缓粘结预应力技术在综合体建筑大跨度梁中的应用

赵培庆，李威，张立山
（民航机场建设工程有限公司，天津　300456）

摘　要：缓粘结预应力技术是一种区别于普通预应力和无粘结预应力的新型技术，它具备后张法预应力筋中有粘结和无粘结的共同优点，且又克服了二者的缺点。文章通过介绍广州南沙国际邮轮母港综合体项目中大跨度梁缓粘结预应力的应用，阐述了缓粘结预应力技术施工工艺及特点，并对应用效果进行了详细的分析，期望能为后续类似综合体建筑大跨度梁采用缓粘结预应力技术施工提供参考。

关键词：缓粘结预应力；综合体建筑；大跨度
中图分类号：U445.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**2095-7874(2021)01-0057-05
doi：10.7640/zggwjs202101013

Application of slow bond prestress technology in long-span beam of complex building

ZHAO Pei-qing, LI Wei, ZHANG Li-shan
(Airport Construction Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: The technology of slow bond prestress is a new technology which is different from ordinary prestress and unbonded prestress. It has the common advantages of bonded and unbonded in post tensioned prestressed tendons, and overcomes their shortcomings.This paper introduces the application of the slow bond prestress technology in the large span beam of Guangzhou Nansha international cruise home port complex project, expounds the construction technology and characteristics of the slow bond prestress technology, and makes a detailed analysis of the application effect, which is expected to provide reference for the construction of slow bond prestress technology in the large span beams of similar complex buildings in the future.

Key words: slow bond prestress; complex building; large span

0　引言

缓粘结预应力筋由外包护套、钢绞线和中间填充的缓粘结胶黏剂构成。外包护套表面通过机械压制成波纹状，在施工阶段，缓粘结胶黏剂具有一定流动性，且对钢材有较好的附着性。施工完成后，缓粘结胶粘剂随着时间的推移逐渐固化，与钢绞线、外包护套之间产生粘结力。当胶黏剂完全固化后，钢绞线与外包套管之间充分粘结，外包护套与混凝土进行咬合，从而使预应力筋与混凝土形成整体；缓粘结预应力从无粘结过渡到有粘结预应力，具备了有粘结预应力筋的力学效果[1]。缓粘结预应力技术作为一种新型预应力技术，在近几年得到了迅速发展，随着我国大型、超大型综合体建筑的建设越来越多，此项技术的应用也会越来越广泛。本文以广州南沙国际邮轮母港综合体项目为例，说明缓粘结预应力施工技术在航站楼二层大跨度转换梁中的应用情况。

1　工程背景

广州南沙国际邮轮母港综合体项目，位于广州南沙虎门大桥下游珠江邻水边，总占地面积 71 935 m^2，总建筑面积 356 443 m^2，其中邮轮母港航站楼二层设计为入境关检区域。为满足关检

收稿日期：2020-10-11　　修回日期：2020-12-10
作者简介：赵培庆（1976—　），男，天津市人，高级工程师，土木工程专业，主要从事建筑工程质量管理工作。E-mail：22007616@qq.com

区域大空间需求，所有框架柱设计为钢骨混凝土组合结构，其中 4 榀框架梁设计为缓粘结预应力混凝土结构，每榀总长为 25.2 m，梁截面尺寸为 1 200 mm×1 800 mm，混凝土强度等级为 C60。具体结构平面见图 1 所示。

