

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.011

# 某桥索塔新旧混凝土结合段防裂处理技术

杨向阳<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>, 李雄<sup>2</sup>, 王功勋<sup>2</sup>, 孙洪鑫<sup>2</sup>

(1. 湘潭城建集团有限公司, 湖南 湘潭 411104; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对杨梅洲大桥主塔因新旧混凝土浇筑龄期差引起混凝土可能开裂的问题,通过室内试验优化混凝土配合比,研究不同纤维长度和掺量对混凝土干缩性能与抗裂性能的影响,测试不同界面处理方法下新旧混凝土结合面的黏结性能,并通过 Midas Civil 软件对新老混凝土结合面的收缩应力进行分析。结果表明:在相同聚丙烯纤维掺量条件下,掺长纤维的混凝土抗收缩效果要好于短纤维混凝土;与基准混凝土相比,单掺 0.92 kg/m<sup>3</sup> 聚丙烯长纤维混凝土的收缩率最小,收缩率降低值达 269×10<sup>-6</sup>;掺长纤维能显著降低裂缝宽度,但细微裂纹数量有所增加。结合面最佳处理方式是将旧混凝土表面凿毛并涂刷界面剂,再浇筑纤维混凝土,其黏结性能要高于其他处理方式。数值分析结果表明:在最优处理方案下,新老混凝土交界面的最大黏结拉应力从 3.10 MPa 降至 2.45 MPa,有效降低了新老混凝土结合面的收缩应力。

**关键词:**新老混凝土;纤维混凝土;抗裂性能;干缩性能;有限元分析

**中图分类号:** U446 **文献标志码:** A

湖南湘潭杨梅洲大桥为主跨 658 m 双塔双索面半漂浮体系斜拉桥,索塔为矩形空心混凝土独柱形塔,塔高 181 m,采用 C55 混凝土,河西塔柱浇筑达到约 140 m 后停工 1 年半,需要继续浇筑约 40 m 中塔柱。受旧混凝土的约束作用以及新浇筑混凝土自收缩、干燥收缩的共同作用,新浇筑塔段混凝土极易在内部产生拉应力,极易产生裂缝,并降低其耐久性<sup>[1-2]</sup>。已有研究表明:混凝土强度越高,内部自约束应力越大<sup>[3]</sup>。新老混凝土收缩性能的差异,导致其结合面通常被认为是混凝土结构的薄弱环节<sup>[4-5]</sup>。

国内外通常采用掺纤维及在结合面涂刷界面剂相结合的方式降低因龄期差异引起的混凝土收缩裂缝。Islam 等<sup>[6]</sup>研究结果证实:与普通混凝土相比,掺 0.25% 纤维混凝土的裂缝宽度减少 72%~93%;路东等<sup>[7]</sup>使用有限元分析软件模拟纤维增强混凝土受压变形过程,分析聚丙烯纤维对混凝土抗裂性能的影响,计算结果表明纤维的加入可起到很好的阻裂效果。聚丙烯纤维的加入能显著提升水泥基材料的强度,且长纤维对抗压强度提升效果更好,短纤维对劈裂抗拉强度提升效果更好<sup>[8-10]</sup>。通过使用界面剂或在结合面采用纤维混凝土等措施,可有效增强新老混凝土的界面黏结性能,提高新混凝土的抗拉强度,降低新混凝土的收缩,达到阻裂、防裂、控裂的目的<sup>[11-13]</sup>。

杨梅洲大桥准备在原有的塔柱上,浇筑 4.5 m 长

的相对经济的聚丙烯纤维混凝土塔段,作为主塔施工的结合过渡段。纤维形式的选择以及掺量、结合界面的处理成为防裂技术的关键。该文通过优化选择适合高墩施工的基础混凝土配合比,在混凝土中掺入不同掺量的长短聚丙烯纤维,测定混凝土的收缩性能与抗裂性能;再通过对旧混凝土表面处理,研究新老混凝土结合面的黏结性能。并结合数值模拟分析索塔新老混凝土结合面的应力状况,为索塔复工提供参考依据。

## 1 低收缩高抗拉强度纤维混凝土的配制

### 1.1 试验原材料与测试试件的材料配比

试验所用水泥为 P. O52.5 级水泥,其主要技术参数如表 1 所示。试验所用河砂、碎石、粉煤灰、矿渣粉、减水剂均为施工方提供。试验所用聚丙烯纤维技术参数如表 2 所示。

