

填料模拟对空腹式无铰拱温度效应的影响分析

谷世君¹, 吴正新², 顾保平¹, 程生平¹
(1.中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2.中交第四航务工程勘察
设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘 要: 采用有限元软件 Midas 建立拱圈模型(M1)和拱圈-拱上结构联合作用模型(M2),对空腹式无铰拱桥进行仿真模拟,引入联合作用系数 K ,对比分析 2 种结构状态下主拱的温度响应。分析结果显示:拱上填料约束了拱桥的变形,改善了应力分布,提高了拱圈的稳定性;温度工况下,拱圈-拱上结构的联合作用效应显著。
关键词: 空腹式拱桥;联合作用系数;温度效应;数值计算
中图分类号: U441.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2021)01-0181-03

0 引 言

空腹式拱桥是我国基础建设中广泛应用且历史悠久的一种桥梁结构类型,如著名的赵州桥、卢沟桥等。

迄今为止,拱桥的计算仍分解为主拱计算与拱上结构计算,并且认为桥梁结构中这两部分的工作彼此无关,将拱看成是全部承受外荷载对桥梁影响的杆件,而将拱上结构当作荷载传递给拱的杆件,且不与主拱共同工作^[1]。对拱桥结构工作状态采取这样的假定,其唯一的目的是为了简化拱桥结构的计算图式。若将拱桥看成拱上结构与主拱联合工作的结构,则在钢筋混凝土桥中,拱上结构与拱联合会形成具有很多赘余未知数的刚架体系,其计算非常困难。另外,拱上填料性能的离散型较大,材料较难准确模拟^[2]。

然而这种简化拱桥结构的计算图式将导致桥梁结构的实际强度大大失去其真实性。由于无铰拱是超静定结构,主拱圈除在外荷载作用下产生弹性压缩外,还因温度变化、混凝土收缩徐变等原因产生轴向变形,拱圈的缩短必将在拱内产生附加内力^[3]。因此,除了外荷载,对于无铰拱,由于温度效应所引起的内力也需要考虑。国内外学者的诸多研究表明^[4-12],拱上结构对拱圈的受力影响很大。

本文采用有限元软件,建立了拱圈模型和拱圈-拱上结构联合作用模型,并对比分析了空腹式无铰拱桥在 2 种结构状态下的温度响应。

收稿日期: 2020-06-10
作者简介: 谷世君(1989—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计咨询工作。

1 工程概况

1.1 总体设计

本工程实例为空腹式无铰拱桥,拱桥孔跨 15 m,矢高 3.0 m。主拱圈采用钢筋混凝土上承式板拱,拱圈厚度为 0.5 m,拱轴线圆曲线,半径为 99.2 m,桥梁全宽 8 m。下部结构采用 U 型桥台、一字桥墩、桩基础。

1.2 材料物理力学参数

拱圈、腹拱圈、主拱墩均采用 C40 混凝土,桥面现浇层采用 C50 防水混凝土,拱腔填料选用石粉渣。

拱上侧墙与拱上填料接触紧密,且两者均与拱圈有接触作用,故将侧墙偏安全地采用填料等代。拱上填料对拱圈受力的影响,其本质是拱圈拱背所受的土压力。由于主拱圈为弧形,随位置不同,倾角也不同,故精确的土压力分布非常复杂,为了简化计算模型,节省计算成本,将其简化为均质材料,且不考虑填料自重。材料指标见表 1。

表 1 材料参数			
材料	弹性模量 /MPa	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比
石粉渣	1 × 10 ⁶	0	0.2
C40 混凝土	3.25 × 10 ⁷	2.5	0.2
C50 混凝土	3.45 × 10 ⁷	2.5	0.2

2 有限元模型建立

采用韩国土木结构专用的结构分析与优化设计软件 Midas/Civil 对空腹式无铰拱桥进行仿真模拟。模型分别按是否模拟拱上填料建立 2 种结构模型,简称为拱圈模型(M1)和联合作用模型(M2),如图 1 所示。

