

上承式钢管混凝土拱桥的地震响应分析

李世龙, 陈爱军

中南林业科技大学土木工程学院 湖南 长沙 410004

摘要: 为研究上承式钢管混凝土拱桥的抗震性能, 本文以湖南省涂乍桥为工程背景, 利用 Midas/Civil 分别建立涂乍桥主桥与裸拱的有限元模型。首先选用多重李兹向量法对主拱进行动力特性分析, 然后选用反应谱分析法与时程分析法对有限元模型估测地震反应的影响。结果表明, 在地震荷载作用下拱脚处产生的轴力最大, 拱顶处产生的位移最大, 拱顶时程位移与 1/4 拱时程位移波动起伏一致。因此在上承式钢管混凝土拱桥抗震设计中, 需特别注意拱顶与拱脚两个设计控制截面的位移与内力验算。

关键词: 上承式钢管混凝土拱桥; 抗震性能; 有限元分析; 动力特性; 反应谱分析法; 时程分析法。

前言

随着我国社会经济高速增长, 桥梁工程的建设面貌也发生日新月异的变化, 如今桥梁结构形式多变, 施工方法多样。但在桥梁后期的运营和维护中, 有时不仅面临车辆对桥梁的破坏, 还面临地震、洪水、强风等天灾对桥梁结构的破坏, 其中地震作用对桥梁结构影响尤为明显。因此桥梁的

抗震设计对于桥梁设计是一个不可忽视的重要问题, 特别是处在强地震带的地方, 更需要在桥梁工程设计时充分考虑好防震设计, 来保证桥梁在运用过程中的安全和可靠性, 以符合当前社会经济的发展要求。因此对桥梁进行地震反应性能研究具有深远意义。

郑史雄等研究了大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能^[1]; 李彩霞针对钢管混凝土拱桥动力特性进行了研究^[2]; 张明亮研究了中承式钢管混凝土拱桥动力特性分析^[3]; 杜思义研究了下承式钢管混凝土拱桥抗震分析^[4]。

1 有限元模型的建立

涂乍桥主桥为计算跨径 252m 的上承式钢管混凝土拱桥, 桥面主梁采用 (13×20)m 先简支后桥面连续 T 梁。主拱肋为等截面四管桁

式结构, 高 5.0m, 宽 2.7m, 横向两个拱肋间距离为 9.3m 上下弦管皆为直径 1100mm 的钢管, 管内灌注 C55 自密实收缩补偿混凝土。涂乍桥共设置 12 根立柱, 其中左右两侧共八根立柱均采用钢管混凝土, 采用直径为 457mm, 壁厚 10mm 的钢管, 管内灌注 C55 自密实补偿收缩混凝土; 其余八根立柱则采用直径 406mm, 壁厚 10mm 的空钢管。

2 动力特性分析

2.1 全桥动力特性

由表 1 可知: 1) 涂乍桥前三阶振型频率差值不大, 主拱圈整体结构产生横向弯曲, 可以说明涂乍桥初始刚度较大; X 方向作为第 4 阶振型的主振型, 同时拱圈出现纵向振动; 第 5、10 阶振型均为 Y 方向主振型, 且出现扭转。2) 涂乍桥前十阶振型的自振频率为 0.268Hz~0.701Hz, 振型分布也比较密集。桥梁结构的第一阶固有频率为 0.268Hz, 并且前十阶自振频率的相差幅度不足 1Hz, 桥梁结构总体上偏向于柔性。

2.2 裸拱动力特性

由表 2 显示前十阶的自振频率范围为

0.276~0.727Hz, 其振型分布较为紧密, 模型一阶的固有频率为 0.276Hz, 与前十阶自振频率的相差也同样低于 1Hz。前三阶振型周期较大, 且频率也相对接近, 前三个模态均为 Y 方向的主振型, 拱圈整体结构则为横向振荡; X 向是第四阶振型的主要振型, 对拱圈结构产生纵向扭转; 而第 5、10 阶振型则为 Y 向主要振型, 产生水平扭曲。裸拱的十阶主要振型模态基本和主桥结构一样, 进一步增强了全桥动力稳定性研究结论的精度和可信度。

3 地震波响应分析

3.1 反应谱法分析

反应谱法能够通过简单的分解计算获得结构最大的地震响应值, 即将复杂的多质点结构体系的动力响应问题转化为多个单质点结构体系通过一定方式相互组合的动力响应问题。

不考虑扭转影响的情况下, 将同一地震动激励输入到结构支承点处, 可得到弹性体系在地震动的作用下的结构振动方程:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{I\}$ 分别为振动结构体系质量、振动结构体系阻尼、振动结构体系的刚度矩阵以及单位列向量。多质点振动方程求解较为复杂, 可用振型分解法将上述方程分解为多个单独的振动方程, 以便于求出每一方程在单质点体系下的振动的方程。

地面运动是随机过程, 并且记录到的地震动受到很多因素的影响, 其中有场地、震源深度、地震传播途径等。所以在进行反应谱分析时, 选择合适的反应谱曲线十分重要。设计加速度 S 按照我国《铁路桥梁抗震设计细则》的要求, 由下式确定:

$$S = \begin{cases} S_{\max} (5.5T + 0.45) & T < 0.1 \text{ s} \\ S_{\max} & 0.1 \text{ s} \leq T \leq T_g \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{\max} (T_g / T)$$

$$T > T_g$$

依据中华人民共和国国家质量技术监督局颁布的《中国地震动峰值加速度区划图》(GB18306-2015), 涂乍桥地面震动峰值加速度为 0.05g、反应谱特征周期为 0.35s, 对应地震基本烈度为 6 度。根据抗震设防标准, 本文选取 50 年超越概率 10% 的地震动参数作为地震动输入。涂乍桥属于 A 类桥梁, 抗震设防措施等级按 7 度设防, 抗震重要性系数 $E1$ 地震作用为 1.0。本桥按照 I 类场地设计, 场地系数 C_s 取 1.2, 特征周期 T_g 取 0.25s, 阻尼比 ζ 取 0.05, 阻尼比调整系数 C 取 1.0。

