

后张法预应力空心板锚下应力分析与应变测试

蒙方成 毛建平 杨洋

(广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院 广西南宁 530011)

摘要:后张法预应力空心板是桥梁工程中常见的上部结构形式。本文通过对后张法预应力混凝土空心板锚下应力进行理论分析,讨论加强钢筋的设置、腹板厚度对锚下应力的影响;测试钢束张拉力作用下空心板锚下应变,观察锚下混凝土裂缝情况,综合分析锚下裂缝产生机理。研究表明:提高锚下加强钢筋的配筋率和加厚腹板均可减小空心板锚下混凝土拉应力,加厚腹板效果更显著;锚下混凝土局部应力过大导致局部存在裂缝和结构损伤,预应力钢束张拉时裂缝不一定马上在混凝土表面出现,而是在锚下混凝土应力重分布后出现。

关键词:预应力 锚下应力 锚下裂缝

引言

后张法预应力空心板通常采用先在梁场集中预制、再运至桥位处安装的施工方法,由于预制空心板施工方法成熟,便于大批量生产,能大大缩短工期和投资,在常规跨径桥梁中得到广泛应用。后张法预应力混凝土空心板钢束应力通过锚具锚固于梁端,强大的锚固力作用下,锚下混凝土应力分布比较复杂,如果结构尺寸或配筋不当,易出现锚下裂缝^[1]。

锚下裂缝是预应力构件损伤的一种表现,不仅影响结构耐久性,严重时会引起锚固端失效,从而引起空心板在使用中出现严重变形,导致空心板其他部位出现裂缝或破坏。由于预应力构件损伤的危害较大,引起了业内学者的重视,在有关规范、规程中得到了体现:《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004)中有关预应力混凝土梁桥的定期检查内容,明确规定了检查内容包括预应力钢束锚固区段混凝土有无开裂;《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)中,预应力构件损伤最高等级类别达5类,单项指标扣分最高可达100分,其中4类标度的标准之一为齿板位置处裂缝严重,裂缝超限,5类标度的标准之一为锚头损坏失效。

要防止锚下裂缝的产生,应从设计阶段结构尺寸的确定、锚下加强钢筋的设置入手,不留隐患,方能彻底解决问题。

1 预应力空心板锚下常见裂缝形态

文献[2]指出,后张法混凝土梁锚具附近的裂缝分为2种:一种是沿着预加力的作用线对应位置的纵向裂缝,该类裂缝由劈裂应力(Bursting stress)引起;另一种是与预加力作用线对应位置由一定距离的纵向裂缝,该类裂缝由剥落应力(Spalling stress)引起。

根据多个项目有关预应力混凝土空心板的现场检测,空心板锚下裂缝主要出现在钢束对应处腹板侧面,方向沿钢束走向。可见,这种裂缝应属于劈裂应力引起的裂缝。在张拉过程中裂缝不一定立刻显现在混凝土表面,也有可能是在张拉后几天甚至更长时间,或者受载后,裂缝才在混凝土表面显现;裂缝宽度一般在0.10mm左右,裂缝长度在30cm左右,见图1。

本文主要研究由劈裂应力引起的裂缝。

2 锚下应力的研究现状

目前,已经有很多学者对预应力锚下混凝土的开裂及破坏机理进行研究^[3-5],研究方法主要采用理论分析为主,常采用有限元进行结构计



图1 预应力空心板锚下裂缝

算^[6-7]。近年来,国内有一些学者通过实验室实体模型对锚下应力进行了试验:张文献等制作了截面尺寸为500mm×420mm的C50混凝土试件,试件中未加入纵筋和箍筋,在实验室中用压力机代替预应力钢束对实测锚下横向应力分布,拟合出锚下横向应力分布经验公式。然而,在实际项目中,许多条件与实验室存在差异,例如结构尺寸、配筋、张拉条件、结构边界等,这将对锚下应力分布产生影响。本文通过在梁场中随机抽选试验梁,试验梁的施工条件与同批次的其他梁完全相同,通过理论分析和现场测试,真实反映预应力钢束张拉在锚下产生的应力、应变分布情况。

3 预应力空心板锚下应力分析与测试

3.1 概况

某项目桥梁上部结构采用后张法20m预应力空心板,主要技术指标见表1。

表1 技术指标表

公路等级	路基宽度/m	跨径/m	预制板高/m	设计安全等级
高速	26	20	0.95	一级

设计主要材料:

- (1) 混凝土: 预制空心板采用C50。
- (2) 预应力钢筋: 低松弛高强度预应力钢绞线, 要求符合《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T5224-2003)的规定。单根钢绞线直径 $\phi_s 15.2 (1 \times 7) \text{ mm}$, 单根钢绞线面积 $A=139 \text{ mm}^2$ 。 $f_{pd}=1860 \text{ MPa}$, 抗拉设计强度。 $f_{pd}=1260 \text{ MPa}$, 弹

性模量 $E_p=1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$, 松弛率 $p=0.035$, 松弛系数 $\xi=0.3$ 。钢束张拉控制应力为 $0.75 f_{pk}$ 。

