

文章编号: 1674—8247(2017)06—0029—04

铁路上承式混凝土拱桥极限跨径的分析

赵会东

(中国铁路总公司, 北京 100844)

摘 要:混凝土拱桥的跨越能力取决于混凝土的抗压能力,文章以混凝土拱桥在轴力作用下的压应力达到混凝土容许应力为控制条件,分析得出了主拱自重状态下的极限跨径。在此基础上结合上部结构、二期恒载、活载与拱圈自重的比例关系,得到了铁路上承式混凝土拱桥的极限跨径,并给出了不同标号混凝土的工程实用极限跨度建议值,研究结果可为工程设计人员掌握上承式混凝土拱桥的跨越能力和结构材料选用提供理论依据。

关键词:极限跨径;铁路上承式混凝土拱桥;容许应力;弹性稳定;荷载比例

中图分类号:U441⁺.2 **文献标志码:**A

Analysis on the Ultimate Span of Railway Concrete Deck Type Arch Bridges

ZHAO Huidong

(China Railway Corporation, Beijing 100844, China)

Abstract: The span capacity of concrete arch bridge depends on the anti-pressure capacity of concrete. Using the axial compressive stress of the arch reaching the allowable compressive strength of the concrete as the control condition, the ultimate span of main arch under arch-ring dead weight condition is analyzed and concluded in the paper. Based on this, we can get the ultimate span of railway concrete deck arch combined with ratio relationship of the superstructure, secondary dead load, the live load to arch-ring dead weight. On the basis of theoretical span, the proposed values of project practical ultimate spans are given when adopting different grades of concrete. The research provides the theoretical foundation on span capacity and structure material selection of concrete deck arch bridge for designers.

Key words: ultimate span; railway concrete deck type arch bridge; allowable stress; elastic stability; load ratio

拱桥利用自身几何形态来平衡外荷载产生的弯矩,因此结构受力以受压为主。由于轴向刚度远大于抗弯刚度,拱桥的竖向刚度明显大于同跨径的梁式桥,使大量应用抗压能力强、抗拉能力弱的混凝土等低造价材料成为可能。近年来,随着劲性骨架法、转体施工等施工技术的进步,制约大跨度上承式拱桥推广应用的难题得到了解决。

由于跨越能力强、刚度大、养护维修工作量小,上

承式拱桥成为艰险山区高速铁路大跨度桥梁的最佳桥型之一,尤其适用于跨越两岸陡峭的V形深沟。

我国结合高速铁路的建设实践,对上承式拱桥的合理构造、受力变形行为、徐变控制等开展了较为系统的研究,并先后建设了渝黔铁路夜郎河桥^[1]、云桂铁路南盘江大桥、沪昆北盘江^[2]等多座大跨度拱桥,其中主跨445 m的沪昆高速铁路北盘江大桥,为世界上最大跨度的混凝土拱桥。

收稿日期:2017-10-30

作者简介:赵会东(1972-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2016G002-1)

引文格式:赵会东.铁路上承式混凝土拱桥极限跨径的分析[J].高速铁路技术,2017,8(6):29-32.

ZHAO Huidong. Analysis on the Ultimate Span of Railway Concrete Deck Type Arch Bridges[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(6): 29-32.

近年来,在欧洲各国,拱桥在高速铁路中的应用也日益增多,西班牙、德国均建成了多座大跨度混凝土拱桥,典型工程为西班牙的阿尔蒙特河大桥^[3],采用了主跨 384 m 的上承式混凝土肋拱。

然而,国内外对混凝土拱桥研究多针对具体工点^[4],关于其跨越能力、适用范围等的研究成果较为缺乏。因此,开展混凝土拱桥的极限跨径分析,对于合理确定其适用范围、合理选择桥式方案等均具有一定的现实意义。

1 研究思路

拱桥受力以受压为主,因此其跨越能力取决于混凝土的抗压能力。本文研究的基本思路就是以混凝土的最大压应力控制为出发点,分析混凝土拱桥的极限跨越能力。显然,当跨度增大到一定程度时,必然会出现自重产生的应力与混凝土容许压应力相等的情况,此时对应的跨度即为自重作用下混凝土拱桥的极限跨径。

