

文章编号: 1006-1355(2014)05-0125-05

钢管再生混凝土拱桥拱肋地震响应及抗震性能

张军艳, 翁光远

(陕西交通职业技术学院 公路工程系, 西安 710018)

摘要: 用再生骨料混凝土作为钢管混凝土结构的填充材料, 形成钢管再生混凝土结构, 研究钢管再生混凝土拱桥拱肋的抗震性能, 以某单跨中承式拱桥为例, 建立计算模型, 分析结构模型的动力特性, 计算了拱肋结构不同截面的弯矩响应峰值和轴力响应峰值, 同时研究得出了不同再生骨料替代率的钢管再生混凝土结构5个屈服阶段的抗震评估曲线。通过比较计算, 所得出的内力响应峰值和抗震评估曲线的关系, 得出了拱肋结构的抗震性能。计算结果表明, 钢管再生混凝土应用于拱肋结构有着较好的抗震性能, 不同替代率的再生骨料对钢管混凝土拱桥结构拱肋抗震性能影响程度较小。

关键词: 振动与波; 钢管再生混凝土; 桥梁结构; 抗震性能; 分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.05.029

Seismic Responses and Anti-seismic Performance of Recycled Concrete-filled Steel-tube Arch Ribs

ZHANG Jun-yan, WENG Guang-yuan

(Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology,

Xi'an 710018, China)

Abstract: Anti-seismic performance of the recycled concrete-filled steel-tube arch ribs is studied. The model for a single span and half-through arch bridge is established, and its dynamic characteristics are analyzed. The peaks of the bending moment response and axial force response in different sections of the arch ribs are calculated. Meanwhile, the seismic evaluation curves of the five yielding stages of the arch ribs with different regeneration aggregate replacement rates are obtained. Comparing the relations between the peak of the internal force response and the seismic evaluation curves, the anti-seismic performances of the arch ribs are obtained. Results of computation show that the recycled concrete applied to the steel-tube arch ribs has good anti-seismic performance, and the replacement rate of the recycled aggregate has little influence on the anti-seismic performance of the concrete-filled steel-tube arch ribs.

Key words: vibration and wave; recycled aggregate concrete filled steel tube; bridge structure; seismic performance; analysis

随着我国交通建设事业的发展, 改扩建项目所产生的废弃混凝土对环境产生了一定的危害。合理利用废弃混凝土成为科研工作者面临的重要课题, 开展该领域研究对于环境保护、节约资源和能源、减

少固体废弃物排放意义重大。再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, 简称RAC)的相关力学性能的研究工作已取得了较多的成果, 但是, 钢管再生混凝土结构及构件的力学性能研究尚在起步阶段^[1-3]。钢管再生混凝土结构是将再生骨料混凝土灌入钢管内形成钢管再生骨料混凝土构件。Yang Y F, Zhu L T^[4]研究了钢管再生混凝土梁—柱结构在交变荷载作用下的受力性能; 广西大学陈宗平等^[5]研究了钢管再生混凝土偏压柱的受力性能及承载力计算, 这些成果较好地揭示了钢管再生混凝土结构的基本受力性能。哈尔滨工业大学王玉银等^[6]进行了12个钢管再生混凝土和12个配置螺旋箍筋的钢

收稿日期: 2013-12-02

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(12JK0919)

作者简介: 张军艳(1978-), 女, 陕西西安人, 硕士, 目前从事桥梁工程抗震性能、路基路面新技术研究。

通信作者: 翁光远(1977-), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 目前主要从事结构抗震控制及结构健康监测技术的研究。

E-mail: weng_guangyuan@163.com

筋再生混凝土轴压短柱试验,在用钢量相同的情况下,对比分析了钢管再生混凝土短柱与钢筋再生混凝土短柱二者轴压力学性能的差异,试验结果表明:钢管再生混凝土试件表现出较好的力学性能。但是,目前对钢管混凝土结构尤其是桥梁结构进行动力计算,分析其抗震性能的研究工作并不多见^[7,8],为此,本文通过数值分析研究钢管再生混凝土拱桥结构的抗震性能。

