

诸永高速公路温州段延伸工程

瓯江大桥科研项目

可行性研究报告

项 目 名 称：“大跨径混合梁刚构桥设计与施工关键技术”

项目承担单位：温州市瓯江通道建设有限公司（公章）

交通运输部公路科学研究所（公章）

编 写 日 期：2011 年 7 月 25 日

项目基本信息表

项目名称	大跨径混合梁刚构桥设计与施工关键技术
项目概要 (宏观描述立项必要性和要解决的主要问题)	以浙江诸永高速公路温州段延伸工程——瓯江大桥为依托工程，针对大桥建设与养护过程中的关键技术，通过试验研究、理论分析和数值仿真分析等技术途径，攻克大跨径混合梁刚构桥的整体性能、钢-混结合段、竖向和体外预应力束合理布置、钢桥面铺装、健康监测与养护管理等设计施工上的关键技术问题，研发大桥安全监测及施工运营养护一体化的管理系统与装备，并进行工程示范。本项目将取得多项工法、发明专利、标准或指南，以及专项设计方法、指导书或应用手册等，并通过项目研究培养锻炼一批专业人才，促进我国桥梁行业的科技进步。
主要研究内容	子课题 1：混合梁刚构桥承载性能及结构优化研究 子课题 2：混合梁刚构桥钢-混凝土结合段关键技术研究 子课题 3：海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术研究 子课题 4：瓯江大桥上部混合梁施工控制技术研究 子课题 5：瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术研究 子课题 6：瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术的研究 子课题 7：基于特征数据的瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术的研究
主要考核指标	(1) 本项目将编制 2 本以上的混合梁刚构桥建设相关技术指南，相关的研究成果可为国内同类工程的建设提供技术指导和行业标准。 (2) 本项目研发钢桥面铺装设计与施工技术，并提出适宜的铺装结构和材料体系，可以延长桥面铺装寿命 2~4 年。 (3) 本项目开发的预应力状态感知测试设备与控制技术将形成 2 项以上的国家专利。 (4) 本项目研究成果直接服务于示范工程——瓯江大桥。通过模型试验及数值仿真分析，深入开展混合梁刚构桥传力机理及承载可靠性研究，提出混合梁刚构桥优化设计方法；通过模型试验检验结合段连接的安全性和可靠性；通过钢桥面铺装模型试验验证设计合理性及适用性；通过检测竖向及体外预应力工作状态，实时反馈及评估桥梁结构安全性。 (5) 在国、内外期刊上发表论文 20 篇以上。

依托工程基本情况	瓯江大桥总体布置为：32+48+65+48+32(m)变高度现浇箱梁+5×32(m)等高度现浇箱梁+31+50+31(m)变高度现浇箱梁+9×30(m)等高度现浇箱梁+31+2×50+31(m)变高度现浇箱梁+4×41.75(m)等高度现浇箱梁+21×50(m)等高度现浇箱梁+84+200+84(m)钢-混连续刚构+5×51(m)等高度现浇箱梁+42.5+72+42.5(m)变高度现浇箱梁+12×28(m)等高现浇箱梁+30+50+30(m)变高度现浇箱梁+3×28(m)等高度现浇箱梁=3456.0m。 其中主桥采用三孔一联的钢-混混合梁刚构桥，中跨跨中 80m 采用钢箱梁，其余部分主梁采用混凝土结构，桥型布置为 84+200+84(m)=368m，主跨采用 60m（混凝土箱梁）+80m（钢箱梁）+60m（混凝土箱梁）钢-混凝土混合梁结构形式。		
项目总经费	1090 万		
完成年限	2011 年 9 月—2014 年 9 月	申报日期	2011 年 8 月

目 录

1. 项目概要	1
1.1. 工程概况	1
1.2. 项目概况	5
1.3. 总体目标	6
2. 项目前期研究及工作基础	7
2.1. 国内外技术现状	7
2.1.1. 国内外混合梁应用及发展	7
2.1.2. 混合梁刚构桥设计施工关键技术研究现状	15
2.2. 现有工作基础	25
2.2.1. 工作基础	25
2.2.2. 承担的相关课题	25
2.2.3. 试验手段及协作条件	27
3. 项目研究背景、必要性和推广前景	31
3.1. 研究背景	31
3.2. 研究必要性及目的	32
3.3. 推广应用前景	33
4. 项目研究和实施方案	34
4.1. 研究内容	34
4.2. 拟解决的关键技术问题	37
4.3. 技术路线	39
5. 考核目标和技术经济指标	47
5.1. 考核目标	47
5.2. 技术经济指标	49
6. 项目研究进度	50
6.1. 实施年限	50
6.2. 年度计划安排与阶段目标	50
7. 第一承担单位及承担单位概况	51
7.1. 承担单位概况	51
7.2. 项目负责人简介	54
8. 研究经费预算及资金筹措情况	55

9. 经济效益和社会效益评估	56
9.1. 经济效益评估	56
9.2. 社会效益	57
10.其它需要说明的问题	58
11.编写人员名单	59
12.第一承担单位意见	59

