

# 432 m 活性粉末混凝土拱桥的设计

编译 陈昫明,陈宝春,吴炎海,黄卿维

(福州大学土木建筑工程学院,福建 福州 350002)

**摘要:**拟修建的巴卡尔桥为 432 m 跨径的拱桥,位于里耶卡到塞尼的高速公路上,横跨巴卡尔海峡。该桥几乎完全由强度达到 200 MPa 的活性粉末混凝土预制构件拼装组成。对该桥新颖的结构形式,施工工艺和富有美感的外形进行了描述与分析。

**关键词:**拱桥;活性粉末混凝土;桥梁设计

**中图分类号:** U448.38

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-7767(2005)01-0001-04

在 1997 年我国主跨 420 m 的重庆万洲长江大桥建成以前,世界上跨径最大的钢筋混凝土拱桥是建于 1980 年的克罗地亚(前南斯拉夫)的克尔克(Krk)1 号桥。克尔克大桥由 1 号桥(跨径 390 m)和 2 号桥(跨径 244 m)组成,总长 1 430 m。两座大桥通过中间的圣马克奥岛将克尔克岛(克罗地亚最大的岛)与克罗地亚大陆连在一起。两桥的主拱圈均为单箱三室截面,尺寸分别为 13 m × 6.5 m 和 8 m × 4 m。桥面结构由 3 片预应力混凝土连续梁和混凝土桥面板组成。主拱架采用悬臂拼装法。桥梁除承受车辆荷载外,还承受管线和供水系统的重量。

克罗地亚在修建大跨径拱桥方面具有相当好的技术优势与传统。早在 1966 年和 1967 年就修建了跨径分别达 246.4 m 和 193.2 m 的希贝尼克(Sibenik)桥和帕格(Pag)桥。最近又提出了修建巴卡尔(Bakar)桥的设计构思。巴卡尔桥在克尔克岛西北面的巴卡尔海湾,与克尔克相距不远。拟建的巴卡尔桥跨径达 432 m,将超过我国的重庆万洲长江大桥。在设计方案中,提出采用活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC),以减轻主拱圈自重的设想,并进行了施工方法研究和初步的计算。

## 1 活性粉末混凝土简介

活性粉末混凝土是一种超高强、高韧性、耐久性和体积稳定性良好的水泥基复合材料,它是由法国最大的营造公司之一布伊格公司在 1993 年率先研制成功的。其抗压强度可高达 200~800 MPa,且具有较高的延性。它由特殊水泥基材料组成,从这种材料的显微结构中可以看到,通过对骨料微粒(直径小于 0.8 mm)级配进行精确的优化,这些微粒混合

后的密度达到了最大值。除强度外,RPC 的出现还使混凝土的耐久性能有了很大的提高。这种混凝土同一般的高性能混凝土相比,其孔隙率低 4~5 倍,微孔率低 10~30 倍,透气性和吸水性低 50 倍,氯化物离子的扩散性低 25 倍。这些性能对于沿海桥梁的防腐具有重要的意义。

RPC 的配制原理是:材料的微裂缝和孔隙等缺陷越少,就可以获得由其组成材料所决定的最大承载能力,并具有良好的耐久性。其制备措施主要有以下 4 个方面:

(1) 除去普通混凝土中的碎石等粗骨料而用细砂代替,使集料粒径较均匀,同时使骨料与水化水泥浆弹模比下降,水泥砂浆的力学性能提高。此外,采用细骨料还能有效地淡化骨料与水泥浆体的界面过渡区。

(2) 优化颗粒级配,严格规定每种集料的粒径范围;应用流变学和优化相对密度理论来决定高效减水剂最佳掺量和需水量;优化搅拌工艺,使拌合物具有良好的流动性,更好地充盈模具;如能在其凝结前和凝结期间加压,可以使 RPC 中气体和自由水排出,消除部分由化学收缩引起的孔隙,从而进一步提高其密实度。

(3) 在 RPC 凝固后进行热养护可以大大改善其微观结构。采用 90 的热养护可显著加速火山灰反应,同时改善水化物形成的微观结构,此时形成的水化物仍是无定形的,只能用于制作 RPC200;若采用 250~400 的干热养护使水化生成物 C-S-H(水化硅酸钙)凝胶体大量脱水,形成硬硅钙石结晶,就可获得 RPC800。

