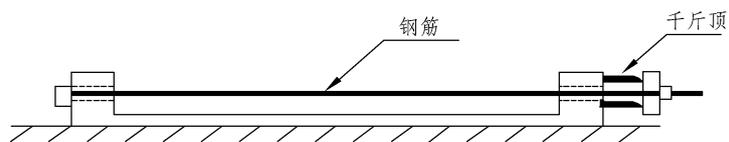


1 绪 论

1.1 研究背景

近年来，我国高速公路建设事业得到了迅速发展，建设规模不断扩大，大跨度公路桥梁结构的设计标准和施工技术水平不断提高的同时也对施工工艺、结构的耐久性、传力的可靠性等提出了更高要求，由此促进了新材料、新技术、新工艺及新设备的研究和应用。

预应力技术按施工方法分为先张法和后张法，两者在施工工艺、传力机理、有效预应力等方面均存在明显差异。其中，后张法是先浇筑混凝土构件并预留孔道，待混凝土强度达到设计要求后，将预应力筋穿入预留孔道进行张拉后锚固于构件端部并在孔道中灌浆，靠锚具使截面产生预压应力。后张法构件在跨度方面具有明显优势，常用于中大跨度曲线配筋的装配式或现浇梁板结构的施工中，目前后张法简支梁结构的跨径已达到 60 m。先张法是先在台座上张拉预应力筋并临时固定，然后浇筑混凝土，待混凝土强度达到设计要求后放张预应力筋，主要工序如图 1.1 所示。先张法构件依靠预应力筋与混凝土间的握裹黏结力传预压应力，一般适用于中小型装配式构件，如公路桥梁结构中常用的装配式预应力简支空心板梁桥结构，一般采用直线配筋先张法，最大跨径不超过 20 m。



(1) 张拉钢筋

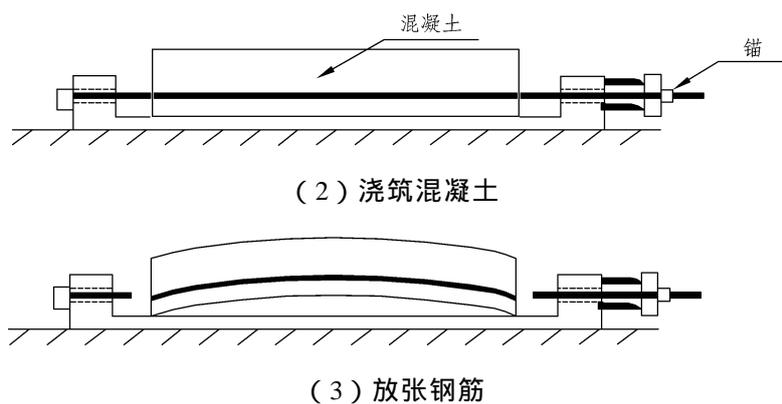


图 1.1 先张法主要施工工序

由于结构设计和施工技术、工艺水平等因素的制约，目前国内已建成的跨径 20 m 以上的高速公路预应力混凝土桥梁结构绝大部分采用了后张法预应力技术，但工程实践研究发现，后张法构件在施工中易产生堵孔、乱束、压浆不密实（图 1.2）等质量问题，尤其是梁端压浆不密实问题已成为后张法预制桥梁结构的典型病害，个别桥梁甚至出现过由于人为失误而漏灌的现象[图 1.2(c)]，由此造成的管道积水、钢筋锈蚀乃至断丝、纵向开裂、预应力失控、跨中区预应力力度不足等一系列问题给结构设计带来严重安全隐患，直接导致结构的垮塌等工程事故。

