

论预应力混凝土梁桥的裂缝

楼庄鸿

摘要:讨论了4种裂缝,即主拉应力斜裂缝、垂直裂缝、纵向裂缝以及底板混凝土劈裂,详细分析其原因,包括设计原因与施工原因,提出防止措施及加固措施。

关键词:预应力 主拉应力 斜裂缝 垂直裂缝

从理论上来说,预应力混凝土梁桥在运营阶段,是不应该存在裂缝的。全预应力和部分预应力A类构件,或者是不出现拉应力,或者是出现小于混凝土容许拉应力的拉应力,当然不应开裂;即使是部分预应力B类构件,在最不利荷载组合时可能出现裂缝,但在卸载后裂缝即闭合。

但是,从实际运营的预应力混凝土梁桥来看,由于设计和施工的原因,相当一些桥梁存在这样或那样的裂缝,甚至有的桥梁在未承受活载的自重阶段,即出现裂缝。因此,有必要讨论一下预应力混凝土桥梁裂缝产生的原因和控制措施。

常见的裂缝,有腹板斜裂缝、垂直裂缝、纵向裂缝以及底板混凝土保护层劈裂等,以下分别叙述。

1 斜裂缝

斜裂缝也称主拉应力裂缝,见图1,这是预应力混凝土梁桥中出现最多的一种裂缝。往往首先发生在剪应力最大的支座附近,与梁轴线成 $25^\circ \sim 50^\circ$,并随着时间推移,不断向受压区发展。裂缝数也会增加,裂缝区逐渐向跨中方向扩展。

斜裂缝一旦出现,就应注意观测。如果斜裂缝限在受拉区且已趋于稳定,不再发展,则可以容忍;如果裂缝长度发展至受压区,或裂缝区迅速向跨中发展,则应认为是严重的,必须加固处理。

1.1 斜裂缝产生的原因

1.1.1 设计原因

在预应力混凝土桥梁的设计中,一般对于正截面强度是重视的,而对于斜截面强度或者主拉应力,有时却重视不够,或者遗漏了最不利截面,

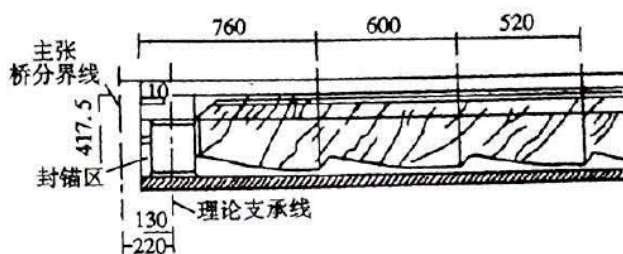


图1 斜裂缝

或者缺乏最不利组合的工况。例如在某特大跨径的大桥设计中,有一个截面的主拉应力计算值已超过了规范规定的容许值,结果斜裂缝就在该截面前后的梁段范围内出现,呈 45° ,有148条腹板裂缝,其中49条内外贯通。

边跨现浇段不设弯起钢束,也是边跨出现斜裂缝的主要原因之一。由于边跨梁段梁高较小,反力较大,如果靠顺桥向和竖向预应力来控制主拉应力,往往因竖向预应力损失过大而难以奏效。因此边跨梁端必须布置弯起钢束,这已成为共识。

至于主跨(或中跨)是否需设弯起束或连续束来克服主拉应力,目前还存在不同的看法。我们的认识是,在主跨梁的跨中区段,自重剪力很小,在大跨径变截面梁的情况下,从根部到 $L/4$ 区段,梁有较大的高度,竖向预应力损失较小,完全可以通过用顺桥向和竖向预应力,控制主拉应力在允许的范围内,既可以不设中跨弯起束,减薄腹板,方便施工;也可以避免如设弯起束,其分布角为 26° ,预应力空白区会延伸至腹板,导致靠近翼板肋腋的腹板出现主拉应力缝。虎门大桥辅航道桥为主跨270m的连续刚构,主跨未设弯起束和连续束,完全靠顺桥向和竖向预应力来控制主拉应力,至今已运营2年多,丝毫不存在主拉应力的

斜裂缝。无独有偶,刚建成的挪威跨径 298m 的连续刚构 Raftsundet 桥,主跨也不设弯起束。看来,这也是大跨径梁桥设计中的一种趋势。自然,在设计中要充分考虑到竖向预应力的损失,也要估计到实际主拉应力比设计值有可能增大的不利情况。那种把主跨(中跨)出现斜裂缝的主要原因归结为没有设弯起束,是不够正确的。

