

# 钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算

戴昌源, 苏庆田

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 制作了 5 个组合桥面板试件并进行负弯矩加载试验, 结果发现组合桥面板在混凝土开裂后截面内钢筋、钢板的应变不符合平截面假定, 钢筋应变明显大于按照平截面假定求得计算值。理论推导了组合桥面板混凝土开裂后截面钢筋应力的计算公式, 并与试验结果对比, 计算值与实测值吻合较好。对不同的混凝土裂缝宽度计算方法进行对比发现: 采用本文推荐的钢筋应力公式, 并使用公预规提出的混凝土裂缝宽度计算公式按照偏心受拉构件计算, 得到的结果与实测值吻合较好。

**关键词:** 组合桥面板; 混凝土开裂; 裂缝宽度; 钢筋应力

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

## Crack Width Calculation of Steel-Concrete Composite Bridge Deck in Negative Moment Region

DAI Changyuan, SU Qingtian

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Five steel concrete composite bridge deck specimens were manufactured and subjected to negative moment loading. It could be observed that the strain of rebar and steel plate of splitting section does not obey the plain-section assumption. The strain of rebar is obviously larger than the value calculated according to the plain-section assumption. Then, a formula which can be used to calculate the rebar stress of cracked section was deduced. The calculating results agreed well with the test values. Finally, different crack width predicting methods were compared. The results show that when using the formula recommended in this paper to calculate the rebar stress, adopting the crack width calculation formula specified in JTG D62 2004 and using the parameters of eccentric tension member, the calculated crack width agrees well with the test values.

**Key words:** composite bridge deck; concrete crack; crack width; rebar stress

目前在实际工程中常用的桥面板形式按照材料划分主要有混凝土桥面板和正交异性钢桥面板。混凝土桥面板构造简单, 造价低廉, 在小跨径桥梁中被大量使用, 但是自重较大, 限制了其在中、大跨径桥梁中的应用。正交异性钢桥面板自重小, 承载能力高, 非常适合在中、大跨径桥梁中应用, 但是疲劳裂纹和铺装问题一直是正交异性钢桥面板的“顽疾”<sup>[1-2]</sup>。钢-混凝土组合桥面板的出现为解决正交异性钢桥面板的疲劳和铺装问题提供了另外一种思路<sup>[3]</sup>。混凝土板通过剪力连接件与正交异性钢桥面板连接在一起, 混凝土板参与结构受力, 这样降低了钢结构应力, 提高了抗疲劳性能, 同时也解决了桥面板的铺装问题。

当组合桥面板应用在连续梁中时, 负弯矩区混凝土板开裂的问题不可避免。为了保证结构的耐久性, 避免钢筋和下层钢结构的锈蚀, 除了在铺装层中增设防水层等构造措施外, 限制混凝土板的裂缝宽度也非常必要。目前混凝土构件受拉裂缝宽度的研究已经比较成熟, 其裂缝宽度计算公式主要分为以下两种类型: 一种是半经验半理论公式, 以《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[4]</sup>(后简称混凝土规范)为代表; 另一种是经过数理统计得到的经验公式, 以《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)<sup>[5]</sup>(后简称公预规)为代表。也有学者对组合梁负弯矩区裂缝宽度的计算进行了相关研究。聂建国等<sup>[6]</sup>提出组合梁负弯矩区混凝土裂缝宽度主要与配筋率、力比和栓钉连接件间距有关。余志武等<sup>[7]</sup>根据 18 根部分预应力混凝土组合梁试验得出, 负弯矩区裂缝宽度主要与负弯矩区综合力

收稿日期: 2016-08-11

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303)

第一作者: 戴昌源(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁。E-mail: dai\_cy@foxmail.com

通讯作者: 苏庆田(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁。E-mail: sqt@tongji.edu.cn

比、剪力连接件间距和钢梁与混凝土的相对高度比有关。张彦玲等<sup>[8-9]</sup>和 Ryu 等<sup>[10]</sup>提出,实测的裂缝间距与横向钢筋间距有很强的相关性,也是影响裂缝宽度的重要因素。上述三位学者提出的裂缝宽度计算公式都是基于混凝土规范中的半经验半理论公式,形式上相同,只是对钢筋应力不均匀系数、裂缝间距的计算方法不同。《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64—2015)<sup>[11]</sup>(后简称钢桥规范)中规定,可以先按照开裂截面特性计算负弯矩区钢筋应力,再按照轴心受拉构件计算组合梁负弯矩区裂缝宽度。

对于组合桥面板,虽然与组合梁构造上相似,但是仍有其特殊之处。例如,组合桥面板混凝土板厚度与组合梁相比较薄,一般只布置一层钢筋。组合梁桥面板下部的钢结构为正交异性钢桥面板,其宽度与混凝土板相同,所以剪力滞效应没有组合梁明显。目前还未见有关组合桥面板中混凝土裂缝宽度计算的文献,因此有必要对组合桥面板负弯矩区混凝土裂缝宽度的计算方法进行研究。本文对5个简支组合桥面板试件进行试验研究,分析钢筋应力、连接件形式、钢筋直径、混凝土强度等级等因素对裂缝宽度的影响。最后,提出了适合组合桥面板的负弯矩区钢筋应力计算公式,并基于现有规范提出了适合组合桥面板的负弯矩区混凝土裂缝宽度计算方法。

