

斜向预应力混凝土道面局部锚固区力学性能试验研究

蒙朝美¹, 王观虎², 沈勇¹, 刘睿¹, 叶晖¹

(1. 95979 部队, 山东泰安, 271207; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 斜向预应力混凝土道面充分利用预应力筋的抗拉强度使水泥混凝土道面在承受荷载前处于双向受压状态, 从而有效提高混凝土道面的承载力与耐久性。基于斜向预应力混凝土道面局部锚固区应力复杂的特点, 开展了斜向预应力混凝土道面模型试验, 实测了局部锚固区纤维混凝土预制模块在预应力筋作用下的力学响应, 分析了 U 形缺口形状对预制模块力学响应的影响效应。结果表明局部锚固区在预应力筋的作用下处于复杂受力状态, 对称受拉时锚固区 U 型缺口顶部预应力筋所在截面的实测拉应变最大; U 形缺口形状对预制模块实测应变影响较显著, 梯形预制模块结构简单、重量较轻, 但存在应力集中现象、力学性能较差, 大倒角预制模块消除了应力集中现象, 力学性能好, 但预留空间大, 预制结构较重, 小倒角的预制模块的力学性能和工艺性能介于梯形和大倒角形之间; 相邻预制模块拼接缝隙显著增大了预制模块的实测应变, 对称受拉是预制模块最不利的受荷条件, 在预应力筋张拉前应对拼接缝隙进行注浆处理, 以改善预制模块的受力条件。

关键词 斜向预应力混凝土道面; 局部锚固区; 力学性能; 预制模块; U 形缺口形状

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.015

中图分类号 U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0119-08

Research on Mechanical Performance of Local Anchorage in Cross-Tensioned Concrete Pavement

MENG Chaomei¹, WANG Guanhu², SHEN Yong¹, LIU Rui¹, YE Hui¹

(1. Unit 95979, Taian 271207, Shandong, China; 2. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract The cross-tensioned concrete pavement is for the tensile strength of pre-stressed tendon to be utilized fully for making concrete pavement in a state of bi-directional compression prior to bearing vehicle loading and environmental effect by tensioning cross-strands, significantly enhancing bearing capacity and durability of concrete pavement. The model test is conducted to get mechanical performance of local anchorage in cross-tensioned concrete pavement based on its complicated distribution of stress, following by discussing influence of shape of U-shaped notch in prefabricated modules on measured strain. The results show that the local anchorage is in a complicated stress state under action of tensioning of cross-strands. The measured tensile strain reaches its maximum value at the top of U-shaped notch in the section where the tensioning cross-strands locate under action of symmetric tensioning. Additionally, the shape of U-shaped notch has apparently influence on measured strain. The trapezoidal prefabricated modules have

收稿日期: 2024-04-22

作者简介: 蒙朝美(1990—), 男, 湖北利川人, 博士, 讲师, 研究方向为机场道面新材料与新结构。E-mail: neu_mengchaomei@163.com

引用格式: 蒙朝美, 王观虎, 沈勇, 等. 斜向预应力混凝土道面局部锚固区力学性能试验研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 119-126.
MENG Chaomei, WANG Guanhu, SHEN Yong, et al. Research on Mechanical Performance of Local Anchorage in Cross-Tensioned Concrete Pavement[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 119-126.

simple structure and light weight, but poor mechanical performance owing to phenomenon of stress concentration. While prefabricated modules with larger angle of chamfer are good in mechanical performance, but heavier weight. The prefabricated modules with smaller angle of chamfer simultaneously have better mechanical performance and lighter weight. Furthermore, the gap between adjacent prefabricated modules obviously makes the measured strain on increase, and symmetric tensioning is the most unfavorable loading condition for prefabricated modules. Therefore, the gap between adjacent prefabricated modules should be dealt with grouting before tensioning of cross-strands to decrease tensile strain.

Key words cross-tensioned concrete pavement; local anchorage; mechanical performance; prefabricated modules; shape of U-shaped notch