1.1.2 施工原因

由于模板安设粗糙,浇筑时走动,使腹板减薄,有的工地上实际腹板厚度比设计少 2cm,甚至减小 4cm,这种情况下,必然会导致出现斜裂缝。

有的工地对竖向预应力张拉重视不够,张拉吨位不足,甚至漏掉而未张拉,这样能不出现斜裂缝吗?还有的工地,虽然张拉了竖向预应力,但拖延很久才进行管道压浆,甚至根本没有压浆,导致竖向预应力筋锈蚀,或减少了竖向有效预应力,而出现斜裂缝。

有的桥在悬臂平衡挂篮浇筑时,由于未预压重以及浇筑顺序由里向外,出现了垂直裂缝,虽张拉预应力束,裂缝不可能闭合。尽管对一些较宽的缝进行了压浆处理,但较小的例如 0.1mm 及以下的缝,难以压浆。由于这些裂缝的存在,在剪力不变的情况下,剪应力急剧增大,由主拉应力 σ_1 计算公式

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

式中, σ_x 为顺桥向压应力; σ_y 为竖向压应力; τ 为剪应力。

由于 τ 的加大,使式中后一项加大,结果出现很大主拉应力,甚至成倍增长。其结果是,运营不多久,即出现主拉应力斜裂缝,而且发展较快。因此,必须精心施工,制订合理的施工工艺和顺序,要对挂篮进行压重,随着浇筑而逐步卸除压重,合理的浇筑顺序是由外向里,就可避免由于施工原因产生的垂直裂缝,进而避免由此原因出现的主拉应力斜裂缝。

1.2 斜裂缝的加固处理

已有不少大跨径梁桥,对斜裂缝进行了加固处理。其加固处理方式可概括如下:

(1) 压浆封闭 对缝宽 0.1mm 及以上的裂缝,采取压浆封闭,一般采用环氧或环氧砂浆。

(2) 粘贴钢板 钢板条与裂缝基本垂直,而且必须锚固在混凝土梁体内。

(3) 加厚腹板 加一层钢筋,与原腹板钢筋相连,并加厚腹板。

(4) 增加预应力筋 通过与原来的钢筋与梁体相连,在与裂缝垂直的方向,增设预应力筋。

上述(3)、(4)措施,往往用在裂缝密集的部位。

2 垂直裂缝

在预应力混凝土桥梁中,受弯的垂直裂缝比较少见,但有时还能见到。

2.1 垂直裂缝产生的原因

2.1.1 设计原因

设计中对于梁桥的正截面强度和应力,一般都很注意,但有时也会出现疏忽,导致实际有效预应力不足而出现垂直裂缝。

我们最近见到的一个桥梁设计,距径 35m 的预应力混凝土预制空心板,每板宽 1.5m,双室,简支安装,最终成为 3 孔一连的连续板。按部分预应力 A 类构件设计,预应力体系采用扁锚,中腹板上布 5 束,竖向放置并弯起。为了节省预应力束,致使梁自重挠度比施加预应力后的上拱度还大 7mm,即施加预应力后梁不会上拱,设计中梁体设向上跨中为 1.5cm 的预拱度,与一般采用的设向下预拱度不同。

这个设计在两个工地上采用,一个工地施工较粗糙,出现超重及内模走动、腹板厚度变动的情况,其台座是一次性的,台座两端有贯通横裂缝,未架设的边梁存在垂直裂缝,其中有一片较严重,缝宽有 0.2mm;梁也存在下挠,最大 4cm。

另一个工地施工工艺较细致,断面尺寸正确,表面光滑,其台座是多次重复使用的,处理较好,未出现裂缝。板已架设,且已封铰及浇筑连续段混凝土。在拟浇防撞栏时,发现梁体下挠,最大到 4cm。用吊车载人检查两片边梁,发现有垂直裂缝 40~50 条,缝宽最宽已达 0.3mm 以上,缝间距 20~50cm,其中 2/3 的裂缝长度已超过梁高一半。

分析其原因,设计原因是主要的,实际有效预应力严重不足。首先将扁锚竖放用作弯起束是错误的,各束在同一管道中互相挤紧,不仅仅是沿管道及弯起的摩阻损失,预应力损失很大,远远超过计算,张拉时延伸量也难以达到,这是主要原因。

