

大跨预应力混凝土梁式渡槽结构 上拱度的分析与控制*

季日臣^{1,2}, 陈尧隆¹, 李宇¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;
2 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

[摘要] 通过对大跨预应力混凝土梁式渡槽结构上拱度的分析认为, 预应力、恒载、弹性模量、混凝土的收缩和徐变等是影响上拱度的主要因素, 而上拱度的预测主要取决于对混凝土徐变的合理估算; 为了防止上拱度过大对结构使用性能的影响, 提出对上拱度的控制应采用降低预应力和减小徐变相结合的措施。

[关键词] 预应力混凝土; 梁式渡槽; 上拱度

[中图分类号] TV672+.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)12-0107-04

钢筋混凝土结构由于受到混凝土裂缝宽度的限制, 所以钢筋的拉应力将受到相应的制约。因为这一制约关系, 其无法利用高强度材料来减轻结构自重, 增大跨越能力^[1]。鉴于钢筋混凝土梁式渡槽结构上的缺点, 通常可采用预加应力来改善结构的使用性能。南水北调工程中渡槽建设任务量大, 渡槽的过水流量、水深及水荷载均很大, 其规模居于世界前列, 小跨径、普通的结构形式已不适应其建设规模及要求, 因此, 作为跨越河流等的渡水建筑物, 这种大跨预应力混凝土梁式渡槽在南水北调水利工程中占有重要的地位^[2]。预应力混凝土梁式渡槽在某时刻的总变形由预应力产生的上拱值(f_p)、构件自重产生的挠度(f_g)以及水荷载产生的挠度(f_w)3部分组成, 即:

$$f = -f_p + f_g + f_w = f_0 + f_w \quad (1)$$

式中, f_0 称为上拱度。若 $f_0 > 0$, 则表明在恒载作用下结构不产生上拱, f_0 即为恒载作用下的挠度; 若 $f_0 < 0$, 则表明在恒载作用下结构会有上拱。在工程中, 这方面的变形问题可以分成两类。一类是指在截面高度限制条件下, 因恒载所占比重较大而产生的过大挠度($f_0 > 0$)。此时为了不影响结构的使用性能或保持原有的设计线型, 通常在梁预制阶段使其有适当的反拱以减小恒载作用下的挠度; 第二类问题是指在高度限制条件下, 采用全预应力混凝土, 且恒载所占比重相对较小, 则在使用阶段有可能产

生较大的上拱度。这种上拱度甚至会由于混凝土的徐变作用而与时俱增^[3], 特别是跨度较大的装配式渡槽, 在预张拉阶段构件自重很小, 且预应力钢筋的孔道对截面削弱较多, 而预应力值很大, 可产生很大的上拱度。另外, 上拱度随张拉龄期的不同而有较大差异, 这里有钢筋应力松弛和混凝土徐变的影响, 更有混凝土弹性模量随时间变化的影响^[4]。因此, 设计、施工中必须慎重确定渡槽的上拱度, 控制各片梁的初张拉龄期, 并结合荷载产生的向下挠度和合理控制预加力来避免产生过大的上拱度。本研究结合理论分析, 探讨上拱度的预测以及控制方法, 期为大跨预应力混凝土梁式渡槽的设计与施工提供参考。

1 挠度计算的一般公式

预应力混凝土梁式渡槽挠度由两部分组成: 一部分是由于预应力钢筋合力产生的上拱度; 另一部分是由于荷载产生的挠度。两者叠加即是挠度的最终值。

由于预应力混凝土梁式渡槽(全预应力)在使用荷载作用下不开裂, 构件处于弹性工作阶段^[5], 故无论是预加应力引起的上拱度计算, 还是由荷载产生的挠度计算, 都可用结构力学的一般方法进行计算, 其公式为:

$$f = \int_0^L \frac{M_p M}{B} dx \quad (2)$$

* [收稿日期] 2003-11-19

[作者简介] 季日臣(1969-), 男, 山西朔州人, 副教授, 在职博士, 主要从事水工结构研究。

式中, M_p 为预加力合力或荷载作用下的弯矩值; \bar{M} 为单位力作用引起的渡槽计算截面处的弯矩值; B 为预应力受弯构件的短期刚度, 对于不出现裂缝的构件, $B = 0.85 E_c I_0$, 其中 E_c 为混凝土的弹性模量, I_0 为预应力混凝土换算截面的惯性矩。