表 1 水泥性能指标

比表面积/ (m <sup>2</sup> · kg <sup>-1</sup> )	安定性	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d
≥300	合格	150	390	37.8	55.6

按强度不小于原设计强度 C55 配制了不同配比的混凝土试件组,每组试件配比见表 3。表 3 中试件

收稿日期:2022-07-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778228);湖南省杰出青年基金项目(编号:2021JJ10003)

作者简介:杨向阳,男,工程师, E-mail:996528962@qq.com

表 2 聚丙烯纤维物理特性

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	直径/ $\mu\text{m}$	长度/ $\text{mm}$	抗拉强 度/ $\text{MPa}$	断裂伸 长率/%	弹性模 量/ $\text{GPa}$
910	32.7	6/12	>469	28.4	>4.0

组 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>为在原设计配合比基础上配置的无纤维普通混凝土对照组,5<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>为掺短纤维试件,纤维长度 6 mm,9<sup>#</sup>~11<sup>#</sup>为掺长纤维试件,纤维长度 12 mm。

1.2 工作性能与抗压强度对比分析

测试抗压强度依据 GB/T 50081—2019《混凝土

表 3 不同混凝土试件的配合比及其抗压强度

试件 编号	配合比/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )								抗压强度/ $\text{MPa}$		28 d 抗拉强 度/ $\text{MPa}$
	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	水	减水剂	纤维	3 d	28 d	
1 <sup>#</sup>	375	50	75	662	1 128	150	6.00	0	52.6	72.7	—
2 <sup>#</sup>	375	50	75	680	1 110	150	6.00	0	49.5	68.1	—
3 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	6.00	0	52.2	69.3	—
4 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.00	0	50.4	68.2	2.52
5 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	6.00	0.92	53.7	72.5	—
6 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.50	0.92	54.6	87.2	2.88
7 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.50	1.38	53.1	84.2	—
8 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.50	1.82	51.7	83.5	—
9 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.50	0.92	53.1	83.6	3.45
10 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.75	1.38	50.6	85.6	—
11 <sup>#</sup>	375	50	75	752	1 038	150	5.75	1.82	53.1	85.0	—

物理力学性能试验方法标准》中规定的方法测试混凝土立方体(150 mm×150 mm×150 mm)的 3、28 d 标准抗压强度。各组试件的抗压强度测试结果见表 3。观察各组混凝土配制过程中的工作性能和抗压强度具有如下特点:

(1) 1<sup>#</sup>混凝土拌和物流动性好,但黏聚性不足,有泌水和离析现象。随 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>配合比中砂率的增加,混凝土拌和物的工作性能逐渐提升,但仍有轻微泌水现象。当 4<sup>#</sup>配合比中降低减水剂用量时,混凝土拌和物和易性最好。综合考虑混凝土的工作性能和力学强度,宜采用 4<sup>#</sup>试件比作为混凝土基准配合比。

(2) 随短纤维掺量的增加,混凝土拌和物的扩展度略有降低,但仍能满足施工要求。在相同掺量的情况下,掺长纤维对混凝土工作性能的不利影响较掺短纤维的大。这是因为长纤维在混凝土中需水量较短纤维的大,而且纤维越长其在混凝土中的分散性越差,导致混凝土拌和物的工作性能下降。

(3) 由表 3 可知,掺入不同体积掺量的长、短纤维,其 28 d 抗压强度基本达 80 MPa 以上,远高于基准混凝土(4<sup>#</sup>)的 68.2 MPa,表明纤维的掺入能有效提高混凝土的抗压强度。随短纤维掺量的增加,混凝土抗压强度降低;随长纤维掺量的增加,混凝土抗压强度

先增大后减少。

根据工作性能和抗压性能对比分析结果,初选出 6<sup>#</sup>组的短纤维混凝土与 9<sup>#</sup>组长纤维混凝土,为进一步比选材料。

1.3 不同配比材料的抗裂性能对比分析

按 4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>的混凝土配比制作了厚 0.1 m、长×宽为 0.8 m×0.6 m 的 3 组抗裂试件,采用大功率风扇吹风,以单位面积上的裂缝数目或单位面积上的总开裂面积作为评判标准,观测试件干缩抗裂情况,测试结果见表 4。