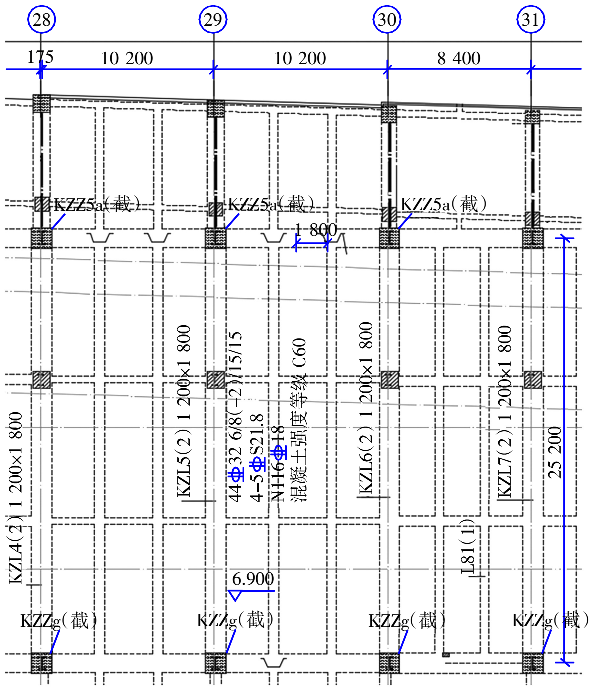


图 1　二层大跨度缓粘结预应力结构平面图

Fig. 1　Second floor plan of large span slow bond prestress structure

航站楼主体结构施工工期要求为 180 d，作为广东省重点工程，施工管理具有工期紧张、结构复杂，且多为现浇大跨度结构等特点。

2　缓粘结预应力技术的优点

传统的预应力有先张法预应力和后张法有粘结预应力及后张法无粘结预应力。而缓粘结预应力是一种新型预应力技术，它具备后张法预应力筋中有粘结和无粘结的共同优点，且又克服了二者的缺点。缓粘结预应力技术不仅能达到传统的预应力效果，且在施工过程中与有粘结预应力技术相比，无需铺设波纹管和灌浆等工序，同时降低了现场人工操作的不良影响，施工质量更容易得到保障。缓粘结预应力张拉端和锚固端均采用单孔锚具，节点布置更灵活，施工更方便。同时，施工过程中可节约铺设波纹管和灌浆工序的施工时间，可有效提高施工工效，节约工期[2]。

3　缓粘结预应力施工

3.1　施工参数的确定

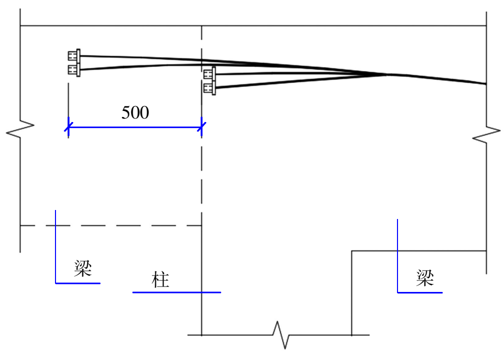
3.1.1　预应力张拉控制应力值的确定

本工程缓粘结预应力钢绞线采用直径为 21.8 mm 高强低松驰钢绞线，外包套管肋高不低于2.0 mm。肋中缓凝粘合剂充盈[3]。其中钢绞线强度标准值 f_{ptk}=1 860 MPa，弹性模量 E_p=195 GPa，张拉控制应力为 σ_{con}=0.75f_{ptk}=1 395 MPa。预应力张拉时采取双控原则，即张拉应力和预应力筋的张拉伸长值 2 个控制参数。

