

## 从设计层面探讨预应力砼连续箱梁桥裂缝控制

施颖\*, 郑建群

(浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 预应力砼连续箱梁桥裂缝产生的原因是多种多样, 但究其原因其根源无外乎来自设计、施工、管理养护和材料这4个层面。而设计是源头, 把好设计关, 即从设计思路、构造处理上加以注意和改进, 从而使砼箱梁桥裂缝得到有效控制。

**关键词:** 预应力砼连续箱梁桥; 设计; 构造; 裂缝

**中图分类号:** U448.35    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-716X(2005)04-0013-06

预应力砼梁桥在技术经济指标、施工方法以及维修保养上, 都具有强劲可比性, 而预应力砼连续箱梁桥具有结构受力性能好、刚度大、变形小、行车平顺舒适、伸缩缝少、造型简洁美观、养护工程量小、抗震能力强等优点, 因此无论是公路或城市桥梁、高架道路, 还是跨越江河湖滨的大桥, 预应力砼连续箱梁桥均以它独特的魅力, 在40~150m跨度内成为最富有竞争力的桥型之一。

然而, 随着预应力砼连续梁桥在我国各地的广泛应用, 有关该桥型在营运过程中出现病害的报告也越来越多, 尤以箱梁裂缝居多, 如腹板裂缝、顶底板裂缝和横隔板裂缝。超出设计许可的结构裂缝对箱梁桥的耐久性和营运的安全性构成了很大的威胁, 同时, 由于箱梁结构裂缝的存在具有一定的普遍性, 使得工程界对箱梁桥的应用开始产生不安, 甚至怀疑。设计为寻找原因及提出整治方案而苦思冥想。业主单位为不出裂缝, 千方百计寻找防裂措施, 在设计图的基础上, 一再要求设计增加大量非预应力筋。这一切均引起了主管部门及设计院的高度重视, 为了探明箱梁结构裂缝产生的规律和形成机理, 纷纷立项从设计、施工和管理养护等层面加以研究。为从定性定量上摸清其裂缝产生的原因, 对出现裂缝的已建成的桥梁进行一次综合调查, 并加以分析研究, 从中找出主要原因, 针对主因提出有效的改进措施和整治方法, 供设计和施工参考, 以确保桥梁的安全性、耐久性和正常使用状态的可靠度。纵观各研究报告, 各有特点, 但都未形成系统的研究, 很少有模型试验分析对比, 因此预应力砼连续箱梁桥裂缝的成因及防治对策, 还有待于从设计、施工、管理和材料

上作更进一步研究, 而设计是源头, 设计是工程的灵魂, 它很大程度上取决于工程质量, 因此首先要把好设计关。本文作者基于多年工程实践仅从设计层面, 即从设计构造角度并参考国外规范理出一些预应力砼连续箱梁桥设计及构造处理上应考虑或注意的事项和设计上的改进, 以尽可能减少或消除裂缝的产生, 使砼箱梁裂缝得到有效控制。

## 1 裂缝的种类

## 1.1 腹板裂缝

## 1.1.1 主拉应力产生腹板斜裂缝

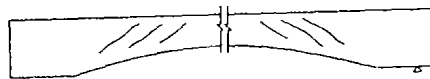
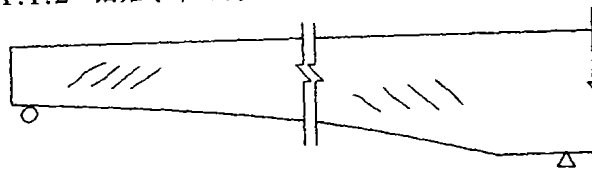