(3) 普通钢筋: 钢筋直径 $\geq 10 \text{ mm}$ 者, 均采用带肋钢筋HRB400, 钢筋直径 $< 10 \text{ mm}$ 者, 采用光圆钢筋HPB300。

(4) 锚具: 锚具变形、钢筋回缩按6mm(一端)计算; 高密度聚乙烯波纹管摩阻系数 $\mu=0.17$, 偏差系数 $\kappa=0.0015$ 。

空心板锚点分布及断面尺寸见图2, 其中钢束1由3根钢绞线组成, 钢束2和钢束3分别由4根钢绞线组成。锚下加强钢筋采用直径为10mm的HRB400钢筋, 见图3~图4。

空心板预制后, 混凝土强度达到设计强度的90%以上(且龄期不小于8d)张拉预应力钢束。预应力钢束张拉顺序: 3→2→1。张拉后及时压注水泥浆。

本次研究随机选择一片边板作为试验梁, 重点研究钢束锚下竖向应力、应变分布情况。

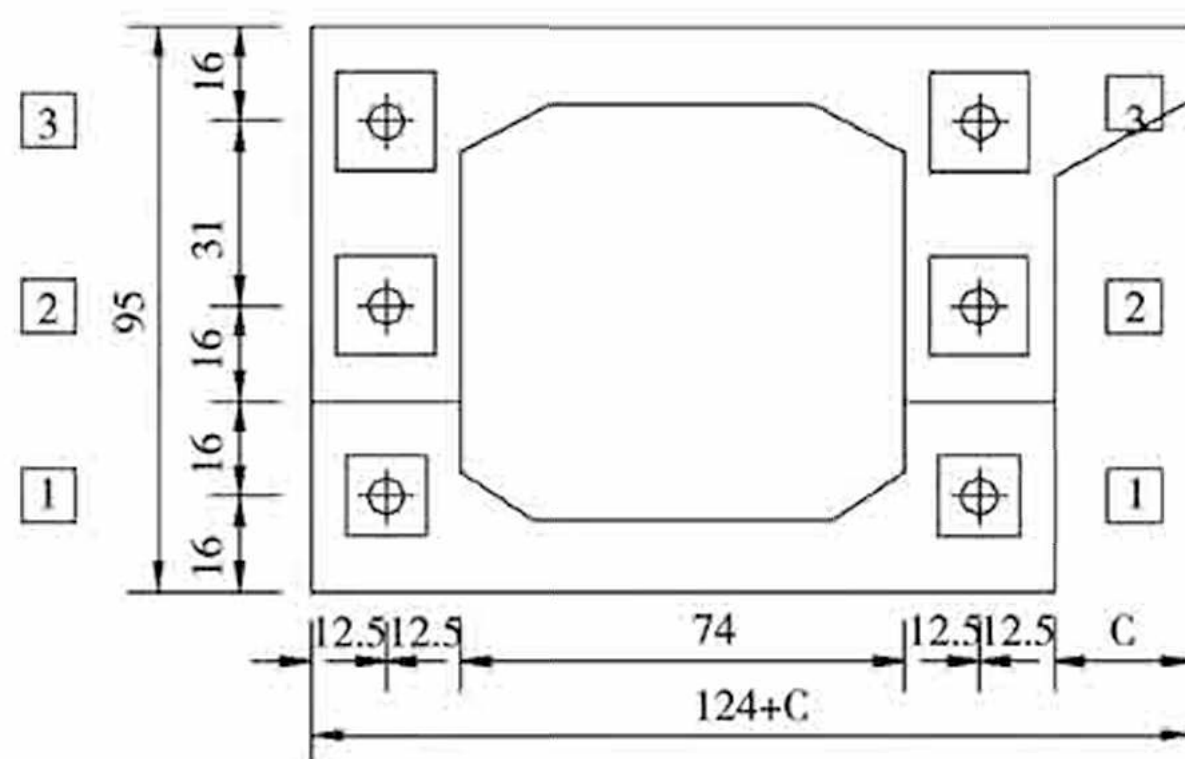


图2 钢束锚点及结构尺寸示意图(单位: cm)