## 1 试验研究

### 1.1 试验试件及加载方案

共设计了5个组合桥面板试件,编号为S1~S5。每个试件的长度为4.3m。以试件S1为例详细介绍试件的结构形式。试件S1截面形式如图1a所示,主要由混凝土顶板、钢顶板、U形加劲肋以及连接件和钢筋组成。试件的混凝土强度等级为C60,钢材强度等级为Q345,宽度为1800mm,高度为406mm。其中,混凝土板厚120mm,加劲肋高280mm,钢顶板厚6mm。混凝土和钢顶板之间通过焊钉连接,焊钉在试件长度和宽度方向的间距为300mm;试件宽度范围内有2个U肋,U肋板厚6mm;混凝土中纵向钢筋直径为22mm,钢筋间距为150mm,横向钢筋直径为12mm,钢筋间距为150mm。以试件S1为基准试件,其他4个试件与试件S1的不同之处在于:试件S2混凝土纵向钢筋采用直径16mm的细钢筋;试件S3混凝土采用高强钢纤维混凝土;试件S4加劲肋采用球扁钢,球扁钢的型号为280×

11,同时试件宽度改为1500mm,截面形状如图1b所示;试件S5剪力连接件采用开孔板连接件,开孔板连接件的厚度为12mm,高度为120mm,孔径为50mm,孔中心间距为150mm。5个试件的设计变量如表1所示。试件的标准断面如图1所示。

表1 试件构造特征

试件编号	混凝土等级	钢筋直径/mm	加劲肋类型	试件宽度/mm	剪力连接件类型
S1	C60	22	U肋	1800	焊钉
S2	C60	16	U肋	1800	焊钉
S3	C80(含钢纤维)	22	U肋	1800	焊钉
S4	C60	22	球扁钢	1500	焊钉
S5	C60	22	U肋	1800	开孔板

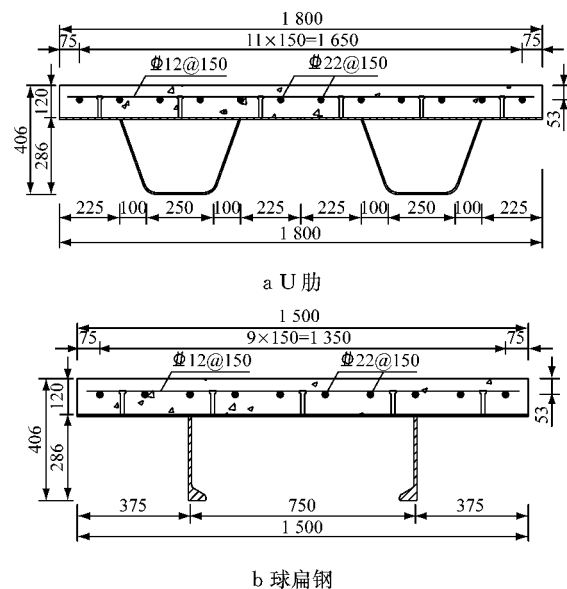


图1 试件标准断面(单位:mm)

Fig.1 Typical section of specimens(unit: mm)

加载方式如图2所示,试件的支承跨度均为4m。在试件的两端约束竖向位移,在跨中下部设置一油压千斤顶施加向上的力使得跨中组合桥面板承受负弯矩作用。试件的现场加载如图3所示。

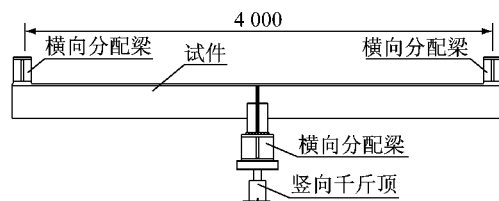


图2 加载方式(单位:mm)

Fig.2 Loading setup(unit: mm)

### 1.2 材性试验

材性试验结果如表2~4所示。

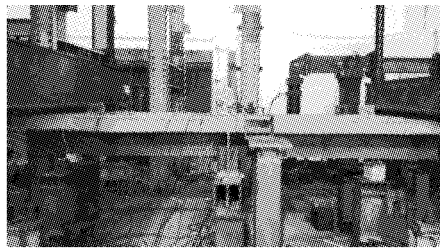


图 3 试验现场照片  
Fig.3 Experiment site

表 2 混凝土材性试验结果

Tab.2 Material properties of concrete

标号	试验类型	抗压强度 平均值/MPa	弹性模量/MPa
C60	抗压	79.72	41 569
C80(含钢纤维)	抗压	113.09	49 511

表 3 钢板材性试验结果

Tab.3 Material properties of steel plate

板厚/mm	类型	平均屈服强度/MPa	平均极限强度/MPa
6	钢板	324.87	461.85
11	球扁钢	378.21	523.24

表 4 钢筋材性试验结果

Tab.4 Material properties of rebar

钢筋直径/mm	强度类型	强度平均值/MPa
16	屈服	517.52
	抗拉	627.99
22	屈服	482.18
	抗拉	656.24

### 1.3 裂缝特征

各试验试件的荷载-裂缝宽度曲线如图 4 所示。由于 S4 试件的宽度与其他试件不同,这里为了方便与其他试件比较,将其对应的荷载放大 1.2 倍进行正则化处理。可以看出,达到相同的裂缝宽度时采用高强钢纤维混凝土的试件 S3 所能承受的荷载更大,采用  $\phi 16$  钢筋的试件 S2 比采用  $\phi 22$  钢筋的试件 S1 裂缝扩展的速度更快。采用球扁钢的试件 S4 比采用 U 肋的试件 S1 裂缝扩展速度略快。同时,试件 S1 与

