

施有志,林四新,阮建凑,等.连续弯箱梁自行车桥地震响应分析[J].地震工程学报,2020,42(5):1208-1216.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1208

SHI Youzhi, LIN Sixin, RUAN Jiancou, et al. Seismic Response of Bicycle Bridges with Continuous Curved-Box Girder[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1208-1216. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1208

连续弯箱梁自行车桥地震响应分析

施有志¹, 林四新², 阮建凑¹, 林树枝³

(1. 厦门理工学院 土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 中交第三航务工程局有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361003;

3. 厦门市建设局, 福建 厦门 361003)

摘要:为研究厦门市弯箱梁自行车桥的地震响应规律,采用 SAP2000 有限元软件建立自行车高架桥三维壳体模型,在考虑多遇地震和罕遇地震水准作用及不同加载方向的基础上,分别采用反应谱分析法和时程分析法进行该桥的动力响应分析。结果表明:自行车桥 z 方向位移分量最大,且 z 方向分量极值均发生在曲线分叉段;相对剪力而言,桥墩竖向支反力相对较小;E1 和 E2 地震水准响应情况随时间的变化趋势基本一致,桥梁结构未进入塑形状态,抗震性能良好,安全性指标较高;反应谱法计算得到的响应包络值相对 3 条不同的地震时程结果的峰值大,在实际桥梁抗震分析过程中需要综合考虑两者的分析结果。文章研究结果对今后自行车桥设计和抗震性能分析具有指导意义,并可为研究者对该类桥的进一步研究提供借鉴。

关键词:地震荷载;自行车桥;动力特性;反应谱法;时程分析法

中图分类号: U448.15

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1208-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1208

Seismic Response of Bicycle Bridges with Continuous Curved-Box Girder

SHI Youzhi¹, LIN Sixin², RUAN Jiancou¹, LIN Shuzhi³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, Fujian, China;

2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd. Xiamen Branch, Xiamen 361003, Fujian, China;

3. Xiamen Municipal Construction and Development Corporation, Xiamen 361003, Fujian, China)

Abstract: To study the seismic response law of the curved-box-girder bicycle bridge in Xiamen city, we established a three-dimensional shell model of the bicycle viaduct using SAP2000 finite element software. We calculated the dynamic response of the bicycle viaduct using the response spectrum and time-history analysis methods after considering the effects of frequent and rare earthquakes and different loading directions. The results show that the Z -direction displacement component of the bicycle bridge is the largest, with the extreme value of the Z -direction component occurring in the curve bifurcation section. The vertical support reaction of the pier was found

收稿日期:2019-02-22

基金项目:厦门市科技计划项目(3502Z20183043);厦门市建设局科技项目(XJK-2019-1-4)

第一作者简介:施有志(1976-),男,教授,主要从事城市基础设施防灾减灾方面的研究。E-mail:2013110907@xmut.edu.cn。

to be small relative to the shear force. The results also indicate that the variation trends of the seismic responses of E1 and E2 are basically the same with time, the bridge structure does not enter the plastic state, and the seismic performance is good. The envelope value calculated by the response spectrum method is larger than the peak value of the time-history results for three different seismic waves. In the actual seismic analysis process, it is necessary to consider the analysis results of both methods. The results of this study have great significance for guiding the future design and seismic performance analysis of bicycle bridges and as a reference for further research on this kind of bridge.

Keywords: seismic load; bicycle bridge; dynamic characteristics; response spectrum method; time-history analysis method

0 引言

我国当前正处于城市化与机动化快速发展时期,交通拥堵、环境污染和能源消耗等问题日益严重^[1]，“绿色交通”正是在这种背景下提出的解决当今城市交通问题的一种有效手段,以与城市环境相协调^[2-3]。将各类交通工具按对环境的影响程度从大到小进行排序,分别为小汽车、摩托车、公共汽车、地铁、自行车、步行^[4]。目前国内外已有许多城市建设享有独立行驶路权的自行车道^[5],为与城市土地利用模式相适应,部分国外城市采取高架桥模式发展自行车交通,如阿姆斯特丹和哥本哈根^[6]。城市自行车桥周边环境复杂,大多采用薄壁曲线形结构,曲线桥梁由于曲率的存在,上部结构的重心偏离桥墩,附加弯矩作用明显,同时存在扭矩,下部的钢管混凝土桥墩也处于压弯剪扭的复杂受力状态中。在多维地震作用下,曲线桥梁由于不对称性而发生破坏甚至倒塌的可能性大大增加。国内已有一些学者对常规桥梁受地震荷载作用的动力响应进行探索,如陈彦江等^[7]基于桥梁碰撞响应的影响因素进行动力非线性时程反应分析,研究一座跨径布置为 20 m × 3 的简支梁桥在地震作用下的碰撞响应和各因素对碰撞响应的程度;崔春义等^[8]以大连长山矮塔斜拉桥为背景,建立全桥大规模三维动力分析数值模型,对桥梁结构—桩基—地基相互作用体系分别进行地震反应谱分析、弹性和弹塑性动力时程分析,并综合评价桥梁结构体系抗震性能;梁师俊等^[9]以某高速公路预应力钢筋混凝土斜拉连续梁组合桥为例,采用有限元法分析该桥在反应谱、一致激励、多点激励和行波效应作用下的地震响应;付立彬等^[10]借助 MIDAS/Civil 有限元软件,依托于某高墩公路斜交桥梁工程,采用反应谱法和动力时程法计算 E2 地震作用下的响应规律,对比分析 2 种方法计算得到的内力和位移响应规律基本一致,响应最

