

# 桥梁体外预应力技术研究

何维利

(北京市市政工程设计研究总院 100045)

**摘要:** 目前, 虽然体外预应力桥梁在一些发达国家已经较为普遍, 但国内应用尚处于起步阶段。体外预应力桥梁还有很多技术问题需要进一步研究。本文分析了体外预应力桥梁破坏机理, 并提出体外预应力桥梁设计基本建议。

**关键词:** 体外预应力 体内预应力 无粘结预应力 全体外预应力 部分体外预应力 塑性破坏 脆性破坏

## 1. 概述

桥梁体外预应力技术问世至今已有70多年的历史。由于早期人们对预应力技术的认识还不完善和当时技术条件的限制, 最初的预应力只能是施加于混凝土外部。世界上最早的体外预应力桥梁是由德国人Karl Dischinger于1928到1936年, 在Alsleben的Saale河上修建的。1934年Dischinger取得了向结构施加体外预应力的技术专利, 是体外预应力桥梁的创始人。

后来随着预应力技术的发展, 体外预应力技术并不像它出现时的那样生机盎然。从20世纪30至40年代期间, 欧洲的一些国家如法国、比利时和英国等, 相继修建了一些体外预应力桥梁, 但由于体外预应力锚区和预应力筋的防腐问题, 在当时还没有得到很好的解决, 所以很多尝试没有取得完全的成功。如60年代建成的英格兰Bournemouth桥, 预应力筋采用大直径独索外包脆性PVC管, 非常容易受到腐蚀, 使得要经常更换预应力筋。德国Saxony的Aue桥的体外预应力筋受到桥下通过的蒸汽机车的蒸汽腐蚀, Aue桥不是箱型梁, 它的体外预应力筋暴露在梁体外部, 所有预应力筋在60年代进行全部更换<sup>[2]</sup>。由于腐蚀问题, 造成很多桥梁需要频繁的更换预应力筋。正是这一严重问题在当时阻碍了体外预应力的技术进一步发展。

体外预应力桥梁获得新生是在70年代, 欧洲各国相继发现很多早期修建的预应力桥梁, 由于当初考虑的预应力损失不足, 致使桥梁急需补强。在混凝土外部使用体外预应力对桥梁进行加固, 成为一种非常成功和有效的方法。通过运用

体外预应力技术加固桥梁, 使得工程师们重新认识到体外预应力的诸多卓越的性能。而且通过体外预应力筋防腐技术的不断改进和高性能预应力钢材的出现。从而使体外预应力技术开始得到很大发展。



图1 新加坡某桥采用预制节段悬臂拼装施工技术

## 2. 体内预应力桥梁应用现况

虽然, 体内预应力结构有诸多优点如: 在极限状态下具有较高的强度, 预应力效率高, 以及预应力筋置于混凝土内部, 有着一个看似“牢固”的保护伞。它的“牢固性”被工程师们认为是顺理成章的事, 但事实并非如此。经过时间的检验, 问题才会逐渐地暴露出来。

近年来, 体内预应力桥梁的“牢固性”不断受到挑战。由于预应力管道压浆时存在排水、排气装置和压浆设备是否通畅及压浆材料和压浆设备能否达到要求等诸多因素。而且, 目前对压浆质量更没有任何可靠的检查手段和方法。体内预应力桥梁的预应力管道压浆往往无法达到完全密实状态, 使预应力管道内部存在空洞、气泡及压浆不能完全包裹预应力筋等质量问题。

在英国第一次发生由于预应力筋锈蚀造成的严重问题是1967年汉普郡的Bickton Meadows人行桥发生坍塌<sup>[3]</sup>；在英国另外还有一座桥也因为预应力筋腐蚀问题而倒塌，这就是西格拉摩根郡的Ynys-y-Gwas桥，倒塌于1985年。这两座桥都是采用节段施工方法，节段接缝为薄砂浆接缝。Bickton Meadows人行桥破坏的原因是由于顶板的预应力筋发生了严重锈蚀。然而，预制节段和薄砂浆接缝的施工质量也是出奇的差。混凝土的质量之差以至于现场压浆时，在节段表面有浆体溢出。这使得预应力筋几乎没有保护，这座桥倒塌时已经使用了15年。Ynys-y-Gwas桥倒塌是因为节段接缝处的纵向预应力筋发生腐蚀。位于接缝处的砂浆已非常稀薄，可以使得湿气、氯化物和氧气直接到达预应力筋表面。在此桥建成32年后，倒塌时没有出现任何征兆。英国运输部于1992年宣布禁止在新建桥梁中使用后张拉压浆施工工艺，后来，在1996年取消了现场浇筑桥梁不能采用后张拉压浆施工工艺的禁令。但是，后张拉压浆施工工艺在预制节段桥梁施工中仍被禁止。这显然是出于对预应力筋在节段接缝处受到腐蚀的担忧<sup>[4]</sup>。