2 预应力产生的上拱度

预加应力产生的上拱度由 3 部分构成, 即传力锚固时的上拱度 f_{p_i} 、预应力损失引起的挠度变化 f_{p_1} 和混凝土徐变引起的挠度变化 f_{p_2} 。

2.1 传力锚固时的上拱度 f_{p_i}

设传力锚固时各截面的预应力合力均为 N_p (应扣除摩擦损失、锚头变形和钢丝回缩引起的预应力损失以及混凝土弹性压缩引起的损失), 如力筋重心按简单抛物线分布, 则偏心距 e_x (距支座为 x 的截面处) 的计算方程为:

$$e_x = 4e_0 \left(\frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2} \right) \quad (3)$$

式中, e_0 为力筋重心在跨中截面的偏心距; L 为渡槽的计算跨径。

预加力引起的弯矩 M_p 沿梁长呈二次抛物线分布, 跨中单位力作用时的弯矩为 \bar{M} 。故传力锚固时预应力所引起的上拱度 f_{p_i} 可直接利用式(2)计算。即

$$f_{p_i} = \int_0^L \frac{M_p \bar{M}}{B} dx = \int_0^L \frac{e_x N_p \bar{M}}{0.85 E_c I_0} dx = \frac{5}{48} \frac{N_p e_0}{0.85 E_c I_0} L^2 \quad (4)$$

式中, I_0 为预应力混凝土换算截面的惯性矩。

2.2 预应力损失引起的挠度变化 f_{p_1}

传力锚固后, 由于混凝土的收缩、徐变及力筋的松弛等, 产生的预应力损失使预应力 N_y 减少, 其引起的挠度变化 f_{p_1} 为

$$f_{p_1} = \int_0^L \frac{(N_p - N_{p_1}) e_x \bar{M}}{0.85 E_c I_0} dx = f_{p_i} - f_{p_1} \quad (5)$$

式中, N_p 为传力锚固时预加应力的合力; N_{p_1} 为扣除全部应力损失后的有效预加应力的合力; f_{p_1} 为

N_{p_1} 产生的上拱度, 可按比例求得 $f_{p_1} = \frac{N_{p_1}}{N_p} f_{p_i}$ 。

2.3 混凝土徐变引起的挠度变化 f_{p_2}

徐变具有双重作用, 一方面, 徐变使预应力降低而导致上拱度减少; 另一方面, 混凝土徐变使构件变形持续增长, 直接加大了原先的上拱度。通常后者

的作用占主导地位。因此, 工程中结构的上拱度一般将随时间逐渐增加。如果近似地认为徐变可以在不变的预张力作用下发生, 且该力等于初始张拉力与最终张拉力的平均值, 挠度的变化可近似地按下式计算

$$f_{p_2} = \int_0^L \frac{M}{0.85 E_c I_0} \left(\frac{N_p + N_{p_1}}{2} \right) \frac{e_x}{0.85 E_c I_0} dx = \frac{f_{p_i} + f_{p_1}}{2} \quad (6)$$

式中, μ 为混凝土徐变系数的最终值, 与加载龄期有关, 设计时取 $\mu = 2.03 \cdot 0^{[6]}$ 。

2.4 预应力产生的上拱度 f_p

上拱度的计算公式为:

$$f_p = -f_{p_1} + (f_{p_i} - f_{p_1}) - \frac{f_{p_i} + f_{p_1}}{2} = -f_{p_1} + \left(\frac{f_{p_i} + f_{p_1}}{2} \right) \quad (7)$$

