

文章编号: 0451-0712(2006)04-0124-05

中图分类号: U443.33

文献标识码: B

钢纤维混凝土桥面抗裂性能及 设计和施工技术

王钧利

(长安大学公路学院公路桥梁与隧道陕西省重点实验室 西安市 710064)

摘 要: 基于混凝土断裂力学的基本理论,通过分析钢纤维的阻裂作用和增强效果,对钢纤维混凝土的抗裂度和裂缝宽度的计算模式进行探讨,提出了相应的公式。通过对已建钢纤维混凝土桥面长期使用性状的分析,对钢纤维混凝土桥面设计中的钢纤维类型、用量、剪力筋的设置及施工工艺等提出了具体要求。通过力学性能和使用性能综合比较,铣削型钢纤维是最佳选择;钢纤维用量的体积比宜为 0.6%~1.0%;施工时选择适宜的水灰比和振捣器具。

关键词: 桥梁工程; 钢纤维混凝土桥面; 断裂力学; 抗裂性能; 钢纤维用量; 施工工艺

水泥混凝土桥面虽然耐久性好、养护费用少,但普通水泥混凝土桥面开裂翻修的实例屡见不鲜。钢纤维的掺入,在理论上可以数倍提高水泥混凝土桥面的寿命,我国从 20 世纪 80 年代就开始修建钢纤维混凝土桥面,但一直未有大规模的使用。其原因一方面是由于水泥混凝土桥面施工控制难度大;另一方面因掺加钢纤维而使成本较高,决策者对其能否达到理想寿命没有信心。

钢纤维混凝土是在普通混凝土中随机掺入乱向分布的短钢纤维所形成的一种新型的多相复合材料。这些乱向分布的短纤维主要作用在于阻碍混凝土内部微裂缝和宏观裂缝的发生与发展,显著地提高了混凝土的抗拉强度及由主拉应力控制的抗弯强度、抗剪强度。钢纤维混凝土较好的韧性及控制裂缝的能力,弥补了混凝土的不足,成为混凝土良好的改性材料。钢纤维混凝土在发达国家和发展中国家的

基金项目:西部交通建设科技项目(2002 318 223 29)

收稿日期:2005-11-03

Stability and Vibration of Long Span CFST Arch Bridges

PENG Wei¹, ZHANG Xin-jun²

(1. Jinhua Vocational Technology College, Jinhua 321017, China;

2. College of Architecture & Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The lateral buckling and seismic response of the space arch structure composed of double main arch ribs with transverse braces are analyzed in this paper. First, the elastic critical buckling load of this kind of structures is deduced according to the principle of minimum potential energy, the influences of the space length and the stiffness of bracing beams on the lateral stability of structure are discussed. Secondly, the seismic response behavior is systematically introduced based on the theory of multi-support seismic excitations and the conception of pseudo-static displacement. The numerical results show that the travelling wave effect has significant influence on the long span arch bridge, the arrangement of bracing beams is sensitive to stability.

Key words: arch bridge; stability; seismic response; travelling wave effect; CFST

开发研究受到普遍重视,但是其基本理论和工程应用的研究还不够完善,施工质量也达不到要求。本文尝试从断裂力学的角度,探讨钢纤维混凝土裂缝计算的新途径,建立抗裂度的计算模式,并根据已建钢纤维混凝土桥面实例分析,对钢纤维种类的选择、用量和施工性能进行研究,提出了最佳的设计方案和施工工艺。

1 钢纤维的阻裂作用

1.1 钢纤维的阻裂作用

混凝土是一种多相复合材料。由于收缩、泌水以及骨料下沉等原因,混凝土在粗骨料表面和水泥浆结构中会产生微裂缝。在车辆荷载和温度变化的作用下,微裂缝不断产生和扩展,并与孔隙等其他先天缺陷汇合,产生较大的应力集中,成为混凝土破坏的根源。1961年Kaplan首先将断裂力学应用于混凝土,并进行了混凝土断裂韧性试验。为建立合理的混凝土断裂模型,许多学者先后提出了多种不同的断裂理论和模型,证明了断裂力学理论对于混凝土的适用性。

