

高效预应力高强混凝土在桥梁工程中的应用

张习贤 赵顺波 王健 王用中

摘要 高强混凝土的应用是桥梁工程领域中引人注目的课题。本文介绍了桥面空心板梁采用高强混凝土和高均匀延伸率优质钢绞线后所作的断面形式与尺寸、结构延性构造措施等方面的优化结果,以及由此获得的技术经济效益。通过16m跨原型试验板的破坏试验验证了各项结构受力性能指标均满足设计要求。从而得到了断面新颖、经济效益优良的高效预应力高强度混凝土空心板梁。该研究成果可推广应用于其它桥梁结构。

关键词 高强混凝土 高均匀延伸率钢绞线 结构延性

我国工程结构安全贮备总体低于发达国家,但结构材料用量并不少,究其原因发达国家多藉高强、高效材料来提高结构安全贮备,而我国无论是结构用钢材或是混凝土其总体强度水平均低于发达国家,因此建设部最近提出的钢筋混凝土结构设计规范讨论稿中将混凝土强度等级提高到C80(相当于桥梁规范混凝土标号80号,为统一起见,下述均采用强度等级),并安排了HRB500级钢筋应用研究,试图在这一方面缩短我们与发达国家的差距。围绕这一规范,意图于桥梁工程中开展高效预应力高强混凝土应用研究,我们做了些工作,现概括介绍如下。

一、高强混凝土的研究与应用现状

随着近20年来混凝土材料科学研究的深入发展,采用常规的水泥和砂石作原材料、使用常规的制作工艺、主要依靠外加高效减水剂或同时外加一定数量的活性矿物材料、使拌合料具有良好的工作度、并在硬化后具有高强性能的水泥混凝土,在我国已发展成为比较成熟的技术。高强混凝土应用于桥梁结构,对有效地降低结构自重和结构高度、增大结构刚度和桥梁跨度、增加结构耐久性并降低维修费用起到了重要作用,但我国桥梁工程混凝土强度等级一般在C50~C60之间。

相对而言,高强混凝土在城市建筑结构中则得到了比较广泛的应用,据统计有数十座高层建筑采用了C60~C80高强混凝土,混凝土强度等级最高达到90MPa,这些工程经验为在桥梁结构中进一步提高混凝土强度等级提供了有益的参考^[1,2]。

高强混凝土的重要特点是耐久、强度高、变形小,能适应现代工程结构向大跨、重载、高耸发展和承受恶劣环境条件的需要。用高效减水剂配制的高强混凝土一般具有坍落度大和早强的性能,因而便于浇注和加快模板周转速度。

高强混凝土的抗压强度很高,应用于钢筋混凝土受弯构件能够带来很大好处。尽管提高混凝土强度并不能明显增加构件的抗弯能力,但是它能降低受弯构件截面的压区混凝土高度,故能提高构件的延性,允许有较高的配筋率,进而通过提高配筋率来增加构件的抗弯能力或降低构件的截面高度。高强混凝土还由于弹性模量较大,可以提高构件的刚度。预应力混凝土构件则能从高强混凝土获得三重好处:可以施加更大的预应力,可以更早地施加预应力以及因徐变较小而导致较低的预应力损失。配置适量受压钢筋的高强混凝土与高均匀延伸率优质预应力钢材组成的高效预应力高强混凝土,可兼顾两种材料优点,提高结构延

张习贤 焦作市公路局 高级工程师

赵顺波 华北水利水电学院 教授

王健 河南省交通规划勘察设计院 高级工程师

王用中 河南海威工程咨询有限公司 国家级设计大师

性,取得更佳结构效果。

对于结构物来说,减小截面尺寸意味着降低结构自重。对结构自重占全部荷载比例很大的大跨度公路桥梁,应用高强混凝土就有着特殊的意义,并且能减轻地基基础的负担。

高强混凝土材料致密坚硬,抗渗抗冻性能均优于普通强度混凝土,所以在露天的、遭海水侵蚀的、受高速流体冲刷的、或易遭碰撞损害的工程构筑物中具有广泛的应用前景。

国内外部分桥梁采用高强混凝土的工程实例有:

