

# 宽底板预应力混凝土桥梁横向应力分析

吴 迅, 李君凤, 王艺桥

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:** 通过对预应力混凝土桥梁横向应力分析, 发现对底板比较宽的箱形和槽形截面的预应力混凝土梁, 其底板不但受到预应力作用, 还要承受一定的横向弯矩, 在横向没有预应力的情况下容易出现危害较大的纵向裂缝。但我国规范 JTG D62—2004 以及 TB10002.3—2005 对混凝土构件的横向应力并没有明确的规定, 国外规范对此考虑的也不完全, 但有借鉴之处。最后建议国内外规范对预应力混凝土构件的横向应力作出明确规定, 保证桥梁的正常使用。

**关键词:** 预应力混凝土; 横向预应力; 纵向裂缝; 规范

**中图分类号:** U 448.36

**文献标识码:** A

## Transverse Stress Analysis of Prestressed Concrete Bridge

WU Xun, LI Junfeng, WANG Yiqiao

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

**Abstract:** For the prestressed concrete girder with broad bottom slab such as box girder or trough girder, if there is no transverse prestressing, harmful longitudinal cracks may appear because the concrete of bottom slab is subjected to longitudinal prestressing and transverse bending in the biaxial stress condition of tension and compression. No regulation about the transverse prestressing is specified in the Professional Standard of the People's Republic of China JTG D62-2004 and TB10002.3-2005, and also the corresponding codes in other countries are immature in this regard. An improved code is proposed to make a definite regulation to ensure the bridge's safety.

**Key words:** prestressed concrete; transverse prestressing; longitudinal crack; code

目前桥梁结构分析以及设计计算中, 纵向裂缝问题一直很少受到人们的关注。在某轨道交通预应

力混凝土槽形梁静载试验中, 活载刚刚加载的时候, 纵向裂缝就先于横向裂缝出现, 随着活载的增加, 纵向裂缝的数量以及宽度都不断增加。而且桥梁中的纵向裂缝并不仅仅出现在试验中, 最近某预应力箱形刚构桥施工到合龙阶段, 在张拉预应力筋时, 箱梁底部也出现了纵向裂缝。这些裂缝开裂较深, 出现在梁底板上的纵向截面最薄弱处, 即出现在纵向预应力钢筋管道处, 并顺着预应力管道延伸。据统计, 没有设横向预应力的预应力箱梁桥大都有纵向开裂情况。但是国内外对纵向裂缝的研究分析很少, 笔者就预应力混凝土的横向应力及其引起的纵向裂缝进行分析。

## 1 对预应力构件横向应力和纵向裂缝的分析

预应力混凝土桥梁结构是受力复杂的空间结构, 按照结构的实际情况进行力学分析比较繁琐, 必须作一些简化。过去的手算以及目前将桥梁结构简化成平面杆系结构来计算, 解决了预应力混凝土结构的纵向配筋以及构造配筋问题, 但是对于某些预应力桥梁并不合理。桥梁结构中底板较宽较薄时, 如上述出现纵向裂缝的槽形梁和箱梁, 若横向没有预应力筋, 张拉纵向预应力并加载后, 由于纵向预应力的作用, 使得梁底板混凝土在纵向受压且梁体在横向要承受一定的弯矩, 横向弯矩使得梁底板混凝土横向受拉。如忽略扭转及箱梁的扭转变形, 则梁底板混凝土处在二轴拉/压状态下, 如图 1, 其中  $M_1$  和  $N$  为由预应力和活载引起的纵向弯矩和压力,  $M_2$  为由活载引起的横向弯矩,  $\sigma_1, \sigma_3$  为应力。

《钢筋混凝土原理和分析》<sup>[1]</sup>指出: 混凝土二轴拉/压状态的抗压强度  $f_3$  随另一方向拉应力的增大

而降低. 同样的抗拉强度  $f_t$  随压应力的增大而减小. 在任意应力比例 ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) 情况下, 混凝土的二轴拉/压强度均低于其单轴抗拉压强度, 即

$$|f_3| \leq f_c, f_1 \leq f_t \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为单轴抗压强度;  $f_t$  为单轴抗拉强度.