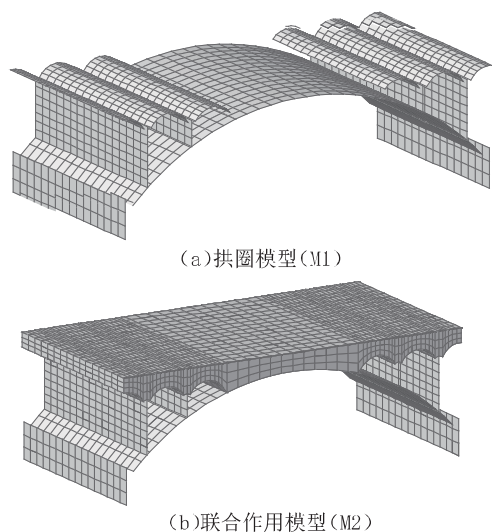


图1 有限元模型

拱圈模型(M1)桥梁结构采用空间板单元模拟,全桥共2 057个节点,1 792个单元。

联合作用模型(M2)中,拱腔填料采用空间实体单元模拟,其他均为空间板单元。全桥共6 613个节点,6 061个单元。

2种模型均考虑系统温度,整体升温工况范围取0℃~34℃,整体降温工况范围取0℃~-25℃,计算时以±5℃作为增量。

3 力学分析

无论是空腹式拱桥还是实腹式拱桥,通常都是多次超静定的空间结构,拱上结构均会不同程度地参与主拱圈受力,通常把这种现象称之为联合作用。拱桥联合作用实质上是拱圈与拱上结构之间的相互作用,拱上结构对主拱圈提供约束,使拱圈均匀挤压,从而减小拱圈内部的弯矩;此外,拱上结构对外部荷载起到扩散作用,使外部荷载得到削弱,拱圈的实际受力大为减小。

本文引入联合作用系数 K ,其为拱圈与拱上结构联合作用下结构产生的应力或变形与裸拱作用下结构产生的应力或变形的比值。其计算公式为:

$$K = \frac{\sigma_k(f_k)}{\sigma_0(f_0)} \quad (1)$$

式中: $\sigma_k(f_k)$ 为联合作用模型(M2)结构产生的应力或者变形; $\sigma_0(f_0)$ 为裸拱模型(M1)结构产生的应力或者变形。

3.1 应力分析

不同温度工况作用下,拱圈模型(M1)与联合作用模型(M2)主拱圈的应力计算结果见表2。

由表2可知,2种模型的应力均随温度绝对值的

增大呈线性增加,联合作用模型(M2)的主应力均大于拱圈模型(M1)。由此可见,主拱圈及拱上结构在容许应力范围内是按弹性状态工作的。

另外不难发现,对于拱圈模型(M1),不同温度工况作用下最大、最小主应力均发生在拱底。对于联合作用模型(M2),降温工况下,拱底出现最大主应力,最小主应力位于拱圈1/4位置,而升温工况下,拱底出现最小主应力,最大主应力位于拱圈1/4位置。由此可见,拱上结构的存在,分散了集中荷载,避免了应力集中,改善了应力分布。

降温工况下,最大主应力联合作用系数为1.382,最小主应力联合作用系数为1.508;升温工况下,最大主应力联合作用系数为1.508,最小主应力联合作用系数为1.382。由此可知,拱上结构的联合作用明显。

3.2 变形分析

不同温度工况作用下,拱圈模型(M1)与联合作用模型(M2)主拱圈的变形计算结果见表3。

由表3可知,2种模型的变形均随温度绝对值的增大呈线性增加,联合作用模型(M2)的位移均小于拱圈模型;主拱圈变形在不同温度工况下的联合作用系数均为0.867。由此可见,联合作用提高了主拱圈的抗推和抗弯刚度。实腹段的桥面结构将直接参与主拱圈工作,相当于增大了主拱圈的截面惯性矩。空腹段则类似于桁架,桥面结构参与工作时,相当于增大了桁架上弦杆的刚度,也就增大了空腹段的刚度^[2]。此外,拱上结构的存在约束了主拱的变形。

4 结语

(1)真实有效的填料模拟能够反映主拱的实际受力状态,目前现行规范忽略了拱上结构与拱圈共同作用对桥梁受力的贡献。

(2)通过对温度工况下拱上结构的联合作用效应分析可知,若不考虑拱上结构与主拱圈的联合作用,将会对拱桥的受力计算结果产生较大影响。降温工况下,最大主应力联合作用系数为1.382,最小主应力联合作用系数为1.508;升温工况下,最大主应力联合作用系数为1.508,最小主应力联合作用系数为1.382。

(3)拱上填料不仅对拱圈起着约束变形的作用,提高了拱圈的稳定性,同时拱上结构的存在,扩散了荷载效应,避免了应力集中,改善了应力分布情况。拱圈、拱上结构与拱圈联合作用2种模型的变形均随温度绝对值的增大呈线性增加,主拱圈变形在不