大跨径混合梁刚构桥设计与施工关键技术可行性研究报告

明显。

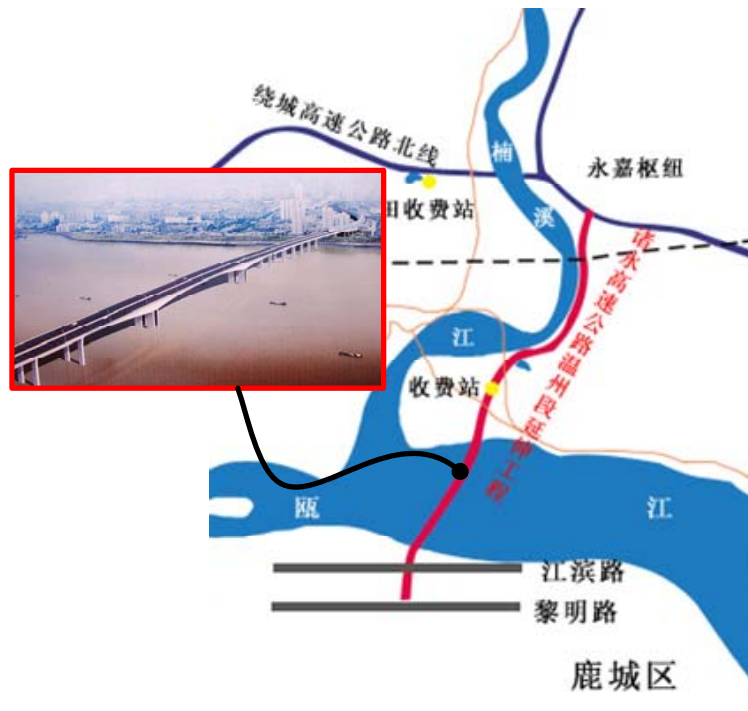


图 1-2 瓯江大桥地理位置及效果图

瓯江大桥主桥桥型布置为 $84+200+84(\text{m})$ ，采用三孔一联的钢-混混合梁刚构桥，如图 1-3 所示。中跨跨中 80m 采用钢箱梁，其余部分主梁采用混凝土结构，截面采用单箱单室斜腹板截面。主梁混凝土部分纵向按全预应力混凝土结构设计，采用变高梁；主梁钢箱梁部分采用等高梁。主桥按双幅布置，单幅箱梁宽度为 15.5m ，桥面横坡为 2.0% 。

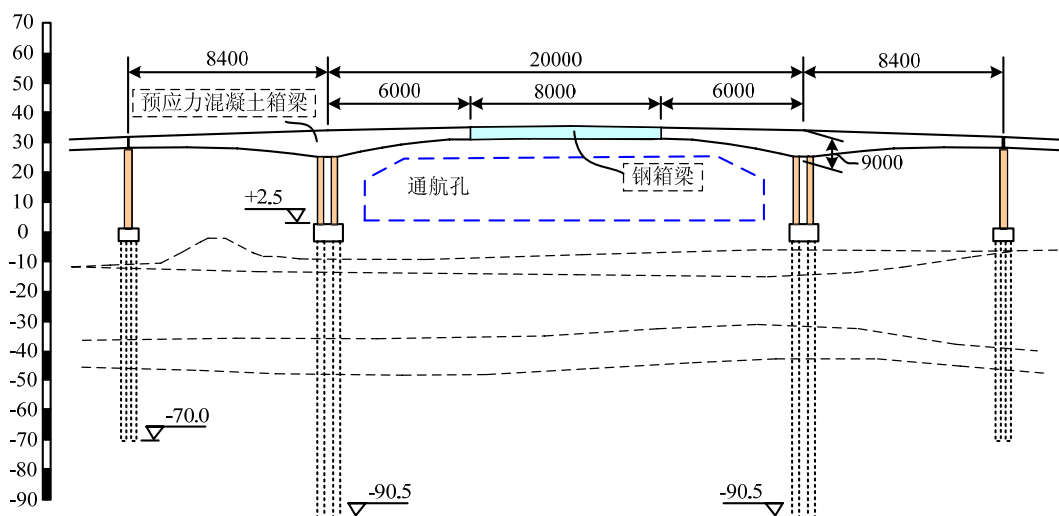


图 1-3 瓯江大桥主桥桥型布置图（单位：cm）

混凝土主梁中支点处梁高 9.0m ，跨中梁高为 3.5m ，支点梁高与跨径之比为

1/22.22，跨中梁高与跨径之比为 1/57.14。仅在主墩支点和边墩支点上布置横隔板，主墩处横隔板厚度与薄壁墩一致均为 1.6m，边墩支点处横隔墙厚度为 1.4m。预应力混凝土箱梁横截面尺寸如图 1-4 所示。