二轴拉/压试件破坏时的峰值应变 ( $\epsilon_{1p}, \epsilon_{3p}$ ) 均随拉应力  $f_1$  或应力比 ( $|\sigma_1/\sigma_3|$ ) 的增大而迅速减小.

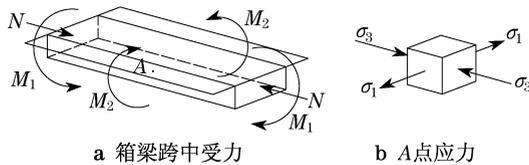


图1 箱梁底板受力分析

Fig.1 Stress analysis of the bottom slab of box girder

《GB 50010—2002 混凝土结构设计规范》<sup>[2]</sup> 附录 C 中图 C.3.2(即图 2)给出了以主应力(相对值)表达的混凝土二轴强度包络图. 3 个象限的折线分别表示二轴拉-拉、拉-压、压-压应力状态. 所以, 这时纵向抗压强度随着横向拉应力的增大而迅速降低, 混凝土横向抗拉强度也随着纵向压应力的增大而迅速减小, 这时很容易出现纵向裂缝.

由某轨道交通预应力混凝土槽形梁静载试验和

空间计算可知, 梁在横向也确实有很大的拉应力出现. 图 3 表示经过空间计算槽形梁在正常使用阶段活载加载(跨中弯矩最大)的工况下混凝土应力图. 可见此时在槽形梁的底部纵向应力为压应力, 而横向拉应力最大值已经达到 4 MPa, 而 C50 混凝土的标准值为 2.65 MPa. 按照计算结果, 混凝土在正常使用阶段或者之前就会在纵向出现裂缝. 试验中在正常营运状态下刚刚开始加载不久就由于横向拉应力过大首次出现了纵向裂缝. 随着荷载的增加, 试验梁底板多处出现纵向开裂, 当裂缝宽度达到 0.03~0.04 mm 时, 正截面还未开裂.

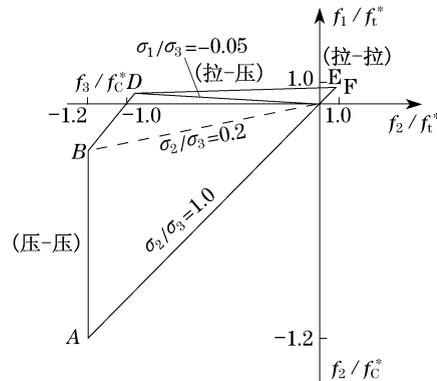


图2 混凝土的二轴强度包络

Fig.2 Concrete strength under the biaxial stress condition

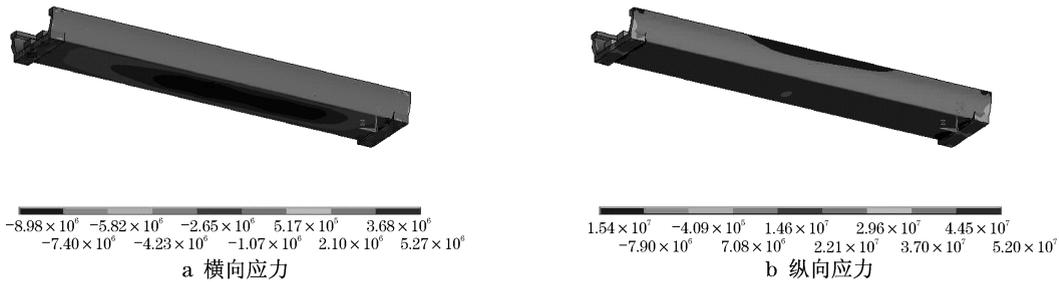


图3 槽形梁正常使用阶段应力

Fig.3 Stress of trough girder on serviceability limit stage

对于预应力箱梁和槽形梁, 没有设横向预应力的情况下虽然都容易出现裂缝, 但是原因侧重点稍有不同, 且对槽形梁更为不利.

