

体外预应力桥梁的研究和应用

徐 栋

一、体外预应力在桥梁结构中的发展历程

1. 早期的发展

在现代预应力结构工程中,体外预应力的运用在体内预应力运用之前。早在1934年,德国工程师Dischinger获得了体外预应力的专利,在1936年和1937年,他设计了世界上第一座预应力混凝土桥,即位于德国Saxony的Aue桥,主跨径25.2069.00+23.40米。这座桥在1962年和1983年经过两次维修及对预应力筋的重新张拉,使用至今。在30年代末期和40年代前期,Dischinger和其他一些工程师设计了一些基于相同概念的公路和铁路体外预应力混凝土桥梁,最大跨径达150米。

在法国工程师Freyssinet的影响下,一家法国公司于1938年设计建造了预应力钢束靠粘结锚固的先张法桥梁,实际上这座由4个33米简支孔组成的桥梁是世界上第一座在预应力钢束和混凝土结构之间完全有粘结的桥梁结构。这座体内预应力混凝土桥梁出现以后,各国工程师均认识到了体内有粘结预应力结构形式所具有的优势:即在极限状态下具有更高的使用效率,包括能得到更高的偏心距和钢束极限应力,以及钢束由于受到周围握裹混凝土的自然保护而“免于担心”环境对其腐蚀。甚至体外预应力结构的创始者Dischinger也于1949年转变成为体内粘结预应力的倡导者。

由于体外束的防护与防腐蚀问题在当时未能得到很好的解决,各国工程师对体外预应力结构

的许多尝试没有取得成功,甚至有些桥梁的预应力钢束在完工后不久便要更换,这些现象的频繁出现对体外预应力带来不良的印象,导致在其后30年中工程应用极少。显然,体外预应力钢束的腐蚀是制约其发展的关键因素。

2. 再发展的契机

体外束得以再发展的原因主要有四个,一是加固和维修原有预应力混凝土体内配束桥梁及钢筋混凝土桥梁得到的经验;二是斜拉桥的兴起促进了体外索的发展;三是随着节段施工法的大量运用,施工技术相应发展;四是对体内预应力“自然防腐”的再认识。

七十年代,欧洲各国相继发现体内布筋建造的预应力混凝土桥梁由于对摩擦造成的预应力损失及混凝土徐变、温度影响估计不足,破损严重,致使多数工程需要补强,荷载等级的提高也需要对原有桥梁进行加固。加固的方法通常都不得不在原桥结构外部进行,即必须把预应力束布置在混凝土截面以外。使体外束补强措施成为一种主要的也是最积极的桥梁加固方法。在桥梁加固方面的经验使工程师们认识了体外预应力的诸多好处,如预应力束布置大大简化,操作与追加新束方便,并大大减少了由于管道摩擦造成的预应力损失。同时,高性能钢束的发展应用导致了体外束数量减少,使体外束桥梁的设计、施工更为简易。

随着六十年代以来斜拉桥的兴起,同样也促进了与其属于同一范畴的体外预应力的复兴。斜

拉索的防护问题在不断得以解决和完善的同时,其相关技术也大量应用于解决体外预应力束的防腐问题,从而使制约体外预应力结构发展几十年的关键因素——钢束防腐问题得到了很大程度的解决,从而大大促进了因腐蚀问题而停滞不前的体外预应力桥梁的发展。

七十年代以来,节段施工法成为桥梁建设的主流,这使桥梁的设计、施工和管理成为相互紧密关联的因素,桥梁的经济性不再仅仅由桥梁结构本身所耗费的材料指标所决定,在施工速度、施工费用、对施工质量的把握以及将来对桥梁的管理和维护方面,在许多条件下体外预应力具有体内预应力难以比拟的优势。Jean Muller在美国建造的Long Key、Channel Five等一系列节段施工的多跨长桥,充分体现了体外预应力结构整体经济性的优势。

近十年来,原本认为的体内预应力筋因管道压浆而不会受到腐蚀的观念受到挑战:预应力管道内(特别是曲线段内)由于压浆无法彻底填密而致使管道内存在空洞;密集的预应力管道也往往导致混凝土灌注上的困难,使混凝土会产生蜂窝现象。这些问题使工程师们对体内后张预应力桥梁的施工质量难以把握,而深埋在混凝土体内的钢束在现有技术下根本无法进行检测和调换。对许多被更换下来的旧梁的检查和调查证实了这一点。更严重的事例是,在1985年12月4日早上,英国西格林摩根的英斯瓦斯桥突然倒塌,其因是在于压浆不成功,氯化物渗入了孔道,致使拼装接缝附近预应力筋发生严重的腐蚀。这个事件致使英国运输部在1992年颁布一份备忘录中指出:在新标准颁布以前,不得再采用管道压浆的后张预应力混凝土桥梁。

