

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.II-0129-13

体外预应力钢-混凝土组合梁受力性能的研究现状与展望

聂建国^{1,2}, *陶慕轩^{1,2}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 体外预应力钢-混凝土组合梁是一种将现代预应力技术和普通钢-混凝土组合梁结合在一起的新型承重构件, 与普通钢-混凝土组合梁相比, 它主要有六大优点: 1) 提高极限承载力; 2) 扩大弹性工作范围; 3) 提高疲劳和断裂性能; 4) 充分利用材料性能, 降低结构高度和自重; 5) 减小使用荷载下的变形; 6) 有利于混凝土裂缝的控制。该文系统综述了国内外学者在体外预应力钢-混凝土组合梁结构方面取得的研究成果, 并对有待进一步研究的工作进行了展望。

关键词: 体外预应力; 钢-混凝土组合梁; 文献综述; 研究现状评述; 展望

中图分类号: TU318⁺.1; TU398 **文献标志码:** A

RESEARCH STATUS AND PERSPECTIVE ON EXTERNALLY PRESTRESSED STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS

NIE Jian-guo^{1,2}, *TAO Mu-xuan^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An externally prestressed steel-concrete composite beam is a new type of structural member combining a steel-concrete composite beam and prestressing technique. Compared with traditional steel-concrete composite beams, prestressed steel-concrete composite beams have six major advantages: 1) increasing the ultimate loading capacity; 2) extending the elastic range of structural behavior; 3) improving the fatigue and fracture behavior; 4) fully utilizing the materials and reducing the structural height and weight; 5) decreasing the deformation under service loading; 6) being helpful to the crack-width control. Based on the review of available research work of externally prestressed steel-concrete composite beams, the research projects to be conducted are proposed.

Key words: externally prestressed; steel-concrete composite beams; review of available literatures; comments of current research work; projects to be studied

传统的钢-混凝土组合梁具有很多优点, 如: 截面高度小、强度高、延性好、刚度大、施工方便、经济适用等, 但同时也存在局限性。对于大跨重载结构, 组合梁往往会刚度不足, 对于连续组合梁, 支座负弯矩区由于过早地出现裂缝而影响正常使用。另一方面, 许多组合桥梁结构车辆荷载超出了

原设计标准, 或者桥面翻新导致恒载增加, 按原设计荷载标准设计的结构可能无法满足新的使用要求。

采用预应力技术是解决上述问题的一种理想而高效的方法。对钢-混凝土组合梁施加预应力有多种方式, 总体上可分为两大类: 一种是通过张拉预

收稿日期: 2010-08-17; 修改日期: 2011-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50438020); 清华大学自主科研计划资助项目(20101081766)

作者简介: 聂建国(1958—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士, 结构工程研究所所长, 从事钢-混凝土组合结构研究(E-mail: niejg@mail.tsinghua.edu.cn);

*陶慕轩(1985—), 男, 上海人, 博士生, 从事钢-混凝土组合结构研究(E-mail: dmh03@mails.tsinghua.edu.cn).

应力束对组合梁直接施加预应力；另一种是采用强迫变形(如钢梁预弯、支座顶升、加卸载配重等)或调整施工工序对组合梁间接施加预应力，本文讨论的是第一种采用预应力束的预应力组合梁，图1给出了各种不同布筋形式的预应力组合梁。

对于预应力简支组合梁(如图1(a)~图1(c)所示)，施加预应力的主要目的是：1) 提高极限承载力；2) 扩大弹性工作范围；3) 提高疲劳和断裂性能；4) 充分利用材料性能，降低结构高度和自重；5) 减小使用荷载下的变形。预应力筋的布置原则是要使预应力产生的弯矩方向和外荷载产生的弯矩方向相反，通过预应力效应来抵抗外荷载效应。根据这一原则，考虑到简支组合梁在外荷载作用下跨中截面正弯矩最大，故可采用如图1(a)~图1(c)所示的直线、折线以及曲线布筋形式，其中折线布筋针

对对称两点集中荷载的情况，曲线布筋针对均布荷载的情况，而直线布筋产生的预应力效应虽然和外荷载效应不完全匹配，但构造相对简单。

而对于多跨预应力连续组合梁(如图1(d)~图1(g)所示)，其同时承受正负弯矩作用，施加预应力的主要目的除了以上所述和预应力简支组合梁相同的5点外，还有就是提高负弯矩区混凝土板的抗裂性能。图1(d)所示就是专门为控制多跨连续组合梁负弯矩区混凝土板开裂在板内布置预应力筋，此外，和预应力简支组合梁类似，可以对多跨连续梁布置直线(图1(e))、折线(图1(f))以及曲线(图1(g))预应力筋。图1中，除图1(d)为有粘结体内预应力组合梁外，其余均为无粘结体外预应力组合梁，是本文讨论和综述的对象。

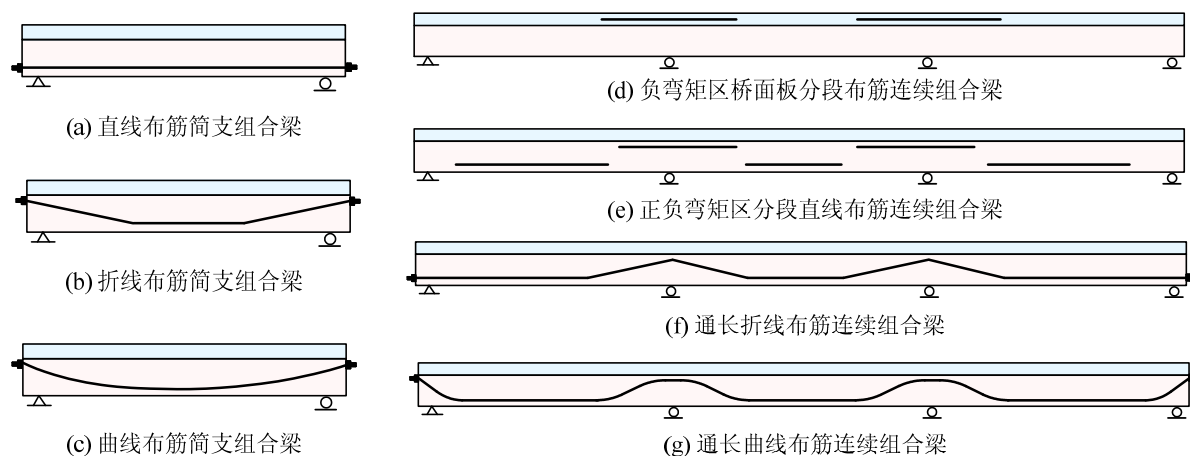


图1 预应力组合梁的结构类型和预应力筋的布置形式

Fig.1 Types and tendon configurations of prestressed composite beams

对于简支和连续这两种预应力组合梁的主要结构类型，除了以上所述在施加预应力的目的方面有所差异外，两者的力学性能也各有特点，研究的侧重点也略有不同。预应力简支组合梁属静定结构，受力行为相对明确简单，而预应力连续组合梁作为超静定结构，在受力性能方面相比简支组合梁具有如下3方面特殊之处：1) 虽然施加了预应力推迟了支座混凝土的开裂，但在受力全过程支座混凝土仍会开裂，混凝土的开裂会导致连续梁的内力重分布；2) 对于普通连续组合梁，支座截面钢梁下翼缘和腹板部分高度受压，当施加了预应力后，支座截面腹板的受压区高度会增大，从而对负弯矩区钢梁的稳定性以及塑性转动能力产生不利的影响，需在分析和设计中特别重视；3) 对超静定结构，收缩徐变以及温度效应对结构的影响更为复杂，结构在

各种荷载以及作用下均会产生较为复杂的次内力。目前，对预应力组合梁的研究大多集中在简支组合梁，而对预应力连续组合梁的研究多侧重于上述3方面复杂受力行为。

图2所示为一典型的体外预应力钢-混凝土组合梁的构造简图，预应力筋仅在锚固端和钢梁相连，通过转向块对预应力筋施加法向约束来控制布筋位置，预应力筋和转向块之间不脱离，但会发生相对摩擦滑移。体外预应力结构的上述特殊构造造成了以下两大受力特点：1) 截面上的预应力筋和组合梁变形不协调，因此任何状态下的预应力筋的内力分析都会涉及全梁的分析，造成结构求解的复杂性。预应力筋的内力分析是求解的核心问题；2) 大变形情况下二次效应显著，引起偏心距损失(如图3所示)。