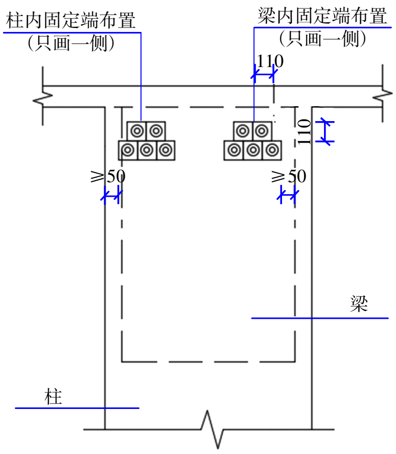
3.1.2　预应力筋下料长度的确定

根据设计要求，结合 06SG429《后张预应力混凝土结构施工图表示方法及构造详图》进行预应力筋布设及下料长度的确定[4]。

4 束预应力筋分别按梁内固定端两束和柱内固定端两束对称布置，其中梁内固定端和柱内固定端不在同一平面内，具体固定端布置如图2 所示。



(a) 梁内和柱内固定布置图



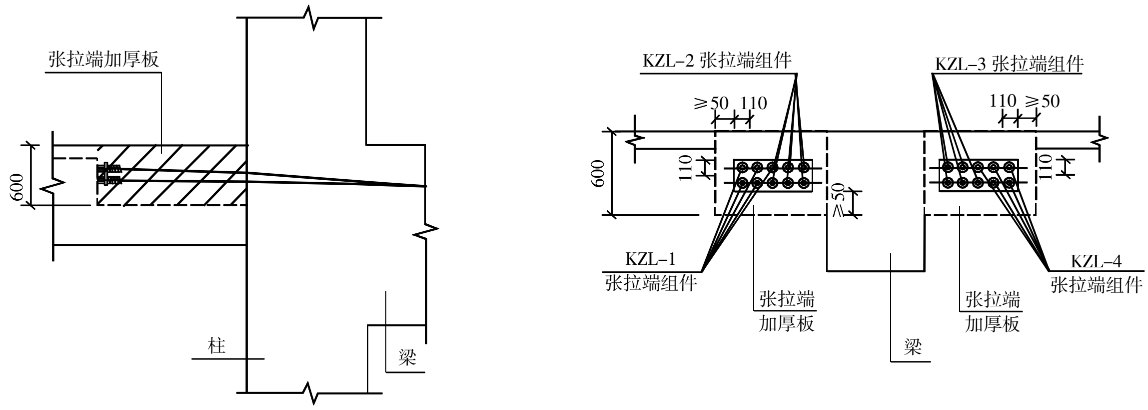
(b) 组件布置图

图 2　固定端布置图

Fig. 2　Layout of the fixed end

根据张拉端组件尺寸及预应力筋保护层厚度要求，承压板尺寸为 110 mm×110 mm，按照预应力筋纵向布置两排，水平布置 5 束，保护层厚度为 50 mm 计算，张拉端深化设计时需对梁两侧原结构板加厚至 600 mm 处理，加厚范围为 1 550 mm×700 mm，同时进行构造配筋。具体张拉端布置图如图 3 所示。

根据预应力筋布置图及规范可知，设计单根钢绞线长度=孔道长度+工艺操作长度，孔道长度=直线长度+曲线增量。其中，直线长度为每段预应力筋一侧的张拉端外边至另一侧的张拉端外边(或固定端外边)的直线距离；梁内预应力孔道的曲线增量按每跨增加 1 倍的梁高累加计算；由于本工程缓粘结预应力梁跨度为 25.2 m 大于 20 m，工艺操作长度取 1.8 m，结合预应力筋布置深化图，梁内固定端和柱内固定端两种预应力筋下料长度分别为 31.55 m 和 32.55 m 两种。



(a) 加厚板处固定布置图　(b) 组件布置图

图 3　张拉端布置图

Fig. 3　Layout of the pull end

3.1.3　理论伸长值的计算

缓粘结预应力理论伸长值 Δl_p^c，公式为：

$$\Delta l_p^c = \frac{F_{pm} l_p}{A_p E_p} \tag{1}$$

式中：F_{pm} 为缓粘结预应力筋平均张拉力，N，本工程采用一端张拉，$F_{pm}=0.75 f_{ptk} \times A_p$；$l_p$ 为缓粘结预应力筋长度，mm；A_p 为缓粘结预应力筋截面积，mm²；E_p 为预应力筋弹性模量，N/mm²。

将已知参数代入公式，可得出本工程 KZL–1、KZL–4 预应力筋理论伸长值 Δl_p^c=225 mm，KZL–2、KZL–3 预应力筋理论伸长值 Δl_p^c=232 mm。