位于比利时Schelde河上的一座桥梁于1992年倒塌，根据报道，在结构框架端部的一个铰内的预应力筋发生锈蚀是事故的原因<sup>[4]</sup>。

根据美国国内公路合作研究计划的关于《预制节段桥梁耐久性分析》报告，还有很多其他非节段拼装桥梁的后张拉预应力筋发生不同程度的腐蚀，有很多情况腐蚀的原因是由于压浆质量太差，使得预应力筋与空气、湿气和氯化物接触，也有一些情况发生在锚固区。总的来看，北美的情况要比欧洲好，没有发现后张拉预应力筋的严重问题，但必须注意报告中的检查手段仅仅局限于简单的目测，有可能根本无法发现体内预应力筋的锈蚀。

目前，国内桥梁设计在耐久性方面没有相应的规范和规定。桥梁耐久性设计标准偏低。我国修建预应力桥梁历史还比较短，国内还没有关于桥梁预应力筋的锈蚀问题的统计和报告，根据一

些普查发现一些公路和铁路桥梁有顺预应力筋方向的裂缝出现并发现有渗出物。我国北方地区道路由于冬季使用除冰盐化雪，已造成大量桥梁混凝土受到不同程度腐蚀。天津中环路众多立交桥，在运行十几年后，也因钢筋腐蚀和混凝土冻蚀陆续进行大修和更换<sup>[1]</sup>。随着桥梁服役期的增加，会有更多问题被发现，应当借鉴国外的经验教训，尽早解决已经出现和还没出现的问题。

### 3. 体外预应力的定义

因为目前还没有对体外预应力等概念的明确定义，所以在分析体外预应力桥梁的力学性能之前，为避免在应用中产生概念混淆，必须先明确以下几个概念。

**无粘结预应力：**指于最终的结构物中，预应力筋全部置于结构构件断面内部，而且在预应力筋与混凝土之间没有通过灌浆或其它方法形成连续的粘结作用。

**体内预应力：**指于结构物中，预应力筋全部采用置于结构构件断面内部，而且，在预应力筋与混凝土之间具有通过灌浆或其它方法形成连续的粘结作用。

**体外预应力：**指于结构物中，预应力筋全部采用或部分采用置于结构构件断面外部的无粘结预应力。它通过锚固端和转向构件将作用力传至结构物。

**全体外预应力：**指结构物中的预应力筋全部采用体外预应力。

**部分体外预应力：**指结构物中的预应力筋一部分采用体外预应力，另一部分则采用体内预应力。

## 4. 体外预应力桥梁力学性能和优缺点

### 4.1 体外预应力桥梁的性能特点

体外预应力结构的构造特点决定了其具有独特的受力特性和工作状态。体外预应力置于结构混凝土外部，只能通过锚固端和转向装置将预应力作用于梁体。体外预应力采用无粘结结构形式，也有在锚固端和转向装置处设有有部分粘结的结构形式。

体内预应力混凝土梁承受荷载时，任意截面

位置处,混凝土应变增量与预应力筋的应变增量相等。所以体内预应力筋的最大应力出现在最大弯矩截面处。体外预应力混凝土梁承受荷载时,由于体外预应力筋和混凝土能发生纵向的相对滑动,其应变增量等于沿体外预应力筋全长范围内混凝土应变增量的平均值。这样,相同条件下的体外预应力筋的应变增量将比体内预应力筋的小。在梁体破坏时由于体外预应力筋的极限应力小于最大弯矩截面处体内预应力筋的极限应力,所以相同条件下的体外预应力梁的极限抗弯强度低于体内预应力梁。

