

# 在连续梁桥中内填混凝土偏心圆形 钢桥墩抗震性能

王占飞<sup>1</sup>, 申启航<sup>1</sup>, 隋伟宁<sup>2</sup>, 梁永强<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;  
3. 龙湖集团控股有限公司沈阳分公司, 辽宁 沈阳 110071)

**摘 要** 目的 讨论桥墩顶部时程位移、桥墩底部反力-桥墩顶部位移滞回曲线、桥墩根部应力分布及变形状态等分析结果, 考察上部结构偏心作用对桥墩地震响应的影响以及内填混凝土钢桥墩的抗震性能效果, 探明内填混凝土圆形钢桥墩以及空钢管桥墩在整体结构中的抗震性能. 方法 采用有限元分析软件 ABAQUS, 建立三维空间有限元模型, 在顺桥向、横桥向分别输入罕遇地震动, 进行非线性动力时程分析. 结果 在顺桥向地震动激励时, 上部结构偏心作用对连续梁桥桥墩的动力响应影响较小; 在横桥向地震动激励时, 随着上部结构偏心率的增加, 桥墩最大响应位移也增加, 偏心率对桥墩的地震响应影响较大; 无论顺桥向和横桥向地震作用, 空钢管桥墩均发生了屈服, 桥墩根部出现应力集中现象, 局部失稳变形过大, 丧失承载能力; 部分填充混凝土钢桥墩也进入了弹塑性阶段, 内填混凝土抑制了钢管局部失稳变形发展. 结论 钢桥墩填充混凝土后提高了承载能力, 减小了最大响应位移, 有效地提高了桥梁的抗震能力.

**关键词** 桥梁工程; 连续梁桥; 有限元分析; 内填混凝土钢桥墩; 地震动; 抗震性能

中图分类号 TU37; U443.22

文献标志码 A

## Seismic Performance of Eccentric Loading Steel Tubular Pier with In-filled Concrete in Continuous Bridges

WANG Zhanfei<sup>1</sup>, SHEN Qihang<sup>1</sup>, SUI Weining<sup>2</sup>, LIANG Yongqiang<sup>3</sup>

(1. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Longfor Group Holdings Co. Ltd., Shenyang Branch, Shenyang, China, 110071)

**Abstract:** To study the seismic performance of eccentric loading steel tubular pier with in-filled concrete and hollow steel tubular pier in continuous bridges, in this paper, a 3-D finite element

收稿日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378319)

作者简介: 王占飞(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震及钢结构桥梁方面研究.

model was established by ABAQUS, and nonlinear dynamic time history analysis was carried out, which input the rare earthquakes along the longitudinal (LG) and transverse (TR) direction of the bridge, respectively. By considering the results of the time-displacement response, force-displacement hysteresis curve, stress distribution, and deformation state, the influence of the eccentricity of the superstructure on the seismic response of piers was investigated, and seismic resistance of the steel tubular pier with in-filled concrete was confirmed. The results show that the eccentricity of the superstructure has little effect on the seismic response of the continuous bridges piers under rare earthquakes in LG direction. When rare earthquakes were input in TR direction of the bridge, the maximum response displacement of piers greatly increased as the eccentricity of superstructure increased. And it shows that eccentricity has a great influence on the seismic response of the piers. Therefore, no matter the rare earthquakes input in the LG and TR direction of the bridge, the hollow steel tubular piers has reached their yield state, and stress concentration occurred. The bearing capacity was lost due to local deformation was too large. These steel tubular piers with in-filled concrete also entered the elasto-plastic stage. Due to the in-filled concrete, the local deformation of the steel tubular pier was restricted. The bearing capacity of the steel tubular pier with in-filled concrete was significantly improved, and the maximum response displacement was reduced, which indicated that steel tubular with in-filled concrete effectively improve the earthquake-resistant capacity of the bridge.

**Key words:** bridge engineering; continuous bridges; finite element analysis; steel piers with in-filled concrete; ground motion; seismic performance

在以往国内外学者的试验和理论研究中,表明部分填充混凝土补强的T型钢桥墩具有良好的抗震性能,并给出了相应截面的极限承载力及极限位移的计算公式<sup>[1-5]</sup>.为了使得该类桥墩能够应用到更复杂的受力结构中,T. AOKI、Y. F. Yang、Y. GOTO等<sup>[6-13]</sup>对竖向荷载偏心作用的部分填充混凝土钢桥墩(或称倒“L”型桥墩)在面内水平荷载作用以及面外水平荷载作用下的拟静力力学性能进行了试验和有限元分析.研究表明,竖向荷载偏心桥墩在面内水平往复荷载作用下,由于初始弯矩的存在,承载能力呈现明显的不对称性,偏心侧水平承载力降低,相反侧水平承载力增加,且随着偏心率的增加这种不对称性越明显.竖向荷载偏心桥墩在面外水平往复荷载作用下,随着偏心率的增加,桥墩的承载能力和延性减小.文献[14-17]给出了竖向荷载偏心作用下部分填充混凝土圆形钢桥墩面内、面外极限承载能力及延性的经验

公式.

目前关于部分填充混凝土补强的钢桥墩,国内外学者的研究主要集中在桥墩构件本身的承载能力、破坏机理以及抗震性能上,缺乏从整体桥梁角度考察桥墩的抗震性能.为了更真实地反映桥墩在地震作用下的响应情况,有必要将该类桥墩放置在整体桥梁中考察其抗震性能及破坏状态.Y. GOTO等<sup>[18]</sup>对内填混凝土钢桥墩和圆形空钢管桥墩的两跨高架桥进行了水平两方向振动台试验,探究了在整体桥梁中桥墩的动力响应.试验结果表明:内填混凝土补强圆形钢桥墩的抗震能力优于空钢管桥墩,并且在整体高架桥动力响应过程中,桥墩的力-位移滞回性能优于单独桥墩构件拟静力荷载作用下的滞回性能.