(4) 掺入微钢纤维以提高 RPC 的韧性。所掺

收稿日期:2004-04-28

编者简介:陈昫明(1975-),男,讲师,1998年毕业于福州大学建筑工程专业,工学学士,2001年毕业于福州大学结构工程专业,工学硕士。

入的钢纤维长度约为 3~13 mm,直径约 0.15~0.20 mm,体积掺量为 1.5%~3%。掺入微钢纤维后,RPC 的抗压强度、弯折强度和韧性有较大幅度的提高。

RPC 出现后,很快就被应用于实际工程。1996~1997 年加拿大魁北克省建成了世界上第一座以 RPC 为材料的步行/自行车桥,该桥位于舍布鲁克市。此后,将 RPC 用于工字梁桥、箱梁桥的设想不断被提出来。而克罗地亚巴卡尔桥则提出了用 RPC 来建造拱桥以减轻主拱圈自重、方便施工的设置。

## 2 巴卡尔桥总体设计

为跨越巴卡尔海峡,巴卡尔桥选用 432 m 跨径的活性粉末混凝土拱桥方案(见图 1)。主拱圈的矢高  $f=72$  m,矢跨比  $f/l=1/6$ ,通航净空为 260 m × 50 m。拱轴线为复杂的 4 次抛物线,以使其由恒载产生的弯矩最小。桥面结构是一个总长 820.0 m 的 22 跨连续箱梁(30.0 m + 20 × 38.0 m + 30.0 m)。截面形式为单箱三室、外形符合空气动力学特性的等截面箱形。主拱圈也是单箱三室等截面构造。为减少侧向风荷载的作用,主拱截面也采用了符合空气动力学特性的流线型外形(见图 2)。

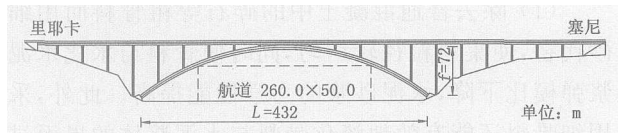


图 1 巴卡尔桥立面示意

基础、立柱和桥台(拱座)采用现浇 C35/45 混凝土,拱座之上的交界墩采用现浇 C40/50 混凝土,桥梁的其余部分(主要是主拱圈和桥面连续梁)完全由 RPC200 预制构件组装而成。RPC200 使得主拱圈和连续梁预制构件的截面形式、腹板和翼缘的厚度以及各个构件之间的连接方式都将与传统拱桥有很大的差别。从克尔克 2 号桥的实践来看,拱箱的厚度和桥面板厚度控制在 12 cm 内即可满足构造要求,因此,巴卡尔桥的箱形截面的板厚也都采用 12 cm。

主拱圈和桥面连续箱梁预制标准节段(其截面示意图见图 3)长 3.8 m,采用短线法制作,相邻构件拼合面相互贴合浇筑。节段拼装时,预制节段端部涂抹环氧树脂,并张拉体外索施加预应力。每一节段端部顶底板上都有 20~50 cm 厚的横隔梁,使翼缘板的长细比在 1/30 跨径左右。翼缘板的厚度为 12 cm。桥面连续梁预制节段只有在顶板(桥面板)处