配置合理体外预应力筋的梁体,在荷载作用下,其最终破坏阶段总是混凝土先发生开裂和压碎破坏,体外预应力筋一般不会先发生拉断。

#### 4.2 体外预应力桥梁的优点

1) 使预应力筋的后期工作状态的检查更容易。可以方便的检查预应力筋的腐蚀情况以及钢筋永存应力大小,检测预应力损失情况。

2) 锚固体系可以更换锚头还可以进行补张。在发现预应力筋或锚头受到严重腐蚀时,在桥梁使用过程中可以将其更换。发现预应力度降低还可以进行二次补张。延长桥梁使用寿命。

3) 简化锚固工艺,预应力筋布设方便。可以省掉或部分省掉孔道灌浆,由于预应力筋位于混凝土外部所以穿束和张拉更加容易。

4) 减轻主梁结构自重、降低主梁普通钢筋施工难度及混凝土质量容易保证。由于没有孔道,所以主梁腹板可以减薄,减少上部结构混凝土用量。消除了体内预应力筋与主梁普通钢筋相互交叉,使得钢筋帮扎和混凝土浇筑更易施工。

5) 预应力损失减少。预应力摩阻损失显著降低。

6) 受弯破坏阶段主梁发生裂缝和变形可以很大,桥梁也不会突然坍塌,对桥梁坍塌提供预警。避免人员伤亡。

7) 预应力筋的保护不依赖混凝土,增加结构安全。由于体外预应力筋有自身的防护体系,即使主梁发生裂缝,预应力筋也不会发生腐蚀。

8) 改善主梁强度。体内预应力桥梁由于需要

设置预应力孔道,主梁截面尤其在腹板范围形成很多薄弱点,这些薄弱点往往是控制设计的关键点。而体外预应力桥梁不需要设置孔道,故无此问题。

#### 4.3 体外预应力桥梁的缺点

1) 体外预应力筋易受不利环境影响。尤其对火灾,腐蚀性化学品敏感。

2) 锚固区钢束布置难度大。由于体外预应力一般张拉吨位较大,在有限的锚固区范围钢束又集中,所以给钢束布置带来难度。

3) 由于体外预应力筋与混凝土无粘结作用,所以同样配置的体外预应力主梁极限强度低于体内预应力有粘结主梁极限强度。由于体外预应力筋作用力臂低于体内预应力,所以体外预应力梁高跨比要略高于体内预应力梁。

### 5. 体外预应力桥梁的抗震性能和破坏状态

#### 5.1 国、内外试验结果

本人搜集了一些国内、外,关于体外预应力结构荷载试验的资料,现简单介绍如下:

北京市建筑工程研究院于80年代,进行了“体外预应力加固钢筋混凝土框架梁试验研究”试验梁按实际结构比例1:3设计。框架实际跨径为7.5米,试件跨径为2.5米。试件包括两组单跨框架和两组双跨框架。这两组单跨框架和两组双跨框架,材料、尺寸和配筋完全相同,分别用于直线和折线体外预应力筋加固对比试验。加载方法采用两点对称加荷的方法进行,加载一定程度后保持该荷载不变,安装并张拉体外预应力筋,继续加载直至梁体破坏。四组试件试验结果均表明:正弯矩区梁顶混凝土被压碎,破坏结果为塑性破坏。试验结果还显示折线体外预应力筋加固强度明显好于直线体外预应力筋加固强度<sup>[7]</sup>。

2003年,北京市市政工程设计研究总院、北京市市政一公司、北京丰盛构件厂和铁道部科学研究院,为配合北京四丰立交桥1#、2#匝道桥采用预应力预制节段拼装箱梁,对预制节段拼装技术进行力学性能和施工工艺进行试验。本次实验梁共分为五个节段,端块及标准段长度为3

米,墩顶块为2.5米,全长14.5米。主梁断面与实梁一致,宽度为8.21米,梁高为1.8米。节段梁纵坡为3%,横坡为变坡由-1%变为1%。试验梁采用部分体外预应力,体内、体外预应力比例为3:2。实验梁由反力架施加荷载,每个反力点最多可施加150吨轴力。受实验条件限制,为达到实验目的,采用简支单悬臂梁模式。加载至破坏阶段时,受压区混凝土产生斜压破坏且有少量混凝土崩落,腹板出现斜裂缝,受拉区节段接缝拉开,主梁产生相当大位移,但整个梁体形态依然完好,继续加载主梁只是继续增大位移。破坏结果为塑性破坏。由于设备加载能力有限,未能加至主梁断裂。对试验梁卸载后,节段间的张缝和腹板斜裂缝完全闭合。这一点说明结构本身具有很好的位移恢复能力。

