

# 预应力技术在市政道路桥梁施工中的应用

付冠西 邓勇 (通讯作者)

四川路桥华东建设有限责任公司

**摘要:**随着市政道路桥梁向预制化发展的背景,为提高桥梁承载能力、控制变形等,本文以预应力技术在桥梁施工中的应用为例,提出筋索张拉、锚固处理、混凝土浇筑等运用举措。文章通过例析预应力钢绞线、受弯构件中的具体应用,阐述了设计参数优化、施工过程精密控制等技术要点。同时,也分析了预制预张、材料选型等方面的技术难题,提出完善监测预警和质量体系等对策。研究成果系统总结预应力技术在桥梁施工实践中的运用要领,可为预应力技术的推广和应用和创新发展提供借鉴。

**关键词:**预应力技术;市政桥梁;施工应用;技术难点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.07.054

预应力技术可以提升桥梁承载性、耐久性并控制变形,在市政桥梁施工中得到广泛应用。然而,技术复杂多样也带来工序质控、材料选择等难题。为推动预应力技术在桥梁施工实践中的持续健康发展,有必要深入探讨预应力在不同结构中的具体应用举措,分析应对技术挑战的思路,以拓展预应力技术的应用空间。

## 一、预应力技术概述

预应力技术是公路桥梁建设中广泛采用的一种技术,主要是在桥梁结构中人为引入内力,使结构能够具有一定的内应力,以抵抗外部荷载作用产生的应力影响。这种技术的主要目的是利用结构中人为预应力的反作用力来调节和控制正常使用荷载作用下混凝土和钢材等的应力状态,使材料得以在较低的应力水平下发挥更高的承载能力和刚度,充分发挥建材的性能。预应力技术在公路桥梁建设中主要体现为预应力混凝土和预应力钢筋两大类型。采用预应力技术设计施工的桥梁结构中,混凝土和钢材能够按照更优状态工作,这种结构形式具有承载力大、刚度高、裂缝控制好等优点。因此,预应力技术的运用,可以降低材料耗用,提高桥梁的节约性和经济性,是公路桥梁建设中一种重要的技术手段。

## 二、预应力技术在道路桥梁施工中的优势

### (一) 提高桥梁的承载能力和耐久性

预应力技术应用于道路桥梁施工中,可以发挥显著的技术优势。第一,它可以明显提高桥梁的承载能力和耐久性。普通桥梁受弯矩作用时,上边缘受压,下边缘受拉,容易开裂脱节。而预制预应力桥梁利用预应力引入下边缘的压应力抵消部分外力,使其始终处于压应力状态。这避免了下边缘开裂,增大了结构的有效断面

积,使承载能力可以提高30%以上。同时,预应力控制了混凝土开裂发育,减缓了碳化和钢筋锈蚀问题,延长了疲劳寿命,使桥梁结构更加耐久。

### (二) 减小桥梁的变形和沉降

第二,预应力技术可以显著减小道路桥梁的变形和沉降。在施工过程中,预应力引入的压应力可以有效抵消部分外荷载在使用阶段对结构的拉应力影响,控制正常应力在合理范围,避免超标拉应力对桥身产生拉伸变形。比如,对于简支T梁桥,预应力可以减小桥梁竖向沉降变形量的60%—80%;对于连续梁桥,可以减小横向沉降变形量的70%以上。此外,预应力还会提高结构的整体刚度,增大弹性阶段区,有效抑制桥梁损伤程度,减缓变形发展。这种减小变形的效果,可以提高行车的舒适性,延长桥面的使用寿命,也更利于上部结构与下部基础的协调工作,保证桥梁的长期稳定性。

### (三) 减小结构尺寸

第三,采用预应力技术可以减小桥梁结构的总体尺寸。由于预应力提高了桥梁抗弯刚度,在确保结构安全的前提下,可以采用更小的断面尺寸。例如,对于简支T梁桥,在不改变跨度、荷载的条件下,采用预应力技术可以减小梁高15%—30%。这可以减少桥梁重量,降低桥台桥墩的结构要求,也减少模板支架等临时工程量。另外,降低梁高也更加美观,结构高度对景观影响更小。对于预制式预应力连续箱梁桥,也可以减少桥梁板厚,这既减轻自重,也减少预制节段的运输难度。