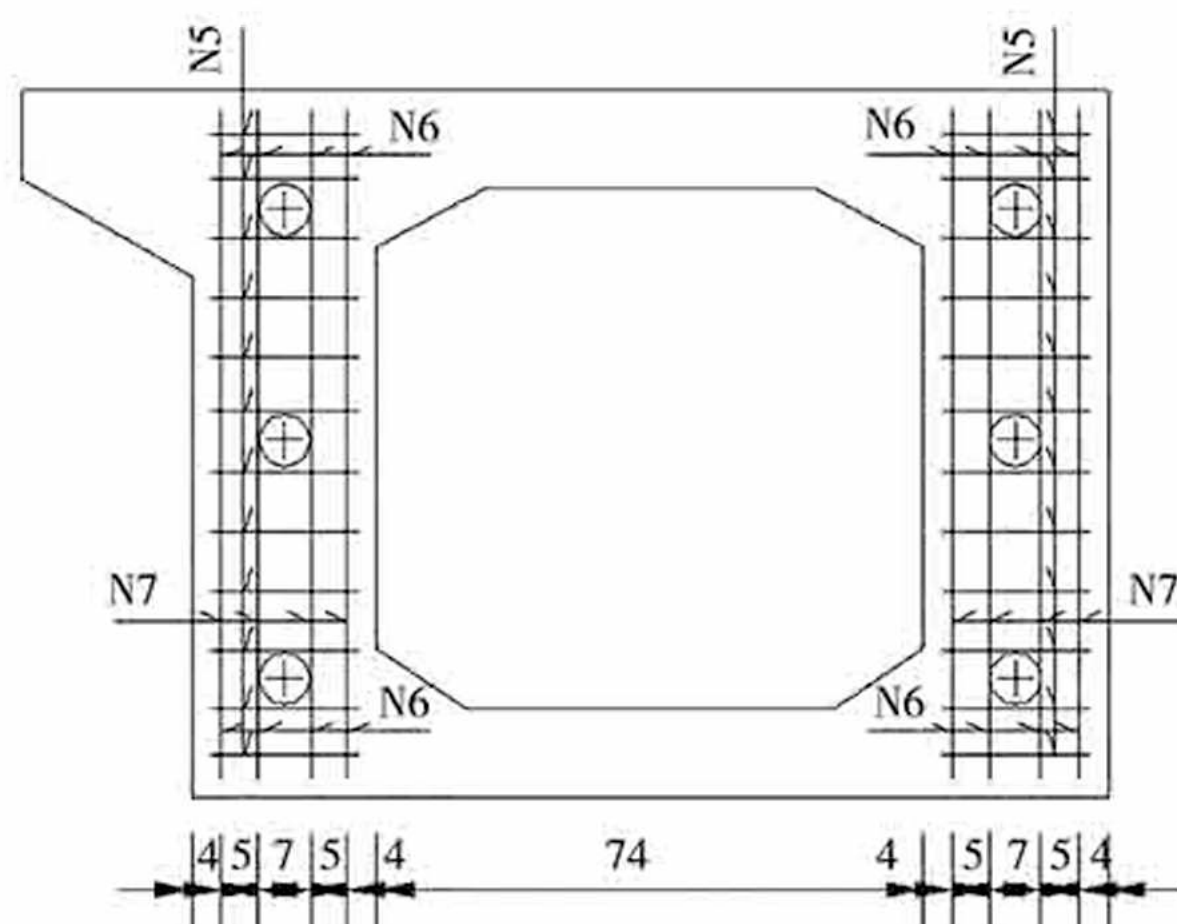


图3 锚下钢筋立面示意图(单位: cm)

