

# 钢管混凝土拱桥的地震响应分析方法

苏虹, 胡世德

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:** 目前常用于钢管混凝土拱桥的地震响应分析方法有换算截面法和双单元法. 提出一种基于钢管混凝土统一理论, 将钢管混凝土作为一种材料, 根据其构件力学性能指标进行地震响应分析的方法, 并运用这3种方法对一钢管混凝土拱桥实例进行了分析. 比较分析其计算结果, 认为基于统一理论的方法是一种分析方便易行的钢管混凝土拱桥地震响应分析方法.

**关键词:** 钢管混凝土拱桥; 钢管混凝土统一理论; 地震响应分析方法

**中图分类号:** U 448.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-374X(2003)04-0404-04

## Methods of Seismic Response Analysis of Concrete-filled-tube Arch Bridges

SU Hong, HU Shi-de

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Current seismic response analytical methods of CFT (concrete-filled-tube) bridges include section conversion method and double elements method. Based on CFT unified theory and its mechanics performance, a seismic response analytical method, regarding CFT as a kind of material was proposed. According to the analytical result, the method based on CFT unified theory is proved to be a simple and convenient seismic response analytical method worthy of further development.

**Key words:** concrete-filled-tube arch bridge; concrete-filled-tube unified theory; seismic response analytical method

在对钢管混凝土拱桥进行地震响应分析时, 首先需要对钢管混凝土拱桥进行有限元离散. 钢管混凝土主拱肋是由钢管混凝土和钢管组成的杆系结构. 目前在计算时一般有两种方法来处理: ① 将钢管和混凝土作为两根杆件来计算, 保证其节点坐标相同; ② 将钢和混凝土换算成一种材料来计算. 本文提出基于钢管混凝土统一理论, 将钢管混凝土视为一种组合材料的统一体, 根据其构件力学性能指标进行地震响应分析的方法, 利用这3种方法对一钢管混凝土拱桥实例进行分析, 并比较分析计算结果.

### 1 分析方法<sup>[1,2]</sup>

目前常用的用来进行钢管混凝土拱桥地震响应分析的方法有两种: ① 双单元法, 也就是将钢管和混凝土分别作为两根杆件, 但保证其节点坐标相同; ② 换算截面法, 这种方法源自钢筋混凝土构件的计算, 也就是在计算单元截面特性时, 将钢按照刚度等效换算成相当的混凝土截面. 其中, 换算截面法是将钢管混凝土截面中的钢材换算成相当的混凝土截面, 换算原则是: 相当混凝土的截面面积  $A = A_c + nA_s$ , 抗弯

收稿日期: 2002-05-08

作者简介: 苏虹(1977-), 女, 上海人, 工学硕士. E-mail: suhong18@163.net

惯矩  $I = I_c + n'I_s$ , 抗扭惯矩  $I_p = I_{pc} + nI_{ps}$ . 其中:  $n = E_s/E_c$ ,  $n' = G_s/G_c$ , 下标 s 表示钢材, 下标 c 表示混凝土.

本文根据“钢管混凝土统一理论”, 提出将钢管混凝土作为一种材料, 利用“统一理论”得到的构件的力学性能指标对结构进行地震响应分析. 此方法是由作者提出的一种基于钢管混凝土统一理论研究成果的分析方法, 称为钢管混凝土单元法. 在计算过程中构件几何性质采用构件的全截面物理指标, 力学性质采用统一理论中抗压组合弹性模量  $E_{sc}$ 、抗弯刚度  $E_{scm}I_{scm}$  和剪切模量  $G_{sc}$  三项弹性指标.  $E_{sc} = f_{sc}^p/\epsilon_{sc}^p$ . 式中:  $f_{sc}^p = [0.192(f_y/235) + 0.488]f_{sc}^y$ ;  $\epsilon_{sc}^p = 0.67f_y/E_s$ ;  $f_{sc}^y = (1.212 + B\xi + C\xi^2)f_{ck}$ ;  $B = 0.1759(f_y/235) + 0.974$ ;  $C = -0.1038(f_{ck}/20) + 0.0309$ .  $E_{scm}I_{scm} = 0.226M_u/\phi_e$ . 式中:  $M_u = \gamma_m W_{scm}f_{sc}^y$ ;  $\gamma_m = -0.4832\xi + 1.9264\sqrt{\xi}$ ;  $\xi = A_s f_y/A_c f_{ck}$ ;  $\phi_e = 0.674f_y/E_s D$ .  $G_{sc} = f_{sc}^{pv}/\gamma^p$ . 式中:  $f_{sc}^{pv} = \{[0.149(f_y/235) + 0.322] - [0.842(f_y/235)^2 - 1.775(f_y/235) + 0.933]\alpha^{0.933}\}(20/f_{ck})^{0.032}f_{sc}^y$ ;  $\gamma^p = 0.595f_y/E_s + 0.07(f_{ck} - 20)E_s$ ;  $f_{sc}^y = (0.422 + 0.311\alpha^{2.33})\xi^{0.134}f_{sc}^y$ .