在上述研究成果的基础上,笔者以一座五跨连续梁桥为研究蓝本,采用ABAQUS有限元分析软件,建立了三维空间有限元模型.为考察上部结构偏心作用对桥墩地震响应的影响以及内填混凝土钢桥墩的抗震性能改善

效果,笔者设计了6座连续梁桥有限元模型,讨论桥墩顶部时程位移、底部反力-墩顶位移滞回曲线、桥墩根部应力及变形状态等结果,分析了上部结构偏心作用对桥墩地震响应的影响以及内填混凝土圆形钢桥墩的抗震性能。

1 连续梁桥模型的建立

1.1 工程概况及简化模型

以某五跨连续梁桥实际工程为蓝本,桥梁全长200 m,单跨跨度40 m,桥梁上部结构采用5片工字型钢主梁,梁高2.2 m,间距2.5 m。桥墩采用圆形钢桥墩,桥墩高度为10 m,承台厚度为2.2 m,桥梁重要程度为B

类。该连续梁桥采用弹性板式橡胶支座支承上部结构,基础形式为桩基础,桥面为浇筑式混凝土,厚0.2 m,铺装层为沥青混凝土,层厚0.07 m。为了考察上部结构偏心作用对桥墩地震响应的影响,上部结构偏心作用在下部结构的偏心率分别取0,0.1,0.2。为了考察内填混凝土对空钢管桥墩抗震性能的改善效果,笔者设计了圆形空钢管桥墩和部分填充混凝土的圆形钢桥墩两类连续梁桥,共计6座连续梁桥,连续梁桥如图1所示。图中, $H$ 为桥墩高度; $e$ 为上部结构恒载作用在支座上的合力距桥墩中线的水平距离;偏心率 $E=e/H$ ;内填混凝土的高度 $H_c$ 为3.5 m。

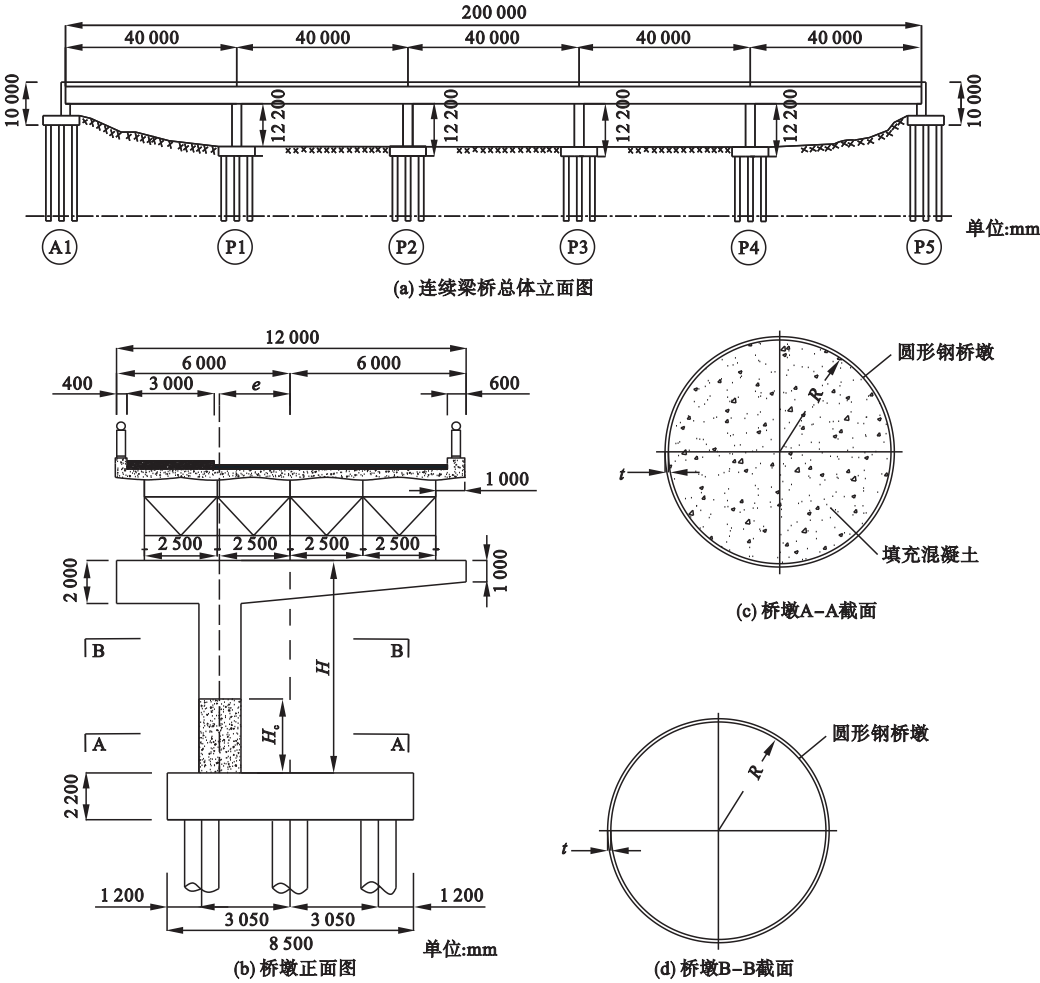


图1 连续梁桥构造图

Fig. 1 Dimensions of continuous bridges

设计的 6 座连续梁桥各桥墩的几何尺寸、设计参数以及静力弹塑性力学性能如表 1 所示. 其中,长细比  $\lambda$  和径厚比  $R_t$  数值由式(1)和式(2)求得. 关于内填混凝土圆形钢桥墩顺桥向、横桥向屈服荷载  $F_{lg,y}$ 、 $F_{tr,y}$  和顺桥向、横桥向屈服位移  $\delta_{lg,y}$ 、 $\delta_{tr,y}$  的计算,未考虑内填混凝土补强效果,与空钢管桥墩采用相同的计算方法,依据文献[14-15]求得. 内填混凝土圆形钢桥和空钢管桥墩顺桥向、