掺入钢纤维后,混凝土的抗裂性能得到明显改善。如果微裂缝的长度大于纤维间距,钢纤维将跨越裂缝起到传递荷载的桥梁作用,约束裂缝的进一步扩展;如果长度小于纤维间距的原生裂缝扩展时遇到纤维,纤维将迫使其改变延伸方向或跨越纤维生成更微细的裂缝场,显著增大了微裂缝扩展的能量消耗。钢纤维混凝土桥面在荷载增大,超过水泥浆体所能承受的拉力时,力通过水泥浆与纤维的粘结力传递给钢纤维,承受更大的荷载并产生弹塑性变形。钢纤维的约束作用,推迟了新裂缝的出现并限制了裂缝的扩展。在相同荷载时,由于钢纤维的弹性模量较混凝土基体的弹性模量高出10倍以上,所以大部分荷载由横贯裂缝的钢纤维来承担,从而提高了桥面铺装的承载能力。当裂缝尖端与钢纤维相遇时,因裂缝无法直接通过而偏转了方向,缓冲了裂缝尖端处的应力集中程度,阻止了裂缝的扩展。

1.2 钢纤维的增强效率

从断裂力学来讲,钢纤维对混凝土最有效的增强状态是钢纤维较密集地分布于应力大的部位,钢纤维的取向最好是主拉应力的方向。假设各个方向的钢纤维分布均匀,增强效率系数为 η ,则:

(1)当钢纤维与拉应力方向相同(即垂直于裂缝方向)时,钢纤维对混凝土的增强效果最好,掺入的

钢纤维利用率最高,即 $\eta \rightarrow 1$;

(2)当钢纤维垂直于拉应力方向(即与裂缝方向相同)时,增强效果趋于零,即 $\eta \rightarrow 0$;

(3)对于其他分布方向的钢纤维,按照它与拉应力方向的夹角 θ , $\eta = \cos \theta$ 。

可见,实际工程中应尽量使钢纤维处于有利的部位和方向,以便发挥增强效率。

1.3 钢纤维对剪切延性的影响

随着钢纤维掺量的增大,混凝土的剪切延性有所提高。钢纤维对延性的增强主要是通过两个方面来实现的:一方面钢纤维改善了混凝土的韧性,显著提高了剪压区混凝土的极限压应变和变形能力;另一方面,跨越斜裂缝的钢纤维承担了混凝土释放的应力,并限制斜裂缝的开展,增强了骨料的咬合作用,斜裂缝张开的过程同时也是钢纤维缓慢拔出的过程,使得荷载在达到峰值以后,能够相对缓慢地回落。

2 钢纤维混凝土裂缝的分析

2.1 裂缝分析

由于钢纤维的阻裂作用,使钢纤维混凝土在破坏之前有较大范围的缓慢稳定裂缝扩展。钢纤维混凝土的裂纹扩展过程大致是:随着荷载的增加,当裂缝扩展通过纤维增强效应区时,裂缝将受到纤维的阻挡而缓慢发展或改变方向绕过纤维而在另一个较易通过的区域内通过,然后又被其他纤维阻挡。同时,开裂区的纤维提供拉拔阻力,阻止裂纹张开。由于纤维的乱向分布,使这种阻裂也是乱向的,这样就增加了裂纹开裂路径的曲折性,使钢纤维混凝土材料在荷载作用下表现为裂纹缓慢的增长,呈现出“塑性”特征。在该区域内,混凝土基体开裂,但纤维阻止裂纹张开,其阻裂效果与纤维拔出量有关。随着裂纹缓慢增长,材料中扩展裂纹所需的能量逐渐增加,直至达到某一临界值而发生裂纹快速扩展或断裂。

根据裂缝在荷载作用下扩展形式的不同,可以把裂缝分为张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。对于混凝土这种脆性材料而言,张开型是最常见,也是最重要的形式。

根据断裂力学理论,I型裂缝尖端的应力场强度因子可表示为:

$$K_I = g\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中: g 为几何因子,主要与相对裂缝深度有关,即 $g = g(a/h)$; σ 为平均拉应力。

K_I 反映了裂缝尖端区域内应力场的强弱情况。钢纤维的加入相当于在裂缝尖端施加一个反向应力场,使应力场强度因子被抵消一部分。钢纤维混凝土的裂缝尖端应力场强度因子 K_{fI} 可表示为:

$$K_{fI} = K_I - K_f \quad (2)$$

式中: K_I 为无钢纤维的混凝土的应力场强度因子; K_f 为钢纤维引起的应力场强度因子下降的部分。

混凝土的裂缝尖端附近存在着一个微裂区,微裂区由许多微裂缝组成,混凝土的断裂性能即受这些微裂缝的发生和发展的影响。裂缝尖端的张开位移则是反映材料非线性特性的综合指标,按断裂力学方法可求裂缝尖端垂直于裂缝方向的位移 δ :