其次,设计中预应力配置不足,梁体不上拱,

更何况预应力损失增大很多,梁体与台座粘结而不脱离。在施加梁体预应力时,梁体要压缩,而台座与梁底出现了摩阻力,这一项预应力损失是在设计中未予考虑的。两个工地,一个工地浇筑粗糙,用一次性台座,处理简单,在张拉预应力时台座出现较宽的横向裂缝,表示梁体已完成了一部分弹性压缩,因此梁体裂缝相对较少。而另一个工地,浇筑较好,用处理较好的多次重复使用的台座,在张拉预应力时台座未损坏,意味着梁体弹性压缩完成少,台座与梁体间摩阻损失大,出现裂缝反而多。

由于预应力损失加大,因此尽管设计计算时,在梁体自重并施加预应力后,下缘混凝土是受压的,但实际产生很大的拉应力,导致开裂。验算也表明,就连受弯承载能力极限状态也通不过。

这个实例告诉我们,在设计中千万不要用扁锚竖放作为弯起钢筋,不要因过分节省预应力束而形成加预应力后梁体不上拱,这都将导致跨中有效预应力的严重不足而出现垂直裂缝,以及因混凝土徐变而引起的梁体下挠。

2.1.2 施工原因

上面在叙述主拉应力斜裂缝时,已提到某桥因盲目抢工期,5天一个周期,工艺粗糙,在梁的悬臂浇筑中,既不预压重,又不调整挂篮挂索,浇筑顺序由里向外,由于挂篮下挠,使在与上一梁段连接的工作缝处出现垂直裂缝,最大的甚至宽达3mm,不得不进行压浆处理,并导致出现裂缝。

有的工地浇筑梁体混凝土时气温过高,空气干燥,保护不够,导致拆模时即出现垂直裂缝。这种裂缝大多限于表面,只要选择较低气温时浇筑,并注意保湿养生,是可以避免的。

2.2 垂直裂缝的加固措施

(1) 封闭压浆

如果由于施工原因出现裂缝,而正截面强度又足够的话,可以仅采用封闭压浆的方法来处理。

但是,要注意观测是否会由于还存在浆压不进的较小垂直裂缝而出现前述主拉应力斜裂缝。如出现,需视具体情况,加以处理。

(2) 增设预应力束

如果由于上述设计原因,即因预应力损失过大而导致跨中段实际有效预应力不足而出现垂直裂缝,则必须采用增设预应力束予以加固。很可能要在板内设体外束。应该说这类加固是很麻

烦、很困难的,效果要差一些,其裂缝也难闭合,最好还是在设计阶段确保梁在施加预应力后上拱,即保持足够的预应力度,防患于未然。

3 纵向裂缝

纵向裂缝是预应力梁桥中出现也较多的一种裂缝,仅次于主拉应力斜裂缝。

纵向裂缝较多地出现在箱梁的顶、底梁上,顺桥向,有的纵缝连续贯通较长,有的则不连续且较短。

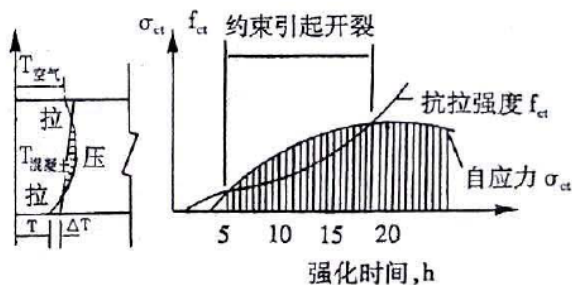
3.1 纵向裂缝的分类

(1) 混凝土硬化期间的纵向缝

往往出现的悬臂节段浇筑施工时底板较厚的梁根部,拆模后即发现底板下缘存在纵向缝。

这种裂缝是在结构没有作用任何荷载下产生的。其原因是由于温差引起的应力(自平衡应力)高于缓慢提高的混凝土抗拉强度。由图2可见,由于底板较厚,硬化期间产生水化热,在板厚中部温度较高,而两侧接触空气的部分稍低,尤以板底更可能低些。这样就产生了自平衡应力,板外缘受拉,中部受压。在外界空气温度较低时,外缘早期冷却较快,其拉应力有可能大于混凝土的抗拉强度,见图2,则可能引起开裂,表现为底板下缘的纵向裂缝。

在大气过于干燥而保湿措施不够时,有时在浇筑根部节段时,也会在较厚的底板中部出现此类裂缝。这种裂缝,往往限在混凝土的表面,其有害影响相对较小,可暂不处理,或加以压浆封闭即可。