横桥向极限荷载  $F_{lg,u}$ 、 $F_{tr,u}$  和顺桥向、横桥向极限位移  $\delta_{lg,u}$ 、 $\delta_{tr,u}$ , 依据文献[16-17]给出的经验公式求得.

$$\lambda = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}},$$

(1)

$$R_t = \frac{D}{2t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)}.$$

(2)

式中: $\sigma_y$  为钢材屈服强度; $E$  为钢材弹性模量; $\nu$  为钢材泊松比.

表 1 各连续梁桥桥墩几何尺寸、设计参数及静力力学性能

Table 1 Detailed design parameters and static mechanical properties of continuous bridges piers

连续梁 桥类型	$E$	$H_c/$ mm	$F_{lg,y}/$ kN	$F_{tr,y}/$ kN	$\delta_{lg,y}/$ mm	$\delta_{tr,y}/$ mm	$F_{lg,u}/$ kN	$F_{tr,u}/$ kN	$\delta_{lg,u}/$ mm	$\delta_{tr,u}/$ mm
HS 连续梁桥	0	—	3 414	-3 414/+3 414	43	-43/+43	4 819	-4 819/+4 819	117	-117/+117
	0.1	—	3 404	-2 290/+4 542	45	-65/+22	4 638	-3 691/+5 947	112	-124/+110
	0.2	—	3 371	-1 159/+5 670	49	-86/0	4 169	-2 564/+7 075	101	-130/+102
CF 连续梁桥	0	3 500	3 414	-3 414/+3 414	43	-43/+43	5 501	-5 501/+5 501	174	-174/+174
	0.1	3 500	3 404	-2 290/+4 542	45	-65/+22	5 637	-4 320/+6 690	126	-181/+167
	0.2	3 500	3 371	-1 159/+5 670	49	-86/0	4 676	-3 130/+7 870	112	-188/+160

注:桥墩高  $H=10\text{ m}$ ,直径  $R=1100\text{ mm}$ ,钢管厚  $t=32\text{ mm}$ ,径厚比  $R_t=0.095$ ,长细比  $\lambda=0.34$ . P(piers)代表桥墩,OE(Eccentric)代表偏心率  $e/H=0$ ,CF(Concrete-Filled)代表填充混凝土,HS(Hollow Steel)代表空钢管;承载力及位移前面的“-”代表偏心,“+”代表非偏心.

在整体连续梁桥抗震性能分析时,在考虑计算精度、能够准确反映地震时结构破坏特征的基础上,尽量缩短分析时间,对上述的

各部分构件进行了模型简化,整体有限元模型如图 2 所示.

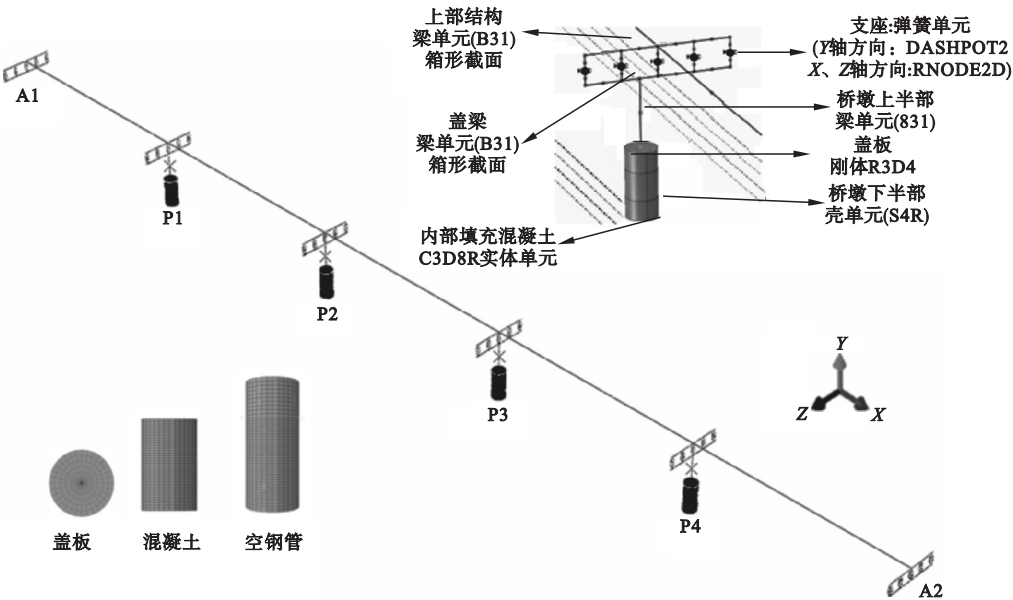


图 2 整体桥梁简化模型

Fig. 2 The analytical model of continuous bridges system

上部结构采用刚度等效原则将主梁及桥面铺装简化为梁单元 B31,其中轴向刚度  $EA = 12.41 \times 10^7 \text{ kN}$ ,抗弯刚度  $EI = 151.35 \times 10^7 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ .每个桥墩与上部结构连接的弹性橡胶支座,参考文献[19]道路桥梁示方书,简化为弹簧单元 SPRING,弹性系数如表2所示.