### (四) 延长结构使用寿命

第四,预应力技术的应用也可以明显延长道路桥梁的使用寿命。预应力可以抑制混凝土开裂,减缓钢筋腐蚀问题,增强结构抗疲劳性能,这有助于延长疲劳寿命。与普通钢筋混凝土桥相比,采用预应力的预制混合梁桥和预制空心板桥的结构设计使用年限可以增加10—15年。此外,预应力减小变形也避免车辆振动反复作用产生金属疲劳。在一定程度上控制内力应力水平,也能减缓混凝土的碳化速率,防止过早劣变。预应力尤其适合跨径较大、要求使用时间较长的重要桥梁。

## 三、预应力技术在道路桥梁施工中面临的挑战

### (一) 材料和设备选择方面的挑战

预应力技术在道路桥梁施工应用中,也面临一定的挑战。第一方面是材料和设备选择带来的挑战。预应力施工需要优质的混凝土和高强钢丝绞线,这对材料力学性能指标有较高要求。部分地区优质混凝土和高强度预应力级钢丝供应不足,限制了预应力技术应用。此外,施工也需要大型铺设设备、张拉装置、后张设备等专用

装备。这些设备投资成本高，对施工企业实力要求高，也制约预应力技术推广。除此之外，材料长期性能如收缩、蠕变等也需要关注，设计计算中如何合理采用材料性能参数也是技术难题。

### （二）施工工序和时间控制方面的挑战

第二个挑战在于施工工序和时间的严格控制。预应力施工质量对结构性能影响很大，需要严格控制每道工序。如预制桥排产需要控制混凝土拌合优质，模内养护周期；设备移位需要精准定位，确保线束受力合理；张拉时要控制应力增量，防止破坏；后张需恰到好处，不能松弛。这些工序对时间控制敏感度高，稍有偏差都会影响质量。此外，金属材料处在预应力状态的时间越长，搁置期若控制不当也会加速时效衰减。还需要严控环境温度、湿度变化对预制产品的影响等。上述种种对工序质量和时间节点控制的严格要求，增加了施工难度，是预应力技术面临的难题。

### （三）质量控制和安全管理方面的挑战

第三，预应力道路桥梁施工中的质量控制和安全管理也面临挑战。由于预制和预张应力工艺复杂多样，对材料强度和构件抗裂性能指标要求高，施工环节中间产品的质量考核与检测难度大，现场作业及产品质量管控工作较为繁重。这需要建立系统、规范的质控体系，完善监测预警机制。与此同时，预制预张等特殊操作也存在一定安全风险。如预制排翻转、吊装过程中要防止碰撞偏移，张拉时组件承载能力易受损伤。还需防止火灾、防雷击等。这要求企业落实操作规程培训，做好安全风险识别评估和隐患排查工作，强化作业人员安全素养。

## 四、预应力技术在道路桥梁施工中的应用

### （一）锚固与锚具处理环节

预应力技术在道路桥梁施工中有非常广泛的应用，其中锚固与锚具处理是重要的工艺环节。这直接关系到预应力的有效传递。

第一，常用锚具有橡胶锚固端、螺纹锚具和楔式锚具三种。其中，橡胶锚固端采用灌注橡胶进行端头封固，制备简便，用于一般情况；螺纹锚具利用螺母或螺钉实现机械锚固，抗拔性能好，重要部位首选；楔式锚具利用楔块嵌固，制作方便，也多用于普通部位。三类锚具各有特点，设计选型时要区别对待。第二，施工处理要严格按规范操作。如螺纹锚具处理要求丝杆两端应留出20毫米，以夹紧空间；端头封固要采用优质橡胶，注入压力 $\geq 0.7$ 兆帕；楔块打击次数不宜过多，以免钢丝受损。质检要对比设计数据，测定锚固长度、保留空间等检验符合规范要求。第三，关键部位锚固处理要重点加强。桥中主墩处预制桥排结构较复杂，钢束应力随截面变化较大，需要精细设计锚固长度，分区处理；边跨处也要严控，避免边跨预制件产生裂缝。一般提高边跨锚具数量或采用螺纹锚固方式提高抗拔性能。