$$\delta = \frac{4K_I^2}{\pi\sigma_s E} \quad (3)$$

式中: σ_s 为屈服极限; E 为弹性模量。

考虑钢纤维的影响后,钢纤维混凝土的裂缝尖端张开位移 δ_f ,可简化为:

$$\delta_f = \frac{4K_{fI}^2}{\pi\sigma_s E_{fc}} \quad (4)$$

这里 σ_s 可取钢纤维混凝土的抗拉强度,由文献[2]可得, $\sigma_s = f_{ft} = (1 + \alpha\lambda_f)f_t$; E_{fc} 为钢纤维混凝土的弹性模量,可与普通混凝土取相同值,即 $E_{fc} = E_c$ 。

2.2 抗裂计算

试验表明,钢纤维对混凝土微观开裂的迟早并无影响,钢纤维只在微观开裂后才真正发挥作用。

当钢纤维混凝土出现裂缝时, K_{fI} 达到临界值 K_{fIc} , K_{fIc} 称为断裂韧度,它表示材料本身所固有的抵抗裂缝扩展的能力,需要通过试验确定。 σ_{fc} 应力就是构件的开裂应力,根据式(1)、式(2)可得:

$$\sigma_{fc} = \frac{K_{fIc} + K_f}{g\sqrt{\pi a}} \quad (5)$$

或 $\sigma_{fc} = \Psi \frac{K_{fIc}}{g\sqrt{\pi a}}$

式中 Ψ 为考虑了钢纤维影响的提高系数 ($\Psi > 1$),和钢纤维的含量特征 $\lambda_f = \rho_{ff} l_f / d_f$ 有关,可用 $\Psi = 1 + A\lambda_f$ 表示, A 可以通过试验数据的统计分析得到。目前尚缺乏这方面的数据,有待进一步的研究。

3 钢纤维类型的选择

3.1 各类钢纤维的特点

钢纤维类型有:(1)剪切平直型钢纤维,其抗拉强度大多为 380 MPa;(2)剪切异形钢纤维,这种钢纤维有多种异形,如波浪形、凹凸形、凸痕形、扭曲形

等,抗拉强度一般在 600 MPa 以上;(3)铣削型钢纤维是采用钢锭为原料,用铣刀进行切削制成的纤维,特点是轴向有扭曲,截面呈三角形,切割时由于刀具的挤压,有一个面形成粗糙面,端部弯折成尾钩;(4)钢丝型钢纤维采用钢丝割切而成,两端带钩,呈弓形,目前最先进的钢丝型钢纤维抗拉强度高达 1 000 MPa 以上。

这几种钢纤维目前的市场价由高至低依次为:钢丝端钩型、铣削型、剪切异型、剪切平直型。

3.2 钢纤维性能比较试验

按同一配合比,分别掺入 4 种钢纤维及 1 组素混凝土,做弯曲韧性试验,试验数据见表 1。

表 1 抗弯初裂荷载对比

类 别	素混凝土	剪切平直型 (300 MPa)	剪切波 纹型	铣削型	钢丝端 钩型
抗弯初裂荷载/kN	26	44.8	50.3	54.3	51.3
比素混凝土增强效果/%		72	93	108	97

对于极限荷载,剪切波纹型、铣削型和钢丝型钢纤维明显高于平直剪切型钢纤维,前 3 种之间稍有差异,以钢丝型最高。对于初裂荷载,以铣削型最高,剪切波纹型稍低,钢丝型初裂荷载相对于铣削型较低,但初裂后仍有较长的缓慢上升阶段,钢丝型的弯曲韧性系数明显大于其他类型。弯曲韧性系数大,意味着吸能程度大。当混凝土出现可见裂纹以后,钢丝锚固端能限制裂缝的延伸,使结构仍有较好的承载力,呈现出良好的塑性。因此钢丝型纤维较适宜于变形较大或允许带裂纹工作的结构。

桥面铺装不是桥梁的主要承重结构,我们更关心的是避免裂缝的产生。桥面开裂后,由于渗水锈蚀作用,加上裂口处水泥砂浆的迅速磨损脱落,会直接影响桥面及梁体的耐久性。因此,桥面铺装混凝土的设计应以初裂强度为控制目标,而不是极限强度。从抗初裂性能上分析表明,铣削型钢纤维性能最适合于桥面铺装,剪切异型稍次之。由于异形剪切钢纤维的品种很多,不同的形状对钢纤维在混凝土中的性能有一定的影响,试验表明,凸痕形钢纤维混凝土抗拉、抗折强度最高。这是因为凸痕形与其他形状不同之处在于其端部有锚固头,锚固头在钢纤维受力的初期即参与受力,有利于提高混凝土的初裂强度,其力学性能可达到与铣削型钢纤维相当的水平。