图1 预应力连续箱梁中跨腹板裂缝示意图

## 1.1.2 锚后拉应力产生腹板斜裂缝



## 1.1.3 连续梁边跨端部腹板斜裂缝

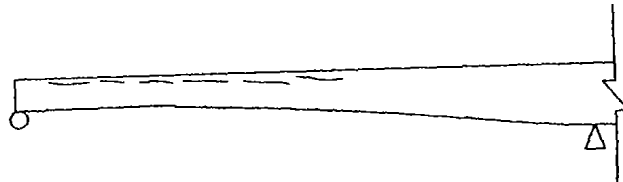


图2 预应力连续箱梁边跨端部腹板斜裂缝示意图

\* 收稿日期: 2004-06-01; 修订日期: 2004-09-10

作者简介: 施颖(1963-), 男, 浙江兰溪人, 高级工程师, 从事桥梁工程教学、科研与设计工作。

#### 1.1.4 竖向正应力产生腹板水平裂缝

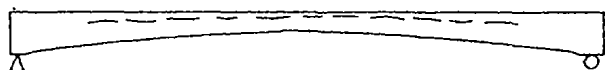
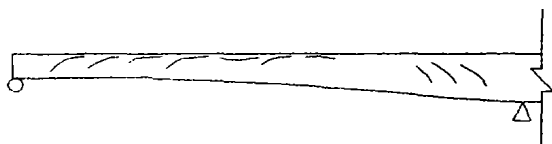
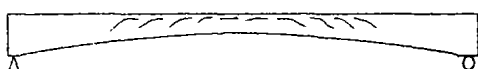


图 3 竖向正应力产生的腹板水平裂缝

#### 1.1.5 竖向正应力和主拉应力作用下的腹板水平、斜向组合裂缝



a) 边跨腹板水平、斜裂缝同时存在



b) 中跨腹板水平、斜裂缝同时存在

图 4 腹板水平斜向组合裂缝

### 1.2 顶、底板裂缝

#### 1.2.1 齿板裂缝

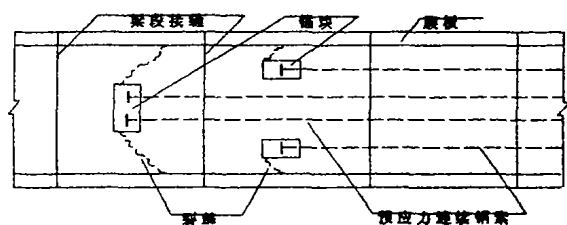


图 5 底板齿板裂缝示意图

#### 1.2.2 支座端底板纵向放射裂缝

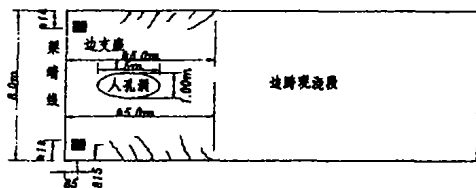


图 6 支座端底板纵向放射裂缝示意图

#### 1.2.3 顶、底板纵向裂缝

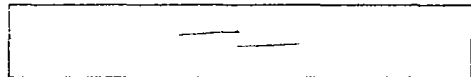


图 7 顶、底板裂缝示意图

#### 1.2.4 顶板伸出翼缘根部下缘裂缝(图 8)

### 1.3 横隔板裂缝

该类裂缝主要为箱梁横隔板孔洞周围放射性裂缝和孔洞之间的竖向裂缝(图 9)。

## 2 裂缝产生原因

### 2.1 腹板裂缝

- 1) 竖向预应力控制不到位;
- 2) 竖向预应力管道压浆不饱满;

- 3) 弯束与竖向预应力控制存在空白区;
- 4) 管道对截面削弱较多;
- 5) 实际情况与计算假定出入太大;
- 6) 施工缝或接缝处砼抗拉强度折减不够;
- 7) 支座下缘压应力储备不足。

