

体外预应力混凝土结构的研究及应用状况

奉龙成　杨家玉

（重庆交通科研设计院　重庆 400067）

摘　要　简要介绍了体外预应力结构的优缺点及其与体内预应力结构的力学性能比较；分析体外预应力结构的国内外的研究情况，以及存在的问题；阐述了国际上体外预应力结构的发展应用状况；简述了体外预应力结构在我国的应用及前景。

关键词　预应力混凝土结构　体外预应力　耐久性　承载能力

体外预应力作为后张预应力体系重要分支之一；在工程建筑中得到广泛的应用，已利用体外预应力技术修建了各种各样结构形式的桥梁，按构造形式分类有[1]：

(1)节段预制的 PC 桥；

(2)采用波形钢板或桁架构件作腹板的组合式 PC 桥梁；

(3)板带桥；

(4)斜拉桥；

(5)其它 PC 桥。

1　体外预应力的优缺点[2]

1.1　优点

体外预应力的主要优点：

(1)梁体混凝土灌注无管道阻碍，易保证质量；

(2)梁体无截面削弱；

(3)力筋状态可随时检查；

(4)预应力损失可以补拉，预应力筋易于更换；

(5)摩擦损失小；

(6)无制孔压浆等工序，灌注混凝土与施加预应力作业是单独进行的，减少了作业之间的相互干扰。

1.2　缺点

体外预应力也存在一些缺点：

(1)预应力筋容易受到意外的破坏，力筋要求严密的防腐措施。

(2)由于转向块和锚固点受到约束，行车时，容易引起预应力筋的振动，力筋的自由长度受到限制。

(3)转向块中用金属做的鞍座应该精确安置以便尽可能减小摩擦和避免损伤预应力筋。

(4)在体外预应力结构中，锚具的工作状态好坏非常关键，一旦锚头破坏就意味着预应力全部损失，因此锚头须十分注意防腐。

(5)体外预应力筋的极限应力增量不单独依靠破坏截面的变形，而是取决于结构的整体变形，因此不好确定。

(6)体外预应力筋的有效偏心距一般比体内预应力筋的小，力筋的抗拉作用不能得到充分发挥。

2　体外预应力结构与体内预应力结构的比较

2.1　材料用量[3]

单纯从预应力钢材用量来看，体外预应力结构的钢束用量相对于体内预应力结构要多，主要的原因有两方面，一是由于体外预应力钢束通常配置在箱梁上、下翼缘板之间，其钢束的有效偏心距较小，故须较大的预应力；二是体外预应力应用于节段施工的桥梁时，尤其是在节段间采用干接缝，在没有粘结钢束或钢筋穿过接缝的情况下，为保证结构的抗裂性，必须有较大的预应力。但是，由于体外预应力结构减小了占恒载较大比重的箱梁腹板尺寸，节约了混凝土的数量。同时，上部结构重量的减轻也导致了下部结构工程量的节省。更重要的是，体外预应力的应用最大限度地发挥了节段施工的优点。采用预制节块组拼，上部结构的预制与下部结构的施

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

工同时进行，节块间采用干接缝，施工快捷、方便，从而给承包方带来巨大的经济效益。

2.2 耐久性

随着斜拉桥拉索防腐问题的解决，过去困扰体外预应力结构发展的腐蚀问题均能得到较好的解决。对于体外预应力结构和体内预应力结构究竟那种更容易遭受腐蚀，那一种结构的耐久性更好，在近20年来，国际上的普遍看法已倾向于体外预应力钢束的耐久性更好。体内预应力结构在腹板内往往布置大量的钢束，而且弯道也多。拥挤的钢束往往造成混凝土浇注的困难，大量的弯道使灌注质量不易得到保证。而体外预应力结构的钢束线形简洁，灌注容易。钢束暴露在外，可以随时方便地进行检测，防护层维护乃至钢束替换。其在耐久性方面的优势是显而易见的。

2.3 结构的力学性能[3]

在使用荷载阶段，特别是全预应力混凝土结构，体外预应力结构与体内预应力结构的力学性能是非常相似的。两者的主要差异在于承载能力极限状态，体外预应力钢束的应力增量，并非取决于截面上的应变，而是取决于整个结构的变形，故其应力增量小。尤其是对于采用干接缝的节段施工桥梁，混凝土的受压区局限于在接缝截面之内，能够达到的极限压应变较小。这样，便导致了体外预应力结构的承载能力较低，延性也较差。对于这种结构的分析必须来源于对结构的全过程仿真分析，从而才能得到较为精确的结构的极限承载力数值，以便得到整个结构的安全度。