由表 4 可知:单掺长纤维的 9<sup>#</sup>配比混凝土,其单位面积上的裂缝数目最小,单位面积上的总开裂面积也较小。而掺长纤维的试件抗拉强度也显著高于短纤维混凝土,故从混凝土控裂角度出发,选取单掺 0.92 kg/m<sup>3</sup>聚丙烯长纤维(12 mm)混凝土为宜。

1.4 不同配比材料的收缩率对比分析

依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,制作 100 mm×100 mm×515 mm 的棱柱体试件,采用非接触式方法测定混凝土的干缩率。每组配比测定 3 个样本,3 d 为 1 个周期。采用刀口约束混凝土抗开裂仪测定混凝土的开裂时间、裂缝数量、裂缝宽度等,据此评价混凝土的抗裂性能,

表 4 不同配比混凝土的抗裂性能参数

试件编号	裂缝 编号	裂缝长 度/mm	裂缝宽 度/mm	每条裂缝平均 开裂面积/ (mm <sup>2</sup> ·条 <sup>-1</sup> )	单位面积 裂缝数目/ (条·m <sup>-2</sup> )	单位面积上的 总开裂面积/ (mm <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )
基准混凝土 4 <sup>#</sup>	第 1 条	462	0.473	70	6.2	434
	第 2 条	468	0.203			
	第 3 条	483	0.216			
掺短纤维混凝土 6 <sup>#</sup>	第 1 条	496	0.135	35	10.4	364
	第 2 条	550	0.216			
	第 3 条	580	0.122			
	第 4 条	400	0.081			
掺长纤维混凝土 9 <sup>#</sup>	第 5 条	488	0.122	22	10.4	229
	第 1 条	380	0.081			
	第 2 条	506	0.082			
	第 3 条	522	0.108			
	第 4 条	518	0.095			
	第 5 条	466	0.081			

24 h 为 1 个试验周期。

图 1 为不同配比混凝土的收缩曲线。  
由图 1 可知:所有混凝土自收缩在早期均发展较快,大部分收缩在 24 h 内完成。这是由于在混凝土早

期,水化反应迅速,混凝土中的水分被大量消耗,导致收缩增大;而随着时间的增加,混凝土水化反应速度放缓,收缩发展趋于稳定。从图 1(d)可知:单掺长纤维混凝土 9<sup>#</sup> 组的收缩率最小。与空白组相比,其 3 d 收