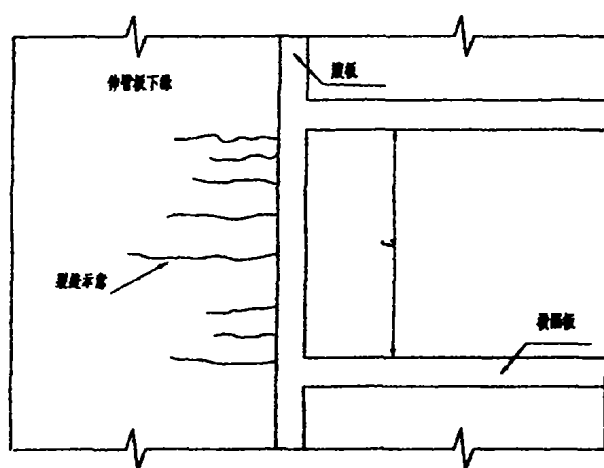


图 8 顶板伸出翼缘根部下缘裂缝示意图

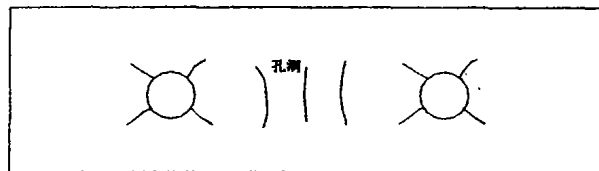


图 9 横隔板裂缝示意图

### 2.2 顶、底板裂缝

- 1) 对顶、底板的局部受力设计计算考虑不足;
- 2) 箱梁横向温度模式选取不合理, 导致应力估计不足, 非预应力筋配置偏少;
- 3) 对收缩和早期砼抗拉强度认识不足;
- 4) 箱梁剪力滞效应未考虑或考虑不够;
- 5) 合龙段设计施工不当;
- 6) 施工质量不高与精度控制不够。

### 2.3 横隔板裂缝

箱梁横隔板孔洞的放射性裂缝主要是孔洞周围应力集中产生的。

## 3 设计对策

从以上原因看, 很多与设计有关, 因此说设计是裂缝控制的第一道关口, 也是最重要的, 笔者认为若在构造上或其他某些方面加以改进与推敲, 箱梁出现的以上裂缝, 将会极大的改观或消除。

### 3.1 设计构造

#### 3.1.1 选择适合的边中比及高跨比

从国内外已建成的桥梁统计分析建议: 对于变截面连续梁边中跨比通常在 0.5~0.8 之间取用, 而大跨度预应力砼连续梁边跨与中跨之比拟控制在 0.55~0.6 范围内为宜。梁高与最大跨径之比, 跨中

截面一般为  $1/30 \sim 1/50$ , 支点截面为  $1/15 \sim 1/20$ 。

### 3.1.2 箱型截面合理布置与选型

横截面布置型式很大程度上取决于桥面宽度。桥面宽度的增加,使单元构件的横截面发生了变化,通常有单箱单室、单箱多室、双箱单室、多箱多室和宽翼缘倒梯形等截面型式。在截面选型上尽可能选用宽跨比较小的单室箱为宜,这主要考虑偏心荷载小,从而减少了横向挠曲,有利于主梁的纵向刚度;其次考虑我国桥梁结构分析的实际情况,一般将复

杂的空间问题简化为平面问题来处理,箱室越窄,空间效应越不明显,结果更趋于实际;当然对宽跨比较大的箱梁桥应作空间分析来确定。另外从国内外预应力砼连续箱梁桥桥宽与截面选型上作了统计分析,可以看出,箱顶宽在  $22.2\text{m}$  以下时,基本都采用单室箱,更宽的应分上、下行双幅桥来设计施工。因此从受力及经济角度考虑,建议横断面采用单箱单室、单箱多室截面或分离式布置为宜(图 10)。