3. 现代体外预应力结构的发展和运用

从1979年法国人Jean Muller设计的在美国佛罗里达州的Long Key桥至今,体外预应力已发展了近20年。以法国和美国为首的各国工程师们对体外预应力进行了丰富多彩的运用。这些运用可以归纳为以下四种类型:

第一种类型是以Long Key桥为代表的采用逐跨预制节段施工的长桥,这种类型的体外预应力结构应用最早、最为广泛,并沿用至今。其突出的优势在于设计和施工的标准化和施工速度的快捷,另外,由于它的体外预应力钢束采用与体内预应力同样的普通多股钢绞线和锚具,与体内预应力钢束同样采用水泥灌浆,故其预应力钢束成本低。近二十年来,它是国际上最广泛采用的体外预应力桥梁形式,在国外城市的高架道路和轻轨干线的建设中得到大量的采用。这种类型的体外预应力结构通常在预制节段间采用干接缝和复式剪力键,当整跨所有的预制节块在支撑结构上安装就位后,施加体外预应力钢束,形成一跨的整体结构。体外预应力钢束在跨内的偏转块处偏转,钢束的管道一般采用HDPE管或钢管,这种类型的体外预应力钢束与通常与结构有离散的粘结,一般只能拆除而不能更换。受支撑结构的影响,跨径一般为3050米,它具有施工速度快、施工简易、施工质量基本只由预制质量控制的优点,同时,由于预制块件小容易运输、施工时仅影响到本跨区域,对现有交通和周围环境破坏小。它通常在通航要求不高的多跨长桥、长大桥梁的引桥以及人口密集和交通组织困难的城市高架公路和轻轨干线中采用。

第二种类型是采用悬臂施工或顶推施工的预应力混凝土连续梁桥,通常采用体内、体外混合

配束,适合于较大的跨径。其突出的优点是用粗大的体外钢束替代了原先配置在腹板内大量的体内钢束,从而大大简化了腹板的构造,也减薄它的厚度。这种类型的体外预应力钢束通常采用无粘结类型。当采用悬臂施工时,悬臂束为直线的体内钢束,成桥后张拉连续束采用张拉吨位较大的体外束,从而免除了大量的穿束和灌浆的繁杂工艺,易于控制施工质量。当采用顶推施工时,由于各截面在施工过程中均要经历最大的正、负弯矩,需要有较多的施工用束,在传统的体内预应力结构中,由于腹板需要留给成桥钢束,故箱梁顶、底板便成了配置这些施工钢束的地方,导致了截面的笨重,也增加了恒载重量。采用体外配束,不但具有与悬臂施工同样的能减薄腹板厚度、简化腹板构造的优点,而且可以把钢束临时反向布置与部分成桥钢束形成较大的中心预应力以满足施工需要,临时钢束在施工结束时放松后再用作为追加的成桥钢束,这种类型的体外钢束通常需要放松和替换,所以钢束和管道之间、管道与结构之间没有任何的粘结联系,需要特殊的钢束生产工艺、灌浆材料和特殊的锚固装置。其应用主要在法国和日本。

第三种类型是极端形式,它实际上是前种类型的延续,特点是把传统的混凝土箱梁腹板改成混凝土桁架形式或直接采用钢结构。前者如法国Bouygues集团在科威特建造的Bubiyah桥。后者的代表作是法国Campeon Bernard集团建造的Maupre桥,它采用波纹钢腹板减小腹板的轴向刚度而使预应力主要作用于混凝土,底板采用钢管高强度混凝土使得整个桥梁横截面成为三角形,采用顶推法施工。