美国,1984年建成的从西弗吉尼亚至俄亥俄的 East Huntington 公路桥,包括一个主跨为 274m 的不对称斜拉梁结构,混凝土强度相当于 C65;而后在华盛顿州跨越 Turtle 河的一座预应力混凝土公路桥(Tower Road),大梁高 1.5m,主跨 49m,总长 86m,采用强度接近于 C75 的混凝土和连续后张施加预应力,使桥梁大梁结构的跨度比达到了 30:1 的程度。路易斯安娜州对美国 AASHTO 先张法标准截面预制公路桥梁采用高强混凝土进行过对比分析(在同样荷载下),结论为:(1)高强混凝土可增大梁的跨度。当强度等级由 C40 提高到 C70 时,IV 型梁(梁高 1.37m,间距 2.4m)的跨度可由 31.7m 增加到 39.9m。(2)高强混凝土可增大梁的间距。当强度等级由 C40 增加到 C55 时,对 30.5m 跨的梁,截面高度可由 1.37m 降到 1.016m,亦即包括 0.2m 现浇桥面板在内梁的跨高比可做到 25。梁高低了,有利于桥墩、支座、引桥造价的降低。

日本,1965 年能生产 80MPa 混凝土桩,在预应力桥梁上采用 60~80MPa 高强混凝土;1970 年建成 Kaminoshima 公路桥,最大跨度 86m,用了 C70 级混凝土;1974 年建成 Fukaimitsu 公路桥,跨度 26m,用了 C80 级混凝土;1976 年建成 Akkagawa 铁路桥,跨度 46m,用了 C90 级混凝土。

我国现代高强混凝土的研究和应用始于 80 年代,期间建造的湘江铁路红水河大桥、广东东莞中堂大桥、广东洛溪大桥、天津西青道立交桥均采用了 C60~C65 混凝土。1992 年,河南三门峡黄河公路大桥用了 C60 混凝土,实测已达 C70。1995 年万县长江大桥采用了 C60 混凝土。现上海、广东等地已在桥梁中多次采用 C80 混凝土,至今上海、北京已能供应 C80 预拌商品混凝土。

二、高效预应力高强混凝土桥面空心板优化

设计

预应力混凝土空心板桥上部结构具有建筑高度低、预制施工简单、易实现标准化和工厂化施工、产品质量可靠、造价低、施工吊装设备容易解决等优点,是公路桥梁工程中被广泛采用的一种结构形式。预应力混凝土空心板桥常用跨径在 16~30m,板厚为 0.70m~1.20m,板宽为 1.0m 和 1.5m,混凝土强度等级多采用 C30~C40。我们对高效预应力 C80 混凝土空心桥面板的设计与受力性能作了较深入研究,以期推动高强混凝土在公路桥梁中的应用。

1. 截面选型

常见的空心板截面形式有:①大孔板,小棱形企口,这种板具有挖空率大,重量轻等优点,但芯模制作复杂且顶板必须配置横向受力钢筋以承担车轮荷载;②圆孔板,葫芦形企口,这种板具有芯模制作简单、能适应不同板厚的空心板等优点,但挖空率小、自重较大、经济效益低。针对公路桥梁工程中预应力混凝土桥面空心板常见的几种开孔形式的优缺点,本文提出了一种新型的双拱门式空心板,如图 1 所示。为比较双拱门式空心板与常见空心板的截面属性,本文选取板高均为 0.65m,板宽为 1.2m 的 16m 跨径预应力混凝土双拱门式空心板、圆孔空心板、大孔空心板进行比较,它们的截面属性如表 1 所示。

桥面空心板的截面属性 表 1

空心板类型	截面面积(cm^2)	挖空率	每米板重(t)
双拱门式板	3512	53.50%	0.88
圆孔板	4077	45.98%	1.02
大孔板	2905	61.44	0.73

为比较上述三种空心板截面的横向受力性能,采用 SAP93 通用有限元分析软件,对 16m 跨简支空心板进行了在汽车-超 20 级重车车轮荷载作用下的三维有限元线弹性分析。图 1 为双拱