### （二）穿索和下料环节的处理

预应力技术在道路桥梁施工中，穿索和下料也是专业复杂的重点工序。这关系到预制排预应力。

首先，穿索对受力均匀、协同变形十分关键。多根索束通过同一个穿孔，需要评定孔道位置和机器布置方案，严控预制排产线中心线与钢丝直线度差，保证孔位精确对称布置。同时，还要严格穿孔质量，保证尺寸与成孔度，避免损坏钢束抗拉疲劳性能和护层防腐性能。此外，下料选择恰当的磨角辊辅助，可减少下料导向机构损伤钢束护层的可能性，也提高工作效率。不同预制排结构尺寸和索束分布情况，要针对性提出合理下料控制措施。如主梁宽度大、钢束分散时，常采取“两步式”下料工艺，分区控制，确定合理落料速度和角度，以免发生钢束缠结现象。例如某预应力T梁桥工程正采用上述措施。监理和施工单位对30米跨径T梁预制排的定位孔、穿孔质量以及预埋锚固端头螺纸板等重点部位的下料过程进行全过程监控，最大限度减少安装过程中的偏差风险，提高了施工精度与效率。

因此，穿索下料工艺的规范控制直接关乎预应力的传导效果，也是保障预制排产品质量的重中之重。这需要设计、施工、监理各方重点关注、通力合作。

### （三）预应力筋的张拉环节

预应力筋的张拉是预应力施工的核心环节，直接关系到下游预制件性能。张拉环节要严格掌控，重点体现在以下几个方面：

其一，张拉设备选择。需要选用电液比例或向量控制等先进设备，实时监控、精确控制张拉力大小。设备要定期校准，保证测力准确度。监理要核查设备性能报告，确认合格后方可张拉。其二，张拉程序优化。常规采用分级加载方式，均匀控制预应力。结合不同类型预制件设计预张量，合理设置加载级数、应力增量大小，精心设计张拉速率曲线，保证预制件各部位拉力增长均匀。避免出现最大拉力超标或拉力不均匀问题。其三，数据监测。监理要监测每级加载增量数值、各预制件实测拉力，与理论计算值对比分析，指导施工调整，确保各作业竖井预应力筋拉力值符合设计。必要时进行抽样核查。例如，某预制连续板桥张拉时，监理采用上述措施，配合施工单位优化调整张拉方案，实现张拉过程各预制件拉力控制误差小于5%，满足设计要求，提高了质量控制精度，也为后期施工奠定良好基础。

### （四）混凝土施工方面

第一，混凝土配合比设计要严格把控。由于预应力设备和施工对混凝土强度指标要求高，混凝土设计要合理选择原材料种类、胶结材用量等。要选用高品质水泥和骨料，细化配合比方案设计，经预试块考核后使用。第二，搅拌和运输过程严密检查，检测混凝土各项性能指标。着重检查搅拌均匀性、坍落度等，避免搅拌不当影响混凝土早期强度；还要严禁混凝土抛撒，避免分层、震损。搅拌时间一般不宜过长。第三，模内养护要严格控制。模内养护直接关系混凝土结构形成，要严

密操作。如蒸汽养护法要严控温度和压力参数，慢速升温，避免热差损伤。可采用自动控制记录仪监测，确保规范。监理要抽检养护记录判断合规性。

在某预应力箱梁项目中，选用上述手段加强混凝土质控，配合优化调整配比，使各项标允值指标优于设计标准，混凝土养护过程也更加规范，为后续工序创造条件。

### （五）预应力钢绞线技术的应用

预应力钢绞线是桥梁预应力施工中最常用的一种预应力构件。正确应用预应力钢绞线技术，直接关系到结构性能。其主要应用体现在以下几方面：

首先，预应力钢绞线材料选择需要审慎。要选择经检验机构认证的优质碳素结构钢或低松弛钢绞线，材料抗拉强度、弹性模量、放松损失率指标要明确控制，并进行预应力腐蚀试验，避免产生时效断裂、应力腐蚀破坏问题。检测报告完备是基础。同时，合理设计预应力钢绞线结构参数。针对不同类型桥梁，要筛选适用的规格、数量组合，逐一计算预应力作用后实际应力水平，精心设计张拉次数，确定端头锚固形式，使各构件抗拉强度和疲劳性能充分满足设计使用要求。其次，严格施工过程管理。从搬运、穿管、张拉等环节严密把控，定期抽检预应力钢束防腐完整性。张拉系统对应力控制精确程度高于95%，严防超载。后续浇筑环节严控施工裂缝。如广东某项目公路预制桥施工选用该管理模式，预应力钢束实测强度、防腐性能等指标优于设计标准，张拉控制和结构施工也更严密，满足结构安全使用需求，提高了预应力作用效果，值得推广。