3.3 施工性能的对比

Bekert 钢丝钢纤维和铣削型钢纤维不易结团,

而且纤维分散得较均匀。剪切型钢纤维都有结团现象,以波纹形最严重。不结团的铣削型钢纤维较适合滑模摊铺。

3.4 综合选择

通过以上的力学性能、使用性能和经济性综合比较,可做出以下评价:铣削型钢纤维是最佳选择;如果采用人工摊铺或资金有限,可以使用剪切异形钢纤维中的凸痕形、端粗形;再次是扭曲形、直线形等;剪切波纹型因较易结团,不便使用。

4 钢纤维混凝土桥面的实例分析

1988年在广东省江门外海大桥桥面全部采用钢纤维混凝土,无钢筋网,钢纤维采用钢丝端钩形,掺入量为0.4%(体积比),铺装层与梁面没有剪力筋等特殊处理方式。截至2003年4月,桥面因碎裂、坑洞而修补的面积约占2%,一半的桥面出现了裂纹,局部质量薄弱处开始破碎。经分析认为:该钢纤维桥面未能达到理想寿命的原因为钢纤维掺量偏少、无钢筋网、铺装层下无剪力筋。凭这种条件能达到目前这样的完好率,说明钢纤维混凝土桥面耐久性还大有潜力可挖。

广东九江大桥建于1996年,掺1%(体积比)的剪切平直型钢纤维,内设钢筋网和扩张网。广州市解放大桥于1998年建成,钢纤维采用钢丝端钩形,掺入量为0.6%(体积比),设置钢筋网(8 cm×8 cm)。这2座桥经过7~9年的运行,桥面仍完好无裂纹。

5 施工技术

5.1 选择适宜的配合比

一般认为,钢纤维用量越多,混凝土力学性能越好,但在实际应用时,选择钢纤维用量要考虑施工操作性和经济性。

在几个工地上针对搅拌问题做了工艺试验,结果发现,在大规模钢纤维混凝土生产中,体积率超过1.2%以上时,有相当数量的钢纤维结团。从已建成的桥面来看,如果钢纤维掺量超过1%,则桥面钢纤维外露量较大,外观较差。国内外资料表明,钢纤维混凝土中纤维的体积率低到一定程度时不起增强作用。对于不同品种、不同长径比的纤维,最低体积率略有不同。对于剪切型、溶抽型钢纤维,0.5%是国内外广泛认可的最小体积率。铣削型钢纤维最小体积率规定为0.4%。

综上所述,对于大规模采用钢筋加钢纤维混凝

土的桥面铺装,在现有的钢纤维材料和设备条件下,钢纤维的掺量(体积率)推荐为0.4%~1.0%之间。钢纤维长度应与混凝土粗集料最大公称粒径相匹配,最短长度宜大于粗集料最大公称粒径的1/3,最大长度不宜大于粗集料最大公称粒径的2倍。钢纤维混凝土的弯拉强度标准值不小于6 MPa。

施工配合比,既不要使钢纤维结团,又不能因水灰比太大而使钢纤维因振捣而竖向排列或下沉。

5.2 适宜的振捣器具

影响钢纤维在混凝土中分布和取向的主要因素有振捣方法、振捣时间及模板尺寸等。在进行振动捣固时,由于重力的作用,钢纤维会不断向模板的下部移动和集中,并趋于在垂直于浇筑方向的平面内取向。另外,由于边壁效应,靠近模板边壁的钢纤维将趋于在平行于边壁方向的平面内取向。

桥面的开裂首先会出现在表面,多为竖向裂缝,因此,尽可能使钢纤维水平分布,所以桥面混凝土施工适宜采用振动梁和平板振捣器,不得使用振捣棒竖向插入振捣混凝土。

5.3 水泥混凝土桥面铺装分层结合面的处理

桥面铺装是在箱梁上或是在梁板顶部整体化层之上浇筑,铺装层与结构层之间存在一结合面。实践表明,许多桥面出现早期破坏,结合面处理不好是极重要原因。因此,结合面处理质量的好坏直接影响桥面铺装层的使用寿命。使用钢纤维混凝土,一次浇筑方案比分层浇筑方案将增加钢纤维的用量,造价较高。两次浇筑的混凝土,结合面是薄弱面,抗分层能力达不到整体浇筑混凝土的水平,而且两次浇筑的混凝土还存在一个收缩差异,在层间结合面会储存一定的剪应力,与外在作用叠加,就有可能出现分层。因此,在分层浇筑的情况下,设置层间剪力筋是必要的措施。