水泥混凝土抗压强度高、温度稳定性好,广泛应用于机场道面^[1-2],但其抗拉强度低,易开裂,水泥混凝土道面需设置大量接缝^[3-4],接缝往往是道面的薄弱环节;承受荷载前对水泥混凝土道面施加预压应力,充分利用混凝土的抗压强度,使其在承受荷载前处于双向受压状态,可有效提高混凝土的抗弯拉强度和抗开裂性能,从而提高混凝土道面的承载力和耐久性^[5-6]。因而,预应力混凝土结构被应用于重载路面^[7-9]和机场道面^[10-11]。为了克服纵向预应力混凝土路面中设置后浇带的弱点,Hancock 等^[12]提出了斜向预应力混凝土路面。Akpınar 等^[13]基于有限元对斜向预应力混凝土路面进行了理论研究,表明预应力混凝土板边缘处的拉应力低于预估值。Meng 等^[14-15]采用理论分析与数值模拟相结合的方法,分析了斜向预应力混凝土道面在预应力筋作用下的有效应力及温度-预应力筋耦合作用下的应力分布规律,表明斜向预应力混凝土道面中在承受荷载前处于受压状态。斜向预应力混凝土道面中,预应力筋与道面纵向存在一定角度,在锚固区将出现拉应力^[8],为解决这一问题,Chen 等^[16]提出了装配整体式斜向预应力混凝土道面,即锚固区采用纤维混凝土预制模块,并基于足尺试验与数值仿真分析了斜向预应力混凝土道面的力学响应。周威等^[17]开展了预留孔道纤维活性粉末混凝土棱柱体试件局部抗压承载力试验,表明预留孔道影响纤维活性粉末混凝土的局部承压强度。李立峰等^[18]开展了纤维增强活性粉末混凝土的局部承载力研究,表明添加纤维可明显提高其局部承载力。王伟等^[19]开展了纤维混凝土试件局部抗压性能试验,表明试件底部支撑状态显著影响局部抗压承载力和破坏模式。

斜向预应力混凝土道面通过锚固区实现预应力筋与混凝土的相互作用,锚固区具有应力传递和分散作用,是预应力混凝土结构的重要组成部分;同时局部锚固区受力复杂、拉应力较大,但目前针对斜向预应力混凝土道面锚固区受力特点的研究较少。基于此,开展了装配整体式斜向预应力混凝土道面模

型试验,实测了不同形状预制纤维混凝土模块典型位置的应变,分析了斜向预应力混凝土道面锚固区预制模块的力学特征,可为斜向预应力混凝土道面锚固区设计及工程应用提供理论依据。

1 试验方案

根据受力特点,斜向预应力混凝土道面的力学响应可分为应力扰动区(称为 D 区)和应力流区(称为 B 区)两部分,如图 1 所示。其中,局部锚固区位于 D 区,即图中灰色部分,位于道面的两侧。对于斜向预应力混凝土道面,局部锚固区的受力复杂,呈现拉应力与压应力交替现象。基于此,局部锚固区采用抗拉强度高、韧性好的高性能纤维混凝土。B 区,即图中黄色部分,位于道面的中间,受力较均匀,且处于受压状态,为了减小收缩变形和提高表面的耐磨性,B 区可采用干硬性混凝土。

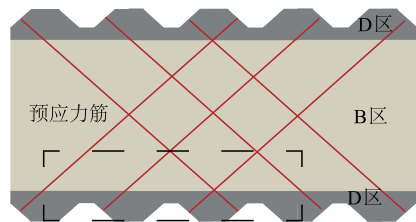


图 1 斜向预应力混凝土道面分区示意图

Fig. 1 Partition Diagram of Cross-tensioned Concrete Pavement

1.1 纤维混凝土配合比

为了较好地改善混凝土的抗拉强度和韧性,在混凝土中引入抗拉强度和弹性模量高的端勾型钢纤维,直径为 0.75 mm,长度为 35 mm,抗拉强度不低于 1 000 MPa,纤维混凝土的配合比参考文献^[19]选用,如表 1 所示。其中钢纤维掺量为 1.2%,水泥采用 P·O42.5,细集料为细度模数 2.58 的天然河砂,粗集料采用石灰岩,最大粒径为 20 mm。通过调节高效聚羧酸减水剂的用量来控制混凝土的和易性,其坍落度为 50~70 mm。纤维混凝土 28 d 立方体劈裂抗拉强度和抗压强度分别为 5.86 MPa、70.3 MPa。

表 1 纤维混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of fiber reinforced concrete

水灰比/(kg · m ⁻³)	水泥/(kg · m ⁻³)	水/(kg · m ⁻³)	中砂/(kg · m ⁻³)	石子/mm		纤维/(kg · m ⁻³)
				4.75~10	10~20	
0.3	533	160	665	299	699	94

1.2 局部锚固区试验方案

为了获得局部锚固区的力学响应,选取图 1 中虚线部分开展试验,由于预应力筋的张拉与锚固需与预应力筋垂直,局部锚固区力学性能试验方案采用梯形结构,如图 2 所示,其中紫色线条代表预制纤维混凝土结构,结构单元间通过企口连接,位于道面的一侧,即沿道面纵向布置;黑色线条代表厚度为 5 mm 的钢模板,同时改善局部锚固区现浇混凝土的受力条件;红色线条为公称直径为 15.2 mm 的无粘结预应力钢绞线,由预应力钢丝、防腐润滑油脂和外护 PE 套管组成,同向预应力筋沿道面长度方向的间距为 0.6 m,预应力筋与道面长度方向的夹角为 30°;蓝色线条代表木模板。