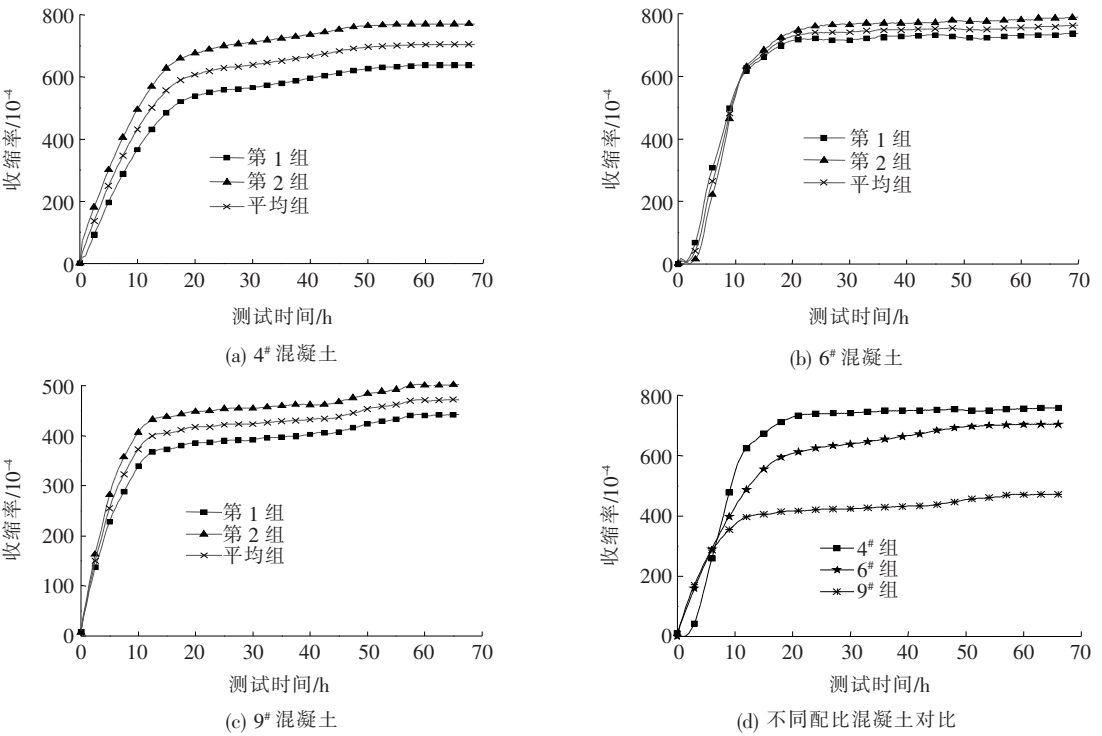


图 1 不同配比混凝土收缩率曲线

缩率可降低约 35%，收缩率降低值达  $269 \times 10^{-4}$ ；与空白组 4# 相比，单掺短纤维混凝土 6# 组的 3 d 收缩率降低约 8.3%，其抗收缩效果较掺长纤维的差。这是因为当纤维长度较长时，水泥基材料对单根纤维的黏结长度较长，即增大了黏结面积，从而能更好地改善混凝土的自收缩<sup>[14-15]</sup>。试验优化结果为，选用掺量为  $0.92 \text{ kg/m}^3$  长纤维混凝土作为新旧混凝土结合段材料。

2 新旧混凝土结合截面处理

2.1 试验方法及工况

将施工方所提供的旧混凝土试块(龄期与已施工索塔相同)进行切割、凿毛、清洗、干燥，再经表面处理 后浇筑新混凝土。将成型后的混凝土水养 28 d 后，采用劈裂试验，测试新旧混凝土结合面的黏结强度。

试验结果表明界面剂涂层厚度为  $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ ，能保证黏结具有较好的均匀性和完整性。

2.2 新旧混凝土的界面黏结性能

对比测试不同试件的劈裂强度，结果见表 5。

表 5 不同交界面的劈裂强度对比

试件组 编号	试件构造说明	劈裂强 度/MPa
1	施工留存完整旧 C55 混凝土试件	3.81
2	旧混凝土上凿毛后直接浇筑 C55	3.01
3	旧混凝土上凿毛后浇筑纤维混凝土	2.77
4	旧混凝土上凿毛涂界面剂后浇纤维混凝土	3.28

由表 5 可知：将旧混凝土表面凿毛并涂刷界面剂后，再浇筑纤维混凝土，其界面黏结力较未涂刷界面剂的效果要好；与留置的完整旧混凝土试件相比，其劈裂强度仅降低了 13.9%。与 3 号样相比，涂刷界面剂的 4 号样其劈裂强度增加了约 18.4%。由此表明，界面剂能有效提升新旧混凝土界面黏结性能。水溶性的界面剂能有效渗入旧混凝土表面的毛细孔隙，并在其表面凝结成膜，将旧混凝土表面的孔隙有效封闭，减少了新旧混凝土结合面的薄弱区。同时，界面剂与水泥浆体之间具有较好的相溶性，故能有效增加新旧混凝土的界面黏结强度<sup>[16-17]</sup>。

3 新旧混凝土结合段收缩应力有限元模拟分析

3.1 有限元模型建立

待接长续建的桥塔中塔柱段为双肢结构，其单肢

截面最大宽度方向(顺桥向)为 13 m，横桥向最宽 9 m。根据桥塔构造尺寸特点及施工节段长度(爬模节段高)，取 7 个施工节段长桥塔进行分析，如图 2 所示，交界面 C—C 以下为已建旧结构，3 个节段共长 12 m，结合段高 4.5 m，结合段以上为 3 个 13.5 m 后续节段 2~4，模型总高 30 m。采用实体块单元，模拟分析不考虑塔内配筋对收缩的影响。模型底面节点全按固定点约束。