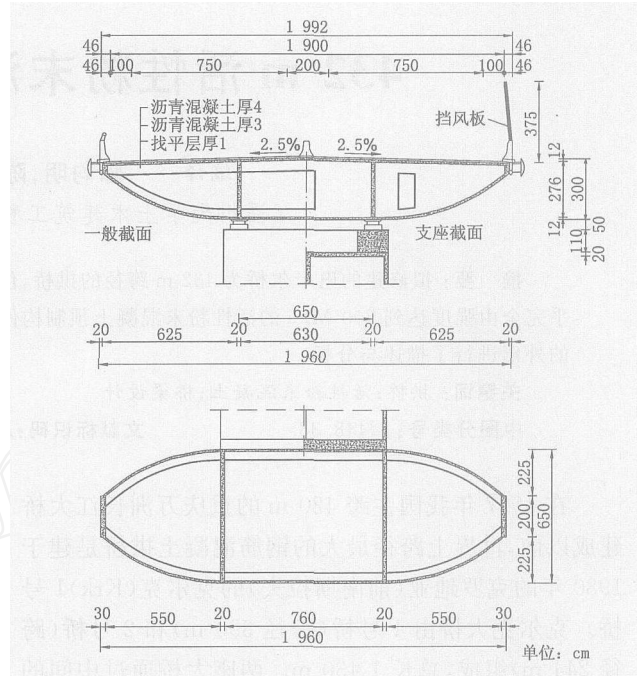


图 2 主拱圈与桥面连续梁截面示意

有 30~60 cm 厚的横隔梁。这种节段的拼装方法类似钢桥节段的拼装,但相比之下,这些节段在几何尺寸上更简洁,因为没有纵向加劲肋,并且相邻构件拼合面相互贴合浇筑的预制方法,使得拼装更容易也更精确。立柱的预制件为双箱矩形截面,而交界墩为现浇单箱矩形等截面,见图 3(b)。

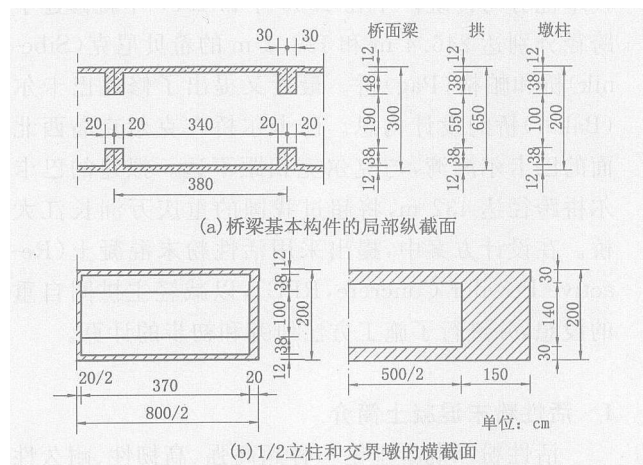


图 3 构件截面示意

## 3 施工工艺

通过体外索将预制 RPC 构件拼装成桥,使桥梁施工完全实现工业化生产,被认为是一种面向 21 世纪的先进的桥梁设计方法。在日本,该技术被用于将重达 4 500 kN 的预制构件拼装成桥。通过使用高性能混凝土来减小预制构件重量是这项技术可能

的发展趋势。活性粉末混凝土的出现为此提供了可能。巴卡尔桥将采用这种通过体外索将预制混凝土构件拼装成桥的技术方法进行施工。

巴卡尔桥交界墩使用塔吊和滑动模板进行现浇。交界墩是所有结构中最先施工完成的,因为它将用来锚固对悬臂的拱肋起平衡作用的斜拉索和背索。扇形的斜拉索和竖琴式背索在交界墩的两个高度上和交界墩之上的辅助塔顶上锚固。重达 965 kN 的拱圈节段通过驳船运到桥下,然后由起重量 1 000 kN、可在拱肋上移动的吊机将其吊起、就位。一个节段就位后,用箱内的体外索将之与已安装的拱肋连接起来。当通过体外索连接的拱肋节段达到 5 个(最大值)时,用斜拉索和背索将其拉住,然后继续下一组悬臂节段的拼装。背索中水平分力最大可达到 88 MN。

桥面连续梁的节段重 781 kN,立柱节段重 339 kN,比主拱圈节段轻,因此可以利用主拱吊机和辅助塔进行桥面梁的吊装施工。目前有两种可能的施工方法可供选择。一种方法是采用自由悬臂法施工,由桥台(交界墩)开始单向拼装节段直到第 1 根立柱,再到第 2 根立柱,依次进行。为了减小悬臂产生的负弯矩,从钢塔塔顶引出射线状拉索拉住拼装节段。桥面梁的节段可以通过引道和已经完成的桥面梁进行运输,使用可旋转的吊机吊起、旋转、就位,涂抹环氧树脂,张拉临时预应力索。在拼装完一跨节段后,即可通过体外索施加永久预应力,然后松开拉索,将钢塔架移动至下一根立柱上拼装下一跨的桥面梁。

桥面梁另一种可能的施工方法为通过桥梁两端不断增加预制节段的顶推法。在这里,顶推法常见的前端辅助钢梁用塔架和拉索代替。这样,桥面梁的节段预制、组拼和施加预应力都可以在桥后同一地点进行,通过顶推向跨中不断推进。在顶推法中,立柱的施工与前述的自由悬臂法相同,是通过梁的悬臂端的吊机进行安装的。