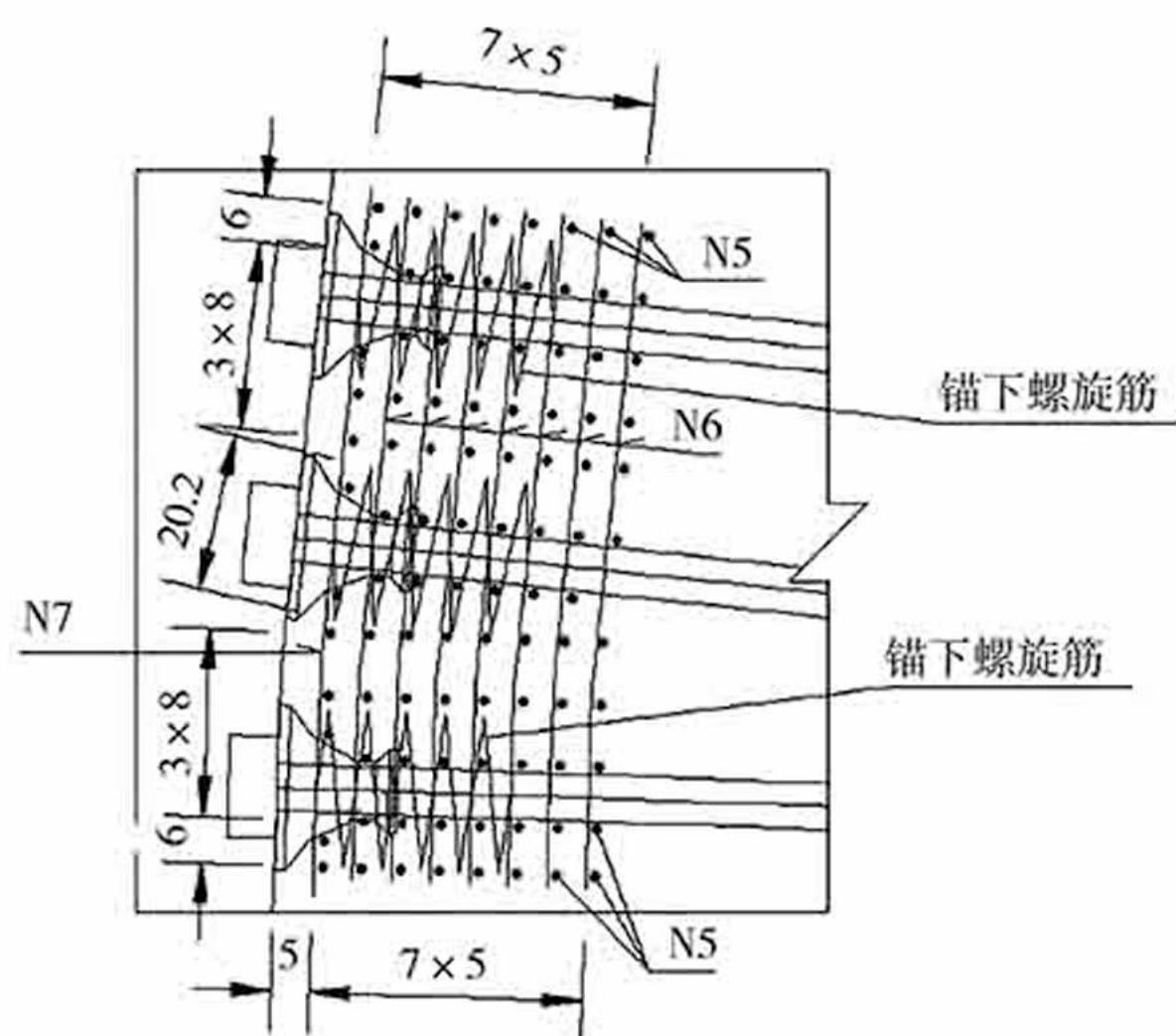


图4 锚下钢筋侧面示意图(单位: cm)

3.2 空心板锚下应力分析

锚下横向应力(水平方向或竖向应力)是产生锚下混凝土纵向裂缝的主要原因,锚下横向应力在锚杯附近较大,本节重点研究边梁中腹板外侧距3号钢束锚杯中心0.1m处的竖向应力沿钢束纵向的分布情况。

采用大型通用有限元软件ANSYS建立空心板端部实体模型进行结构分析,计算模型考虑了锚杯形状、锚板大小、钢束预留孔道对结构的影响。用solid65模拟钢筋混凝土,锚下加强钢筋以配筋体积率的形式在该种单元的实常数中得以体现。空心板端部混凝土结构离散见图5,锚杯及锚板结构离散见图6。

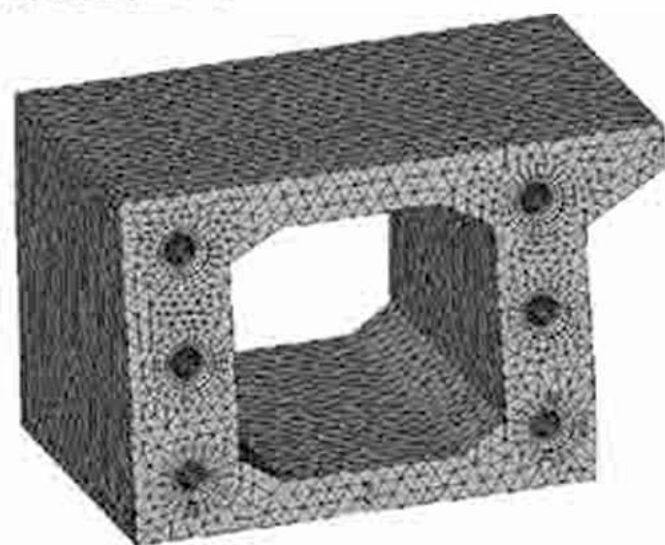


图5 空心板端部混凝土结构离散图

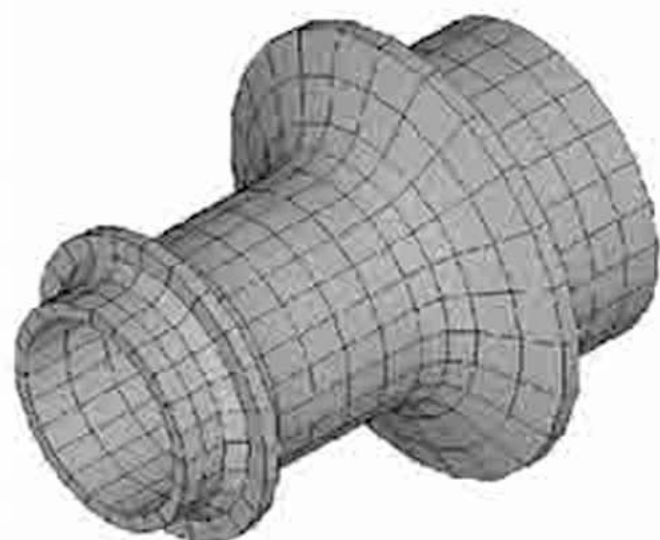


图6 锚杯及锚板结构离散图

3.2.1 加强钢筋配筋率对锚下混凝土应力的影响分析

为研究锚下加强钢筋对锚下混凝土应力的影响,设置了如下4个分析工况,见表2所示。

表2 分析工况一览表

工况	锚下加强筋配筋情况	体积配筋率 1%
1	不配置锚下加强钢筋	0
2	配筋位置和根数与设计相同,钢筋直径为8mm	1.69
3	配筋位置、根数、直径完全按原设计 (即钢筋直径为10mm)	2.65
4	配筋位置和根数与设计相同,钢筋直径为12mm	3.81