表 2 不同温度工况下拱圈模型与联合作用模型主拱圈应力表

系统温度/℃		拱圈模型(M1)				联合作用模型(M2)				联合作用系数 K	
		最大主应力 /MPa	位置	最小主应力 /MPa	位置	最大主应力 /MPa	位置	最小主应力 /MPa	位置	最大主应力	最小主应力
降温工况	-25	4.748	拱底	-5.162	拱底	6.561	拱底	-7.784	1/4 位置	1.382	1.508
	-20	3.798	拱底	-4.130	拱底	5.249	拱底	-6.227	1/4 位置	1.382	1.508
	-15	2.849	拱底	-3.097	拱底	3.937	拱底	-4.670	1/4 位置	1.382	1.508
	-10	1.899	拱底	-2.065	拱底	2.624	拱底	-3.114	1/4 位置	1.382	1.508
	-5	0.950	拱底	-1.032	拱底	1.312	拱底	-1.557	1/4 位置	1.382	1.508
升温工况	5	1.032	拱底	-0.950	拱底	1.557	1/4 位置	-1.312	拱底	1.508	1.382
	10	2.065	拱底	-1.899	拱底	3.114	1/4 位置	-2.624	拱底	1.508	1.382
	15	3.097	拱底	-2.849	拱底	4.670	1/4 位置	-3.937	拱底	1.508	1.382
	20	4.130	拱底	-3.798	拱底	6.227	1/4 位置	-5.249	拱底	1.508	1.382
	25	5.162	拱底	-4.748	拱底	7.784	1/4 位置	-6.561	拱底	1.508	1.382
	30	6.195	拱底	-5.698	拱底	9.341	1/4 位置	-7.873	拱底	1.508	1.382
	34	7.021	拱底	-6.457	拱底	10.586	1/4 位置	-8.923	拱底	1.508	1.382

表 3 不同温度工况下拱圈模型与联合作用模型主拱圈变形表

系统温度 /℃	拱圈模型(M1)	联合作用模型(M2)	联合作用 系数 K	
	变形 /mm	变形 /mm		
降温 工况	-25	4.639	4.022	0.867
	-20	3.712	3.218	0.867
	-15	2.784	2.413	0.867
	-10	1.856	1.609	0.867
	-5	0.928	0.804	0.867
升温 工况	5	0.928	0.804	0.867
	10	1.856	1.609	0.867
	15	2.784	2.413	0.867
	20	3.712	3.218	0.867
	25	4.639	4.022	0.867
	30	5.567	4.826	0.867
	34	6.310	5.470	0.867

同温度工况下的联合作用系数均为 0.867。

参考文献:

[1] JTG D61—2005:公路圬工桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
[2] 顾懋清,石绍甫.公路桥涵设计手册 拱桥[M]. 北京:人民交通出版社,1994.

版社,1994.
[3] 刘其伟.对无铰拱弹性压缩所引起的拱轴偏离影响的探讨[J].公路,1996(9):10-14.
[4] 交通部交通科学研究院.空腹式拱桥考虑拱上结构作用的实验分析及计算方法—弹性地基曲梁法[M].北京:中华人民共和国科学技术委员会,1963.
[5] ROYLES R, HENDRY A W. Model tests on masonry arches[J]. Proc Inst of Civ Engrgs. Part 2, 1991, 91(6): 299-321.
[6] MELBOURNE C, WALKER P. Load tests to collapse of model brick work masonry arches [C]//Proceedings 8th International Brick and Block Masonry Conference Volume 2 .New York: Elsevier Applied Science, 1988: 991-1002.
[7] PONNIAH D A, PRENTICE D J. Long term monitoring of fill pressures in a new brickwork arch bridge [J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(3): 159-167.
[8] THAVALINGAM A, BICANIC N, ROBINSON J I, et al. Computational framework for is continuous modelling of masonry arch bridges [J].Computers and Structures, 2001, 79: 1821-1830.
[9] AXEL R T, ZOLTAN O, KATALIN B. Discrete element analysis of a stone masonry arch [J]. Mechanics Research Communications, 2009, 36(4): 469-480.
[10] WADE S A, NIXON J M, SCHINDLER A K, et al. Effect of temperature on the setting behavior of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(3): 214-222.
[11] GILBERT M. Guide to use of ring 2.0 for the assessment of railway masonry arches [R].[S.l.]: UIC Report, 2006.
[12] 范亮,黄曼.考虑填料“围压效应”的实腹式拱桥结构分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,18(2): 125-127.