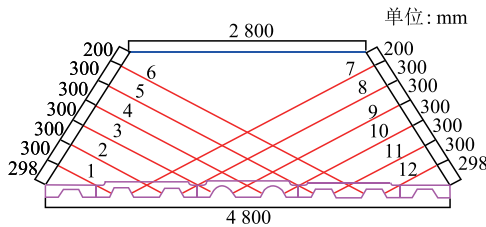


图 2 锚固区试验方案

Fig. 2 Diagram of model experiment

由于预应力筋斜向布置,为了方便安装锚垫板,预制纤维混凝土结构设置 U 形缺口,如图 2 所示。U 形缺口的形状直接影响预制结构的力学性能,为了分析预制结构 U 形缺口形状对局部锚固区力学性能的影响,设置梯形、小倒角形和大倒角形 3 种结构形式,如图 3 所示;其中梯形缺口如图 3(a)所示,结构简单,易于施工,但可能存在应力集中现象;大倒角形缺口(倒角半径取 80 mm,接近圆弧)如图 3(b)所示,可消除应力集中现象,但预留空间大,预制结构重量较重;小倒角形缺口(倒角半径取 40 mm)如图 3(c)所示,其力学性能和工艺性能均介于梯形和大倒角形之间。此外,预制结构中预留预应力孔道,其位置如图 3 中绿线所示;为了方便预制结构间的安装和布设预应力筋(预应力筋不跨越相邻预制结构),预制结构两端预留缺口,缺口直线部分长度为 70 mm,同时可增加预制部分和现浇部分的整体性。需要指出的是,为了保证 U 形缺口顶部(该区域为受拉区)混凝土厚度相近(梯形模块为 80 mm、倒角型模块为 70 mm),3 种形状预制模块的高度存在差异,即梯形预制模块的高度小于倒角

形预制模块的高度。

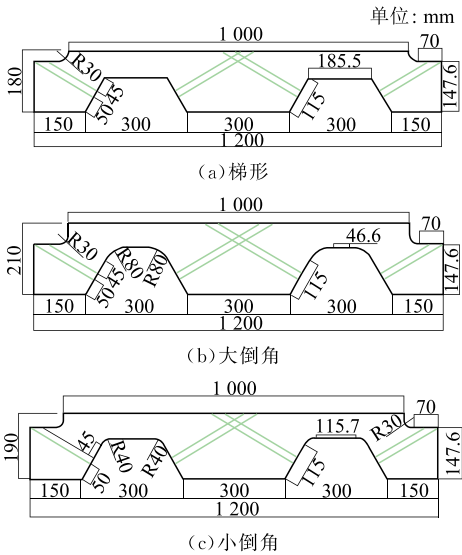


图 3 锚固区预制结构设计图

Fig. 3 Diagram of prefabricated modules

1.3 试件制作

试件制作分 2 步进行,首先是制作纤维混凝土预制模块,如图 4 所示,为保证锚固区预制模块与中间现浇部分的可靠粘结,并有效传递剪应力,界面处设置了 $\Phi 12$ mm 螺纹构造筋,同时,在浇筑纤维混凝土时不抹面,保持表面粗糙状态。

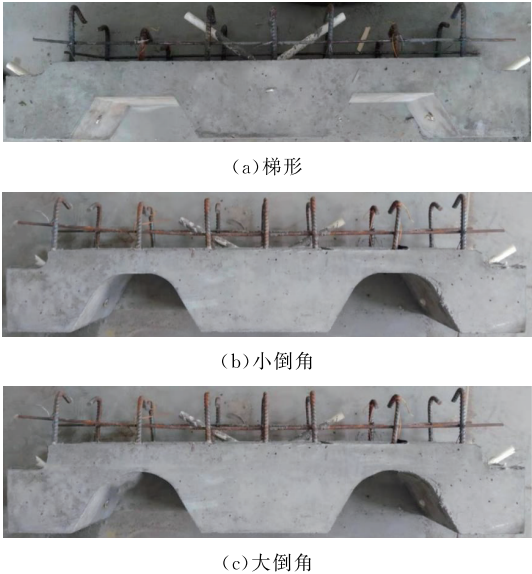


图 4 纤维混凝土预制模块

Fig. 4 Fiber reinforced concrete prefabricated modules

待局部锚固区预制纤维混凝土洒水养护 28 d 后用细砂对实验室地面找平,并铺设塑料薄膜滑动

层,其目的是为了减小面层与基层间的摩擦阻力^[20-21]。然后根据图 2 试验方案安装预制纤维混凝土模块、两端钢模板及另一侧的木模并采用木方进行固定。相邻预制模块间通过企口缝相互连接,如图 5 所示,可见相邻预制模块间存在较明显的缝隙。预制模块和两端钢模板安装就绪后,按预定的位置进行布设、校直和架立无粘结预应力筋。最后完成中间部分混凝土的浇筑和养护。