第四种类型称为坦拉式体外预应力结构(

Extradosed Prestressing Structure),是由法国工程师J.Mathivat命名的,这种预应力结构概念的第一次实现是法国Quillery公司为Arret-Darre桥招标投标时所出的方案。但实际实施却是在日本建造的部分斜拉桥,如小田原港桥、冲原桥、蟹泽大桥、屋代南桥、屋代北桥等。由于预应力混凝土桥基本上都是中小跨的梁式桥形式,200米以上跨径是PC斜拉桥的经济跨径,从梁高非常高的预应力混凝土箱形梁到具有柔细梁的预应力混凝土斜拉桥,在视觉上变化很大,在这两个范围之间没有平滑过渡的连续性结构。而部分斜拉桥具有梁桥与斜拉桥的双重特性,也可以说这种结构体系的适用跨径介于两者之间。日本学者研究了它与斜拉桥的分界,认为当斜索的竖向荷载承担率超过30%,或斜索在活载作用下的应力变幅超过50MPa,即进入斜拉桥范畴,其标志为斜索的容许应力取值的不同:看作为斜拉桥的斜索,其容许应力取 $0.4f_{pu}$,安全系数为2.5;而没有超过界限的斜索容许应力取值则与预应力混凝土梁式桥相同,取 $0.6f_{pu}$,安全系数为1.67。同时,由于桥梁的刚度相对较大,故没有斜拉桥的重要特征构件——尾索。

综上所述可以归纳为两点:首先,体外预应力指的是与设计、施工、管理、维护密切相关的“结构”,而非仅仅指钢束;其次,体外预应力密切结合着新材料、新工艺在桥梁结构中的运用,其潜力巨大,其运用方兴未艾。

二、体外预应力结构的力学性能

由于在桥梁结构中,特别是节段施工的体外预应力桥梁结构,其设计思想是全预应力的,即在正常使用极限状态下,结构受力的最不利位置将仍然有一定数量的压应力储备,也就是说,节

体外索

段间的接缝将不会开裂。在此状态下, 结构基本处于弹性状态, 结构的变形很小。如结构的几何尺寸及材料相同, 各种配束方式下结构的力学性能基本上是相同的。但是, 随着荷载的增加到承载能力极限状态时, 体外预应力结构的力学性能将不同于体内预应力结构。与传统的体内有粘结预应力结构相比, 体外预应力钢束的应变与混凝土主梁的应变在相同截面上不协调, 体外预应力钢束的应力发展将不同于体内钢束, 通常在极限状态下不会到达屈服, 从而导致其抗弯曲能力的削弱; 与整体施工法的体内无粘结预应力结构相比, 由于大量体外预应力结构往往采用预制节段施工, 在主梁的节段间存在接缝, 所配置的普通钢筋在接缝处被断开, 其力学性能在很大程度上受到接缝的影响。于是, 节段施工体外预应力结构在极限状态下的力学性能既不同于传统的体内预应力结构, 也不同于整体施工的无粘结预应力结构的力学性能。

一般情况下, 在计算传统的体内有粘结预应力混凝土结构的极限承载能力时, 通常认为截面上的钢束达到极限强度。而整体施工的无粘结预应力结构借用了这种计算方法, 区别是预应力钢束在极限阶段达不到极限值, 现在通常的设计计算方法是取用一个通用的钢束极限应力公式, 随后便可以按体内预应力结构一样的方法来计算结构的极限承载能力。这些钢束极限应力公式往往是通过大量的实验获得, 这些实验结果反映在各国及各专业协会的规范中, 如美国ACI318规范, 美国AASHTO规范等。我国1985年出版的《部分预应力混凝土结构设计建议》中便采用了建研院杜拱辰、陶学康的实验成果。但是, 这些公式均是通过整体施工的结构的研究而得到

的, 如杜-陶公式中预应力钢束的极限应力与截面普通钢筋含量密切相关。而节段施工的体外预应力结构普通钢筋是在接缝位置断开的, 且节段间的接缝、钢束的粘结情况、钢束偏转块的布置等等因素的综合影响, 使问题变得非常复杂。

三、影响体外预应力结构力学性能的主要因素

1. 整体施工与节段施工

结构整体施工与节段施工最大的区别在于一是没有接缝, 二是具有节段施工结构所没有的穿越结构整体的普通钢筋。图1显示普通钢筋的不同配筋率对结构力学性能的影响, 结构采用Rabbat和Sowlat^[3]的实验结构, 在计算中假设原结构在受拉区的普通钢筋配筋率 μ_0 。