#### 4 主拱圈和桥面梁的计算

通过线性静力计算来检验拱在承受使用荷载时的应力、施工过程的应变,桥面梁在施工和使用荷载作用下的应力及应变。除了恒载和车辆荷载之外,静力计算还包括温度效应、混凝土徐变、侧向风力作用以及地震效应。在静力分析中,假设 RPC 的抗压强度为 200 MPa,挠曲抗拉强度为 40 MPa,弹性模量为 50 GPa, RPC 的收缩不计,且徐变只取常规值

的 5%。

最大压应力出现在拱墩:由自重、附加恒载、车载、风荷载、温度作用产生的应力 = 67.35 MPa;由自重、附加恒载、50%车载、50%风荷载、温度作用、混凝土徐变、地震作用产生的应力 = 64.86 MPa。这些值都在允许范围内。根据克罗地亚现行规范关于预应力混凝土的规定,200 MPa 混凝土的容许边缘压力可取其强度的 1/3,且当抵抗附加和特殊荷载时增加 15%,即  $\text{容许} = (200 \text{ MPa}/3) \times 1.15 = 76.67 \text{ MPa}$ ;对于附加荷载和地震荷载可以增加 50%,即  $\text{容许} = (200 \text{ MPa}/3) \times 1.50 = 100.00 \text{ MPa}$ 。最大的拉应力也出现在拱座, = -10.61 MPa,与最大压应力 = 67.35 MPa 相比,应力比值约为 1/6。由于拉应力小于实际压应力的 1/4,因此它是合适的。在预制节段连接成拱时,所有的连接件都由体外索施加预应力,其压应力小于 1.5 MPa。

拱圈自重、成桥后拱上建筑重量以及混凝土徐变产生的拱圈挠度计算结果见图 4。由上述影响产生的最大挠度出现在从拱顶向桥台方向的第 2 根立柱处,其值为 44.84 cm,这样,拱圈挠度与跨径的比值约为 1/1 000,这与一般混凝土拱变形相当。将计算所得的挠度值作为预拱度加到拱相应位置的高程上,作为施工时拱圈的放样值。

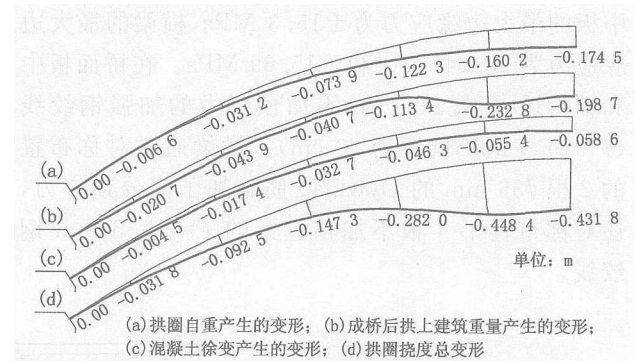


图 4 拱圈挠度变形

尽管拱圈架设时考虑了预拱度,然而桥面梁的变形还是会受到拱圈变形的影响。所以,在架设过程中,拱圈要有次序、平稳地进行吊装。通过挠度仪对液压设备提升结构进行控制,以保证桥面系的纵坡线符合设计要求。

逐跨架设过程中,其桥面连续梁最大的正负弯矩为  $M_{g,\min} = -g^2/19$ ,  $M_{g,\max} = g^2/14$  (见图 5)。桥面梁在自重、附加恒载、车载、温度效应以及预应力的共同作用下的最大压应力 = 25.62 MPa。在工况 1 中没有施加预应力时,桥面梁边缘最大压应力为 13.10 MPa,最大拉应力为 -11.73 MPa。