值有所不同,总体而言,反应谱法计算所得结果偏安全;何江等^[11]分析大跨度桥梁墩—水耦合边界,基于反应谱理论计算大跨度桥梁结构承受的地震力最大值,得出多级地震响应曲线,以分析其多级地震响应;并以某地六跨桥为例,以多级地震下桥梁的位移、剪力、弯矩等响应时程为指标进行分析;王天利等^[12]以城市立交中分叉曲线桥梁为工程依托,构建典型分叉曲线桥梁模型,通过单维、多维和 E1、E2 地震工况下的数值仿真时程分析,研究分叉曲线立交桥梁的动力响应特性。尽管关于桥梁荷载研究成果较多,但未见涉及自行车桥的相关报道。另外,自行车高架桥在我国尚处于探索尝试的起步阶段,其地震响应分布规律仍需进一步探讨。

基于此,本文以中国首条薄壁弯箱梁自行车桥为工程背景,通过有限元程序 SAP2000 建立自行车桥的三维壳体有限元模型,在考虑 E1 和 E2 地震水准作用及不同加载方向的基础上,通过模拟地震荷载作用揭示桥梁在不同地震波作用下桥梁变形、应力以及支反力的动力响应结果,总结出一些对该类型桥梁设计和抗震性能分析有参考价值的结论。

1 地震响应分析方法

1.1 反应谱分析方法

反应谱法的理论是基于单质点体系推演得到的近似,即将结构简化为单质点串联弹性杆的结果计算体系,利用单自由度的反应谱理论进行求解分析,最终求得质点的等效地震力。

基于反应谱理论分析的基本分析流程为:按照多自由度体系的动力方程求解出各阶频率及对应的模态振型,再根据各个振型的周期从加速度反应谱中读取对应的谱加速度,从而计算出各阶振型作用在各节点的拟静定地震力,再将不同的振型的作用结果通过振型组合的方式进行组合,最终求出各阶

振型地震作用下总反应的最大值。

1.2 时程分析方法

时程分析法是给定的地震动输入出发,采用多节点多自由度的计算模型建立完整的动力学方程,采用逐步计算地震过程中每一瞬时的桥梁的位移、速度和加速度响应,从而得出桥梁在地震作用下的弹性和塑性阶段的内力变化以及构件开裂、损坏、内力重分配的发展过程。

本次分析选择 El Centro 波和兰州波两条有代

表性的二类场地地震波,持续时间依次为 30 s 和 16 s,两组波的采样频率均为 50 Hz,其中最大峰值加速度 El 波为 $341.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,兰州波为 $211.9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。另外通过人工地震波生成程序,输入符合本次桥梁场地的参数后生成人工波,对应的峰值加速度值为 $71.79 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。对上述 3 条地震波进行频谱分析(即快速傅里叶变换—FFT),再转换为周期与加速度的函数,将转化后的曲线同规范设计反应谱对比,曲线图见图 1 所示。

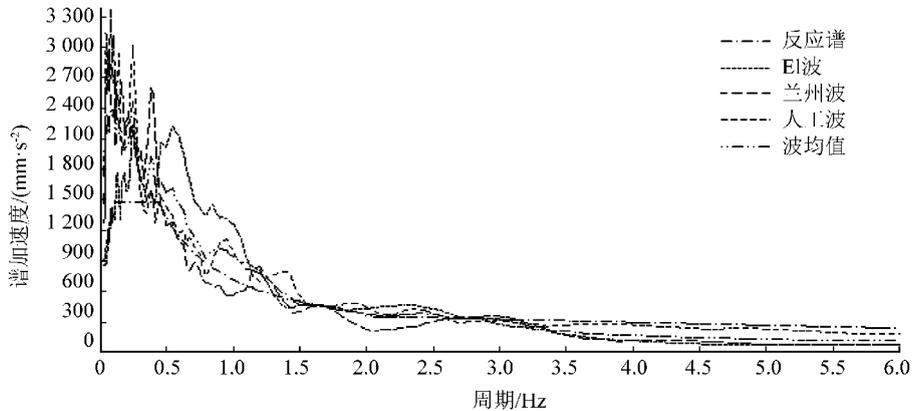


图 1 地震波谱加速度同规范反应谱的对比曲线

Fig.1 The contrast curve between the acceleration of seismic spectrum and the normative response spectrum

从图 1 可以看出,在桥梁结构的敏感周期范围内,El Centro 波、兰州波和人工波对应的地震反应谱频谱曲线同设计反应谱误差在 $\pm 20\%$ 以内,因此所选 3 条地震波满足对应的频谱要求。