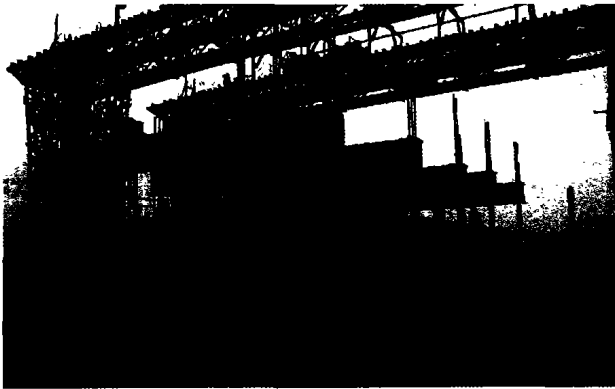


图2 北京四丰立交桥试验梁

2002年5月美国加利福尼亚大学(UCSD)做了关于“预制节段桥梁上部结构抗震性能”的试验,试验梁共四片,与实际结构比例为2:3。试验目的是为了测试预制节段桥梁接缝的抗震性能,配置不同体内、体外预应力比例对上部结构抗震性能的影响,最后检查桥梁的破坏状态[6]。得出实验结论如下:

1. 在很高的弯矩和剪力荷载共同作用下结构能够保持不破坏的同时,预制节段桥梁接缝可以承受很大的裂缝宽度。
2. 体内预应力梁,以及部分体外预应力梁由于混凝土压碎试验呈现脆性破坏。
3. 全体外预应力梁的破坏为塑性破坏。而且全体外预应力梁破坏前产生的位移最大,延性最好。

4. 地震荷载作用下的主梁永久残余变形,可以通过全体外预应力梁使之显著减小。

5. 在高地震区不推荐采用部分体外预应力梁。部分体外预应力梁在竖向荷载作用下,产生较小的位移时结构就会发生破坏。

在一些国外进行的碳纤维体外预应力桥梁荷载试验资料中,试验梁体于破坏阶段也大都产生显著的位移,在桥梁破坏产生前提供预警。关于体外预应力梁的试验资料还有很多,但结果与以上试验基本一致,由于篇幅限制没有列出。

## 5.2 体外预应力梁破坏机理分析

目前国内一些文章认为体外预应力梁体的破坏状态为脆性破坏,但是,本人认为大多数体外预应力梁体破坏状态为有很大延性的塑性破坏。从实验结果中,不能简单的认为试验梁发生混凝土压碎和钢筋拉断,就判定结构为脆性破坏状态。任何结构的最终断裂都是瞬间发生的。如果结构在最终断裂发生前,在破坏荷载作用下能够产生显著的位移而不发生断裂,甚至再增加一定的荷载也只增加结构位移,能够对使用者提供明显的破坏预警,那么结构的破坏状态就是塑性破坏。

体内预应力梁在破坏阶段,梁体于最大受力截面产生裂缝,体内预应力筋由于粘结力的存在,造成体内预应力筋在混凝土裂缝处产生应变集中,随着裂缝的开展,体内预应力筋在裂缝处的应力急剧增加,最终发生拉断。因此,体内预应力适筋梁和低筋梁容易发生脆性破坏。由于体内预应力筋的粘结力对混凝土应变的限制作用,所以体内预应力梁刚度较大,发生破坏时位移相对较小。

在主梁破坏阶段,对部分体外预应力梁的体内预应力筋,因为其粘结力的存在,造成体内预应力筋在主梁裂缝处承受的荷载远大于体外预应力筋,最终总是体内预应力筋先拉断。然而,一旦体内预应力筋发生拉断,剩余的体外预应力已不能单独承受如此大的荷载,形成体内、体外预应力筋各个击破。从而造成部分体外预应力梁发生脆性破坏。