### 3.1.3 梗腋

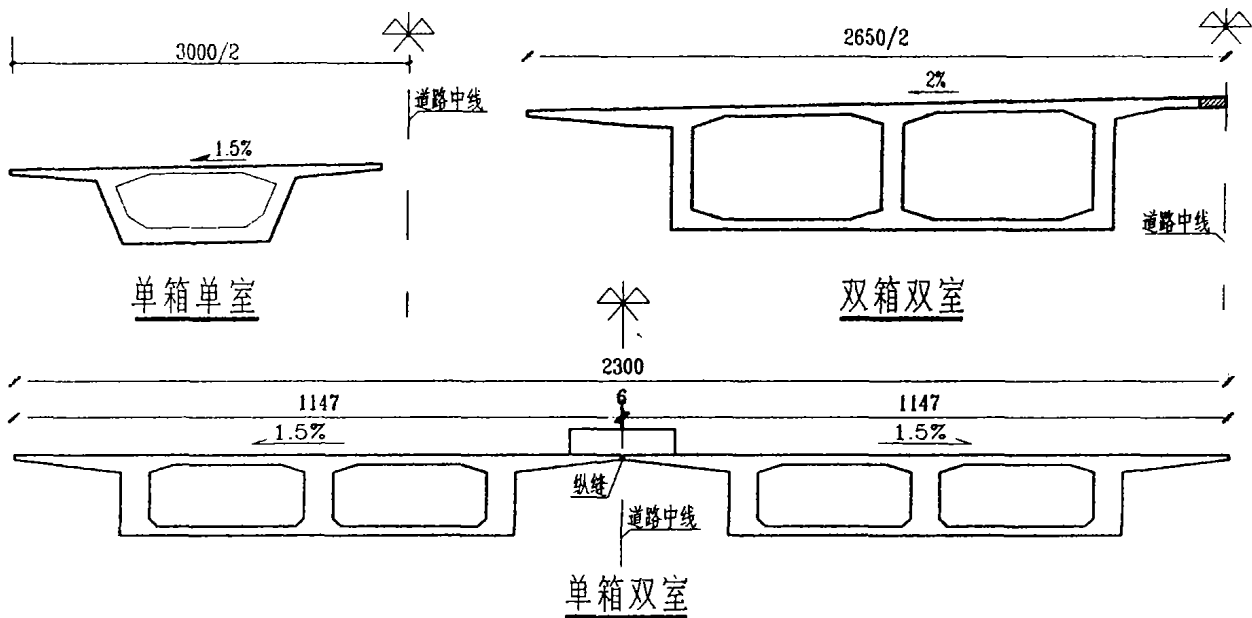


图 10 截面形式(单位:cm)

梗腋提高了截面的抗扭刚度和抗弯刚度,减少了扭转剪应力和畸变应力。桥面板支点刚度加大后,可以吸收负弯矩,从而减少了桥面板的跨中正弯矩。此外,梗腋使力线过渡比较平缓,减小了次应力。从构造上考虑,利用梗腋所提供的空间便于布置纵向预应力筋和横向预应力筋,同时也为减薄底板和顶板的厚度提供了构造上的保证,所以梗腋设计应加以重视,我们可以调节梗腋的尺寸比例(图 11),以使腹板的刚度与顶底板刚度不至于相差悬殊,发挥

一般箱梁上梗腋多采用图 a) 的形式,腋的竖向高度不小于顶板厚度。当箱梁截面较小时,也采用图 b), c) 的形式,图 d), e) 常用于斜腹板与顶板之间的梗腋,对底板与腹板之间的承托常采用 f), g) 布置。

### 3.1.4 横隔板的设置

横隔板的基本作用是增加截面的横向刚度,限制畸变应力。在支承处横隔板还担负着承受和分布较大支承反力的作用。箱形截面由于具有很大的抗扭刚度,所以横隔板的布置可以比一般肋式梁桥少一些。目前许多国家认为可减少或不设置中间横隔板。从受力角度来分析,中间横隔板对纵向应力和横向弯矩的分布影响很小,活载横向弯矩的增加很少超过 8%,而恒载应力又不受横隔板的影响,因此单从结构上来考虑,中间横隔板的作用可以用局部加强腹板或采取特殊的横向框架的办法来代替。但日本预应力砼铁路桥梁中横隔板数目依跨度而定,跨度小于  $50\text{m}$  时,设置 4 道,跨度  $50 \sim 70\text{m}$  时,设置 5 道,跨度  $70 \sim 80\text{m}$  时,设置 6 道,而且跨中及支点处必须设置。