图 5 预留企口缝

Fig. 5 Gap between adjacent prefabricated modules

1.4 测试方案

局部锚固区预制纤维混凝土模块的力学性能采用外贴应变片的方法测量,每个锚固单元(U 形缺口)设置 6 个测点,应变片的布置方案如图 6 所示,其中预制模块的上表面设置 5 个测点,应变片的编号为①~⑤。①号和②号靠近预制模块端部,即预制结构左边 U 形缺口锚固单元的应变片从左至右依次编号,右边 U 形缺口锚固单元的应变片从右至左依次编号,①号和⑤号测点位于预应力筋孔道的正上方,②号和④号测点位于 U 形缺口转角或倒角处,③号测点位于 U 形缺口的中间,应变片中心距预制模块边缘 20 mm,⑥号测点位于预制模块的侧面,且位于 U 形缺口的中间,距上表面的距离为 150 mm(预应力筋中心所在截面),实物如图 7 所示。应变片粘贴前先用砂纸对粘贴处表面进行打磨,再用酒精进行清洗,最后涂抹一层环氧树脂,待环氧树脂凝结后采用专用胶水粘结电阻应变片,温度补偿应变片布置在同期浇筑且同养护条件下的立方体试件表面。

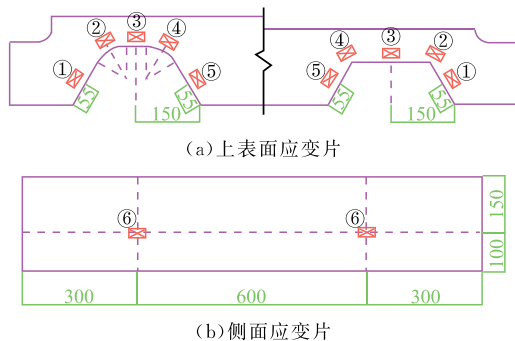


图 6 应变片位置及编号

Fig. 6 Position and number of strain gauges



图 7 应变片实物

Fig. 7 Strain gauges

1.5 加载方案

现浇部分混凝土浇筑 7 d 后张拉预应力筋,测试预应力筋张拉前后预制纤维混凝土模块的应变,测试采用 1/4 桥路。预应力筋的张拉控制应力为 1 260 MPa(176 kN),2 根预应力筋对称同时张拉,分 30%、80% 和 100% 三级张拉,前两级持荷 30 s,第三级荷载持荷 5 min 后读取应变数据,数据复核无误后放张预应力筋,预应力筋编号如图 2 所示,张拉方案如表 2 所示。

表 2 预应力筋张拉方案

Tab. 2 Scheme for tensioning cross-strands

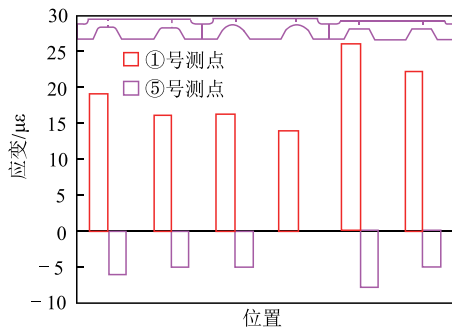
张拉序号	受力状态	预应力筋编号	预制模块 U 形缺口形状
1	对称受拉	1、7	小倒角
2		2、8	
3		3、9	大倒角
4		4、10	
5		5、11	梯形
6		6、12	
7	同一模块 对称受压	2、7	小倒角
8		4、9	大倒角
9		6、11	梯形
10	相邻模块	3、8	小倒角与大倒角
11	对称受压	5、10	大倒角与梯形

