

深圳彩虹大桥设计与研究

李 勇 聂建国 陈宜言 陈宝春

(华中科技大学) (清华大学) (深圳市政设计院) (福州大学)

摘 要 深圳彩虹大桥是一座由钢管混凝土拱、预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁、钢管混凝土组合桥墩构成的全钢-混凝土组合结构桥梁,在国内外属于首座。主跨 150m,跨越深圳火车北站 29 股道。设计构思新颖,造型优美,结构轻巧,抗风、抗震性能好,结构体系有所创新。体现了桥梁建筑与美学及环境的统一,实现了桥梁建设“轻型大跨、预制装配、快速施工、关注环境”的目标。

关键词 全钢-混凝土组合桥梁 钢管混凝土 系杆拱 预应力钢高托座-混凝土空心板叠合梁 钢管混凝土组合桥墩

中图分类号: U442.5⁺4 TU398 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2002) 05-0052-05

1 概 述

深圳彩虹(北站)大桥位于广东省深圳市区,是连接八卦三路与田贝四路的一座城市跨线桥。该跨桥线桥全长 1.2km,跨越深圳火车北站 29 条股道,是目前世界上跨越铁路股道最多的桥梁之一。主桥采用门构式(下承)钢管混凝土柔性系杆拱,拱脚无推力,桥面宽 23.8m,拱脚处桥面宽 28m。设计荷载:汽—超 20,挂—120,人群荷载:4.5kN/m²,桥下按电气化列车运营要求预留净空,不小于 7.2m。桥面纵坡 2.5%,横坡为双向 1.5%,地震按 7 度设防。

主桥计算跨径 150m,矢跨比 1/4.5,拱轴为悬链线,拱轴系数 1.167,采用双拱肋,每片拱肋由 4- ϕ 750 \times 12mm 钢管混凝土组成桁式断面,桁高 3.0m,桁宽 2.0m,钢管内灌注 C50 微膨胀混凝土。两片拱肋之间采用 6 道风撑连接,拱顶设 2 片 K 撑,拱脚侧各设 2 片一字形风撑。建成后的深圳北站大桥如图 1 所示。

桥面采用预应力钢高托座-混凝土空心板叠合梁,设计成纵向漂浮体系。下部结构基础为独柱独桩式,桥墩采用 ϕ 2.8m ~ ϕ 3.4m 变截面钢管混凝土组合柱,主拱与桥墩采用拱墩固结形式,采用纵向系杆平衡主拱的水平推力。主桥桥型布置如图 2 所示。

2 设计特点

深圳彩虹(北站)大桥采用了多项新技术、新工



图 1 深圳彩虹(北站)大桥通车照片

艺。北站大桥是首座全钢-混凝土组合结构桥梁,它跨越深圳火车北站 29 条股道,广深、广九高速列车及货车运营十分繁忙,客、货车调车频度极高。如何减少现场作业,减少对铁路行车的干扰是本桥设计中应该研究的问题。为此,本设计采用全组合结构,除拱墩固结点的帽梁采用现浇钢筋混凝土外,其余部分均采用工厂制造,现场安装。实现了全桥无模板施工,适合现代桥梁建设对“轻型大跨、预制拼装、快速施工、关注环境”的要求。

通过方案的比较分析和对模型梁的试验研究,桥面采用预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁(如图 3 所示),具有以下特点:(1)对钢梁施加预应力,降低了钢梁高度,使钢梁高度从 1.7m 降到 1.2m,节省了钢材;强屈比提高,预应力钢-混凝土组合梁比普通钢-混凝土组合梁的强屈比要增大 15%~20%;组合梁的刚度增大,并且有效抵消了梁在施工阶段的挠度和应力;承载能力提高,所承受的荷载与结构本身重量之比达 20 以上。(2)成功地解决了在梁的间