实际工程中,拱桥还承担拱上结构、二期恒载、活载等后期荷载,如果能根据工程经验得到拱上结构、二期恒载、活载等荷载与主拱自重的关系,就能得到具有实际工程意义的极限跨径。

2 混凝土拱桥极限跨径分析

2.1 自重作用下混凝土拱桥的应力分析

混凝土拱桥的跨越能力取决于混凝土的抗压能力。实际工程中,拱桥多采用变截面拱,为便于简化分析,近似按等截面拱进行分析。极限跨径分析时,近似取拱跨 1/4 截面作为研究对象。

对于上承式拱桥,若忽略拱顶弯矩的影响,则拱顶水平推力:

$$H = \frac{ql^2}{8f} \tag{1}$$

式中: H ——拱顶的水平推力;

q ——作用于拱桥的荷载集度;

l ——拱桥的跨度;

f ——拱桥的矢高。

由于仅分析轴向力,可忽略拱轴线线形的影响。为简化计算,按抛物线拱进行分析。拱 1/4 截面处的轴力为:

$$H = H \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2} = \frac{ql^2}{8f} \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2} \tag{2}$$

结构自重 $q = \gamma \times A$,则自重作用下的轴力为:

$$H = H \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2} = \frac{\gamma Al^2}{8f} \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2} \tag{3}$$

式中: N ——计算截面的轴力;

γ ——混凝土的容重;

A ——截面的面积。

自重作用下截面应力为:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{\gamma l^2}{8f} \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2} \tag{4}$$

式中: σ ——截面的压应力。

2.2 拱桥容许应力的分析

由弹性稳定理论^[5]可知,上承式无铰拱桥的自由长度:

$$l_0 \approx 0.36S = 0.36 \left(1 + \frac{8f^2}{3l^2}\right)l \tag{5}$$

式中: l_0 ——上承式拱桥的自由长度;

S ——主拱的全长。

根据设计经验,铁路拱桥的平均截面高度 h 约为 $\frac{l}{40} \sim \frac{l}{50}$,则长细比:

$$\frac{l_0}{h} = (14.4 \sim 18.0) \left(1 + \frac{8f^2}{3l^2}\right) \tag{6}$$

根据不同矢跨比计算出长细比,并据此按 TB 10092-2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》^[6]求出稳定折减系数 φ ,如表 1 所示。

表 1 轴心受压混凝土构件稳定性折减系数

矢跨比	1/3	1/3.5	1/4	1/4.5
长细比	18.7 ~ 23.4	17.5 ~ 21.9	16.8 ~ 21.0	16.3 ~ 20.4
稳定折减系数	0.79 ~ 0.67	0.84 ~ 0.70	0.84 ~ 0.73	0.86 ~ 0.74

2.3 自重作用下混凝土拱桥极限跨径的分析

自重作用下的混凝土应力与混凝土的容许应力同时:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{\gamma \times l^2}{8f} \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2} = \varphi[\sigma] \tag{7}$$

式中: $[\sigma]$ ——混凝土的容许压应力。

取 $\gamma = 27.5 \text{ kN/m}^3$,则可根据式(7),推导出自重作用下混凝土拱桥的极限跨径:

$$l_{\max} = \frac{8\varphi[\sigma] \frac{f}{l}}{\gamma \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2}} = \frac{8\varphi[\sigma] \frac{f}{l}}{27.5 \times \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{l}\right)^2}} \tag{8}$$

由(8)式可知,极限跨径仅与容许应力、矢跨比有关,不同参数的单拱状态理论极限跨度计算结果如表 2 所示。

表 2 单拱状态理论极限跨度(m)

矢跨比	1/3	1/3.5	1/4	1/4.5
C50	724 ~ 824	677 ~ 812	636 ~ 732	586 ~ 681
C60	865 ~ 1020	808 ~ 970	760 ~ 874	699 ~ 813

上述分析中未考虑弯矩的影响,近似认为弯矩引起的压应力由偏心受压容许应力与轴心受压容许应力间的差值承担。从对徐变控制的角度出发,一般要求截面的压应力按 $0.4f_c$ (极限强度) 控制,其数值与容许应力接近,因此,在计算时忽略钢筋的提高效应是合理的。