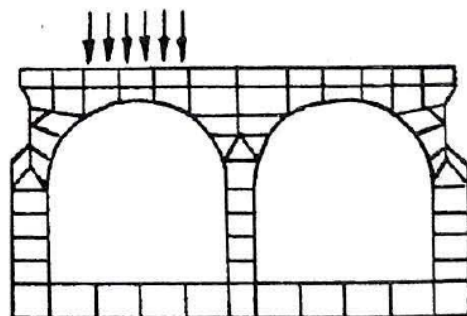


图 1 双拱门式空心板有限元网格划分

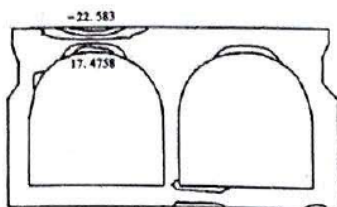


图2 拱门式板横向应力等值线图

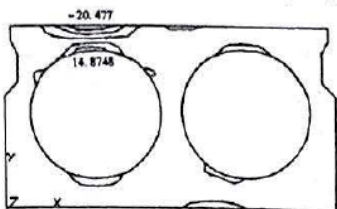


图3 圆孔板横向应力等值线图

门式空心板的横向有限元网格划分,一个重车轮重为70kN,按均布荷载计算,均布荷载的作用面积为30cm×20cm。

在重车轮荷载作用截面处,以上三种截面形式的空心板横向应力等值线如图2~图4所示(应力单位:0.1MPa)。从图2、图3可以看出,双拱门式空心板和圆孔空心板的横向应力差别很小,同样无需横向受力筋,但双拱门式空心板的挖空率高,自重轻,恒载小,有利于节省纵向钢筋。从图2、图4可以看出,双拱门式空心板与大孔空心板相比,虽然大孔空心板的挖空率高一些,自重轻,但其横向应力与双拱门式空心板比大很多,因此大孔空心板横向必须要有受力钢筋。综合考虑后,设计选用了双拱门式空心板截面形式。

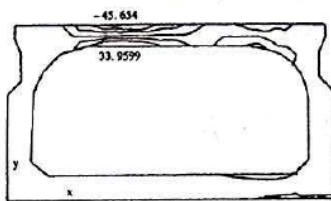


图4 大孔板横向应力等值线图

2. 桥面板宽度选择

实际工程中,预应力混凝土空心桥面板宽常见为1.0m和1.5m。为比较不同板宽空心板的横向受力性能,本文计算了板宽为1.0m、1.5m,跨径为16m的双拱门式空心板,在重车轮荷载作用下的弹性有限元分析,板横向应力等值线图如图5、图6所示。从图2、图5、图6可看出,双拱门式空心板的板宽变化对横向应力影响很小。

按《公路桥梁设计手册——梁桥》(以下简称手册)对幅宽12m,桥长为16m的双拱门式空心板桥,计算了当板宽为1.0m、1.2m、1.5m时计算刚度参数 γ 和各板横向分布影响线坐标值,2号

板的横向分布系数、横向分布系数与截面抗弯惯性矩之比如表2所示。可见,对于相同高度的桥面空心板,板宽越大,计算刚度参数 γ 越大。荷载的横向分布系数越大,横向各板受力的均匀性、协调性能越好,折合每米板宽横向分布系数愈小。考虑到实际公路桥梁工程施工中吊车的起吊能力,常见的16m预应力混凝土桥面空心板宽度取1.0m。对于双拱门式桥面空心板,考虑板宽符合公路工程中的模数要求及吊车起吊重量的限制,16m预应力混凝土桥面空心板的板宽取为1.2m。

