

钢管 - 钢管混凝土复合拱桥静力性能研究

韦建刚, 陈宝春, 孙 潮, 陈友杰

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 应用经实桥测试验证的有限元模型, 以管内混凝土填充长度系数为参数, 对钢管 - 钢管混凝土复合拱的结构内力、截面应力、拱肋挠度、极限承载力和弹性一类稳定系数进行了分析. 分析结果表明: 复合拱的主要优势在于稳定性方面, 管内混凝土填充至 $L/4$ 处较合适, 但应注意变刚度截面应力的控制.

关键词: 桥梁; 钢管; 钢管混凝土; 复合拱; 静力性能

中图分类号: U441

文献标识码: A

Study on behaviors of hybrid arch bridge of steel tube and concrete filled steel tube

WEI Jian - gang, CHEN Bao - chun, SUN Chao, CHEN You - jie

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Based on the FEM model validated by the field testing, with the parameter of the length for the concrete in tube, the behaviors of the hybrid arch bridge of steel tube and concrete filled steel tube are analyzed by the finite element method. The results show that stress in the cross section of rigidity varied should be taken into account in design. The concrete in tube filled to $L/4$ is preferable. The advantage of this type bridge is its stability.

Key words: bridge; steel tube; concrete filled steel tube; hybrid arch; behavior

钢管 - 钢管混凝土复合拱桥是吸收了钢管拱和钢管混凝土拱的优点而提出的一种新型结构, 其拱肋的拱脚段为钢管混凝土, 其余部分为空钢管. 这使得拱肋的自重较小、重心较低, 横向地震作用力减小, 并且避开了拱顶段管内混凝土不密实的问题. 已建成的第一座钢管 - 钢管混凝土复合拱桥是福建省福鼎市的山前大桥^[1], 该桥成桥后进行了静动载测试^[2,3]. 本文应用文献[2]经静载试验分析验证的有限元模型, 以管内混凝土填充长度为参数, 对结构线弹性范围内的内力、变形、一类稳定等静力特性进行了讨论; 同时, 还采用双单元法^[4]对结构的非线性行为和极限承载力进行了分析. 通过分析对复合拱桥的受力性能有了进一步的了解, 并对管内混凝土填充长度的选择提出了建议.

1 计算模型简介

山前大桥位于福建省福鼎市市区, 跨越桐山溪, 主跨采用墩中心距为 80 m 的下承式刚架系杆拱, 净跨径 75 m, 净矢高 15 m, 净矢跨比 $1/5$, 拱肋间距 13.30 m. 该桥拱肋为钢管与钢管混凝土复合结构, 钢管外径为 1 200 mm. 两拱脚段钢管壁厚为 16 mm, 内填 C40 混凝土, 为钢管混凝土结构. 跨中段为空钢管, 管壁厚 20 mm. 静载试验荷载采用普通载重车加载, 静载试验共进行了 4 个工况: 工况 1 为按 $L/4$ 点弯矩最大; 工况 2 为拱脚负弯矩最大; 工况 3 为拱顶正弯矩最大; 工况 4 为拱脚推力最大布载. 大桥总体布置及静载测点布置见图 1. 测试的过程及数据详见文献[2].

山前大桥的受力分析采用大型通用程序 ANSYS 进行计算. 建模时, 拱肋、桥面纵梁、横梁采用空

收稿日期: 2005 - 03 - 30

作者简介: 韦建刚(1971 -), 男, 博士研究生, 助理研究员.

基金项目: 福建省重大科技资助项目(2003F007); 福建省教育厅科研资助项目(JA03016)

间梁单元, 其中钢管混凝土拱肋段采用双单元法建模, 即在模型离散时, 在同一段有限元模型中将钢管和混凝土分别作为两根杆件输入, 但同时保证二者的节点坐标完全相同, 在相同的节点间建立两个单元, 一个单元赋予钢管的材料属性, 另一个单元则赋予混凝土的材料属性, 这样两种材料的应力 - 应变关系可以得以输入^[4]; 系杆与吊杆采用拉杆单元, 桥面板采用板单元. 文献[2]的分析表明, 在进行下承式系杆拱受力规律的分析时, 有限元建模可采取固定拱的形式进行简化, 因此本文在计算中不考虑系杆与桥墩的影响而按固定拱建模. 全桥共 374 个节点, 422 个梁单元和 45 个板单元, 有限元模型见图 2.

