

# 拱桥极限状态设计理论研究

郑振飞 陈宝春  
(土建系)

**摘 要** 应用极限状态设计理论,在对圬工拱桥和钢筋混凝土拱桥系列研究的基础上,综合分析了拱桥的承载能力极限状态和裂缝使用极限状态,讨论了现行《桥规》在拱桥设计理论方面存在的问题,提出了较为合理和实用的拱桥极限设计理论,可供《桥规》修订和实际工程应用参考。

**关键词** 拱桥; 极限状态; 设计; 规范

## 1 问题的提出

本文研究的对象为公路工程中大量应用的钢筋混凝土无铰拱和圬工拱桥。1985年交通部颁布了《公路桥涵设计通用规范(JTJ022-85)》和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTJ023-85)》(以下简称新《桥规》)。新《桥规》对拱桥的设计验算采用了分项系数的半概率方法,比1974年《桥规》<sup>[3]</sup>的单一系数的容许应力法前进了一步。然而因其计算方法仍为弹性理论,其极限状态采用的是构件而非结构的极限状态,因而其计算结果与实际的承载能力相差甚远,这是新《桥规》的一个不足之处。同时,对于使用极限状态之一的裂缝,新《桥规》缺乏相应的规定,因而,在拱桥设计时,无法进行裂缝使用极限状态的验算,这是它的另一不足之处。本文针对上述问题进行了讨论,提出了可供新《桥规》修订和工程实际应用的拱桥极限状态设计理论。

## 2 承载能力极限状态

承载能力极限状态包括结构达到极限承载能力,结构整体或部分地丧失稳定以及结构达到疲劳极限。本文仅讨论公路拱桥设计中主要考虑的结构达到极限承载能力时的承载能力极限状态。先考察2个实例。

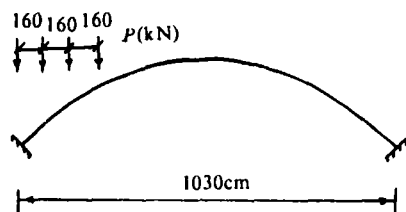


图1 莆田江口桥

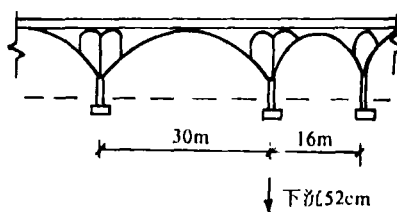


图2 漳州某桥

例1<sup>[4]</sup>莆田江口桥。桥为多孔不等跨圆弧石拱桥,其中较大跨径有11.7m(矢跨比1/6)和10.3m(矢跨比1/5)。1987年有一台50MVA主变压器,采用TG200型牵引车和17.15型平板挂车运输,要通过该桥。取10.3米跨径一孔按《桥规》方法计算,得拱脚偏心矩为

本文1993年1月13日收到

0.186cm, 远超过其规定值 0.14cm. 平板挂牵的轴重为 137.5kN. 以《桥规》计算方法计算, 符合规定时其轴重不能超过 123.5kN. 采用极限状态法计算时, 其轴重可达到 157.8kN. 最后, 在极限状态法计算的基础上, 引进活载优化思想, 成功地解决了特大荷载过江口桥这个问题.

例 2<sup>[5]</sup> 福建漳州某桥. 该桥为钢筋混凝土双曲拱桥, 全长 438.4m, 主河道上每孔 30m, 矢跨比 1/6, 桥面净宽 17.5m. 南岸 30m 跨双曲拱桥和 16m 石拱桥的联系墩为刚性扩大基础, 由于施工问题而产生大位移. 按新《桥规》以 30m 一跨计算, 只计恒载时, 支座容许最大下沉量为 15.2cm. 可是, 该桥在联系墩下沉 52cm 的情况下, 仍照常通车使用, 这是《桥规》计算理论所无法解释的. 文献[5]应用双重非线性分析方法, 指出当支座的下沉 68cm 时, 主拱圈在恒载作用下才形成三个塑性铰. 在目前情况下, 考虑活载作用时, 该桥也未达到承载能力的极限状态. 这样就较好地解释了这一工程现象.