增加横隔板道数,势必增加施工难度,可能会影

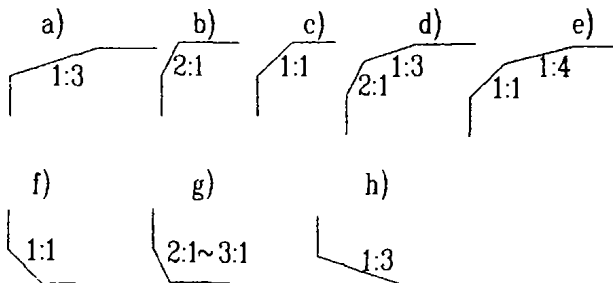


图 11 梗腋形式

横截面的框架作用,力求各部分构件协调工作,受力均衡。

响工期,从施工角度最好不设或少设;但作为设计上的构造要求或弥补平面计算分析不足,应该设置,建议跨度小于 50m 时,只在支点处设置;跨度大于等于 50m 时,至少设置 3 道,即在支点和跨中截面处设置。

### 3.1.5 腹板厚度及间距

腹板的厚度应由对抗剪、抗扭、砼保护层和砼浇注的要求确定。

适当增加腹板的厚度,对截面正应力、剪应力和主拉应力均有良好的改善,但势必会增加箱梁自重。对照各国规范对腹板最小厚度都有一些规定,考虑到①腹板主要承受弯曲剪应力与扭转剪应力所引起主拉应力;②腹板的厚度应考虑预应力束管道和砼浇注的要求;③腹板的厚度应考虑中间锚固(或连接器)构造及锚下局部应力的要求;④腹板的刚度与顶底板刚度量级协调。因此,在具体设计时,取用腹板厚度不宜过小,建议腹板厚度由跨中向支点逐渐加宽过渡,一般跨中截面腹板最小厚度为 30cm,对既有纵向和又有竖向管道的腹板最小厚度为 40cm (AASHTO 规定为 38cm);支点截面腹板最小厚度取

50~60cm,变化点选用四分点左右较好。

从箱梁开裂的实例调查和分析看,顶底板开裂均为腹板间距较大者,究其原因这是由于箱梁畸变和横向弯曲所致。因此,有的设计单位和笔者尝试减小腹板间距,追求密肋效应。密肋布置有效增加了桥面刚度和箱梁整体刚度,从而减少很难准确计算出的箱梁畸变和横向弯曲应力,从构造上有效控制了裂缝的产生和开展,从几座桥的实践中,客观说效果还是不错的,但箱梁的单方砼量增大,显得不是很经济。不过话说回来,若一并考虑开裂后的修补费用,显然密肋布置所带来的效果和费用具有可比性。

### 3.1.6 顶板与底板

对于顶板首先要满足桥面板的受力要求,其次要满足力筋的构造要求,因此只能给出一个构造要求下的最小尺寸,一般为 20cm。

底板需满足正弯矩下的力筋通过的构造要求,按如下方法确定:

一般国内连续梁桥,底板上只配一排  $7\phi_{15}$  钢绞线者居多,以此为例定出最小构造尺寸(图 12)。

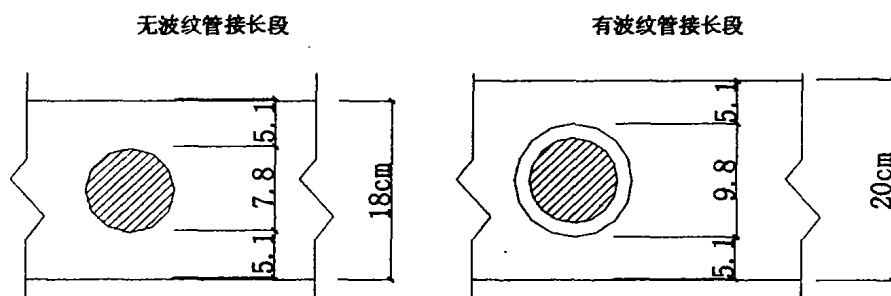


图 12 底板最小尺寸构造示例(单位:cm)