经结构分析,研究边梁中腹板外侧距3号钢束锚杯中心0.1m处的竖向应力沿钢束纵向的分布情况。以距锚点纵向距离为横轴,以竖向应力为纵轴,绘制各工况的应力沿钢束纵向的分布曲线,见图7,各工况的最大应力见表3。应力以受压为负,受拉为正。

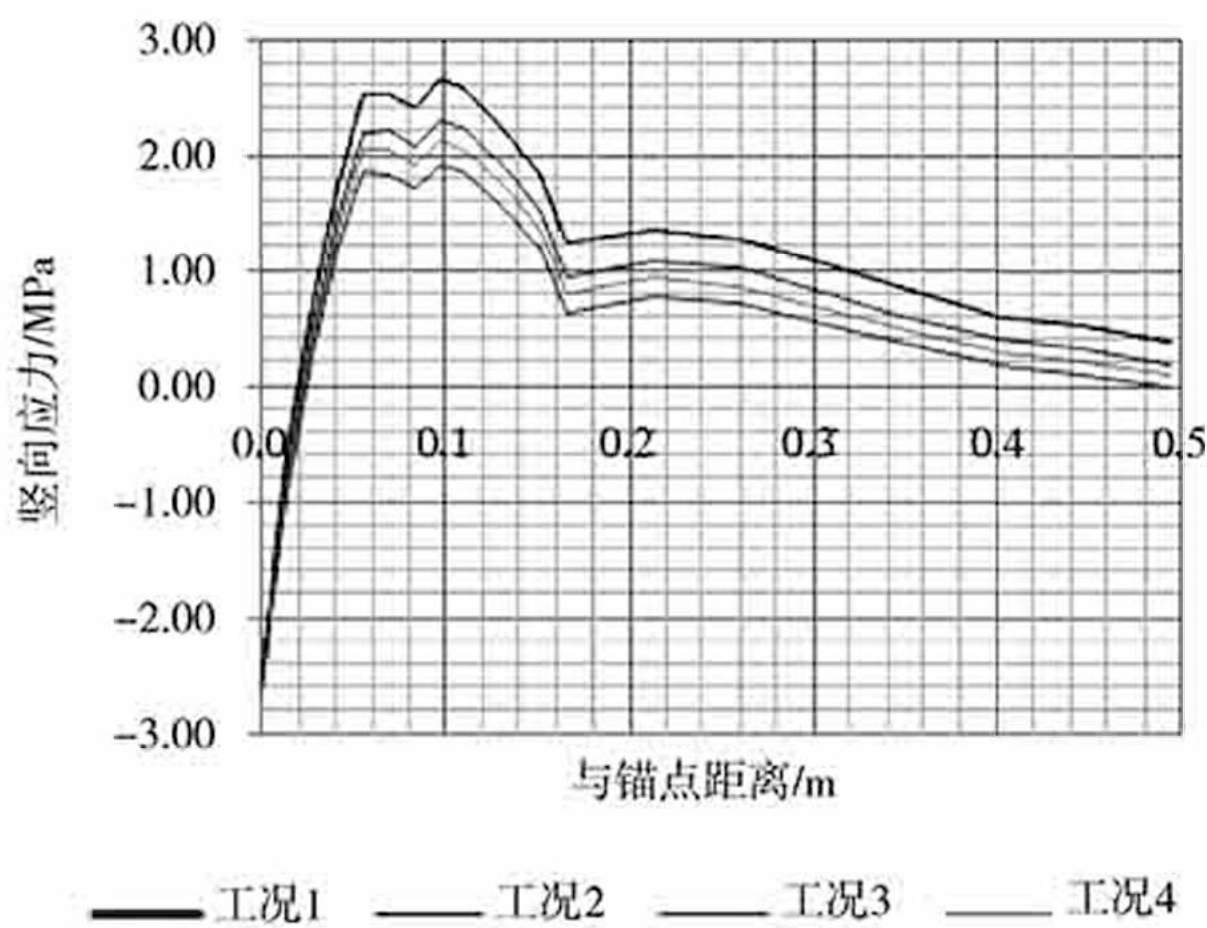


图7 各工况应力沿纵向分布曲线

表3 各工况最大应力汇总

工况	位置	应力值/MPa
1	距锚点0.10m	2.64
2	距锚点0.10m	2.30
3	距锚点0.10m	2.11
4	距锚点0.10m	1.91

可见:

(1) 提高锚下加强钢筋配筋率,能减小锚下竖向应力;