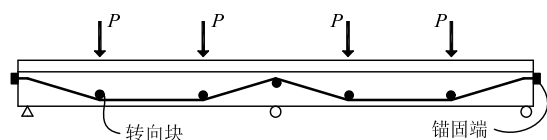


图2 体外预应力钢-混凝土组合梁构造简图

Fig.2 Sketch of externally prestressed composite beam

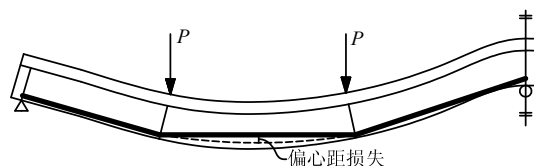


图3 预应力组合梁的二次效应

Fig.3 Secondary effect of prestressed composite beam

1 体外预应力钢-混凝土组合梁的研究现状

总结半个多世纪以来国内外对预应力组合梁的研究成果,学者们主要从以下9个方面对预应力组合梁开展研究:1) 受力全过程数值模拟。预应力组合梁的非线性全过程模拟能帮助学者深入认识结构的内在机理和特性,并为大规模的参数分析提供可能性。国内外学者开发了多种数值模型和数值算法来模拟预应力组合梁复杂的力学行为;2) 承载力和刚度的解析分析。从工程设计的角度看,全过程分析计算量大,耗费时间长,不利于工程应用。结构的特征荷载值(如开裂荷载、弹性极限荷载和塑性极限承载力)以及正常使用极限状态刚度的解析表达常常是工程师比较关心的问题。研究的核心问题依然是预应力筋内力的计算方法。对于预应力简支组合梁,滑移效应的影响是研究的一大热点;对于预应力连续组合梁,滑移效应、混凝土开裂以及支座钢梁稳定问题也是学者们重点关注的,试验研究方面,多以负弯矩区局部试验为主,整梁试验较少;3) 预应力损失和长期性能。这部分研究以借鉴预应力混凝土的研究成果为主,试验资料较少;4) 疲劳特性。预应力作用改变了原钢梁受拉区的应力比,从而改善了组合梁的疲劳特性。预应力组合梁多用于桥梁结构,因此疲劳问题是设计中突出的问题;5) 预应力连续组合梁负弯矩区裂缝发展和内力重分布。预应力作用能控制负弯矩区裂缝,如何计算和评价裂缝的发展情况十分重要。同时,预应力增加了支座钢梁受压区高度,中支座的极限转动能力随之下降,内力可能无法充分重分布,按普通组合梁的调幅系数进行内力分析会偏于不安全;6) 动力特性与抗震性能。这部分研究尚处在起步阶

段;7) 施工性能。预应力组合梁的性能和施工顺序、施工工艺以及施工过程密切相关。国内外学者对此也有许多研究成果;8) 设计方法。预应力组合梁桥的设计包括结构选型、初步设计参数确定、结构尺寸优选、整体设计计算、构件设计计算以及构造设计等。学者们就以上内容做了大量的研究工作;9) 构造措施。体外预应力组合梁设计的关键构造包括预应力筋转向块构造以及端部锚固构造。

1.1 受力全过程数值模拟

1965年,Reagan和Krahl^[1]第一次对承受正弯矩的预应力简支组合梁进行全过程数值分析。作者先将梁离散为一系列杆单元,假定钢梁下翼缘的应变以及预应力筋的内力值,对每个节点建立平衡方程,然后用数值方法求解体系的非线性方程组。程序采用分级增加应变的方法,每增加一个应变值,就要求解平衡方程,然后将该条件下计算得到的预应力筋内力作为下一位移步时假设的预应力筋内力值,不断重复,得到结构受力全过程的反应。这一方法的不足是没有建立钢梁和预应力筋之间变形协调方程,每一步迭代前都要假定预应力筋内力,仅满足平衡条件,不满足变形协调条件,实际上只得到了问题的下限解。

1989年,Saadatmanesh等人提出的变形增量法模型^[2-3]第一次完整地建立了预应力组合梁的基本理论分析框架,适用于承受正弯矩和负弯矩的预应力简支组合梁,并得到了一根正弯矩和一根负弯矩预应力组合梁试验结果的验证。他们的工作是在Reagan和Krahl提出的方法^[1]上作了改进,补充了弹性阶段及弹塑性阶段的预应力筋和组合梁的变形协调条件,使理论模型充分满足平衡条件、变形协调条件和物理条件。Saadatmanesh等人的模型^[2-3]抓住了体外预应力结构求解的核心特征,为后来大量学者的研究所引用。然而,模型忽略了许多复杂因素,如模型未考虑钢和混凝土之间的滑移效应、几何非线性带来的偏心距损失、残余应力、施工工序、预应力损失以及结构软化等因素。对于承受负弯矩简支梁的分析,模型仅适用于轧制密实截面,对于桥梁中使用更为广泛的受稳定承载力控制的焊接非密实截面方法并不适用。针对上述情况,Ayyub等人^[4]于1992年完善了承受负弯矩的预应力组合梁变形增量法。模型进一步考虑了施工阶段的二次受力以及预应力筋松弛造成的预应力损失,同时考虑了非密实截面横向失稳和局部失稳问

题,计算的荷载位移曲线以屈服承载力为极限承载力的标志,并得到5个试件的试验结果验证,但屈服后强度的计算问题尚未解决。

进入21世纪,国内外学者的研究工作主要有以下三大特点:1)在数值模型中考虑更多复杂的因素,以更精确地模拟结构的非线性反应;2)重点研究了简单高效的杆系单元模型以及应用广泛的精细有限元模型在预应力组合梁分析中的应用;3)研究重点开始从预应力简支组合梁转向预应力连续组合梁。

1) 杆系单元模型。

国外学者Dall'Asta等人于1998年提出^[5]、并于2005年改进^[6]的杆系有限元理论模型较为完善,在模拟预应力组合梁全过程受力方面收到了良好的效果。此方法主要特点是通过结构体系运动和变形的精细分析考虑几何非线性的影响、计入了残余应力和施工过程的影响、采用10自由度和16自由度的基于位移无闭锁组合梁单元^[7]很好地模拟栓钉变形导致的滑移效应,同时程序能够计算结构的软化段。经试验验证,用此模型计算预应力简支组合梁具有很高的精度,然而由于预应力连续组合梁整梁试验结果的缺乏,理论模型在连续组合梁中的计算效果尚未得到有效评估。此外,模型在用于连续组合梁时牵涉到的受拉区混凝土模型选取、中支座转动能力以及局部屈曲等问题都未得到妥善解决^[8-9]。

国内学者聂建国、周天然^[10]于2000年用弯矩曲率法对预应力简支组合梁的受力全过程进行模拟。作者重点解决了栓钉刚度随加载变化导致的滑移效应、塑性铰以及构件截面和单元卸载等问题,且充分考虑了几何非线性和下降段的计算问题。经过和7根组合梁试验结果的对比,证实了此方法的高效性和准确性。4年后,李晨光等人^[11]同样用弯矩曲率法模拟了两跨预应力连续组合梁。虽然程序未涉及滑移效应、几何非线性、残余应力、施工应力、负弯矩区稳定、预应力损失、软化段计算以及混凝土受拉开裂计算等复杂因素,但通过和两根连续组合梁试验结果的对比可知,对于负弯矩区稳定问题不突出的预应力连续组合梁,忽略上述复杂因素不会造成太大的误差,满足工程精度,且能大大提高计算效率。

2) 精细有限元模型。

近年来,国内有多位学者开展预应力组合梁的

精细有限元模拟,深入研究了预应力组合梁的受力机理。宗周红等人^[12-13]从2000年开始用有限变形弹塑性修正拉格朗日有限元法对预应力简支和连续组合梁进行全过程非线性模拟。方法的特点是考虑了负弯矩区钢梁局部或整体失稳。方法经过一根预应力简支组合梁和一根预应力连续组合梁的试验验证,具有借鉴意义。

在通用有限元软件数值模拟方面,洪英维^[14]、张云龙^[15]等人于2005年报道了用ANSYS对预应力简支组合梁进行了全过程有限元分析的情况,分析采用非线性弹簧单元模拟滑移效应,其中张云龙^[15]的模型还包含了转向块等细部构造,较其他学者更为精细,计算结果和试验的吻合程度都较高,证实了通用有限元软件用于预应力简支组合梁模拟是精确可行的。