缓粘结预应力筋实测伸长值 Δl_p^0 可控制在 ±6% 理论伸长值内，则 KZL–1、KZL–4 缓粘结预应力筋实测伸长值 Δl_p^0 在 211~232 mm 内均为合格；KZL–2、KZL–3 缓粘结预应力筋实测伸长值 Δl_p^0 在 222~246 mm 内均为合格。

3.2　施工控制要点

3.2.1　支设梁底模，绑扎梁骨架钢筋

本工程预应力梁长 25.2 m 跨中梁底模板按照 1/500 梁长起拱，采用满堂脚手架支撑。为保证梁不出现下沉变形等质量事故，在梁底模中间加设两排立杆，并将支撑架体小横杆加密。梁底模板支设完成后，绑扎梁骨架钢筋，铺设预应力筋，最后再绑扎梁中钢筋。

3.2.2　定位矢高，固定钢绞线架立筋

根据设计预应力筋基本线性图，本工程为 2 段 L(折线)形布置，结合规范要求，预应力筋在梁内竖向高度采用架立筋控制，架立筋间距控制在 1 m 以内。固定钢绞线架立钢筋采用 ϕ14 mm 的螺纹钢筋，架立筋采用绑扎固定。当绑扎操作比较困难时，增加绑扎附加筋，架立筋与附加筋采用焊接固定[5]。

3.2.3　穿入预应力筋

预应力筋的加工及组装按照深化设计确定好的下料长度在工厂内完成，穿入前确保每根预应力筋规格、尺寸及数量无误且端部配件组装可靠。预应力筋由固定端向张拉端穿入，当预应力筋与普通钢筋发生碰撞时，优先保证预应力筋的位置，且不得影响预应力筋的矢高。预应力筋出梁面张拉端若遇到梁墙柱普通钢筋较密时，张拉端位置可前后错过钢筋较密处进行调整。

3.2.4 安装张拉端，固定端承压板

张拉锚固体系包括固定端采用的 Mp22 挤压锚具和张拉端采用的 M22–1 单孔夹片锚具，所有锚具均采用 I 类锚具[6]。张拉端严格按照深化预应力筋位置在加厚板端部模板上钻孔，先将螺旋钢筋套入缓粘结预应力筋上，确保与缓粘结预应力筋同轴，且固定牢固，再安装承压板，最后安装穴模，承压板与穴模紧靠固定，且确保承压板与预应力筋垂直。张拉端锚具系统安装时，同样先安装螺旋筋，再安装挤压锚，且确保缓粘结预应力筋露出挤压锚长度满足张拉机具所需长度，本工程预留 1.8 m。

3.2.5 绑扎梁其他钢筋，合侧模，浇筑混凝土

本工程缓粘结预应力框架梁除了骨架钢筋外，还包括内箍筋、拉钩筋、腰筋等钢筋，确保所有钢筋绑扎完毕后进行合侧模。混凝土浇筑前，检查预应力筋抛物线型和定位钢筋固定情况，发现问题及时调整。混凝土试块制作时，应多出 2 组，与梁进行同条件养护，在预应力筋张拉前试压时使用，混凝土浇筑过程中，不得扰动预应力筋、定位钢筋以及预埋件的位置，并应确保端部混凝土振捣密实。张拉操作位置先进行预留，待张拉完成后再补浇预留位置混凝土。

3.2.6 安装锚具及预应力张拉程序

由于缓粘结胶黏剂具有一定流动性，为减少张拉过程的摩阻力，提前在不安装锚具夹片的情况下进行预张拉 2~3 次，使胶黏剂受到一定的扰动，然后安装夹片，张拉到位[7]。本工程预应力筋张拉分两阶段，当预应力梁混凝土强度达到设计强度的 100%时(以同条件养护试块的试验结果为准)，进行第一阶段张拉，张拉预应力筋总数量的 50%；当航站楼主体结构全部完成后，进行第二阶段张拉，张拉预应力筋总数量的另外 50%。预应力筋两侧对称同时张拉，按照张拉端布置图，第一阶段张拉 KZL–1、KZL–4 组件（或 KZL–2、KZL–3 组件）；第二阶段张拉 KZL–2、KZL–3 组件(或 KZL–1、KZL–4 组件)。由于本工程地处广东地区，施工时正处于夏季，当地全天温度高于 20℃，根据规范要求，张拉过程可为张拉应力从 0~1.0σ_{con} 即可。张拉控制应力不超过 0.75f_{ptk}=1 395 MPa，预应力张拉时采取双控原则，即张拉应力和预应力筋的张拉伸长值 2 个控制参数。当实际伸长值大于或小于理论伸长值的 6%时张拉暂停，查出原因，并采取相应措施进行调整后再继续张拉。