2 工程背景

厦门市自行车高架桥位于岛东部云顶路段,该桥全线共 80 联,每联 2~4 跨,跨度 18~40 m,为独墩连续梁体系,总长约 7.5 km。主梁采用流线形薄壁钢箱梁作为主体受力结构,整幅式箱梁宽 4.8 m,分离式箱梁宽 2.8 m,高均为 1.0 m;在箱内顶、底板及腹板上布置扁钢加劲肋。墩柱采用钢管混凝土结构形式,外表面为 20 厚 Q345 圆钢管,内填充 C30 微膨胀混凝土,截面直径 1.2 m,高度 1~8 m。

3 数值模型设计

为研究地震作用下桥梁位移、应力和支座反力变化情况,借助有限元分析程序 SAP2000 构建自行

车桥三维壳体模型。限于篇幅,选取该自行车桥第 21 联(第 70 跨~第 74 跨)进行计算,该联包含分离式、整体式、曲线分叉和双线合并单线等多种典型桥跨结构形式。

3.1 网格划分与单元模拟

相比于杆系有限元模型受平截面刚性假定的限制,壳单元模型能够比杆系有限元模型更为真实地反映应力和变形沿钢梁横断面的分布情况,从而可以更合理地描述高架自行车钢桥在地震荷载作用下的受力变形特点。因此,主梁结构采用壳单元模拟,网格划分时综合考虑运算效率与精度,以四边形网格为主,局部过度区域为三角网格,最大网格划分尺寸为 1.0 m,共划分 14 465 个单元;桥墩结构采用杆单元模拟,划分为 402 个单元。

3.2 结构参数

数值模型中,主要使用的材料和物理参数见表 1,参数包括:重度 γ 、密度 ρ 、弹性模量 E 、剪切模量 G 、泊松比 ν 、线膨胀系数 α 。

表 1 有限元模型中所使用材料物理参数表

Table 1 Material physical parameter table used in finite element model

构件	材料	$\gamma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/Pa	G/Pa	ν	$\alpha/(1 \cdot \text{C}^{-1})$
桥墩	C30 混凝土+钢管	25 000	2 550	3.0×10^{10}	1.25×10^{10}	0.2	$1.0\text{E}-5$
主梁	Q345	77 000	7 850	2×10^{11}	7.69×10^{10}	0.3	$1.17\text{E}-5$

3.3 几何模型

选取的自行车桥第 21 联包括分离直线段(第 1 跨)、整体直线段(第 2 跨)、分离曲线段(第 3 跨)、曲

线分叉段(第 4 跨)和单幅曲线段(第 5 跨)5 种典型桥跨结构形式,如图 2(a)所示,其中第 2 跨整体直线段模型图见图 2(c)所示。

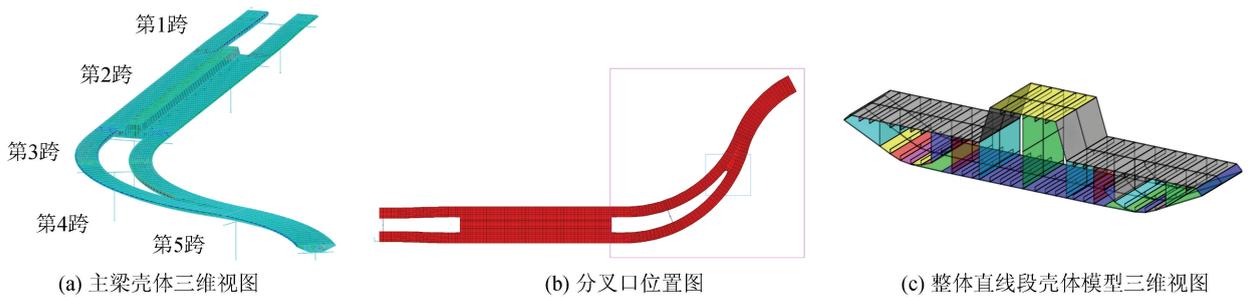


图 2 自行车桥第 21 联有限元模型图

Fig.2 Finite element model of the twenty-first joint of bicycle bridge

3.4 计算工况

3.4.1 反应谱法

本次分析主要考虑 E1 和 E2 地震水准作用下反应谱工况结果,其中反应谱工况分为 4 个工况,分别为 x 方向和 y 方向 2 个方向的地震作用,其中反应谱对应的地震水准分别对应于多遇地震和罕遇地震,其中多遇地震对应的峰值加速度为 $0.205g$,罕遇地震对应的地震峰值加速度为 $0.692g$ 。每种地震水准均考虑 x 方向(顺桥向)和 y 方向(横桥向)2 个方向。因此地震反应谱工况一共为 4 个对应的荷载工况,具体参见表 2 所示。