首先, 在桥面宽度  $B$  一定的情况下, 槽形梁底板宽度相对于箱梁更宽, 假设恒活载一定, 则槽形梁承受的横向弯矩较大.

其次, 箱梁的横向弯矩由上下底板共同承受, 上底板受压, 下底板受拉. 槽形梁只有下底板, 横向弯矩全由下底板承受, 底板上部受拉, 下部受拉, 拉压区中心距离很小, 在横向弯矩一定的情况下, 槽形梁的下翼缘受到的拉应力更大(见图 4).

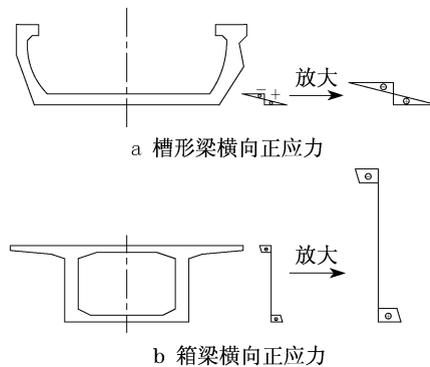


图4 底板横向正应力

Fig.4 Normal stress of the bottom slab

可见箱梁的横向弯矩对纵向裂缝的危害不大,故箱梁的纵向裂缝主要是由纵向预应力引起的.而槽形梁由横向弯矩引起的底板下翼缘的拉应力要相对大很多,成为引起纵向裂缝的主要原因.下翼缘较大的拉应力也使得槽形梁受力更为不利,根据对上述槽形梁的试验研究,在没有设横向预应力的槽形梁中,其纵向抗裂性很难满足要求.

## 2 纵向裂缝的危害

使用预应力构件不仅为了充分利用混凝土较强的抗压能力,减小构件体积,减轻自重,而且也为了减少甚至避免裂缝的产生,保护预应力钢筋,防止锈蚀,其性能优于钢筋混凝土结构.混凝土的抗拉强度很低,在不大的荷载作用下就可能产生裂缝.裂缝可根据其形态、分布情况和规律性等可分为横向裂缝、纵向裂缝、斜裂缝等.裂缝不仅影响结构的外观,而且造成使用者的不安.从结构本身来看,某些裂缝的发生或发展,将影响结构的使用寿命.上述裂缝中,纵向裂缝的影响要比横向裂缝和斜面裂缝的影响更大.

首先,纵向裂缝是沿纵向预应力筋开裂的,裂缝一般比较深且长,延伸至管道,导致有害介质很容易达到结构中最重要纵向预应力钢筋,使得预应力筋被腐蚀.

其次,目前预应力混凝土桥梁结构中,一般采用高强钢丝和钢绞线作为预应力筋.但是预应力混凝土中的高强钢丝和钢绞线直径小,锈蚀后截面面积损失相对较大,在高应力下容易发生应力腐蚀而产生脆断.应力腐蚀是一种腐蚀介质和拉应力共同作用下钢筋产生晶间或穿晶断裂的现象.这种断裂所造成的损失从钢筋表面不容易清楚地看出.加速应力腐蚀的条件有:使用易腐蚀的钢材;钢筋承受高拉应力;存在有氧化效应的腐蚀剂<sup>[3]</sup>.可见纵向裂缝对使用钢丝钢绞线的预应力构件影响很大.

再次,预应力混凝土中的纵向裂缝不像横向裂缝那样,在使用阶段的大多数情况下是闭合的,纵向裂缝长时间存在,增加了它的危害性.