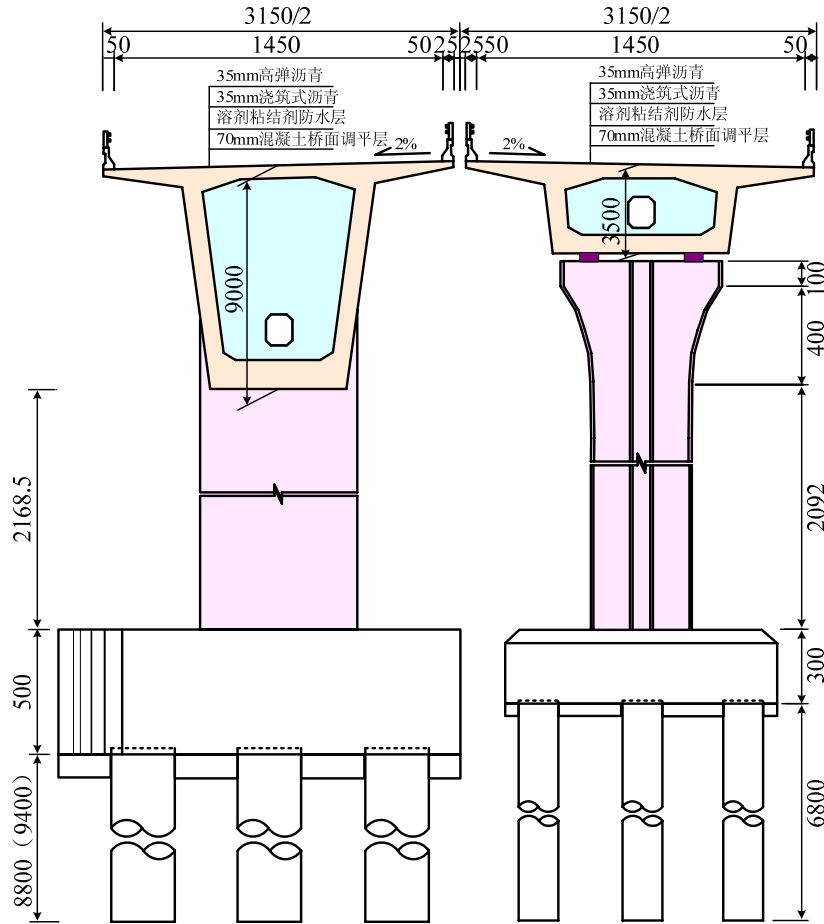


图 1-4 混凝土箱梁横截面尺寸（单位：cm）

整体钢箱梁为等高钢箱梁，箱梁宽 15.5m，桥面板采用正交异性板，板厚 16mm，在不同部位分别采用 U 形肋、倒“T”肋及板肋纵向加劲。U 肋标准间距 600mm，上开口为 300mm，下边宽为 170mm，高 280mm，板厚 8mm；倒“T”肋全高 150mm，翼缘板宽 100mm，板厚 12mm，腹板高 138mm，板厚 10mm；板肋规格为 110x10mm。顶板悬臂 3.38m，悬臂根部垂直高度为 921mm，端部为高 321mm；箱梁腹板采用斜腹板，板厚为 24mm；底板全宽为 7743mm，底板厚 20mm，采用 U 形肋纵向加劲，标准间距 750mm，底板 U 肋下开口为 300mm，上边宽为 184mm，高 260mm，板厚 6mm。箱梁标准段横隔板间距为 3.0m，标准横隔板腹板板厚 12mm，腹板上开设人孔和体外索管道孔；在两相邻大横隔板中部设置一小横隔板，小横隔板采用倒“T”截面，下翼缘板件与悬臂根部翼缘板等高，规格

为 280x12mm。整体箱梁两端部在顶、底板及腹板纵肋间设置刚度过渡板，刚度过渡板终止于两个面，分别距理论节段拼接线 4.8m 和 6.3m 处。整体钢箱梁标准横截面尺寸如图 1-5 所示。

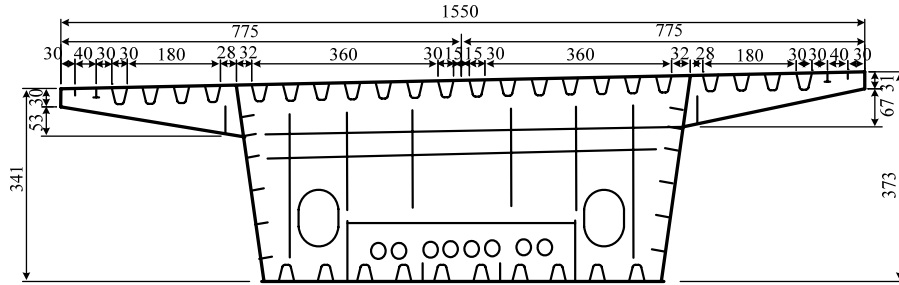


图 1-5 整体钢箱梁标准横截面尺寸 (单位: cm)