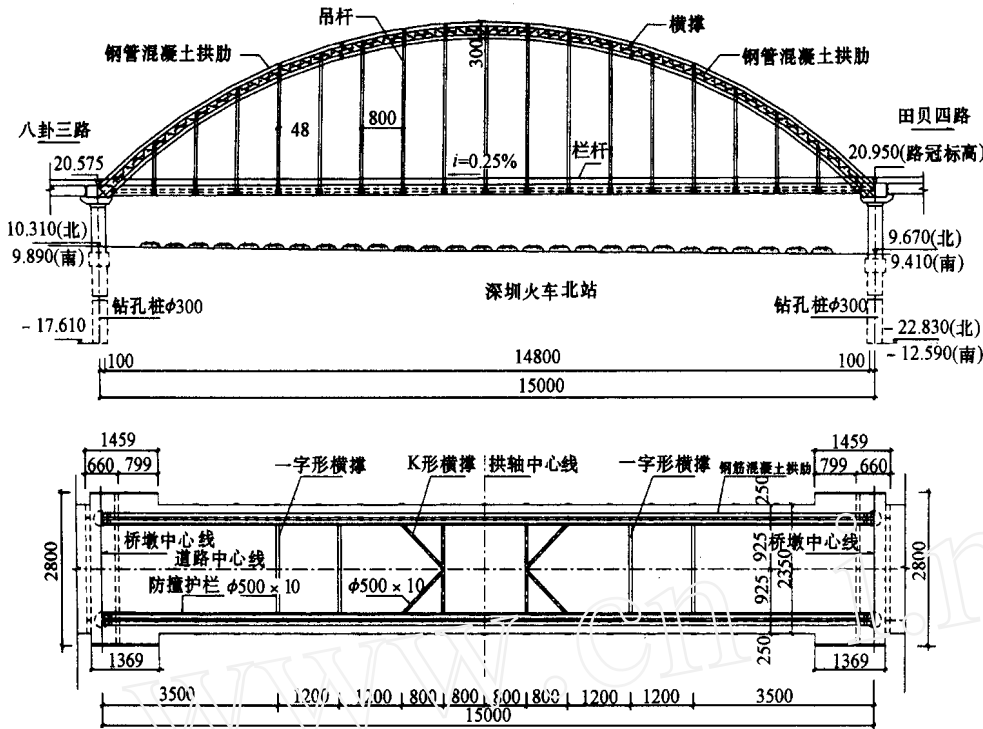


图 2 深圳彩虹（北站）大桥桥型布置

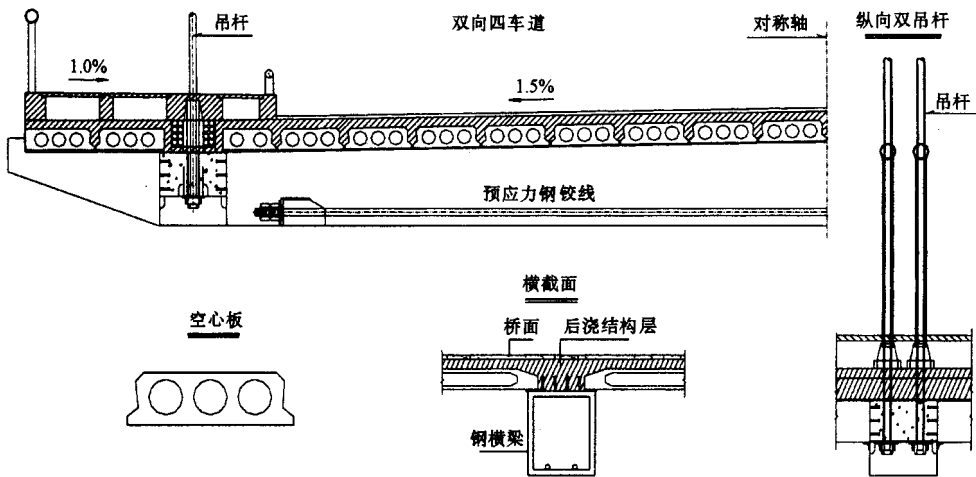


图 3 预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁

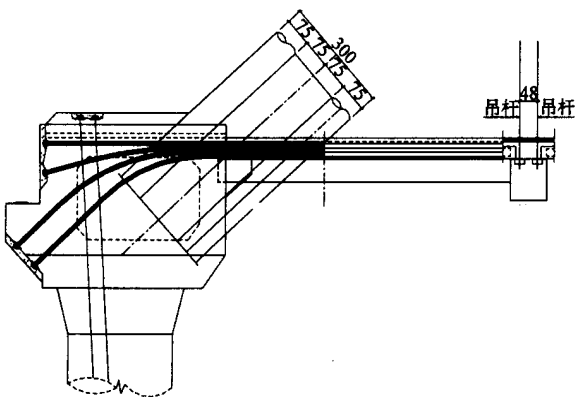


图 4 拱墩固结点大样

距比较大时采用钢—混凝土叠合板组合梁的关键技术难题。

通常情况下是在桥梁上直接浇注后浇混凝土或在薄板（或压型钢板）上浇注混凝土而形成钢—混凝土叠合板组合梁，本桥采用的是预应力钢横梁、预应力混凝土空心板和现浇混凝土叠合在一起的预应力钢—混凝土空心叠合板组合梁，栓钉剪力连接件通过现浇混凝土把预应力钢横梁、预应力空心板和现浇混凝土连成整体。预应力空心板具有三重作用：一是作为模板；二是作为桥面纵向受力板的一部分参与桥面板的受力，起行车道板作用，抵抗正弯矩的受力钢筋配置在预应力空心板内；三是作为横向承重组合梁的混凝土翼缘的一部分参与组合梁受力。

采用拱墩固结形式（图 4），具有以下特点：（1）拱脚是主拱垫板、墩顶、帽梁、墩身拉杆、水平系杆交合点，结构

外形简洁，但受力十分复杂。国内采用拱墩固结形式的钢管混凝土拱桥见表 1。（2）提高全桥的整体性，对抗风、抗震、改善行车振动均十分有利。（3）方便施工，节省了大型支座的安装，更换，有利于桥梁的养护。（4）桥墩承受拱脚不平衡弯矩。