裂缝对钢筋锈蚀影响的观点中有人认为<sup>[3]</sup>:与受力钢筋正交或斜交的横向裂缝对钢筋锈蚀的影响很小,无需限制,危害结构安全的裂缝是顺钢筋方向的纵向裂缝.纵向裂缝处的钢筋锈蚀和体积膨胀使混凝土保护层剥落,钢筋的暴露又加快了锈蚀的速度,使钢筋截面进一步减小,导致结构破坏.这种观

点是从钢筋结构的工程调查中得出来的,虽说没有区分结构所处的环境是普通钢筋混凝土还是预应力混凝土,不考虑横向裂缝的影响是不合理和不全面的.但是由此可以看出纵向裂缝的危害性,特别是对桥梁耐久性的影响.所以,对纵向裂缝应该有更加严格的规定.

## 3 我国规范

### 3.1 设计规范分析

根据《JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[4]</sup>规定:预应力混凝土构件可根据桥梁使用和所处的环境的要求,进行下列构件设计:

(1) 全预应力混凝土构件.此类构件在作用短期效应组合下控制的正截面的受拉边缘不允许出现拉应力(不得消压).

(2) 部分预应力混凝土构件.此类构件在作用短期效应组合下控制的正截面的受拉边缘可出现拉应力,当拉应力小于限值时,为A类预应力混凝土构件;当拉应力超过限值时,为B类混凝土构件.

跨径大于100 m桥梁的主要受力构件不宜进行部分预应力混凝土设计.

公路桥涵的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求,采用作用的短期效应组合、长期效应组合或短期效应组合并考虑长期效应组合的影响,对构件的抗裂、裂缝宽度和挠度进行验算,并使各项计算值不超过本规范规定的各相应限值.

预应力混凝土受弯构件应按下列规定进行正截面和斜截面抗裂验算.验算内容见表1.表中, $\sigma_{st}$ 为在作用短期效应组合下构件抗裂验算边缘混凝土的法向拉应力; $\sigma_{pc}$ 为扣除全部预应力损失后的预应力在构件抗裂验算边缘产生的混凝土预压应力; $f_{tk}$ 为混凝土的抗拉强度标准值; $\sigma_{lt}$ 为在荷载长期效应组合下构件抗裂验算边缘混凝土的法向拉应力; $\sigma_{tp}$ 为有作用短期效应组合和预应力产生的混凝土主拉应力.同时对预应力B类构件的裂缝宽度也进行了限定(见表2),最大裂缝宽度 $W_{rk}$ 的计算公式为

$$W_{rk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left( \frac{30 + d}{0.28 + 10\rho} \right) \quad (2)$$

式中: $C_1, C_2, C_3$ 为系数; $\sigma_{ss}$ 为有荷载短期效应组合引起的开裂截面纵向受拉钢筋的应力; $E_s$ 为普通钢筋的弹性模量; $d$ 为纵向受拉钢筋直径; $\rho$ 为纵向受拉钢筋配筋率.

表1 混凝土受弯构件验算内容

Tab.1 Content of concrete bending structure

抗裂验算截面	验算应力	混凝土构件类别	验算的作用效应组合	验算内容
正截面	正截面混凝土的拉应力	全预应力预制	短期	$\sigma_{st} - 0.85\sigma_{pc} \leq 0$
		全预应力纵向分块	短期	$\sigma_{st} - 0.80\sigma_{pc} \leq 0$
		A类预应力	短期	$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0.7f_{tk}$
		A类预应力	长期	$\sigma_{lt} - \sigma_{pc} \leq 0$
斜截面	斜截面混凝土的主拉应力	全预应力预制	短期	$\sigma_{tp} \leq 0.6f_{tk}$
		全预应力现场浇筑	短期	$\sigma_{tp} \leq 0.4f_{tk}$
		A类和B类预应力预制	短期	$\sigma_{tp} \leq 0.7f_{tk}$
		A类和B类预应力现场浇筑	短期	$\sigma_{tp} \leq 0.5f_{tk}$