表2 支座弹簧单元系数

Table 2		Coefficient of spring element for bearings			kN/m
桥台/桥墩	连续梁桥橡胶支座支撑方向			垂直桥面方向	
	纵桥向	横桥向			
A1、A2 桥台	8 360	8 360		$\infty$	
P1 ~ P4 桥墩	4 720	4 720		$\infty$	

下部结构的桥台,由于在罕遇地震作用下不容许进入弹塑性,在本模型中未给予考虑,支座直接作用在边界条件上;下部结构的桥墩是桥梁承受地震作用的主要受力构件,在罕遇地震作用下,利用桥墩的弹塑性耗散地震能量确保整个桥梁的安全,因此对桥墩进行简化时,桥墩上半部分钢管柱以及盖梁采用梁单元 B31 建模,桥墩下半部分钢管采用壳单元 S4R 建模,高度约为桥墩高度的一半.桥墩柱壳单元与梁单元通过刚体 S3R 连接.混凝土采用缩减积分 C3D8R 实体单元建模,混凝土与钢管之间采用摩擦接触,摩擦系数取为  $0.6^{[17]}$ .桥梁上部结构和桥墩上半部分梁单元划分对结构的动力分析结果影响较小,并且也不是笔者主要考察对象,划分的网格比较粗略,上部结构梁单元每跨40 m 划分20个单元,桥墩梁单元划分10个单元.桥墩下半部分壳单元网格划分的比较详细,桥墩圆周方向划分32个单元网格,高度方向单元网格划分遵循单元长:高=2:1.混凝土实体单元网格划分在圆周方向及高度方向与桥墩壳单元保持一致,采用沿桥墩截面半径从内向外逐步加密的形式,划分了5个单元网格.

在材料设置方面,对于钢材上部结构和下部结构均采用 Q345 钢材,钢材的屈服强度  $\sigma_y$  取 345 MPa,弹性模量  $E$  为 206 GPa,泊松比  $\nu$  为 0.3,材料进入弹塑性后,选择可以考虑包辛格效应的双折线随动硬化模型,屈服后二次模量取  $E_0/100$ .混凝土立方体抗压强度  $\sigma_c$  取 50 MPa,抗拉强度取抗压强度的 1/10,混凝土本构关系为塑性损伤模型,膨胀角为 40 度,离心率取值为 0.1,等效双轴抗压屈服应力为 1.16,受拉子午线与受压子午线常应力的比值为 0.666 67,黏滞系数为 0.

1.2 边界条件及地震动输入

1.2.1 边界条件设置

暂不考虑桩土作用和行波效应,连续梁桥墩底与基础设置为固定约束.桥台部分采用主从约束的刚性连接,仅约束了竖向、横桥向以及绕桥轴线 X 轴的转动自由度,其他方向均无约束.

1.2.2 地震动输入

由于偏心率对桥墩的抗震性能影响较大,为了便于对比在罕遇地震作用下各种类型桥墩的安全性评价,笔者选取日本公路桥梁抗震规范中规定的地基情况良好且对抗震有利的第 I 类场地 JMA - NS 与 JMA - EW 罕遇地震动,分别在顺桥及横桥方向上输入地震波,持续时间为 20 s.

1.2.3 分析方法

分析采用非线性动力时程直接积分 Newmark  $\beta$  法进行分析,其中  $\beta = 0.25$ ,计算时间步长采用自动控制,最大步长设定为 0.01 s.分析中,阻尼采用 Rayleigh 阻尼,其计算公式为

$$C = aM + \beta K,$$
 (3)

$$a = \frac{4\pi f_1 f_2 (f_1 h_2 - f_2 h_1)}{f_1^2 - f_2^2},$$
 (4)

$$\beta = \frac{f_1 h_1 - f_2 h_2}{f_1^2 - f_2^2}.$$
 (5)

式中:  $M$  为质量矩阵;  $K$  为全体刚度矩阵;  $f_1$



为第一基本频率, Hz;  $f_2$  为第二基本频率, Hz;  $h_1, h_2$  为相应的阻尼系数, 取  $h_1 = h_2 = 0.02$ .

2 有限元分析结果

在整理 6 座连续梁桥非线性动力时程分析数据过程中, 由于数据庞大, 笔者仅以 JMA-NS 波为例, 讨论上部结构偏心作用与

不同桥墩类型的连续梁桥对桥墩顺桥向及横桥向地震响应的影响; 然后利用统计的方法对 6 座连续梁桥所有桥墩进行安全评价.

2.1 上部结构偏心作用对连续梁桥中墩 P2 动力响应结果对比分析

含有不同偏心率, 不同类型桥墩的 6 座连续梁桥的中墩 P2 在顺桥向和横桥向地震波激励下位移时程曲线对比如图 3 所示.

