

基于稳定性的高墩大跨连续刚构桥极限墩高研究

石雪飞, 白午龙

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:以湖北龙潭河大桥高墩结构形式为基本模式,利用大型空间有限元软件 ANSYS 建立数值模型,研究在确定的截面形式、结构参数和稳定安全储备条件下,高墩大跨连续刚构桥可能达到的极限墩高,并研究结构几何参数、材料参数、初始几何缺陷及风荷载等因素对极限墩高的影响程度。研究结果显示:采用龙潭河大桥高墩结构形式,连续刚构桥可以达到的极限墩高约为 205 m。增大极限墩高的途径也在文中进行了探讨。

关键词:稳定性;连续刚构桥;极限墩高

中图分类号:U448.23 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2013)03-0013-05

0 引言

随着我国桥梁建设逐渐向西部山区发展,连续刚构桥因其跨越能力大、受力合理、施工方便等优点,在桥梁工程建设中被广泛采用^[1]。为满足桥梁跨越深沟峡谷的需要,连续刚构桥的跨径和墩高不断增加,部分桥梁墩高已超过 150 m^[2],高墩大跨连续刚构桥的极限墩高引起人们的关注。

高墩大跨连续刚构桥的桥墩一般采用空心薄壁结构及高强度材料,使结构整体和局部的刚度下降,结构稳定问题突出,有时甚至成为控制结构安全性的关键问题^[3]。因此,高墩结构稳定性成为限制墩高的关键因素。以往研究多针对具体工程实例,研究高墩大跨连续刚构桥在不同荷载工况下的稳定性及影响因素,对其极限墩高研究较少。现重点研究在确定的截面形式、结构参数和稳定安全储备条件下,高墩大跨连续刚构桥可能达到的极限墩高,以及结构几何参数、材料参数、初始几何缺陷及风荷载等因素对极限墩高的影响程度。

1 稳定问题的理论

结构稳定一般研究两类稳定问题。第一类稳定叫做平衡分支问题,即到达临界荷载时,除结构原来的平衡状态理论上仍然可能外,出现第二个平衡状态。第二类是结构保持一个平衡状态,随着荷载的增加在应力比较大的区域出现塑性变形,结构变形很快增大。当荷载达到一定数值时,即使不再增加,结构变形也自行迅速增大以至于结构破坏^[4]。

第一类稳定问题一般只适用于理想中心压杆,即假定杆轴是直的,材料是匀质无瑕疵的,杆截面是沿杆长不变的,压力是中心作用的。而实际结构往往不能同时满足以上假定,因而实际工程稳定问题一般都表现为第二类稳定问题。因此,重点研究高墩大跨连续刚构桥高墩结构的第二类稳定问题。

2 有限元模型概况

目前国内高墩大跨连续刚构桥采用较多的高墩形式为双臂薄壁空心墩。以湖北龙潭河大桥为原型建立有限元分析模型,龙潭河大桥主桥上部构造为(106+3×200+106)m五跨预应力混凝土连续刚构桥梁,主桥墩最高 178 m,主桥桥墩墩身采用双臂变截面矩形空心墩^[5]。

2.1 单元的选取

收稿日期:2013-01-08

作者简介:石雪飞 男 1964 年出生 教授

桥梁结构 ANSYS 仿真分析模型中,主要使用的单元类型有梁单元、壳单元和实体单元。通常用梁单元分析结构的整体行为,壳单元和实体单元分析结构细部^[6]。连续刚构桥的稳定性是结构的整体性能,按照梁单元建立有限元模型,其计算精度就可以满足要求。采用 Beam188 单元建立连续刚构桥有限元模型。

2.2 结构材料参数

第二类稳定分析时结构采用非线性材料。主梁混凝土强度等级为 C55,墩身混凝土强度等级为 C40,弹性模量为 3.25×10^4 MPa,密度为 $2\ 600\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.2。参照德国的 Rusch 建议的混凝土轴心受压应力-应变曲线模型^[7],其本构关系表达式为

$$\begin{cases} \sigma_c = f_c [2\varepsilon_c/\varepsilon_0 - (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^2] & (\varepsilon_c \leq \varepsilon_0) \\ \sigma_c = f_c & (\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (1)$$