2.4 工程意义的极限跨径分析

对实际工程中的拱桥而言,由于还需承受拱上结构、二期恒载和活载的重量,因此工程意义的极限跨径要小的多。

若梁部采用混凝土结构,则拱上的梁跨一般采用 30 ~ 40 m 的跨径。根据设计经验,其用量一般为 $15\text{ m}^3/\text{m}$,扣除 0 号立柱后,拱上立柱的用量为 $12\sim15\text{ m}^3/\text{m}^{[6]}$ 。

客货共线铁路二期恒载和活载的总量约为 $32\text{ t/m}^{[7]}$,客运专线铁路约为 $29\text{ t/m}^{[8]}$,相对结构自重而言,其差别可以忽略。将其折合为混凝土,约为 $11\sim12\text{ m}^3/\text{m}$ 。

由上述分析可知,拱上结构自重与二期恒载、活载的重量之和,可折算为 $38\sim42\text{ m}^3/\text{m}$ 的混凝土。

根据我国几座上承式拱桥的统计结果,主拱的平均圬工量约为 $60\sim65\text{ m}^3/\text{m}$,也就意味着拱上结构自重、二期恒载、活载之和约占自重的 58% ~ 65%,根据工程可行性,保守取 62%。

与分析自重作用下极限跨径的道理类似,工程意义的有效跨径计算公式为:

$$l'_{\max} = \frac{8\varphi[\sigma] \frac{f}{l}}{(1+\beta)\gamma \times \sqrt{1 + (\frac{2f}{l})^2}} = \frac{8\varphi[\sigma] \frac{f}{l}}{(1+\beta)27.5 \times \sqrt{1 + (\frac{2f}{l})^2}} \quad (9)$$

式中: β ——其它荷载与拱自重的之比。

根据混凝土强度等级、矢跨比等因素,分别计算出混凝土拱桥的极限跨径如表 3 所示,结果总体上与工程实践结果一致。

表 3 混凝土拱桥的极限跨径

矢跨比	1/3	1/3.5	1/4	1/4.5
C50	447 ~ 509	418 ~ 498	392 ~ 452	362 ~ 420
C60	534 ~ 630	499 ~ 599	469 ~ 540	431 ~ 499

上述分析是从混凝土的受压能力得出的,并未考虑立柱的刚度控制、混凝土收缩徐变变形的控制、施工

难度等因素。从目前国内混凝土拱桥的实践经验来看,混凝土拱桥的徐变挠跨比大致在 1/5 000 左右^[9]。跨度越大,徐变曲线曲率半径越大,徐变变形不是跨度的控制性因素。而实际工程中,上承式拱桥立柱的刚度控制较为困难,且施工难度较大,因此从工程角度应控制立柱的高度。建议矢跨比为 1/3.5 及以下时,上承式混凝土拱桥的最大跨度应控制在 450 m 以内,当采用 1/3 的矢跨比时,最大跨度应控制在 400 m 以内。

3 结论

(1) 当主拱采用 C50 混凝土,矢跨比分别为 1/4.5、1/4、1/3.5、1/3 时,铁路上承式拱桥拱的理论极限跨径建议控制在 360 m、390 m、420 m、450 m 以内。当主拱采用 C60 混凝土,矢跨比分别为 1/4.5、1/4、1/3.5、1/3 时,铁路上承式拱桥拱的理论极限跨径建议分别控制在 430 m、470 m、500 m、530 m 以内。

(2) 本文是在中心受压拱的理想状态下,基于混凝土的受压容许应力,得到上承式混凝土拱桥极限跨径的,并未考虑立柱刚度、成拱方式、混凝土收缩徐变变形控制、施工难度等因素,因此工程中确定极限跨径时,应保留一定的富余。

(3) 综合考虑立柱刚度控制、工程风险、施工难度等因素,建议拱圈采用 C60 混凝土,矢跨比为 1/3.5 及以下时,上承式混凝土拱桥的最大跨度控制在 450 m 以内,当矢跨比采用 1/3 时,跨度控制在 400 m 以内。

(4) 大跨度铁路上承式混凝土拱桥具有结构刚度大、稳定性能好的特点。但铁路混凝土拱桥自重和二期恒载较大,成为制约其跨越能力的主要因素。因此,要提高其跨越能力,采用轻质、高强混凝土及减轻拱上结构重量是有效的技术途径。同时应采用合理的工法和工艺,解决拱圈和拱上结构的施工问题。

参考文献:

[1] 宋随弟,马庭林,郭伦波,等. 渝黔铁路夜郎河大桥主桥设计关键技术[J]. 桥梁建设,2017 47(5):89-94.
SONG Suidi, MA Tinglin, GUO Lunbo, et. al. Key Techniques of Design of Main Bridge of Yelang River Bridge on Chongqing - Guiyang Railway [J]. Bridge Construction, 2017 47(5):89-94.