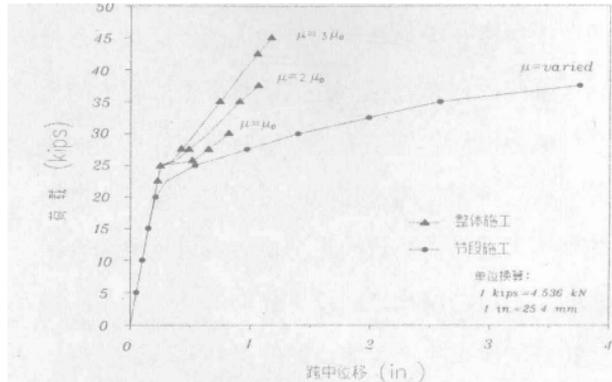


图1 不同配筋率对结构力学性能的影响

2. 体内、体外混合配束

图2为混合配束对节段施工结构力学性能的影响

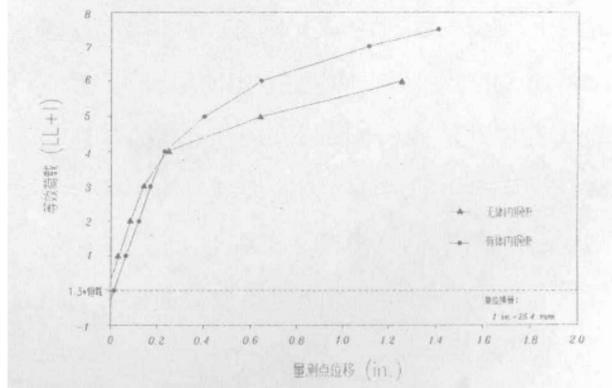


图2 混合配束对节段施工结构力学性能的影响

影响,采用MacGregor等的实验结构。

3. 钢束粘结性能

体外预应力结构可以采用水泥灌浆的普通钢绞线,也可以采用由单根的无粘结钢绞线组装而成。由于体外钢束与混凝土结构粘结情况不同,其力学性能也会不同,图3表示MacGregor等的实验结构的体外预应力钢束粘结情况对其力学性能的影响。

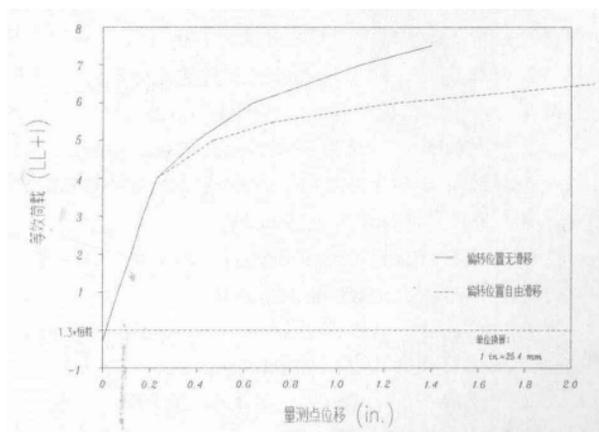


图3 钢束粘结情况对结构力学性能的影响

4. 计算结论

由于接缝和普通钢筋的影响,整体施工的体外预应力结构与节段施工的体外预应力结构的力学性能是有很大的区别的,不能把整体施工体外预应力结构的力学性能等同于节段施工体外预应力结构的力学性能,也不能把整体施工的体外预应力结构的试验或计算结果套用到节段施工的体外预应力结构中去。从根本上来说,采用节段施工、节段间有接缝的体外预应力结构,接缝处的刚体转动是其区别于其他各种预应力结构的本质因素。限制接缝处的刚体转动,将导致结构极限承载能力和结构在极限荷载阶段刚度的提高。由于节段施工体外预应力结构的混凝土和普通钢筋在接缝位置完全被断开,预应力钢束是限制节段间接缝刚体转动的唯一影响因素,前述几个方面

均证实了这一点,明确这对以后的理论研究和实际工程应用具有重要的意义。

四、体外预应力结构在我国的应用前景

我国自五十年代以来,预应力技术发展迅速,特别是改革开放以后,迎来了我国桥梁建设的黄金时期。经过桥梁建设者们几十年的不懈努力,我国预应力混凝土桥梁的发展业已成熟,各建设、设计和施工单位均具有了较高的技术水平和丰富的实践经验。目前我国正处于桥梁建设的又一个高峰期,从而提供了应用体外预应力技术的大好机遇。理论研究、设计经验、施工技术和设备的进展已为我国体外预应力的应用做了充分的准备。体外预应力钢束最为关键的防腐措施及相应锚固系列在国内预应力厂家龙头企业——柳州OVM公司的大力研发下得到快速发展。体外预应力结构已越来越被桥梁工程界所重视。诸多因素使体外预应力技术在我国的大量应用仅仅是时间问题。