采用 2.8m~ 3.4m，变截面组合桥墩，主要考虑以下三个方面的因素：1) 节省模板、支架，减少对铁路行车的干扰；2) 减小桥墩直径，改善铁路站场通视效果；3) 承受上部结构的水平推力及不平衡弯矩。施工阶段水平推力变化大、变化次数多，对此设计作了特殊处理：在上、下接头部位采用了钢垫环，在承台顶面预埋钢环，以方便定位、调平，再焊

成整体。

表 1 国内跨径超过 100m 的门式钢管混凝土拱桥

序号	桥名	跨径 (m)	失跨比 (f/L)	拱轴系数	桥面宽 (m)	设计荷载	单肋截面	建成时间
1	四川旺苍河大桥	115	1/6	1.543	15.0	汽-20	哑铃形	1990
2	广东佛陈大桥	110	1/5	1.167	25.0	汽-20	哑铃形	1994
3	河南安阳文锋桥	135	1/5	1.050	31.4	汽-20	横哑铃	1995
4	峨边大渡河桥	140	1/5	1.352	13.5	汽-20	横哑铃	1995
5	四川青龙场桥	132	1/5	—	30.3	汽-超 20	哑铃	1997
6	深圳北站大桥	150	1/4.5	1.167	23.8~28	汽-超 20	桁式	2000

采用纵向双吊杆, 出于三个方面考虑: (1) 为成桥后吊杆的调试及更换提供方便; (2) 对改善横梁及桥面的抗扭有利; (3) 大间距的双吊杆具有韵律感。

3 计算分析

3.1 空间静力、动力与稳定分析

主拱肋采用桁式, 截面抗弯效率高。上、下弦杆以受压为主, 弯矩很小, 充分发挥了钢管混凝土结构抗压强度高的优点。斜腹杆以受拉为主, 发挥了钢结构抗拉强度高的优点, 也避免了局部失稳情况。桁式断面结构自重轻, 刚度大, 结构受力合理。静力计算结果表明, 本桥有两个比较显著的特点: 一是主拱各断面弯矩很小, 二是主拱水平推力小。说明本桥的整体设计合理, 拱轴系数的选择恰当。