2011年,陶慕轩和聂建国^[16]以6根不同参数的两跨预应力连续组合梁的全梁系列试验结果为基础,以通用有限元程序MSC.MARC(2005r2)为平台,提出了用于模拟预应力两跨连续组合梁非线性全过程受力行为的精细有限元模型,模型能深入揭示预应力筋内力变化、滑移效应、内力重分布、曲率分布以及塑性铰形成等复杂特性,并和实测结果及理论分析结果进行对比校核,证明模型具有较高的精度和广泛的适用性。

需要说明的是,无论采用杆系单元模型还是精细有限元模型,都可以较为精细地考虑结构的几何非线性特点,这样也就自然在计算中考虑了体外预应力组合梁大变形情况下的二次效应这一重要受力特性。

1.2 承载力和刚度的解析分析

1.2.1 预应力简支组合梁

预应力简支组合梁的分析主要包括弹性分析和极限分析,弹性分析和极限分析的核心问题都是求解外荷载作用下预应力筋内力的增量。

最早进行弹性分析的学者是Szilard(1959)^[17]。第一次给出弹性阶段预应力筋内力增量公式的是Hoadley^[18],他在1963年用力法和虚功原理得到了预应力筋内力增量的表达式如下式所示。

$$\Delta T = -\frac{\delta_{01}}{\delta_{11}} = \frac{\int_0^L \frac{M}{E_s I_{cp}} dx}{\int_0^L \frac{e^2}{E_s I_{cp}} dx + \int_0^L \frac{dx}{E_s A_{cp}} + \int_0^L \frac{dx}{E_p A_p}} \quad (1)$$

式中: ΔT 为预应力筋内力增量; δ_{01} 为将预应力筋

中点切断后外荷载引起切断点之间的水平相对位移; δ_{11} 为将预应力筋中点切断后单位预应力筋内力引起的切断点之间的水平相对位移; L 为梁跨; e 为预应力筋偏心距; M 为外荷载产生的弯矩; E_s 为钢梁弹性模量; I_{cp} 为组合梁换算为钢材后的换算截面惯性矩; A_{cp} 为组合梁换算为钢材后的换算截面面积; E_p 和 A_p 分别为预应力筋弹性模量和截面积。Hoadley 的分析^[18]基于经典梁理论, 其计算简单, 物理概念明确, 对后面学者的研究具有广泛影响。Saadatmanesh 等人^[3]也曾将预应力简支组合梁等效为一个平面框架+下弦杆模型采用刚度法进行弹性计算(1989), 但方法牵涉到矩阵运算, 比较繁琐, 很少被后面学者引用。

大量的试验研究结果证实, 弹性阶段混凝土和钢梁间的滑移效应对预应力简支组合梁的受力性能影响很大, 按不考虑滑移效应的换算截面法计算的弹性极限承载力会较试验值偏大, 弹性挠度会较试验值偏小, 这对于工程设计是不安全的, 应当引起重视。因此, 在弹性分析中, 学者们主要研究的焦点是如何考虑滑移效应的影响, 目前比较成熟的思路是借鉴普通组合梁弹性分析中的折减刚度法^[19]。

聂建国和周天然等人^[10,20]于 2000 年提出的方法仍采用式(1)计算预应力筋内力增量, 因此滑移效应的影响并未体现在预应力筋内力增量的计算中, 仅在弹性极限承载力和弹性刚度的计算中用折减刚度法作了修正。实际上, 由于预应力筋和组合梁

的协调变形, 预应力筋和组合梁都会受滑移效应影响, 但该方法在计算预应力筋内力增量时未计滑移效应是理论上的一大不足, 2003 年聂建国和温凌燕等人^[21]提出的刚度增强法也同样存在这一不足。2002 年, 聂建国和高瑾旭^[22]的方法改进了这一不足, 他们用折减刚度法分别修正了预应力筋内力增量 ΔT 、弹性极限承载力 M_y 以及弹性刚度 B , 同时为了避免积分运算, 作者还取了常用外荷载形式对公式作了简化, 使公式便于工程应用。2005 年张南和洪英维^[14]提出的弹性极限承载力计算方法未考虑滑移效应, 计算值平均偏大 10.7%; 刚度分析中预应力筋内力值未计入滑移效应, 但挠度表达式中加入了刚度折减系数, 计算值平均偏大 10.3%。同年, 郝宪武和姚辉瑞^[23]提出的弹性刚度计算方法需要不断迭代, 不利于工程应用, 在迭代中同时用到了普通组合梁的折减刚度系数和预应力组合梁的刚度增强系数, 作者对此缺乏合理的解释, 同时此方法没有得到试验的验证。2006 年, 刘钊和冉嵬^[24]在计算预应力筋内力增量时未用式(1), 而使用了预应力-应变增量和挠度之间的经验公式, 方法考虑了滑移效应, 但许多参数都是经验系数, 缺乏严格的理论推导, 故计算效果也不够理想。表 1 比较了上述方法的计算效果, 从中可以看出聂建国、高瑾旭提出的方法理论完整, 计算值和试验值吻合良好, 聂建国和周天然以及聂建国和温凌燕提出的方法理论上虽有欠缺, 但计算效果也比较好, 而其他方法误差较大。

表 1 不同方法计算效果的比较

Table 1 Comparison on calculation effect among different methods

方法	弹性承载力			弹性刚度			极限承载力			极限刚度		
	试验数	理/实 平均值	理/实 标准差	试验数	理/实 平均值	理/实 标准差	试验数	理/实 平均值	理/实 标准差	试验数	理/实 平均值	理/实 标准差
聂建国和周天然方法	4	1.060	0.037	8	1.066	0.076	8	0.950	0.024	未提出方法		
聂建国和高瑾旭方法	4	0.955	0.021	6	0.951	0.101	4	0.963	0.019	4	0.950	0.024
聂建国和温凌燕方法	未提出方法			4	0.989	0.061	未提出方法			未提出方法		
张南和洪英维方法	1	1.107	0.000	2	1.103	0.007	未提出方法			未提出方法		
郝宪武和姚辉瑞方法	未提出方法			没有试验验证			未提出方法			未提出方法		
刘钊和冉嵬方法	未提出方法			4	1.295	0.069	4	0.858	0.026	未提出方法		
							4	0.860	0.019			

预应力简支组合梁的极限分析可采用基于塑性铰理论的极限平衡法, 跨中截面达到极限弯矩 M_u , 可按简化塑性理论计算, 截面应力分布为矩形应力分布。分析的难点是如何确定极限状态下预应力筋的内力值 T_u , 试验结果表明, 预应力筋在极限状态下可能达到极限强度, 也可能处于弹性阶段,

T_u 的值和初始预应力、布筋形式、偏心距大小以及外荷载形式等均有密切联系, 简单地取 T_u 为常数是不恰当的。

最早对预应力简支梁进行极限分析的是 Hoadley(1963)^[18], 但他没有给出准确解的表达式, 仅指出钢梁开始屈服为承载力下限, 预应力筋达到

极限强度为承载力上限。1989 年 Saadatmanesh 等人^[3]的方法取预应力筋的内力为极限拉力, 虽然和试验情况接近, 但不具有代表性。

国内学者聂建国、周天然、高瑾旭等人^[10,22,25]仍从预应力筋和组合梁的变形协调出发, 通过将全梁划分为弹性区、弹塑性区和塑性铰区来简化全梁的应变分布, 由变形协调条件经过迭代运算得到极限状态下预应力筋内力值。由于迭代运算不便于工程应用, 作者又进一步提出了简化方法。聂建国和周天然等人提出两步法^[10,25], 实际上就是只迭代一步, 计算结果满足工程精度。聂建国和高瑾旭^[22]从试验数据和定性理论分析中观察到预应力筋内力增量和挠度的近似线性关系, 塑性极限状态下 ΔT_u 和弹性极限状态下 ΔT_y 的比值恰为构件的位移延性比 β_r , 据此建议 ΔT_u 可保守地取 $3\Delta T_y$, 试验证明这一简化方法计算的极限承载力精度良好, 且偏于安全。刘钊和冉崑^[24]于 2006 年提出的极限承载力计算公式中, 预应力筋应力增量按《部分预应力混凝土结构设计建议》取, 缺乏合理依据。由表 1 数据可知, 聂建国和高瑾旭以及聂建国和周天然的极限分析方法计算精度较高, 其他方法误差较大。