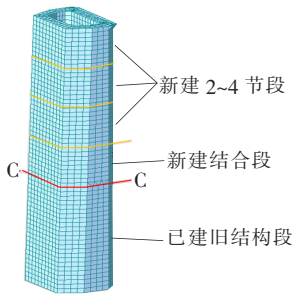


图 2 索塔塔柱有限元分析模型

初始模型全部节段采用原设计 C55，防裂模型的结合段采用纤维混凝土材料，各部分材料参数取值结果见表 6，纤维混凝土弹性模量标准值采用 28 d 实测值。原设计 C55 名义收缩系数按式(1)计算：

$$\epsilon_{cs0} = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/10)] \times 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (1)$$

式中： $\beta_{RH} = 1.55 \times (1 - 0.7^3)$ ； $\beta_{sc} = 0.5$ ； $f_{cm} = 52 \text{ MPa}$ 。

根据试验测试结果，纤维混凝土的收缩率比原设计 C55 减小 35%，偏于安全取纤维混凝土的名义收缩系数为  $0.7\epsilon_{cs0}$ 。表 6 中实测抗拉强度设计值根据表 3 抗拉强度标准值推算。

3.2 索塔新建节段的应力分析

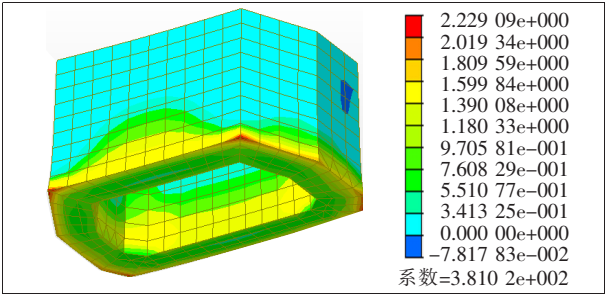
图 3 为续建节段 4 完成施工后，1 000 d 龄期索塔新旧混凝土交界面上不同材料新建结合段的主拉应力云图。

由图 3 可见：最大主拉应力出现在构件截面外周线的折角处，采用老材料方案峰值收缩应力为 2.23 MPa。主拉应力较大的区域为结合段临近交界面的外周区域，全长外周线混凝土主拉应力值均超过 1.1 MPa，在两条较长边向上延伸至 1.0 m 高仍有约 1.1 MPa 的拉应力。采用纤维混凝土结合段，分布规律与原方案相同，但峰值应力从 2.23 MPa 降至 1.89 MPa，降低了 0.34 MPa，降幅为 15.2%。有限元模拟分析结果表明：采用纤维混凝土结合段方案，一方面降低了新旧混凝土收缩差引起的收缩拉应力；另一方面提高了材料的抗拉强度和抗裂性能。双重作用下可明

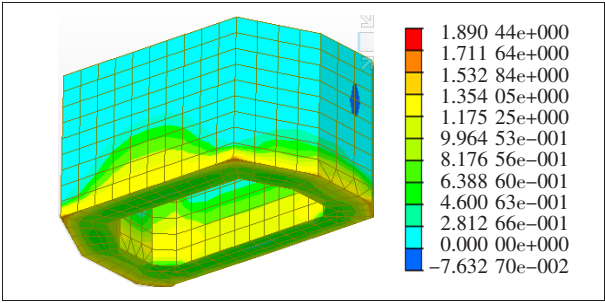


表 6 仿真施工有限元模型的材料参数、施工阶段设定值

施工节段	材料类型	收缩起始 龄期/d	弹性模量 /MPa	名义收 缩系数	阶段施工 时长/d	实测抗拉强度 设计值/MPa
已建旧结构	原设计 C55	540	$3.55\times10^4$	$1.83\times10^{-4}$	10	1.89
结合段	纤维混凝土	5	$3.52\times10^4$	$1.28\times10^{-4}$	10	2.61
续建节段 2~4	原设计 C55	5	$3.55\times10^4$	$1.83\times10^{-4}$	10(每段均相同)	1.89



(a) 初始模型



(b) 防裂模型

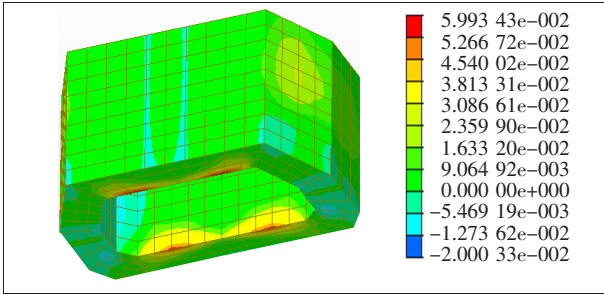
图 3 不同材料新建结合段模型的主拉应力云图(单位:MPa)