式中,相应于峰值应力的应变 ε_0 和极限压应变 ε_{cu} 分别取为 0.002 和 0.003 5。混凝土材料的本构关系如图 1 所示。

2.3 结构几何参数

为便于计算分析,以湖北龙潭河大桥结构为原型,对一些结构几何参数进行了简化。墩柱截面横桥向宽度从墩顶至墩底由 6.5 m 变化为 15 m,单肢墩纵桥向长度为 4 m,双肢墩净间距为 9 m,墩壁厚度为 0.7 m,主跨跨径为 200 m,边跨跨径为 106 m。

2.4 工况及荷载

一般认为,高墩大跨连续刚构桥当施工到最大悬臂状态时结构的稳定安全储备最低^[8]。以连续刚构桥最大悬臂施工状态工况下的结构为研究对象,建立有限元模型如图 2 所示。荷载考虑结构自重,施工荷载,挂篮掉落不平衡重以及风荷载耦合作用。施工荷载取 1 000 kN,挂篮掉落取冲击系数为 2.0,风荷载取基本风速为 30 m/s。

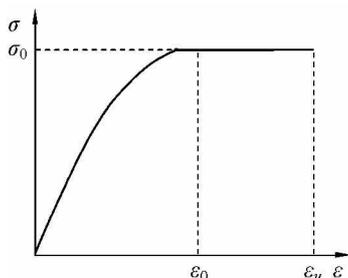


图 1 混凝土本构关系

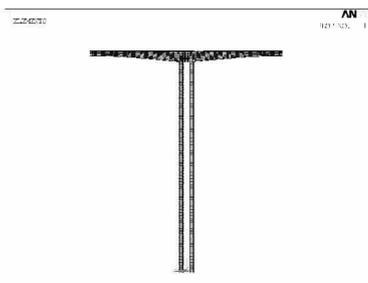


图 2 连续刚构桥最大悬臂状态模型

2.5 稳定性判别准则

在第二类稳定分析时,结构达到极限承载力采用稳定极限承载能力准则,即极限承载能力条件下构件容许出现屈服,但不容许发生强度破坏。按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 JTG D60—2004》荷载组合系数取 1.20,设计强度对应的混凝土安全系数为 1.25,采用标准强度时,混凝土的材料安全系数则为 1.25β (系数 β 为标准强度与设计强度的比值,上述规范中各等级混凝土 β 值在 1.22 ~ 1.24 之间),结构工作条件系数为 0.95,则要求钢筋混凝土结构的整体安全系数为: $K = 1.20 \times 1.25 \times 1.24 / 0.95 = 1.96$ ^[9]。根据失稳破坏不得先于强度破坏的原则,偏安全地取稳定安全系数为 2.0。

3 极限墩高研究

利用有限元软件,以龙潭河大桥高墩结构形式为基本模式,改变墩高,研究不同墩高的结构稳定安全系数,得到墩高与稳定安全系数的关系如图 3 所示。

由图 3 可知,随着墩高的增大,高墩结构的稳定安全系数也随之降低,墩高与稳定安全系数大致呈线性关系。按照钢筋混凝土结构最小稳定安全系数应该大于 2.0 的判别准则,高墩大跨连续刚构桥基于稳定性的极限墩高约为 205 m。在墩高为 205 m 的条件下,进行结构全过程稳定性分析,得到墩顶横桥向位

移与荷载系数关系如图4所示,高墩结构在极限状态的应力如图5所示。由图4可知,荷载系数为在0.6以前,墩顶横桥向位移与荷载系数呈现较好的线形关系。当荷载系数达到0.6后,曲线斜率开始变缓。荷载系数达到1.8时,曲线趋近于缓和。当荷载系数达到2.0时,ANSYS线形搜索法计算求解发散,认为结构达到极限承载能力,结构的稳定安全系数为2.0。由图5可知,高墩结构在极限状态下失稳模态为横桥向侧倾,墩底薄壁段较大范围内的混凝土达到极限压应力,形成塑性铰,高墩结构最终的破坏形态为墩底薄壁段混凝土强度破坏。

4 影响因素分析

以龙潭河大桥的结构形式为基本模式,通过改变墩底横桥向宽度、单肢墩纵桥向长度、双肢墩净间距、墩壁厚度、材料强度等级、横桥向几何缺陷比例、纵桥向几何缺陷比例、主跨跨径、风荷载放大系数等参数,研究这些因素对连续刚构桥极限墩高的影响程度。各因素对极限墩高的影响程度如图6所示。