3.4.2 时程分析法

本次时程分析同样也是考虑 E1 和 E2 地震水

准,每个水准分别选取 3 条地震波进行分析,对应的波的名称分别为 El-Centro 波、兰州波和人工波,相对应的地震波的峰值分别为 341.7、211.9 和 71.79;每条地震波均考虑 x 方向和 y 方向。因此地震时程工况一共为 12 个对应的荷载工况,具体参见表 3 所列,地震工况分析最小加载步为 0.02 s 。

表 2 地震作用分析反应谱工况及其参数表

Table 2 Response spectrum working conditions and parameter table for seismic action analysis

工况编号	地震水准	最大峰值加速度	加载方向
1-1	E1	0.205g	x
1-2			y
1-3	E2	0.692g	x
1-4			y

表 3 地震作用分析时程工况及其参数表

Table 3 Time-history working conditions and parameter table of seismic action analysis

工况编号	地震水准	最大峰值加速度	地震波函数	地震波函数峰值	加载方向
2-1	E1	55 cm/s ²	Elcentro 波	341.7	x
2-2					y
2-3			兰州波	211.9	x
2-4					y
2-5			人工波	71.79	x
2-6					y
2-7	E2	310 cm/s ²	Elcentro 波	341.7	x
2-8					y
2-9			兰州波	211.9	x
2-10					y
2-11			人工波	71.79	x
2-12					y

考虑到时程分析结果的数据量非常巨大,本次分析选取有代表性的点作为采样点,其中位移采样点如表 4 所示,其中应力为单元对应采样点位置处的应力。本次分析选取采样点主要分为 2 大类,分别为跨中采样点和支座采样点,其中跨中采样点选

取桥面平面处和桥梁跨中位置处的节点,支座采样点选择桥面平面处和支座所在位置交汇处。

4 桥梁结构动力特性

模态分析作为后续反应谱和时程分析的基础,

表4 时程分析工况结果采样点映射表

Table 4 Sampling point mapping table of time-history analysis

区域名称	位置名称	节点编号
端部采样点	1#桥墩	260
	2#桥墩	511
	3#桥墩	537
	4#桥墩	891
	5#桥墩	1 268
	6#桥墩	2 952
跨中采样点	第1跨跨中	249
	第2跨跨中	264
	第3跨跨中	523
	第4跨跨中	884
	第5跨跨中	1 259
支座采样点	1#支座	2 599
	2#支座	2 600
	3#支座	2 601
	4#支座	2 602
	5#支座	2 603
	6#支座	2 604

有必要在先求解对应的模态结果。自行车桥前3阶振型结果如表5所列。

从表5可知,桥梁第1阶、2阶和3阶的主振型分别发生在 z 方向、绕 z 轴方向和 x 方向,其中第1阶 z 方向平动振型,其质量参与系数为25%;第2阶为横截面方向扭转振型,其质量参与系数为6.7%;第3阶为绕 z 轴方向扭转振型,其质量参与系数为24%。前2阶的振型图见图3所示。

5 计算结果及分析

5.1 地震作用下自行车桥位移分析

5.1.1 反应谱法计算结果

E1和E2地震水准作用下自行车桥的最大位移及出现位置如表6所列。

从表6可以看出,4个工况下的最大位移量为14 mm,出现在横桥向作用时第4跨跨中的 z 方向;

表5 自行车桥前3阶振型结果

Table 5 Results of the first three vibration modes of bicycle bridge

振型	周期/s	频率/Hz	质量参与系数			
			x 轴方向	y 轴方向	z 轴方向	绕 z 轴方向
1阶	0.29	3.448	0.002	0.007	0.25	0.015
2阶	0.284	3.521	0.008	0.024	0.006	0.052
3阶	0.206	4.854	0.061	0.13	0.015	0.24

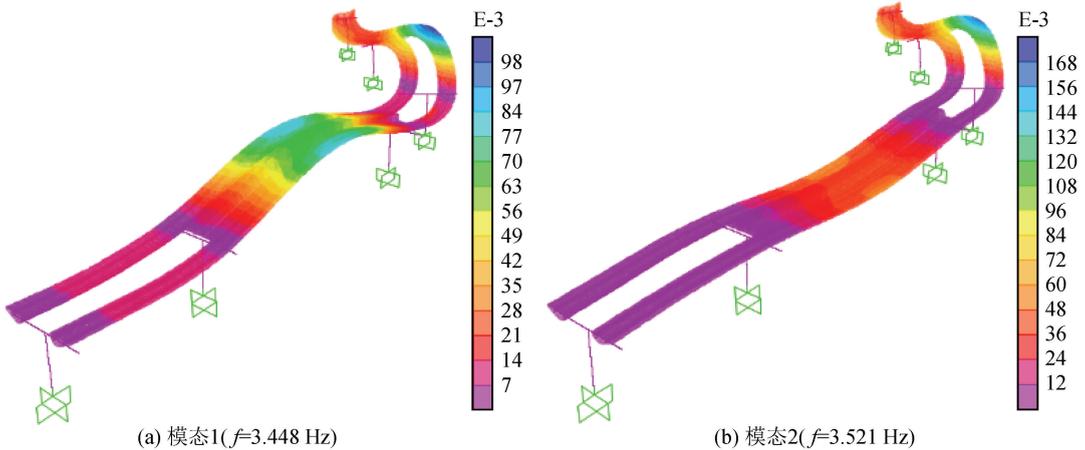


图3 模态振型

Fig.3 Modal shape

表6 地震作用下自行车桥最大位移及出现位置(单位:mm)