以上各式中:  $E_{sc}$  为钢管混凝土抗压组合弹性模量, MPa;  $f_{sc}^p$  为钢管混凝土轴心受压组合比例极限, MPa;  $f_{sc}^y$  为钢管混凝土轴心受压组合强度标准值, MPa;  $E_s$  为钢材的弹性模量, MPa;  $f_{ck}$  为混凝土的抗压强度标准值, MPa;  $f_y$  为钢材的屈服强度, MPa;  $E_{scm}I_{scm}$  为钢管混凝土抗弯刚度,  $kN \cdot m^2$ ;  $M_u$  为钢管混凝土构件抗弯承载力,  $m^3$ ;  $W_{scm}$  为钢管混凝土全截面抵抗矩,  $W_{scm} = \pi d^3/32$ ,  $kN \cdot m$ ;  $d$  为钢管混凝土截面直径, m;  $A_s$  为钢材面积,  $m^2$ ;  $A_c$  为混凝土面积,  $m^2$ ;  $G_{sc}$  为钢管混凝土剪切模量, MPa;  $f_{sc}^{pv}$  为钢管混凝土剪切组合比例极限, MPa;  $\gamma^p$  为钢管混凝土剪切组合比例应变;  $f_{sc}^y$  为钢管混凝土剪切组合强度标准值, MPa;  $\alpha$  为含钢率, 且  $\alpha = A_s/A_c$ . 上述公式中下标 scm 指的是全截面的几何物理量. 值得注意的是在钢管混凝土统一理论中抗压模量和抗弯模量是不同的, 这是由钢管混凝土本身的构件性能所决定的.

## 2 分析模型

本算例为一净跨 46 m、净矢跨比为 1/3 的钢管混凝土中承式肋拱. 拱肋为二次抛物线, 由直径  $d = 800$  mm, 厚度  $t = 14$  mm 的钢管内灌 C30 混凝土组成拱肋断面. 桥台和拱肋上的立柱采用直径为 600 mm, 厚度为 10 mm 的钢管混凝土断面. 其中钢管均为 A3 钢, 内填 C30 混凝土. 桥面以下的下横撑和斜撑用直径为 600 mm, 厚度为 8 mm 的空钢管, 桥面上用直径为 700 mm, 厚度为 10 mm 的空钢管将两拱肋连成整体. 总体布置如图 1 所示. 按照前面所述的 3 种方法分别建立模型, 如图 2 所示. 考虑到拱脚与立柱均支撑在重力式桥台上, 因此不考虑土与结构相互作用, 拱脚与立柱均固定约束. 3 种方法中拱肋单元截面特性见表 1. 其中, 双单元法中的钢和混凝土的截面性质是根据各自实际的截面形状计算得到, 换算截面法中的截面性质则是按照换算原则将钢换算成混凝土后得到的截面性质, 钢管混凝土单元法中的截面性质是根据全截面计算得到.

表 1 拱肋单元截面特性 ( $d = 800$  mm,  $t = 14$  mm)

Tab.1 Section property of arch elements ( $d = 800$  mm,  $t = 14$  mm)

方 法	截面面积/ $m^2$	抗弯惯矩/ $m^4$	抗扭惯矩/ $m^4$
双单元法 (钢)	0.034 6	0.002 67	0.005 337
(混凝土)	0.467 8	0.017 43	0.034 850
换算截面法	0.698 5	0.035 23	0.066 000
钢管混凝土单元法	0.502 0	0.020 10	0.040 200