1.2.2 预应力连续组合梁

预应力连续组合梁的弹性分析包括开裂荷载、屈服荷载以及弹性挠度的计算。核心问题仍是预应力筋内力增量的计算, 主要方法有力法或能量原理。求解难点在于如何考虑滑移效应和支座混凝土开裂的影响。

宗周红等人^[26]于 2000 年提出的弹性分析简化方法采用力法求解, 未考虑滑移效应和支座混凝土开裂区的影响, 计算得到的开裂弯矩和屈服弯矩均偏大, 因此这一方法精度不高。2006 年, 聂建国和温凌燕^[27]提出的方法有了很大的改进, 认为支座附近 $0.15L$ 范围内混凝土退出工作, 正弯矩区用折减刚度法考虑滑移效应, 计算得到的屈服荷载平均误差在 5% 以内, 但离散度较大, 且验证的试验数较少。2007 年, 聂建国和陶慕轩^[28]进一步作了改进, 他们根据试验研究和理论推导的结果, 证明了支座混凝土开裂区长度和预应力度密切相关, 通过和 6 个试验结果的对比, 此方法平均误差 3%, 离散度也很小。周安等人^[29-30]也于 2006 年给出过预应力连续组合梁的挠曲线方程理论解, 该方法有待进一步的试验验证。

预应力连续组合梁的极限分析研究主要局限

于负弯矩承载力的计算。Ayyub 等人^[4]以及陈世鸣等人^[31]分别于 1992 年和 2005 年指出, 对于非密实截面, 预应力作用增大了负弯矩区局部屈曲和整体失稳的可能性, 极限承载力受失稳控制, 简化塑性理论计算的承载力偏大, 屈服承载力和实测结果更接近。宗周红等人^[26]也于 2000 年发现了上述问题, 他们采用了弹塑性简化设计方法对截面应变和预应力筋内力作了一系列假定, 但计算值仍偏大 10% 左右。2006 年, 聂建国和温凌燕^[27]第一次对连续组合梁进行整梁的极限分析, 由于试验中在负弯矩区灌注了混凝土, 提高了负弯矩区的稳定承载力, 负弯矩区的极限弯矩可按简化塑性理论计算, 但方法未给出预应力筋内力计算方法, 仅按实测值代入公式, 极限承载力的计算误差大于 10%。2009 年, 聂建国和陶慕轩^[32]采用极限平衡方法通过基于全梁的变形协调给出了预应力连续组合梁极限状态下预应力筋求解公式, 并较为准确地预测了一组两跨预应力连续组合梁的极限承载力。

需要补充的是, 由于预应力组合梁极限状态下二次效应机理复杂, 很难得到解析解, 因此上述各学者提出的预应力组合梁承载力解析分析方法均未考虑二次效应的影响。但根据聂建国和陶慕轩^[32]的相关建议, 可以参考英国规范 BS5400 从构造上限制相邻转向块之间的距离来消除二阶效应的显著影响。

1.3 预应力损失和长期性能

预应力组合梁的预应力损失主要包括: 摩阻力引起损失 σ_{s1} , 锚具变形引起的损失 σ_{s2} , 温度引起的损失 σ_{s3} , 分批张拉引起的梁体弹性压缩损失 σ_{s4} , 预应力筋松弛引起的损失 σ_{s5} 以及混凝土收缩徐变引起的损失 σ_{s6} , 其中混凝土收缩徐变对预应力组合梁的长期性能有着重要的影响。预应力组合梁的预应力损失及长期性能的试验研究资料较少, 分析多借用预应力混凝土的计算思路。

以下是各学者对各项预应力损失的计算建议:

1) 摩阻力引起损失 σ_{s1} 指的是预应力筋张拉时因和转向块之间产生摩擦而造成的损失。可采用隔离体平衡的弹性分析方法进行求解 (Troitsky, 1990^[33]; 王元丰和钟善桐, 1993^[34]), 求解的关键参数是预应力筋和转向块间的摩擦系数 μ , 薛伟辰和王骅^[35]的试验结果平均值为 0.2, Troitsky^[33]建议涂润滑剂时, 摩擦系数在 0.05~0.10 之间。

2) 锚具变形引起的损失 σ_{s2} 以及分批张拉引起

的梁体弹性压缩损失 σ_{s4} 可按材料力学弹性方法进行计算(Troitsky, 1990^[33];《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》, 2004^[36])。

3) 温度引起的损失 σ_{s3} 主要指由于钢材和混凝土导热系数的差异, 环境温度的剧烈变化造成钢材和混凝土的温差, 从而导致预应力筋内力的变化, 造成预应力损失。需要指出的是, 由于钢材和混凝土的热膨胀系数较为接近, 所以当环境温度缓慢变化时, 温度沿截面高度变化均匀, 此时不会引起预应力损失。国内外多位学者曾研究过温差效应引起的预应力损失计算方法(Szilard, 1959^[17]; Troitsky, 1990^[33]; 王元丰和钟善桐, 1993^[34]), 其建议的方法均是把温差变化看作一种外荷载, 采用同 1.2 节所述的经典弹性分析方法通过力法或虚功原理求解外荷载作用下预应力筋内力的变化值 ΔT_i , 即为预应力损失值。Troitsky^[33]给出了预应力简支组合梁 ΔT_i 的详细推导过程, 其最终得到的解析表达式如下:

$$\Delta T_i = -\frac{\delta_{01}}{\delta_{11}} = \frac{\int_0^L (\Delta \varepsilon + \Delta \phi e) dx}{\int_0^L \frac{e^2 dx}{E_s I_{cp}} + \int_0^L \frac{dx}{E_s A_{cp}} + \int_0^L \frac{dx}{E_p A_p}} \quad (2)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为温度变化引起的组合梁截面轴向应变增量; $\Delta \phi$ 为温度变化引起的组合梁截面曲率增量; 其余变量含义同式(1)。

和式(1)相比, 式(2)仅对分子部分进行了修改, 可见计算温度引起的预应力损失和预应力组合梁在一般荷载作用下的经典弹性分析方法从基本原理上没有任何区别。同时, 式(2)也可用于使用阶段温度效应对预应力组合梁受力性能的影响分析。

4) 预应力筋松弛引起的损失 σ_{s5} 主要由试验拟和经验公式得到, Ayyub 等人^[37]于 1992 年量测了负弯矩作用下预应力筋松弛情况, 并用 1964 年 Magura^[38]用于预应力混凝土梁的经验公式进行了计算, 发现用此公式预测预应力组合梁的预应力筋松弛过程整体趋势相同, 但具体系数需要调整, 调整后的公式比较可靠, 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[36]给出的不同类型钢筋的松弛系数可作参考, Troitsky^[33]给出了松弛系数的大致范围为 1%~5%。

5) 计算混凝土收缩徐变引起的损失 σ_{s6} 时同样可以将收缩徐变看作一种外荷载, 同 1.2 节所述的经典弹性分析方法通过力法或虚功原理求解预应力损失值(Szilard, 1959^[17]; Troitsky, 1990^[33]; 王元

丰和钟善桐, 1993^[34]), 具体而言, 就是把式(2)中的分子项 δ_{01} 修改为因收缩徐变引起的预应力切断点之间的水平相对位移, 具体的计算过程可参见 Troitsky^[33]的推导。这种分析方法比较成熟, 也得到了试验的验证。

混凝土的收缩徐变除了会引起预应力损失外, 还会影响预应力组合梁的长期性能。薛伟辰等人^[39-40]完成的体外预应力简支组合梁长期性能试验表明, 相比非预应力组合梁, 预应力组合梁在加载早期挠度会快速增长, 随后会进入一个缓慢的逐步增长期, 根据其实测结果, 预应力简支组合梁因收缩徐变导致的一年长期挠度是瞬时挠度的 3.1 倍, 而非预应力组合梁仅为 2.0 倍, 而目前欧洲规范 4 和我国规范给出的长期挠度放大建议均比实测值小, 这对设计是偏于不安全的。因此, 对于预应力组合梁, 应更加重视收缩徐变对组合梁的不利影响。

此外, 多位学者对预应力组合梁的长期性能开展了全过程模拟。王连广等人(2005)^[41]采用收缩徐变微分分析方法, 编程进行了全过程分析, 尚缺乏试验验证。周奇等人(2007)^[42]提出的方法因忽略了预应力筋对混凝土收缩徐变的约束, 理论上有待进一步探讨。薛伟辰等人^[40]以试验为基础, 采用调整龄期的有效模量法对预应力简支组合梁的长期性能开展了全过程的数值模拟, 取得了良好的效果, 模拟结果和实测结果吻合良好。