1 模拟试验模型

1.1 模型结构的工程背景

本文按照某大桥的施工图设计的结构形式建立模拟试验的模型结构,该桥为单跨中承式钢管混凝土拱桥,计算跨径为125 m,矢高为31.25 m,矢跨比均为1/4,拱轴线为悬链线,拱轴系数为1.347,具体设计见图1。

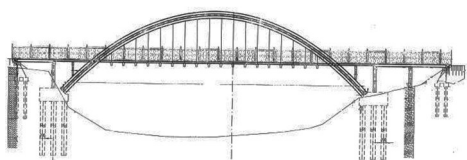


图1 拱桥结构

该拱桥的中拱肋高2.7 m,拱肋上下弦钢管直径为950 mm,均采用20 mm厚钢板卷制。桥梁上部结构中钢管混凝土采用C 30混凝土,预应力梁、铺装层采用C 40混凝土,桥面板采用C 35混凝土。

1.2 模型结构的建立

利用有限元计算通用程序ANSYS建立计算模型结构并进行计算,分别建立钢管混凝土的混凝土材料为普通混凝土和不同替代率再生混凝土的计算模型结构。

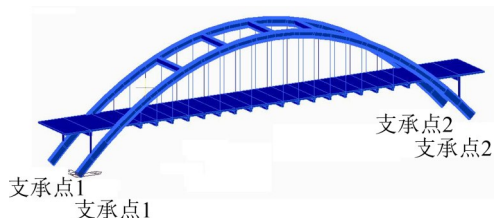
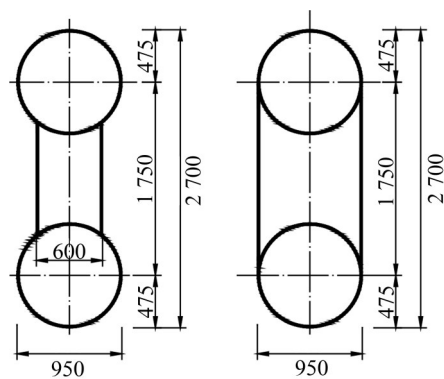


图2 模型结构

(1) 拱圈截面

单个拱肋分为24段,截面形式均为哑铃型拱截面,其中拱脚端截面采用组合截面I,其截面形式和截面的几何参数见图3(a),除拱脚端截面外,拱圈其余截面采用组合截面II,其截面形式和截面的几何参数见图3(b)。在拱肋上、下弦钢管之间用钢板焊接连接,连接钢板之间不灌注再生混凝土。

为了简化计算,在建立力学模型时,按照截面面



(a) 组合截面 I (b) 组合截面 II

图3 哑铃型拱肋截面

积和截面含钢量不变的原则,将以上两种截面等效为理想的圆钢管混凝土截面,简化后截面的几何参数及含钢量见表1。

表1 模型结构简化后的截面参数

截面特征	截面类型	
	组合截面 I	组合截面 II
含钢率/(%)	9.2	8.1
截面外径 D/mm	400	380
钢管厚度 t/mm	2.80	2.76

(2) 基本力学性能参数

本文仅考虑再生粗骨料取代率分别为100 %、50 %、0 %的再生混凝土做钢管的填充材料,同时选取龄期为10年(RA-10)的粗骨料,且忽略再生粗骨料龄期对力学性能参数的影响。钢管屈服强度 f_y 、边长为100 mm的再生混凝土立方体试块抗压强度 $f_{cu,100}^r$ 、再生混凝土轴心抗压强度 f_c^r 、再生混凝土的弹性模量 E_c^r 等参数的取值见表2。

表2 钢管再生混凝土拱圈的力学性能参数

粗骨料取代率	f_y/MPa	$f_{cu,100}^r/\text{MPa}$	f_c^r/MPa	E_c^r/MPa
100 %	309.0	43.1	31.1	2.12×10^4
50 %	309.0	46.7	33.7	2.39×10^4
0 %	309.0	45.3	32.7	2.70×10^4