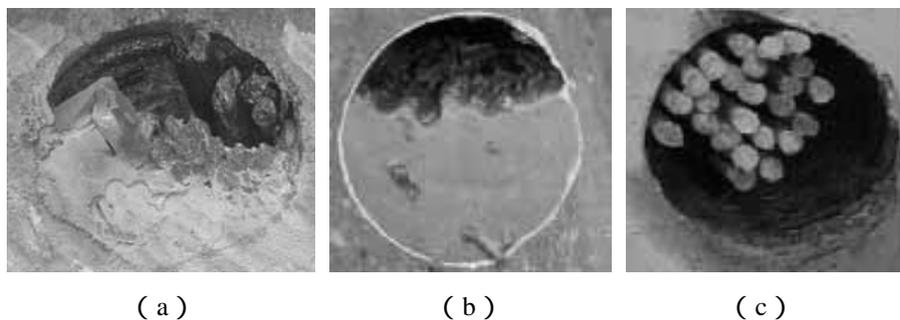


图 1.2 预应力管道压浆不密实

由于后张法构件管道灌浆属隐蔽工程，管道实际压浆情况检测和评估难度大，一般打开废旧桥梁梁体后才能明确压浆质量。东南大学曾以沪宁高速公路拓宽改建为契机，对其中三座后张法预应力混凝土桥梁管道压浆

饱满率进行了调查，结果分别为 73.3%、66.6%和 77.7%。尽管真空压浆、智能张拉、大循环智能压浆等现代施工技术以及无损检测手段的研究和应用使得预应力管道的压浆质量有所改善，但压浆效果仍难以保证。另外，后张法施工需留孔、穿束、压浆、封锚等步骤，工序复杂，而且构件靠锚具传递预加力，对锚具性能及防腐要求高。与后张法相比，先张法施工工序简单，节约了波纹管、锚具、锚下钢筋、锚垫板和管道浆料费用及后期维护成本。因而先张法预应力技术在欧美等发达国家得到广泛应用，并已形成了满足不同跨径、不同建设条件的先张法预制标准梁体系，常用预制标准梁有美国 Bulb-Tees、I-Beams 等，英国 M-beam、U-beam、T-beam 等以及加拿大 I Girders、Box Girders 等。

探索高效、经济合理的传力体系是桥梁结构设计永恒的主题，在特殊条件下结构的设计要求往往也较高。预应力混凝土简支梁桥结构的发展主要体现在两大方面：双预应力体系和折线配筋预应力体系。其中，奥地利阿尔姆公路（1977 年）双预应力混凝土简支梁结构的跨径达 76 m，高跨比为 1：30.4；我国沪杭高速公路（1995 年）两座双预应力混凝土结构体系跨线桥的计算跨径为 38.86 m，高跨比为 1：30。受限于技术条件，双预应力结构体系未能得到大规模推广。然而，梁高受限、复杂环境等特殊条件下的结构设计所面临的挑战促进了折线配筋预应力体系的研究和应用，成为中大跨径装配式预应力混凝土梁桥的重要发展方向。

预应力混凝土受弯构件跨度较大时一般需根据内力分布特点将预应力筋在端部附近弯起，线形包括曲线、直线、折线及其组合等，如图 1.3(a)~1.3(c) 所示，其中，曲线形式可以是二次抛物线[图 1.3(a)]、悬链线、圆弧等，主要适用于后张法预留孔道施工；直线和折线的线形易于控制，常用于先张法构件中，如早期的小跨径简支梁和空心板梁结构主要采用直线配束[图 1.3(b)]先张法预制而成。为满足跨中和梁端的受力要求将预应力钢束在适当位置弯起，即形成折线配束先张法。根据不同的设计要求，折线配筋先张法又可设计为单折线或双折线配束形式，单折线配筋先张法[图 1.3(c)]是在跨中或偏置位置设置一个弯起器将预应力钢束弯折一次；双折线配筋先张法[图 1.3(d)]通过两个弯起器将预应力钢束弯折两次，弯起点距梁端一般取跨径的 $1/4 \sim 1/3$ 。

