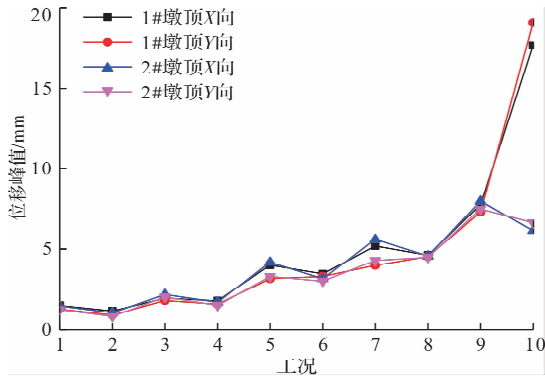


图 6 三向激励墩顶 X、Y 向位移峰值对比

Fig. 6 Comparison of X- and Y-direction displacement peaks of three-way excitation piers

从以上图表可以看出：

表 5 三向地震波输入时墩底钢筋应变峰值

Tab. 5 Strain peak value of pier bottom reinforcement with three-way seismic wave put in

工况	地震波	1# 墩底	2# 墩底	3# 墩底	4# 墩底
1	El Centro 波	22	26	32	26
2	Taft 波	14	50	52	14
3	El Centro波	64	156	212	70
4	Taft 波	68	128	276	44
5	El Centro波	138	164	346	66
6	Taft 波	138	142	212	80
7	El Centro波	122	180	252	180
8	Taft 波	164	330	412	312
9	El Centro波	132	284	286	186
10	Taft 波	150	302	366	218

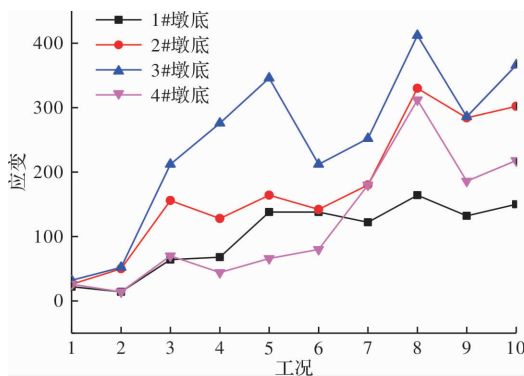


图 7 三向激励墩底钢筋应变对比

Fig. 7 Three-way excitation strut steel bar strain comparison

从以上图表可以看出：

在相同地震波输入的情况下各个桥墩墩底钢筋应变峰值随着地震动烈度的增大而变大，2#墩底和3#墩的钢筋应变要比1#墩底和4#墩底的

1#墩顶和2#墩顶在三向地震波输入中呈现出：在0.05~0.3 gal 加速度峰值输入时纵桥向位移峰值大于横桥向位移峰值，在0.3~0.4 gal 加速度峰值输入时纵桥向位移峰值小于横桥向位移峰值。同时，1#墩顶横桥向位移峰值增长速率急剧上升，说明随着加速度峰值增大将快速增大1#墩顶的横向位移，当达到0.3 gal 时，1#墩顶即将或已经破坏。

### 3.3 桥墩墩底钢筋应变响应分析

不同工况条件下，对桥梁模型结构进行三向地震波激励时，对1#~4#墩底钢筋应变响应进行分析研究。钢筋应变响应值见表5，钢筋应变数值分析见图7。

钢筋应变大，说明2#墩底、3#墩底更加容易受地震的影响。1#墩、4#墩墩底钢筋应变小，这与边墩采用了板式橡胶支座的隔震作用消耗了能量有关，支座削弱了部分地震里的传递。

### 3.4 桥墩墩底混凝土应变响应分析

不同工况条件下，对桥梁模型结构进行三向地震波激励时，对1#墩底、2#墩底混凝土应变响应进行分析研究。混凝土应变响应值见表6，混凝土应变数值分析见图8。

从以上图表可以看出：

在相同地震波输入的情况下各桥墩墩底混凝土应变峰值总体随着地震动烈度的增大而变大。在各地震动烈度下，2#墩底混凝土应变应变始终大于1#墩混凝土应变。地震动烈度大于8度后，2#墩底混凝土应变峰值增大了1.84倍，此时2#墩底即将或已经达到极限状态。

表 6 三向地震波输入时墩底混凝土应变峰值

Tab. 6 Peak strain of concrete at the bottom of the pier with three-way seismic waves put in

工况	地震波	1#墩底	2#墩底
1	El Centro波	20	32
2	Taft 波	18	34
3	El Centro波	42	86
4	Taft 波	60	104
5	El Centro波	102	296
6	Taft 波	94	164
7	El Centro 波	84	236
8	Taft 波	170	422
9	El Centro波	150	560
10	Taft 波	184	672

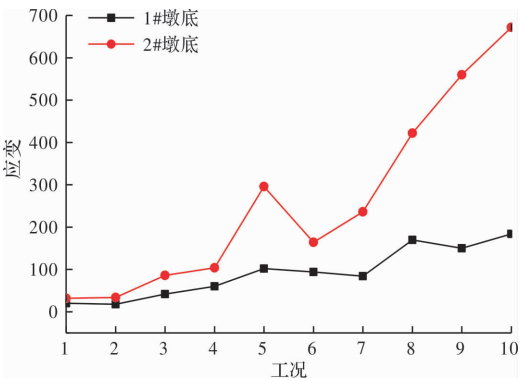


图 8 三向激励墩底混凝土应变峰值对比

Fig. 8 Comparison of strain peaks of concrete with three-way excitation

4 结论

(1)三向地震波激励下，墩顶加速度峰值整体呈增长趋势，当地震动烈度达到 9 度时，1#墩顶可能已进入塑性铰阶段。墩顶位移峰值响应表现出地震动烈度小于 8 度时对纵桥向影响较大，在地震动烈度大于 8 度时对横桥向影响更大，此时 1#墩顶即将或已经破坏。