该桥的动力特性采用其固有振型和与之相应的振动周期表示。计算发现, 第一振型的振动周期达 3.01s, 显然太长。它是否因为主拱或桥墩的刚度太小所引起, 经大量分析后发现, 由于桥面采用悬浮体系, 平行吊杆也无法制约其纵横向摆动, 从而造成桥面系振动周期过长。为此, 对桥面采取了纵横向限位措施。

主拱圈为压弯构件, 存在稳定问题。大跨度钢拱桥稳定问题往往成为设计的控制因素。第一类稳定问题为平衡分支点失稳, 第二类稳定为极值点失稳。工程结构不可能处于理想的中心受压状态, 均属第二类稳定, 但第二类稳定计算复杂。按第一类稳定计算被广泛用于工程领域, 第一类稳定求得的临界荷载是第二类稳定极值点荷载的上限, 其差值对不同结构有不同幅值, 而且结构失稳突然, 破坏性大, 因此, 按一类稳定计算时采用较大的稳定系数, 本桥取 K 为 (4~6)。

表 2 北站大桥稳定系数表

序号	工 况	K 撑于拱顶	K 撑于拱脚	备 注
1	形成两铰拱	3.69	—	面外失稳
2	浇完管内混凝土 (无铰拱)	4.42	—	面外失稳
3	拱顶 汽-超 20	5.12	4.77	面外失稳
4	1/4 拱 汽-超 20	5.12	4.60	面外失稳
5	拱 脚 汽-超 20	6.73	6.23	面外失稳
6	拱 顶 挂-120	5.22	4.69	面外失稳
7	最大水平推力	4.88	4.34	面外失稳

对于 K 撑设于拱顶和设于拱脚两种情况进行了比较 (见表 2), 本设计采用 K 撑位于拱顶。对施工阶段的横向稳定系数采取增加缆风索的办法解决。

计算表明, 桥面预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁的承载力、变形均满足现行规范要求, 桥面自重减轻约 1200t (比原混凝土桥面结构方案的自重减轻 40%)。

3.2 钢管内流态混凝土受力机理

钢管混凝土, 本质上属于套箍混凝土, 其基本力学特征是: 一方面, 核心混凝土受到钢管约束在承受轴向压力时发生的侧向应变受到限制, 处于三向受压状态, 从而具有比普通钢筋混凝土大得多的承载能力和变形能力。另一方面, 钢管也受到核心混凝土约束, 管壁稳定性增强, 它既是结构的组成部分, 又起到施工模板、支架的作用。

钢管内的混凝土, 在灌注过程中处于流态, 类似于液体, 一般在设计时仅将其作为荷载; 由于液态混凝土向拱脚钢垫板传递液压力, 从而减轻钢拱肋负荷, 改变结构受力状况; 因此, 本桥设计时不仅将其作为荷载; 同时考虑液态混凝土向拱脚钢垫板传递液压力的减载作用。

钢管内的流态混凝土承受一部分内力, 因此钢管内的混凝土凝固时有初应力。流态混凝土不能传递剪力、弯矩, 也不能传递集中力产生的点压力, 但它能传递液压力, 其大小为 $P = \gamma \times h$ 。受力模型如图 5 所示。在拱顶处 $h = 0$, 但在拱脚处 h 就等于矢高 f 。拱脚截面承受着整个主拱及桥面的全部荷载, 从而控制设计。因此, 研究流态混凝土对拱脚的受力影响有意义。

本桥考虑流态混凝土受力机理后钢管承受混凝土重量引起的拱脚应力由 46.52MPa 减小到 33.28MPa, 降低 37.1%。同时, 设计中在拱脚采用了实腹段。先浇实腹段混凝土, 再灌钢管内的混凝土, 对于改善拱脚的受力有利, 对设计大跨度的钢管混凝土拱桥更具指导意义。

先安装的构件将参与后期受力。钢管参加各阶段受力，而钢管内混凝土仅参与除钢管与管内混凝土重量以外的后期受力。显然，在同一截面上，钢管所受的力比混凝土要大。从材料性质上看，钢材的抗拉压性能均比混凝土好，钢管混凝土的施工顺序也正是设计所期望的。