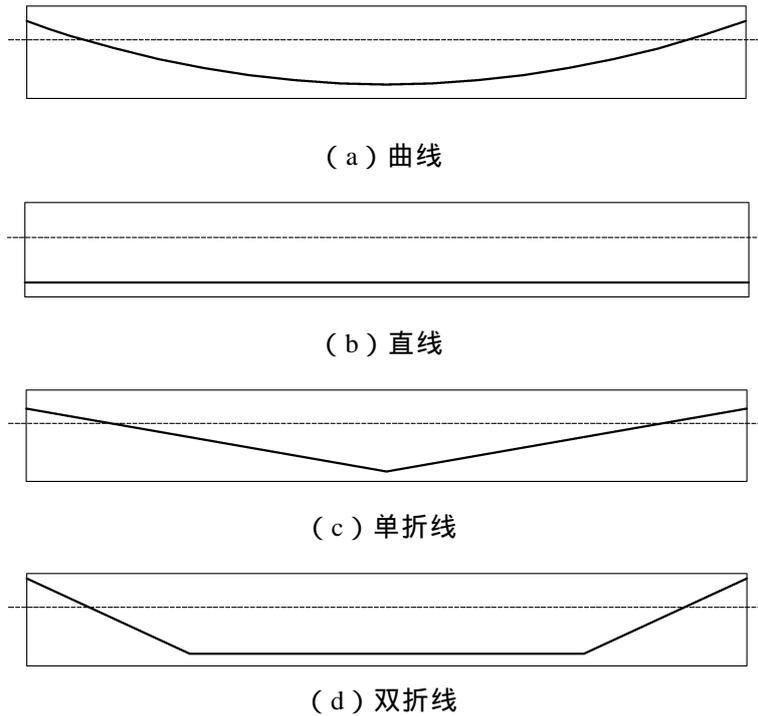


图 1.3 简支梁预应力钢束布置形式

根据等效荷载法，预应力钢筋在混凝土构件中产生的预弯矩图形状只与预应力钢筋线形和在梁端的定位点有关，曲线和折线预应力钢束所产生的预弯矩沿梁长分布与预应力筋至形心轴的距离（偏心距）的变化规律是一致的，即与预应力钢束布置形式相似。以简支梁结构为例，其在均布荷载作用下的设计弯矩图及不同配束形式下的预弯矩图分别如图 1.4—图 1.5 所示，其中，曲线配束和折线配束预应力筋在端面处的定位点均位于形心轴以上，对比图 1.4 和图 1.5 (a) 可以看出，曲线配束所产生的预弯矩与构件弯矩图形状较接近；而图 1.4 和图 1.5 (b) 则除跨中附近区域外吻合较差，大部分截面承载力得不到充分发挥，构件跨度越大时该问题越突出，而且直线预应力钢束不能提供预剪力，反拱控制难度大，张拉台座设计要求高，因此当梁体跨径较大时不够经济合理。从图 1.5 (c)、图 1.5 (d) 可以看出，折线配束条件下预应力钢筋所产生的预弯矩与梁体弯矩包络图形状较直线配束时有所改善，为满足梁端各截面的受力要求，需同时配置一定数量的

直线预应力钢束。可见，当梁体跨径较大时，采用单折线与直线组合配束形式更为合理。

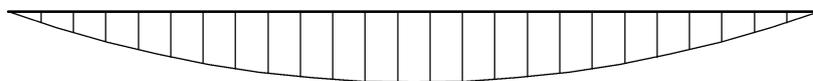
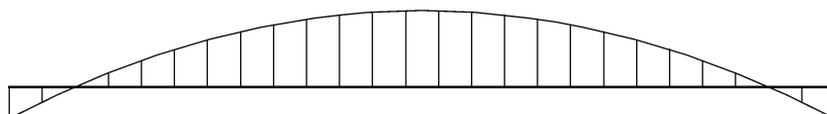
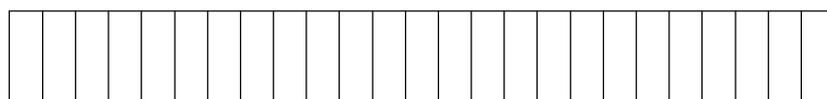