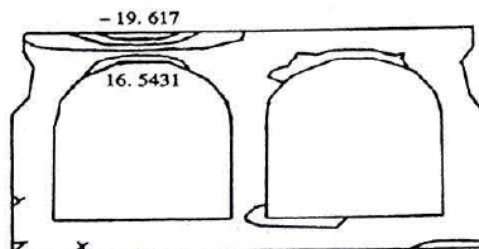


图5 双拱门式板(板宽1.0m)横向应力等值线图

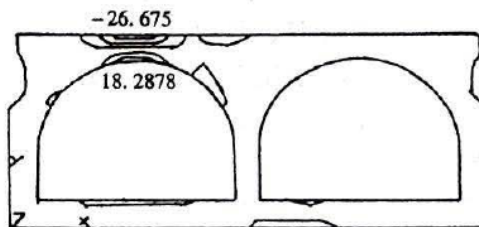


图6 双拱门式板(板宽1.5m)横向应力等值线图

板宽不同时截面性能 表2

双拱门式板	板宽1.0m	板宽1.2m	板宽1.5m
截面面积(cm ²)	3013.9	3512.3	4374.0
挖空率	51.96%	53.50%	53.98%
每米板重(t)	0.75	0.88	1.09
计算刚度参数 γ	0.0129	0.0170	0.0244
横向分布系数(2号板)	0.230	0.271	0.334
每米板宽横向分布系数(2号板)	0.230	0.226	0.223
横向分布系数与截面抗弯惯性矩之比	14.13	13.84	13.60

3. 配筋计算和延性设计

设计依据《高强混凝土结构设计指南》(HSCC93-1)进行^[4]。按先张法施工,采用ASTM416-90a270级预应力钢绞线作预应力筋,按标准要求,标距610mm时延伸率大于3.5%。为满足设计延性要求,采购时对厂方提出标距610mm时延伸率大于5.5%之要求。美国公路桥梁设计规范特别强调了通过超静性延性等结构性能来保证结构安全的概念^[11]。

结构件及其连续的延性定义为 $\mu_f = \Delta u / \Delta y$,式中 Δu 为极限变形, Δy 为相应于弹性极限的变形,构件或连接件超过弹性极限的反应可能

表现为脆性或延性,脆性意味着当超过弹性极限时立即丧失承载能力,而延性则意味着在发生任何承载能力丧失之前,呈现出较大的非弹性变形。较大的非弹性变形可为结构的失效提供警告信号。在地震荷载反复作用下,大的非弹性变形可消散能量,降低地震效应。关于混凝土结构的延性,以往常为结构工程师们忽视,他们只在抗震设计中关注结构延性问题。而事实上实际结构的延性与结构的可靠度是紧密相关的,美国公路桥梁设计规范特别说明“为保证得到延性破坏模式,业主可以假定一个最小的延性系数。”该规范提到的结构超静性,亦是要用结构的延性作保证或前提的^[11]。根据超静定结构的可靠度分析,同一结构因延性或脆性的不同,其可靠度有十倍、几十倍之差,因此,作为一个结构工程师,应关注结构延性设计的概念与方法的发展问题。

影响钢筋混凝土结构的延性的因素主要是混凝土强度与配筋率。对钢筋混凝土受弯构件,箍筋和受压钢筋的配置也是决定其延性的重要因素。传统的看法认为预应力混凝土构件的延性比钢筋混凝土构件的延性小,这是因为在加载过程中,预应力混凝土构件中混凝土的受压破坏以及预应力钢材的拉断都比钢筋混凝土结构要早些。解决预应力混凝土构件这一弱点的有效措施是采用高均匀延伸率预应力钢材和有侧限约束的混凝土。

基于上述概念,在此次预应力空心桥面板的设计中,充分注意了混凝土强度配筋率、受压钢筋配置、箍筋设计和预应力钢材延性诸问题,从设计上保证了构件的延性。

4. 经济分析评价

为了便于说明经优化设计的高效预应力高强混凝土桥面空心板的经济性能,以某交通设计院正在使用的普通预应力混凝土桥面空心板为基准,按全幅高速公路单孔进行了材料用量比较,其中材料费用预算单价:C40混凝土400元/m³,C80混凝土500元/m³;普通预应力钢绞线5000元/t,本研究采用的高均匀延伸率钢绞线6000元/t,普通钢筋2350元/t。

由表3可见,本研究提出的高效预应力高强混凝土桥面空心板较常规普通预应力桥面空心板可节省混凝土35%以上,30m跨时可节省55%之多;可节省钢绞线15%以上,16m跨时可节省65%之多。在16~30m跨范围内,仅材料费用一

项便可节约投资20%以上。当桥下净高一定时,还可由空心板结构高度降低而减少路基土方量,带来相应的投资减少。由此可见,对于公路桥梁工程中大量使用的空心板进行必要的优化设计,其经济效益将是十分可观的。对于大跨度连续梁、连续刚构桥,因结构自重占其设计内力的85%~95%,应用高强混凝土减轻结构自重效益将更大,而应用高效预应力高强混凝土提高结构延性,若考虑结构塑性内力再分配,可大幅度提高结构极限承载力和结构可靠度。