显提升结合段结构的防裂性能。

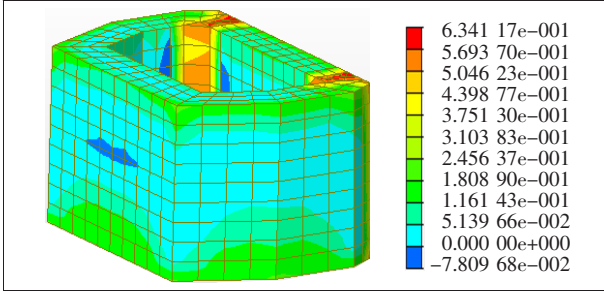
考虑到后浇的续建节段 2~4 仍采用原 C55 混凝土,与结合段材料之间也存在一定的收缩差,分析与结合段相邻的续建节段 2 的主拉应力,结果如图 4 所示。由图 4 可知:结合段后一施工节段的峰值应力由 0.60 MPa 升至 0.634 MPa,仅上升了 0.034 MPa,表明在结合段采用纤维混凝土后对其后续节段的既定施工方案不会造成不利影响。

3.3 新旧混凝土结合面的竖向黏结应力分析

图 5 为不同模型索塔新旧混凝土交界面附近的竖向应力对比云图。由图 5 可知:最大竖向黏结应力出现在交界面处的位置,峰值位于四个角端位置;采用原设计方案在临界交界面区均有较大竖向拉应力,峰值应力为 3.1 MPa。对比图 5(a)、(b)可知:当采用纤维混凝土后,交界面的最大竖向拉应力从 3.10 MPa 降至 2.45 MPa,降幅约 21%。

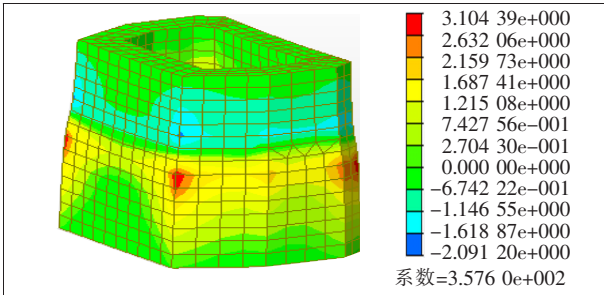


(a) 初始模型

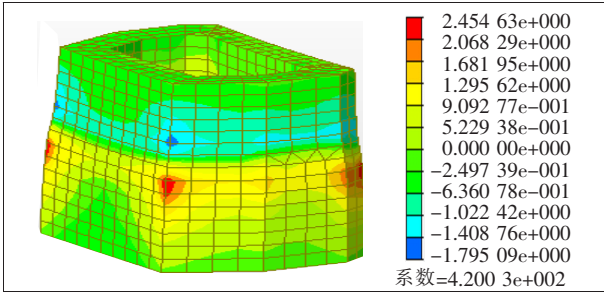


(b) 防裂模型

图 4 不同模型的续建节段 2 的主拉应力云图(单位:MPa)



(a) 初始模型



(b) 防裂模型

图 5 新旧混凝土交界面附近竖向应力云图(单位:MPa)

图 5 中竖向拉应力为仅考虑混凝土收缩的效应,若考虑后续塔柱和结构自重产生的压应力累加之后,最终应力状态为压应力。

为了避免施工期该短暂状态下混凝土横向裂缝发生,除采用上述新材料结合段降低拉应力水平的措施外,在交界面特别是角端区外周保护层内,还布置了加密加长的细钢筋网。在老混凝土上涂刷厚 0.3 mm 的界面剂。界面剂为低弹模延性材料,可使交界面的拉应力得到放松,进一步降低开裂风险。

在桥塔结合段浇筑后的 14 d 和 45 d,对旧混凝土结合面以下 1.5 m,以上 3.0 m 的桥塔段进行了外观检测。交界面与结合段未发现明显裂缝,表明处理技术达到防裂效果。