3 体外预应力技术研究现状

3.1 国外研究情况

（1）1995年，Gonzalo Ramos and Angel C. Aparicio[4]采用非线性数值模型分析了体外预应力混凝土桥。用这种方法对一些实际试验梁进行分析，得出对于简支梁桥，在极限状态下预应力筋的应力增量不能忽略。另一方面，对连续梁桥，如果转向块是自由滑动的，在极限状态下，预应力筋的应力增量较小，可以忽略，如果转向块不滑动，预应力筋的应力增量达到208 MPa。经过分析还表明，ACI规范给出的预应力筋极限状态下的应力增量偏高。

（2）1996年，Hiroshi Mutsuyoshi and Kazuteru Tsuchidad[5]等，对体外预应力混凝土梁进行了试验研究，试验分析表明混凝土梁在开裂后，刚度减小，在体内有粘结筋屈服时，挠度迅速增加。并在此研究基础，考虑预应力筋的偏心距减小所引起二次影响、体内有粘结普通钢筋的配筋率以及加载模式对预应力筋的应力增量的影响，对Naaman提出的无粘结预应力筋的极限应力的计算公式进行了修正，提出体外预应力混凝土梁限状态下预应力筋应力增量的计算公式。

（3）1997年，Kiang—Hwee Tan and Chee—Kloon Ng[6]通过试验分析了6片T形钢筋混凝土梁用体外预应力加固后的抗弯强度。试验结果表明没有设置限制预应力筋位置的鞍座的加固试验梁，由于偏心距的改变而产生的二次效应将引起其承载能力降低，相反在梁跨最大挠度截面设置限制预应力筋位置的鞍座将有效地降低由偏心距的改变值而产生的二次效应，产生满意的受力行为和极限荷载行为；对于截面尺寸和配筋指标相同的试验梁，施加较小的有效预压力，在一定的外加荷载作用下，将在体内钢筋和体外预应力筋引起更高的应力，产生更大的裂缝宽度和使用荷载挠度，但是在极限破坏时表现出更好的延性；对于截面尺寸和配筋指标相同的试验梁，施加相同的有效预压力，如果增加预应力筋面积，虽然受力行为相似，但是强度提高，破坏时延性降低。并提出体外预应力混凝土梁极限状态下预应力筋应力增量的计算公式。

3.2 国内研究情况

（1）1993年，杜世生、叶见曙、赖国麟等[8]提出了体外预应力加固钢筋混凝土简支梁的抗弯极限强度的计算方法。从而可决定预应力筋的极限应力，计算结构的极限强度。

（2）1997年，黄乔、张树仁等[7]试验分析了12片钢筋混凝土梁。其中7片甲类配筋指标和截面尺寸完全相同的梁，用于抗弯试验；另外5片乙类配筋指标和截面尺寸完全相同的梁，用于抗剪试验。甲类试验梁的水平预应力筋的极限应力主要与材料强度、预应力筋有效应力大小、配筋数量以及构件的高跨比等因素有关；乙类试验梁在剪切破坏时，斜筋亦达不到剪切破坏，斜筋应力值仅达到其屈服强度的0.63。斜裂缝出现较晚，剪切破坏的延性亦较好，抗剪承载力提高近一倍。

（3）铁道部牛斌等，于1992年进行了一批体外预应力混凝土梁的试验。利用试验结果，建立体外

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

预应力混凝土梁全过程非线性分析的计算方法和相应的计算机程序。2000 年，牛斌又利用试验结果对假设体外预应力混凝土梁在破坏阶段，在最大弯矩截面附近形成一个塑性区，将这个塑性区理想化为一个铰的计算方法进行了验证，计算结果与试验结果吻合良好。

(4) 2000 年，孙海和黄顶业等[9]，对体外预应力混凝土梁进行了试验研究，提出了预应力筋在转向块处的受力模型，同时对体外预应力混凝土梁全过程进行非线性分析。