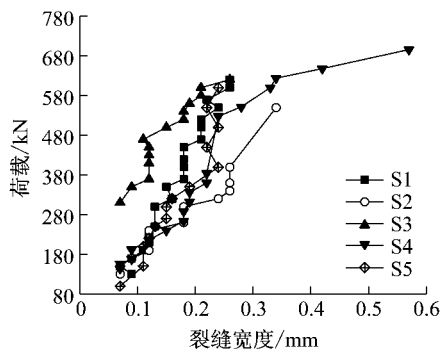


图 4 试件荷载-裂缝宽度曲线

Fig.4 Load-crack width curve of the specimens

S5 的裂缝扩展速率基本相同,说明剪力连接件的类型对负弯矩区裂缝的扩展影响不大。

各试件在最终破坏时的裂缝分布如图 5 所示。

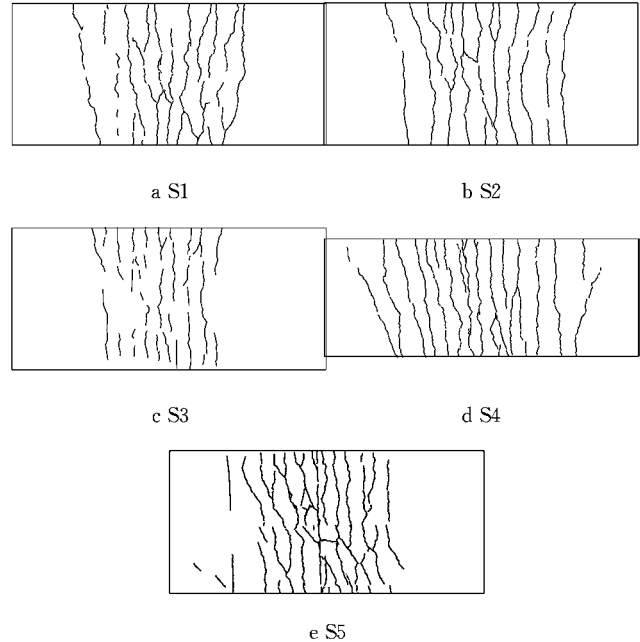


图 5 裂缝分布图

Fig.5 Crack distribution

从图 5 看出,对于试件 S1、S2、S3 和 S5 的混凝土裂缝主要集中在跨中  $L/2$  (2 m 范围,  $L$  为跨度),而试件 S4 裂缝分布范围较大,在  $3L/4$  范围内。对于试件 S3,由于采用纤维混凝土,其混凝土裂缝较少且稀疏,裂缝在试件宽度方向也没有形成通长裂缝,而其他试件均在试件宽度方向形成了通长裂缝。

## 2 混凝土裂缝宽度计算方法

### 2.1 钢筋应力

目前混凝土裂缝宽度的计算公式中都将裂缝截面钢筋应变作为一个主要影响因素考虑在内,因此准确计算开裂截面钢筋应力是混凝土裂缝宽度计算分析的基础。钢桥规范中对于组合梁受弯构件钢筋应力的计算采用如下方法:不考虑混凝土作用的开裂截面模量,按照受弯构件的截面应力计算公式计算。在弯矩  $M$  作用下钢筋的应力

$$\sigma_{ss} = \frac{My_r}{I_{cr}} \quad (1)$$

式中:  $y_r$  为混凝土中受拉钢筋距开裂截面中性轴的距离;  $I_{cr}$  为开裂截面惯性矩。

将采用式(1)计算的钢筋应力换算成应变,与试验测得的钢筋应变对比如图 6 所示。对比发现,式

(1)的计算值明显偏小.上述试验试件的混凝土裂缝宽度达到 0.2 mm 时,将跨中开裂截面的钢筋、钢顶板、U 肋(或球扁钢)下缘应变按照截面高度位置绘于图 7.可以看出,开裂截面应变已不再符合平截面假定,钢筋应变明显大于利用钢顶板、加劲肋底部应变按照平截面假定外推得到的应变.同时,对于常规混凝土试件,两者的差别较大,对于采用高强钢纤维混凝土的试件,两者的差别较小.可见,式(1)中认为开裂截面仍然符合平截面假定,是导致计算结果偏小的原因.