瓯江大桥采用有格室后承压板式钢-混凝土结合段构造形式，如图 1-6 所示。结合段长度 4.0m，结合面往钢梁侧采用变刚度钢箱结构，长度为 2.2m。距结合面 1.6m 处设置一道横隔板用于锚固预应力短束。结合面处承压板采用 60mm 厚板，中部开洞，以使钢箱梁和混凝土箱梁通畅，保持箱梁通畅，在承压板相应位置开设预应力孔，混凝土箱梁侧承压板立面布设圆柱头抗剪焊钉，抗剪焊钉规格采用 $\phi 22 \times 150\text{mm}$ ，标准间距为 $200 \times 200\text{mm}$ 。结合面往混凝土侧采用双壁板钢-混组合结构，长为 1.8m。顶板双壁板厚 1.22m，底板双壁板厚 1.1m，腹板双壁板厚 0.84m，双壁板上焊接剪力板，剪力板与刚度过渡板横向位置对应。顶板上剪力板的标准间距为 600mm，底板剪力板标准间距为 750mm；腹板上剪力板的标准间距为 300mm；剪力板上开设直径 $\phi 80\text{mm}$ 的孔，顶板顶层穿横向预应力，其余穿 $\phi 32\text{mm}$ 的粗钢筋。

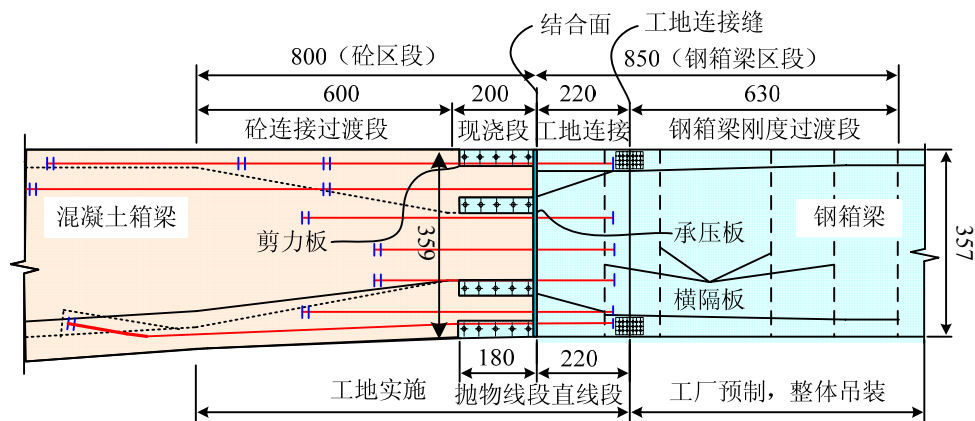


图 1-6 钢-混结合段剖面图 (单位: cm)

顶板和底板的雙壁板顶层均开设混凝土灌注孔，内腔均灌注 C60 微膨胀混

凝土，且在开孔板件内表面布设圆柱头抗剪焊钉，标准间距为 200x200mm。由于结构受力的需要，在钢-混结合段设置了局部预应力索，一部分锚固于锚固面处；另外一部分采用锚箱，锚固面位于距结合面 1.8m 处。结合面处及锚箱端部的锚垫板均需开设压浆孔和排气孔，整个锚箱密闭设计。考虑钢箱梁内完全封闭，在结合段顶、底双壁板之间采用构造横隔板密封，横隔板布设两个可开启式封盖进入孔。

瓯江大桥主桥墩身采用分幅设置，承台为整体承台。主墩采用双薄壁墩，墩身壁厚为1.6m，纵桥向双薄壁墩外缘间距为8m，单幅墩横桥向宽7m。承台为圆端型承台，横桥向长35.4m，顺桥向宽12.0m，厚度为5.0m，采用C35混凝土。基础为钻孔灌注桩基础，每墩设12根桩，桩径2.8m，采用水下C35混凝土。

瓯江大桥北引桥全长为 2142.474m，其中陆上部分引桥长 486m，三江围垦区引桥长 441m，水中部分引桥长 1215.474m。北引桥陆上部分桥梁上跨规划楠瓯大道（宽度 48m）、规划中心大道（宽度 40m），分别采用（30.5+44+65+44+30.5）m 及（31+50+31）m 桥梁跨越；北引桥三江围垦区桥梁上跨规划环江大道（宽度 32m）、规划防洪堤，采用（31+2×50+31）m 桥梁跨越。北引桥水中桥梁主跨采用 50m 现浇箱梁，采用移动模架法施工。南引桥：南引桥全长为 943.9m，其中陆上部分引桥长 531.9m，水中部分引桥长 412m。南引桥主要上跨望江路及防洪堤景观带及江滨路，分别采用（42.5+72+42.5）m 及（30+50+30）m 桥梁跨越。

1.2. 项目概况

本项目依托浙江省诸永高速公路温州段延伸工程-瓯江大桥开展科研攻关。确定瓯江大桥科研项目的出发点主要基于两点：(1)对大桥设计施工存在的关键技术难题进行攻关，为大桥设计和施工服务并在此基础上凝练行业共性技术；(2)对大桥建设过程和养护过程急需的监测、评价和管理技术进行攻关，为保证大桥顺利建成和安全运营提供技术支撑。经过温州市瓯江通道建设有限公司与参研单位，尤其是交通运输部公路科学研究所的共同协商与研讨，本项目“大跨径混合梁刚构桥设计与施工关键技术”共设立如下 7 个研究专题：