高效预应力高强混凝土桥面空心板与
普通预应力混凝土桥面空心板材料用量对比表 表3

跨 度(m)	16		20		30	
混凝土标号(mm)	40	80	40	80	40	80
钢绞线(kg)	6371	3869	9683	7479	17294	15160
普通钢筋(kg)	11983	10026	14741	13159	31186	20093
预制构件混凝土(m ³)	153.6	112.0	192.1	140.1	406.6	262.8
封头混凝土(m ³)	1.5	1.25	1.50	1.25	3.00	1.92
接缝混凝土(m ³)	5.5	6.20	7.0	8.5	13.6	12.7
梁高(cm)	75	65	75	65	120	100
预制构件质量(t)	16.1	14.4	20.4	18.2	43.0	33.7
预制构件混凝土体积比	1.37	1.00	1.37	1.00	1.55	1.00
钢绞线用量比	1.65	1.00	1.29	1.00	1.14	1.00
材料费用(万元)	12.15	10.28	15.99	13.18	32.24	26.96
材料费用比	1.18	1.00	1.21	1.00	1.20	1.00

我国规划建设国道主干线高速公路总长3.5万公里,已建1万公里,待建2.5万公里。初步估计若在待建的2.5万公里高速公路工程中应用此项技术,可节省投资5亿以上。同时,采用高效预应力高强混凝土,因混凝土和钢材用量均有减少,对保护自然资源,减少环境污染,都是十分有益的。若能在实际工程中推广应用高效预应力高强混凝土,社会经济效益十分可观。

三、高效预应力高强混凝土桥面空心板试验研究

1. 试验概况

预应力空心板梁长度为15.96m,跨度为15.5m,宽度为1.19m,高度为0.65m,按汽车一超20级和挂车—120活荷载设计,中板的横断面形状和尺寸如图7所示。

试验板纵向配置7φ5高均匀延伸率低松弛270级钢绞线作预应力钢筋,单根公称面积 $A_p = 140\text{mm}^2$,实测其1%伸长荷载和破断拉力分别为247.1kN和272.1kN,伸长率 $\delta = 5.5\%$ 。纵向和横向的普通钢筋均采用I级热轧钢筋,直径为φ16、φ12、φ10和φ8四种。

根据设计计算和有限元分析结果,如图8所示,拟定沿板梁纵向4点、横向2点加载方案。在

实验室内 2m 宽的槽道上竖立反力架架设长度为 9.6m 的反力钢梁,其下依次设荷载传感器、千斤顶、钢分配梁,钢分配梁简支于试验板梁顶面沿横向布置的 2 个加载钢垫板(其平面尺寸相当于车轮的着地尺寸)上。荷载的施加以板梁跨中截面、1/4 跨截面、1/8 跨截面和支座截面的设计计算控制弯矩和剪力为参照,待完成检验各截面能承受的控制弯矩和剪力后,以跨中弯矩等增量施加荷载至试验板梁达到极限承载力。

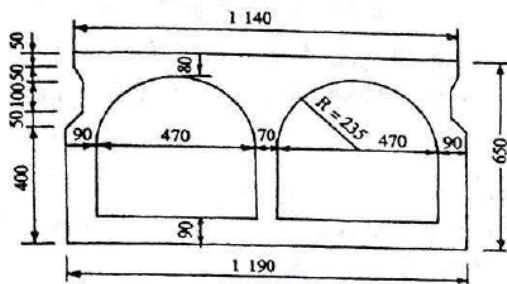


图7 试验板横截面(尺寸单位:mm)

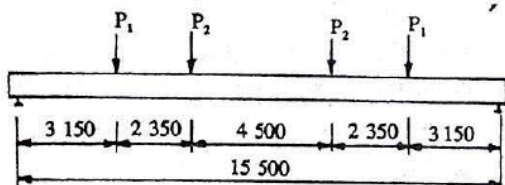


图8 试验板加载点位置(尺寸单位:mm)