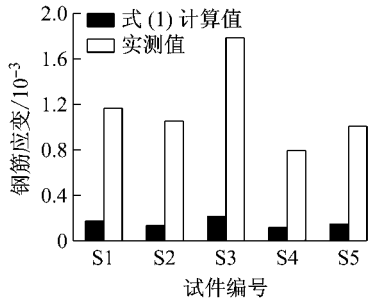


图 6 钢筋应变计算值与实测值对比

Fig.6 Comparison of rebar stress between calculation results by Eq. (1) and test results

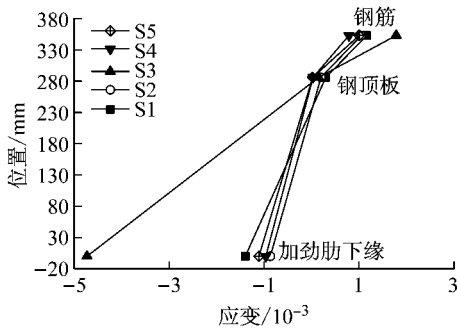


图 7 开裂截面应变

Fig.7 Strain distribution of cracked section

基于上述试验结果和理论分析,本文提出了计算组合桥面板负弯矩区混凝土开裂截面钢筋应力的公式,其推导过程如下所示:

计算中假定:①混凝土与钢顶板之间的剪力连接件完好,不会发生破坏,能够有效传递剪力;②混凝土与钢筋之间的黏结完好,两者之间不发生滑移;③未开裂截面仍符合平截面假定.

取图 8 的状态进行分析,此时,截面 2 位置的弯矩值刚好为开裂弯矩  $M_{cr}$ ,跨中弯矩为  $M$ ,在跨中截面 1 位置已经产生了一条贯通裂缝.取出截面 2 到截面 1 之间的组合桥面板段的混凝土板进行分析,其内力如图 9 所示.图 8 中, $M_{cr} = f_{tk} n_{sc} I_0 / y_{ct}$ ,其中  $y_{ct}$  为混凝土板顶缘到组合截面形心的距离,  $n_{sc}$  为钢与混凝土的弹性模量比,  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准

值,  $I_0$  为换算截面惯性矩.

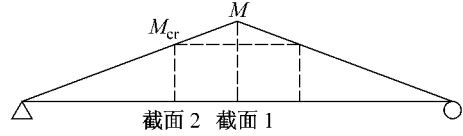


图 8 计算状态

Fig.8 Analysis stage

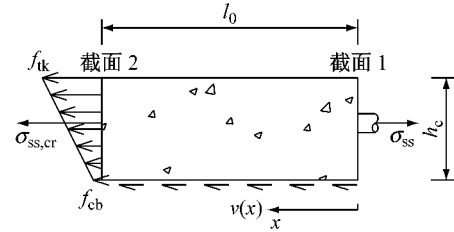


图 9 混凝土段内力

Fig.9 Stress distribution of concrete segment

由图 9 所示混凝土段  $x$  方向的合力为零可得

$$\sigma_{ss} A_r = \frac{1}{2} (f_{tk} + f_{cb}) h_c b + b \int_0^{l_0} v(x) dx + \sigma_{ss,cr} A_r \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{ss}$  为开裂截面(截面 1)钢筋应力;  $A_r$  为钢筋截面积;  $f_{cb}$  为开裂弯矩作用下混凝土截面下缘应力,  $f_{cb} = M_{cr} y_{cb} / I_0$ , 其中  $y_{cb}$  为混凝土下缘距组合截面中性轴的距离;  $h_c$  为混凝土高度;  $b$  为混凝土板宽度;  $v(x)$  为混凝土与钢之间的剪应力;  $l_0$  为截面 1 和 2 之间的距离;  $\sigma_{ss,cr}$  为开裂弯矩作用下钢筋应力,  $\sigma_{ss,cr} = M_{cr} y_r / I_0$ .

对于承受跨中集中荷载的简支梁,截面 1 和 2 之间剪力分布

$$F_v(x) = \frac{dM(x)}{dx} = \frac{M - M_{cr}}{l_0} = \frac{\Delta M}{l_0} \quad (3)$$

由此可以得到从截面 1 到 2 钢与混凝土之间的剪应力分布

$$v(x) = \frac{F_v(x) S^*}{I_0 b} = \frac{\Delta M S^*}{I_0 b l_0} \quad (4)$$

其中,  $S^*$  为混凝土板面积和钢筋面积对组合截面中性轴的静矩.

$$S^* = \frac{1}{n_{sc}} A_c y_c + A_r y_r \quad (5)$$

其中,  $y_c$  为混凝土板形心到组合截面形心的距离;  $A_c$  为混凝土板面积.

将式(4)和(5)代入式(2)得

$$\sigma_{ss} = \frac{(f_{tk} + f_{cb}) h_c b}{2 A_r} + \frac{\Delta M \left( \frac{1}{n_{sc}} A_c y_c + A_r y_r \right)}{I_0 A_r} + \sigma_{ss,cr} \quad (6)$$

进行简化后得到钢筋应力计算公式为

$$\sigma_{ss} = \frac{(f_{tk} + f_{cb})h_c b}{2A_r} + \frac{\Delta M A_c y_c}{n_{sc} I_0 A_r} + \frac{\Delta M y_r}{I_0} + \sigma_{ss,cr} \quad (7)$$

式(7)等号右边第一项和第四项的物理意义为混凝土截面开裂瞬间,原来混凝土所承担的力全部传递给钢筋承担,会使钢筋应力由  $\sigma_{ss,cr}$  瞬间产生一个增量.此后随着荷载的增加,产生的钢筋应力增量由第二项和第三项计算得到.