由于收缩、松弛和徐变的组合作用, 预张力逐渐减小, 徐变正是在这一条件下发展变化的, 因而如果想得到更高的精度, 就可以采用时段递增法来进行计算, 即将历经的时间划分成一系列时段 t , 实际计算各时段内发生的递增变化值, 并用总和法来求得任意历经时间 t 时的预应力上拱度 f_{p_t} 。这种逐步逼近的方法虽然仍是近似的, 但能够通过减小所考虑时段的步长, 从而增加时段的数量, 来提高精度至任意所希望的程度^[7]。在此情况下, 式(6)可重新表示成:

$$f_{p_t} = -f_{p_1} - \int_0^t [(t_n,) - (t_{n-1},)] f_{p_{n-1}} \quad (8)$$

式中, $f_{p_{n-1}}$ 为某一时段起始时的预张拉应力所引起的挠度; $(t_{n-1},)$, $(t_n,)$ 分别为某一时段起始或终止时的徐变系数, 当缺乏徐变试验数据或没有试验资料时, 需要对 $(t,)$ 进行预测或估算。对此国内的研究成果尚不多, 而国外已提出不少预测方法, 其中最具有代表性的是 CEB-FIP(1972) 预测方法, 表达式为:

$$(t,) = K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_t \quad (9)$$

式中, K_b 为混凝土配合比修正系数; K_c 为环境湿度的修正系数; K_d 为加荷时混凝土龄期的修正系数; K_e 为构件尺寸的修正系数; K_t 为持荷时间的修正系数。有关参数的具体取值见文献[8]。

计算时, 任一时段终止时的预张拉力 N_{p_n} , 等于该时段起始时的预张拉力 $N_{p_{n-1}}$ 减去收缩、徐变和

松弛产生的损失;前一时段终止时的预张拉力,就作为后一时段预张拉力的起始值。尚需指出的是,利用式(8)计算时,必要的话还可以计及混凝土弹性模量 E_c 随时间的变化值^[9]。

3 构件自重产生的挠度

构件自重产生的挠度 f_g 可用前述的结构力学公式(1)进行计算。考虑混凝土徐变的影响,其跨中挠度为

$$f_g = f_{gi}(1 + \quad) = \frac{5}{48} \frac{M_g L^2}{0.85 E_c I_0} (1 + \quad) \quad (10)$$

式中, M_g 为自重产生的跨中弯矩。

4 水流荷载作用前(空槽情况下)的总挠度

水流荷载作用前的总挠度 f 为上列各项挠度的总和,计算公式为

$$f = - [f_{p1} + (\frac{f_{pi} + f_{p1}}{2})] + f_{gi}(1 + \quad) \quad (11)$$

此外,由于太阳光的辐射,上下缘产生温差,也会引起槽体变形。

5 算例分析

5.1 原始资料

南水北调工程中有某预应力混凝土筒支梁渡槽,其单跨跨长为 40 m,宽度为 5.2 m,高度为 3.57 m,设计水深为 2.5 m,槽体断面为矩形,由底板、侧板、翼缘组成。梁采用 C50 混凝土,弹性模量 $E_c = 35\ 000\ \text{MPa}$, 级普通钢筋,预应力筋采用 270 级高强度低松弛钢绞线,公称直径 15.24 mm,公称面积 $140\ \text{mm}^2$,弹性模量 195 GPa,标准强度 1 860 MPa,控制应力 1 385 MPa。7 根钢绞线为 1 束,预应力锚具采用 HVM 系列锚具,同时采用相应吨位配套千斤顶,预应力钢束张拉时实行张拉吨位和引伸量双向控制,预应力管道采用预埋金属波纹管成孔,预应力钢绞线共计 140 根合 $19\ 600\ \text{mm}^2$,截面惯性矩 $3.679\ \text{m}^4$,预应力合力作用点至截面重心轴的距离为 1.21 m,混凝土徐变系数取 2.0,渡槽自重为 65 kN/m。

5.2 计算结果

(1) 预加应力的合力

传力锚固时预加应力的合力:15 883 kN;

扣除全部应力损失后的有效预加应力的合力:13 440 kN;

(2) 预应力产生的上拱度

传力锚固时预应力产生的上拱度:27.8 mm ();

预应力损失引起的挠度变化:4.21 mm ();

混凝土徐变引起的挠度变化:51.3 mm ();

预应力产生的上拱度:74.8 mm ();

(3) 渡槽自重产生的挠度:53.7 mm ();

(4) 空槽情况下的总挠度:21.1 mm ();