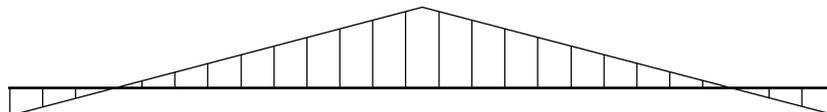
图 1.4 均布荷载作用下的弯矩图



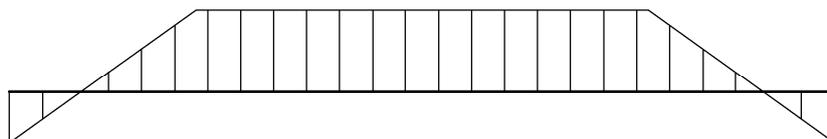
(a) 曲线配束



(b) 直线配束



(c) 单折线配束



(d) 双折线配束

图 1.5 预应力钢束产生的预弯矩

1.2 折线配筋先张法构件的特点及适用范围

由于施工技术、工艺水平的限制，传统的先张法构件主要采取直线配束形式，导致其难以用于中大跨径桥梁结构中。研究表明，与直线配筋先张法相比，折线配筋先张法预应力受弯构件具有以下优势：

(1) 预应力筋的弯起使梁端获得一定预剪力，改善梁端受力状态，有效抑制或延缓梁端斜裂缝的出现；

(2) 改善腹板应力状态，扩大了先张法的适用范围；

(3) 折线配筋可减小构件的反拱值，有利于长期变形控制；

(4) 构件施工质量可靠，传力可靠、耐久性好。

从工程经济角度，折线配筋先张法构件施工所需的张拉台座、张拉设备、模板系统等尽管一次性投入较大，但如果能够形成预制梁体标准化体系，使张拉反力系统、设备等可重复利用，就能够通过大规模生产降低成本。先张预应力混凝土构件便于工厂化预制，具有施工周期短、工序简洁、节约材料、质量稳定、维修养护工程量少、耐久性好等特点，加之目前发达的交通运输和物流网络使工厂制作的先张梁体能够快捷地远距离运输到施工现场，因此，其经济性反而比当前大量采用的后张法预应力预制梁优越，而且能够降低管理单位的安全质量风险。

随着桥梁工程建设规模的不断扩大、大跨度桥梁结构设计和施工技术的不断进步、相应配套施工设施的不断完善以及对桥梁施工质量、技术标准和结构耐久性要求的不断提高，后张法在实际应用中所暴露出的质量和耐久性问题以及直线先张法不适用中大跨径结构的不足使得折线配筋先张法预应力技术重新受到设计和研究人员的重视，折线配筋先张法构件逐渐成为中大跨径预制预应力混凝土构件的重要发展趋势，尤其是在跨海、高原寒冷地区等气候条件复杂、耐久性要求高的桥梁结构中应用具有明显优势。

因此，深入研究单折线配筋先张法预应力混凝土标准梁体的设计方法、施工工艺和受力性能，并加以推广和应用，有利于扩大折线配筋先张法预应力结构的适用范围，提高四川省乃至国内其他地区同类型桥梁质量水平和耐久性，降低工程造价，对于进一步完善我国中大跨径桥梁结构的设计理论、施工工法研究以及设计和施工标准化建设，提升桥梁品质，促进公路桥梁建设由粗放型向集约型发展等均具有重要意义。