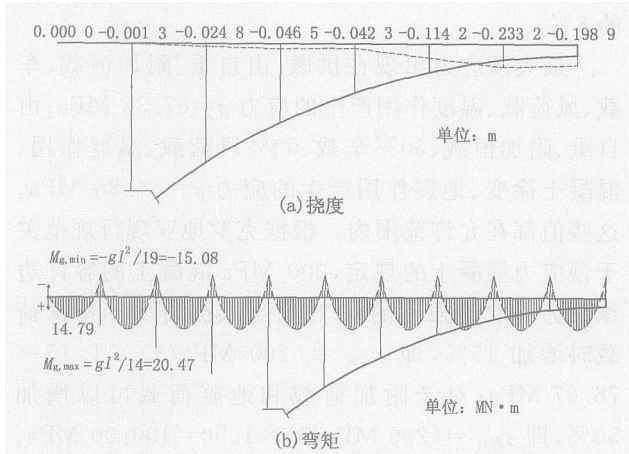


图 5 桥面梁自重作用下的挠度及弯矩

如果取抗拉强度 (40 MPa) 的 1/3 或 1/4 作为容许抗拉强度,则只需在节段连接处的横截面施加预应力 [见图 6(a)]。但在引桥和主桥桥面梁的中心位置附近,还需对体外索 Dywidag 筋施加预应力 [见图 6(b)]。使用这种预应力装置是因为其预应力筋、锚固点、连接器和保护装置较为合理和简单。全桥纵向预应力筋总用量为 33 kg/m<sup>2</sup>。如果使用强度更高的  $\phi=12.7$  mm 的预应力钢绞线,而不是  $\phi=36$  mm 的劲性筋,全桥纵向预应力筋总用量将降至 21 kg/m<sup>2</sup>。

本文也对桥面板和横梁进行了计算,在工况 1 中板的最大边缘应力为  $\pm 15.3$  MPa,横梁的最大边缘应力为 10.24 MPa 和 -15.69 MPa。在桥面板中和轴附近,配置双向的、不加预应力的加强钢绞线 ( $\phi=15.3$  mm,间距为 20 cm)。横梁通过对称布置的 2 根  $\phi 36$  mm 的 Dywidag 筋施加了部分预应力,还对称布置了 4 根不加预应力的  $\phi=15.3$  mm 钢绞线。

### 5 结语

以受压为主的拱桥采用具有较高抗压强度且造价低廉的混凝土材料为主来建造无疑是合理的。然而,由于自重,施工过程中需要大量的施工设备与临时设施,以及消耗大量的人工费用,使得它的经济性能受到很大的影响,特别是当跨径增大时这个问题愈显得突出。采用 RPC 将从根本上改变预制节段的横截面形式,腹板和翼缘的厚度,以及节段的连接形式。巴卡尔桥的设计显示了这种可能性。本文对巴卡尔桥设计的介绍,希望对我国钢筋混凝土拱桥的应用与研究能有所借鉴。

然而,将 RPC 应用于大跨度拱桥还只是一个设想,真正的实现还有许多工作要做。一方面,为了搞清楚这类桥梁结构,还要对这种新的结构单元进行深入的研究,特别是对桥面板和横梁。另一方面,对于 RPC 的材料性能、结构性能和工程的实际应用也还在研究之中。

活性粉末混凝土于 1993 年法国布伊格公司研制成功后,加拿大于 1994 年开始工业性试验,并于 1996~1997 年间进行了一系列工程试验。1998 年,在加拿大召开了高性能混凝土与活性粉末混凝土国际研讨会。活性粉末混凝土出现后,我国清华大学、长沙铁道学院、同济大学、福州大学等单位的科研工作者很快就开展了相关的研究,在试验室中已配制出了一系列强度等级很高的 RPC,但目前还未见其工程应用的相关报道。本文的介绍希望能引起我国 RPC 研究者的注意,尽快开展相关的应用研究,使 RPC 走出试验室,为我国正在进行的大规模的基础设施建设服务。