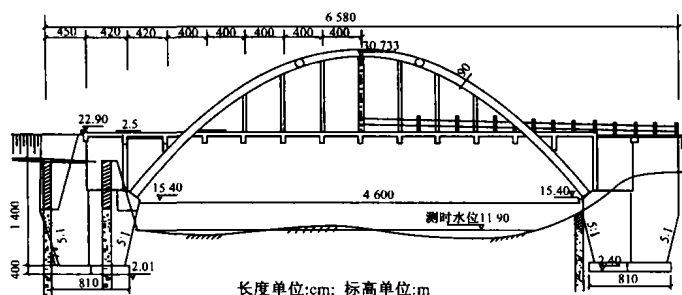


图 1 总体布置图

Fig.1 General layout

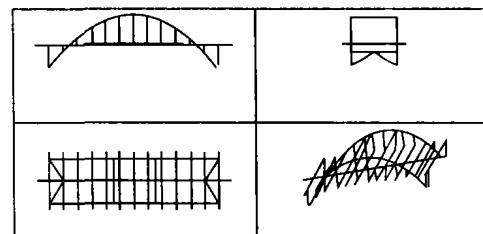


图 2 结构模型图

Fig.2 Structural model

### 3 计算结果

#### 3.1 动力特性分析

分别对 3 种方法建立的模型进行动力特性分析,振型序列见表 2.

表 2 振型序列

Tab. 2 Series of mode shape

阶数	双单元法		换算截面法		钢管混凝土单元法	
	周期/s	振型图	周期/s	振型图	周期/s	振型图
1	0.812 35	拱的一阶对称侧弯	0.812 44	拱的一阶对称侧弯	0.914 12	拱的一阶对称侧弯
2	0.519 75	拱梁一阶反对称竖弯	0.519 76	拱梁一阶反对称竖弯	0.571 93	梁的一阶反对称扭转
3	0.513 43	梁的一阶反对称扭转	0.513 45	梁的一阶反对称扭转	0.555 31	拱梁一阶反对称竖弯
4	0.322 27	梁对称扭转	0.322 28	梁对称扭转	0.353 52	梁对称扭转
5	0.315 81	拱梁一阶对称竖弯	0.315 82	拱梁一阶对称竖弯	0.333 26	拱一阶反对称扭转
6	0.295 26	拱一阶反对称扭转	0.295 30	拱一阶反对称扭转	0.331 38	拱梁一阶对称竖弯
7	0.230 85	拱梁对称竖弯	0.230 85	拱梁对称竖弯	0.237 04	拱梁对称竖弯
8	0.214 82	梁反对称扭转	0.214 83	梁反对称扭转	0.231 92	梁反对称扭转
9	0.196 17	梁对称扭转	0.196 17	梁对称扭转	0.203 24	梁对称扭转
10	0.187 53	拱梁反对称竖弯	0.187 54	拱梁反对称竖弯	0.197 19	拱梁反对称竖弯

#### 3.2 地震输入

选用加速度峰值为  $2.464 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  的地震波作为水平向地震输入,其加速度时程见图 3,相应的加速度反应谱见图 4.

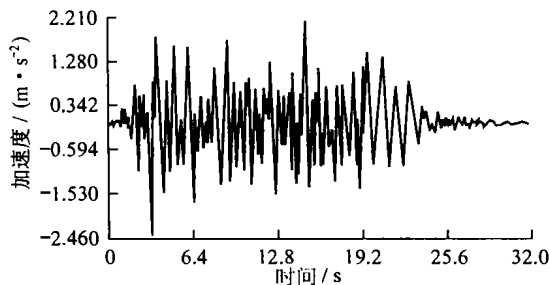


图 3 地震波加速度时程

Fig. 3 Time history of the seismic wave acceleration

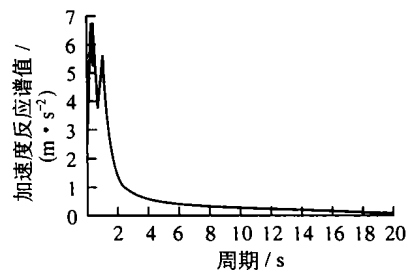


图 4 加速度反应谱

Fig. 4 Acceleration response spectrum

#### 3.3 时程分析计算结果

在图 5 中分别列出了 3 种方法计算所得的主拱在恒载和水平向地震荷载作用下的轴力、剪力、弯矩包络图.由图可知,双单元法和换算截面法的计算结果是一致的,钢管混凝土单元法的计算结果和前两种虽有些差异,但差异并不大.例如主拱弯矩钢管混凝土单元法计算偏小,但最大相差也不超过 20%.