(3) 材料的本构模型

本计算模型结构的拱轴线为合理拱轴线,拱圈截面为轴心受压构件,截面轴压应力与截面应变的关系根据参考文献[6]得出,如图4所示。

(4) 系杆

该拱桥设计采用可更换式OVMLZM-61成品组合型吊杆,属于受拉构件,计算模型中用杆单元模拟,吊杆的破断强度标准值为1 860 MPa。

1.3 模型结构的动力特性

通过对再生骨料替代率分别为100 %、50 %和

0%的模型结构进行动力模态分析,结果发现再生骨料替代率对于模型结构的动力特性影响并不大。表3列出了不同粗骨料替代率的模型结构前10阶固有频率及振动情况。

2 抗震性能分析

2.1 地震波的输入

本算例在研究抗震性能时采用时程分析的方法,选取EL-centro地震波,该模型的主桥跨度为125 m,研究中考虑了地震波多点输入的行波效应。模型结构中的支承点1和支承点2(见图2)输入的地震波分别按照基于相位差谱地震动场生成方法确定,自功率谱采用Clough-Penzien谱,迟滞相干函数 $r_{jk}(\omega)$ 采用Harichandran-Vanmareke模型,相位差谱采用基于Thráinsson and Kremidjian相位差谱统计模型。利用上述条件模拟生成该拱桥两端支承点的非平稳水平地震波时程,支承点1和支承点2的加速度时程如图5所示。

2.2 地震响应计算结果

采用时程分析方法对计算模型结构进行地震响应分析,根据场地情况选取本文图3生成的包含多

点输入相位差的EL-centro地震波。本文只考虑了计算模型结构在自重荷载和地震作用组合下的响应,为了便于分析,本文取该拱桥结构弯矩响应峰值和轴力响应峰值分析抗震能力。为了便于表示,将图1从左到右的方向记为顺桥向。取每个拱肋等间距的25个截面,I[1]表示顺桥向左侧拱肋从左侧拱脚位置开始的第一个截面,II[1]为顺桥向右侧拱肋从拱脚位置开始的第一个截面。表4给出了顺桥向左侧拱肋内响应峰值的计算结果,表5给出了顺桥向右侧拱肋内响应峰值的计算结果,表中数据均为Z轴方向的响应峰值。

2.3 抗震能力评估

按照参考文献[9]将钢管整个屈服过程分为5个阶段,各阶段定义如下:I阶段,钢管边缘屈服,为钢管混凝土截面的弹性极限状态;II阶段,截面1/4半径处屈服,为边缘至1/4半径处的区域屈服,其他区域则仍处于弹性状态,屈服区域内的钢管处于屈服状态,混凝土失效退出工作;III阶段,截面1/2半径处屈服,为边缘至1/2半径处的区域屈服,其他区域仍处于弹性状态,屈服区域内的钢管处于屈服状态,混凝土失效退出工作;IV阶段,截面3/4半径处屈服,

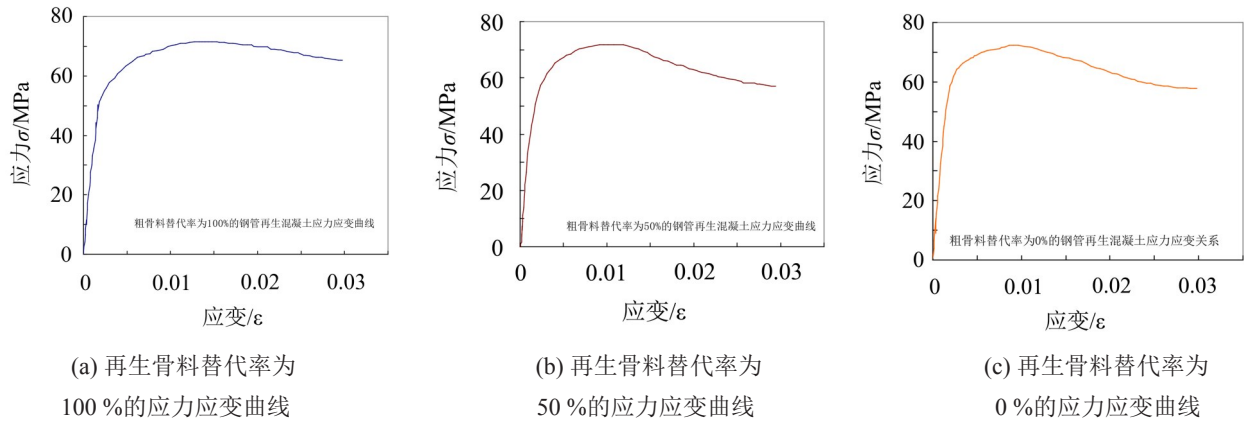
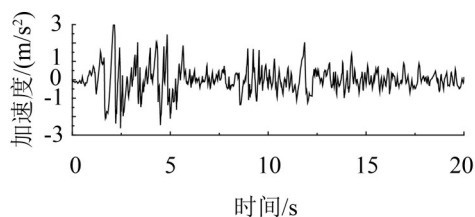