预埋剪力筋可制作成U形,还可起到定位钢筋网架的作用。剪力筋的用量国内规范尚无规定,可参考美国公路桥梁设计规范,以没有接缝的整体浇筑混凝土为参照,求出分层浇筑有接缝的混凝土要达到整体浇筑等效抗剪强度所需要的配筋量。界面的公称抗剪力取为:

$$V_n = cA_{cv} + \mu[A_{vt}f_y + P_c] \quad (6)$$

式中: A_{cv} 为介入剪力传递的混凝土面积,mm²; A_{vt} 为穿过剪力平面的剪力筋面积,mm²; f_y 为钢筋的屈服强度,MPa; P_c 为垂直于剪力平面的永久净压力,N;对于桥面铺装,设 $P_c=0$; μ 、 c 为摩擦力系数

和粘结力系数。 μ 、 c 按下列情况取值:(1)对整体浇筑的混凝土, $c=1.0$ 、 $\mu=-1.4$ (此时 $A_{ur}=0$);(2)对已硬结的清洁无浮浆、表面已加工、粗糙度达到 6 mm 的紧贴浇筑混凝土, $c=0.7$ 、 $\mu=-1.0$ 。

6 结语

(1)应尽可能使钢纤维均匀分布在混凝土基体中,最好能使钢纤维定向排列并处于有利的方向和部位,使其达到最佳受力状态,发挥最大的增强效果。

(2)用断裂力学方法进行钢纤维混凝土裂缝的分析与计算是一种合理有效的手段,这是因为钢纤维混凝土材质仍是偏脆性的,且其内部也存在原生微裂缝和空洞等缺陷,这些都与断裂力学的假定相符。

(3)通过力学性能、使用性能和经济性综合比较,铣削型钢纤维是最佳选择。如果采用人工摊铺或资金有限,可以使用剪切异形钢纤维中的凸痕形、端粗形。再次是扭曲形、直线形等。

(4)钢纤维混凝土桥面的钢纤维掺入量体积比为 0.6%~1.0%,单丝钢纤维抗拉强度不小于 600 MPa,应使用经过防锈蚀处理且具有锚固端的钢纤维;钢纤维长度应与混凝土粗集料最大公称粒

径相匹配,最短长度宜大于粗集料最大公称粒径的 1/3,最大长度不宜大于粗集料最大公称粒径的 2 倍。

(5)钢纤维用量适当加大,采用初裂强度高的铣削型钢纤维,施工过程中选择最佳配合比,认真执行操作规程,特别要注意振捣器具的选择和使用,才能使得桥面完好使用 20~30 年得以实现。

参考文献:

- [1] 曾志兴. 基于断裂力学的钢纤维混凝土裂缝的研究[J]. 工业建筑, 2005, (3).
- [2] JTG D40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [3] 李彦兵. 建造长寿命水泥混凝土桥面[J]. 公路, 2004, (8).
- [4] Vishalvanich K, Naanam A E. Fracture Model for Fiber Reinforced Concrete [J]. J. of the ACI, 1983, 80(2).
- [5] 王钧利. 桥面铺装疲劳性能及可靠性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, (3).
- [6] Ashour SA, Wafa FF. Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams [J]. ACI Struct J. 1993, 90(3).

Cracking Resistance Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Bridge Floor and Its Design and Construction Techniques

WANG Jun-li

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: On the basis of the fracture mechanics theory of concrete, the cracking resistance function and reinforcing effects of steel fiber are analyzed. It is discussed that the method for calculating the cracking resistance and the width of the cracks in steel fiber reinforced concrete and the corresponding formula are presented. Through analyzing the long term performance of steel fiber reinforced concrete bridge floor, it is put forward that the steel fiber type and its dosage, the setting of shearing steel bar in design and construction techniques. Colligated all sides, the best steel fiber is milling type fiber; the dosage of steel fiber is 0.6%~1.0% (volume ratio); the most suitable ratio of water and cement and the most suitable shaker must be chosen.

Key words: bridge engineering; steel fiber reinforced concrete bridge floor; fracture mechanics; crack resistance performance; dosage of steel fiber; construction techniques