

# 预应力砼新技术探索

周志祥

**【摘要】**在总结已有预应力砼技术优缺点的基础上,提出了预弯取预应力复合梁,预弯预应力钢筋砼,预弯无粘结预应力砼,横张预应力砼技术的构思。其中,横张预应力砼技术集良好的使用性,用材的经济性和施工的简易性于一体,具有很好的技术经济效益和推广前景。

**【关键词】** 预应力砼 预弯复合梁 横张预应力  
预应力混凝土

自1986年美国的P.H.Jackson首次将预应力原理应用于砼中,获得在砼拱内张紧拉杆作楼板的专利以来,越来越多的人对预应力砼的实现方法及工艺进行了探索和研究,提出了许多新的预应力砼技术,使预应力砼有了很大的发展和进步。

## 一、现有预应力砼技术简述

现有技术,常用的预应力砼的实现方法可归纳为:先张法、后张法(含中张法)和预弯复合梁三类,现将其主要方法简述如下:

### 1、先张法

先张法即先张拉预应力钢筋,再浇筑构件砼,待砼达到一定强度后放松钢筋,砼构件借助钢筋的弹性回缩而获得预压应力。张拉钢筋的方法主要是借助张拉台座用千斤顶对钢筋预加应力。此法工艺简单,施工方便,但需专用预制场和吊运设备,通常适用于批量生产的中、小型构件。

### 2、后张法

后张法即先浇筑砼构件,再张拉预应力筋,砼构件在张拉钢筋的同时受到预压,待张拉到预定吨位时,将预应力钢筋在构件端部锚固。在实际工程中,主要有如下几种实现方法:(1)常规后张预应力砼:优点是布筋灵活,适用于现浇或预制大、中型构件,在桥梁工程中得到广泛的

应用,缺点是工序繁多,工艺复杂;(2)无粘结预应力砼:此法减少了孔道成型、穿束和灌浆等工序,施工较简单,但构件的极限强度及使用性能有所降低,目前多用于预应力砼板式结构;

(3)体外预应力:此法简化了预应力工艺,但结构的力学性能较常规有粘结预应力砼差,钢材用量也较大,目前主要用于较大跨度的桥梁工程或维修加固工程中;(4)中张法预应力:即先浇筑构件之部分,待张拉预应力束后再完成构件剩余部分的浇筑,此法减少了孔道成型、穿束和灌浆工艺,并保持了常规预应力砼应有的极限强度和良好的使用性能,但因预加应力阶段构件截面的削弱而可能成为控制因素,致使用材增大、成本提高,故此法并未得到积极的推广应用;

(5)双预应力砼:即在简支梁的上缘设置预压应力钢棒,在下缘设置预拉应力钢筋,该法的最大特点是梁的建筑高度小。其代表作品为奥地利的阿尔姆桥(74m跨径的公路简支梁桥,跨中截面仅高2.5m);但其预压应力钢棒的施工锚固可谓艰难,故这种结构并未能得到广泛的应用。

(6)竖张法预应力:即力筋的两端先锚固于梁体上,再以梁底为反力承压面对力筋施加竖向力来张拉力筋而使梁体获得预应力,此法的特点是用较小的竖向张拉力即可在预应力钢筋内产生很大的拉力,属体外预应力体系,结构受力性能较常规预应力砼有所降低,另因其既未避免常规预

周志祥 重庆交通学院教授、博士、硕士生导师

## 预应力砼

应力砼梁端部锚固,又增加了竖向张拉后的定位构造,因而未得到更为广泛的推广应用。

### 3、预弯复合梁

预弯复合梁也叫预弯预应力钢-砼组合梁,是对一根屈服强度较高且具有一定预拱度的I型钢梁施加竖向荷载的条件下浇筑下翼缘砼(即第一期砼),待砼达到预定强度后,卸除预加荷载,第一期砼借助钢梁的弹性恢复获得预压应力,最后浇筑上翼缘和腹板砼(即第二期砼)形成预弯复合梁。其特点是建筑高度小、自重轻、跨越能力较大。但由于其用钢量巨大,工艺较复杂,所需预加载设备庞大,占用周期长,目前尚未在钢产量有限的大多数国家和地区得到推广应用。