另外,由于体外预应力筋与梁体混凝土间可产生相对移动,体外预应力筋与梁截面变形不协调,应变增加值可以在体外预应力筋的全长范围内进行调节。主梁在破坏阶段开裂造成的沿预应力筋的全长度范围内应变增加值较小,所以,体外预应力筋的应力在主梁破坏阶段增加不大。只要体外预应力筋配置合理,主梁在破坏阶段仅发生混凝土的开裂和压区破坏,不会发生体外预应力筋的拉断。破坏后的混凝土与体外预应力筋之间形成了一个新的受力平衡体系,不会突然造成梁的断裂。因此,体外预应力梁破坏状态一般为塑性破坏。

影响桥梁破坏状态的因素很多,如混凝土、含筋量、预应力度、梁的高跨比及体内、体外预应力比例等。所以各试验梁破坏状态也会有所不同,应当具体问题具体分析。综合已有试验结果和以上分析,得出结论:体外预应力梁的破坏状态一般为塑性破坏。

## 6. 体外预应力桥梁的结构优势和应用前景

目前国外发达国家桥梁设计规范中对结构耐久性设计有明确的规定,而国内桥梁耐久性设计还在摸索阶段。桥梁结构对耐久性的要求越来越迫切。但是桥梁的耐久性设计不应仅仅局限于结构材料耐久性。应当在桥梁结构设计时就应当考虑耐久性问题。材料的耐久性总是有限的,如一旦混凝土产生裂缝,体内预应力筋就会受到不同程度的腐蚀。从调查材料看出这种情况已有发生,有的甚至已经造成桥梁坍塌事故。而且,目前还没有非常有效的无损检测办法查看体内预应力筋的腐蚀程度。如果发现桥梁体内预应力筋产生严重腐蚀,也无法更换和修补,即使加固,费用和难度会很大。

本人认为桥梁结构设计的最基本要求就是桥梁结构应该做到可查、可修和可换。可查,是指桥梁设计应考虑在现有技术条件下能够方便检查各部分桥梁构件工作及破损情况;可修,是指桥梁设计应考虑在桥梁出现破损时能够进行及时修

补;可换,是指桥梁设计应考虑在桥梁出现破损及不能修补时,可以通过更换小部分构件以最小的代价来保证桥梁安全使用。桥梁结构耐久性设计应当在保证“三可”的前提下,再考虑桥梁材料的耐久性设计。只有这样,才能真正保证桥梁结构的耐久性。

综合以上体外预应力的力学性能和结构特点,本人认为体外预应力桥梁是能够满足桥梁结构设计最基本要求的一种重要结构形式,在满足可查、可修和可换的要求上具有显著的结构优势。而且,体外预应力技术的应用,不断推进桥梁施工技术尤其是城市桥梁施工技术创新和发展。如预制节段拼装桥梁和无支架施工技术等。

一些发达国家和东南亚经济较发达国家建造体外预应力桥梁已非常普遍。国内应用尚处于起步阶段,北京、上海等一些城市已经修建了数座体外预应力桥梁,创造了良好的效益。相信未来体外预应力技术在桥梁建设中的应用将更加广泛。

## 7. 结论

通过以上综合分析以及本人在体外预应力桥梁设计工作中的总结经验,从原则上对体外预应力桥梁设计提出以下建议:

1. 体外预应力桥梁在性能上和延长结构使用寿命方面,具有显著的结构优势,应该得到推广。
2. 合理配筋的体外预应力梁的破坏状态为塑性破坏。设计时必须控制预应力度值不得过低。
3. 为减少产生体外预应力梁脆性破坏的可能性,转向装置的间距可以适当加密,或增加构造转向装置。以在梁体破坏阶段增加结构整体性。
4. 体外预应力桥梁不适合修建在易发生火灾,及易接触高侵蚀性化学品的环境中。
5. 在高地震地区可以修建全体外预应力桥梁。实验证明全体外预应力梁的抗震性能优于体内预应力梁及部分体外预应力梁。对部分体外预应力梁在高地震地区修建,如没有可靠试验验证应慎重采用。

(下转第18页)