1.4 疲劳性能

国外学者中, Li 等人^[43-44]于 1995 年完成的预应力组合梁疲劳特性的研究工作比较有代表性, 他们的工作主要包括关键部件研究和整体性能研究。关键部件主要指预应力筋、栓钉以及盖板。他们搜集了过去学者进行的 700 根预应力筋试件、99 个栓钉试件以及 193 个盖板试件的疲劳试验数据^[45]进行回归分析, 得到了疲劳强度公式, 并和 AASHTO 中的构造分类进行比对, 提出了相关设计建议, 这些工作具有很高的参考价值。整体性能研究方面, 作者对 11 根预应力简支组合梁进行整梁疲劳试验, 主要变化参数为应力比和应力幅。结果表明, 预应力简支组合梁的疲劳强度受焊接盖板端部的疲劳强度控制, 预应力筋和栓钉在试验中均未发生疲劳破坏。在等应力幅的情况下, 预应力作用使钢梁下翼缘焊接盖板的应力比从 0 变为-1, 疲劳强度从而得到明显的提高, 提高幅度约为 AASHTO 中的一

个构造等级。同时,这种提高作用和应力幅也密切相关,应力幅越低,提高幅度也就越明显。以上工作充分证实了预应力对组合梁疲劳强度的提高,并在机理上予以了深入的阐述,对疲劳设计具有借鉴意义。

国内学者宗周红和车惠民^[46]于 2000 年对两片预应力简支和连续组合梁的疲劳性能展开试验研究。试件中预应力钢绞线、锚具和栓钉连接件按 AASHTO 和 EC4 规范的预应力混凝土标准进行设计,未发生疲劳破坏,从而验证了方法的可靠性,但该研究未给出定量的结论。

1.5 预应力连续组合梁负弯矩区裂缝发展和内力重分布

预应力作用能提高连续组合梁的开裂荷载,对于完全预应力连续组合梁,使用荷载下的支座混凝土不开裂,而对于使用更为广泛的部分预应力连续组合梁,使用荷载下支座混凝土开裂,裂缝宽度的计算仍然是正常使用极限状态验算的重要内容。国内学者多对轴心受拉混凝土构件的裂缝计算公式进行修正,以用于预应力连续组合梁负弯矩区裂缝宽度的计算。轴心受拉混凝土裂缝计算公式的 3 个重要参数是钢筋应力不均匀系数 ϕ 、裂缝处钢筋应变 ε_s 以及平均裂缝间距 l_f 。试验结果^[47]表明, ϕ 和支座开裂弯矩 M_r 与使用弯矩 M_k 的比值相关,而使用弯矩又受内力重分布的影响,和弹性计算值不同; ε_s 也和支座使用弯矩 M_k 密切相关,同时还受到预应力以及支座钢和混凝土部分组合作用的影响; l_f 和栓钉间距以及力比 R 相关。段建中和陈莘艳(2000)^[48]的方法仅考虑了预应力和力比的影响,计算平均误差超过 20%。聂建国和李绍敬(2003)^[47]考虑了上述因素,采用试验回归的方法,平均误差在 5%以内,但由于公式对机理的剖析尚不够,且用于回归的数据也很有限,计算结果离散性也比较大,因此该公式仍有待进一步验证和改进。

支座混凝土开裂进一步导致预应力连续组合梁的内力重分布,国内普遍采用弯矩调幅法来计算预应力连续组合梁的内力。试验表明^[47],虽然预应力作用降低了中支座转动能力,使预应力组合梁弯矩调幅系数比普通组合梁低,但一般仍能超过 25%。聂建国和李绍敬等人^[47,49]曾对弯矩调幅系数的取值做过研究,思路是沿用普通组合梁的公式,加入了布筋形式、预应力度和有效初始轴压比的影响,用试验数据进行参数拟合,虽然和试验吻合良

好,但同样存在试验验证量不足以及机理剖析不够的缺点。

1.6 动力特性与抗震性能

预应力作用会改变简支组合梁的动力特性,Miyamoto 等人^[50]于 2000 年第一次完整地推导了预应力简支组合梁自振频率的解析解,并得到捶击试验的验证。在理论分析和试验研究中,作者发现预应力对简支组合梁自振频率的影响主要取决于预应力筋的布置对组合梁的效应以弯矩为主还是轴力为主,前者提高自振频率,后者降低自振频率。表征这种布置特性的是预应力筋布置参数(Arrangement Parameters): 1) e/y_{s1} , 组合梁锚固端偏心距 e 和组合梁中和轴高度 y_{s1} 的比值; 2) θ , 转向块处预应力筋的转角; 3) k , 预应力筋轴向刚度和组合梁截面轴向刚度的比值。预应力简支组合梁的自振频率随预应力筋布置参数呈单调正比变化。最后,作者用理论方法对一个实际桥梁结构进行分析,和实测值吻合良好。

预应力组合梁的抗震性能研究仅在 2007 年有报道(薛伟辰等人)^[51]。研究以 5 根组合梁低周反复荷载试验为基础,得到了关于简支组合梁破坏形态、滞回曲线、延性、耗能能力、变形恢复能力、刚度退化以及滑移效应的若干定性结论,初步验证了预应力简支组合梁良好的抗震性能。

此外,预应力连续组合梁的动力特性及抗震性能研究未见报道。

1.7 施工性能

施工工艺和施工过程对预应力组合梁的受力性能有很大的影响。

关于预应力组合梁施工性能的研究主要包括两个方面的内容:一方面是探讨如何优化施工方案以提高预应力组合梁的性能,譬如,针对负弯矩区预应力效率问题,Saadatmanesh 等人(1989)^[2,52]根据试验结果展开讨论,建议采用在负弯矩区对钢梁和混凝土板分别张拉预应力然后再将两者形成组合作用的施工方案;Ayyub 等人(1992)^[37]针对预应力预制桥面板和现浇桥面板两种施工方法展开试验研究,试验中预应力预制桥面板组合梁表现出更好的性能,同时能降低造价、节省时间、保证材料质量,应当在工程中成为首选。另一方面是探讨预应力组合梁施工技术中的难点问题,主要针对国内实际工程如福州会堂(张文耀,1998)^[53]、沧黄铁路立交桥主桥上部结构(蔡德凯,2007)^[54]等工程进行施

工难点的分析和施工全过程分析,相关研究局限于个别工程,尚缺乏普遍适用规律的研究。

1.8 设计方法

预应力组合梁主要用于桥梁结构,和其他形式的桥梁结构一样,预应力组合梁桥的设计主要包括计算分析和概念设计两部分内容。

1.8.1 计算分析

计算分析主要分为两个步骤。第一步骤是整体计算。对于一个实际的梁式桥来说,多根主梁通过横向联系梁形成空间梁格体系,整体计算的目的是要把作用在空间梁格体系的外荷载分配到每根主梁上,把空间受力问题转化为平面受力问题,落实到设计方法上,就是荷载横向分布系数的计算问题,而这里的荷载不仅包括传统意义上的竖向活荷载,还包括预应力等效荷载。Klaiber 等人^[55]对这个问题有过深入的研究,1982 年他们用正交各向异性板理论计算了竖向荷载以及预应力等效荷载在各主梁间的分布,理论计算结果和试验结果吻合良好,3 年后,为了进一步简化计算方法,他们针对预应力作用下的弯矩和轴力的分配规律问题,以一个四主梁双车道后张预应力简支组合梁桥作为分析模型,用 SAP IV 程序进行参数分析,并经过现场试测结果的校核^[56-57],从分析结果中,作者提炼了端部约束条件、施加荷载形式(轴力、偏心力或纯弯矩)、主梁跨度、预应力筋锚固位置、主梁相对刚度比以及支座斜交角度等因素,回归得到了预应力作用下弯矩和轴力的横向分布系数经验公式,为预应力简支组合梁整体计算提供了简便而准确的分析方法。整体计算给出了单根预应力组合梁的荷载情况,接下来就可以对单根预应力组合梁进行设计计算。学者们提出的设计方法及流程多以数值模拟(1.1 节)和解析分析(1.2 节)结果为基础,且局限于抗弯性能的设计,设计方法总体上可分为允许应力设计法和极限状态设计法。国外学者提出的方法中比较有影响的是 Saadatmanesh 等人的方法^[52],此方法以先前的试验研究和理论分析为基础提出了预应力组合梁抗弯设计的具体方法和流程,方法中允许应力设计包括整体分析、初步设计、内力计算、应力验算、剪力连接件计算以及腹板抗剪、挠度等其他方面的计算,极限状态设计涵盖密实截面和非密实截面、承受正弯矩和负弯矩等各种情况,Kocsis^[58]还于 1991 年以 Saadatmanesh 等人的方法^[52]为基础,开发了预应力简支组合梁的抗弯设计