2. 试验板承载性能测试成果分析

(1) 试验板在正常使用荷载作用下的受力性能

加载至第 6 级时试验板跨中弯矩为 598.0kNm,达到正常使用极限状态的弯矩理论计算值 584.5kNm,该级荷载作用下试验板正截面板顶混凝土压应力、板底混凝土拉应力测试值分别为 13.9MPa 和 2.95MPa,设计值分别为 10.2MPa 和 2.75MPa,跨中挠度测试值和设计值

分别为 8.5mm 和 13.8mm。结合裂缝观测、跨中截面受压混凝土和受拉混凝土的跨中弯矩~应变关系曲线以及跨中弯矩~挠度关系曲线,可以判定在加载至第 10 级时,试验板跨中区段出现裂缝,相应的跨中弯矩为 893.0kNm。不计自重时,试验板正截面开裂弯矩与正常使用荷载作用产生的弯矩之比为 $893.0/584.5 = 1.53$ 。

由此可见,试验板的正常使用性能完全满足设计要求。

(2) 裂缝分布形态和裂缝宽度

试验板两侧面的裂缝分布和各级荷载作用下裂缝宽度如图 9 所示。当加载到 11 级荷载时,用 20 倍读数显微镜观测到在板跨中纯弯段的两侧分别出现了 6 条和 8 条垂直裂缝,裂缝宽度在 0.04~0.07mm。至 13 级荷载时,试验板两侧的裂缝数目分别增加到 18 条,裂缝分布基本均匀对称,裂缝间平均值为 294mm,最大裂缝宽度为 0.28mm。此时卸载为零,裂缝能够闭合至宽度 0.05mm 以内,在随后的荷载作用下,裂缝数目不再增加,但裂缝宽度增大。14 级荷载以后,裂缝沿高度方向的发展十分缓慢,仅当加载至 18 级接近极限承载时,跨中的几条裂缝才突然上升并分叉。试验结束后卸载为零,最大裂缝宽度仍可由 3.5mm 闭合至 0.15mm,表明试验板具有良好的变形回复和裂缝闭合性能。从整体上看,试验板的裂缝发展与有粘结部分预应力梁的适筋破坏形态非常一致。试验板上裂缝的均匀分布为板底预应力钢绞线在跨中区段内多截面的均匀受力提供了条件,从而有利于钢绞线在多个截面产生塑性变形,增加了试验板的变形能力。

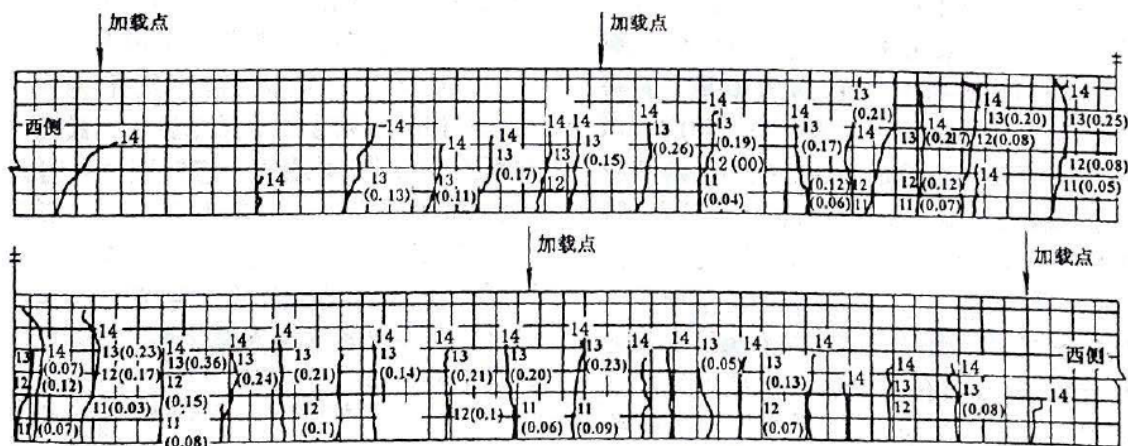


图9 试验板裂缝分布图

(注:图中括号外数字表示荷载级数,括号内数字表示该级裂缝宽度,单位:mm)