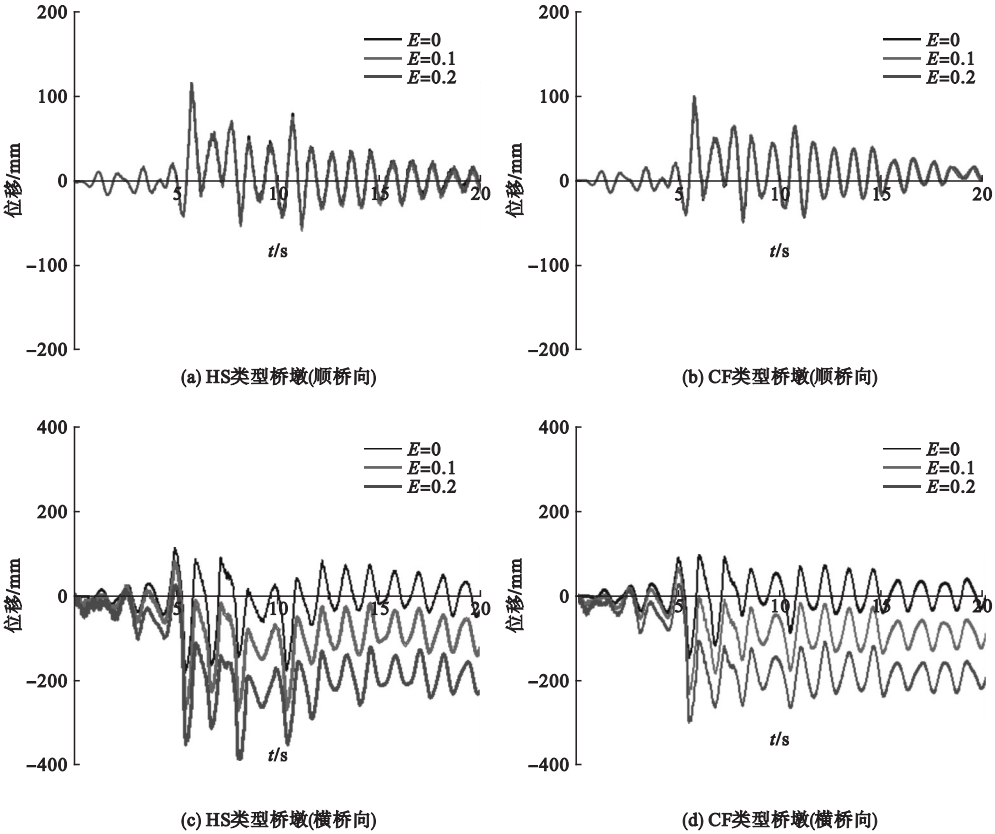


图 3 不同偏心率连续梁桥 P2 桥墩 JMA-NS 地震作用下响应位移

Fig. 3 Displacement of P2 in the continuous bridges with different eccentricity under JMA-NS

由图 3(a)、(b)可知: 顺桥向地震波激励下偏心率  $E = 0, 0.1, 0.2$  的 HS 类型连续梁桥 P2 桥墩, 最大时程位移均发生在 5.83 s, 其最大位移分别为 114 mm, 115 mm, 116 mm. 偏心率  $E = 0, 0.1, 0.2$  的 CF 类型连续梁桥 P2 桥墩, 最大时程位移均发生在 5.83 s, 其最大位移分别为 98 mm, 99 mm, 99 mm. 无论 CF 类型桥墩连续梁桥还是 HS 类型连续梁桥, 在顺桥向地震波激励下上部结构是否偏心对桥墩时程位移的影响较小.

由图 3(c)、(d)可知: 在横桥向地震波激励下偏心率  $E = 0, 0.1, 0.2$  的 HS 类型连续梁桥 P2 桥墩, 最大时程位移分别发生在 5.46 s、8.08 s 和 8.16 s, 其最大位移分别为 -179 mm, -269 mm, -384 mm. 偏心率  $E = 0, 0.1, 0.2$  的 CF 类型连续梁桥 P2 桥墩, 最大时程位移分别发生在 5.48 s、5.47 s 和 5.46 s, 其最大位移分别为 -146 mm, -230 mm, -298 mm. 结果表明无论 CF 类型连续梁桥还是 HS 类型连续梁桥, 偏心率