[2] 朱颖,徐勇,陈列,等. 沪昆客运专线北盘江特大桥桥位、线路高程及桥式方案比选[J]. 高速铁路技术,2013,4(4):1-6.
ZHU Ying, XU Yong, CHEN Lie, et al. Alternative Solution of Beipanjiang Bridge Site, Route Height and Bridge Type on Shanghai - Kunming Passenger Dedicated Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2013,4(4):1-6.

[3] Analysis and Design of the Almonte Bridge. Proc. of the 37th

Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2014.

[4] Candrlie V, Radic J, Gukov I. Research of concrete arch bridges up to 1000m in Span [A] // Proceedings of the Fourth International Conference on Arch Bridge [C]. Barcelona: CMNE, 2004: 538-547.

[5] 李国豪. 桥梁结构的稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 2002.

LI Guohao. Stability and Vibration of Bridge Structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.

[6] TB 10092-2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].

TB 10092-2017 Code for Design of Concrete Structures of Railway Bridge and Culvert[S].

[7] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].

TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].

[8] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].

TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

[9] 中国铁路经济规划研究院, 中铁二院工程集团有限责任公司, 中国铁路设计集团有限公司, 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 200-450米跨度混凝土桥设计关键技术研究报告[R]. 北京:中国铁路经济规划研究院, 中铁二院工程集团有限责任公司, 中国铁路设计集团有限公司, 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2017.

China Railway Economic and Planning Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., China Railway Design Group Co., Ltd., China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. Research on Key Technique of 200~450-meter-span Concrete Bridge Design Research Report[R]. Beijing: China Railway Economic and Planning Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., China Railway Design Group Co., Ltd., China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2017.

(编辑:朱雨辰 白雪)

(上接第9页)

[5] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part I. Formulation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 711-725.

[6] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part II. Applications [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 727-742.

[7] Cofer W F, Zhang Y, Mclean D I. A comparison of current computer analysis methods for seismic performance of reinforced concrete members [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2002, 38(9): 835-861.

[8] McKenna F, Fenves G L. The OpenSEES command languagemanual [EB/OL]. http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Main_Page, 2010-3-31.

[9] Prakash V, Powell G H and Campbell SD. DRAIN-2DX: Static and Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures [R]. NISEE, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1993.

[10] 嵇一, 李忠献. 钢筋混凝土纤维梁柱单元实用模拟平台[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 102-108.

ZHUO Yi, LI Zhongxian. A practical Simulation Platform of Reinforced Concrete Fiber Beam-column Element [J]. Engineering Mechanics 2011; 28(4): 102-108.

[11] Filippou F C, Popov E P, Bertero V V. Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints [R]. EERC Report 83/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Bekerley, CA, 1983.

[12] Menegotto M, Pinto P E. Slender RC Compressed Members in Biaxial Bending [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1977, 103(3): 587-605.

[13] Mohd-Yassin M H. Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cyclic Loads [D]. University of California, Berkeley, 1994.

[14] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain rates [J]. ACI Structural Journal, 1982, 84(4): 13-27.

[15] Kent D C, Park R. Flexural members with Confined Concrete [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1971, 97(7): 1969-1990.

[16] Blakely R W G, Park R. Prestressed Concrete Sections with Cyclic Flexure [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1973, 99(8): 1717-1742.

[17] Nagaya K, Kawashima K. Effect of Aspect ratio and Longitudinal Reinforcement Diameter on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns [R]. Report No. TIT/EERG, 2001, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.

[18] 嵇一, 王菲. 罕遇地震下城际铁路连续梁桥延性抗震设计[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(4): 66-71.

ZHUO Yi, WANG Fei. Seismic Ductility Design for Intercity Railway Continuous Bridge Under Rare Earthquake [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 66-71.

(编辑:刘会娟 苏玲梅)