(3) 跨中挠度和挠度曲线

图10为试验板的跨中弯矩与挠度关系曲线,图中的变形值均未扣除预应力作用的反拱值。可见,试验板的变形随荷载的增加表现出明显的三个阶段:第一阶段为弹性阶段,试验板的变形随荷载的增加而线性增大,板的抗弯刚度不变。第二阶段为弹塑性阶段,试验板的变形随荷载的增加呈非线性增大,板的抗弯刚度因裂缝的产生和发展而逐渐降低,第一阶段和第二阶段之间有明显的转折点,是为板正截面的开裂点。第三阶段为塑性阶段,试验板承受的荷载基本不变而变形增加,表现出良好的持荷变形能力,第二阶段和第三阶段之间也有明显的转折点,是为板正截面的极限承载点。

本次试验在板的跨中挠度达到413mm时,因加载千斤顶再次达到最大行程而停止。此时试验板仍能承受最大荷载,没有发生受压区混凝土压碎和受拉钢筋或预应力钢绞线被拉断的现象,卸载回零后,试验板回弹至残余挠度为110mm。

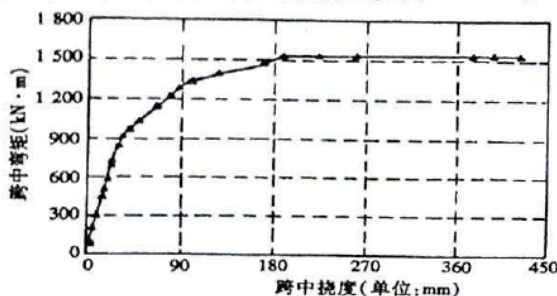


图10 试验板跨中弯矩—挠度曲线

(4) 空心板的延性分析

按照延性系数的定义,首先确定试验板的极限变形和屈服变形。由于本试验在加载到最后一级时,板仍能承受第19级的最大荷载,因而可以确定其极限变形(跨中挠度)大于425mm。对于试验板的屈服变形,采用钢绞线达到1%伸长荷载247.1kN时对应的跨中挠度,由图10试验板跨中弯矩—挠度曲线和跨中截面弯矩与预应力钢绞线应变的关系曲线以及钢绞线的拉力与实测应变的关系曲线,可以确定试验板的屈服变形(跨中挠度)为95mm。由此确定的试验板挠度延性系数 $\mu_f > 4.47$ 。

根据粘贴在试验板侧表面的混凝土应变片的测试数据分析,空心板在达到极限承载力后的混凝土受压区高度为62mm,按文献^[2]给出的位移延性系数 μ_f 计算公式得到试验板的位移延性系

数 $\mu_f = 3.60$ 。

通过以上两种方法计算结果可见,本试验板的延性系数在3.0以上,完全满足延性受弯构件的延性设计要求。分板试验资料后试验板延性较大的重要原因是:

(1)采用高强混凝土后,降低了试验板受荷时的受压区高度,使得截面转动能力增大,从而增加了板的延性。根据文献^[2]的研究,高强混凝土达到极限强度时的应变值随混凝土强度的提高有增大的趋势,对板的延性提高提供了有利的材性条件。同时,试验板在受压区内配置了占受压混凝土截面面积0.66%的受压钢筋,能够协助混凝土承受压力并有利于混凝土在受压边缘达到极限变形后进行应力重分布,保证受压后混凝土塑性变形充分发挥。

(2)在混凝土受压变形能力一定的前提下,试验板的延性便取决于受拉钢筋的变形能力。试验板中配置了普通受拉钢筋,但配筋量较小,对延性的提高作用也是较小的。因此,关键问题便归结于钢绞线的变形能力。正是本研究采用了高均匀延伸率的钢绞线,保证了其达到极限强度后能够有足够的塑性变形来调整截面的受力状态。同时,混凝土与钢绞线的有效粘结,使得裂缝比较均匀的出现,为钢绞线多断面的塑性发展提供了有利条件。