(a) 自平衡应力 (b) 超过抗拉强度而开裂

图2 由于水化热和冷却而引起的纵缝

(2) 运营期间出现的纵向裂缝

这种裂缝,显然是在荷载作用下产生的,是需要着重讨论的。

3.2 纵向裂缝产生的原因

3.2.1 设计原因

(1) 未采用横向预应力

早期修建的一些大跨径梁桥,由于经验的缺乏,未采用横向及竖向预应力,如沙洋大桥,其横向为钢筋混凝土结构,在荷载作用下,顶板中部下缘出现纵向裂缝是不可避免的。

这类裂缝,如果在规范规定的允许宽度范围内,应该认为是正常的,一般并不需要采取措施。

(2) 顺桥向的永存预应力过大

在大跨径梁桥采用全预应力结构的设计中,往往对最小应力留有约 2MPa 的压应力储备,以克服计算简化假定或图式与实际的不一致,以及剪力滞、局部应力等的不利影响。

但是,在有的大跨径梁桥的设计中,却把最小压应力的储备留得过大,甚至留有 10MPa 以上,似乎压应力储备留得大就较安全,但实际却恰恰相反,容易导致纵向裂缝的产生。

我们知道,构件在承受轴向力时,轴向长度因弹性压缩而缩短,而与其垂直方向将因材料的泊松比而产生拉应变。如果正应力储备过大,就会在其垂直方向发生较大的拉应变,在最薄弱的截面,往往是沿预应力管道因拉应力过大而出现纵向裂缝,这种裂缝沿顺桥向预应力管道而发展,下渗之水会沿管流动,造成锈蚀的威胁远大于垂直裂缝。

因此,必须改变顺桥向预应力压力储备越大越安全的不正确观念,这样做不但多用了预应力束,而且会导致有害的沿管道纵向裂缝的产生,有时还会因主压应力过大而损失。

(3) 温度应力估计不足

我国的桥梁设计规范中,对于温差应力,仅规定了上翼缘与梁的其他部位有 5℃ 的温差,计算其内力。这个温差应力的规定,与实际温差应力比较,可能是较小的,偏不安全的。

国外有些学者,如英国、新西兰的学者研究了温差应力,并将成果纳入了他们的设计规范。对于箱梁来说,温差应力可以接近甚至达到活载的应力,控制截面的跨中区段下缘和支点区域上缘。我国云南六库怒江大桥上,也曾实测了温度变化如下顶底板的应变,如图 3 所示。由图可见,顶板应变比底板大,相差 3.09 倍^[1]。设计中对温差应力估计不足,无疑这是出现纵向裂缝重要原因之一。不过对于这个问题,还需要进一步深化认识。

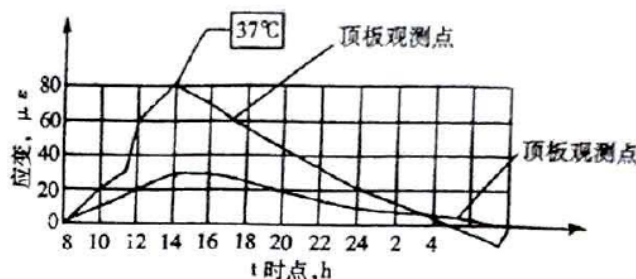


图3 实测箱梁温差应变

3.2.2 施工原因

个别工地上也曾出现过横向预应力施加不足,这也是造成顶板纵向开裂原因之一。

4 底板保护层混凝土劈裂

表现为底板预应力束下的混凝土保护层劈裂,有时可达相当宽的范围。

4.1 设计原因

(1) 保护层过薄

有的设计人员往往片面从充分发挥预应力束的作用出发,盲目减少其保护层,这种情况下,容易产生底板劈裂,尤其在变截面梁底板顺桥向呈弯曲的情况下。

(2) 未采取抗径向力的措施

在变截面梁底板为弯曲的抛物线形,底板束张拉时,会产生向下的径向分布荷载, $q = T/R$ 。

如果板保护层过薄,又未采取抗径向应力的措施,容易引起混凝土的劈裂。

正确的设计往往按此分布荷载设平衡箍筋,使这部分力,通过平衡箍筋传递于上层钢筋,进而使全底板承受此力,就能防止底板劈裂的发生。

4.2 施工原因

对已设置的波纹管保护不够,受到局部重载,形成折曲,张拉时引起向下的分力,这也是底板劈裂原因之一,尤其在过早张拉,混凝土强度还未足够时。

这种缺陷,必须加以处理,因为波纹管暴露空气中,易引起锈蚀,进而影响预应力束的锈蚀;而且也为了保证预应力束与混凝土有足够的握裹力。

参考文献

- [1] 中交公路规划设计院. 预应力混凝土梁桥裂缝成因分析研究报告. 1998.
- [2] 混凝土结构的裂缝和裂缝控制. 北京公路, 1989 (2).