## 3.2 设计计算

### 3.2.1 箱梁有效翼缘宽度的确定

薄壁箱梁的有效翼缘宽度问题与剪力滞,实质上是一回事,前者是用等效板宽表示,而后者是用不均匀应力表示。有效翼缘宽度用于非箱形截面(开口截面),而剪力滞一般多用于箱形截面(闭口截面)。在桥梁设计中,恒载、二期恒载、活载、预加力均在横截面上产生剪力滞效应,其中尤以恒载为主。我国桥规对箱梁剪力滞的考虑是参照了 T 型梁的规定进行的,没有专门的箱梁桥剪力滞计算办法,因此,设计人员往往缺乏对箱形梁剪力滞的充分考虑。

剪力滞效应是砼箱形梁设计中应该加以考虑,特别是跨宽比小,上下板的惯矩与整个箱截面惯矩之比较大的连续箱梁支点处,不能忽视其剪力滞效应。如果这一影响因素被忽视,可能导致设计的不合理或结构的破坏。剪力滞效应考虑过多,对钢筋砼结构只不过多配筋,造成一些浪费;而对预应力砼结

构,由于翼缘板上的法向应力不均匀,若按大值取值过多设置预应力筋,不按应力变化的要求,按等间距等预应力布置力筋,势必造成压应力和上拱度均过大,既不安全又不经济;若按均值设置预应力筋,又不按应力变化的要求设置,按等间距等预应力布置力筋,可能会造成峰值处预加力不足,导致砼开裂。

对箱形截面的剪力滞效应问题,国内外学者各自有侧重地对箱梁的剪力滞效应及其有效宽度进行了系统而深入的研究,有些成果相应列入各国规范中。比较各国规范现阶段箱形梁桥设计可参考德国规范 DIN1075 关于共同作用宽度的规定条文执行:

1) 在计算梁的弯、剪受力时,需要考虑翼板的共同作用宽度;

2) 当翼板净悬出宽度  $b \leq 0.3d_0$  ( $d_0$  为腹板高度) 时,取  $b_m = b$ ; 当  $b \geq 0.3d_0$  时,可由图表确定  $b_m$ ; 在跨间的共同作用宽度是  $b_{mf} = \rho_f \cdot b$ , 在支座上

则是  $b_{ms} = \rho_s \cdot b$ ; 对于连续梁的中间支座, 应按相邻跨中较大的跨径计算  $\rho_s$ ; 一般情况下  $b_{mf} > b_{ms}$ , 如果某一跨当  $b_{mf} < b_{ms}$ , 那么该跨的共同作用宽度由该跨两支座处共同作用宽度的连线来确定;

3) 对共同作用宽度的计算可忽略设置水平横隔板或横梁、翼板厚度变化、腹板高度变化、活荷载位置变化的影响;

4) 在计算预加力产生的主梁应力时, 对于纵向力产生的应力, 按翼板全宽度考虑; 对于弯矩产生的应力, 按翼板共同作用宽度考虑。

### 3.2.2 压应力控制值选取

如均采用 C50 砼, 达到设计强度的 80% 进行张拉, 其 3 国规范比较如表 1。

表 1

项 目	英国 BS5400	中国 JTJ023-85	美国规范(94)
运营阶段	20.0MPa	17.5MPa	22.5MPa
预加力阶段	16.0MPa	21.0MPa	22.0MPa

由表 1 知, 使用阶段压应力容许值中国规范偏低, 趋于保守。而施工阶段容许压应力仅次于美国, 两者仅差 4.76%, 比英国大出 31.25%。由于中国施工机械和水平及施工管理、施工质量与美国相比还存在不足, 理论计算模式及其计算结果与实际结构在许多方面存在着差距, 也还有许多因素在设计中是很难精确计算的, 若施工阶段容许压应力取值过高, 确实存在着冒险的因素。建议  $\sigma_{hs} = 0.65 R_a^b$  (荷载组合 I), 即为其两国的平均值较好。在具体进行桥梁设计时, 要求结构各截面的应力具有一定的安全储备, 对截面正应力, 一般要求在不不利荷载组合下, 还应保持约 2.0MPa ~ 3.0MPa 左右的压应力储备。