3.2.7 切割多余预应力筋，张拉端封锚

张拉端封锚预应力筋张拉完毕后，留出 30 mm 长的缓粘结预应力筋，其他多余的采用砂轮锯进行切除。及时对锚固区进行封锚保护，采用高一个强度等级的微膨胀细石混凝土或砂浆封埋密实[8-9]，最后浇筑张拉操作预留位置混凝土，如图 4 所示。

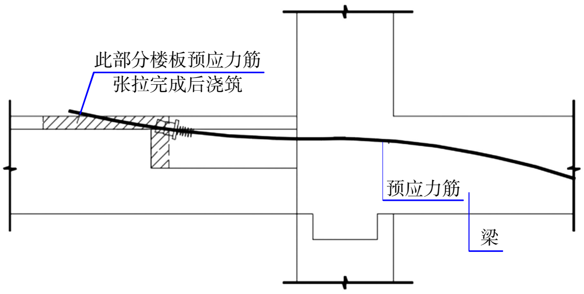


图 4　张拉端预留操作位置图

Fig. 4　Reserved operation location diagram of the pull end

4　应用效果

4.1　张拉效果

本工程自 2019 年 9 月 5 日开始预应力梁梁底模板支架施工，9 月 13 日完成该部位的混凝土浇筑，7 d 后对预留的同条件养护的混凝土试块进行抗压强度试验，混凝土强度已经达到设计值 100%，即在 2019 年 9 月 20 日进行第 1 阶段的预应力筋的张拉，第 2 次张拉在 2019 年 12 月 25 日，即本工程主体结构全部封顶之后，两次张拉过程，张拉应力均在控制范围内，且实际伸长值偏差在理论伸长值的±6%控制范围内，张拉效果良好。二次张拉时间距离预应力筋生产时间为 98 d，在缓粘结剂的标准张拉使用期为 180 d 内。

4.2　可操作性

缓粘结预应力技术施工工艺与无粘结预应力技术相似，但与有粘结预应力技术相比操作相对少了两道工序，无需布置波纹管且不需要进行注浆，减少了现场人工操作的影响，施工质量更容易得到保障。且缓粘结预应力张拉端与锚固端均采用单孔锚具，节点布置更灵活，施工更加方便。在该工程施工前，需对缓粘结预应力筋的布置进行详细的施工深化设计，张拉端与固定端预应力筋根据现场实际情况进行了合理的布置，有效地避免了预应力筋与型钢柱及梁钢筋的碰撞；在张

拉端采用加厚板处理，预留张拉操作位置；采用一端出板面张拉方式，为张拉作业提供了便利的施工条件及足够操作空间，确保了张拉过程顺利完成。

4.3 经济性

本工程缓粘结预应力筋约 9 t，根据目前定额单价，有粘结预应力施工及材料综合单价为 15 000 元/t，缓粘结预应力技术施工及材料综合单价为 20 000 元/t，则在本工程中缓粘结预应力技术材料综合费用比有粘结预应力技术的材料综合费用高出约(20 000−15 000)×9=45 000 元。但由于缓粘结预应力技术施工过程少了两道复杂的施工工序，相对节约人工费用约 150 000 万元。综上所述，本工程采用的缓粘结预应力与有粘结预应力技术相比总费用节省了约 105 000 元。