综上所述,已有的各种预应力砼技术均各在某一方面(或某些方面)有其独特的优势,但欲求得全面兼顾良好的使用性能、用料的经济性和施工的简易性的预应力砼结构尚需人们做出不懈的努力。

### 二、思考 探索 创新

勤于思考、勇于探索、力求创新可谓笔者在预应力砼技术研究方面的信念,笔者赞叹预应力砼的创始人们巧妙地构思了预应力砼,从而能动地把高强钢筋与砼结合起来;赞叹发明家提出了无粘结预应力砼,从而简化了预应力砼的施工工艺;更赞叹最初阶段无粘结预应力砼的应用者们,他们重视其优点,不断地改进其力学性能降低的缺陷,从而发展到今天这样使其在工艺和设计理论两方面都较为成熟的程度。前人的研究成果激发着我们去思考和探索,从而产生了一些构想。

#### 1、预弯双预应力复合梁的构思

笔者于1990年读到陆亚芳、张士铎教授题为“预弯梁及其截面强度”的文章<sup>[1]</sup>,该文介绍了50年代由比利时人提出的预弯复合梁工艺及原

理,并依据弹塑性理论提出了正截面强度计算公式,笔者依据完全塑性理论简化了其计算图式,提出了新且大为简化的计算公式,并以《对‘预弯梁及其正截面强度’的讨论》为题发表<sup>[2]</sup>,该公式较原文公式的计算结果相差不多。至此,采用预弯(预加弯矩)的方式对砼施加预应力给我留下了深刻的印象:预弯复合梁改传统的纵向张拉力筋为对钢梁施加竖向荷载来达到预应力的效果。事实上,对I型钢梁施加竖向荷载即是对下翼缘钢板的张拉,对上翼缘钢板的压缩,只是这种预拉力和预压力沿梁长的分布不是恒定的,其变化形同荷载弯矩的变化,这也正是砼构件所期望的预压力沿梁的分布方式。由此提出了“预弯双预应力复合梁”的构思<sup>[3]</sup>,其制作工艺为:a、制作I型钢梁(腹板可用腹杆代替);b、对钢梁预加载抵消其预拱度至期望值;c、一次性浇筑全梁砼;d、待砼达强度后卸除预加载,借助卸载时钢梁的弹性恢复,下翼缘砼获得预压应力,上翼缘砼获得预拉应力,避免了前述双预应力砼梁中设置预压应力钢棒的艰巨工作,亦将预弯复合梁的两次浇筑砼简化为一次浇筑砼,明显地简化了工艺。

笔者提出<sup>[4]</sup>:在I型钢桁梁上拌模浇筑砼(掺缓凝剂),以未凝固的砼和模板重量作为钢梁的预加载(即恒载部分已作用于梁上,对74m跨径简支梁,该部分荷载约占全部使用荷载的80%~90%),当砼硬化后,在恒载作用下梁正截面上砼的应力为0,达到阿尔姆桥设计者的初衷,却避免了设置预压应力钢棒的艰巨工作。为抵消活载作用下在梁下翼缘产生的拉应力,尚可在该箱型梁的底板处附加一些常规预应力钢束。

#### 2、预弯预应力钢筋砼梁的构思

当完成预弯双预应力复合梁的构思后,笔者确实兴奋了一阵,我盼望得到重视和支持,但却联系不到资助该项研究的费用,原因在于用钢量

## 预应力砼

太大,不适合我国国情。确实,在预弯复合梁中承受荷载的主体是钢梁(如预加载过程),砼的作用则为保护钢梁和增大使用荷载下梁的刚度,在该梁的正常使用期限中并未发挥出砼抗压强度高的优势。为此提出了将预弯的方式应用于钢筋砼梁中,形成了“预弯预应力钢筋砼梁”的构思,其主要工序(图1)为:a、制作带预留槽口的钢筋砼梁(主筋为冷拉IV级钢);b、对该梁预加竖向荷载(使下缘主筋受拉);c、浇筑下翼缘砼;d、待砼达到强度后卸除预加载,后浇砼翼缘借助钢筋的弹性恢复获得预压应力。并完成了5片小梁的试验研究,验证了该技术的正确性。但在实际工程中,梁下翼缘预留槽口和二次浇筑砼却是很麻烦的事,为此提出将该技术应用于连续梁桥的负弯矩区段,而在正弯矩区段仍采用普通钢筋砼,这样麻烦相应要少一些。