表2 预应力B类构件最大裂缝宽度限值

Tab.2 Crack limit of B type of prestressed concrete  
mm

钢筋类型	I类和II类环境	III类和IV类环境
精轧螺纹钢	0.20	0.15
钢丝或钢绞线	0.10	不得进行带裂缝的B类构件设计

以上是对文献[4]中持久状况正常使用极限状态抗裂验算.在文献[4]中对持久状况和短暂状况构件的应力计算以及我国《TB10002.3—2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》[5]中对预应力混凝土构件的规定也只指出了纵向应力和主应力及相对应的裂缝的计算方法和它们的限值,这对于在横向没有设置预应力的预应力混凝土梁来说,不考虑横向弯矩以及横向应力是不合理的.对于底板比较宽、比较薄的预应力混凝土桥梁结构,按照我国规范进行验算有以下3项不合理之处:

(1) 只进行正截面和斜截面的抗裂验算而忽略了纵截面上的抗裂验算.这样对于底板比较宽、比较薄的预应力混凝土桥梁结构,预应力的设计优势没有完全体现出来.这种构件很容易在纵向开裂,而且多数在横向以及斜裂缝开裂之前出现,这时纵向裂缝已经对桥梁结构的持久状况[4]的耐久性造成了很大影响,再去进行正截面以及斜截面上的抗裂验算,即使全部通过,也不能说构件的持久状况设计符合要求.

(2) 对纵向裂缝宽度控制不够严格.由于纵向裂缝对桥梁的耐久性影响较大,即使较小的裂缝也会造成很大的危害,对纵向裂缝的控制应该更加严格.若按照对预应力B类构件的裂缝宽度允许值进行控制,将难以满足使用要求.

(3) 纵向裂缝是在二轴拉/压状态下发生的,此时的混凝土抗拉强度比单轴受拉以及二轴拉/拉状态下要低很多,按照现有规范对截面拉应力允许值

进行验算,是不合理的.

### 3.2 其他规范

《JTG H11—2004 公路桥涵养护规范》[6]在梁桥的检查与评定中,已明确规定预应力混凝土梁顺筋裂缝宽度不得大于0.2 mm,在实际铁路工程中也有认为预应力梁一旦出现顺筋裂缝就是质量事故.桥涵设计中对裂缝的限值本应该比养护规范中的限值更加严格,故我国的桥涵设计规范应该对纵向裂缝限值提出明确的规定.

## 4 国外规范参考分析

### 4.1 美国规范

经总结美国规范[7]对预应力混凝土构件的设计,按照以下2个方面考虑:

(1) 在按弯曲和轴向力效应设计的一般规定假设中,如果混凝土是不受侧限的,在混凝土受压最外纤维处的最大可用应变不大于0.003;如果混凝土受到侧限,经验证,可采用大于0.005的最大可用应变.

(2) 对于在使用极限状态下损失发生后的全预应力构件,预压受拉区中混凝土的横向拉应力不得大于 $0.25\sqrt{f'_c}$  MPa,其中, $f'_c$ 为规定的混凝土28 d的抗压强度, $0.25\sqrt{f'_c}$ 相当于我国规范的 $0.25\sqrt{f_{ck}}$ ,其中, $f_{ck}$ 为混凝土的抗压强度标准值,对于C50混凝土来说即为1.4 MPa.部分预应力构件按照全预应力构件规定的那样限制压应力,可以在预压受拉区中有裂缝.

美国规范在整体设计中以混凝土的横向应变来控制压应力,虽说是假设,却是整体计算的前提,超过这个应变则为不合理.横向应变既包括了纵向的压应力影响,也包括了横向压应力影响.在具体规定中,对全应力的横向应力提出了允许值,但是这个允许值和纵向拉应力的允许值相同.对部分预应力构件提出了整体的裂缝控制,这可能使设计人员根据正截面裂缝和斜截面裂缝的宽度允许值来控制纵截面裂缝.规

范中没有区别三者的危害,这是不合理的。

#### 4.2 英国规范

英国规范<sup>[8]</sup>也将预应力混凝土构件分为3类:不允许出现拉应力构件、允许出现一定拉应力但不允许出现裂缝构件以及允许出现一定拉应力也允许出现有限值裂缝的构件。设计裂缝的宽度规定得很细,根据环境不同分为4类,而且相对我国规范的裂缝宽度限制更加严格。但是对构件的设计验算中,没有提及横向应力以及纵向裂缝,也没有提及横向应力的设置问题。