分析时以管内混凝土填充长度系数 α 为参数(参数含义见图 2). $0 < \alpha < 0.5$ 时为复合拱; 当 $\alpha = 0$ 时为钢管拱; 当 $\alpha = 0.5$ 时, 为钢管混凝土拱. 在进行内力、变形与一类弹性稳定时, 不考虑材料的非线性. 在进行结构的极限承载力分析时, 钢管与混凝土均采用理想弹塑性模型.

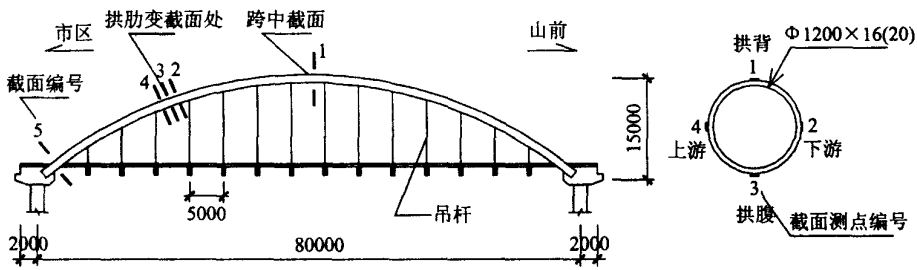


图 1 山前大桥总体布置及测点布置图(mm)

Fig. 1 Elevation view of Shangqian bridge

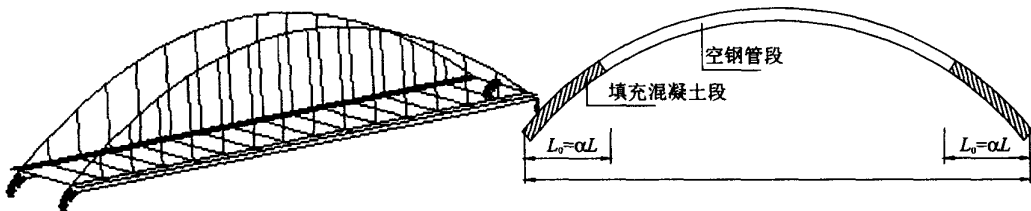


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2 拱的内力

由于该桥为超静定拱, 因此截面刚度的变化会导致截面内力的变化. 从工程经验以及文献[2]的分析可知, 该桥的极限承载力由其拱脚处弯矩控制. 图 3 为该桥拱脚处的弯矩影响线, 图 4 为在混凝土填充长度变化下拱脚处的弯矩值. 从图 3、图 4 可以看出, 当 α 从 0 变化至 0.083 时, 拱肋拱脚处弯矩相差较大, 在以弯矩控制的工况中(工况 1、2、3), 拱脚弯矩的变化幅度达到 40% ~ 50%, 而在工况 4 中, 该幅度也达到 19%; 而当 α 在 0.083 与 0.5 之间变化时, 其拱脚弯矩的变化幅度为 8% ~ 19%, 这说明复合拱的拱脚受弯规律与钢管拱差别较大, 而与钢管混凝土拱接近.

此外, 从图 4 可以看出, 在工况 1、2、3 中, 当 $\alpha > 1/6$ 后, 拱脚的弯矩均呈下降的趋势, 而在工况 4 中, 当 $\alpha > 1/6$ 后拱脚弯矩随 α 的增大而增大, 但变化幅度仅为 8%, 因此, 在复合拱设计中进行填充长度的选择时, 填充长度系数选取 $\alpha > 1/6$ 有利于减小拱脚处弯矩.

图 5 为 α 变化时拱肋四分点轴力变化图. 在各工况条件下, 四分点处轴力最大变化幅度仅为 3.6%, 因此拱肋管内填充长度对四分点轴力的影响较小, 可忽略不计.

