文章编号:025822724(2002)0520500205

体外预应力高强混凝土两跨连续梁模型试验

李方元, 赵人达, 周益云
(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:为研究预应力和混凝土材料对高强度混凝土体外预应力连续梁的力学行为的影响,设计并完成了 4 片体外预应力高强度混凝土连续梁模型的静载试验。试验结果表明:体外预应力连续梁的裂缝分布和发展规律与无粘结预应力梁相似;采用钢纤维提高负弯矩区的开裂载荷是有效的,而且利用钢纤维增强可在一定程度上限制裂缝发展并在卸载后使裂缝闭合;普通钢筋对分散裂缝和限制裂缝发展有利。

关键词:高强混凝土;连续梁;钢纤维混凝土;体外预应力
中图分类号:TU378 **文献标识码**:A

Model Test of Two Span High2Strength Concrete Continuous Beams with External Prestress

LI Fang2yuan, *ZHAO Ren2da*, *ZHOU Yi2yun*
(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Four different high2strength concrete continuous beams are designed with different external prestresses and made of different concrete materials (high2strength concrete or steel2fiber2reinforced high2strength concrete), and tested under static load to study their structural behaviors. The test results show that: the crack distribution and propagation of the externally prestressed continuous beams are similar to those of the non2bond prestressed concrete; using steel fiber to improve the cracking load in negative moment region is effective, and the steel fiber reinforcement can not only hinder cracks propagation, but also cause cracks to close after unloading; and conventional reinforcing steel bars are favorable to separating cracks and restricting cracks propagation.

Key words: high2strength concrete; continuous beams; steel2fiber2reinforced high2strength concrete; external prestresses

高速和重载运输的发展给铁路桥梁提出了更高的使用性和耐久性要求。从材料角度,要求混凝土不仅具有良好的物理力学性能,而且应具有良好的耐久性能。高强混凝土(HSC)由于其强度高,耐久性能好,正好满足这种要求,所以,HSC 的应用越来越多,创造的经济和社会价值也愈来愈高。但是 HSC 的脆性随强度的提高而上升,为了在保证强度的同时,又能提高韧性,人们通过添加纤维来弥补其韧性的不足,其中钢纤维混凝土(FRC)由于其良好的韧性越来越受关注[1,2]。

随着体外预应力技术中的防腐问题得到了很好的解决,体外预应力结构的应用愈加广泛。与其它预应力形式相比,体外预应力筋易于检查、便于更换、方便施工。而对后张预应力,由于压浆技术不成熟或无法保证压浆防腐程度,并且实践也证明压浆防腐的可靠性值得怀疑,又无法检查和监察,不易更换,这使体

收稿日期:2001212216
基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助(98061307)
作者简介:李方元(1972 -),男,博士研究生.

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

外预应力技术得到一定的应用空间。

体外预应力混凝土结构已是混凝土结构中一个新的发展方向,对体外预应力结构的研究也成为当前世界各国的热门课题之一。各国混凝土工程界对体外预应力结构的使用性能、预应力筋的应力增量、构件极限承载力以及抗疲劳性能等方面均作了一些研究工作[3]。但对体外预应力混凝土连续梁在荷载作用下的全过程受力性能的研究却很少,结合高强混凝土的体外预应力连续梁的结构行为研究未曾见到报道。

本课题就是为了研究连续梁在体外预应力与 C80 高强混凝土和钢纤维高强混凝土(FRHSC)2 种材料情况下的结构力学行为。

1　试验材料及性能

为了对体外预应力高强混凝土连续梁进行较全面的研究,制定了几种条件下的对比试验的研究,其中包括:

(1) 其它条件相同时,体内有粘结预应力和体外预应力连续梁的比较。本文中仅对体外预应力连续梁的试验进行介绍。

(2) 采用不同预应力比率来研究不同数量的预应力钢筋和普通钢筋情况下的受力性能。

(3) 同时考虑采用 2 种混凝土配置形式:全梁采用 HSC 与支座负弯矩区采用 FRHSC,其它部位用 HSC。目的是在使用荷载作用下实现跨中为部分预应力混凝土 PPC B 类截面,支座负弯矩区为 PPC A 类截面,以利于试验研究成果在结构及桥梁中的应用。

混凝土用材料如下:

(1) 水泥:四川江油双马牌旋窑 525 普通硅酸盐水泥,指标合格;

(2) 砂:普通河砂,细度模数 2.25,属 II 区中砂;

(3) 石子:5～20 mm 石灰岩碎石,连续粒级,级配合格;

(4) 外加剂:北京产 JYB - 5 泵送复合型减水剂;