(2)各桥墩墩底钢筋应变峰值随地震动烈度的增大而变大，2#墩底、3#墩底更加容易受地震的影响。各桥墩墩底混凝土应变峰值总体随着地震动烈度的增大而变大，当地震动烈度大于 8 度时，2#墩底将进入危险阶段。

(3)服役 20 年的钢筋混凝土连续刚构桥随着地震动强度达到 8 度时，桥墩在横桥向更易受损，桥墩处已进入危险阶段甚至已经发生破坏。故抗震设防烈度要求 8 度以上的在役连续刚构桥应及时进

行桥梁抗震加固，并重考虑对桥墩处进行加固处理，二次提高在役桥梁的抗震性能。

参考文献 References

[1] 周履. 桥梁耐久性发展的历史与现状[J]. 桥梁建设, 2000(4):58-61.  
ZHOU Lü. History and current status of bridge durability development[J]. Bridge Construction, 2000(4): 58-61.

[2] 周枚,封伟,谢功元,等. 基于 F-R-M 方法的桥梁地震风险评估研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2017, 42(1): 299-308.  
ZHOU Mi,FENG Wei,XIE Gongyuan,et,al. Research on bridge seismic risk assessment based on F-R-M method[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2017,42(1):299-308.

[3] 赵珺,牛狄涛. 在役钢筋混凝土连续刚构桥梁抗震性能评估[J]. 中国公路学报,2014,27(9):74-81.  
ZHAO Jun,NIU Ditao. Evaluation of seismic performance of existing reinforced concrete continuous rigid frame bridges[J]. Journal of China Highway,2014,27(9):74-81.

[4] 张玥,兰方,言赵丹,等. 震区圆柱式桥梁墩柱配筋率取值范围分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018, 43(6):2311-2321.  
ZHANG Yue, LAN Fang, YAN Zhaodan, et, al. Analysis on the range of reinforcement ratio of cylindrical bridge piers in earthquake area[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2018, 43(6):2311-2321.

[5] 程麦理,杨红霞. 基于 Vlip 和 OpenDCL 的钢箱梁桥 BIM 设计方法研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019,44(2):470-476.

- CHENG Maili, YANG Hongxia. Research on BIM design method of steel box girder bridge based on Vlisip and OpenDCL[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 470-476.
- [6] 刘旭政, 赵军, 王鹏. 考虑动水压力高桩承台桥梁地震反应分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1519-1525.
- LIU Xuzheng, ZHAO Jun, WANG Peng. Seismic response analysis of high-pile cap bridge considering hydrodynamic pressure[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(4): 1519-1525.
- [7] KAVIANIPOUR F. Experimental and analytical seismic studies of a four-span bridge system with composite piers[D]. Reno: University of Nevada, 2013.
- [8] ARALIYA, M, MEHRAN S. Seismic fragility analysis of typical pre-1990 bridges due to near and far-field ground motions[J]. International journal of advanced structural engineering, 2016, 8(1): 1-9.
- [9] CORONELLI D, GAMBAROVA P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2004, 130(8): 1214-1224.
- [10] 姚蓓, 张启伟. 钢斜拉桥运营期耐久性与易损性监测[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 90-94.
- YAO Bei, ZHANG Qiwei. Durability and vulnerability monitoring of steel cable-stayed bridges during operation[J]. Sino-foreign Highway, 2016, 36(1): 90-94.
- [11] 胡思聪. 考虑氯离子侵蚀的桥梁地震易损性及抗震加固策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- HU Sicong. Research on bridge seismic vulnerability and seismic reinforcement strategy considering chloride erosion[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [12] 赵尚传. 海洋环境中氯离子侵蚀与混凝土碳化诱发钢筋锈蚀失效概率的对比分析[J]. 公路, 2008(4): 163-166.
- ZHAO Shangchuan. Comparative analysis of chlorine ion erosion and concrete carbonation induced corrosion failure probability in marine environment[J]. Highway, 2008(4): 163-166.
- [13] ENRIGHT M, FRANGOPOL D M. Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion[J]. Engineering Structure, 1998, 20(11): 960.
- [14] 张平生, 卢梅, 李晓燕. 锈蚀钢筋的力学性能[J]. 工业建筑, 1995, 25(9): 41-44.
- ZHANG Pingsheng, LU Mei, LI Xiaoyan. Mechanical properties of corroded steel bars[J]. Industrial Building, 1995, 25(9): 41-44.
- [15] 梁岩, 罗小勇. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 202-209.
- LIANG Yan, LUO Xiaoyong. Research on restoring force model of corroded reinforced concrete compression and bending members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 202-209.
- [16] 赵珺. 在役混凝土桥梁的地震易损性分析与抗震性能评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- ZHAO Jun. Seismic vulnerability analysis and seismic performance evaluation of existing concrete bridges[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch, 2015.
- [17] 周颖, 吕西林. 建筑结构振动台模型试验方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHOU Ying, LÜ Xilin. Shaking table model test method and technology of building structure[M]. Beijing: Science Press, 2012.

(编辑 桂智刚)