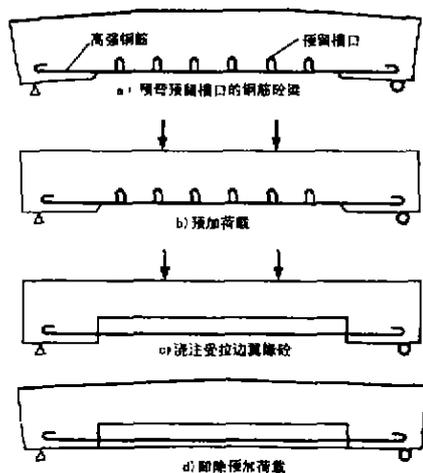


图1 预弯预应力钢筋砼梁工艺简图

### 3、预弯无粘结预应力砼梁的构思

预弯预应力钢筋砼梁虽然节省了锚具等材料,降低了对施工的技术要求,但其长时间的预加载、在下翼缘的预留槽口和大范围的二次浇筑砼,给施工带来很大的不便,为此笔者提出了预弯无粘结预应力砼的设想。a、浇筑砼梁(主筋中段为无粘结力筋束,两端散开打入砼中作为锚固区段)并在梁下缘留少量预留槽口;b、对梁

作预加载,预应力钢束受拉伸长,砼梁沿预留槽口张开;c、用钢垫板塞紧受载后张开的槽口。卸除预加载,砼梁体借助预应力筋的弹性回缩获得预应力;d、用环氧砂浆灌注槽口剩余部分。想象中已解决了预弯预应力钢筋砼技术的不足,从而有了很大的进展,兴奋之下,自费做了三片试验梁,然而在预加载时产生两个问题,一是预留槽口顶端的裂缝开展得既高又宽,另一是钢垫板难于填塞紧密,卸载后预应力损失较大,至此该项研究工作即告一段落。后来曾设想在槽口顶端设铰,在预加应力完毕后再现浇砼封闭该槽口断面,但考虑到较麻烦而未实施。

### 4、横张预应力砼的提出

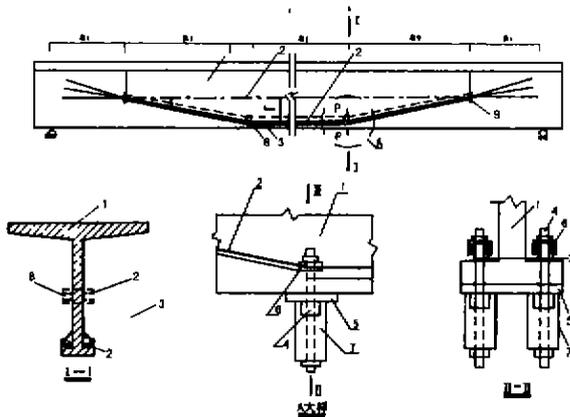
为了克服预应力钢筋砼的缺陷,曾作了多种探索,其中东南大学丁大钧教授对预弯梁项目评审意见中提出:在梁中段主筋与梁体砼完全分离(两端伸入砼中作为锚固区段),再实施预加载下后浇受拉边砼的方法给了我很大启示。分析表明,对这种梁直接进行预加竖向荷载可能产生如丁教授在评语中已预见的宽而高的集中裂缝,其裂缝可能较上述预弯无粘结预应力砼梁更严重一些。对此通过十多天的辛勤思考和努力探索提出:为何不可以在此条件下借助主钢筋对砼梁体施加竖直向上的荷载而使砼梁获得所需的预应力呢?从而产生了“横张预应力砼梁”的构思。