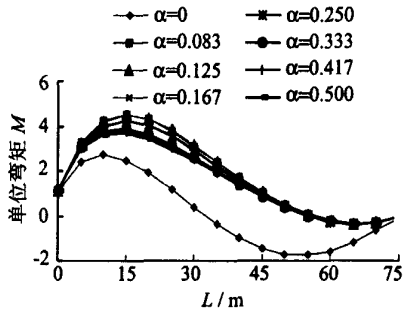


图 3 拱脚弯矩影响线

Fig. 3 Influence line of bending moment for arch spring

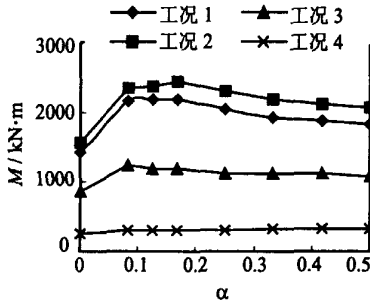


图 4 拱脚弯矩变化图

Fig. 4 Bending moment of arch spring

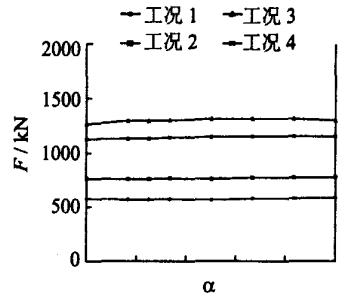


图 5 四分点轴力变化图

Fig. 5 Axes thrust of quarter point

3 截面应变

图 6、图 7 为拱肋各典型截面上、下缘应变随 α 系数变化的趋势图. 从图 6、图 7 可以看出, 钢管拱与复合拱相比, 拱脚处应变变化幅度较大; 而复合拱与钢管混凝土拱相比, 拱顶截面应变变化较大; 而对 $L/4$ 截面来说, 当 $\alpha = 0.25$ 时截面应变有一个跃升; 即当 α 趋近 0.25 时, 该截面的应变都趋近最大值, 其上下缘应变差变化幅度为 33% ~ 39%. 这表明, 在复合拱的设计中, 在运用容许应力法进行设计时, 钢管与钢管混凝土交接截面附近的截面应力是设计中的主要控制因素.

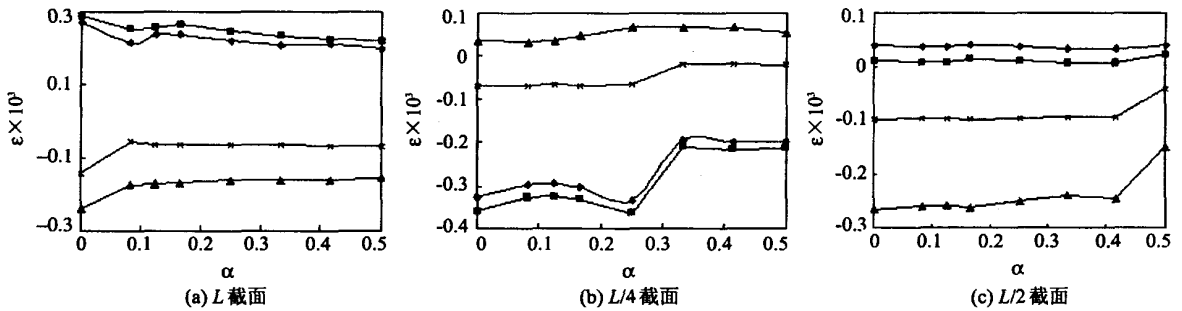


图 6 上缘应变变化图

Fig. 6 Extrados strain of different points (—工况 1 —工况 2 —工况 3 —工况 4)

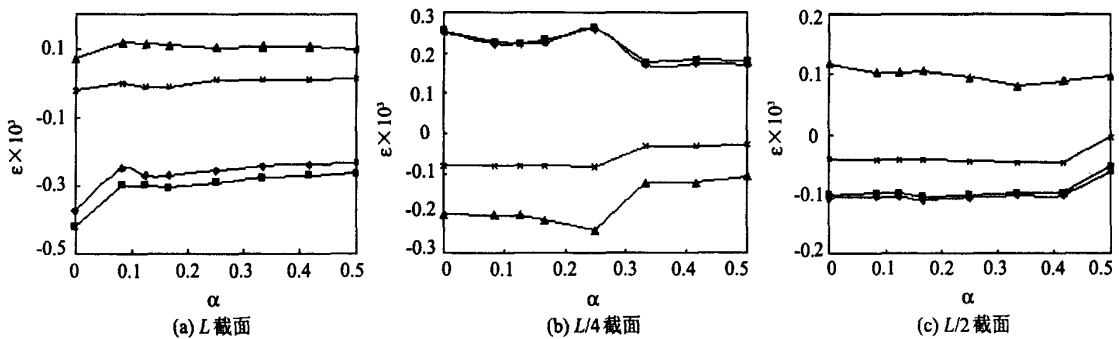


图 7 下缘应变变化图

Fig. 7 Intrados strain of different points (—工况 1 —工况 2 —工况 3 —工况 4)