#### 3.4 结果讨论

为了进一步明确导致结果异同的原因,笔者比较了本算例中 3 种方法主拱肋的刚度值(见表 3).从表 3 可发现双单元法和换算截面法的截面刚度值近乎一样,而钢管混凝土单元法的截面刚度值和前两种方法略有差异.另由表 2 可知,双单元法和换算截面法的振型周期值、振型序列基本相同.钢管混凝土单元法的振型序列与前面两种方法相比除第 2,3,5,6 阶的次序有所不同外,其余振型序列基本相同.钢管混凝土单元法由于钢管混凝土单元的截面刚度较小,结构显得比较柔,周期相对于另两种方法偏长.由于钢管混凝土单元法的刚度值和前两种方法存在差异,因而地震反应的内力结果不同是显见的.双单元法和换算

表 3 主拱截面刚度值( $d = 800 \text{ mm}$ ,  $t = 14 \text{ mm}$ )

Tab. 3 Stiffness of main arch sections( $d = 800 \text{ mm}$ ,  $t = 14 \text{ mm}$ )  $\times 10^5$

方 法	$EA/\text{kN}$	$EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$GI_p/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$
双单元法(钢+混凝土)	210	10.60	8.48
换算截面法	210	10.60	8.48
钢管混凝土单元法	186	7.97	4.84

截面法尽管在进行有限元计算时,所采用的材料性质和截面性质不同,但是对形成单元刚度矩阵起关键作用的各项单元截面的抗压刚度  $EA$ ,抗弯刚度  $EI$ ,和抗扭刚度  $GI_p$  却是相同的,因而地震反应内力计算相同。

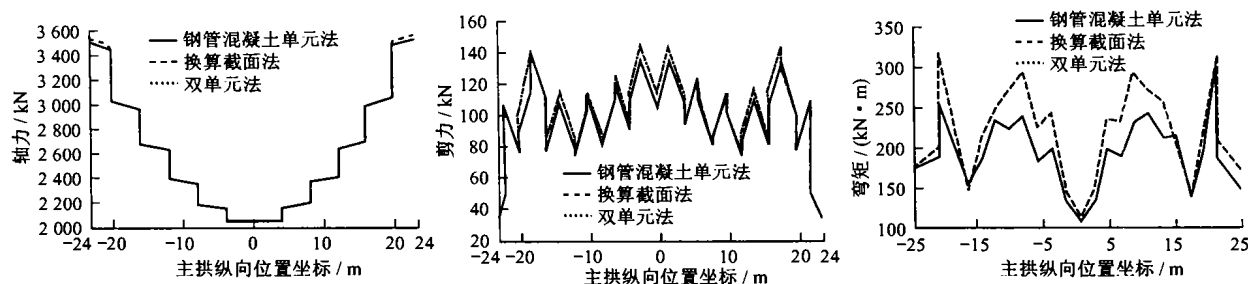


图5 主拱在恒载和水平地震荷载作用下的内力包络

Fig.5 Internal force envelopes of main arch under dead loads and horizontal seismic loads

## 4 结语

从以上分析可以知道,基于钢管混凝土统一理论的地震响应分析方法在计算结果上和双单元法、换算截面法存在一定差异,但这种分析方法将钢管混凝土断面作为一种组合材料的统一体考虑,应用全截面的几何物理量进行分析,概念明确,受力明确;且它采用了钢管混凝土统一理论中经过实验与理论验证的钢管混凝土力学性能指标,在一定程度上比双单元法和换算截面法更加真实地反映了钢管混凝土构件本身的力学性能,例如抗压和抗弯采用不同的模量表达式。因此方法三是一种分析方便且易行的对钢管混凝土拱桥进行地震响应分析的方法。

## 参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1994.
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000.

### ·下期文章摘要预报·

## 沥青路面罩面设计新方法研究

刘黎萍,孙立军

针对国内外罩面或改建设计方法的不足,借助于同济大学对新建的罩面改建后的沥青路面使用性能的研究成果,将寿命周期费用分析引入罩面设计,提出了沥青路面罩面设计的新方法——基于使用性能和技术经济分析的最佳罩面时机和最佳罩面厚度选择方法,并通过实例说明了该方法的应用。