### 三、横张预应力砼梁的基本概念

笔者针对现有预应力砼施工工艺复杂、工序繁多、技术要求高的弱点,在综合先张法与后张法预应力砼、体外束与体内束预应力砼和有粘结与无粘结预应力砼各自优势的基础上,提出了横张预应力砼梁的构思,现以简支梁为例为说明制作工艺及预应力原理。

如图2所示,横张预应力砼梁施工工序为:a、梁内通钢筋骨架就位后,安装梁中段(图2中 $a_2+a_3+a_4$ 区段)的模板;b、按设计要求穿入预应

力钢绞线,其中段位于模板外侧,并采取措施使之处于图2(a)中(2')的位置,其两端伸入普通钢筋骨架内并绑扎普通钢筋骨架上;c、浇筑主梁砼(1),钢绞线在梁中段与砼梁完全分离,其两端伸入砼梁体内形成粘结锚固区段;d、安装横向张拉设备,用横张工作杆(4)穿过预应力筋约束件(6)和梁下翼缘对应的预留孔,以及工作垫板(5)的对应孔,安装穿心式张拉千斤顶(7),以梁底为反力承压面,通过千斤顶(7)的作用对钢绞线(2)进行横向张拉,使之下行至设计位置(2)的预留明槽内;e、穿入定位插销(8),卸除横张设备(4~7);f、灌注明槽内砼(3),使预应力钢筋与砼梁成为整体。



1. 砼梁体; 2. 横张前预应力钢筋位置; 3. 横张后预应力钢筋位置; 3. 后浇砼; 4. 张拉杆; 5. 钢垫板; 6. U型约束件; 7. 张拉千斤顶; 8. 预埋钢板

图2 横张预应力工艺简图

横向张拉前,预应力钢绞线在原直线位置

$$(2') \text{ 的裸露长度为: } l_0 = 2a_2 + a_3 \quad (1)$$

横张定位后,钢绞线变为折线位置(2),其裸露的折线总长为:

$$l_p = a_3 + 2\sqrt{a_2^2 + f^2} \quad (2)$$

其中 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 和 $f$ 的符号意义参见图2。

则钢绞线经横张后的总伸长值为( $l_p - l_0$ ) (暂不考虑砼弹性压缩的影响),于是钢绞线经横张后产生的应力 $\sigma_{p1}$ (或总拉力 $N_{p1}$ )为

$$\sigma_{p1} = E_p(l_p - l_0) / l_0 \text{ 或 } N_{p1} = E_p(l_p - l_0) / l_0 \cdot A_p \quad (3)$$

式中: $E_p$ ——钢绞线的弹性模量;

$A_p$ ——被张拉钢绞线的总面积。

按此计算,力筋重心处砼获得的预压应力为:

$$\sigma_{cp} = N_{p1} (1/A_r + e_p^2/I_r) - M_{p1} e_p / I_r \quad (4)$$

式中: $A_r$ 、 $I_r$ ——净截面的面积和惯性矩;

$e_p$ ——预应力钢筋的偏心距;

$M_{p1}$ ——梁的自重弯矩。

计入砼的弹性压缩,据(3)式计算的预应力钢筋的应力沿应扣除由此而引起的减小部分,方为力筋的实际应力,即:

$$\sigma_p = \sigma_{p1} - n_p \sigma_{cp} \text{ 或 } N_p = (\sigma_{p1} - n_p \sigma_{cp}) A_p \quad (5)$$

值得说明的是:在一次性横张预应力的施工中,力筋并不发生因砼弹性压缩而引起的预应力损失,砼的弹性压缩是在张拉过程中完成的,但上述计算则是分别考虑,(5)式是一次迭代的近似值,与精确分析的结果很接近,其误差对工程设计是可接受的。

若暂不考虑工作拉杆(4)与砼梁体中预留孔之间的摩擦影响,则横向张拉所需的拉力 $P$ 为:

$$P = N_p \sin \alpha = N_p \cdot f / \sqrt{a_2^2 + f^2} \quad (6)$$

因 $\alpha$ 通常较小,欲使预应力筋达到总拉力 $N_p$ 所需的横向张拉力 $P$ 较小,故用常规千斤顶即可对一根梁内所有预应力筋实施一次性张拉,从而避免了分批张拉所引起的弹性压缩损失;又因横张预应力砼梁无需留孔穿束和常规预应力的锚固,从而避免了因管道摩擦和锚具变形所引起的预应力损失,故在横张预应力砼中通常可只计入山钢筋松弛和砼收缩徐变所引起的预应力损失。