利用高均匀延伸率优质钢绞线,提高高效预应力高强混凝土结构延性,是本次课题研究的主要内容。结构的延性、钢筋混凝土、预应力混凝土结构的延性已为有关专家重视,但仅针对抗震结构做了较多工作,其实,因延性结构破坏形态迥异于脆性结构,在同等安全度情况下,结构延性破坏较脆性破坏,造成的损失要少得多,对使用者的人身安全更有保障。对超静定结构因延性而导致结构内力重分布,按可靠度理论分析,对同一超静定结构延性破坏状态的失效率较脆性破坏状态的失效率要小得多(可达几十倍),因此从可靠度理论讲,高效预应力高强混凝土空心桥面板使用的安全性较现通用的类似构件要大。鉴于这方面研究尚属开始,关于结构延性分析,关于考虑结构延性的结构塑性分析的深入研究将是本课题进一步深入的重要内容。

(下转第57页)

右,比《无粘结预应力混凝土结构技术规程》背景资料经验公式计算值平均小30%。

3. 在使用荷载作用下,砼拉应力约为 0.84N/mm^2 ,在板底正弯矩区配置 $A_s = (0.001 - 0.0015)bh$ 非预应力普通钢筋,对控制板底裂缝宽度与分散裂缝起到了良好的作用,并有效地增加了板的延性。

4. 模型板的悬臂平板在竖向荷载作用下,表现为沿悬挑方向和垂直于悬挑方向双向受弯。在悬臂板顶面配置配筋率为0.2%的非预应力普通钢筋,为控制悬臂板裂缝开展和提高悬臂板承载力,起到了有效的作用。试验表明,悬臂长度为后张平板跨度的1/3,在试验平板保持使用荷载的条件下,悬臂平板的荷载可增至 32.0kN/m^2 ,为使用荷载的4倍,其挠度达到悬臂长度的1/24,未发生突然断裂。

本文限于篇幅省略部分图表。

致 谢

本试验是在中国建筑科学研究院结构所大型结构试验室进行的,翟斌、李丽萍、武江等工程师参加了本模型试验。在本论文研究过程中,还得到洪婉儿高级工程师、王逸、王霓工程师的许

多帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- (1) N. H. Burns and R. Hemakom. Test of Post - Tensioned Flat Plate with Bonded Tendons, Journal of the structural Division. ASCE, Vol. 111, No. 9, Sept. 1985.
- (2) G. M. Kosut, N. H. Burns and C. V. Winter, Test of a Four - Panel Post - Tensioned Flat Plate, Journal of the Structural Division. ASCE, Vol. 111, No. 9, Sept. 1985.
- (3) 陶学康、王逸、陈文义、刘之汉,无粘结部分预应力带状布束的九柱四板荷载试验建筑结构,1995年第7期。
- (4) 中华人民共和国国家标准,混凝土结构设计规范 GBJ10 - 89,1989年,北京。
- (5) 无粘结预应力混凝土结构技术规程背景资料,中国建筑科学研究院结构所技术资料,1991年9月。
- (6) ACI - ASCE Committee 423, Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons. ACI Structural Journal. May - June 1989.
- (7) ACI318 - 89. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1989.
- (8) 中华人民共和国国家标准,混凝土结构试验方法标准 GB 50152 - 92,1992年,北京。

(上接第52页)

参 考 文 献

- [1] 陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及应用. 土木工程学报, 1997(5): 3 ~ 11.
- [2] 陈肇元, 朱金铨, 吴佩刚. 高强混凝土及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [3] 郭佩玲, 陈翠红, 王元. C80 高强混凝土的研究与应用. 混凝土, 1997(6).
- [4] 中国土木工程学会高强混凝土委员会. 高强混凝土结构设计与施工指南. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [5] JTJ023 - 85. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范. 北京: 人民交通出版社, 1985.

- [6] 胡洲冠, 易绍华, 吴广林. C80 泵送混凝土的研制. 混凝土, 1998(5): 8 ~ 12.
- [7] 李家康, 王巍. 高强混凝土的几个基本力学指标. 工业建筑, 1997(8): 50 ~ 54.
- [8] 杜国华, 毛昌时, 司徒妙岭著. 桥梁结构分析. 上海: 同济大学出版社, 1994.
- [9] GB50152 - 92. 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [10] GB/T5224 - 1995. 预应力混凝土用钢绞线[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [11] 美国各州公路和运输工作者协会制订(齐济平等译). 美国公路桥梁设计规范. 北京: 人民交通出版社, 1995.