### 3.2.3 荷载横向分布的计算方法选取

当前对预应力砼连续箱梁桥设计, 一般均采用将桥跨结构分解为单主梁组成的平面连续梁系, 由平面杆系程序进行内力分析, 而车辆的偏心荷载作用通常用增大系数法来考虑, 即箱梁腹板的横向荷载分布, 按平均分布值乘以不同的增大系数  $\mu$ : 对弯矩  $\mu_M = 1.15$ , 对剪力  $\mu_Q = 1.05$ 。虽然增大系数法简单, 省去了繁杂的荷载横向分布计算, 但缺乏理论基础, 又不考虑结构、跨度等不同要求, 因此存在着很大的任意性和盲目性, 这必然导致与箱梁截面受力与实际不符, 其结果造成极大的浪费或偏不安全。因此建议采用二次刚度换算法、偏压修正法来计算, 比较合理和经济。

### 3.2.4 选取合理的箱梁的温度梯度模式

在现行桥规不尽合理的情况下, 设计人员进行

温度应力分析时, 可以借鉴国外桥规相关规定及铁道部关于箱梁桥温度分布测试研究得出的温度梯度模式(类似于新西兰桥规所指出的温度梯度模式)。

### 3.2.5 砼的徐变

砼的徐变机理也有许多种, 如弹性徐变理论、老化徐变理论、继效徐变理论等等。作为工程裂缝控制的应用, 我们只能应用其中主要的成果, 以常系数的形式, 考虑在弹性计算的结果中, 从而简化了非线性分析。由于砼的徐变作用, 给预应力砼带来有利和不利两方面的影响。从不利方面看来, 它可以造成预应力损失, 增加挠度, 可以降低钢筋和砼的粘着力等。从有利方面看来, 它可以使弹性的温度收缩应力大大的松弛, 根据变形速率及砼龄期, 它对应力降低的程度约 0.3 ~ 0.8 倍, 保温保湿养护越好, 降温越慢, 松弛系数越小。对砼的徐变计算理论有的学者认为不能按规范公式计算, 有些学者认为按规范公式计算还是合理的, 但有一点是明确的, 砼的徐变计算时间由原来的 3 年, 已逐渐延长至 7 年, 即 2520d。

## 3.3 箱梁配筋

### 3.3.1 纵向预应力筋

目前比较流行的一种纵向配直线束的做法, 与传统的按受力要求曲线配束不同, 它既简化了设计和施工, 又减少了摩阻损失, 对建立纵向有效预应力有利, 而剪应力需配置密排竖向预应力束来克服, 竖向预应力束也可起到减少主拉应力的作用, 但效果不大。这是由于竖向直线束太短, 几乎建立不起有效预应力来, 建立值与设计值相差太大, 难免会出现主拉应力方向的结构裂缝。另外剪应力和主拉应力沿纵向是连续分布, 配直线束加密排竖向束组合, 一定存在一段应力空白区。换句话说, 密排竖向束, 究竟排与排间距为多少, 才能使竖向束建立的有效预应力分布有一个交叉范围, 可消除这个空白区, 这无理论依据。因此建议应合理布置腹板内纵向预应力弯束, 让预应力提供的抗剪能力沿纵向有一个连续分布, 并尽可能多地将预应力束布置在腹板内, 建立起足够的纵向有效预应力和弯起束提供的竖向预应力, 有效减少或消除主拉应力, 减少或消除腹板裂缝(图 13)。

### 3.3.2 竖向预应力筋

竖向预应力筋设置能显著地减少或消除主拉应力, 但力筋太短, 难以建立有效预应力。虽在施工工艺上加以改进, 如采用超张拉或反复三次张拉。杭州下沙大桥作了这方面试验, 从测试的几根来看, 效果应该不错, 但难免多少存在着人为因素, 这与施工人员的素质是分不开, 如紧固螺母、压浆饱不饱满等。

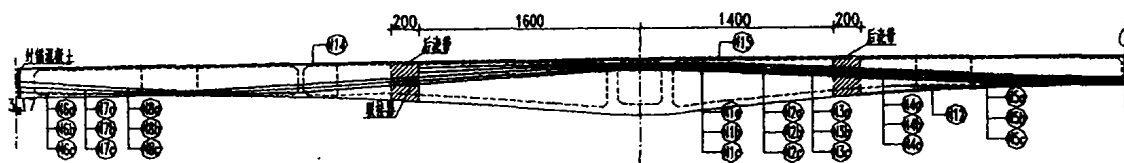


图13 预应力束立面布置图(单位:cm)