5 结语

通过缓粘结预应力技术在广州南沙国际邮轮母港综合体项目中的应用，不难发现，缓粘结预应力技术在满足公共建筑所追求的大跨度、大空间的效果外，与传统的预应力技术相比，施工过程相对较简单，更具有可操作性，且施工质量容易得到保证。虽然缓粘结预应力筋的市场价格较高，但在施工过程中可节约劳动力，节约工期，总体经济性较好。

参考文献：

[1] JGJ 387—2017,缓粘结预应力混凝土结构技术规程[S].
JGJ 387—2017, Technical specification for concrete structures prestressed with retard-bonded tendons[S].

[2] 06SG429,后张预应力混凝土结构施工图表示方法及构造详图[S].
06SG429, Post-tensioned prestressed concrete structure construction drawing representation method and structure detail drawing[S].

[3] JG/T 369—2012,缓粘结预应力钢绞线[S].
JG/T 369—2012, Retard-bonded prestressed steel strand[S].

[4] 宋晓峰,李俊安,许术旺,等.缓粘结预应力技术在双辽站工程中的应用[J].建筑科学,2011,27(S2):167-168.
SONG Xiao-feng, LI Jun-an, XU Shu-wang, et al. Construction of retard-bonded prestressed in the Shuangliao station[J]. Building Science, 2011, 27(S2): 167-168.

[5] 丁伟,胡世金,赵成成.缓粘结预应力在工程中的应用及问题研究[J].四川建筑,2014,38(2):172-173,175.
DING Wei, HU Shi-jin, ZHAO Cheng-cheng. Application and problem study of slow bond prestress in engineering[J]. Sichuan Architecture, 2014, 38(2): 172-173, 175.

[6] GBT 14370—2015,预应力筋用锚具、夹具和连接器[S].
GBT 14370—2015, Anchors, grip and coupler for prestressing tendons[S].

[7] 李金根,熊小林,张磊.缓粘结预应力摩阻测试及施工工艺研究[C]//第十三届全国混凝土及预应力混凝土学术会议论文.2005:416-421.
LI Jin-gen, XIONG Xiao-lin, ZHANG Lei. Study on test and construction technology of slow bond prestress friction resistance [C]//Proceedings of the 13th national symposium on concrete and prestressed concrete. 2005: 416-421.

[8] 黄铁.建筑结构缓粘结预应力混凝土施工技术[J].建筑工程技术与设计,2018(26):1 425,1 427.
HUANG Tie. Construction technology of slow bond prestressed concrete of building structure[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2018(26): 1 425, 1 427.

[9] 刘文华,朱龙,刘立军,等.新型缓粘结预应力体系的试验研究[J].中国港湾建设,2009,29(1):25-32.
LIU Wen-hua, ZHU Long, LIU Li-jun, et al. Experimental investigation of new slow bonded prestressed system[J]. China Harbour Engineering, 2009, 29(1): 25-32.

(上接第 22 页)

2014,34(2):70-74.
ZHU Lian-yu. Design and realize of special shipping information integration and optimization system based on lean management method—A case study of CCCC International Shipping Corporation [J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(2): 70-74

[15] 蔡芸,霍永忠.集装箱码头仿真和优化研究进展[J].中国港湾建设,2008,28(1):74-78.
CAI Yun, HUO Yong-zhong. Progress in research on simulation and optimization of container terminal: an overview[J]. China Harbour Engineering, 2008, 28(1): 74-78.

[16] 韩晓龙,童辉.随机需求下考虑多目标的空箱调运研究[J].广西大学学报:自然科学版,2017,42(2):764-772.
HAN Xiao-long, TONG Hui. Empty containers dispatching optimization with multi-objective based on random demand[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2017, 42(2): 764-772.

[17] 刘宝碇,赵瑞清,王纲.不确定规划及应用[M].北京:清华大学出版社,2003.
LIU Bao-ding, ZHAO Rui-qing, WANG Gang. Uncertain programming with applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.