2 试验结果与分析

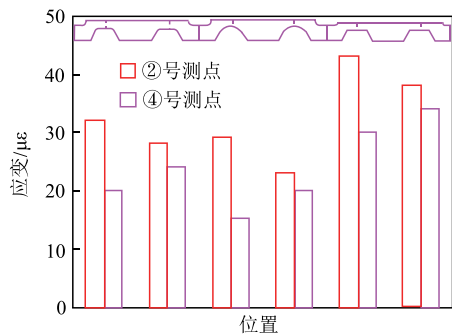
2.1 对称受拉

图 8 给出了预制模块对称受拉(表 2 中预应力筋张拉序号 1~6)时每个测点测得的最大应变,其中测点①和⑤、测点②和④、测点③和⑥位于相对应的位置,将其结果放在一起对比分析。由图 8 可知,总体来说,当预制模块对称受拉时,预制模块在应变片布设方向多处于受拉状态,仅⑤号测点为压应变,其余测点处测得的应变均为拉应变。不同测点处的应变差异显著,局部锚固区处于复杂受力状态,⑥号测点距离预应力筋作用最近,该处的拉应变最大,其

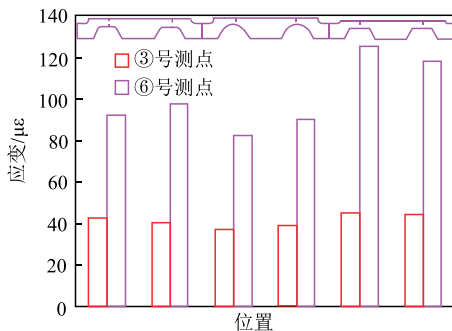
次是③号测点,接着是②号测点与④号测点,①号测点与⑤号测点测得的应变最小。此外,预制模块 U 形缺口形状也影响测点处应变的大小,梯形预制模块测得的应变最大,大倒角预制模块最小,对于⑥号测点,小倒角预制模块实测应变约为梯形预制模块实测应变的 80%,大倒角预制模块实测应变约为梯形预制模块实测应变的 70%。



(a) ①号和⑤号测点



(b) ②号和④号测点



(c) ③号和⑥号测点

图 8 对称受拉时预制模块实测应变

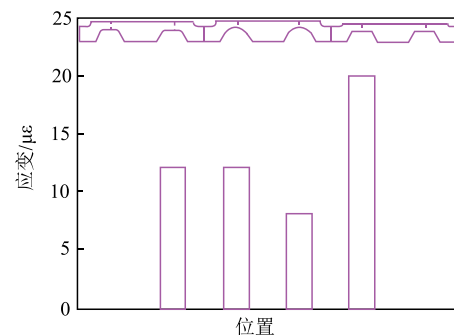
Fig. 8 Measured strain of prefabricated modules under symmetric tensioning

①号测点与⑤号测点均位于预应力筋正上方,处于相对的位置,但由于①号测点靠近预制模块端部,如图 6(a)所示,预制模块拼接过程中存在缝隙,在预应力筋的作用下,预制模块的受力特点类似于悬臂梁,所以①号测点处为拉应变。⑤号测点位于预制模块的中部,在张拉预应力筋的作用下,该测点处于局部受压状态,实测应变为压应变,但数值较小,其原因是该测点受预应力筋的作

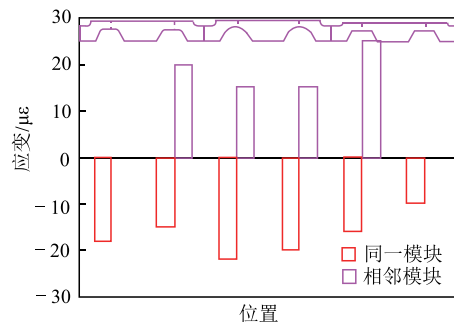
用点较小。②号测点与④号测点均位于预制模块转角处,应变测量方向与预制模块长度方向的夹角为 30° ,同样由于②号测点靠近预制模块端部,该测点的实测应变大于④号测点的实测应变。表明对于斜向预应力混凝土道面,锚固区采用预制模块,由于预制模块在拼装过程中存在缝隙,缝隙的存在将增大局部锚固区的拉应力,消弱局部锚固区的承载力。在后续的研究中可对接缝缝隙进行灌浆处理,以提高预制模块的承载能力。③号测点与⑥号测点的测试应变方向均为道面纵向,由于⑥号测点在道面厚度方向位于预应力所在截面,其实测应变显著大于③号测点实测值,约为③号测点实测应变的 2~2.5 倍。

2.2 对称受压

图 9 给出了预制模块对称受压时每个测点实测应变的最大值,对称受压分为同一模块对称受压(表 2 中预应力筋张拉序号 7~9)和相邻模块对称受压(表 2 中预应力筋张拉序号 10 和 11)2 种情况,其中同一模块对称受压时①号测点未获得数据,相邻模块对称受压时⑤号测点未获得数据。由图 9 可知,由于预制模块拼装接缝的存在,同一预制模块对称受压和相邻模块对称受压实测应变最大值有显著差异。同一模块对称受压时,各测点的实测应变均为压应变,而相邻模块对称受压时,①号测点、②号测点和⑥号测点的实测应变为拉应变,表明相邻预制模块间的拼装接缝缝隙的存在恶化了混凝土的受力状态。