1.3 国内外研究和应用现状

现阶段国内外对折线配筋先张法预应力混凝土构件的研究和应用仅限

于双折线配筋预应力混凝土梁[图 1.3(d)],由于双折线配筋一般在靠近梁端处弯起,弯折角度较大,在预应力钢束张拉过程中钢绞线与弯起器接触面的摩阻力即弯折摩擦损失也相应较大,且存在两个弯折点,进一步削弱了钢绞线的有效预应力,预应力筋竖向分力较大,对弯起器基础设计要求高,施工需两套转向装置,增加了施工成本和难度。相比之下,单折线配筋先张法预应力混凝土构件仅在梁跨中设计一个弯折点,减小了预应力钢筋的弯折角度和弯折点数量,有利于降低钢绞线弯折引起的预应力损失及弯折处局部应力集中程度,预应力钢筋张拉时所产生的竖向分力也相应较小,一定程度上降低了工程造价。

由于折线配筋先张法预应力混凝土构件的一系列优势,目前已在国内外若干中大跨径桥梁结构中成功得到了应用。美国自提出折线配筋技术以来,在铁路和公路建设中大量采用了折线配筋先张法预应力结构;苏联也曾设计过跨度达 69.2 m 的折线配筋先张法预应力梁以及跨度 15.8~33.5 m 的预应力梁结构;意大利和韩国也应用该技术建造了众多折线先张法预应力梁,如跨度达 50 m 的韩国仁川大桥,采用了折线配筋先张法预应力混凝土箱梁结构。

我国早在 20 世纪 50 年代就曾试制过跨径 31.7 m 折线配筋先张梁,但由于相关技术尚不成熟,未能推广应用。折线配筋先张法预应力工艺在我国最早用于铁路桥梁结构中,21 世纪初铁路部门为解决高原严寒地区桥梁结构的耐久性问题在青藏铁路建设中开展了 24 m 折线配筋先张法预应力混凝土梁结构设计和制造工艺的研究与应用,进而在合肥至南京高速铁路(合宁高铁)客运专线中得到了进一步应用。在公路桥梁结构领域,2007 年河南驿宛高速公路淮河大桥和岭南高速公路黄鸭河大桥工程中探索性地采用了折线配筋先张预应力工艺,而单折线先张预应力梁桥在跨径 20 m 以上的公路桥梁结构中尚未得到应用。我国台湾地区台北至高雄高速铁路建设中采用了跨径 50 m 的折线配筋预应力混凝土先张法箱梁结构。表 1.1 给出了折线配筋预应力混凝土先张梁结构在国内部分实际工程中的应用情况。

目前国内有关折线配筋先张法预应力混凝土桥梁结构的研究中预应力钢束配置普遍采用双折线形式,而对单折线配筋先张法预应力混凝土构件,尤其是对标准跨径 30 m 及以上的单折线配筋先张法梁结构尚缺少专门研究。本书以四川省遂宁市至广安市高速公路(遂广高速公路)项目为依托,

结合标准跨径 30 m 单折线配筋先张法预应力混凝土预制标准梁体的首次工程实践，针对结构设计和应用中的关键技术问题展开研究。

表 1.1 我国部分折线配筋先张法预应力桥梁

建造年份	工程名称	跨径/m	截面形式	折线形式
2004 年	青藏铁路	24	T 形	双折线
2006 年	淮河大桥	35	箱形	双折线
2006 年	黄鸭河大桥	35	箱形	双折线
2007 年	合宁高铁客运专线	32	箱形	双折线
2007 年	鄄城黄河公路大桥	50	T 形	双折线
2012 年	岳常高速新二号高架桥	25	箱形	双折线
2016 年	鄱阳湖二桥	35	T 形	双折线

1.4 本书主要内容

本书相关研究单位具有丰富的科研、设计、施工和管理经验，一直跟踪国内外桥梁技术的发展动态，通过开展大量的文献查阅、国内外实地调研结果，并根据目前国内外相关研究的现状和趋势，确定了研究的重点和目标，初步完成了适应高速公路桥梁结构技术标准的折线配筋预应力混凝土先张梁的结构设计和施工工艺设计工作。