4 拱的变形

在各种工况中, 工况 2 的拱肋竖向变形的绝对值以及位移差最大, 如图 8 所示. 从图 8 中看出, 虽然存在着截面刚度突变, 但复合拱的拱肋变形的连续性仍较好. 当钢管混凝土段所占的比重较大时, 由于拱肋的整体刚度也较大, 结构的竖向变形从总体上来说就比较小.

从图 9 各典型截面竖向变形值可以看出, 管内充填混凝土对截面抗弯刚度增加的影响大于对抗压刚度增加的影响. 即当拱肋承受不对称荷载

(工况 1、2) 时, 拱肋的挠度绝对值较大, 混凝土填充长度对 $L/4$ 及 $3L/4$ 截面挠度的影响较大. 当拱肋承受对称荷载(工况 3、4)时, 拱肋的挠度绝对值相对较小, 填充长度对拱顶截面的挠度影响较大. 在各种工况中, 当填充长度超过 $L/4$ 后, 各截面竖向位移的变化均趋缓, 因此考虑拱肋挠度控制因素时, 混凝土填充长度为 $L/4$ 时最经济合理.

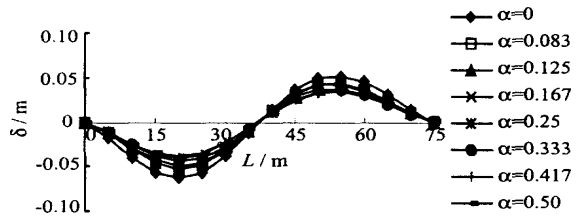


图 8 工况 2 拱肋竖向位移变化图

Fig. 8 Vertical deform of arch rib for load case 2

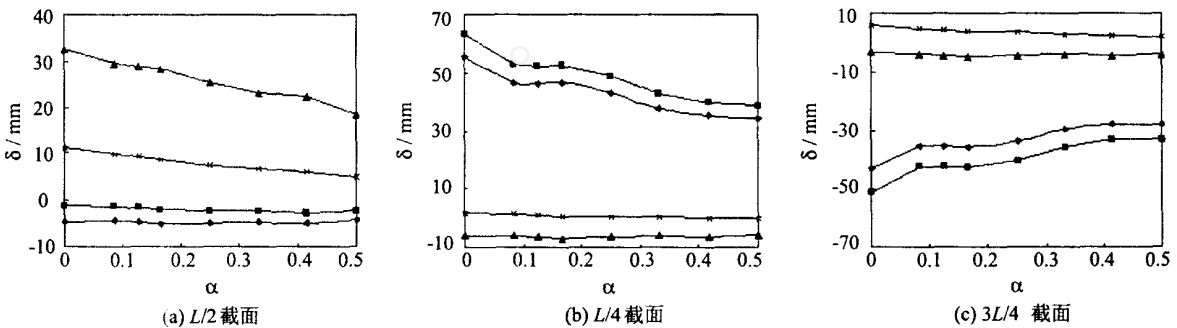


图 9 截面竖向位移变化趋势图

Fig. 9 Vertical deform of arch rib

(— 工况 1 — 工况 2 — 工况 3 — 工况 4)

5 弹性一类稳定

对该桥的弹性一类稳定分析表明, 在各种加载工况下, 一阶弹性失稳模态不受混凝土充填系数的影响, 均为面外失稳. 但对稳定系数有影响, 见图 10. 当 α 从 0 变化至 $1/12$ 时, 稳定系数缓慢增长, 最大仅增加 4.8%; 此后, 稳定系数增加较快, 当 α 趋近 $L/4$ 时, 稳定系数均达最大值(除工况 3); 此后随 α 增加稳定系数反而下降, 在 $\alpha = 0.417$ 时达到最低点后又开始上升, 到 $\alpha = 0.5$ (钢管混凝土拱) 时稳定系数达到第 2 个峰值. 因此, 从弹性一类稳定系数来看, 填充系数太小(小于 $1/12$) 时管内混凝土对稳定系数提高的作用较小, α 在 0.25 附近时, 效率最高; 超过 0.25 时反而降低了拱的稳定性能, 这可能是此时刚度增加的有利作用小于拱肋自重产生的不利影响. 当然, 钢管混凝土拱的稳定系数最大, 但从复合拱的角度而言, 钢管与钢管混凝土在拱肋 $L/4$ 处相接, 结构一类弹性稳定性最好.