(5) 钢纤维:上海哈瑞克斯金属制品有限公司生产的 HAREX SF01 - 32 铣削型钢纤维,外形尺寸:长度为 32 ±1 mm;宽度为 1.4～3.8 mm;厚度为 0.4 ±0.05 mm;抗拉强度 > 700 MPa;长径比为1∶40。

测试用钢筋和钢绞线的取样与模型梁用料同时取样,两种受力钢筋分别为 <= 16 mm 和 <= 10 mm 的 II 级变形钢筋;钢绞线规格为 7<5.0。经过测试,钢筋和钢绞线的力学性能见表 1。由于试验梁不能发生抗剪破坏,通过计算,选用箍筋和构造筋的规格分别为 d = 12 mm 和 d = 6.5 mm 的 I 级钢筋,相应的强度指标按规范取值。

表 1　钢材的力学性能

性能	<16 钢筋	<10 钢筋	7<5.0 钢绞线
屈服强度 σ_y/ MPa	419.2	401.1	-
极限强度 σ_u/ MPa	572.4	561.5	1866.0
模性模量 E/ MPa	1.92×10^5	1.92×10^5	1.94×10^5

试验用配比见表 2,其中 C, W, S, G, J 分别表示水泥、水、砂、石子、外加剂的份数。FRHSC 组配比的钢纤维体积含量为 0.75 %。

表 2　最终合格试验配比

编号	C∶W∶S∶G∶J	钢纤维掺量/ (kg·m^{-3})	单位水泥用量/ (kg·m^{-3})	坍落度
HSC	1∶0.33∶0.93∶2.22∶0.025	0	540	自找平
FRHSC	1∶0.33∶0.93∶2.22∶0.025	60	540	自找平

为了获取实际成型的 HSC 连续梁的强度及相应施工配比的强度,测试了标准养护和自然养护条件下的强度指标,相应的各性能指标见表 3。

从结果可以看出,由于养护的不同,成型的连续梁混凝土强度值比 C80 预期的低,这在进行受力分析时应该引起注意。在连续梁结构测试时,测试了所用混凝土相同龄期(101 d)的静力抗压弹性模量,测得两种混凝土的弹性模量见表 3。

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

表 3 实测的混凝土强度指标 MPa

编号	28 d 标准养护		69 d 标准养护	28 d 自然养护	95 d 自然养护		101 d 抗压弹模
	抗压强度	劈拉强度	抗压强度	抗压强度	抗压强度	劈拉强度	
HSC	80.6	4.86	88.2	77.1	82.65	4.71	3.79×10^4
FRHSC	83.0	5.52	98.8	77.3	89.62	5.41	3.92×10^4

2 模型梁的设计与制备

2.1 连续梁的设计

由于试验主要目的是分析梁在体外预应力作用下的抗弯性能、截面的应力应变和梁体的变形等性能,为此,在设计时要求梁体只能出现抗弯破坏,不能出现抗剪破坏,以抓住重点进行研究。

模型梁的设计条件包括:(a)试验所用材料;(b)在使用荷载作用下要达到支座负弯矩区截面实现 PPC B 类和跨中为 PPC A 类截面的要求;(c)需要与体内有粘结预应力进行对比;(d)实验室加载设备的加载范围。这些要求使得设计荷载为 200 kN 左右时,当采用钢绞线作为预应力筋,应采用梁体两侧对称配筋,只能取每侧一根 $7\phi5.0$ 钢绞线。根据这些已有条件和约束因素,需要通过试算和调整来选择截面尺寸及跨度。另一方面,为了使试验梁能反映常用的连续梁的受力特性,且常用连续梁多采用变截面,最后设计的连续梁为两跨 T 形变截面梁,净跨长为 2.9 m + 2.9 m,模型试验梁的尺寸参见图 1,等截面部分高 300 mm,中支座截面高 450 mm,翼缘宽 500 mm,高 80 mm,腹板宽 150 mm。跨中的中支座截面主要配筋见表 4。由于对体外预应力的研究较少,在设计过程中,对截面应力的验算和极限承载力计算,均参考现有部分预应力理论和无粘结预应力理论[4,5]进行。其中极限承载力计算时,除体外预应力筋外,采用平截面假定。体外预应力筋极限应力采用 0.9 倍的设计强度[6]。