$E$  对横桥向地震波激励下桥墩的响应位移影响较大,随上部结构偏心作用的增加,最大响应位移增大,残余变形也增大。

6 座连续梁桥中墩 P2 在顺桥向和横桥向地震波激励下桥墩底部水平反力 - 墩顶位移滞回曲线对比如图 4 所示。

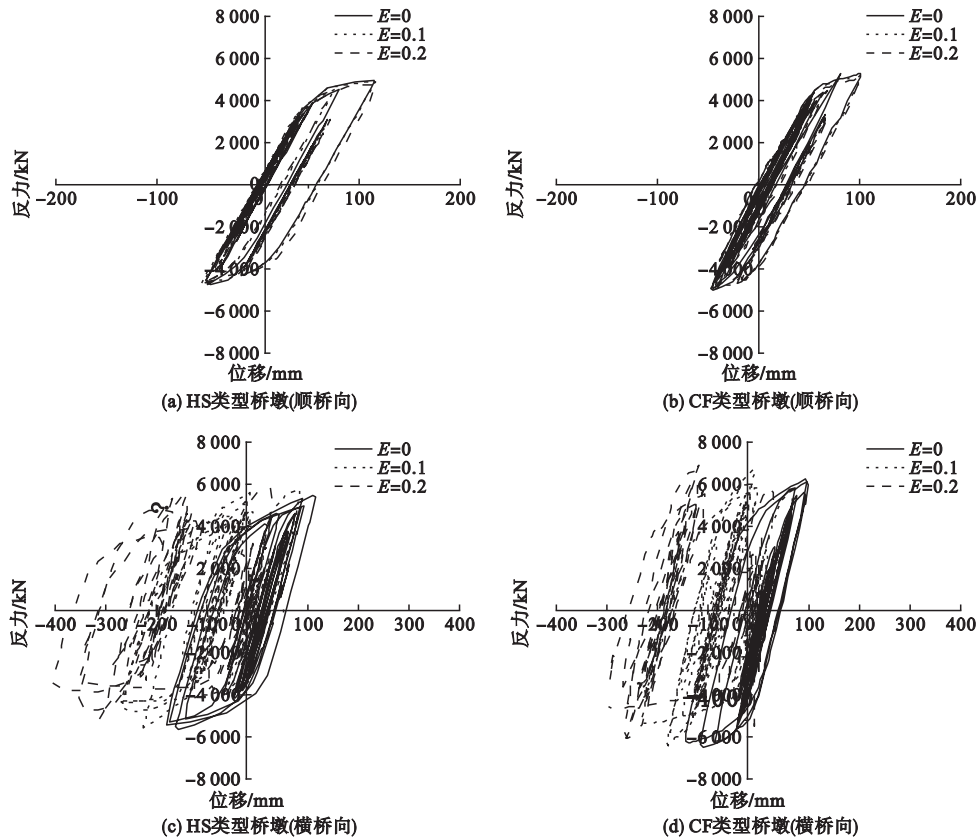


图 4 不同偏心率连续梁桥 P2 桥墩在 JMA - NS 地震作用下水平反力 - 位移的滞回曲线

Fig. 4 Force-displacement curve of P2 in the continuous bridges with different eccentricity under JMA-NS

由图 4(a)、(b) 可知,在地震波顺桥向作用下,6 座连续梁桥 P2 桥墩均进入弹塑性状态,充分耗散地震能量. 在上部结构偏心率  $E$  在 0 ~ 0.2 时,随着桥墩墩顶响应位移的增加,桥墩底部的反力同样增长,各连续梁桥 P2 桥墩进入弹塑性区域后,桥墩的刚度下降较快,但响应的桥墩底部反力逐渐增加,除偏心的空钢管桥墩达到最大承载力有缓慢下降的趋势外,其他桥墩均处于安全状态. 同时也表明上部结构偏心与否对桥墩顺桥向滞回性能影响较小。

由图 4(c)、(d) 可知:在横桥向地震波作用下,随着上部结构偏心率  $E$  的增加,响应位移均向偏心侧偏移,并且随着响应位移的增加,桥墩的桥墩底部反力达到屈服承载

力后也有所增加,除  $E=0$  的两种类型连续梁桥 P2 桥墩底部反力超过最大承载力后缓慢下降外,其他 4 座连续梁桥的 P2 桥墩底部反力达到最大承载力后均快速下降,结构处于危险状态. 从图 4 桥墩水平反力 - 位移滞回曲线结果看,上部结构偏心作用于下部结构对桥墩顺桥向力 - 位移滞回曲线影响较小,对横桥向力 - 位移滞回曲线影响较大. 同时也表明,即使个别桥墩动力时程响应达到极限状态,但是桥墩底部响应反力均大于同一位移时刻的静力承载能力. 如图 4(c) 中  $E=0$  的 HS 桥墩位移响应为 117 mm 时,桥墩底部响应反力为 5 523 kN,大于表 1 中所对应桥墩的极限承载力 4 819 kN. 这主要是由于上部结构主梁具有较大的侧向抗弯刚度,为

桥墩提供一定的约束所致.

2.2 HS 类型桥墩和 CF 类型桥墩最大位移响应时应力分布和局部变形对比分析

图 5 为上部结构偏心率  $E$  为 0.2 的 HS

类型连续梁桥中墩和 CF 类型连续梁桥中墩 (P2) 在顺桥向及横桥向 JMA-NS 地震动作用下最大响应位移时所对应的 Mises 应力云图及 PEEQ 等效塑性应变云图.

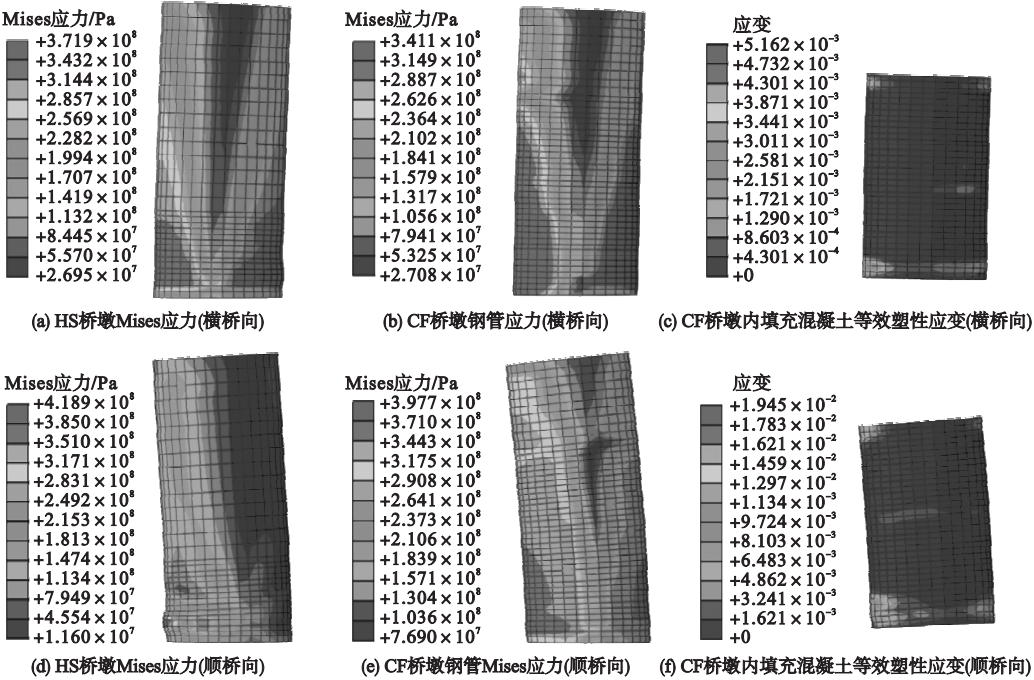


图 5  $E=0.2$  的 P2 桥墩底部应力分布、等效塑性应变及变形情况

Fig. 5 Deformation, stress contour and equivalent plastic strain of pier P2 with eccentricity  $E=0.2$