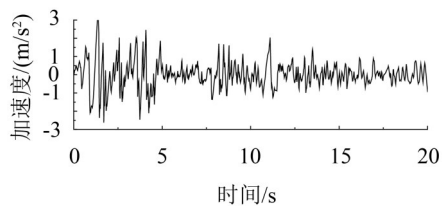
图4 不同粗骨料替代率的再生混凝土本构模型

表3 模型结构的模态分析

阶次	频率(Hz)			振动情况
	100 %替代率	50 %替代率	0 %替代率	
1	0.141	0.141	0.139	对称侧弯
2	0.253	0.251	0.252	反对称侧弯
3	0.331	0.328	0.329	正对称侧弯
4	0.472	0.470	0.469	反对称侧弯
5	0.488	0.488	0.485	反对称竖弯
6	0.518	0.518	0.517	正对称侧弯
7	0.639	0.639	0.639	反对称侧弯
8	0.722	0.721	0.722	正对称竖弯
9	0.751	0.753	0.752	扭转
10	0.792	0.791	0.791	反对称侧弯+扭转



(a) 支承点1地震波加速度时程



(b) 支承点2地震波加速度时程

图5 拱桥两端支承点的地震波合成

为边缘至3/4半径处的区域屈服,截面其他区域仍处于弹性状态,屈服区域内的钢管处于屈服状态,混凝土失效退出工作;V阶段,全截面屈服,截面全部处于屈服状态,混凝土失效退出工作。

根据文献[7]的方法可以计算得出5个阶段的弯矩承载力和轴力承载力,从而得出这5个阶段临界的弯矩-轴力相关曲线,以此曲线作为拱肋抗震能力评估曲线,该曲线将坐标系的第一象限分为6个区域,本文计算了再生骨料替代率分别为100%、50%及0%的钢管再生混凝土拱肋的弯矩承载力和轴力承载力,并得出了3组抗震评估曲线,分别如图6、图7和图8所示。将表4和表5中的弯矩响应峰值和轴力响应峰值绘制在抗震评估曲线中,根据表4和表5中数值在抗震评估曲线的位置判别拱肋结构的抗震能力。

从图6、图7和图8可以得出,不同粗骨料替代率的钢管再生混凝土拱桥的拱肋结构的弯矩响应峰值和轴力响应峰值均落在抗震评估曲线的II区,说明该拱肋结构具有较好的抗震性能,但随着粗骨料替代率的增大,抗震评估曲线中各个区域的弯矩承载力和轴力承载减小,弯矩响应峰值和轴力响应峰值在抗震评估曲线中的分布更接近II区临界曲线,说

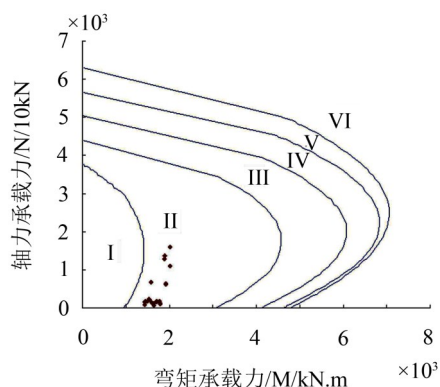


图6 再生骨料0%替代率的抗震评估曲线

明随着粗骨料替代率的增大,拱肋结构的抗震能力有所下降。

3 结语

通过研究,得出如下几个结论:

(1) 钢管再生混凝土和普通的钢管混凝土力学特性相似;

(2) 不同粗骨料替代率的钢管再生混凝土拱桥结构的固有频率变化不大,振型变化很小,钢管再生混凝土拱肋结构具有较好的力学性能和动力特性,具有较好的工程适用性;

表4 顺桥向左侧拱肋内力响应峰值

截面位置	轴向响应/kN	剪力响应/kN	扭矩响应/kN·m	弯矩响应/kN·m	截面位置	轴向响应/kN	剪力响应/kN	扭矩响应/kN·m	弯矩响应/kN·m
I[1]	-20 266.25	742.68	-1041.49	-1 080.86	I[14]	-14 489.15	-397.76	144.18	-141.11
I[2]	-19 254.08	843.57	-1324.85	612.87	I[15]	-14 623.09	-595.67	158.82	-155.56
I[3]	-18 931.24	231.08	-1370.48	1 282.09	I[16]	-15 115.4	223.68	10.29	-169.31
I[4]	-17 991.19	397.99	888.16	-85.96	I[17]	-15 488.53	58.03	-0.73	204.53
I[5]	-17 741.5	-376.34	912.62	-144.25	I[18]	-15 995.07	131.97	-554.11	123.5
I[6]	-17 090.49	-540.28	929.97	-141.34	I[19]	-16 518.16	40.37	-547.7	-105.45
I[7]	-16 497.11	-702.4	935.45	-48.31	I[20]	-17 101.86	-5.93	-537.54	-174.82
I[8]	-15 914.08	-645.84	194.27	666.09	I[21]	-17 747	4.73	-527.88	-171.23
I[9]	-15 457.2	-797.79	179.46	212.79	I[22]	-17 961.66	-670.15	-521.2	-106.44
I[10]	-15 068.51	-949.65	197.42	-166.02	I[23]	-18 909.59	-277.15	2 105.69	1 371.22
I[11]	-14 642.2	-75.39	120.25	-166.18	I[24]	-19 247.41	87.26	2 105.69	623.19
I[12]	-14 493.84	-248.05	136.14	-149.32	I[25]	-20 253.74	729.08	1702	1585.7
I[13]	-14 442.39	-198.37	131.05	-66.28					

表5 顺桥向右侧拱肋内力响应峰值

截面位置	轴向响应/kN	剪力响应/kN	扭矩响应/kN·m	弯矩响应/kN·m	截面位置	轴向响应/kN	剪力响应/kN	扭矩响应/kN·m	弯矩响应/kN·m
II[1]	-20 417.31	851.05	1 906.46	1 217.97	II[14]	-14 494.66	-359.23	160.51	-135.32
II[2]	-19 404.53	932.74	2 358.29	-469.81	II[15]	-14 628.5	-563.34	164.42	-24.99
II[3]	-19 082.46	298.06	2 405.32	-518.57	II[16]	-15 159	268.41	243.56	-152.25
II[4]	-18 125.12	450.65	-394.84	1 401.95	II[17]	-15 531.82	96.3	270.01	-269.94
II[5]	-17 875.29	-347.18	-430.74	872.16	II[18]	-16 125.19	193.45	831.96	-552.75
II[6]	-17 223.33	-529.92	-443.63	333.29	II[19]	-16 649.97	93.33	845.34	-153.2
II[7]	-16 627.68	-692.59	-430.53	-190.45	II[20]	-17 235.77	43.44	823.13	377.97
II[8]	-15 957.31	-611.74	-94.8	-396.92	II[21]	-17 880.9	59.7	772	907.06
II[9]	-15 500.78	-764.28	-68.84	-287.15	II[22]	-18 124.96	382.6	772	1 390.86
II[10]	-15 112.11	-914.32	-51.28	-168.2	II[23]	-19 060.11	-220.3	-1 531.03	-590.63
II[11]	-14 647.7	-26.6	103.28	-29.05	II[24]	-19 361.35	-757.42	-1 508.79	-543.26
II[12]	-14 499.38	-199.66	118.43	-143.9	II[25]	-20 404.95	837.3	-1 192.94	-768.63
II[13]	-14 447.92	-153.99	147.42	-231.57					