此外,特别需要说明的是,即使在截面 1(跨中开裂截面)和 2(弯矩值等于开裂弯矩的截面)之间还有

其他裂缝,也不会影响此公式计算的精度,因为只要混凝土和下部钢结构的剪力连接完好,混凝土和钢筋之间的黏结完好,就能保证剪力的顺畅传递,式(2)就能成立,由此计算得到的钢筋应力就具有足够的精度.

将由式(7)计算得到的钢筋应变和由钢桥规范推荐的式(1)计算得到的钢筋应变与实测值进行比较并绘于图 10.

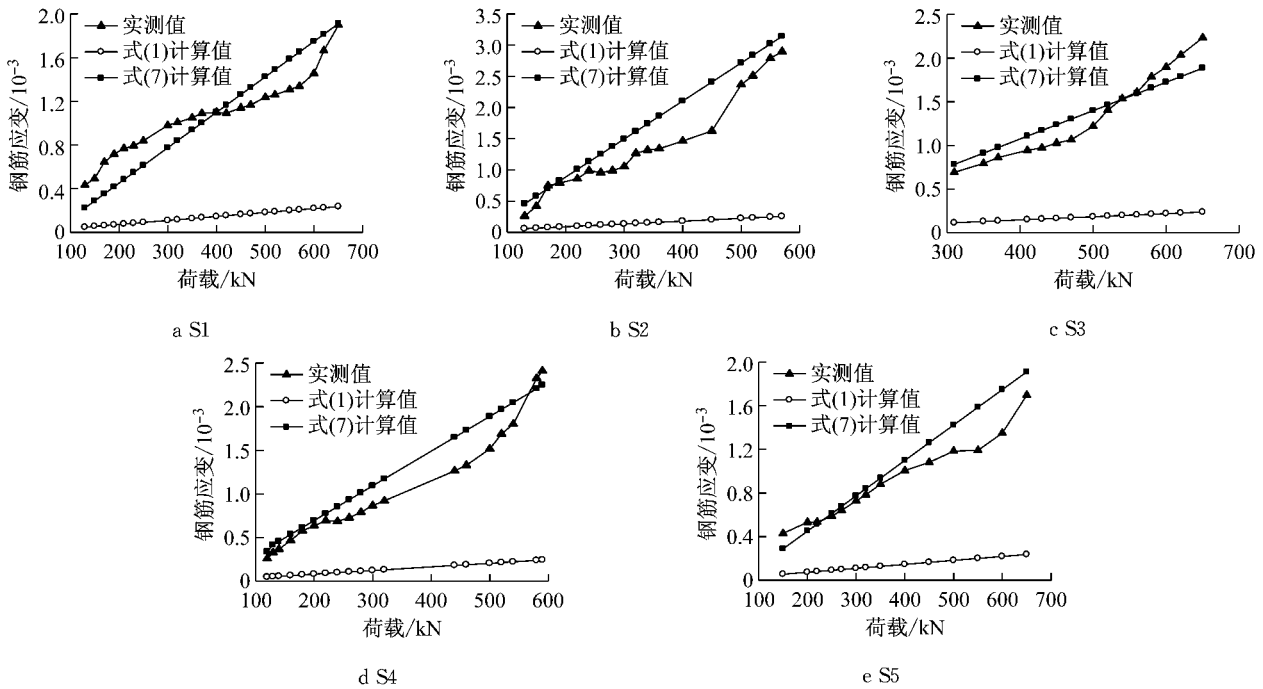


图 10 式(1)和(7)计算得到的钢筋应变和实测值对比

Fig. 10 Comparison of load-rebar stress among calculation results by Eq. (1), Eq. (7) and test results

从图 10 可以看出,由本文提出的式(7)计算得到的钢筋应变与实测值吻合较好,钢桥规范中推荐的式(1)计算出的结果明显小于实测值,而且变化趋势也与实测结果不符.可见平截面假定在开裂截面并不成立,基于此假定计算的钢筋应力、应变也会产生较大的偏差.

文献[12-15]中通过将红墨水或树脂注入裂缝观察混凝土开裂时的裂缝分布,得到了很多重要的结论,其中对混凝土开裂的特征作如下描述:① 裂缝表面是一个规则的曲面.混凝土裂缝宽度沿截面发生显著变化,在钢筋周界处的宽度最小,构件表面的混凝土裂缝宽度最大,两者相差 3~7 倍.② 钢筋周界处混凝土裂缝宽度很小,表明钢筋和混凝土的相对滑移小,即使是光圆钢筋,相对滑移也很小.③ 构件的受拉裂缝,除了表面垂直于钢筋轴线或间距和宽度都较大的主裂缝外,还有自钢筋表面横肋处

向外延伸的内部裂缝(即次裂缝),如图 11 所示.这些裂缝首先在裂缝截面附近产生,次裂缝数量较多,间距小,从钢筋向外延伸,但未到达构件表面<sup>[16]</sup>.可以看出,在裂缝截面附近,混凝土与钢筋虽然黏结完好,但由于次裂缝的存在两者的应变并不协调,钢筋应变要比周围混凝土应变大.这个现象进一步验证了上述推导的假定.