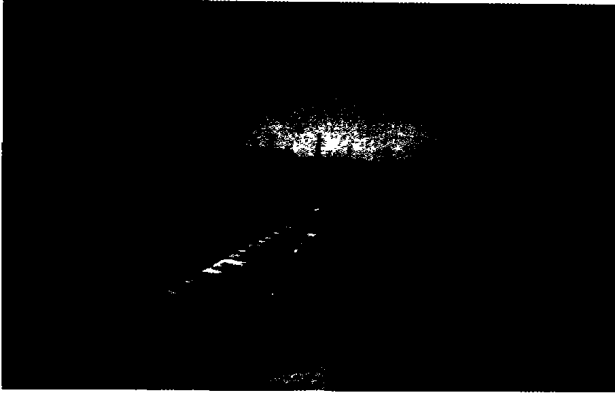


图5 长春预应力A/O池(100.7m×88m)冬季试水



图7 本溪 52.6×45.7m 预应力清水池

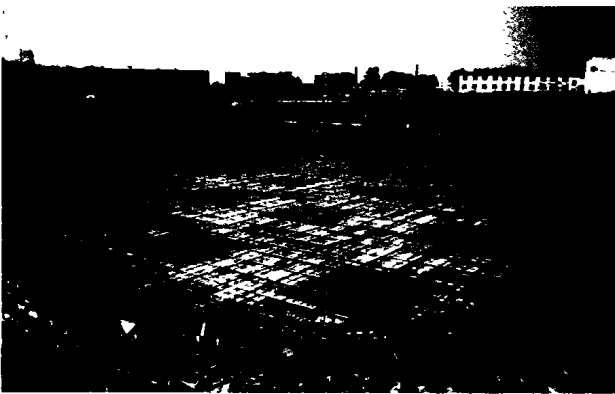


图6 吉林72×72m预应力清水池底板钢绞线布置

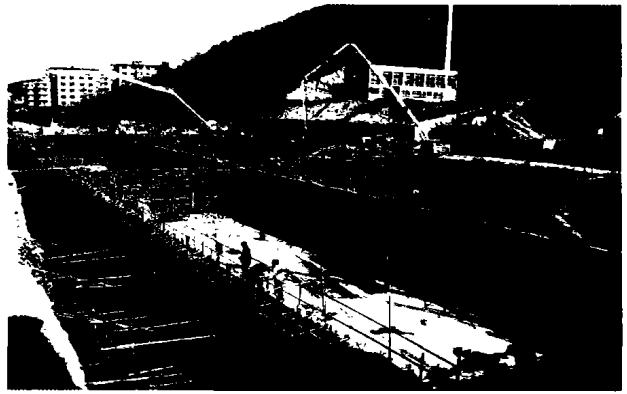


图8 大连老虎滩污水101.8×40.8m 预应力SBR池

(上接第27页)

6. 必须充分重视体外预应力筋的防腐问题。选择优质耐久的防腐材料及预应力管道。做到整个体外预应力体系在一个防腐的密封环境中。在结构接缝及桥梁伸缩缝处更要注意防止水进入锚头和预应力管道。

7. 设计体外预应力桥梁时, 必须考虑锚固区和转向区的高应力状态。

8. 对体外预应力桥梁必须采用可更换型体外预应力筋及锚具, 有条件的应考虑采用可进行二次补张的可更换型锚具。

9. 体外预应力桥梁必须设置检查及维修通道。并考虑足够的更换操作空间。

10. 从经济方面考虑, 体外预应力梁的跨径一般大于40米, 而且体外预应力连续梁较简支梁经济。

由于本人水平有限, 文中难免存在错漏之处, 如能得到您的批评指正, 本人将不胜感激。

#### 参考文献

- [1]. 陈肇元等, 《混凝土结构耐久性设计施工指南》. 中国建筑工业出版社 2004.5
- [2]. Mr. Chaussinr, M, E (SETRA), 《EXTERNAL PRESTRESSING》, SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES 1990.2
- [3]. 徐栋, 《节段施工体外预应力桥梁的极限强度分析》. 博士学位论文. 同济大学桥梁工程系 1999.2
- [4]. NCHRP Web Document 15 (Project 20-7/Task 92) Contractor's Final Report 《DURABILITY OF PRECAST SEGMENTAL BRIDGES》 1998.6
- [5]. 陶学康, 《无粘结预应力混凝土设计与施工》. 地震出版社 1993.5
- [6]. University of California, San Diego, Final Report 《SEISMIC PERFORMANCE OF PRECAST SEGMENTAL BRIDGE SUPERSTRUCTURE》 2002.5
- [7]. 北京市建筑工程研究院, 《体外预应力大跨结构设计研究与工程应用》. 北京市科技新星计划资助项目 2000.11