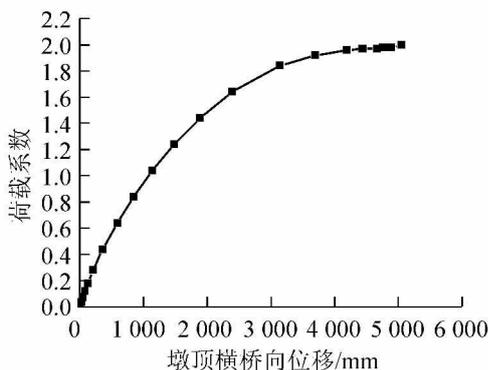


图4 墩顶横桥向位移-稳定安全系数关系

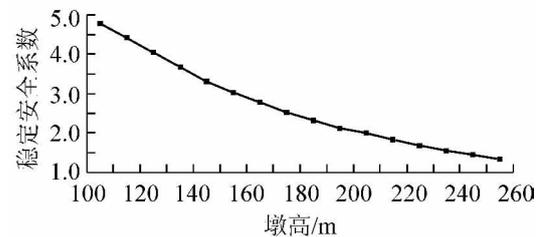


图3 墩高-稳定安全系数关系

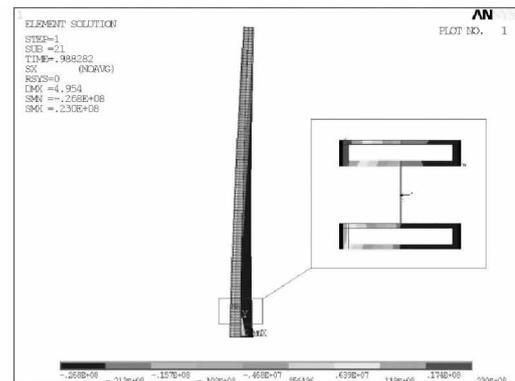


图5 结构极限状态应力

(1) 墩底横桥向宽度。墩底横桥向宽度对极限墩高的影响较大,墩底横桥向宽度每增加1 m,极限墩高增加10~15 m。

(2) 单肢墩纵桥向长度。单肢墩纵桥向长度对极限墩高的影响较大,单肢墩纵桥向长度每增加1 m,极限墩高增加约6~10 m。

(3) 双肢墩净间距。双肢净间距对极限墩高的影响较小,当双肢净间距大于6 m时,极限墩高基本不变,当双肢净间距小于6 m时,双肢净间距每减小1 m,极限墩高减小约1 m。

(4) 墩壁厚度。墩壁厚度对极限墩高的影响较大,厚度每增加0.1 m,极限墩高增加10~20 m。

(5) 材料强度等级。材料强度等级对极限墩高的影响较大,材料强度等级每增加10个标号,极限墩高增加约20 m。

(6) 横桥向几何缺陷比例。横桥向几何缺陷对极限墩高的影响相对较小,当横桥向几何缺陷小于1/400时,极限墩高基本不变,当横桥向几何缺陷大于1/400时,横桥向几何缺陷每增大1倍,极限墩高减小约5 m。

(7) 纵桥向几何缺陷比例。纵桥向几何缺陷对极限墩高的影响相对较小,当纵桥向几何缺陷小于1/800时,极限墩高基本不变,当纵桥向几何缺陷大于1/800时,纵桥向几何缺陷每增大1倍,极限墩高减小约1 m。