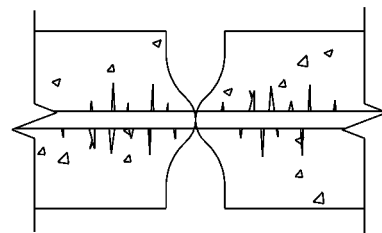


图 11 开裂位置示意

Fig. 11 The characteristics of crack region

## 2.2 混凝土裂缝宽度计算与结果对比

组合桥面板混凝土裂缝宽度与许多因素有关。除了上面提到的开裂截面钢筋应力外,还与组合结构力比、横向钢筋间距、配筋率、剪力钉间距、保护层厚度等诸多因素有关,以公预规和混凝土规范为代表的两类混凝土裂缝宽度计算公式分别不同程度地考虑了上述因素的影响。本文采用四种方法计算了试验中试件的混凝土裂缝宽度,并将其与试验值进行对比。

方法一,采用式(7)计算得到的钢筋应力,按照公预规中的混凝土裂缝宽度计算公式,采用偏心受拉构件的系数计算,计算公式如下:

$$w_{tk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left( \frac{30+d}{0.28+10\rho} \right) \quad (8)$$

式中: $C_1$ 为钢筋表面形状系数,对带肋钢筋取1.0; $C_2$ 为作用长期效应影响系数,由于采用试验试件,不考虑长期效应的影响,取1.5; $C_3$ 为与构件受力性质有关的系数,这里取偏拉构件系数1.1; $E_s$ 为钢筋弹性模量; $d$ 为钢筋直径; $\rho$ 为混凝土板配筋率。

由于组合桥面板在混凝土板下层还有正交异性钢板通过剪力连接件与混凝土连接,当混凝土开裂后,正交异性钢板的钢顶板也承受拉应力,和普通钢筋一样具有限制裂缝开展的作用。因此,在计算配筋率时也应该考虑这部分钢板的作用,经过笔者试算,发现不论普通钢筋如何配置,在考虑了钢顶板后,配筋率均会超过公预规公式的上限值0.02,所以这里5个试件的配筋率均取为0.02。

方法二,采用钢桥规范推荐的方法,即采用式(1)计算得到的钢筋应力 $\sigma_{ss}$ ,按照公预规中的混凝土裂缝宽度计算公式,用轴心受拉构件的系数 $C_3=1.2$ 计算,其他系数取值同方法一。

方法三,采用文献[6]提出的组合梁负弯矩区混凝土裂缝宽度计算公式计算,计算公式如下:

$$w_m = 1.45\psi'\epsilon_r l_{cr} \quad (9)$$

式中: $\psi' = 1.1 - \frac{1.5Rf_{tk}}{\rho_{ct}\sigma_r}$ 为钢筋应力不均匀系数,其中 $\rho_{ct}$ 为混凝土板配筋率, $\sigma_r$ 为钢筋应力, $R$ 为组合梁力比, $R = \frac{A_r f_{ly}}{A_s f_y}$ , $f_{ly}$ 为普通钢筋屈服强度, $A_s$ 为钢梁面积, $f_y$ 为钢梁屈服强度; $\epsilon_r$ 为钢筋应变。 $l_{cr}$ 为裂缝平均间距,计算公式如下:

$$l_{cr} = 1.1 \left( 2.7c + \frac{0.11}{\rho_{ct}/d + 0.25R^2/p} \right) \nu \quad (10)$$

式中: $c$ 为最外层受拉区钢筋的保护层厚度; $p$ 为栓钉连接件间距; $\nu$ 为与钢筋有关的系数,带肋钢筋为

0.7,光圆钢筋为1.0。

方法四,采用文献[8]提出的组合梁负弯矩区混凝土裂缝宽度计算公式计算,计算公式如下:

$$w_{max} = \alpha_{cr} \varphi (\sigma_{rk} / E_r) l_{cr} \quad (11)$$

$$\varphi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk} \sqrt{R_p}}{\rho_{te} \sigma_{rk}} \quad (12)$$

$$l_{cr} = l_a (1 - R_p^3) \quad (13)$$

式中: $\rho_{te}$ 为混凝土板配筋率; $\sigma_{rk}$ 为钢筋应力,采用式(1)计算; $E_r$ 为钢筋弹性模量; $l_{cr}$ 为裂缝间距; $\varphi$ 为钢筋应力不均匀系数; $R_p$ 为考虑了预应力钢筋后的合力比,对于组合桥面板,计算公式同方法三; $\alpha_{cr}$ 为构件的受力特征系数,取1.0; $l_a$ 为混凝土板横向钢筋间距。

需要说明的是,对于组合桥面板,由于混凝土板厚度较小,只配置一层钢筋,中性轴一般在混凝土和钢交界的位置,负弯矩区开裂时混凝土全截面承受拉应力,因此在计算截面配筋率时,不宜按照公预规中规定将轴心受拉构件受拉钢筋面积取一半,而应取所有受拉钢筋面积计算配筋率。

上述四种方法的计算结果与实测值的对比如图12所示。

由图12可以看出,对于试件S1,方法一的计算结果与实测值吻合较好,方法二、方法三和方法四的计算结果偏小。对于试件S2,方法一、方法三和方法四计算结果均与实测值吻合较好,其中方法一在混凝土裂缝宽度小于0.3 mm时计算结果较为准确,混凝土裂缝宽度大于0.3 mm后计算结果偏大;试件S3采用了钢纤维混凝土,方法一计算结果趋近实测值的上限,计算结果较为保守,方法二和方法四与实测值吻合较好,方法三结果偏小。对于试件S4和S5,方法一计算结果与实测值较为吻合,方法二、三和四的结果均偏小。总体而言方法一的计算结果与试验结果的吻合情况最好。