6 极限承载力

图 11 为山前大桥极限承载力随 α 系数变化的规律图. 计算极限承载力采用双单元法建模, 钢管与混凝土的本构关系均采用理想弹塑性模型^[2, 41]; 图中 f_u 表示破坏时承载力, f_y 表示静载试验时承载力. 从图 11 可以看出, 该桥的承载力是以拱脚处弯矩(工况 2)进行控制, 破坏时安全系数均大于 4.5(未考

虑荷载分项系数)。

从承载力的变化规律来看, 钢管拱的承载力最低, 复合拱次之, 钢管混凝土拱最高。从 0 (钢管拱) 变化至 $1/12$ (复合拱) 时, 极限承载力提高 10.28% ~ 36.95%; 从 $1/12$ (复合拱) 变化至 $5/12$ (钢管混凝土拱) 时, 极限承载力提高 33.62% ~ 104.41%; 而对复合拱来说(当从 $1/12$ 变化至 $5/12$ 时), 极限承载力变化不大, 最大提高仅 19.54%。因此, 极限承载力的大小不是复合拱设计时选取充填长度要考虑的主要因素。

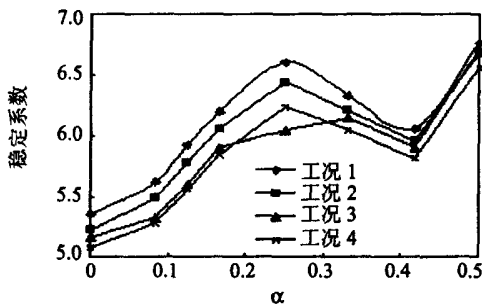


图 10 稳定系数变化趋势图

Fig. 10 Stability factor for different load cases

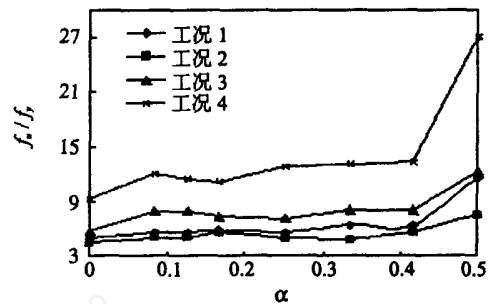


图 11 极限承载力变化趋势图

Fig. 11 Ultimate load capacity for different load cases

7 结语

1) 考虑减小拱脚处弯矩, 钢管 - 钢管混凝土复合拱的填充系数宜大于 $1/6$, 而对四分点轴力的影响较小, 可不作为考虑的因素。此外, 空钢管拱、复合拱和钢管混凝土拱之间的极限承载力相差较大, 但就复合拱本身而言, 填充系数对极限承载力的影响较小, 极限承载力可不作为选择充填长度的考虑因素。

2) 从拱的变形曲线分析可见, 混凝土填充长度为 $L/4$ 时最经济合理。弹性一类稳定分析结果表明, 填充长度的变化不会改变拱的失稳模态, 而管内混凝土填充至 $L/4$ 时, 稳定系数较大, 效率最高。

3) 综合考虑结构内力与应力、极限承载力、挠度和弹性一类稳定的分析结果, 钢管 - 钢管混凝土复合拱肋管内混凝土以填充至 $L/4$ 处较为合适。

4) 在钢管 - 钢管混凝土复合拱的设计中, 钢管与钢管混凝土相接处靠近空钢管一侧的截面应力是设计中的主要控制因素之一。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 陈友杰, 刘玉擎. 钢管与钢管混凝土复合拱桥[J]. 桥梁建设, 2001(1): 17 - 20.
- [2] 韦建刚, 陈友杰, 陈宝春. 钢管—钢管混凝土复合拱桥实桥静载测试与分析[J]. 中南公路工程, 2005(3): 58 - 61.
- [3] 孙潮, 陈宝春. 钢管—钢管混凝土复合拱桥动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001(2): 48 - 52.
- [4] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱材料非线性有限元分析方法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 344 - 348.