1.4.1 研究内容

本书主要内容包括以下几方面：

1. 折线配筋先张法预制标准梁体的设计关键技术研究
 - (1) 基于预制平台共用化的梁体截面设计；
 - (2) 单折线先张法预应力混凝土简支梁结构设计；
 - (3) 弯起器设计。

2. 折线配筋先张法预制标准梁体的施工关键技术研究

- (1) 张拉反力台座的模具化和工具化设计与施工；
- (2) 预应力钢束的转向系统；
- (3) 预应力钢筋的张拉及放张程序。

3. 折线配筋先张法预制 T 梁的力学性能试验研究

通过足尺模型试验研究折线配筋先张法预制标准梁体在静力荷载作用下的性能指标和验收标准，从正常使用性能、承载能力、刚度、破坏形态和变形能力等方面对 30 m 跨径折线配筋先张法预应力混凝土简支梁结构的基本力学性能进行综合评价。

1.4.2 预期目标和社会经济效益

1. 预期目标

本书的预期研究目标包括以下四方面：

(1) 形成折线配筋先张法预应力混凝土预制简支梁结构设计、施工等成套技术，实现预制梁体的工地批量化制作。

(2) 提高预制梁结构的耐久性，实现降低全寿命成本和可持续发展目标。

(3) 明确折线配筋先张法预制标准梁体的工作性能和破坏机理，验证结构设计和施工质量的可靠性。

(4) 在推广应用方面，以遂广高速公路工程为依托，在部分桥梁上探索性地应用研究成果；通过技术交流、现场会、发表研究论文等方式推广介绍新技术的特色；编制施工技术手册、设计标准图册和验收标准，加大推广力度。

2. 经济社会效益

(1) 折线配筋预应力混凝土先张法预制梁与当前应用最多的后张法预应力混凝土预制梁相比，省去了成孔、穿束、压浆、封锚等工序，节约了波纹管、锚具、锚下钢筋和管道浆料等材料；减少了预制后再张拉的工序、压浆工序、封锚工序等，节省了大量的劳动力，提高了预制工效，缩短了施工周期；同时还避免了后张法中可能出现的堵孔、压浆不密实、预应力

失控、梁端锚固区应力集中、摩阻力大导致跨中区预应力度不足等质量隐患，施工质量有保证，传力可靠性高。

(2) 尽管先张法预应力筋张拉台座、弯起器等会增加一定的固定成本，但张拉反力台座可实现模具化和工具化，建立成熟的预制梁标准体系后，先张法更易于工厂生产，质量更易于控制，提高模板周转率，降低工程造价。初步测算，当一个台座的预制梁达到 20 片以上时，经济效益非常显著，在遂广高速公路个别桥梁的部分桥段上进行工程试点应用后，节省投资约 2 000 万元。

(3) 先张法预制梁体的推广和应用有利于提高桥梁的耐久性，有利于减少后期维护成本。

(4) 可以促进四川省公路桥梁建设由粗放型向集约型的发展，并带动相关产业发展。

综上所述，折线配筋先张法预制预应力技术具有技术先进、经济性好等突出优势，值得以遂广高速公路试点工程为契机，将折线配筋先张法成套技术加以系统总结在实际工程中加以推广，在国内大量待建高速公路桥梁结构中推广应用将会产生巨大的经济和社会效益，应用前景广阔。

1.5 主要技术路线

本课题采用查阅文献、现场调研、有限元分析计算和足尺模型静载试验研究相结合的技术路线，明确国内外先张法预制梁体的技术现状和发展趋势，并结合四川省桥梁量大、面广、分散、施工场地狭窄的特点，开发出一套适用于四川山区特点的折线配筋先张法预应力梁标准图和施工工法。采用足尺模型试验验证预制标准梁体设计和预制施工技术的合理性和可靠性。同时，编制相应的设计标准图，便于更好地推广应用该项技术。