#### 4.3 欧洲规范

欧洲规范<sup>[9]</sup>在混凝土结构设计中并没有明确钢筋混凝土和预应力混凝土的设计区别,只是作了统一规定。在正常使用的开裂极限状态中规定:通过计算来检验有关开裂的各种不同极限状态主要是针对与纵向作用的各种效应和显著垂直于纵向钢筋方向开裂的任何裂缝。同时在特殊情况中指出:斜截面裂缝是以合适的构造布置剪切配置来抗御的;平行于纵向钢筋的裂缝是特别危险的,应当采用合适的构造来避免,并且限制粘结应力或局部压力。

可见欧洲规范是在控制不损坏结构的正常使用和耐久性时,用构造配筋来避免斜裂缝和纵向裂缝的,同时明确指出了纵向裂缝的危害。但是它对梁裂缝的控制主要针对的是垂直于纵向钢筋的横向裂缝,对斜裂缝以及纵截面裂缝的控制只是基于抗剪抗扭的基础上,并没有考虑预压应力和横向弯矩的影响。

#### 4.4 小结

国外规范对横向应力和纵向裂缝虽然有所提及,但是都不明确,没有进行全面的分析。但是美国规范中看到预应力混凝土的三维性,指出了要对横向拉应力进行控制,欧洲规范指出了纵向裂缝的危害性,这都可以借鉴。

## 5 结论

根据对纵向裂缝的分析比较,并参考国内外规范,对我国规范提出以下建议:

(1) 对于下部宽而薄(箱梁、槽形梁等)的预应力结构除了计算纵向应力以及主应力,还要计算横向应力,对构件横向抗裂性进行验算。由于影响构件横向应力的因素比较多,且近年来空间计算软件发展比较快,建议规范指出需对上述结构进行空间应力计算,保证桥梁正常使用。

(2) 对必须设置横向预应力的情况进行说明。

由于混凝土梁底板的裂缝不能由普通钢筋来避免,对于不允许出现裂缝的混凝土梁底板,必须设置横向预应力。若由于构件几何特征设置横向预应力有困难,则要严格控制其裂缝宽度。

(3) 提出预应力混凝土结构的横向应力的允许值。由于此处混凝土处二轴拉压状态下,建议横向拉应力的允许值适当减小。

(4) 提出允许出现裂缝的部分预应力B类构件的纵向裂缝宽度允许值,由于纵向裂缝的危害较大,建议允许值适当减小,纵向裂缝允许值的大小可用名义拉应力来表示。

#### 参考文献:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.  
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete's principle and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.  
Ministry of Construction of PRC. GB50010—2002 Concrete structure design code [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [3] 赵国藩,李树瑶. 钢筋混凝土结构的裂缝控制[M]. 北京:海洋出版社,1991.  
ZHAO Guofan, LI Shuyao. Crack control of cracks of the reinforced concrete structure[M]. Beijing: Ocean Press, 1991.
- [4] 中交公路规划设计院. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.  
CCCC Highway Consultants. JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China's Communications Press, 2004.
- [5] 中铁工程设计咨询集团有限公司. TB10002.3—2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.  
China Railway Engineering Consultants Group. TB10002.3—2005 Code for design on reinforced and prestressed concrete structure of railway bridge and culvert [S]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [6] 陕西省公路局,长安大学. JTG H11—2004 公路桥涵养护规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.  
Shaanxi Highway Bureau, Chang'an University. JTG H11—2004 Code for maintenance of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China's Communications Press, 2004.
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge design specifications SI units [S]. 3rd ed. Washington D C: AASHTO Publications Staff, 2004.
- [8] Civil Engineering and Building Structures Standards Committee. BS5400—4—1990 Steel, concrete and composite bridges Part 4: Code of practice for design of concrete bridges [S]. 3rd ed. London: British Standards Institution, 1990.
- [9] European Committee for Standardization. Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1992.