从上述的国内外的研究情况可以看到体外预应力混凝土简支梁，在极限状态下预应力筋的应力增量不能忽略，其大小受预应力筋的布置形式、预应力筋的面积、初始预应力，外加作用的大小和模式等许多因素的影响，计算公式可以参考无粘结预应力混凝土的计算公式进行修正，但是还难以找到适用各种体外预应力混凝土结构的预应力筋的极限应力的计算公式；这种结构受力行为与无粘结预应力混凝土梁的非常相似，荷载挠度关系曲线有明显 3 个阶段：线弹性阶段、开裂阶段、非线性阶段；偏心距的改变而产生的二次效应将引起其承载能力降低，应在最大挠度截面设置限制预应力筋位置的鞍座以便有效地降低由偏心距的减小而产生的二次影响；体内有粘结普通受拉筋的配筋率将影响结构破坏形式，配筋率过高将引起截面超筋破坏，配筋率过低结构延性降低。非线性仿真分析成为研究分析体外预应力混凝土梁的最有效的工具，也成为研究的热点课题；预应力斜筋能明显提高斜截面承载能力。目前对体外预应力混凝土梁的研究，研究其静力行为多，动力疲劳、体外索的振动和结构的耐久性研究不多，一般认为在使用荷载范围内力筋应力变化小，力筋无疲劳问题；力筋的固定点的间距在 7～8 m 可以防止力筋的共振；简支梁研究的比较多，连续梁研究的比较少；正截面工作效果研究的比较多，斜截面工作效果研究的相对较少，一般认为体外预应力混凝土梁的斜面的受力分析可以采用一般预应力混凝土的分析方法，在进行斜截面强度计算时，预应力筋应力增量很小，可以不加考虑；对裂缝控制和普通钢筋的合适配筋率还没有看到有关的研究情况，中国建筑科学院在研究无粘结混凝土梁中提出按全部配筋的极限内力考虑，有粘结钢筋应占到总拉力的 15% 以上；另外卫纪德[10]等在对无粘结混凝土梁的试验中，试验表明，在使用荷载范围内，在同一级荷载循环中，裂缝条数并不随循环次数的增多而增加，但高度随循环次数增加而略有升高，裂缝宽度随循环次数的增多而增大，但 3 次后基本稳定。体外预应力混凝土锚固体系和转向块的合理形式以及构造细节的分析有待进一步的深入调查研究。体外预应力结构的静动力的仿真分析的问题还有许多工作要做。

4 体外预应力的应用和展望

为了促进体外预应力结构的发展和广泛应用，欧洲成立了体外预应力协会。在将完成的欧洲新规范 Eurocode 2 的桥梁部分中，将制定出世界上第一本体外预应力规范。

4.1 体外预应力结构在国外的应用状况[3]

(1) 在法国，几乎所有新建的大型桥梁都是采用体外预应力，自 1982 年以来，就先后建成 50 余座体外预应力混凝土桥。如标准跨径 110 m，全桥约 3 km，平衡悬臂施工的跨越海峡的雷岛大桥；顶推施工的诺曼底大桥的引桥等等。

(2) 在美国，体外预应力主要用于逐跨施工的多跨长桥(大型桥梁的引桥、城市高架桥和轻轨快速干道等)，是唯一与 AASHTO 标准梁或基于这些标准梁的预应力混凝土叠合梁相抗衡的结构形式，根本原因在于其经济性。

(3) 在日本，这几年采用体外预应力索修建的 PC 桥正在迅速增加，建造了世界上仅有的 3 座坦拉式体外预应力(extrodosed prestressing)结构，即小田原项桥、冲原桥和蟹泽大桥。与此同时，也在大力发展有关体外索预应力技术的研究，日本 PC 技术协会于 1996 年完成了体外索 PC 结构的设计施工指南的编订。

(4) 在英国，由于在 1985 年一座节段拼装施工体内配束桥梁的突然倒塌，其原因是由于不成功的压浆使氯化物渗入了孔道，致使拼装接缝附近预应力筋发生严重的腐蚀。这次事故发生后，在 1992 年英国运输部颁发了一份备忘录，指出了体内后张预应力束的腐蚀问题，在一定条件下限制采用管道压浆的后张预应力混凝土桥梁。