专题 1：混合梁刚构桥承载性能及结构优化研究

专题 2：混合梁刚构桥钢-混凝土结合段关键技术研究

专题 3：海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术研究

专题 4: 瓯江大桥上部混合梁施工控制技术研究

专题 5: 瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术研究

专题 6: 瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术的研究

专题 7: 基于特征数据的瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术的研究

本项目拟通过七个专题的研究,着力解决好瓯江大桥主、引桥在结构设计、架设安装、运营养护和建设管理等方面存在的关键技术问题,为保障大桥顺利建成和建成后的安全养护管理提供技术支撑;形成的工法、专利、标准、指南和装置等为今后钢-混凝土混合梁刚构桥的建设与发展提供技术指导与参考,提高我国钢-混凝土混合梁刚构桥的综合建设水平。

本项目由温州市瓯江通道建设有限公司总承担,由交通运输部公路科学研究所(以下简称部公路所)牵头管理,联合大桥设计和施工单位,以及国内著名高等院校、科研院所开展研究工作。浙江省政府和交通运输部已联合聘请桥梁专家组成技术专家组,对项目研究重大技术方案、关键技术难题、成果质量与水平、新技术、新工艺、新材料开发与应用等开展技术咨询;建立了严密的项目管理体系,制定了严格的管理制度,可为项目顺利实施提供管理保障。

1.3. 总体目标

本项目拟通过七个专题的研究,着力解决好瓯江大桥在设计、施工和运营养护等方面存在的关键技术问题,为保障大桥顺利建成和建成后的安全养护管理提供技术支撑;形成的工法、专利、标准、指南和装置等为今后类似混合梁刚构桥的建设与发展提供技术指导与参考,提高我国混合梁刚构桥的建设水平。

本项目的研究内容具有较显著的创新性,其成果将填补国内外混合梁刚构桥设计与施工技术上的空白,提高我国混合梁刚构桥建设水平和在世界桥梁舞台上的竞争力。课题研究成果直接服务于瓯江大桥工程建设,为瓯江大桥健康、顺利、安全投入运营提供技术保障,促进我国钢-混凝土组合结构桥梁设计理念的进步,提供桥梁使用耐久性,培养一批有国际竞争力的桥梁专业化人才队伍。

预计本项目研究成果将达到国际先进水平。

2. 项目前期研究及工作基础

2.1. 国内外技术现状

2.1.1. 国内外混合梁应用及发展

随着桥梁跨度的不断增加,采用单一材料往往很难在结构的力学性能与经济性之间寻求一个更好的平衡点。例如预应力混凝土梁桥,当跨径超过 200m 后主梁重量将很大,其跨越能力将受到限制,而主梁采用钢结构则造价又偏高。为解决这一问题,并充分发挥混凝土梁的压重作用和钢梁跨越能力大的特点,20 世纪 70 年代出现了钢-混凝土混合梁结构,如图 2-1 所示。由图可以看到,由于边跨的压重作用,弯矩图的分布更为合理,且边跨边支座不会出现上拔力。

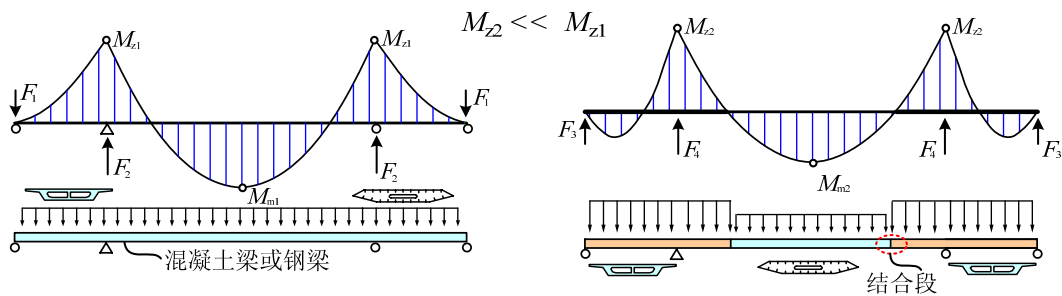


图 2-1 混合梁桥弯矩示意图^[1]

钢-混凝土混合梁通过合理利用钢材和混凝土的材料性能,在受力性能、跨越能力、经济性等方面具有非常显著的竞争优势,在桥梁建设中得到越来越广泛的应用,目前已在梁式桥、斜拉桥、自锚式悬索桥、拱桥、索塔及拱肋等多种形式的桥梁结构中应用^[2]。