(2) 设计配筋情况下(工况3),锚下竖向

拉应力为2.11MPa，大于C50混凝土强度设计值1.83MPa，此处有开裂的可能。

3.2.2 腹板厚度对锚下混凝土应力的影响分析

为研究腹板厚度对锚下混凝土应力的影响，设置了如下4个分析工况，见表4所示。

表4 分析工况一览表

工况	腹板厚度
1	设计值，即25cm
2	加厚3cm，即28cm
3	加厚6cm，即31cm
4	加厚9cm，即34cm

经结构分析，研究边梁中腹板外侧距3号钢束锚杯中心0.1m处的竖向应力沿钢束纵向的分布情况。以距锚点纵向距离为横轴，以竖向应力为竖轴，绘制各工况的应力沿纵向的分布曲线，见图8所示，各工况的最大应力见表5。应力以受压为负，受拉为正。

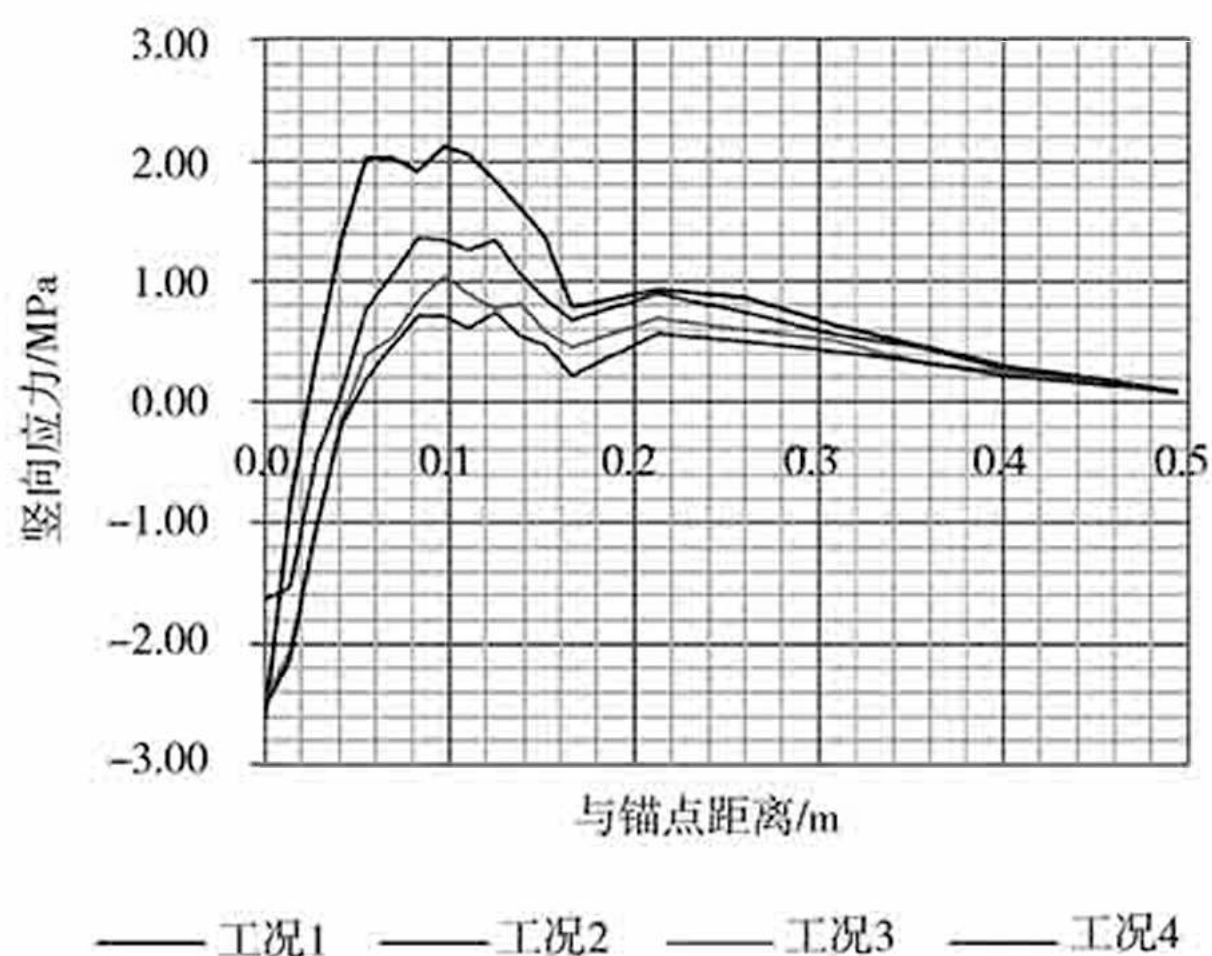


图8 各工况应力沿纵向分布曲线

表5 各工况最大应力汇总

工况	位置	应力值/MPa
1	距锚点0.10m	2.11
2	距锚点0.12m	1.35
3	距锚点0.10m	1.04