由上述分析可以看出,对于组合桥面板,在进行负弯矩区混凝土裂缝宽度验算时,采用本文提出的方法计算钢筋应力,并使用公预规提出的混凝土裂缝宽度计算公式按照偏心受拉构件计算,可以得到与实测值较为吻合的结果,且概念清晰,推荐在进行桥面板负弯矩区混凝土裂缝宽度验算时使用。对于采用钢纤维混凝土的组合桥面板,此方法计算结果略微保守。

## 3 结论

(1) 根据5个试件的试验结果,可以观察到如下

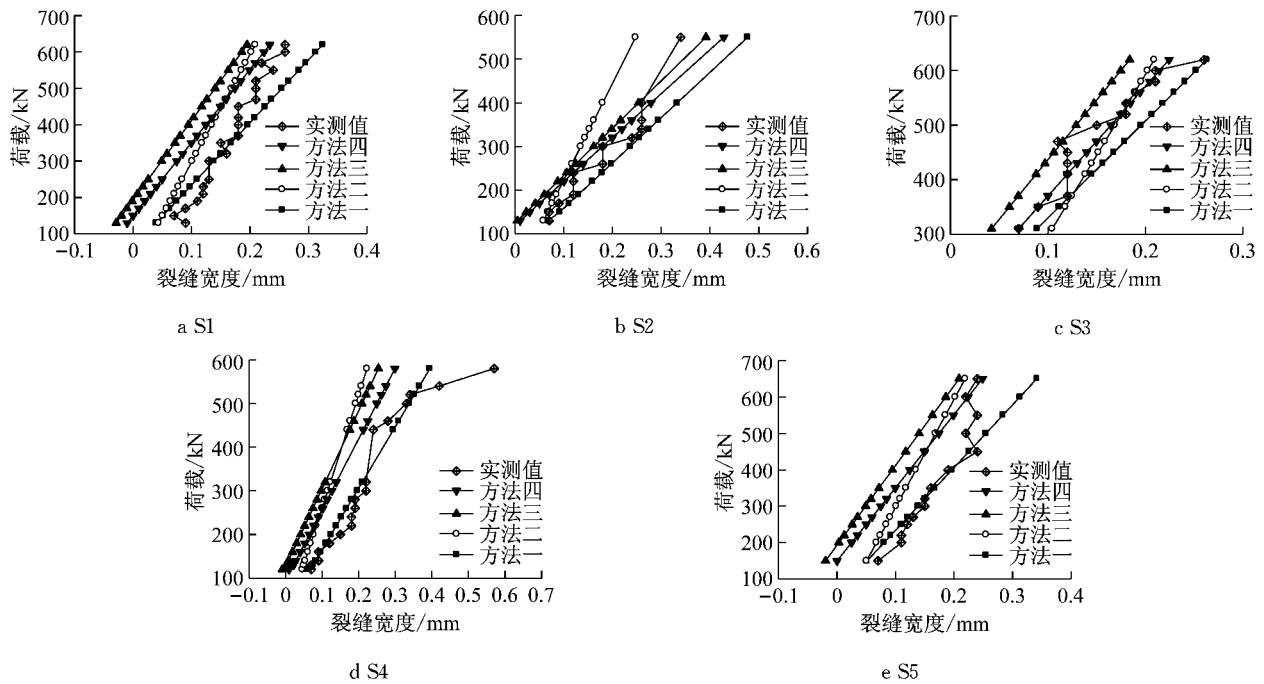


图 12 混凝土裂缝宽度计算结果与实测值对比

Fig. 12 Comparison of load-crack width between calculation results and test results

试验现象:混凝土标号、钢筋直径、加劲肋类型对负弯矩区裂缝的扩展速率有较为显著的影响,而剪力连接件形式的影响不大.其中,采用钢纤维混凝土的试件开裂荷载较高,采用细直径钢筋的试件裂缝扩展较快,采用球扁钢的试件在破坏时裂缝的分布范围较采用U肋的试件更大.由于试件数量有限,上述试验现象仍然需要大量试验试件进行验证.

(2) 开裂截面钢筋和正交异性钢板的应变分布并不符合平截面假定,实际钢筋的应变明显偏大,常规混凝土钢筋应力实测值与按平截面假定计算得到的结果差别较大,高强钢纤维混凝土两者的差别则较小.

(3) 推导了组合桥面板负弯矩区开裂截面钢筋应力的计算公式,计算结果与实测值吻合较好.

(4) 采用四种方法计算了5个试件的混凝土裂缝宽度,发现采用本文推荐钢筋应力公式,并使用公预规提出的混凝土裂缝宽度计算公式按照偏心受拉构件计算,可以得到与实测值吻合较好的结果.

#### 参考文献:

[1] ZHANG Qinghua, CUI Chuang, BU Yizhi, *et al.* Fatigue tests and fatigue assessment approaches for rib-to-diaphragm in steel orthotropic decks [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 114: 110.