3.3 主拱钢管灌注混凝土顺序对结构受力的影响

先浇注的混凝土将参与后期的受力，钢管内混凝土灌注顺序是“先上后下”还是“先下后上”，通过对每片拱肋四个钢管的灌注顺序进行研究，计算结果见表 3。

经分析确定，先灌上管混凝土，后灌下管混凝土，理由如下：(1) 桥面恒活载作用下，拱脚产生负弯矩，使拱脚上缘受拉，下缘受压，与前阶段的初应力叠加起来，对安装桥面及运营阶段均有利。(2) 先灌上管混凝土使墩顶产生的水平变位较小。(3) 从构造上看，上管受力稍大一些更合理，因为下管拱脚的锚固不及上管强。

表 3 恒载情况下钢管混凝土灌注顺序比较
(单位应力为 MPa，位移为 mm)

截面位置		灌注顺序							
		先灌上管				先灌下管			
		上缘应力	下缘应力	水平位移	竖直位移	上缘应力	下缘应力	水平位移	竖直位移
拱脚	上管	12.59	10.45	0.42	- 1.15	11.53	9.23	0.64	- 1.25
	下管	8.51	10.90			9.76	11.94		
1/4 拱	上管	9.93	10.70	0.52	- 4.38	8.78	7.87	0.58	- 4.23
	下管	7.23	8.96			8.37	10.64		
拱顶	上管	10.39	8.93	- 0.02	- 6.70	9.24	7.85	- 0.03	- 6.30
	下管	6.33	7.18			7.42	8.31		

4 试验研究

4.1 预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁试验

鉴于本桥在形成组合截面前先对钢梁施加预应力，并采用空心板叠合尚属首次，为验证设计的可靠性，使设计成果更科学、合理和更具普遍意义，按照 1:4 的比例进行了 8 根模型梁试验，结果表明：(1) 北站大桥首次采用的预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁的整体性能良好，在技术上是先进的，其受力性

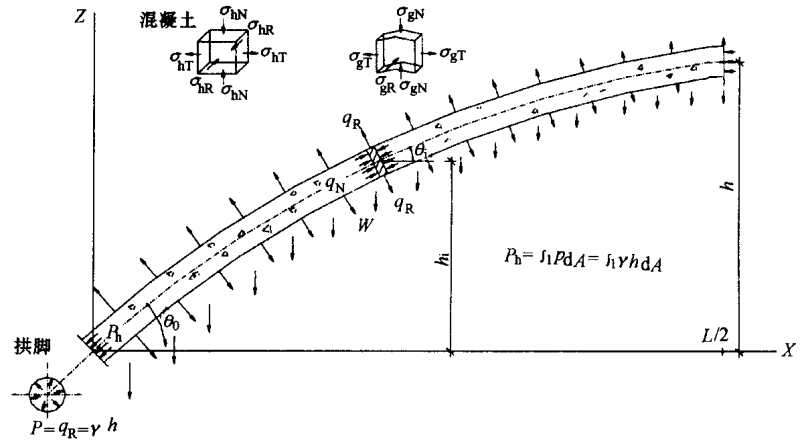


图 5 钢管承受流态混凝土时的受力模型

能安全可靠。(2) 对钢梁施加预应力降低了钢梁高度，节省了钢材。(3) 对钢梁施加预应力效果显著，刚度提高，试验梁跨中挠度延性系数达到 4.46 ~ 7.16，强屈比达到 1.84 ~ 2.17，这是因为钢梁屈服后预应力钢筋仍处于弹性阶段而且离屈服点还有一个较长的过程。(4) 采用空心板进行叠合减轻了自重，且不影响组合的整体效果，是先进合理的，它是对叠合板组合梁的发展。(5) 抗剪栓钉在传递剪力，连接成整体方面起了应有的作用。