横张预应力砼梁归纳起来有三项特点:其一是改传统的纵向张拉为横向张拉(降低了对张拉设备的要求);其二是改预留孔道为预留明槽(节省了波纹管及定位钢筋和工序,浇筑明槽砼较常规的管道压浆更易保证质量,从而确保了预应力钢筋与梁体粘结的可靠性);其三是改专用

## 预应力砼

锚具锚固为粘结力自锚(节省了锚具及部分锚下加强钢筋)。上述三个特点在已有各种预应力砼技术中均分别有所体现,如横向张拉与前述的竖张预应力原理相同,体外预应力和无粘结预应力均无需预留孔道,先张法中的预应力钢筋即利用了粘结力自锚的特点。而横张预应力砼梁集这三种特点于一体,故在一定条件下,在结构的力学性能、用材的经济性和施工的简易性三方面均具有较大的优势。

### 四、小结

1、人们在长期的生产实践和科学研究中已发明了数种预应力砼的实现方法,每一种方法都在某一(些)方面有其自身的优势,但欲求得全面兼顾良好的使用性、用材的经济性和施工的简易性三者的预应力砼结构尚需人们作出不懈的努力。

2、在前人研究的基础上,笔者综合已有预弯复合梁和双预应力砼梁的特点,提出了“预弯双预应力复合梁”的构思;针对已有预弯复合梁用钢量过大的缺陷,提出了“预弯预应力钢筋砼梁”的构思;针对实践中预弯预应力钢筋砼梁施工仍较麻烦且质量不易保证的缺陷,又提出“预弯无粘结预应力砼梁”的构思;试验研究表明预弯无粘结预应力砼梁在预加载时即产生集中裂缝高而宽的致命弱点,故另寻途径,从而提出“横张预应力砼梁”的构思;在试验研究和工程实践过程中,横张预应力技术表现出了明显的优势。笔者在探索其在大跨度结构中的应用前景时,将

横张预应力技术应用于钢-砼复合梁结构中,从而提出了“横张预应力复合梁”的设想。

3、笔者以后将对横张预应力砼梁作较详细的探讨,而对本文中笔者提出的其它预应力砼技术在目前仅是一种初步构思,尚未来得及仔细研究其可能存在的问题,或虽已做了一些研究工作,但因篇幅有限,不便在此赘述。总的说来,预应力砼技术可望不断的改进、完善和发展。

4、阐述了横张预应力砼梁的预应力原理和制作工艺,分析表明,横张预应力砼梁集先张法与后张法,有粘结与无粘结,体内束与体外束的优点于一体,克服了其部分缺点,朝兼有良好的使用性、用材的经济性和施工的简易性三者的预应力砼预应力结构迈出了一步。

5、横张预应力技术可望得到进一步开发应用,但它也有其一定的适用范围,并不能取代其它有其自身特色的预应力技术。

### 参考文献

- [1] 陆亚芳、张士铎 预弯梁及其正截面强度[J], 土木工程学报, 1989, (12)。
- [2] 周志祥 对《预弯梁及其正截面强度》的讨论[J], 土木工程学报, 1990, (2)。
- [3] 周志祥 预弯双预应力砼梁的构思[C], 1994年桥梁学术讨论会论文集, 北京: 人民交通出版社, 1994。
- [4] 周志祥 阿尔姆桥的新构想[C], 95' 预应力砼连续梁和刚构桥学术会议论文集, 上海: 同济大学出版社, 1995。

注: 本文原载于《重庆交通学院学报》1999年12月第4期。

## 启 事

凡本刊的交换刊物请直接邮寄到: 广西柳州市龙泉路三号《OVM通讯》编辑部(邮政编码: 545005)。勿寄个人或其它部门。

《OVM通讯》编辑部  
2000年2月