新《桥规》的计算方法和规定与实际之所以还存在如此大的差距, 究其原因主要有二. 其一, 它把截面荷载达到材料极限抗力(即构件的极限承载力)作为结构的极限承载状态. 事实上, 对于超静定结构, 只有当结构满足平衡条件、破坏条件和屈服条件时才达到承载能力的极限状态. 对无铰拱来说, 它应当是形成四个塑性铰成为机构时才处于破坏状态, 这时应有四个截面达到截面极限强度, 从这一点来说, 新《桥规》是偏保守的. 其二, 新《桥规》仍规定“拱圈内力按弹性理论计算”(见《JTJ022-85》第 4.2.1 条和《JTJ023-85》3.37 条), 实际上, 不论是圬工还是钢筋混凝土, 均为非线性材料(应力应变非线性且会出现裂缝), 公路拱桥在受力过程中存在着明显的截面应力重分布和各截面之间的内力重分布, 弹性理论不能反应结构受力的实际状态, 从这点上来说, 是偏于安全的. 但是, 以上两个方面与实际差距以第一点为甚, 所以拱桥的实际承载力要比《桥规》的算法大得多. 从以上分析可见, 1985 年《桥规》与 1974 年《桥规》相比, 虽然改单一安全系数的容许状态法为分项系数的半概率法, 但其内力计算仍用弹性理论, 限定标准仍为截面极限承载力, 只是在表达方法上的变化, 而并不是建立在真正的极限状态理论之上.

结构的极限承载能力计算方法有非线性全过程分析和塑性极限分析法. 前者从材料非线性性能出发, 以计算机分析为手段, 分析结构比开始受力到达到极限状态的受力全过程情况, 确定出结构的极限承载能力. 后者则假定材料为刚塑性, 只考虑结构的破坏状态, 通过塑性理论得出结构的极限承载能力. 在实际应用中, 后者分析简便, 是确定结构极限承载能力实用的工程方法, 建议《桥规》予以采用.

### 3 裂缝极限状态

钢筋混凝土使用极限状态, 主要指标为裂缝宽度. 对一般结构而言, 限制裂缝宽度的目的有二: 一是控制钢筋的锈蚀, 以保证结构的耐久性; 一是保证结构的外观和安全感. 影响裂缝宽度的因素甚多, 国内外进行了大量的研究, 产生了方法不同、公式各异的各种计算模式. 研究的对象多限于钢筋混凝土受弯构件, 对拱式结构(压弯构件)少有涉及. 同时, 目前的许多研究显示, 裂缝宽度对钢筋的长期锈蚀没有影响或影响甚微, 对裂缝宽度的限制有放宽的趋势. 因此, 对于钢筋混凝土拱, 要在短期内得出其裂缝宽度计算公式和限制值是困难也不是非常必要的. 以下, 将从定性的角度来分析这一问题.

由试验研究得知<sup>[6]</sup>, 钢筋混凝土拱受荷产生的裂缝, 其宽度与钢筋应力成明显的非线性关

系,且在钢筋达到屈服时(即形成受拉塑性铰时),在钢筋屈服处,由于钢筋对砼开裂的约束作用明显削弱,受压砼也随之进入屈服状态,使裂缝宽度随荷载增加的幅度明显增大.从限制裂缝宽度的目的出发和基于前面对裂缝问题的讨论,可以把拱内出现第一个塑性铰(即某个截面达到截面强度极限),做为裂缝使用极限状态.它所对应的荷载可以通过非线性分析求得,一般需借助计算机方法.

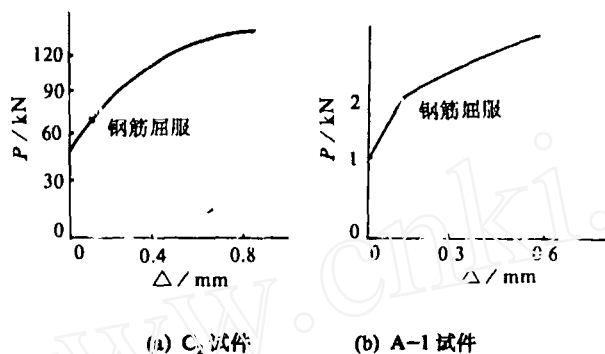


图 3 最大裂缝宽度与荷载关系

非线性分析表明,结构的内力重分布是由于截面刚度变化引起的.截面刚度变化是由材料的非线性、截面的开裂和塑性铰的产生引起的,其中以塑性铰的影响最大.因此,在拱形成第一个塑性铰之前,结构的内力重分布不是非常明显.考虑到实际应用,忽略了材料的非线性影响后,可以采用新《桥规》承载能力极限状态的计算方法来计算这里建议的钢筋砼拱桥裂缝使用极限状态.