从钱江三桥随机抽检 35 根来看,其结果不得不让人担忧,无浆占 71.42%;不饱满占 11.42%;开孔流水的占 40%。不过这从加强管理、提高工人素质和技术水平上可得到控制。所以,单从主拉应力控制断面看,建议:当采用竖向预应力时,断面的主拉应力也应按无竖向预应力时控制在规定的容许范围为宜,竖向预应力只作为安全储备。

### 3.3.3 梁肋侧面纵向分布钢筋配置

关于梁肋侧面纵筋配置问题,我国现行公路规范,没有明确规定。但根据认识再认识的过程,应该说加密钢筋网间距,提高钢筋直径,配置收缩和温度筋,能起到很好的抗裂作用。一般认为,选用直径为 12mm 的螺纹钢,间距为 10cm 布置较好,这也与德国和美国规范所规定的最小配筋率相吻合。

### 3.3.4 砼梁的顶面和底面分布筋

对箱梁顶板顶层横向配筋一般按悬臂板根部弯矩或行车道板支承处固端弯矩控制,顶板底层配筋按行车道板跨中弯矩控制;对箱梁底板分布筋和顶板纵向钢筋一般按受力和构造要求设置,但构件每米长度上的最小配筋应不小于  $1.0 \mu d$  ( $\mu$ ——最小配筋量的基本值,一般取 0.1;  $d$ ——截面高度)。

### 3.3.5 梁肋的抗剪钢筋

梁肋的抗剪钢筋主要指箍筋,其单肢面积、肢数和间距按现行规范通过计算确定,但规范中没有给出最小配筋量要求,为此按笔者的习惯配置,对照德国 DIN4227 预应力砼标准,竟然非常接近。因此笔者建议梁肋的抗剪钢筋最小配筋量不小于  $1.0 \mu b_0$  ( $\mu$ ——最小配筋量的基本值,一般取 0.1;

$b_0$ ——梁肋宽度)。

## 4 结 语

由于裂缝问题的复杂性,尚有许多问题有待于进一步研究与探讨,但笔者认为,根据不同的结构、跨度,选择不同的、切合实际的构造,去弥补计算上的某些不足及储备某些安全度,在一定程度上对裂缝的控制,确保桥梁安全与经济,是设计行之有效的途径。

### 参考文献:

- [1] 美国公路桥梁设计规范. 荷载与抗力系数设计法[S]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [2] 交通部公路规划设计院. 联邦德国桥梁规范汇编[S]. 北京:1997.
- [3] BS5400 钢桥 混凝土桥及结合桥[S]. 成都:西南交通大学出版社,1987.
- [4] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
- [5] 浙江省预应力连续箱梁桥裂缝防治课题组. 预应力混凝土箱形连续梁桥裂缝调查分析及防治研究报告[R]. 杭州:2001.
- [6] 天津市市政设计研究院. 招宝山大桥有关设计方面的专题报告[R]. 天津:1999.
- [7] 交通部公路规划设计院, 湖南大学. 预应力混凝土箱形连续梁桥裂缝调查分析及研究[R]. 1998.
- [8] 浙江省公路管理局. 预应力混凝土箱形连续箱梁桥裂缝分析及设计改进[R]. 杭州:2002.
- [9] 胡肇滋. 桥跨结构简化分析—荷载横向分布[M]. 北京:人民交通出版社,1996.

## Cracking control of PC continuous box girder bridges form the design point of view

SHI Ying, ZHENG Jian-qun

(Construction Engineering College, Zhejiang Industrial Technology University, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The cause that cracking procreate of PC continuous box girder bridges are many, In the final analysis, There are design、construction、manage and material. And that the design is mostly root, Therefore ameliorate the design thinking and Structure, so that reduce or control crack.

**Key words:** PC continuous box girder bridges; design; structure; cracking