(a) ①号测点



(b) ②号测点

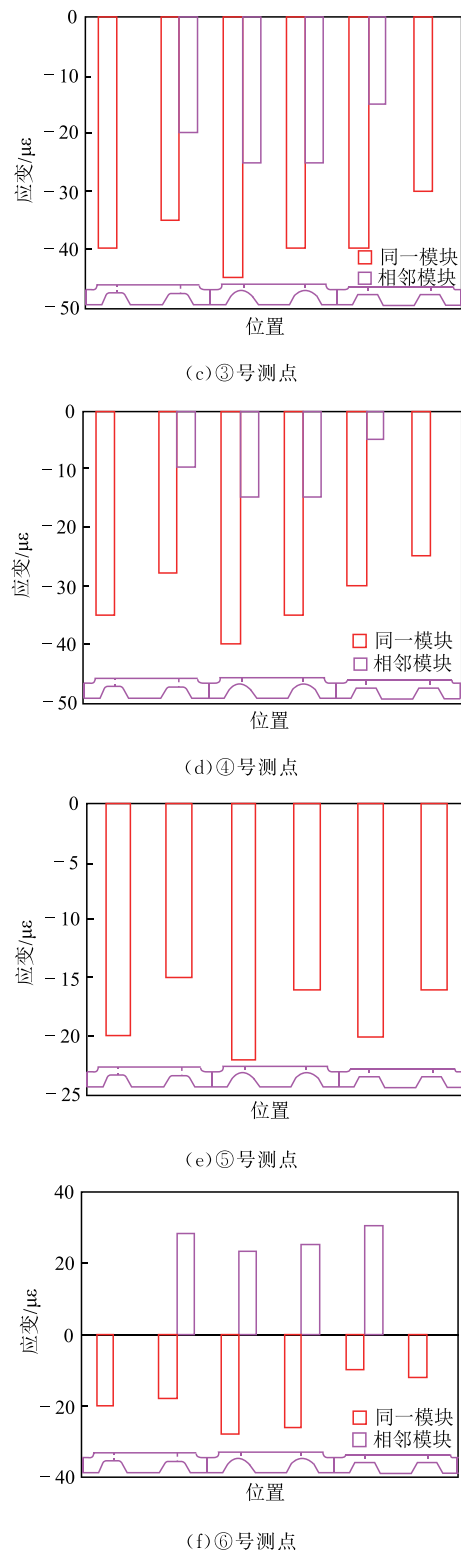


图9 对称受压时预制结构实测应变

Fig. 9 Measured strain of prefabricated modules under symmetric compression

对于同一预制模块,在预应力筋作用下对称受压时,①号测点没有应变,其原因是同一预制模块对称受压时,①号测点距离预应力筋作用部位较远,还有U形缺口隔离,该处受张拉预应力筋的影响小。②号测点实测应变也较小,其原因是该测点距离预应力筋作用部位也较远,受预应力筋的影响较小,但在

预应力筋作用的影响范围内,故表现为压应变。③号测点和④号测点实测压应变最大,其原因是③号测点和④号测点距离预应力筋作用部位较近,受预应力筋的影响较大,且应变片的布设方向与预应力筋所在方向的夹角较小,所测得的压应变较大。⑤号测点与⑥号测点的实测压应变也较小,约为③号测点和④号测点实测应变的50%~75%,其原因是⑤号测点位于其中1束预应力筋的正上方,不在锚垫板的应力传递路径范围内,受该束预应力筋的影响小,而距离另1束预应力筋较远,受另1束预应力筋的影响也较小,因而实测压应变较小。⑥号测点在相邻2束预应力筋的作用表现为不同的受力状态,存在相互抵消现象,其合力表现为受压状态,因而实测压应变也较小。除⑥号测点外,其余测点左侧锚固单元的实测值略大于右侧锚固单元的实测值,其原因是锚固单元左侧预应力筋的作用点高于锚固单元右侧预应力筋的作用点,如图7所示。