文献<sup>[6~8]</sup>所进行的钢筋砼拱试验研究中,裂缝的最大宽度都在 0.25mm~0.45mm 范围以内,考虑了安全度以后,最大宽度会更小.从工程实践来看,用《桥规》方法设计出来的大量钢筋砼拱桥都没有出现很大的裂缝宽度.因此,应用《桥规》强度验算方法与公式作为钢筋砼拱的裂缝使用极限状态是可行的.同时,这一套方法已为工程界熟悉和掌握,因而也是实用的.

对于圬工拱桥,现行《桥规》是通过偏心矩的限制对裂缝加以控制.实际上,在进行圬工拱桥极限承载力计算时,通常都假定材料不抗拉,裂缝的产生是结构受力全过程的现象,不会影响到结构的极限承载力,对结构的耐久性也影响不大.如果圬工拱桥的强度验算采用了极限承载力方法,且进行了变形极限状态的验算,则对裂缝控制就失去了意义.

#### 4 讨论

对于静定拱桥,由于出现一个塑性铰,结构即告破坏,因此这里建议的两个极限状态可以认为是用时出现的.

对于超静定钢筋砼,建议的裂缝使用极限先于承载能力极限状态的出现,设计时只要对前者进行验算,后者必定满足.如果建议的裂缝使用极限状态套用现行《桥规》强度计算与验算方法,对于实际应用并没有带来什么困难,只是在概念上发生了根本的变化,使得计算方法更加科学与合理.当然,在条件成熟时,用更合理的裂缝宽度计算方法和限制标准或其它更科学的限制条件与计算方法,来保证结构的耐久性是有必要的.

拱桥承载能力的极限状态, 可用于已修建的公路拱桥. 对于支座较大的变形、主拱圈的开裂、或通过偶然的特大荷载, 用承载能力的极限分析方法加以验算, 对于发掘现有拱桥的承载能力, 消除人们的顾虑, 将会发挥积极的作用, 在当前交通需求很大而资金紧缺无法大量修建新桥的时候, 尤其如此.

对于拱桥失稳的承载能力极限状态和变形极限状态, 以及它们同本文所述的两个极限状态之间的关系、裂缝宽度的计算方法与限制标准等, 还需做大量的工作, 有待今后的研究.

#### 参考文献

- 1 交通部. 公路砖石及砼桥涵设计规范. 北京: 人民交通出版社, 1985
- 2 交通部. 公路钢筋砼及预应力砼桥涵设计规范. 北京: 人民交通出版社, 1985
- 3 交通部. 公路桥涵设计规范. 北京: 人民交通出版社, 1974
- 4 郑振飞, 彭大文, 林国华. 大吨位荷载通过江口石拱桥承载能力研究. 福州大学学报(自然科学版), 1988(3): 1~7
- 5 谢 琪. 钢筋砼拱桥极限变位研究: [硕士论文]. 福州: 福州大学土建系, 1988
- 6 郑振飞, 陈宝春. 钢筋砼无铰拱非线性平面有限元分析. 工程力学, 1988(4): 72~79
- 7 郑振飞, 彭大文. 超静定钢筋砼拱的非线性分析. 福州大学学报(自然科学版), 1985: 116~127
- 8 郑振飞, 张尚杰, 彭大文, 等. 钢筋砼拱的极限承载能力试验研究. 福州大学学报(自然科学版), 1982(2): 1~12

## Analysis of Limite State Design Theory of Arch Bridges

Zheng Zhenfei Chen Baochun

(Department of Civil and Architectural Engineering)

**Abstract** Based on the series analysis results of masonry and RC arch bridges, the limite state design theory is used in this paper to analyse the load bearing ultimate state and cracking limite state of arch bridge. The problems in design theory of arch bridge in "The Design Gode of Highway Bridge" are discussed and more rational and more practical design theory of arch bridges is presented. This theory can be made as a reference for revision of the Design Code and for the practical use in engineering.

**Keywords** arch bridge; timite state; design; code