(1) 混合梁在斜拉桥中的应用

斜拉桥主梁采用混合梁结构形式时,边跨可起到平衡主跨重量的作用。设计时边主跨比可以取到更小 0.2~0.4,使主跨跨度进一步增大。混合梁的设计理念最早也是出现在斜拉桥结构之中,1972 年,德国建成了世界上第一座混合梁斜拉桥——库特-舒马赫桥,为独塔双索面公路、铁路两用斜拉桥,跨度为 287.04m+146.41m。随着人们对混合梁斜拉桥的认识逐渐深入,欧美等国家建成了多座混合梁斜拉桥,如著名法国的诺曼底大桥(856m)、瑞典的新 Tjorn 桥(366m)等。日本也较早开展混合梁桥的建设。以大阪大和桥(主跨跨径 83m)为起点,陆续建成了多座混合梁斜拉桥^[3]。1985 年建成的秩父桥,主跨跨径为 153m;1987

年建成的十胜中央桥，主跨跨径为 250m；1991 年建成的生口桥，主跨跨径为 490m；1999 年建成的多多罗大桥主跨跨径则达到（890m），是当时世界上跨度最大的斜拉桥。

混合梁斜拉桥的设计理念从上个世纪 90 年代传入中国，很快就得到桥梁工程师的认可，并在多座大跨度桥梁中得到应用，如武汉白沙洲大桥（618m）、天津塘沽海河大桥（310m）、舟山桃夭门大桥（580m）、鄂东长江大桥（926m）、香港汲水门桥（430m）、香港昂船洲大桥（1018m）等。

可以说，钢-混凝土混合梁始于斜拉桥，也繁荣于斜拉桥。斜拉桥是目前应用混合梁最为广泛的一种桥型。表 2-1 给出国内外混合梁斜拉桥的工程实例。

表 2-1 混合梁斜拉桥工程实例

序号	桥名	所在地	年份	跨径（m）	桥型
1	Kurt-Schumacher Bridge	德国	1972	287	独塔斜拉桥
2	zarate-brazo largo	阿根廷	1977	330	斜拉桥
3	Rande Bridge	西班牙	1977	400	双塔斜拉桥
4	Dusseldoff-Flehe Bridge	德国	1978	368	独塔斜拉桥
5	Tjornn	瑞典	1980	366	双塔斜拉桥
6	faroe	丹麦	1985	290	斜拉桥
7	秩父桥	日本	1985	153	独塔斜拉桥
8	Annacis Bridge	加拿大	1986	465	双塔斜拉桥
9	Tampico Bridge	墨西哥	1988	360	双塔斜拉桥
10	emscher schnellweg	德国	1990	310	斜拉桥
11	生口桥	日本	1991	490	双塔斜拉桥
12	Normandie Bridge	法国	1995	856	双塔斜拉桥
13	滨名湖桥	日本	1997	145	独塔斜拉桥
14	上海徐浦大桥	中国上海	1997	590	双塔斜拉桥
15	汲水门桥	中国香港	1997	430	双塔斜拉桥
16	多多罗桥	日本	1998	890	双塔斜拉桥
17	鹤洞桥	中国广州	1998	360	双塔斜拉桥
18	汕头礮石大桥	中国广东	1998	518	双塔斜拉桥
19	台湾高屏溪桥	中国台湾	1999	330	独塔斜拉桥
20	武汉白沙洲大桥	中国湖北	2000	618	双塔斜拉桥
21	木曾川桥	日本	2001	275	四塔斜拉桥
22	揖斐川桥	日本	2001	271.5	五塔斜拉桥
23	友好桥	日本	2001	247	矮塔斜拉桥
24	New Koror-Babeldaob Bridge	帕劳共和国	2002	247	双塔斜拉桥
25	塘沽海河大桥	中国天津	2002	310	独塔斜拉桥
26	Rama VIII	泰国	2003	300	斜拉桥
27	舟山桃夭门大桥	中国浙江	2003	580	双塔斜拉桥

28	ring road	泰国	2004	326	斜拉桥
29	ring road NO.1	泰国	2004	398	斜拉桥
30	湛江海湾大桥	中国广东	2006	480	双塔斜拉桥
31	厦门圆博园 11 号桥	中国福建	2007	112	独塔斜拉桥
32	香港昂船洲桥	中国香港	2009	1018	双塔斜拉桥
33	鄂东长江大桥	中国湖北	2010	926	双塔斜拉桥
34	荆岳长江大桥	中国湖北	2010	816	双塔斜拉桥

注：本表根据文献[1]~文献[11]调研结果，非不完全统计。

(2) 混合梁在梁式桥中的应用

当修建跨线桥梁时，采用整体吊装钢梁桥，既可以利用交通间歇期快捷施工而不影响桥下交通，又可以改善桥梁的造型和美感。通常情况下，跨线桥跨径较邻跨要大，采用混凝土梁作为边跨可有效调整中跨正弯矩，从而改善由于跨径不协调而引起的不利影响^{[1][2]}。因此，桥梁工程师们开始探索将混合梁结构应用于跨线桥梁当中。邻国日本在这一方面开始了较早的尝试，日本于 2000 年建成了新川桥，为一联 5 跨连续梁，跨径为 39.2m+40.0m+118.0m+40.0m+39.2m，如图 2-2 所示。随后相继建成了吉田川桥（76m）、塩坪桥（76.6m）、美濃関桥（158m）和鍍川桥（94.5m），均为连续梁桥且跨度都不是很大。