作者认为,节段施工的多跨长桥和部分斜拉桥可以作为体外预应力桥梁在我国现阶段发展的重点。前者应用广泛,产业化前景广阔,可以体现出巨大的经济效益和社会效益;后者在百米跨径左右具有较强的竞争力,外型美观,可以在一定程度上替代此跨径范围内千篇一律的系杆拱结构,而且在旧桥技术改造可作为一个极具竞争力的方案。

作者曾针对某市轻轨做了一个设计方案。对同样的30m简支跨径,截面混凝土和普通钢筋用量与某轻轨设计基本相同,在满足铁路规范主力荷载组合安全系数大于2的前提下,设计方案在一跨的预应力钢材用量比原设计多用10.2%,折算成15.24钢绞线重量上的差异,设计方案将多

体外索

用0.53吨。而试设计采用标准化的节段预制、逐跨施工，在现场只有拼装作业，变化预制节段数可适应21-36米的不同跨径。预应力管道线型简洁，布置方便，变化预应力钢束粗细可适应不同跨径，而与混凝土施工无关。由于在施工中没有立支架、立模板、绑扎钢筋和现场浇注等繁杂工序，大大减轻了现场施工难度。设计方案在施工中虽然需要较大的桥墩支架和钢制假设梁，初期投入较大，但轻轨交通线路较长的特点决定了这些设备将大量地重复使用，初期费用将可以在重复使用中得以回收。在施工管理方面，基本避免了对线路周围环境和交通的影响，大大减轻了对现场施工组织的压力，由于这种施工方式对周围交通环境的影响仅在施工的这一跨，故完全可以采用敞开式的施工。

采用设计方案的施工方法，施工速度将比现在的满堂支架施工大大加快，施工周期大为缩短。箱型梁在采用整体现浇的施工方法时，由于立模板的原因，截面通常需要分层浇注，也就是说，至少需要等两次的混凝土到达龄期时间，再加上各道工序，施工一跨时间至少需要一月有

余。而采用设计方案的方法，由于在下部结构施工的同时可以预制上部结构，现场结构施工和预应力施工量小，故一跨的现场施工时间可以仅为几天。其所带来的经济效益和社会效益是显而易见的。

参考文献:

1. 徐栋、项海帆, “节段施工体外预应力桥梁的极限强度分析”, 同济大学博士论文, 1998.11
2. 谢红兵译, “节段式混凝土桥梁设计和施工指导性规范(一)”, 国外桥梁, 1993.4, pp.297-315
3. 严国敏译, “采用斜索加强的混凝土桥的结构特性——斜拉桥与部分斜拉桥”, 桥梁信息资料N96-03, 铁道部大桥设计院技术室, 1996.2V
4. MARTA Rapid Transit Bridges, PCI JOURNAL, Vol. 30, No.6, Nov.-Dec., 1985, pp.189-194
5. Virlogeux, M.P., External Prestressing: From Construction History to Modern Technique and Technology. External Prestressing in Bridges, ACI sp-120,1990
6. Rabbat, B.G., and Sowlat, K., Testing of Segmental Concrete Girders with External Tendons, PCI JOURNAL, Vol.32, No.2, Mar.-Apr., 1987, pp.86-107
7. MacGregor, R.J.G., Kreger M.E., Breen, J.E., Strength and Ductility of a Three-Span Externally Post-Tensioned Segmental Box Girder Bridge Model, External Prestressing in Bridges, ACI sp-120,1990

(上接第31页)

置, 如图9, 这样就可以形成拉压分散型锚索。它可以提供比拉力分散型、压力分散型更为均匀

的锚固力, 据实验可知, 拉压分散型锚索塑性滑移前的抗拔能力较拉力分散、压力分散型锚索均有较大提高。

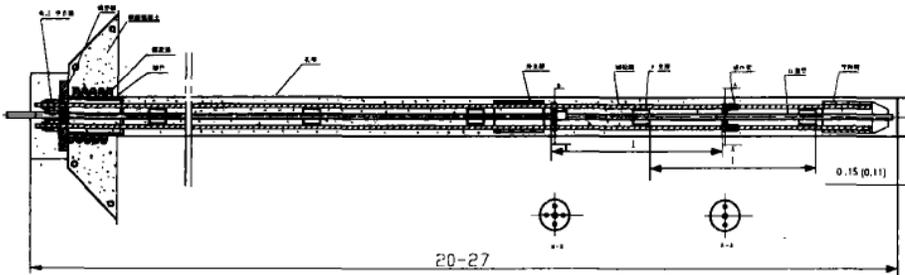


图9 拉压分散型防护锚索