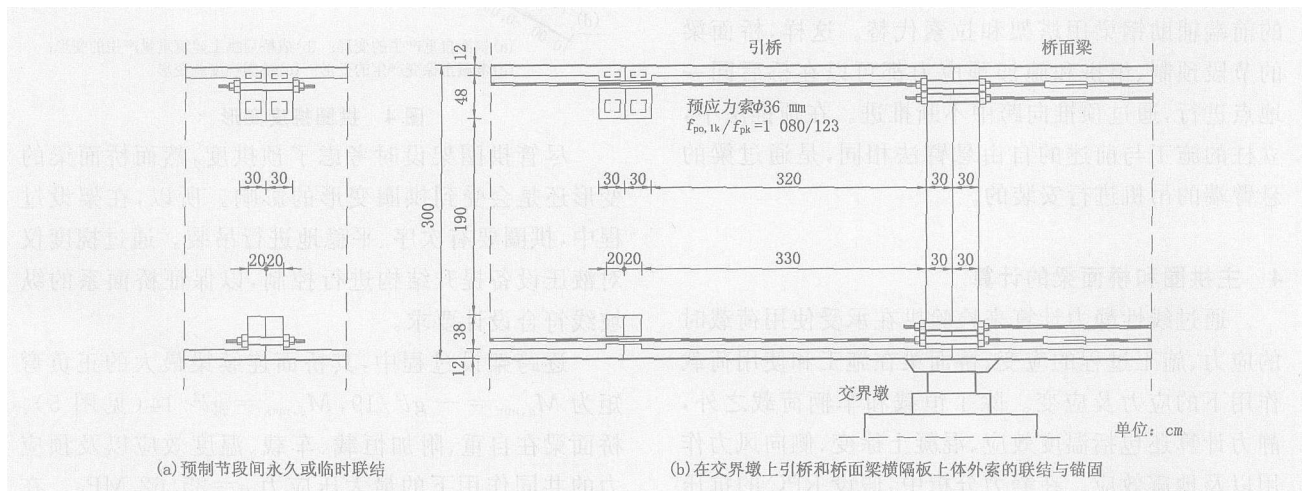


图 6 构件联结构造示意

(下转第 16 页)

和两墩壁轴向力不要相差太大等,选择墩壁中心距 6.4 m,墩厚 2 m。墩壁下为 11.2 m × 11.2 m × 5 m 承台及 4 根  $\phi 3$  m 挖孔桩基础,桩长 38 m,桩底埋至河床底以下。

## 5 锚杆设计

锚杆布置在压重段端横隔梁处,采用  $\phi 32$  mm 精轧螺纹钢筋,共布置 4 排,纵向间距 100 cm,横向间距 180 cm。地面以下钻  $\phi 15$  mm 孔,插入锚杆后灌注水泥浆。地面以上锚杆置于箱梁预埋钢管中,并涂防腐膏。每根锚杆张拉力为 320 kN。

## 6 设计体会

(1) 根据特殊地质、地貌,选择预应力单腿连续刚构桥方案,较好地解决了结构与地质、地貌的问题。

(2) 边跨压重段采用 40 m 长既考虑了受力需要,又考虑了经济性。

(3) 由于受力需要仅靠边跨 40 m 长压重段,不能完全解决压重,所以在 40 m 长压重段桥台侧横梁处布置 4 排岩石地锚,使箱梁施工阶段稳定性比采用堆载压重更可靠。

# Overall Design of Luola River Bridge on Guanling-Xingren Highway in Guizhou

DING Li-xin

(Wuxi Municipal Engineering Design and Research Institute, Wuxi 214005, China)

**Abstract:** This paper presents the overall design of Luola River Bridge on Guanling-Xingren Highway in Guizhou and describes in considerable details the design of the long-span and single-pier prestressed concrete continuous rigid-frame structure, ballast on the side spans and rock ground anchor rods of the Bridge in connection with the exceptive topographic and geologic conditions at the Bridge site.

**Key words:** rigid-frame bridge; ballast on side span; anchor rod; bridge design

(上接第 4 页)

## 参 考 文 献:

- [1] V Candrljic, J Bleiziffer, A Mandic. Bakar Bridge in Reactive Power Concrete[A]. Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge [C]. Paris, France, 2001. 695 - 700.
- [2] Z Simunic, B Pavlovic, J Bleiziffer. Dynamic behaviour of concrete arch bridges on the Adriatic coast[A]. Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge[C]. Paris, France, 2001. 641 - 646.
- [3] 陈宝春. 拱桥技术成就与展望[A]. 第二届全国公路科技创新高层论坛论文集[C]. 朝华出版社, 2004. 121 - 125.
- [4] 吴炎海,何雁斌,杨幼华. 活性粉末混凝土(RPC)的性能研究及应用前景[J]. 福建建筑, 2002, (4): 50 - 52.
- [5] 吴炎海,何雁斌. 活性粉末混凝土(RPC200)的配制试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, (5): 41 - 46.

# Design of a 432-m Span Reactive Powder Concrete Arch Bridge

CHEN Yun-ming, CHEN Bao-chun, WU Yan-hai, HUANG Qing-wei

(Institute of Civil and Architectural Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The Bakar Bridge to be built on expressway from Rijeka to Senj and over the Bakar Straits is a 432-m span arch bridge composed of almost all precast and assembled reactive powder concrete elements with concrete strength up to 200 MPa. In this paper, the novel structural type, construction technology and graceful configuration of the Bridge are described and analyzed.

**Key words:** arch bridge; reactive powder concrete; bridge design