Table 6 Maximum displacement and occurring position of bicycle bridge under earthquake (Unit:mm)

工况编号		1-1	1-3	1-2	1-4
x 方向分量	最大值	1.05	5.6	1.4	4.9
	出现位置			第5跨跨中	
y 方向分量	最大值	1.68	3.5	1.68	5.6
	出现位置		第5跨跨中		第4跨跨中
z 方向分量	最大值	2.38	8.4	2.92	14
	出现位置			第4跨跨中	

无论是横桥向作用或顺桥向的地震作用,还是 E1 或 E2 地震水准作用,位移计算结果均表现为 z 方向分量最大,且 z 方向分量极值均发生在第 4 跨(曲线分叉段)跨中位置。

5.1.2 时程分析法计算结果

通过计算发现,E2 水准地震作用无明显的非线性过程,E2 水准响应曲线没有明显的附加阻尼滞后效应,因此 E2 的响应曲线和 E1 响应曲线的随时间的变化趋势一致,E1 对应的最大时刻与 E2 相同。根据结果采样点映射表(表 4)输出的 E2 水准地震作用下自行车跨中和桥墩顶部位移计算结果见表 7 和表 8 所列。

表 7 E2 水准地震作用下自行车桥跨中最大位移及发生时刻

Table 7 Maximum displacement and occurrence time of bicycle bridge span under E2 level earthquake

加载方向	工况编号	第 1 跨跨中		第 2 跨跨中		第 3 跨跨中		第 4 跨跨中		第 5 跨跨中	
		最大值/mm	发生时刻/s								
x 方向	工况 2-7	1.03	3.04	0.21	2.08	0.08	2.08	3.76	2.4	0.1	2.08
	工况 2-9	0.91	3.36	0.23	3.2	0.07	3.2	4	8.64	0.11	9.44
	工况 2-11	0.84	13.7	0.17	4.56	0.07	6.88	3.2	6.64	0.12	10.88
y 方向	工况 2-8	4.09	2.4	1.9	2.48	0.63	4.88	4.49	3.04	2.32	2.48
	工况 2-10	4.31	4.8	1.53	8.64	0.74	7.36	3.8	4.8	1.94	9.52
	工况 2-12	3.86	13.68	1.42	10.56	1	8.8	3.2	6.64	3.96	13.68

表 8 E2 水准地震作用下自行车桥桥墩顶部最大位移及发生时刻

Table 8 Maximum displacement and occurrence time of the top of bicycle bridge pier under E2 level earthquake

加载方向	工况编号	1# 桥墩顶部		2# 桥墩顶部		3# 桥墩顶部		4# 桥墩顶部		5# 桥墩顶部		6# 桥墩顶部	
		最大值/mm	发生时刻/s										
x 方向	工况 2-7	0.23	2.08	0.08	2.08	0.06	2.08	2.88	2.4	0.1	2.08	4.06	2.88
	工况 2-9	0.18	3.2	0.07	3.2	0.058	4.72	3.99	8.64	0.14	9.44	4.4	8.64
	工况 2-11	0.22	9.12	0.06	15.28	0.06	12	2.6	16.08	0.14	10.88	3.59	6.64
y 方向	工况 2-8	2.39	2.4	0.04	4.48	0.038	2.48	4.59	3.04	3.8	2.48	3.63	3.04
	工况 2-10	2.58	8.64	0.043	9.04	0.048	9.68	4.36	4.8	3.01	9.52	3.25	9.2
	工况 2-12	2.3	10.56	0.044	8.8	0.046	8	4.23	13.68	2.9	13.12	3.21	13.68

由表 7 和表 8 可知,横桥向和顺桥向地震作用下桥墩顶部出现最大位移的位置分别在 4# 桥墩顶部和 6# 桥墩顶部。E2 水准地震作用下自行车桥跨中最大位移为 4.49 mm,桥墩顶部最大位移为 4.59 mm,两者均发生在 y 方向的 El-centro 地震波作用下的 3.04 s 时刻处,分别出现在第 4 跨(曲线分叉段)跨中和 4# 桥墩顶部,与反应谱法计算结果相同;其中,该工况下(工况 2-8)各桥墩顶部的最大位移值从大到小的排序为 4# 桥墩 > 5# 桥墩 > 6# 桥墩 > 1# 桥墩 > 2# 桥墩 > 3# 桥墩。

5.2 地震作用下自行车桥应力分析

5.2.1 反应谱法计算结果

壳体的应力分量较多,限于篇幅,本节以最大工作应力分量为例, x 、 y 方向 E1 和 E2 水准地震作用下最大工作应力分量变化情况如表 9 所列。

从表 9 可以看出,在 x 方向 E1、E2 水准地震作用下应力最大值出现在第 4# 跨的跨中位置,最大值分别为 8.4 MPa 和 28 MPa;同 x 加载方向一样,