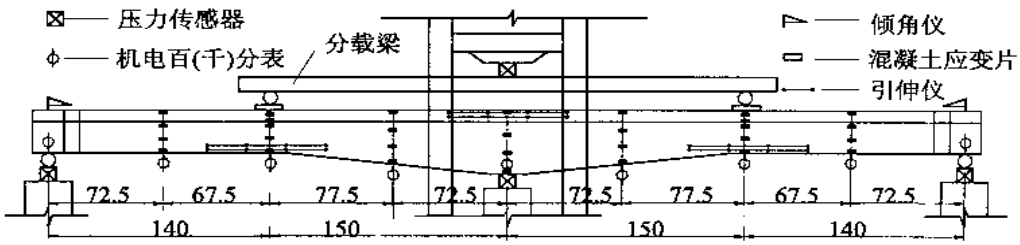


图 1 加载方案及测点布置示意图

表 4 各试验梁的钢筋设置

梁编号	EPC079		EPC091		EPC100		ECP100	
预应力比率	0.79		0.91		1.00		1.00	
截面位置	跨中	中支座	跨中	中支座	跨中	中支座	跨中	中支座
直径/ mm	16	16	10	10	-	-	-	-
数量/ 根	2	2	2	2	-	-	-	-

体外预应力高强混凝土连续梁的试验采用 2 种混凝土和 3 种预应力比率值,预应力比率分别为 0.79,0.91,1.00时中支座负弯矩区采用 FRHSC,其余为 HSC;预应力比率为 1.00 时,梁全长采用 HSC。

由于模型梁截面尺寸较小,不宜采用增设肋截面或加大截面来设置体外预应力筋的转向,此处采用局部应力集中对结构性能影响较小的预埋钢销的办法实现转向,试验结果也证明,这一方法对减少改变截面引起分析的复杂性是有效的。

2.2 连续梁的成型与张拉

在按设计要求支好钢筋网后,在水平地面用钢模和木模按设计尺寸组合,利用所配制的 HSC 和 FRHSC 配比同时成型 4 片梁。其中钢销转向装置部位采用预埋塑料管,待混凝土硬化后,将加工好的钢销替换塑料管。

当混凝土梁养护到 64 d 时,进行钢绞线的安置和施加预应力。钢绞线的张拉采用一端锚固,一端张

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

拉。张拉前,在每根钢绞线的一端预设传感器,以监控施加的预应力大小和判别预应力损失,张拉同时记录了各关键截面的反拱与沉降。预加力采用分级施加,张拉控制应力 σ_K 为 0.75 R_y^b(R_y^b 为钢绞线强度标准值),并按 0.02 %σ_K 进行超张拉,以弥补预应力的部分损失。

3　体外预应力连续梁的静力测试

3.1　加载方案

由于试验梁是先张拉后吊装,梁端支座变形不受约束,因此试验前通过对支座内力的调整,可避免对二次内力的考虑,即在加载前,按弹性静力计算出连续梁的各支座受力,然后在试验梁吊装就位后,通过施加一定荷载,利用梁两端支座预置的螺杆式刚性垫板,将支座反力调整到计算的受力大小,因此在各支座预设了传感器。在进行测试时,通过记录两端支座和中支座预设的传感器的反力,来获取连续梁的内力重分布的变化情况。

试验利用钢分载梁对连续梁进行相对中支座的两点对称加载。根据试验目的,在两端支座截面布置了倾角仪,以观察两跨绕支座转动能力;分别在跨中和中支座布置了手持式引伸仪测点,以用于记录混凝土开裂后的变形及平均裂缝宽度;在 1/4 处、3/4 处、中支座及加载点截面处沿梁高及底面(加载点)和顶面(中支座)均布置混凝土应变片,以分析各截面混凝土应力分布;在对应混凝土应变片截面布置有机电百分表(支座处为千分表),用来分析梁的整体变形和挠度变化规律;另有钢绞线端部的压力传感器,用以记录受力过程中,钢绞线的应力增量。加载方案和各测点布置如图 1 所示。

3.2　静力测试结果

弹性计算结果与试验测试结果进行比较并列于表 5,表中的各荷载是相对于分载梁一端的集中荷载,对应于试验机则为表中荷载的 2 倍。由于成型梁的差异、支座调整的精确性,以及加载过程中其它不可排除的因素,使得梁 ECP100 存在 3 个开裂荷载,即两跨中的开裂荷载不同。通过对试验结果比较,发现两者相差较小,故取其跨中的开裂荷载为两跨开裂荷载的平均值。

表 5　设计结果与测试结果对比表　　kN

梁编号	ECP100		EPC100		EPC091		EPC079	
截面位置	跨中	中支座	跨中	中支座	跨中	中支座	跨中	中支座
弹性开裂荷载	113.6	109.4	113.6	124.5	115.6	125.5	118.7	127.0
实测开裂荷载	134.35	155.3	140.6	170.6	120.6	175.6	130.6	175.6
弹性极限荷载	248.2	209.8	248.2	209.8	284.6	234.5	340.9	272
实测极限荷载	263.1		274.6		306.6		395.6	