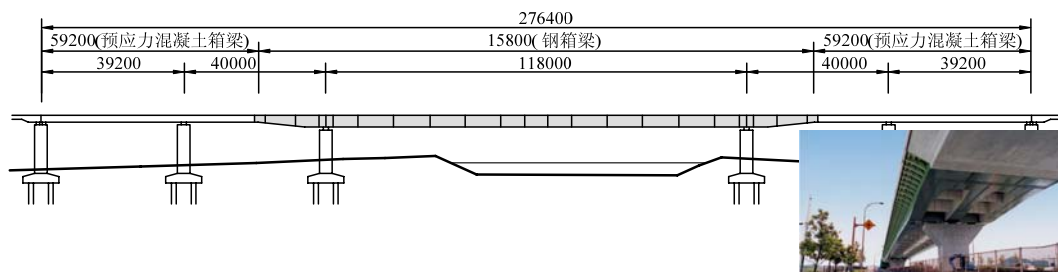


图 2-2 新川桥结构布置图（单位：mm）

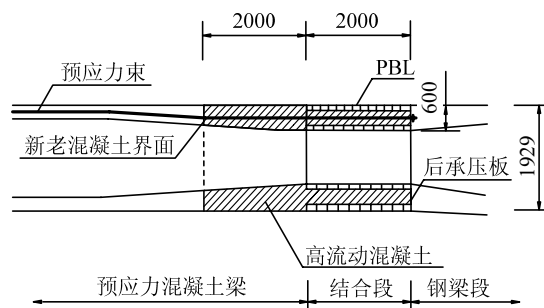


图 2-3 新川桥钢-混结合段构造示意图^[1]

新川桥的钢-混凝土结合段位采用了后承压板式构造，并设置了开孔板连接件，构造如图 2-3 所示。由于空间较小且该部位对混凝土的密实度要求

很高，因此施工时采用了高流动性的自密实混凝土。施工前为此还专门制作了 1:1 的模型进行施工工艺检验。

目前，世界上采用混合梁结构的梁式桥的主跨跨径最大已达到 330m，这一纪录由重庆石板坡长江大桥保持，其跨径组合为 $86.5+4\times 138+330+132.5=1101\text{m}$ ，如图 2-4 和图 2-5 所示。其中，主跨中间部分采用钢梁（长 108m），端部采用混凝土梁（长均为 111m）。利用钢梁自重轻、刚度大的特点，大幅降低了墩梁结合段位的负弯矩，大大提高了连续刚构桥的跨越能力^[13]。为满足纵向温度变形和徐变变形的要求，主跨桥墩采用了双薄壁墩，其余桥墩采用空心墩。除北岸第 1 和第 2 个桥墩上设置滑动支座外，其余桥墩均与主梁固结。采用刚构体系有利于降低维护要求^[14]。