在 y 方向 E1、E2 水准地震作用下应力最大值也出现在第 4 跨(曲线分叉段)跨中位置,最大值分别为 15.4 MPa 和 49 MPa。

表 9 地震作用下自行车桥最大工作应力(单位:MPa)

Table 9 Maximum working stress of bicycle bridge under earthquake (Unit:MPa)

工况编号	1-1	1-3	1-2	1-4
最大值	8.4	28	15.4	49
出现位置	第 4 跨跨中			

5.2.2 时程分析法计算结果

E2 水准地震作用下自行车跨中和桥墩顶部应力计算结果见表 10 和表 11 所列。

从表 10 和表 11 可以看出,E2 水准地震作用下自行车桥跨中最大应力值为 12.7 MPa,桥墩顶部最大应力值为 9.86 MPa,均发生于 y 方向的 El-centro 地震波作用下的 2.72 s 时刻处,分别出现在第 1 跨跨中和 1# 桥墩顶部。顺桥向和横桥向地震作用下自行车桥跨中最大应力出现的位置分别为第 4 跨和

表 10 E2 水准地震作用下自行车桥跨中最大应力及发生时刻

Table 10 Maximum stress and occurrence time of bicycle bridge span under E2 level earthquake

加载方向	工况编号	第 1 跨跨中		第 2 跨跨中		第 3 跨跨中		第 4 跨跨中		第 5 跨跨中	
		最大值 /mm	发生时刻/s								
x 方向	工况 2-7	4.94	3.36	3.55	2.48	0.88	5.2	9.96	2.72	1.19	2.32
	工况 2-9	5.1	3.68	3.3	3.44	1.34	9.44	10.93	3.44	1.54	4.88
	工况 2-11	3.89	7.44	2.38	13.04	1.4	9.2	8.91	4.32	2.2	12.24
y 方向	工况 2-8	12.7	2.72	5.32	2.64	5.2	5.2	8.03	3.36	4.23	4.96
	工况 2-10	10	3.44	2.63	6.56	8.85	9.2	8.77	3.68	3.63	9.52
	工况 2-12	9.12	16.08	4.12	15.68	8.97	8.96	8.6	4.56	3.37	13.12

表 11 E2 水准地震作用下自行车桥各桥墩顶部最大应力及发生时刻

Table 11 Maximum stress and occurrence time of pier top of bicycle bridge under E2 level earthquake

加载方向	工况编号	1# 桥墩顶部		2# 桥墩顶部		3# 桥墩顶部		4# 桥墩顶部		5# 桥墩顶部		6# 桥墩顶部	
		最大值 /mm	发生时刻/s										
x 方向	工况 2-7	4.98	2.48	3.51	2.48	1.11	2.72	6.26	2.72	0.92	2.64	1.44	2.48
	工况 2-9	4.05	4.96	3.1	9.52	1.38	11.2	6.71	3.44	1.07	8.24	1.02	8.64
	工况 2-11	3.82	13.12	3.25	7.44	1.8	6.88	5.16	4.32	1.47	12.32	1.13	6.64
y 方向	工况 2-8	9.86	2.72	5.34	4.48	5.38	2.48	6.38	2.72	2.9	4.96	1.24	4.88
	工况 2-10	8.54	3.44	6.57	3.6	7.11	3.6	5.96	3.68	3	9.52	1.16	9.52
	工况 2-12	7.4	13.36	6.73	8	6.94	8.8	5.21	7.2	2.14	13.12	1.04	7.44

第 1 跨,各桥墩顶部最大应力出现的位置分别为 4# 桥墩和 1# 桥墩。横桥向第 1 跨跨中的 El-centro 波、兰州波和人工波对应的应力最大值依次为 12.7 MPa、10 MPa 和 9.12 MPa,发生在对应地震波下的 2.72 s、3.44 s 和 16.08 s 时刻处;1# 桥墩顶部应力最大值依次为 9.86 MPa、8.54 MPa 和 7.4 MPa,发生在对应地震波下的 2.72 s、3.44 s 和 13.36 s 时刻处。

5.3 地震作用下自行车桥支反力分析

5.3.1 反应谱法计算结果

x 方向和 y 方向分别对应的 E1 和 E2 水准地震作用下桥梁支座反力结果见表 12 所列,支反力结果分为水平 x 方向和 y 方向 2 个分量,竖向力为 z 方向,本节分析主要以水平反应谱分析为主。

从表 12 可以看出,最大的 x 方向的支反力发生在 x 方向 E2 水准地震作用下的 3# 桥墩处,最大值为 1 653.38 kN;最大的 y 方向的支反力发生在 y 方向 E2 水准地震作用下的 2# 桥墩处,最大值为 1 593.84 kN;最大的 z 方向的支反力发生在 y 方向 E2 水准地震作用下的 2# 桥墩处,最大值为 302.01 kN,根据支反力的大小可以看出桥墩在地震作用下以剪力为主,因水平变形导致偏心后产生弯矩并最终导致 z 方向支反力发生重分布,进而影响竖向支反力的大小,相对剪力而言,竖向支反力相对较小。