由图 5(a)、(b)、(c) 可知, HS 桥墩在最大响应位移时, 桥墩底部钢管高应力分布区域与 CF 桥墩相比, Mises 应力数值高且分布区域小, 同时在桥墩底部上方 300 ~ 800 mm 内发生的局部失稳变形. CF 桥墩在顺桥向地震动激励下, 桥墩底部钢管的达到屈服应力的分布区域广, 并且没有出现可视的局部变形. 这是由于内填的混凝土, 减缓了钢管 Mises 应力的进一步增加, 也延缓了钢管发生局部失稳变形的扩展. 从内填混凝土的第一主应力的分布可知, 混凝土下部基本处于受压, 上部处于受拉状态, 并且没有达到混凝土的抗压强度和抗拉强度. 由图 5(d)、(e)、(f) 可知, HS 类型桥墩的底部钢管 Mises 高应力分布区域小, 出现了较大的局部失稳变形及

应力集中现象. 与 HS 类型桥墩相比, CF 类型桥墩下部的钢管, 由于有内填混凝土的存在, Mises 高应力分布区域较广泛, 没有出现应力集中现象及明显的局部失稳变形. 内填的混凝土除了底部和顶部出现较大的塑性应变外, 大部分混凝土处于弹性状态, 未达到混凝土的抗拉或抗压极限强度.

2.3 第 I 类场地地震动作用下桥墩的安全性评价

六座连续梁桥所有桥墩在第 I 类场地地震动激励下抗震安全评价结果如图 6 所示. 安全评价采用安全系数(桥墩最大响应位移  $\delta_{\max}$  与该桥墩的极限位移  $\delta_u$  之比)是否超过 1 进行安全评价, 小于 1 说明结构处于安全状态, 而大于 1 则说明结构处于危险状态.



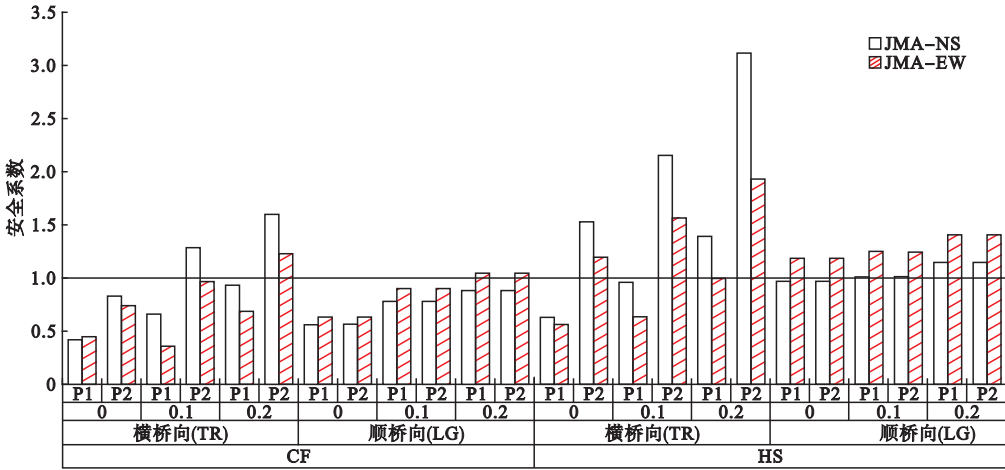


图6 第I类场地地震动激励下两种类型连续梁桥桥墩的抗震安全评价

Fig. 6 Seismic safety evaluation of two types continuous bridges piers under class I ground motion

由图6可知,当地震动横桥向作用时,CF类型连续梁桥P1桥墩均处于安全状态,P2桥墩中偏心率 $E=0$ 桥墩处于安全状态, $E=0.1$ 和 $0.2$ 处于危险状态;当地震动顺桥向作用时,除 $E=0.2$ 连续梁桥桥墩在JMA-EW地震动作用下略超过安全值外,其余桥墩均处于安全状态.HS类型连续梁桥在横桥向地震动作用时,只有 $E=0$ 和 $0.1$ 连续梁桥的P1桥墩处于安全状态,其余均处于危险状态;当地震动顺桥向作用时,只有 $E=0$ 的桥墩在JMA-NS地震动作用下处于安全状态,其余均处于危险状态.以上结果表明,无论上部结构偏心与否,CF连续梁桥桥墩的抗震性能以及安全评价结果均优于HS类型连续梁桥桥墩.

3 结 论

(1)连续梁桥在顺桥向地震动激励时,上部结构偏心与否对两种类型桥墩的响应位移基本没有影响,横桥向激励时,上部结构偏心率 $E$ 由0增加至0.2时,桥墩的最大响应位移及残余变形均有大幅度增加,偏心与否对两种类型桥墩的响应位移影响较大.

(2)JMA-NS地震波无论顺桥向还是横桥向作用,上部结构偏心率 $E$ 为0.2的HS类型连续梁桥桥墩均达到屈服,桥墩根部出

现应力集中现象,局部变形过大,桥墩底部响应反力达到最大值后有所降低.而CF类型连续梁桥的桥墩虽然也达到屈服状态,由于钢管内部混凝土的存在抑制钢管局部失稳变形的扩展发展,没有出现应力集中,顺桥向桥墩没有达到极限状态.其他条件相同的情况下,钢管墩内填混凝土能够提高桥墩承载能力,大幅度减小响应位移,并有效地提高桥梁的抗震能力.