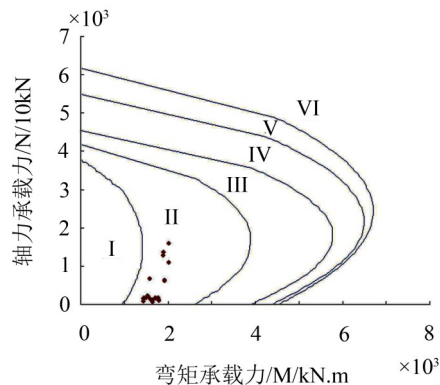


图7 再生骨料50%替代率的抗震评估曲线

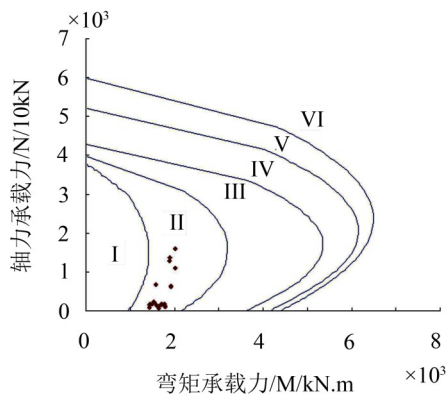


图8 再生骨料100%替代率的抗震评估曲线

(3) 合理划分钢管再生混凝土的5个屈服阶段,并以5个阶段的弯矩—轴力承载力曲线作为抗震评估曲线,根据拱肋结构地震响应峰值在评估曲线中的位置关系可以判别拱肋结构的抗震能力,该方法是一种实用的判别不同粗骨料替代率钢管混凝土结构抗震性能的有效方法;

(4) 钢管再生混凝土拱桥的拱肋结构具有较好的抗震性能,且其抗震性能随着再生粗骨料替代率

的增大略有下降,但总体变化不大。

参考文献:

- [1] Konno K, Sa to Y, U edo T, et al. Mechanical property of recycled concrete under lateral confinement[J]. **Transactions of the Japan Concrete Institute**, 1998, 20 (3): 287-292.
- [2] YANG Y F, HAN L H, Wu X. Concrete shrinkage and creep in recycled aggregate concrete filled steel tubes[J]. **Advances in Structural Engineering**, 2008, 11 (4): 383-396.
- [3] YANG Y F, HAN L H. Compressive and flexural behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) under short - term loadings[J]. **Steel and Composite Structures**, 2006, 6 (3): 257-284.
- [4] YANG Y F, ZHU L T. Recycled aggregate concrete filled steel SHS beam- columns subjected to cyclic loading[J]. **Steel and Composite Structures**, 2009, 9 (1): 19-38.
- [5] 陈宗平, 李启良, 张向冈, 等. 钢管再生混凝土偏压柱受力性能及承载力计算[J]. **土木工程学报**, 2012, 45(10): 72-80.
- [6] 王玉银, 陈杰, 纵斌, 等. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J]. **建筑结构学报**, 2011, 32(12): 170-177.
- [7] 邹竞芳, 蔡铭, 王璐, 等. 高架符合交通噪声的动态模拟及特征分析[J]. **噪声与振动控制**, 2012, 32(2): 99-104.
- [8] 翁光远, 王社良. 磁控形状记忆合金作驱动器设计及其控制效果[J]. **噪声与振动控制**, 2012, 32(2): 157-162.
- [9] 谢开仲, 吕文高, 覃乐勤. 钢管混凝土拱桥拱肋抗震能力评估方法[J]. **桂林理工大学学报**, 2010, 30(4): 540-544.