4	距锚点0.12m	0.75

可见：

- (1) 加厚腹板能有效减小锚下竖向应力；
- (2) 加厚腹板比加大加强钢筋配筋率对改善锚下竖向应力的效果更显著。

3.3 空心板锚下应变测试

3.3.1 测点布置

试验梁钢筋绑扎时在梁端A-A，B-B，C-C截面布置锚下应变测点，测点布置及编号示意图见图9，应变测点现场照片见图10。

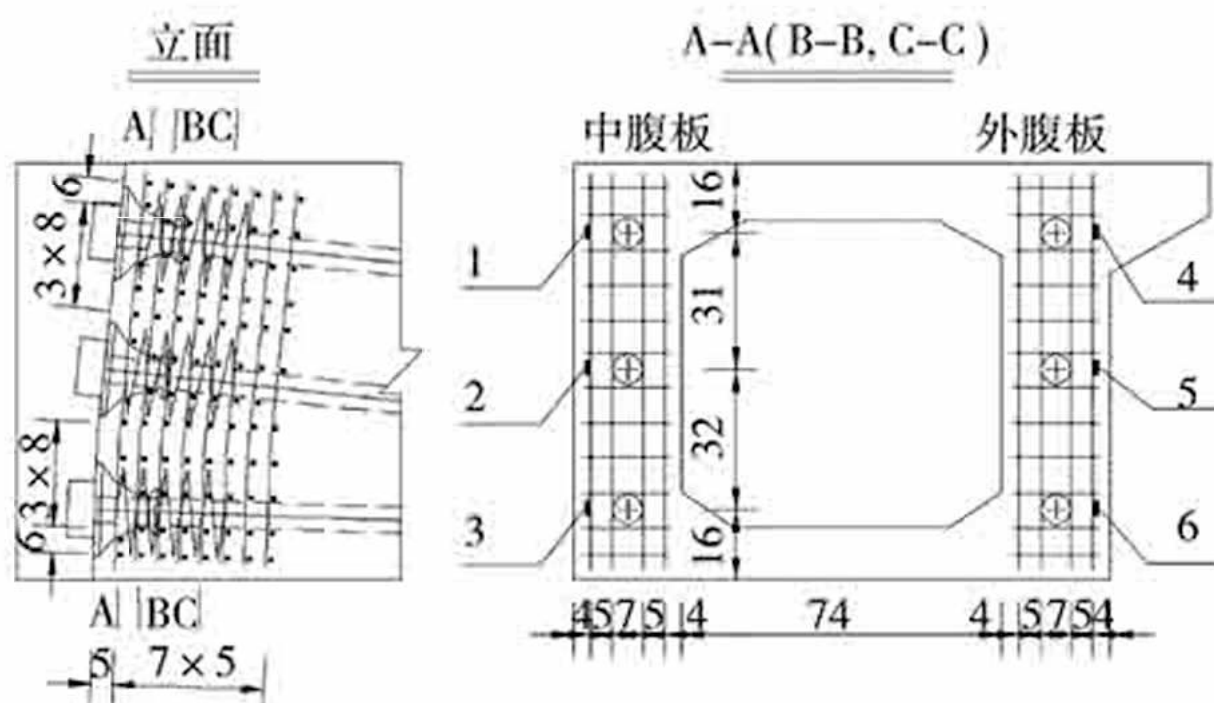


图9 应变测点布置及编号示意图（单位：cm）



图10 锚下应变器安装

3.3.2 应变测试结果

试验梁预制龄期和强度达设计要求后张拉预应力钢束，张拉阶段测试锚下应变，应变以受拉为正，受压为负。由于锚下应力状态复杂，多向应力作用下，结构变形受泊松效应的影响，要通过应变推算应力，必须测试多个方向的应变。由于多向应变的测试存在难度，本次仅测试各测点的竖向应变，测试数据不足以推算出测点处混凝土的应力，但并未对结果分析造成影响。测试结果直接给出应变实测值和理论值，见图11。