[2] XU W, ZHANG X N. Experimental and numerical simulation

study on the crack of steel orthotropic bridge deck pavement [C]//6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Chicago: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2008.

- [3] ALLAHYARI H, DEHESTANI M, BEYGI M H A, *et al.* Mechanical behavior of steel-concrete composite decks with perfbond shear connectors [J]. *Steel and Composite Structures*, 2014, 17(3): 339.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG D62—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [6] 聂建国, 张眉河. 钢-混凝土组合梁负弯矩区板裂缝的研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1997, 37(6): 97. NIE Jianguo, ZHANG Meihe. Study on the crack of concrete flange in tension of composite steel-concrete beams [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1997, 37(6): 97.
- [7] 余志武, 郭凤琪. 部分预应力钢-混凝土连续组合梁负弯矩区裂缝宽度试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(4): 55. YU Zhiwu, GUO Fengqi. Experimental study of crack width in negative bending region of partially prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Building*

- Structures, 2004, 25(4): 55.
- [8] 张彦玲, 樊健生, 李运生. 连续组合梁桥裂缝发展规律分析及裂缝宽度计算[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 84.  
ZHANG Yanling, FAN Jiansheng, LI Yunsheng. Law of crack development and calculation of crack width of continuous composite beams [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 84.
- [9] 张彦玲. 钢-混凝土组合梁负弯矩区受力性能及开裂控制的试验及理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
ZHANG Yanling. Theoretical analysis and experimental research on behavior and crack control of negative moment zone in steel-concrete composite beams [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [10] RYU H-K, CHANG S-P, KIM Y-J, *et al.* Crack control of a steel and concrete composite plate girder with prefabricated slabs under hogging moments [J]. Engineering Structures, 2005, 27 (11): 1613.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [12] BROMS B B. Crack width and crack spacing in reinforced concrete members [J]. ACI Structural Journal, 1965, 62(10): 1237.
- [13] BROMS B B, LUTZ L A. Effects of arrangement of reinforcement on crack width and spacing of reinforced concrete members [J]. ACI Journal Proceedings, 1965, 62(11): 1395.
- [14] BASE G D. Crack control in reinforced concrete-present position [C]//Symposium on Serviceability of Concrete. Melbourne: Institution of Engineers, 1975:1-10.
- [15] REED J B, BASE G D, BEEBY A W, *et al.* An investigation of the crack control characteristics of various types of bar in reinforced concrete beams [R]. London: Cement and Concrete Association, 1966.
- [16] 丁崑. 钢筋混凝土结构裂缝宽度计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
DING Wei. The study on crack width calculation methods of reinforced concrete structure [D]. Tianjing: Tianjing University, 2007.

~~~~~

(上接第 798 页)

- LUO Lisheng, LUO Yongfeng, GUO Xiaonong. Overall stability of existing reticulated shells considering the effect of geometric position deviation of joints [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2013, 40(3):26.
- [6] 刘慧娟, 罗永峰, 杨绿峰, 等. 单层网壳结构稳定性分析的随机缺陷模态迭加法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(9):1294.  
LIU Huijun, LUO Yongfeng, YANG Lufeng, *et al.* Stochastic imperfection mode superposition method for stability analysis of single-layer lattice domes [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(9):1294.
- [7] ARREGUI-MENA J D, MARGETTS L, MUMMERY P M. Practical application of the stochastic finite element method [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(1):171.
- [8] 沈士钊, 陈昕. 网壳结构稳定性 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
SHEN Shizhao, CHEN Xin. Stability of reticulated shells [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [9] LIMA M D C S, CORDEIRO G M, ORTEGA E M M. A new extension of the normal distribution [J]. Journal of Data Science, 2015, 13:385.
- [10] CHEN Gengbo, ZHANG Hao, RASMUSSEN K J R, *et al.* Modeling geometric imperfections for reticulated shell structures using random field theory [J]. Engineering Structures, 2016, 126:481.
- [11] 唐敢, 黎德琳, 赵才其, 等. 空间结构初始几何缺陷分布规律的实测数据及统计参数 [J]. 建筑结构, 2008, 38(2):74.  
TANG Gan, LI Delin, ZHAO Caiqi, *et al.* Statistical regulation and parameter study on initial geometrical imperfections of spatial structures based on measured data [J]. Building Structure, 2008, 38(2):74.
- [12] 刘学春, 张爱林, 葛家琪, 等. 施工偏差随机分布对弦支穹顶结构整体稳定性影响的研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):76.  
LIU Xuechun, ZHANG Ailin, GE Jiaqi, *et al.* Study on the influence of construction deviation random distribution on the integral stability of suspend-dome [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 76.
- [13] BRUNO L, SASSONE M, VENUTI F. Effects of the equivalent geometric nodal imperfections on the stability of single layer grid shells [J]. Engineering Structures, 2016, 112:184.
- [14] DEGROOT M H, SCHERVISH M J. Probability and statistics [M]. New Jersey: Addison-Wesley, 2011.
- [15] 陈希孺. 高等数理统计学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.  
CHEN Xiru. Advanced mathematical statistics [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009.
- [16] PUGA J L, KRZYWINSKI M, ALTMAN N. Points of significance; Bayesian statistics [J]. Nature Methods, 2015, 12(5):377.