程序 PRCB。国内学者中,王元丰和钟善桐^[34]于 1993 年将国外学者的研究成果进行了总结,综述了预应力简支组合梁的抗弯设计方法。2002 年,聂建国和高瑾旭^[22]以自己的试验研究和理论分析结果为依据,做了大量的参数分析和讨论,给出了预应力及预应力加固简支组合梁的受弯性能设计方法,该设计方法包括弹性承载力设计、正常使用极限状态设计、极限承载力设计以及构件延性比的设计控制,并经过试验的验证。

1.8.2 概念设计

预应力组合梁的设计内容不仅包括具体的计算,方案选择、初步参数选取以及构造方面的考虑对于充分发挥预应力组合梁的优势,避免它的劣势起着至关重要的作用,这些都是概念设计的内容。这方面的研究总体上未成体系,多以工程和试验的经验性总结为主。

1989 年, Saadatmanesh 等人^[2]探讨了预应力筋布置问题,结果表明预应力筋位置离中和轴位置越远,对强度提高越明显,为了尽可能地发挥预应力筋的效率,设计时正弯矩区预应力筋位置应当尽可能位于钢梁下翼缘的下侧,负弯矩区预应力筋的位置应当尽可能靠近上翼缘。同时,设计中还应注意尽可能减小转向块间距以减小偏心矩损失。关于预应力筋布置的研究, Ayyub 等人(1990)^[59]有更具体而实用的结论。他们指出,预应力筋材料的选择不会影响组合梁的屈服承载力,但使用高强钢绞线比使用普通预应力钢筋极限承载力要高得多,并且更经济,因此高强钢绞线比普通预应力钢筋具有更高的综合效益;在布筋形式方面,折线布筋使偏心矩随荷载弯矩变化而变化,同时能提高组合梁支座抗剪能力,然而直线布筋对比折线布筋能使组合梁有更高的屈服强度,更大幅度扩大弹性范围,改善使用性能,造价更低,因此作者认为直线布筋比折线布筋更有优势。

预应力组合梁初步设计时的参数优化也是学者们研究的一个重点。Tochacek 和 Mehta 的工作(1972)^[60]主要针对简支组合梁,他们通过参数分析给出了一系列尺寸优化的建议。预应力连续组合梁的参数优化可以参考 Tong 和 Saadatmanesh 的工作(1992)^[61],他们的工作比较系统全面,涵盖了预应力大小、偏心距、预应力筋长度、荷载形式、布筋形式、预应力施加顺序的变化各因素对预应力连续组合梁支座弯矩、跨中挠度、预应力筋内力增量的

影响,对预应力连续组合梁的初步设计具有很好的参考价值。

此外, Ayyub 等人^[37]于 1992 年对预应力连续组合梁负弯矩区的稳定设计提出一系列构造建议。建议指出,鉴于预应力连续组合梁负弯矩区承载力多由钢梁稳定控制,增设足够的侧向支撑十分必要;为减轻自重,钢梁腹板无需设计成密实截面,但翼缘板应尽量设计成厚而窄的密实截面,以发挥钢梁腹板的屈曲后强度。虽然预应力组合梁负弯矩区钢梁失稳问题在计算上尚未得到很好解决,但这些构造建议可以避免钢梁失稳造成的结构性能下降。

1.9 构造措施

体外预应力组合梁设计的关键构造包括预应力筋转向块构造以及端部锚固构造。

体外预应力结构的预应力筋需要通过转向装置改变方向,从而形成预应力折线或曲线配筋。转向装置可传递体外预应力筋产生的水平和垂直横向力,并将预应力筋在转折处产生的集中荷载传递至梁体中。在转向装置与预应力筋的接触区域存在摩擦和横向力的挤压作用,因此设计时应尽量减少此处的摩阻损失。同时,转向装置在结构使用期内也不应对预应力材料造成损害^[62]。典型的工字型钢梁的体外预应力筋转向装置的构造形式如图 4 所示^[33]。

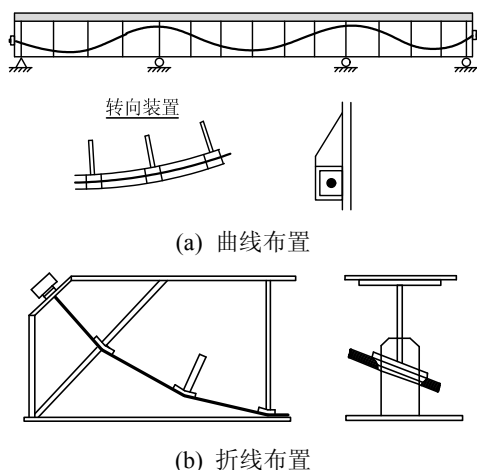


图 4 体外预应力筋转向装置构造

Fig.4 Details of the deviators of external prestressing tendons

若组合梁桥中钢梁部分为箱型梁,则转向装置可采取图 5 所示的构造,即鞍座式、横隔板式和肋板式^[63]。鞍座式转向装置(图 5(a))体积较小、自重轻,但其应力分布较为复杂,易引起应力集中;横隔板式转向装置(图 5(b))可与结构的顶板或底板相

连成整体,自重较鞍座式与肋板式大,在体外预应力束作用下的受力模式接近受压柱,因而承载能力较强;肋板式转向装置(图 5(c))的自重较横隔板式小,受力状态介于前二者之间。

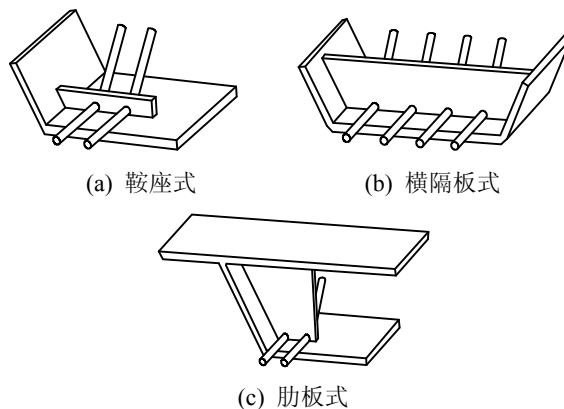


图 5 钢箱梁内预应力束转向装置构造

Fig.5 Details of the deviators of external prestressing tendons in steel box girders

预应力的锚固构造是保障结构安全性和可靠性的关键。对于锚于钢梁上的预应力束,端部的锚固构造应通过加劲肋进行加强,并牢固焊接于钢梁(图 6(a))^[33]。设计时要特别注意钢梁在集中荷载作用下不会发生局部失稳与屈服。对于设置于钢箱梁内部的锚固区,通过混凝土与钢板的局部结合,既可以增加集中力的传递长度、减少应力集中,也可以提高钢板的刚度,防止局部失稳(图 6(b))。此外,把折线形或曲线形索锚固在承压能力较强的钢筋混凝土翼板端部也是一种较好的布置方法。

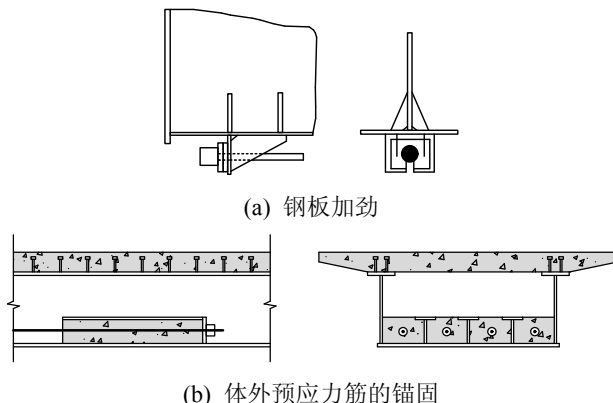


图 6 体外预应力筋转向装置构造

Fig.6 Anchorage of external prestressing tendons

2 体外预应力钢-混凝土组合梁的研究展望

从上述文献回顾的情况看,国内外学者的研究多集中于预应力简支组合梁,应该说,到目前为止,

国内外学者和工程技术人员对预应力简支组合梁的力学性能已经有了较为深入而全面的认识,研究工作已基本形成体系。但作为在桥梁结构中同样使用十分广泛的预应力连续组合梁,国内外的相关研究报道仍十分有限,许多问题仍有待进一步解决。因此建议进一步开展预应力连续组合梁的相关研究工作如下:

(1) 鉴于体外预应力结构的预应力筋内力和全梁变形相关,负弯矩区的局部试验结果并不能完全代替整梁试验结果,应当进一步开展预应力连续组合梁的整梁试验。

(2) 静力特性方面,支座钢梁失稳、屈曲后强度的利用以及混凝土板开裂造成组合梁的复杂性能尚有待进一步研究。

(3) 内力分析方面,预应力导致支座转动能力的下降如何在设计中予以考虑、基于内力重分布的调幅系数设计法具体如何实现均是尚未澄清的问题。

(4) 其他研究方面,预应力连续组合梁的长期性能、疲劳性能、动力性能、抗震性能以及施工性能在目前的研究中几乎很少涉及到。

(5) 设计方法方面,预应力连续组合梁尚缺乏系统的设计方法。

参考文献:

- [1] Reagan R S, Krael N W. Behavior of prestressed composite beams [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 1967, 93(6): 87—108.
- [2] Saadatmanesh H, Albrecht P, Ayyub B M. Experimental study of prestressed composite beams [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 1989, 115(9): 2348—2363.
- [3] Saadatmanesh H, Albrecht P, Ayyub B M. Analytical study of prestressed composite beams [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 1989, 115(9): 2364—2381.
- [4] Ayyub B M, Sohn Y G, Saadatmanesh H. Prestressed composite girders. II: Analytical study for negative moment [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 1992, 118(10): 2763—2783.
- [5] Dall'Asta A, Dezi L. Nonlinear behavior of externally prestressed composite beams: analytical model [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 1998, 124(5): 588—597.
- [6] Dall'Asta A, Zona A. Finite element model for externally prestressed composite beams with deformable connection [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 2005, 131(5): 706—714.
- [7] Dall'Asta A, Zona A. Slip locking in finite elements for composite beams with deformable shear connection [J]. *Finite Element Analytical Design*, 2004, 40(13/14): 1907—1930.
- [8] Chen S M. Discussion of "Finite element model for externally prestressed composite beams with deformable connection" by Andrea Dall'Asta and Alessandro Zona [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 2006, 132(12): 2036—2037.
- [9] Dall'Asta A, Zona A. Closure to "Finite element model for externally prestressed composite beams with deformable connection" by Andrea Dall'Asta and Alessandro Zona [J]. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 2006, 132(12): 2037—2038.
- [10] 周天然. 预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
Zhou Tianran. Experimental study on prestressed steel-concrete beams with hollow slab flange [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000. (in Chinese)
- [11] 李晨光, 王玲, 刘航, 聂建国. 预应力钢-混凝土连续组合梁的非线性分析[J]. *建筑技术开发*, 2004, 31(9): 2—5.
Li Chenguang, Wang Ling, Liu Hang, Nie Jianguo. Nonlinear analysis of continuous prestressed steel-concrete composite beams [J]. *Building Technique Development*, 2004, 31(9): 2—5. (in Chinese)
- [12] 宗周红, 车惠民, 房贞政. 预应力钢-混凝土组合梁有限元非线性分析[J]. *中国公路学报*, 2000, 13(2): 48—51.
Zong Zhouhong, Che Huimin, Fang Zhenzheng. Nonlinear analysis of prestressed composite steel-concrete beams by the finite element method [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2000, 13(2): 48—51. (in Chinese)
- [13] 郑则群, 房贞政, 宗周红. 预应力钢-混凝土组合梁非线性有限元解法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(2): 218—222.
Zheng Zequn, Fang Zhenzheng, Zong Zhouhong. Finite-element nonlinear method of prestressed steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(2): 218—222. (in Chinese)
- [14] 洪英维. 体外预应力钢箱-混凝土组合梁试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
Hong Yingwei. An experimental study on steel box-concrete composite beam with external prestressing tendon [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [15] 张云龙. 体外预应力钢-混凝土组合梁结构行为的试验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005.
Zhang Yunlong. Test study of external prestressed composite steel-concrete beams structure [D]. Jilin: Jilin

- University, 2005. (in Chinese)
- [16] 陶慕轩, 聂建国. 预应力钢-混凝土连续组合梁的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 8—20.
Tao Muxuan, Nie Jianguo. Nonlinear finite element analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 8—20. (in Chinese)
- [17] Szilard R. Design of prestressed composite steel structures [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1959, 85(9): 97—124.
- [18] Hoadley P G. Behavior of prestressed composite steel beams [J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1963, 89(3): 21—34.
- [19] Nie J G, Cai C S. Steel-concrete composite beams considering shear slip effects [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2003, 129(4): 495—506.
- [20] 聂建国, 秦凯, 周天然, 高瑾旭. 预应力钢-混凝土组合梁的刚度[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 6—8.
Nie Jianguo, Qin Kai, Zhou Tianran, Gao Cuixu. Study on rigidity of prestressed steel-concrete composite beams [J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 6—8. (in Chinese)
- [21] 聂建国, 温凌燕, 刘冬林. 预应力钢-混凝土简支组合梁变形计算的刚度增强法[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 9—11.
Nie Jianguo, Wen Lingyan, Liu Donglin. An increased stiffness method for predicting the deformation of prestressed simply supported steel-concrete composite beam [J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 9—11. (in Chinese)
- [22] 高瑾旭. 预应力及预应力加固钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
Gao Cuixu. Experimental study on prestressed and prestress strengthened steel-concrete composite beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [23] 姚辉瑞. 预应力钢-混凝土组合梁挠度变形分析和计算理论研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
Yao Huirui. Study on deformation analysis of prestressed steel-concrete composite beams [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [24] 冉嵬. 体外预应力钢-混凝土组合梁受弯性能理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Ran Wei. Theoretical analyse and experimental research on bending behavior of external prestressed composite steel-concrete beams [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [25] Nie J G, Cai C S, Zhou T R, Li Y. Experimental and analytical study of prestressed steel-concrete composite beams considering slip effect [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2007, 133(4): 530—540.
- [26] 宗周红, 车惠民, 房贞政. 预应力钢-混凝土组合梁受弯承载力简化计算[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 56—61.
Zong Zhouhong, Che Huimin, Fang Zhenzheng. Simplified calculations of flexible moment capacity of prestressed composite steel-concrete beams [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition), 2000, 28(1): 56—61. (in Chinese)
- [27] 聂建国, 温凌燕. 体外预应力加固钢-混凝土连续组合梁的承载力分析[J]. 工程力学, 2006, 23(1): 81—86.
Nie Jianguo, Wen Lingyan. Load-carrying capacity analysis of continuous steel-concrete composite beams strengthened by external prestress [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(1): 81—86. (in Chinese)
- [28] 聂建国, 陶慕轩. 预应力钢-混凝土连续组合梁的变形计算[J]. 土木工程学报, 2007, 40(12): 38—45.
Nie Jianguo, Tao Muxuan. Deformation analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(12): 38—45. (in Chinese)
- [29] 周安, 刘其伟, 戴航. 预应力钢-混凝土连续组合梁的挠度研究[J]. 公路交通科技, 2006, 24(1): 63—66.
Zhou An, Liu Qiwei, Dai Hang. Study on deformation of continuous prestressed steel-concrete composite beams [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 24(1): 63—66. (in Chinese)
- [30] 周安, 戴航, 刘其伟. 基于栓钉柔性连续预应力组合梁挠度增量理论解[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(3): 290—293.
Zhou An, Dai Hang, Liu Qiwei. Theoretic formulas for the deflection increment of continuous prestressed composite beams based on stud flexibility [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2007, 30(3): 290—293. (in Chinese)
- [31] 陈世鸣, 孙森泉, 张志彬. 体外预应力钢-混凝土组合梁负弯矩区的承载力研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 14—20.
Chen Shiming, Sun Senquan, Zhang Zhibin. Load carrying capacity of steel-concrete composite beams with external tendons under negative bending [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 14—20. (in Chinese)
- [32] 聂建国, 陶慕轩. 预应力钢-混凝土连续组合梁的承载力分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 38—47.
Nie Jianguo, Tao Muxuan. Bearing capacity analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 38—47. (in Chinese)
- [33] Troitsky M S. Prestressed steel bridges theory and design [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1990.
- [34] 王元丰, 钟善桐. 有索预应力组合梁的性能与设计[J]. 钢结构, 1993, 8(19): 61—68.
Wang Yuanfeng, Zhong Shantong. Behavior and design method of prestressed cable composite beams [J]. Steel Construction, 1993, 8(19): 61—68. (in Chinese)
- [35] 薛伟辰, 王骅. 体外预应力钢-混凝土组合梁长短期性