由测试结果可见，锚下混凝土应变实测值与理论值趋势基本一致，A1，A2，C5测点应变实测值大于理论值，其余均小于理论值。张拉完成

后,对锚下混凝土表面进行观察,未发现裂缝。

张拉完成后,及时对预应力孔道灌浆。

张拉后一个月,对锚下混凝土进行观察,发现在中腹板3号钢束对应处出现1道长 \times 宽=25cm \times 0.08mm的纵向裂缝,见图12。

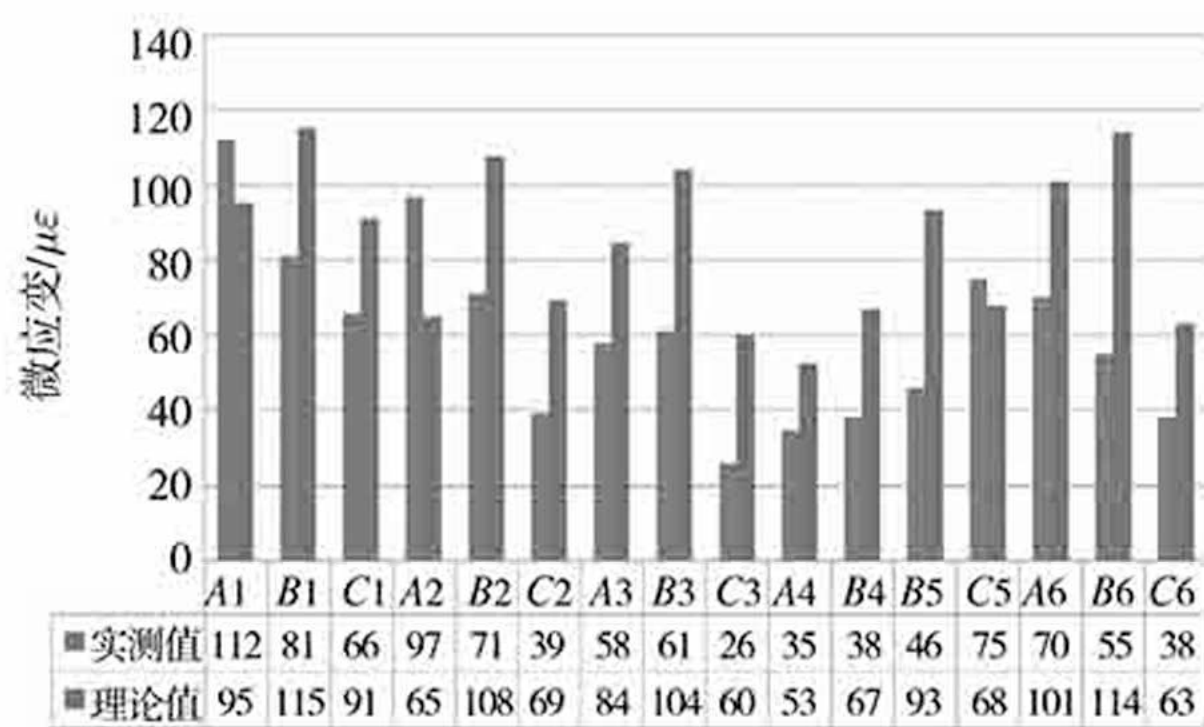


图11 锚下混凝土应变测试结果



图12 中腹板3号钢束对应处纵裂缝

3.3.3 锚下混凝土纵向裂缝产生机理

根据锚下应力理论分析、锚下应变测试结果、锚下混凝土裂缝情况,综合分析锚下混凝土纵向裂缝的产生机理:

(1) 理论分析表明:钢束张拉力引起的锚下混凝土应力分布复杂,在局部区域存在拉应力过大现象,有开裂的可能;

(2) 应变测试结果表明:A1, A2, C5应变实测值比理论值大,说明在钢束张拉力作用下,锚下混凝土局部区域可能存在裂缝,结构存在损伤,但裂缝不一定马上在混凝土表面出现;

(3) 经过1个月后,经观察发现中腹板3号钢束对应处存在纵向裂缝,说明随着时间的推移,

已经存在内部裂缝、存在结构损伤的锚下混凝土发生应力重分布后,裂缝可在混凝土表面出现。

4 结论

(1) 提高锚下加强钢筋配筋率和加厚腹板均可减小空心板锚下混凝土拉应力,加厚腹板比提高锚下加强钢筋配筋率效果更显著;

(2) 钢束张拉力引起的锚下混凝土应力分布复杂,若锚下加强钢筋设置不当或腹板厚度不足,在局部区域存在拉应力过大现象,锚下混凝土局部区域可能存在裂缝、结构存在损伤,在张拉完成时裂缝不一定马上在混凝土表面出现,而是在锚下混凝土应力重分布后出现;

(3) 在设计中,应合理选择腹板厚度、合理设置锚下加强钢筋,同时也可以从优化锚杯大小、形状方面入手,防止锚下混凝土纵向裂缝的发生。

参考文献

- [1] 李国平, 谢正元, 沈殷等. 预应力锚具锚下病害原因分析及建议[J]. 预应力技术, 2012, 85(2): 24-25、35.
- [2] 刑立强, 赵通. 锚下混凝土的应力分析[J]. 工程结构, 2005, 25(4): 73-76.
- [3] MOHAMAD H A, SHAO J F. Elastoplastic Damagemodelling and Failure Analysis of Concrete in Compression[J]. Key Engineering Materials, 2007, 340/341(2): 1127-32.
- [4] ZHANG W J, ATSUSHI K. A Study of the Localized Bearingcapacity of Reinforced Concrete Segment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(4): 467-473.
- [5] SHAO Y X, JAYASIRI S. Moment Capacities and Deflection Limits of FRP Sheet Piles[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(10): 520-528.
- [6] MARCEAU D, FAFARD M, BASTIEN J. Numerical Study of Mono Strand Anchorage Mechanism under Service Load [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 18(4): 475-491.
- [7] MA J, SHENG F, CHEN Y J. FEM Analysis of Stress Field inanchorage Zone of Box Section under Big Tonnage[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(6): 866-869.
- [8] 张文献, 朱红, 金叔阳等. 预应力锚下混凝土局部承压横向应力的分布规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(8): 1187-1191.