3.2 动态时程分析

3.2.1 地震波的选取

地震动强度、频谱特性和地震持续时间是地震影响结构震害程度的主要因素。选用合适的地震波进行桥梁抗震设计通常有三种常用方法: 第一种是选用桥梁建设场地已有的强震记录。第二种是选用从全球地震波中选用具有代表性的、广为熟知的地震波。一般选用的强震地震波有 El-Centro 波、Taft 波与汶川波等。第三种是依据场地基本参数等因素来确定地震波的地面震动加速度峰值、地震波波形与地震持续时间等, 从而拟定人工合成地震波。

3.2.2 裸拱动态时程分析

同主桥一致, 裸拱同样采用计算结果选取关键截面, 即拱脚、拱顶、1/4 拱进行分析。输入地震荷载工况为顺桥向+横桥向+0.65 竖桥向。图 1~图 2 分别为 Taft 波各位置轴力图与 Taft 波各位置位移图。图 3~图 4 分别为 El-Centro 波各位置轴力图与 El-Centro 波各位置位移图。

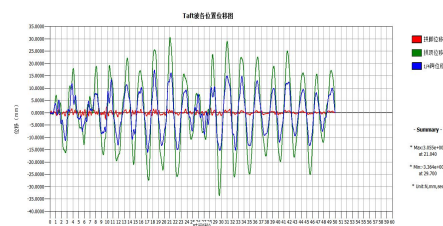


图 1 Taft 地震波各位置轴力图
Figure 1 Axis force diagram of Taft

seismic wave at each location

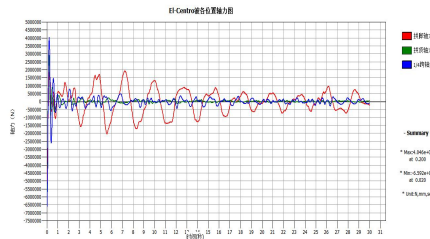


图 2 Taft 地震波各位置位移图

Figure 2 Displacement map of Taft seismic wave at each location

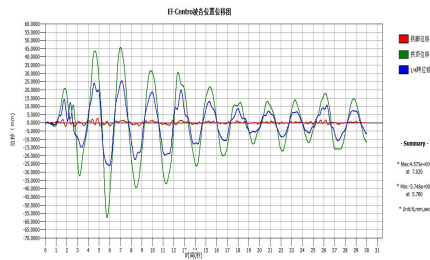


图 3 El-Centro 波各位置轴力图

Figure 3 Axis force diagram of each position of the El-Centro wave

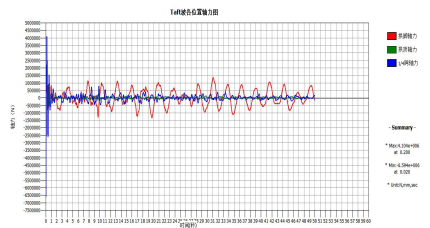


图 4 El-Centro 波各位置位移图

Figure 4 Displacement map of each position of the El-Centro wave

由图 1、图 3 可以看出拱脚轴力时程曲线波动最大,拱脚处产生最大轴力,由此可见拱脚、1/4 拱与拱顶三者中轴力对于拱脚影响较大,因此在钢管混凝土拱桥抗震验算中,要特别注意拱脚轴力验算。由图 2、图 4 可知 1/4 拱位移曲线与拱顶位移曲线起伏变化一致,且 1/4 拱位移略小于拱顶位移,说明在地震荷载作用下拱顶位移响应较为明显,因此在钢管混凝土拱桥抗震设计时,应特别注意拱顶位移验算^[5]。

结论

通过多重李兹向量法,反应谱分析法与时程分析法对涂乍桥主桥与裸拱的有限元模型进行计算分析,得出以下结论:通过多重李兹向量法分别计算分析涂乍桥主桥与裸拱的前四十阶振型与对应的自振频率,三阶振型周期较大,频率较为接近,三种模态均为 Y 方向作为主振型,拱圈整体结构发生横向振动;X 方向作为第 4 阶振型的主振型,拱圈发生纵向摆动;第 5、10 阶振型为 Y 向主振型,发生扭转。主桥与裸拱有限元模型前十阶自振频率的相差幅度不足 1Hz,桥梁结构总体上偏向于柔性。

参考文献

- [1] 郑史雄,周述华,丁桂保.大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能[J].西南交通大学学报,1999,(03):70-74.
- [2] 李彩霞.钢管混凝土拱桥动力特性的研究[D].武汉理工大学,2004.
- [3] 张明亮.中承式钢管混凝土拱桥动力特性分析[D].东北林业大学,2006.
- [4] 杜思义,陈淮,王宝聚.某下承式钢管混凝土拱桥抗震分析[J].郑州大学学报(理学版),2007,(03):158-162.
- [5] 张季伟,杜轲.大跨度上承式钢管混凝土拱桥抗震韧性评估[J].地震研究,2024,47(01):37-50.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378211)

作者简介:

李世龙(2000—),男,湖南省岳阳市,硕士研究生,主要从事桥梁抗震与稳定性研究。