### （六）在混凝土箱梁中的应用

首先，根据箱梁设计跨径和结构布置类型，选取合适的预应力方式，如预张预应力、后张预应力或组合方式，明确预应力筋类型及受力分布。同时优化预制箱梁产线设计，确定预制节段划分与接缝设置方案。同时，针对预制箱梁产品工艺特点，采用适宜的预应力施工工艺，如自承式预张法、支承式预张法等，确定相应的设备、模架支承要求。并合理确定各预制件的预张力设计值。一方面，预制过程中精心控制预张环节，严密检测预应力钢丝张拉力，控制误差在5%以内，满足设计要求。采取支承治理、结构补强等措施，降低预制与运输过程中的槽梁受力变化导致的破坏风险。另一方面，吊装预制箱梁时，严格控制起吊速度，避免发生超载，或碰撞变形问题。后张和灌浆过程也要逐块检测数据，确保后张预应力索的各项指标满足设计。

### （七）在受弯构件中的应用

第一，根据T梁、箱梁设计情况，选择恰当的受弯构件预制产线和预应力方式。如大跨径箱梁宜选用支承式预张技术，配套成品梁分部浇筑法生产工艺，确定预制过程支模架设计，保障产线稳定。第二，根据跨径、段数等特征，优化设计预张力预应力分布。积极推进

采用可调力索绑带等新技术引入后张力，实现后张预制件的结构强度增长，弥补预张不足。精心设计索束分布和受力情况，确保各龙骨、腹板受力均匀。第三，严密施工过程测试与控制。制定张拉测力曲线和逐步加载方案，监测各预制件张拉力，控制拉力误差小于5%。防止预制件产线钢丝受力不均、受力不足等质量问题产生。采取模板支撑、衬砌加固等措施降低翻转运输风险。

如湖南长沙某预制箱梁桥结合该思路设计施工的80米特大箱梁，采用分布式可调力预张技术，结构裂缝控制良好，主要指标均优于设计标准要求，验证了预应力技术效果，值得推广。

### （八）预应力钢筋的穿梭技术

预应力钢筋穿梭技术是指在混凝土结构体上制作预制孔，并将预应力钢筋穿过该孔后张拉锚固的一种预应力技术，这项技术在公路桥梁工程中取得了广泛应用。主要体现在以下几个方面：

一是，根据跨径和结构布置，选择采用预制简支T梁或箱梁等。明确预制生产线位置，分析钢筋穿孔与预制件型钢结构位置，优化穿梭钢筋的布置计划，合理确定孔位、孔径和穿梭筋数量。二是，优选高抗裂疲性能螺纹钢作为穿梭筋，并针对钢筋规格、锚固方式等研究优化穿梭工艺，确定穿钻设备、封孔材料等采用标准。制定穿梭钢筋的加工、检测规程，保证穿梭钢筋与结构件连接可靠性。三是，钻孔封孔后，采用灌浆桩法将混凝土浇灌入预制件和梁柱节点，保证结构连接处完整性。四是，浇筑数量和强度严格控制，减少结构破损风险，后张拉预应力筋时检测锚固长度，严控预损失和预张力降低幅度。

结语：随着预制装配技术的推广应用，预应力作为桥梁施工的重要环节也需要不断创新完善，构建系统的应用体系。工程技术人员需要积极探索各类预应力新材料新工艺的运用，加强对结构受力分析，提高信息技术应用水平，从而促进预应力技术在桥梁实践中取得新进展。展望未来，随着BIM、IOT建造技术的发展，预应力桥梁施工也将迎来新的机遇。这需要加大预应力结构多维受力模型研究，探索大数据分析预测预应力损伤演化规律，开发预应力结构数字孪生系统，实现从设计到施工全生命周期的智能化监测管理。这无疑将极大拓展预应力技术的应用前景，推动我国桥梁建造向更高水准迈进。

### 参考文献

- [1] 吕倩. 预应力技术在道路桥梁施工中的有效应用分析[J]. 运输经理世界, 2023(26): 86-88.
- [2] 钟益雄. 预应力技术在道路桥梁施工中的应用分析[J]. 居业, 2022(08): 29-31.
- [3] 李君. 预应力技术在道路桥梁施工中的应用[J]. 建筑监督检测与造价, 2022, 15(02): 33-37.