对于相邻预制模块,在预应力筋作用下对称受压时,小倒角预制模块左侧锚固单元和梯形预制模块右侧锚固单元距离预应力筋作用部位远,未测到应变。此外,⑤号测点距离预应力筋作用部位较远,也未测到该点的应变。①号测点、②号测点和⑥号测点的实测应变为拉应变,③号测点和④号测点为压应变,但实测值均较小。①号测点的实测拉应变较小,其原因是①号测点位于预应力筋正上方,处于局部受压区,但由于拼接缝隙的存在,又承受较大剪应力,表现出受拉状态,但数值较小。②号测点的受力特点类似于悬臂梁的受拉区,在预应力筋的作用下承受较大的拉应变,但在相邻预制模块预应力筋作用下,又处于局部受压区范围内,具有抵消效应,在合力作用下表现为受拉状态,但拉应变不显著。③号测点和⑥号测点与②号测点的受力状态相似,但③号测点较②号测点而言,距离预应力筋作用较远,受拉效应较弱,受压效应增强,从而表现出受压状态,但数值也较小。⑥号测点距离本锚固单元的预应力筋作用点近,受拉效应显著,表现出受拉状态。④号测点距离预应力筋的作用点较远,在2束预应力筋的合力作用下,表现为受压状态,但与同一预制模块对称受压相比,数值减小了一半以上。

综上所述,对称受拉是斜向预应力混凝土道面局部锚固区最不利的受荷条件,预制模块间拼装接缝的存在显著增大了局部锚固区的拉应变,6个测点中,⑥号测点的实测应变最大。此外,预制模块形状也影响各测点应变的大小,梯形预制模块的应变大于倒角预制模块的应变,大倒角预制模块的应变略小于小倒角预制模块的应变,其原因是对预制模

块U缺口进行倒角处理,可有效消除应力集中现象,从而改善预制模块的受力状态。

3 结论

基于斜向预应力混凝土道面优异的承载力和耐久性,开展了装配整体式斜向预应力混凝土道面模型试验,得到了预应力筋作用下局部锚固区纤维混凝土预制模块的实测应变,分析了不同U形缺口形状预制模块的力学响应及其效应,得到了以下主要结论:

1)装配整体式斜向预应力混凝土道面局部锚固区采用预制模块,可减小作用于现浇部分的应力,缩短预应力筋张拉时间,但相邻预制模块拼接缝隙的存在显著增大了局部锚固区的拉应变,在预应力筋张拉前应对拼接缝隙进行注浆处理,以改善预制模块的受力条件。

2)局部锚固区设计了3种U形缺口形状的预制模块,预制模块的形状影响其成型工艺和受力特点。U形缺口为梯形的预制模块,结构简单,重量较轻,易于施工,但存在应力集中现象,力学性能较差。U形缺口为大倒角的预制模块,消除了应力集中现象,力学性能好,但预留空间大,预制结构重量较大。U形缺口为小倒角的预制模块,力学性能和工艺性能介于梯形和大倒角形之间;工程应用中建议选用小倒角预制模块,倒角半径建议为30~60 mm。

3)实测了不同位置处预制模块在预应力筋作用下的力学响应,不同位置处的实测应变差异大,局部锚固区在预应力筋的作用下处于复杂受力状态,对称受拉时,锚固区U型缺口顶部预应力筋所在截面的实测应变最大,且为拉应变。对称受拉是斜向预应力混凝土道面局部锚固区最不利的受荷条件,在预应力筋张拉过程中需合理设置张拉顺序。

参考文献

- [1] SHARIFI N P, CHEN S Y, YOU Z P, et al. A Review on the Best Practices in Concrete Pavement Design and Materials in Wet-Freeze Climates Similar to Michigan[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6(3): 245-255.
- [2] MENG C M, CAI L C, WANG G H. An Approximate Model for Continuously Reinforced Concrete Pavement under Temperature Loading[J]. ACI Materials Journal, 2019, 116(6): 193-204.
- [3] 岑国平, 陈悦, 崔云化. 高强合成纤维混凝土机场道面接缝抗冲击性能[J]. 空军工程大学学报(自然科学

版), 2018, 19(5): 25-29.

CEN G P, CHEN Y, CUI Y H. Research on the Impact Resistance of High Strength Synthetic Fiber Concrete at Airport Pavement Joint[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 25-29. (in Chinese)

- [4] 张献民, 李梦晓, 陈宇, 等. 考虑接缝传荷作用的机场水泥道面板边应力折减分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(6): 61-66.

ZHANG X M, LI M X, CHEN Y, et al. An Analysis of Edge Stress Reduction for Airfield Concrete Pavement Slab Considering Joint Load Transfer[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 61-66. (in Chinese)

- [5] 阎西康, 温家鹏, 杜闯, 等. 预应力活性粉末混凝土道面板的抗弯性能[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 20-29, 48

YAN X K, WEN J P, DU C, et al. Flexural Performance of Prestressed Reaction Powder Concrete Pavement Slabs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(2): 20-29. (in Chinese)

- [6] 刘聪, 翁兴中, 张俊, 等. 预应力道面混凝土的弯拉与疲劳特性[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 211-217.