(3)在I类场地罕遇地震动作用下,HS类型桥墩无论顺桥方向还是横桥方向,多数桥墩处于危险状态,上部结构偏心率 $E$ 越大,桥墩的危险性越高.CF类型桥墩由于内填混凝土,承载能力及延性得到大幅度提高,响应位移较小,多数桥墩的抗震满足安全要求,但当地震动横桥向作用时,偏心率 $E$ 过大时,也有桥墩处于危险状态.

参考文献

[1] KITADA T. Ultimate strength and ductility of state-of-the-art concrete-filled steel bridge piers in Japan [J]. Engineering structures, 1998, 20 (4/5/6): 347-354.

[2] GAO S, USAMI T, GE H. Eccentrically loaded steel columns under cyclic out-of-plane loading [J]. Journal of structural engineering, 2000, 126(8): 974-981.

[3] HIROTA T, SAKIMOTO T, YAMAO T, et al. Experimental study on hysteretic behaviour of inverted I-shaped steel bridge piers filled with

- concrete [C]. Proceedings of the 4th international conference on thin-walled structures. Loughborough, UK, Bristol and Philadelphia; Institute of Physics Publication, 2004: 373 – 380.
- [4] GOTO Y, JIANG K, OBATA M. Stability and ductility of thin-walled circular steel columns under cyclic bidirectional loading [J]. Journal of structural engineering, 2006, 132 (10): 1621 – 1631.
  - [5] GOTO Y, MURAKI M, OBATA M. Ultimate state of thin-walled circular steel columns under bidirectional seismic accelerations [J]. Journal of structural engineering, 2009, 135 (12): 1481 – 1490.
  - [6] AOKI T, SUSANTHA K A S. Seismic performance of rectangular-shaped steel piers under cyclic loading [J]. Journal of structural engineering, 2005, 131 (2): 240 – 249.
  - [7] AOKI T, SUZUKI S, WATANABE S, et al. Experimental study on strength and deformation capacity of inverted II-shape steel bridge piers subjected to out-of-plane cyclic loading [J]. Doboku gakkai ronbunshu, 2003 (724): 213 – 223.
  - [8] GOTO Y, KUMAR G P, KAWANISHI N. Nonlinear finite-element analysis for hysteretic behavior of thin-walled circular steel columns with in-filled concrete [J]. Journal of structural engineering, 2010, 136 (11): 1413 – 1422.
  - [9] GOTO Y, MIZUNO K, PROSENJIT K G. Nonlinear finite element analysis for cyclic behavior of thin-walled stiffened rectangular steel columns with in-filled concrete [J]. Journal of structural engineering, 2011, 138 (5): 571 – 584.
  - [10] GOTO Y, EBISAWA T, LU X. Local buckling restraining behavior of thin-walled circular cft columns under seismic loads [J]. Journal of structural engineering, 2013, 140 (5): 04013105.
  - [11] YANG Y F, HAN L H. Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression [J]. Thin-walled structures, 2011, 49 (2): 379 – 395.
  - [12] YANG Y F, HAN L H. Concrete filled steel tube (CFST) columns subjected to concentrically partial compression [J]. Thin-walled structures, 2012, 50 (1): 147 – 156.
  - [13] 王占飞, 梁永强, 邱国强, 等. 偏心受压部分填充混凝土圆形钢桥墩横桥方向作用下拟静力试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33 (5): 792 – 803.  
(WANG Zhanfei, LIANG Yongqiang, QIU Guoqiang, et al. Experimental study on the mechanical performance of partial concrete-filled steel tubular bridge pier under the vertical eccentric and horizontal cyclic loading in bridge transverse direction [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33 (5): 792 – 803.)
  - [14] 王占飞, 隋伟宁, 李幅昌, 等. 水平往复荷载作用下部分填充混凝土圆形钢桥墩柱的力学性能 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (1): 62 – 70.  
(WANG Zhanfei, SUI Weining, LI Guochang, et al. Mechanical behavior of partially concrete-filled steel circular bridge piers under cyclic lateral load [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28 (1): 62 – 70.)
  - [15] 王占飞, 张霞, 李幅昌. 基于延性性能圆形钢桥墩内填混凝土补强填充高度的简易计算方法 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32 (5): 827 – 837.  
(WANG Zhanfei, ZHANG Xia, LI Guochang. A simple method to calculate the concrete-filled height of steel tubular bridge piers with concrete-filled based on the ductility performance [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (5): 827 – 837.)
  - [16] 王占飞, 邱国强, 刘可, 等. 竖向偏心部分填充混凝土圆形钢桥墩的抗震性能 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32 (2): 261 – 270.  
(WANG Zhanfei, QIU Guoqiang, LIU Ke, et al. Study on the seismic performance of partial concrete-filled steel tubular bridge pier under the eccentrically vertical load [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (2): 261 – 270.)
  - [17] 王占飞, 李天宇, 隋伟宁, 等. 竖向偏心部分填充混凝土圆形钢桥墩顺桥方向抗震性能 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (12): 119 – 128.  
(WANG Zhanfei, LI Tianyu, SUI Weining, et al. Seismic performance of partial concrete-filled steel tubular bridge pier with vertical eccentricity along longitudinal direction [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30 (12): 119 – 128.)
  - [18] GOTO Y, EBISAWA T, OBATA M, et al. Ultimate behavior of steel and cft piers in two-span continuous elevated-girder bridge models tested by shake-table excitations [J]. Journal of bridge engineering, 2017, 22 (5): 04017001.
  - [19] 日本道路协会. 道路桥示方书·同解说: V 耐震设计篇 [M]. 东京: 丸善出版, 2017.  
(Japan Road Association. Specifications for highway bridges, part v seismic design [M]. Tokyo: Maruzen Publishing, 2017.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)