4.2 拱墩固结点光弹试验

试验对拱脚两次浇注混凝土分别进行了两种模型的光弹试验，结果表明(1) 北站大桥拱墩固结点设计总体受力合理。(2) 桥墩墩身出现拉应力，设计中采用钢管混凝土墩柱是安全合理的。(3) 鉴于拱墩固结点应力复杂，且在施工和运营阶段不断变化，采用钢纤维混凝土有效地解决了这一问题。(4) 关于局部应力集中的问题，设计已按试验要求进行了配筋处理。

5 施工加载程序

北站桥施工受到多方面因素制约，经过反复比较分析，选择采用缆索吊装施工方案，施工加载程序在本文不作详细介绍，仅对加载过程中的一些特殊处理作简要说明。

(1) 拱脚设铰是为了配合缆索吊装进行线性调整而设计，同时它可以释放施工引起的拱脚弯矩。

(2) 拱脚及各段接头均设内导管，目的是方便施工定位，同时保证钢管接头对接精度，且充当焊接内衬管。

(3) 接头设法蓝盘，充当临时固接措施，使对接焊缝在无应力条件下施焊。

(4) 各接头在主拱线型调整完成后再施焊，这对

于确保主拱线型,使主拱受力合理具有意义。

6 结 语

深圳(彩虹)北站大桥采用了一系列新技术,并进行了深入的分析和试验研究,取得了为工程应用所必需的、并且对今后类似桥梁结构设计具有重要实用参考价值的成果。把钢管混凝土拱和预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁有机地结合在一起,形成钢-混凝土组合桥梁结构体系,技术经济效益和社会效益十分显著。钢-混凝土组合结构技术在深圳北站大桥的成功应用,对钢管混凝土拱桥结构体系的创新和发展具有借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 李勇,聂建国,陈宜言.一种新型的预应力钢-混凝土

- 组合梁[J].桥梁建设,2001(6):31~33
- [2] 蔡绍怀.我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J].土木工程学报,1999,32(4):16~26
- [3] 李勇,刘厅,刘冰.钢管对接的内导管定位新工艺[J].哈尔滨建筑大学学报,2001,34:111~113
- [4] 李勇,王晓红.钢管内流态混凝土受力机理研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2001,34:114~116
- [5] 聂建国,李勇.钢-混凝土组合梁刚度的研究[J].清华大学学报(自然科学版),1998,38(10):38~41
- [6] 聂建国,余志武.钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J].土木工程学报,1999,32(2)
- [7] 钟善桐.预应力钢结构[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1986
- [8] 李勇,陈宜言,聂建国等.钢-混凝土组合桥梁设计与应用[M].北京:科学出版社,2002

DESIGN AND STUDY ON SHENZHEN RAINBOW BRIDGE

Li Yong¹⁾ Nie Jianguo²⁾ Chen Yiyang³⁾ Chen Baochun⁴⁾

1) Huazhong University of science and technology, 2) Tsinghua University,

3) Shenzhen municipal engineering design insititute, 4) Fuzhou University

Abstract

The Shenzhen rainbow bridge is a steel-concrete composite bridge. It is made up with the steel tube-confined concrete tied arch, the prestressed hollow-plank composite deck, and the steel tube-confined concrete composite piers. Its main span is 150 m spanned over 29 train tracks. Some new design ideas are introduced in the project. It is found that the bridge is in good-looking, light in self-weight, and high performance to resist wind and seismic action. It is well matched with its around natural environment.

Key words: steel-concrete composite bridge, steel tube-confined concrete tied arch, prestressed hollow-plank composite deck, steel tube-confined concrete composite pier

李 勇 高级工程师,华中科技大学在职博士生,享受政府特殊津贴专家,从事公路铁路桥梁、钢-混凝土组合结构设计研究。通讯地址:518035 广东省深圳市笋岗西路3007号深圳市政设计院

聂建国 教授,博士生导师,长江学者奖励计划特聘教授,从事钢-混凝土组合结构、钢结构、混凝土结构的研究开发工作。

陈宜言 教授级高级工程师,硕士,从事道路、桥梁结构设计研究与工程实践。

陈宝春 教授,博士生导师,享受政府特殊津贴专家,从事桥梁、钢管混凝土组合结构设计与研究。