LIU C, WENG X Z, ZHANG J, et al. Flexural-Tensile and Fatigue Performance of Prestressed Pavement Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(1): 211-217. (in Chinese)

- [7] 郭超, 张敏江, 陆征然, 等. 重轴载交通下斜向预应力混凝土路面应用研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 286-291.

GUO C, ZHANG M J, LU Z R, et al. Research on Application of Cross Tensioned Concrete Pavements to Heavy Axle Loading Traffic[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(3): 286-291. (in Chinese)

- [8] 李娜, 张东省, 徐希娟, 等. 斜向预应力混凝土路面数值模拟[J]. 公路工程, 2014, 39(2): 27-30, 36.

LI N, ZHANG D S, XU X J, et al. Stress Numerical Simulation of Cross-Tensioned Prestressed Concrete Pavement[J]. Highway Engineering, 39(2): 27-30, 36. (in Chinese)

- [9] 张东省, 韩森, 韩微微, 等. 斜张法双向预应力水泥混凝土路面关键设计参数研究[J]. 公路, 2010, 55(11): 70-73.

ZHANG D S, HAN S, HAN W W, et al. Research on Key Design Parameters of Two Direction Cross-Tensioned Prestressed Cement Concrete Pavement[J]. Highway, 2010, 55(11): 70-73. (in Chinese)

- [10] 杨博瀚, 翁兴中, 付婕, 等. 装配式机场预应力混凝土道面承载性能的影响因素分析[J]. 材料导报, 2015,

- 29(22):119-123.
- YANG B H, WENG X Z, FU J, et al. Analysis on the Influence Factors of Prefabricated Airport Prestressed Concrete Pavement Bearing Capacity[J]. Materials Reports, 2015, 29(22):119-123. (in Chinese)
- [11] QU B, WENG X Z, ZHANG J, et al. Analysis on the Deflection and Load Transfer Capacity of a Prefabricated Airport Prestressed Concrete Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 449-458.
- [12] HANCOCK J, HOSSAIN M. Cross-Tensioned Concrete Pavement: an Alternative Modern PCCP Design [C]. Ames, Iowa: Mid-continent Transportation Symposium, 2000.
- [13] AKPINAR A V, HANCOCK J, HOSSAIN M, et al. Theoretical Investigation of Cross Tensioned Concrete Pavement[C]//International Conference on Concrete Pavements the Use of Concrete in Developing Long-lasting Pavement Solutions for Century. Orlando, Florida: International Society for Concrete Pavements, 2001, 939-952.
- [14] MENG C M, CAI L C, WANG G H, et al. An Approximate Model to Predict Stress and Displacement of Cross-Tensioned Prestressed Concrete Pavement under Temperature Loading[J]. ACI Materials Journal, 2020, 117(5): 193-207.
- [15] MENG C M, CAI L C, LING J M, et al. Research on Effective Stresses of Cross-Tensioned Prestressed Concrete Pavement[J]. ACI Materials Journal, 2022, 119(3):149-160.
- [16] CHEN Z L, WANG G H, MENG C M, et al. Mechanical Response of Cross-Tensioned Concrete Pavement: Experimental Study and Finite Element[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(1):1-14.
- [17] 周威, 胡海波. 预留孔道活性粉末混凝土局压性能与承载力分析[J]. 工程力学, 2014, 31(7):119-128.
- ZHOU W, HU H B. Analysis on Bearing Capacity and Behavior of Reaction Power Concrete with Empty Concentric Duct under Local Pressure[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7):119-128. (in Chinese)
- [18] 李立峰, 李文全, 石雄伟, 等. 不同养护条件下活性粉末混凝土局压承载力试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(2):50-61.
- LI L F, LI W Q, SHI X W, et al. Local Compressive Bearing Capacity of Reactive Powder Concrete under Different Curing Conditions[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(2):50-61. (in Chinese)
- [19] 王伟, 蒙朝美, 蔡良才, 等. 纤维增强混凝土局部抗压性能试验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(4):104-110.
- WANG W, MENG C M, CAI L C, et al. Research on Local Compressive Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(4): 104-110. (in Chinese)
- [20] 韩森, 漆祥, 韩霄, 等. 滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥路面板的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(4):1-8.
- HAN S, QI X, HAN X, et al. Influence of Friction Coefficient of Sliding Layer on Cross-Prestressed Concrete Pavement Slab[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(4):1-8. (in Chinese)
- [21] HAN S, CHEN D, LING C, et al. Study on Sliding Layer of Cross-Tensioned Concrete Pavement [J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(3): 518-535.

(编辑: 韩茜)