## 4 结 论

(1) 采用纤维混凝土结合段及界面剂交界面处理方案对长时间停工后的桥塔新旧混凝土结合段进行施工能获得良好效果。

(2) 优选出的  $0.92 \text{ kg/m}^3$  的单掺长聚丙烯纤维混凝土材料,在提高抗压、抗拉强度基础上,还具有低收缩率、微小干缩裂纹等特点,与对照的原设计 C55 材料相比,收缩应变降低约 35%,抗拉强度提高 36%,干裂裂缝长度和宽度显著减小。

(3) 桥塔有限元施工模拟数值分析结果表明:结合段采用纤维混凝土的方案,新旧混凝土收缩差导致的主拉应力均减小了 15%,总应力水平控制到 2.0 MPa 以下,小于纤维混凝土抗拉设计值。结合段的防裂性能得到显著提高。

(4) 将旧混凝土表面凿毛并涂刷界面剂,与直接在旧混凝土表面浇筑混凝土相比,可一定程度上提高新筑纤维混凝土与旧混凝土的界面黏结强度并降低黏结应力,预防施工期交界面附近的横向开裂现象。

## 参考文献:

- [1] ZHOU Ao, QIN Renyuan, LUCIANO Feo, et al. Investigation on Interfacial Defect Criticality of FRP-Bonded Concrete Beams[J]. Composites Part B, 2016, 113: 80—90.
- [2] KIM Sun-Woo, PARK Wan-Shin, JANG Young-Il, et al. Crack Damage Mitigation and Shear Behavior of Shear-Dominant Reinforced Concrete Beams Repaired with Strain-Hardening Cement-Based Composite[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79: 6—19.
- [3] 钟卓, 黄乐鹏, 张恒. 混凝土内部湿度场与自约束应力场

- 的研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2 609—2 621.
- [4] BEUSHAUSEN Hans, BESTER Nicholas. The Influence of Curing on Restrained Shrinkage Cracking of Bonded Concrete Overlays[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 87: 87—96.
- [5] WU Di, GAO Wei, FENG Jinwen, et al. Structural Behaviour Evolution of Composite Steel-Concrete Curved Structure with Uncertain Creep and Shrinkage Effects [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 86: 261—272.
- [6] SADIQUL, ISLAM G M, SRISTI Das Gupta. Evaluating Plastic Shrinkage and Permeability of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete[J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016, 5(2): 345—354.
- [7] 路东, 张丽哲, 季涛. 基于有限元的不同聚丙烯纤维掺量的纤维增强混凝土抗裂性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3 191—3 195, 3 202.
- [8] 张成龙, 刘漪, 张明. PP/PVA 纤维增强硫铝酸盐水泥基快速修补材料试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2 174—2 183.
- [9] 郭荣鑫, 郭佳栋, 颜峰, 等. 聚丙烯纤维轻骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1 323—1 330.
- [10] 马一平, 余少同, 游璐, 等. 纤维参数对水泥基材料减裂效果的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 797—802.
- [11] BEUSHAUSEN Hans, CHILWESA Masuzyo. Assessment and Prediction of Drying Shrinkage Cracking in Bonded Mortar Overlays[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53(13): 256—266.
- [12] MAJ Marek, UBYSZ Andrzej. Cracking of Composite Fiber-Reinforced Concrete Foundation Slabs Due to Shrinkage[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38 (Part 4): 2 092—2 098.
- [13] KHURAM Rashid, MADIHA Ahmad, TAMON Ueda, et al. Experimental Investigation of the Bond Strength between New to Old Concrete Using Different Adhesive Layers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118 798.
- [14] 周浩, 贾彬, 黄辉, 等. 玄武岩纤维混凝土抗压和抗折力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 147—152.
- [15] 刘志龙, 杜向琴. 碳纤维混凝土抗裂性能的试验研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2016, 32(21): 52—53.
- [16] 张建, 毛倩瑾, 王子明, 等. 减缩型聚羧酸减水剂提高混凝土早期抗裂性的作用研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (10): 3 359—3 365.
- [17] ZHANG Jingxiao, MA Yuwei, ZHENG Jiazheng, et al. Chloride Diffusion in Alkali-Activated Fly Ash/Slag Concretes: Role of Slag Content, Water/Binder Ratio, Alkali Content and Sand-Aggregate Ratio[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 119 940.