(5) 满槽情况下的总挠度:14.7 mm ()。

6 上拱度的控制

6.1 采用部分预应力混凝土

降低预应力将直接减小结构的初始上拱度,具有较小的上拱度是部分预应力混凝土结构的最主要优点之一。

6.2 施工过程中上拱度的控制措施

1) 制槽底座预留反拱

在制槽底座预留反拱,由跨中向两端按二次抛物线过渡,以抵消一部分上拱值。但需考虑现场混凝土的实际弹性模量大于设计弹性模量而引起上拱度的变小^[10]。

2) 预应力施工的有效控制

分两阶段施加预应力,即初张拉和终张拉,且两端同步张拉。这样由初张拉引起混凝土徐变而造成的钢绞线预应力损失,可以通过补拉得到补偿,而补拉时混凝土龄期较长,徐变的影响较小。精确测定各项预应力损失,终张拉前,试验确定管道、锚口摩阻损失,合理调整张拉控制应力,确保钢绞线的有效应力能够满足设计要求。

3) 混凝土徐变的控制

严格控制预应力的施加时间,施加全部预应力时必须同时满足下述条件:混凝土的弹性模量、强度达到或超过设计值,混凝土的龄期达到或超过设计允许的张拉龄期。因此,可掺用早强减水剂,提高张拉时混凝土的强度和弹性模量。

在潮湿的环境下,混凝土的徐变值小。因此在施工过程中应加强对混凝土的养护和覆盖,保证空气湿度相对稳定。

水灰比越大,混凝土的徐变值越大,所以要严格控制用水量,满足设计要求的前期应尽可能降低水灰比。

4) 混凝土弹性模量的控制

无论是预加应力,还是混凝土收缩徐变或是槽体自重引起的挠度,都与混凝土弹性模量有关,而提高混凝土粗骨料的强度,减少砂率、水灰比可有效提高混凝土的弹性模量。

7 结论与建议

1) 预应力、恒载、弹性模量以及混凝土的收缩和徐变等是影响上拱度的主要因素。

2) 上拱度的预测主要取决于混凝土徐变的合理估算。

3) 上拱度可采用时段递增法进行精确计算。

4) 上拱度的控制应采用降低预应力和减小徐变措施相结合的综合方法进行。

5) 预应力混凝土渡槽上拱度的合理预测,还应在综合国内外试验资料的基础上,提出符合我国国情的徐变预测方法,包括利用短期徐变实测数据来预报长期徐变。而影响混凝土徐变的因素很多,徐变值在理论上具有随机性。因此徐变预测还应该结合概率方法。

[参考文献]

- [1] 周 氏. 水工钢筋混凝土结构学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [2] 赵顺波,陈文义,黄和法,等. 南水北调中线工程预应力混凝土渡槽叠合结构设计研究[J]. 人民黄河,1999,21(2):35-37.
- [3] 周建民. 预应力混凝土梁上拱度的预测及控制[J]. 上海铁道大学学报,1997,18(12):32-37.
- [4] 张谢东,林 清,杨吉新,等. 预应力混凝土梁上拱度实验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2003,27(3):322-325.
- [5] 李 乔. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:铁道出版社,2001.
- [6] 刘玉清,李金权. 40 m 后张法预应力混凝土 T 形公路梁预拱度设计[J]. 铁道建筑,2001,26(8):28-32.
- [7] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [8] 惠荣炎. 混凝土的徐变[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
- [9] 亢景付,彭小平. 预应力施加过程中混凝土的徐变变化[J]. 天津大学学报,2003,36(2):210-214.
- [10] 赵建龙,罗玉华,王建平. 现场预制后张法预应力混凝土 T 形铁路梁的上拱度控制[J]. 铁道建筑技术,2001,17(S1):46-48.

Analysis and control on the deflection upwards of large prestressed concrete aqueduct

JI Ri-chen^{1,2}, CHEN Yao-long¹, LI Yu¹

(1 College of Water Resource and Hydroelectricity, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The main factors influencing the deflection upwards are prestressed force, dead load, concrete elasticity modulus, shrinkage and creep through analysis of the deflection upwards of large prestressed concrete aqueduct. The prediction of the deflection upwards lies on rational estimate of concrete creep. The measures to control deflection upward are brought forward in order to prevent deflection upwards excessively and causing failure of service. The countermeasure is the combination of reducing prestressed force and creep of concrete.

Key words: prestressed concrete; aqueduct; deflection upwards