5.3.2 时程分析法计算结果

E2 水准地震作用下自行车桥墩顶部支座反力计算结果见表 13 所列。

表 12 地震作用下自行车桥支座反力(单位:kN)

Table 12 Bicycle bridge bearing reaction under earthquake action (Unit:kN)

位置	工况	x 方向分量	y 方向分量	z 方向分量
1# 桥墩	1-1	32.99	18.35	38.14
	1-3	111.37	61.95	128.73
	1-2	10.21	84.63	52.13
	1-4	34.47	285.67	175.97
2# 桥墩	1-1	462.75	131.08	47.83
	1-3	1562.05	442.48	161.44
	1-2	168.53	472.16	89.47
	1-4	568.88	1593.84	302.01
3# 桥墩	1-1	489.80	138.39	76.94
	1-3	1653.38	467.13	259.72
	1-2	142.20	459.95	81.55
	1-4	480.02	1552.61	275.27
4# 桥墩	1-1	39.98	28.89	56.99
	1-3	134.97	97.52	192.37
	1-2	35.40	74.94	83.24
	1-4	119.50	252.97	280.97
5# 桥墩	1-1	42.81	76.03	56.84
	1-3	144.50	256.64	191.88
	1-2	31.03	171.65	79.54
	1-4	104.73	579.43	268.50
6# 桥墩	1-1	71.38	67.37	32.46
	1-3	240.95	227.41	109.59
	1-2	59.44	101.31	48.17
	1-4	200.64	341.97	162.60

由表 13 可知, x 方向对应的 E2 水准地震作用下最大支座反力均出现在 6# 桥墩顶部, y 方向则出现在 5# 桥墩顶部,最大支座反力值为 438.9 kN,发生在 y 方向对应的 Elcentro 地震波下(工况 2-8)

表 13 E2 水准地震作用下自行车桥各桥墩顶部最大支座反力及发生时刻

Table 13 Maximum support reaction and occurrence time at the top of bicycle bridge piers under E2 level earthquake

加载方向	工况编号	1# 桥墩顶部		2# 桥墩顶部		3# 桥墩顶部		4# 桥墩顶部		5# 桥墩顶部		6# 桥墩顶部	
		最大值 /kN	发生时刻/s										
x 方向	工况 2-7	65.8	2.08	147.6	2.08	196.1	2.08	108.97	2.48	124.75	2.48	245.4	2.48
	工况 2-9	90.48	3.76	170.7	3.52	192.9	3.52	132.9	3.52	132.1	8.64	277.2	3.52
	工况 2-11	102.3	10.88	142	6.88	155.4	12	83.6	4.56	126.3	6.64	201.3	6.64
y 方向	工况 2-8	277.7	2.48	107.9	4.48	122.3	4.48	237.3	2.24	438.9	2.48	257.8	2.08
	工况 2-10	218.5	9.04	118.7	4.64	129.8	9.04	222.8	9.04	392.2	6.32	250.2	4.64
	工况 2-12	238.5	6.8	111.6	8.8	120.4	8.8	211.1	15.28	421.1	16.08	239.4	4.58

的 2.48 s 时刻处;该工况下各桥墩顶部的支座反力值从大到小的排序为 5# 桥墩 > 6# 桥墩 > 1# 桥墩 > 4# 桥墩 > 3# 桥墩 > 2# 桥墩,各个桥墩支反力最大值为 438.9 kN > 257.8 kN > 277.7 kN > 237.3 kN > 122.3 kN > 107.9 kN。

6 结论与建议

本文采用反应谱分析法和时程分析法对厦门自行车桥地震荷载下的受力性能展开研究。借助全球著名有限元分析程序 SAP2000 建立第 21 联整体数值模型,考虑 E1 和 E2 地震水准作用,每种地震水准均考虑顺桥向和横桥向,计算在不同的地震作用下桥梁结构在跨中和支座位置的动态响应,分别针对位移、应力和支反力这 3 项关键指标逐一分析,主要得出以下结论。

(1) 无论是横桥向作用或顺桥向的地震作用,还是 E1 或 E2 地震水准作用,位移计算结果均表现为 z 方向分量最大,且 z 方向分量极值均发生在第 4 跨(曲线分叉段)跨中位置。

(2) 桥墩在地震作用下以剪力为主,因水平变形导致偏心后产生弯矩并最终导致 z 方向支反力发生重分布,进而影响竖向支反力的大小,相对剪力而言,竖向支反力相对较小。

(3) E1 和 E2 地震水准响应情况随时间的变化趋势基本一致,未出现位移变化滞后的现象,因此在 E2 水准地震作用过程中桥梁无明显阻尼比变化,也无明显的塑形耗能的情况。因此可以判断在 E2 水准地震作用时,桥梁结构整体仍基本处于弹性,基本没有塑形耗能导致的变形之后的现象。