试验过程中,在加载至接近极限破坏时,出现锚具打滑,从而降低了预应力。对未打滑的梁,达到加载最后阶段时,由于梁跨中截面出现约 2 cm 贯通裂缝,使得此时的荷载全由钢绞线承担,为了保证试验安全,无法将钢绞线完全破坏,因而实际的极限荷载,应根据试验现象和理论分析在所得的最大荷载之前提取,此处的极限荷载值则是实测最大加载值。

在测得最大加载值后,卸载时,连续梁由加载时的极限变形,立即恢复到相对平顺的状态。表明钢绞线和混凝土的共同作用,使得连续梁形成在一定角度可以转动的带铰连续梁。可以推断,如果不是 HSC 的作用,该铰部位的混凝土会被压碎;如果仅采用 HSC,普通钢筋会出现拉断破坏。而且截面严重开裂导致的大变形,使得预应力筋应力增量明显增大,相应截面抗弯强度较理论值偏高,与体外预应力截面抗弯强度低于有粘结预应力的结论不符。

对裂缝的记录中可以看到,混凝土裂缝分布规律与部分预应力十分相似,即随预应力比率值的增大,裂缝数量不断减少,当预应力比率为 1.00 时,每个截面仅一条宽裂缝和与之很近之处的少量微裂缝。

无论从有无钢纤维混凝土的中支座截面的开裂荷载来看,还是从开裂截面裂缝分布来比较,FRHSC 的作用和效果是存在的,但并不明显。当 HSC 中无钢纤维时,仅在中支座最大负弯矩截面附近出现裂缝,而且该裂缝一旦出现,立即贯通整个截面。此时即使立即卸载,也无法使裂缝闭合。而对 FRHSC,则裂缝出现的截面位置发生改变,裂缝数量和宽度,以及裂缝的发展速度都在不同程度上得到减少。

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

中支座两种不同混凝土,有一个共同点,即截面出现裂缝时通常不象跨中截面最初出现裂纹阶段那样裂缝延伸较慢,而是迅速沿梁高度方向扩展。虽然钢纤维限制了裂缝向支座部位的延伸,使得采用 FRHSC 的中支座开裂截面能在一定范围内卸载后闭合,但这一现象说明,将中支座截面设计成 PPC B 类十分不利。

4 结 论

(1) 在设计时,充分考虑对中支座负弯矩区为 PPC B 类的影响因素,可实现对跨中 A 类,支座负弯矩 B 类的效果。对全长采用 HSC 的连续梁,跨中和中支座负弯矩的开裂荷载相近;当采用钢纤维混凝土在负弯矩区加强时,相应的跨中开裂荷载降低,而中支座负弯矩区开裂荷载增大,表明采用钢纤维来提高负弯矩区的开裂荷载是有效的。

(2) 中支座处裂缝的出现十分突然,裂缝的发展也相当迅速。当无钢纤维的增强作用时,裂缝一旦开裂,迅速贯通顶面并向底部延伸,且无法闭合;利用钢纤维增强可在一定程度上限制裂缝发展和卸载后使裂缝闭合。从裂缝的扩展来看,对中支座实行 PPC A 类设计是必要的。

(3) 不同预应力比率条件下,裂缝的分布规律与已有部分预应力结果相似。当普通钢筋较少,即预应力比率较大时,裂缝较少,且发展迅速;当普通钢筋较多时,裂缝较为分散,且裂缝宽度较小,这表明普通钢筋对分散裂缝和限制裂缝的发展是有利的。

(4) 由于混凝土的高强度导致截面严重开裂,使得体外预应力筋的应力在计入增量后接近极限强度,因而实测极限抗弯强度与理论值不一致。

参考文献:

[1] 陈肇元,朱金铨,吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992: 4220.
[2] 程庆国,高路彬,徐蕴贤,吴淑华. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1999: 127.
[3] 王旭光. 体外预应力混凝土连续梁的受力分析[D]. 硕士学位论文. 西南交通大学,1998.
[4] 肖长礼. 后张无粘结部分预应力混凝土公路桥[M]. 北京:人民交通出版社,1999: 962116.
[5] 房贞政. 无粘结与部分预应力结构[M]. 北京:人民交通出版社,1999: 1042119.
[6] 郑文忠. 后张预应力混凝土平板柱结构设计与工程实例[M]. 黑龙江科学技术出版社,1999: 124.

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