(8) 主跨跨径。主跨跨径对极限墩高的影响较大,主跨跨径每增加20 m,极限墩高减小10~15 m。

(9) 风荷载放大系数。风荷载放大系数对极限墩高的影响较小,风荷载放大系数每增加1倍,极限墩高减小约5 m。

本桥高墩结构的横桥向刚度较小,结构易沿横桥向发生失稳。因此,横桥向刚度是影响结构稳定性

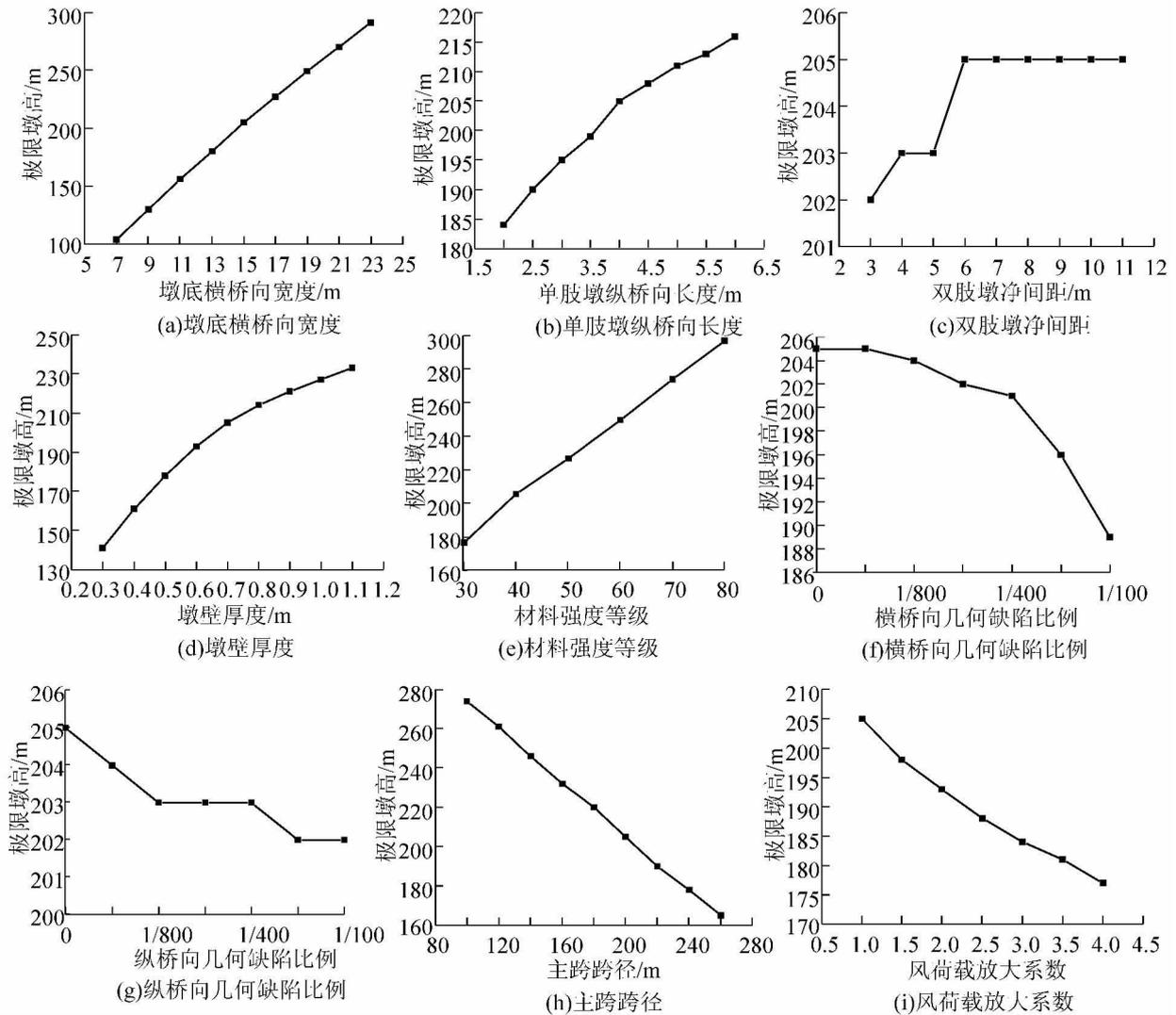


图 6 各因素对极限墩高的影响程度

的控制因素。增加墩底横桥向宽度、单肢墩纵桥向长度和墩壁厚度可有效增大结构横桥向刚度,从而显著改善结构稳定性,增加极限墩高。双肢净间距对横桥向整体刚度影响较小,只有当双肢净间距减小到一定程度,使高墩结构纵桥向刚度小于横桥向刚度,纵桥向刚度成影响结构稳定性的控制因素时才对极限墩高产生影响。增加材料强度等级可以提高混凝土强度破坏时极限应力的安全储备,从而增大极限墩高。主跨跨径增大,墩顶荷载增大,结构应力水平增大,混凝土易发生强度破坏,使极限墩高减小。横桥向几何缺陷、纵桥向几何缺陷以及风荷载使墩顶集中力引起附加弯矩增大,产生显著的二次效应,降低结构稳定性,使极限墩高减小。