(5) 在香港、汉城、曼谷、墨西哥城等大城市的高架道路和轻轨交通干道均已大量使用体外预应力结构。

(6) 在德国、比利时、印度、委内瑞拉等国家对体外预应力结构也均进行了系统研究和应用于各种

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

表 1　国外主要的体外预应力混凝土桥梁

桥　梁　名	构 造 形 式	跨　度	体外力筋 全部力筋
Saint - Agnant bridge(法国)	PC6 跨连续 4 主梁	25.32 + 4 × 37.25 + 27.6	100%
Sylans bridge(法国)	PC 连续桁架腹板梁	21 × 60.6	100%
Winttropertal bridge(德国)	6 跨连续波形钢腹板梁	34.75 + 4 × 43.0 + 34.75	100%
新　开　桥(日本)	钢筋混凝土合成单纯梁	30	62%
重 信 川 桥(日本)	5 跨连续 PC 刚构梁	5 × 47	67% ~ 77%

结构类型的桥梁。

在国外已成建了数十座体外预应力混凝土桥，在表 1 中仅列出几座代表性的桥。

4.2　体外预应力结构在国内的应用状况

体外预应力技术尚未在我国广泛应用，在桥梁工程中，多应用于简支梁桥的加固。如：福建省南平电机厂专用桥的加固工程，广东肇庆大沙桥加固，陕西省周至渭河桥的加固处理，河北省猪龙河桥的加固工程，四川遂宁涪江大桥的加固等等。上述 5 个示例均为国内在 80 年代和 90 年代初完成的体外预应力加固的典型工程。加固结构均为中、小跨径的钢筋混凝土简支梁桥。我国体外预应力在混凝土桥梁的采用到 90 年代才开始，譬如丹阳的云阳大桥，主跨 70 m，下承系杆拱的系杆及吊杆均采用体外预应力，于 1990 年 12 月建成。在沪杭高速公路开始试建造一座体外预应力混凝土简支梁桥。

5　体外预应力技术的前景

欧美各国积累了大量修建预应力桥梁的经验，特别是体外索的发展，法国差不多 80% 的预应力桥采用了体外索工艺。目前日本正在修建的东名、名神高速公路，为了探求合理、安全、经济的新桥型式，其中就有几座采用体外索的 PC 桥梁。体外配索桥梁在国外似乎已成为当今桥梁建设的时尚。体外预应力的应用大大减轻了结构的自重。同时，也相应减少了桥梁下部工程量。体外预应力的应用最大限度地发挥了节段施工的优点。采用预制节块组拼，上部结构的预制与下部结构的施工同时进行；施工方便，从而给承包方带来巨大的经济效益。体外索与配置一定数量的非预应力普通筋并用成为部分预应力混凝土结构，更能充分发挥其优点。随着以轻型、高强效能为目标的复合钢——混凝土结构的出现，例如采用波形钢板或桁架构件作腹板的组合 PC 桥梁，体外预应力技术将达到一个新的水平，其应用前景更加广阔。我国正面临着道路建设和城市建设的高峰，体外预应力技术具有极大的针对性，在我国桥梁建设中有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

1　易圣涛，黄凡．日本体外预应力索桥梁应用现状．公路交通技术，2000(1)

2　Andre Picard, Bruno Massicotee et al. Relative Efficiency of External Prestressing. Journal of Structural Engeering. December 1995: 1832 - 1840

3　徐东．体外预应力桥梁的发展、结构特性及应用前景．华东公路，1997(6)

4　Gonzalo Ramos, et al. Ultimate Behavior of Externally Prestressed Concrete Bridges. Structural Engineering International 1995(3): 175 - 177

5　Hiroshi Mutsuyoshi and Kazuteru Tsuchida, et al. Flexural Behavior and Proposal of externally Prestressed Concrete Members. Concrete Library of JSCE December. 1996: 65 ~ 77

6　K. H. T and Chee - Kloon Ng. Effect of Diviators and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams. ACI Structural Journal/January - February 1997: 13 ~ 12

7　黄乔等编著．公路钢筋混凝土简支梁桥的体外预应力加固技术．北京：人民交通出版社，1997

8　杜世生等．体外预应力筋加固梁桥的抗弯极限强度的计算．华东公路，1991(4): 25 ~ 29

9　孙海，黄顶业等．体外预应力简支梁受力性能研究与非线性分析．土木工程学报，2000(4)

10　卫纪德，郑文忠等．无粘结部分预应力混凝土矩形梁裂缝的开展和闭合试验．哈尔滨建筑工程学院学报，1993(2)

收稿日期：2000 - 11 - 17

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.