(4) 反应谱法计算得到的响应包络值相对 3 条不同的地震时程结果的峰值大。由于反应谱分析是基于规范规定具有一定的保证率,因此计算结果偏大;而时程分析法采用的地震波具有较强离散性,能

得到随时间变化的趋势信息,但另一方面该计算结果仅代表输入地震波对应的响应。因此在实际桥梁抗震分析过程中需要综合考虑两者的分析结果,从而能够更准确的得到桥梁在地震作用下的响应情况。

综上所述,该自行车桥在罕遇地震作用下仍处于线弹性状态,桥梁结构整体满足设定的各类性能指标。

参考文献(References)

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国筑路机械学术研究综述·2018 [J].中国公路学报,2018,31(6):1-164.
Review on China's Road Construction Machinery Research Progress:2018 [J].China Journal of Highway and Transport, 2018,31(6):1-164.
- [2] 秦茜,袁振洲,田钧方.绿色交通理念下的慢行系统规划方法研究[J].规划师,2012,28(增刊2):5-10.
QIN Qian, YUAN Zhenzhou, TIAN Junfang. Slow-moving System Planning Method under the Concept of Green Transportation [J]. Planner, 2012, 28(supp2): 5-10.
- [3] 杨新苗,王亚华,田中兴.中国特色绿色交通城市发展战略与对策研究[J].城市发展研究,2018,25(5):19-24.
YANG Xinmiao, WANG Yahua, TIAN Zhongxing. Development Strategy and Countermeasure of Green Transportation City with Chinese Characteristics [J]. Urban Development Research, 2018, 25(5): 19-24.
- [4] 吴昊灵,袁振洲,田钧方,等.基于绿色交通理念的生态新区交通规划与实践[J].城市发展研究,2014,21(2):106-111.
WU Haoling, YUAN Zhenzhou, TIAN Junfang, et al. Transportation Planning and Practice of new Eco-zone based on Green Traffic Concept [J]. Urban Development Research, 2014, 21(2): 106-111.
- [5] 熊文,黎晴,邵勇,等.向世界级城市学习:天津市滨海新区 CBD 慢行交通规划[J].城市交通,2012,10(1):38-53.
XIONG Wen, LI Qing, SHAO Yong, et al. Learn from World-class cities: CBD Slow Traffic Planning for Tianjin Binhai New Area [J]. Urban traffic, 2012, 10(1): 38-53.

- [6] 冯建喜,马汀·戴斯特,扬·普瑞尔维茨.荷兰自行车交通的历史演进及规划设计[J].国际城市规划,2013,28(3):29-35.
FENG Jianxi,MARTIN DAISSE,JAN PRILVITZ.Historical Evolution and Planning and Design of Cycling Traffic in the Netherlands[J].International Urban Planning,2013,28(3):29-35.
- [7] 陈彦江,于连杰,刘良,等.简支梁桥纵向地震碰撞响应研究[J].自然灾害学报,2016,25(2):159-166.
CHEN Yanjiang,YU Lianjie,LIU Liang,et al.Study on Longitudinal Seismic Pounding Response of Simply-Supported Girder Bridges[J].Journal of Natural Disasters,2016,25(2):159-166.
- [8] 崔春义,孟坤,程学磊,等.大连长山矮塔斜拉桥抗震性能三维数值分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(3):335-340.
CUI Chunyi,MENG Kun,CHENG Xueli,et al.Three-dimensional Numerical Analysis of Seismic Performance of Dalian Changshan Low-pylon Cable-stayed Bridge[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2017,37(3):335-340.
- [9] 梁师俊,朱海东.斜拉-连续梁组合结构桥梁动力特性及地震响应分析[J].工程抗震与加固改造,2018,40(1):76-83.
LIANG Shijun,ZHU Haidong.Dynamic Characteristics and Seismic Response Analysis of Cable-stayed Continuous Beam Composite Bridge[J].Seismic Resistance and Reinforcement of Engineering,2018,40(1):76-83.
- [10] 付立彬,张敏,付娟.南水北调工程某高墩公路斜交桥抗震分析[J].施工技术,2018,47(16):86-88.
FU Libin,ZHANG Min,FU Juan.Seismic Analysis of a high Pier Highway Skew Bridge in the South-to-North Water Transfer Project[J].Construction Technology,2018,47(16):86-88.
- [11] 何江,王玉振.大跨度桥梁结构多级地震响应研究[J].地震工程学报,2018,40(1):26-31.
HE Jiang,WANG Yuzhen.Study on Multi-scale Seismic Response of Long-span Bridge Structures[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):26-31.
- [12] 王天利,李青宁.城市立交中分叉曲线桥梁地震响应研究[J].自然灾害学报,2018,27(3):179-187.
WANG Tianli,LI Qingning.Seismic Response of Bifurcated Curved Bridges in Urban Interchange[J].Journal of Natural Disasters,2018,27(3):179-187.