5 结论

以龙潭河大桥高墩结构形式为基本模式,在确定的截面形式、结构参数和稳定安全储备条件下,通过空间有限元研究分析,对高墩大跨连续刚构桥可能达到的极限墩高及其各因素对极限墩高的影响程度进行详细深入的讨论,文章对于高墩大跨连续刚构桥的极限墩高得出以下几点结论:

- (1) 研究结果显示,采用龙潭河大桥高墩结构形式,在确定的截面形式、结构参数和稳定安全储备条件下,高墩大跨连续刚构桥可以实现的极限墩高约为 205 m。
- (2) 在达到极限状态时,高墩结构最终的破坏形态为墩底薄壁段混凝土强度破坏。
- (3) 研究结构几何参数、材料参数、初始几何缺陷及风荷载等因素对极限墩高的影响程度,得到对极

限墩高影响较大的因素有墩底横桥向宽度、单肢墩纵桥向长度、墩壁厚度、材料强度等级以及主跨跨径。双臂墩净间距、横桥向几何缺陷比例、纵桥向几何缺陷比例以及风荷载放大系数对极限墩高影响较小。

(4) 如果要进一步增大墩高,可以采用的措施有:增加高墩结构墩底横桥向、宽度单肢墩纵桥向长度和墩壁厚度,提高混凝土材料强度等级以及减小主跨跨径等。

参 考 文 献

- [1]刘志宏,詹建辉,黄宏力. 高墩大跨径连续刚构桥的稳定性分析[J]. 中外公路, 2005(6): 63-66.
 [2]杨昀,周列茅,周勇军. 弯桥与高墩[M]. 北京:人民交通出版社, 2011: 233-239.
 [3]丁作常,陈冠桦,唐志. 温泉特大桥高墩稳定性分析[J]. 中外公路, 2011(4): 117-123.
 [4]李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 1994: 6-10.
 [5]罗玉科,冯鹏程. 龙潭河特大桥设计[J]. 桥梁建设, 2005(2): 29-32.
 [6]吴勇往,张运波. 高墩大跨连续刚构桥施工过程稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2012, 25(4): 43-47.
 [7]顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海:同济大学出版社, 2007: 25-26.
 [8]杜进生,康景亮,罗小峰. 考虑施工缺陷和初始偏心的高墩稳定性分析[J]. 工程力学, 2011(4): 115-118.
 [9]沈炯伟. 大跨度桥梁稳定全过程分析与结构安全性研究[D]. 上海:同济大学桥梁工程系, 2011.

Study on Ultimate Pier Height of Long-span Continuous Rigid Frame Bridge Based on Stability

Shi Xuefei , Bai Wulong

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

Abstract: On the basis of the pier structure of Longtanhe Bridge in Hubei , establishing numerical model with ANSYS , the ultimate pier height of Long-span continuous rigid frame bridge with high pier is discussed in this paper on the condition of certain section form , structural parameters and stability. The result shows that the ultimate pier height of continuous rigid frame bridge is about 205 m using the pier structure of Longtanhe Bridge. The ways to enhance the ultimate pier height are also discussed.

Key words: stability; continuous rigid frame bridge; ultimate pier height (责任编辑 车轩玉)

(上接第12页)

Key Problems of Full-scale Fatigue Tests of Stayed-cables

Liu Hui , Shi Xuefei

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

Abstract: With the increase of the cable-stayed bridge construction , stayed-cable fatigue is becoming more prominent. As the primary means to study the fatigue properties of the stayed-cable , the full-scale fatigue test is conducted rarely , especially inside China , because of its huge size and high cost. On the basis of relevant literature , the paper summarizes the fatigue test parameter determining methods and compares the relevant provisions of domestic and international codes , and introduces the main full-scale fatigue tests conducted so far.

Key words: stayed-cables; full-scale tests; fatigue tests; test parameters; fatigue loading systems (责任编辑 车轩玉)