- 能研究[C]. 2003 年全国桥梁学术会议. 成都: 人民交通出版社, 2003: 572—578.
- Xue Weichen, Wang Hua. Study on long-term and short-term behavior of externally prestressed steel-concrete composite beams [C]. Proceedings of the National Conference on Bridge Engineering 2003. Chengdu: China Communications Press, 2003: 572—578. (in Chinese)
- [36] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- JTG D62-2004, Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [37] Ayyub B M, Sohn Y G, Saadatmanesh H. Prestressed composite girders. I: Experimental study for negative moment [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1992, 118(10): 2743—2762.
- [38] Magura D D, Sozen M A, Siess C P. A study of stress relaxation in prestressing reinforcement [J]. PCI Journal, 1964, 9(2): 13—57.
- [39] 薛伟辰. 1 年持续荷载下预应力组合梁的受力性能[J]. 桥梁建设, 2003(2): 1—3.
- Xue Weichen. Performance of prestressed steel-concrete composite beam under one-year sustained loading [J]. Bridge Construction, 2003(2): 1—3. (in Chinese)
- [40] Xue W C, Ding M, H C, Li J. Long-term behavior of prestressed composite beams at service loads for one year [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2008, 134(6): 930—937.
- [41] 王连广, 刘莉, 崔敬奇. 预应力钢与高强混凝土组合梁徐变效应分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(7): 695—698.
- Wang Lianguang, Liu Li, Cui Jingqi. Analysis of creep effect on prestressed steel composite beams with high-strength concrete [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(7): 695—698. (in Chinese)
- [42] 周奇, 张南, 洪英维. 体外预应力钢箱-混凝土组合梁的预应力损失的计算方法[J]. 公路工程, 2007, 32(4): 40—44.
- Zhou Qi, Zhang Nan, Hong Yingwei. The calculation for the loss of pre-stressing in the external pre-stressed steel-concrete composite box beam [J]. Highway Engineering, 2007, 32(4): 40—44. (in Chinese)
- [43] Li W L, Albrecht P, Saadatmanesh H. Strengthening of composite steel-concrete bridges [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1995, 121(12): 1842—1849.
- [44] Albrecht P, Li W L, Saadatmanesh H. Fatigue strength of prestressed composite steel-concrete beams [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1995, 121(12): 1850—1856.
- [45] Albrecht P, Li W L. Fatigue strength of prestressed composite beams [R]. NTIS Rep. No. PB89223317, Maryland: Dept. of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, Md, 1989.
- [46] 宗周红, 车惠民. 预应力钢-混凝土组合梁的疲劳性能[J]. 铁道学报, 2000, 22(3): 92—95.
- Zong Zhouhong, Che Huimin. Fatigue behavior of prestressed composite steel concrete beams [J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(3): 92—95. (in Chinese)
- [47] 李绍敬. 预应力及其加固钢-混凝土连续组合梁的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- Li Shaojing. Experimental study on prestressed and prestress reinforced continuous steel-concrete composite beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [48] 段建中, 陈苹艳. 预应力组合连续梁的变形计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 362—365.
- Duan Jianzhong, Chen Pingyan. The deformations calculation of continuous prestressed composite beams [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2000, 23(3): 362—365. (in Chinese)
- [49] 聂建国, 李绍敬, 李晨光, 刘航. 预应力钢-混凝土连续组合梁内力重分布试验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 12—14.
- Nie Jianguo, Li Shaojing, Li Chenguang, Liu Hang. Experimental study on internal force redistribution of steel-concrete continuous composite beams [J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 12—14. (in Chinese)
- [50] Miyamoto A, Tei K, Nakamura H, Bull J W. Behavior of prestressed beam strengthened with external tendons [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2000, 126(9): 1033—1044.
- [51] 薛伟辰, 李杰, 李昆. 预应力钢-混凝土组合梁抗震性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 656—660.
- Xue Weichen, Li Jie, Li Kun. Experimental studies on seismic performance of prestressed steel-concrete composite beams [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 656—660. (in Chinese)
- [52] Saadatmanesh H, Albrecht P, Ayyub B M. Guidelines for flexural design of prestressed composite beams [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1989, 115(11): 2944—2961.
- [53] 张文耀. 福建会堂预应力钢-混凝土组合梁施工与测试[J]. 施工技术, 1998(12): 30—31.
- Zhang Wen Yao. Construction and test of prestressed steel-concrete composite beams of Fujian Hall [J]. Construction Technology, 1998(12): 30—31. (in Chinese)

(参考文献[54]—[63]转第 156 页)

- Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(1): 102—105. (in Chinese)
- [7] 李黎, 夏正春, 江宜城, 梁政平. 输电线断线振荡研究[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 165—169.
Li Li, Xia Zhengchun, Jiang Yicheng, Liang Zhengping. Study on wire breaking-induced vibrations of electric transmission line [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 165—169. (in Chinese)
- [8] 田福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Tian Fujun. Computational fluid dynamics analyses [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 李黎, 孔德怡, 龙晓鸿, 梁政平. 输电线微风振动的 CFD 数值仿真[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊 II): 235—240.
Li Li, Kong Deyi, Long Xiaohong, Liang Zhengping. Numerical simulation of aeolian vibrations transmission lines by CFD [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(Sup.II): 235—240. (in Chinese)
- [10] Cao Huajin, Li Li, Chen Yuankun. Research on initial form-finding and galloping of ice-coated transmission conductors [C]// IEEE Computer Society. 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering. Chengdu, China, 2010: 113—116.
- [11] Desai Y M, Yu P, Popplewell N, Shah A H. Finite element modeling of transmission line galloping [J]. Computer and Structure, 1995, 57(3): 407—420.
- [12] 夏正春. 特高压输电线的覆冰舞动及脱冰跳跃研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
Xia Zhengchun. Research on galloping and ice-shedding of ultra high-voltage transmission conductors [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)

(上接第 141 页)

- [54] 蔡德凯. 钢-混凝土组合梁体外预应力体系施工技术[J]. 桥梁建设, 2007(增刊 1): 106—108.
Cai Dekai. Construction techniques for external prestressing system of steel and concrete composite girders [J]. Bridge Construction, 2007(Sup.1): 106—108. (in Chinese)
- [55] Klaiber F W, Dunker K F, Sanders W W. Strengthening of single-span steel-beam bridges [J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1982, 108(12): 2766—2780.
- [56] Dunker K F. Strengthening of simple span composite bridges by post tensioning [D]. Iowa: Iowa State University, 1985.
- [57] Dunker K F, Klaiber F W, Sanders W W. Post-tensioning distribution in composite bridges [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1986, 112(11): 2540—2553.
- [58] Kocsis P. Discussion of “Guidelines for flexural design of prestressed composite beams” by Hamid Saadatmanesh, Pedro Albrecht, and Bilal M Ayyub [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1991, 117(11): 3548—3549.
- [59] Ayyub B M, Sohn Y G, Saadatmanesh H. Prestressed composite girders under positive moment [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1990, 116(11): 2931—2951.
- [60] Tochacek M, Mehta C L. Economical design of prestressed plate girder [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1972, 98(6): 1273—1289.
- [61] Tong W X, Saadatmanesh H. Parametric study of continuous prestressed composite girders [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1992, 118(1): 186—206.
- [62] 卢春玲, 李传习. 体外预应力箱梁桥转向块配筋设计分析[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 122—126.
Lu Chunling, Li Chuanxi. Reinforcement design and analysis of deviators of externally prestressed box girder bridges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 122—126. (in Chinese)
- [63] 黄民元. 体外预应力结构转向块的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(1): 143—145, 157.
Huang Minyuan. Research on the deviators of external pre-stressing structure [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2008, 28(1): 143—145, 157. (in Chinese)