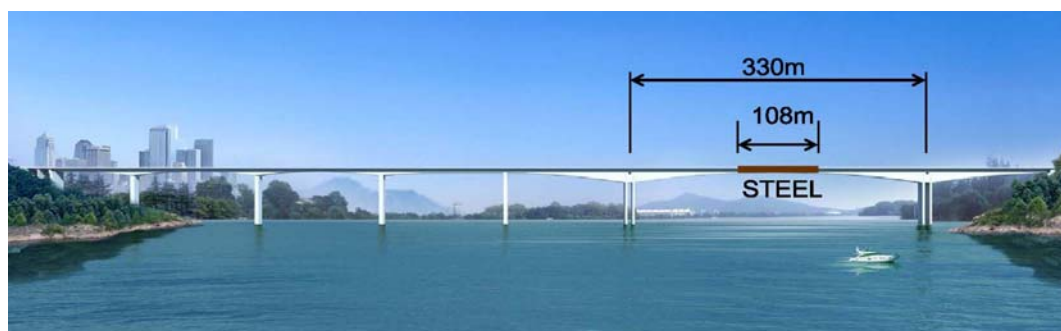


图 2-4 重庆石板坡长江大桥效果图

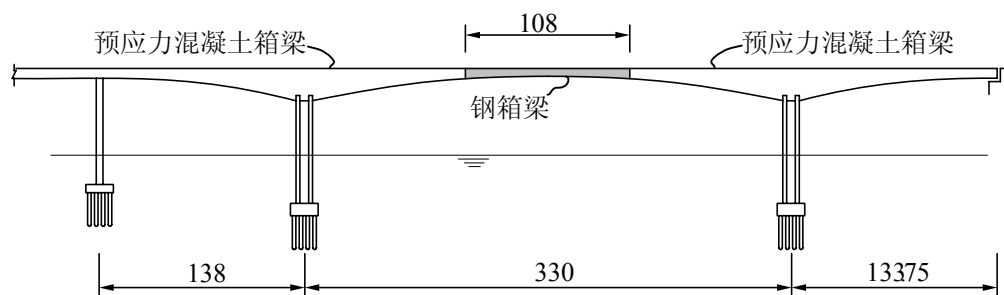


图 2-5 重庆石板坡主桥桥型布置（单位：m）

重庆石板坡长江大桥的钢-混结合段采用填充混凝土的后承压板式（图 2-6）。钢箱梁端部的顶板、底板和腹板做成双壁形式，并在内部填充混凝土。结合段通过开孔板连接件、预应力筋和普通钢筋将相邻的混凝土箱梁和钢箱梁连接成整体。结合段的钢结构纵向长度为 4m，其中钢箱部分长 2.5m，内部填充混凝土的部分长 1.5m。钢箱梁在结合面设置有 50mm 厚的承压板^[13]。

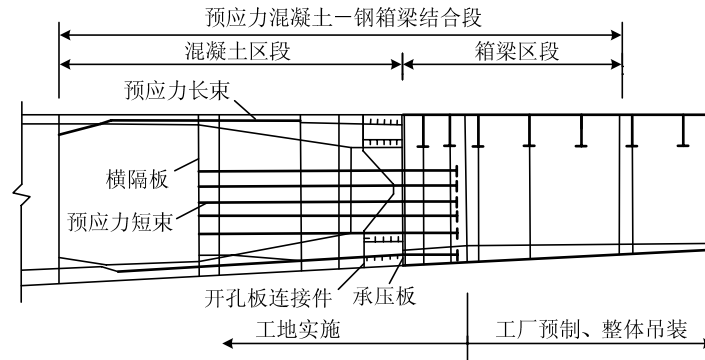


图 2-6 钢-混凝土接头构造图



图 2-7 重庆石板坡钢箱梁整体吊装过程

表 2-2 给出国内外混合梁连续梁（刚构）桥工程实例，相比较而言，混合梁在梁式桥中的应用相对较少，在主跨 200m 以上的连续刚构桥中的应用更是屈指可数，本项目瓯江大桥建成后将成为世界第二大跨度混合梁刚构桥。

表 2-2 混合梁连续梁（刚构）桥工程实例

序号	桥名	所在地	年份	跨径 (m)	桥型
1	新川桥	日本	2000	39.2+40.0+118.0+40.0+39.2	连续梁桥
2	吉田川桥	日本	2001	39.5+76+39.5 71+89+55+8x36	连续梁桥
3	美濃関桥	日本	2004	39.1+2×44+69.5+48.5+3×40 158.1	连续梁桥
4	塩坪桥	日本	2005	75.65+42.25	连续梁桥
5	石板坡长江大桥	中国重庆	2006	86.5+138×4+330+132.5	连续刚构
6	鐙川桥	日本	2008	50+94.5+50	连续梁桥

注：本表根据文献[1]~文献[11]调研结果，非不完全统计。

（3）混合梁在自锚式悬索桥和拱桥中的应用

当混合梁在斜拉桥和梁式桥中取得显著的综合效益后，桥梁工程师们开始积极探索混合梁在自锚式悬索桥和系杆拱桥中的应用。广东佛山平胜大桥（主跨 350m）是世界上第一座采用混合梁的自锚式悬索桥，主跨采用钢箱梁，边跨（锚跨）采用混凝土梁，如图 2-8 所示。这样做突出的优点是能够充分适应桥位地形，减小边跨跨度，有效节省投资，减小了主缆内力和边跨端支点的负反力，从而增加悬索桥的跨越能力。随后建成的主跨 280m 的宁波甬江庆丰桥（见图 2-9）和主跨 235m 的福州鼓山大桥（见图 2-10）均采纳这一设计思路^[15]。



图 2-8 广东佛山平胜大桥



图 2-9 宁波甬江庆丰桥



图 2-10 福州鼓山大桥

对于系杆拱桥，拱脚附近的混凝土主梁，与混凝土拱脚、预应力混凝土引桥连接成一体形成肋间平台，并为系杆提供锚固。主跨为 300m 的广东佛山东平大桥即采用这一设计思路^[16]，如图 2-11 所示。



图 2-11 广东佛山东平大桥

(4) 混合梁在索塔及拱肋中的应用

在国内外已有的钢索塔混合梁结合段和钢拱肋混合梁结合段的连接形式主要有埋入式和承压锚固式两种连接形式，如图 2-12 和图 2-13 所示。埋入式连接主要是将钢桥塔和钢拱肋的底端部分节段埋入混凝土承台中，通

过预先设置的抗剪连接件实现钢桥塔（钢拱肋）与混凝土塔座（拱座）之间的有效连接，采用这种连接方式的代表性工程有南京长江三桥钢索塔结合段（648m），重庆菜园坝长江大桥拱肋结合段（420m），广西南宁大桥拱肋结合段（300m）等，如图 2-14~图 2-16 所示。

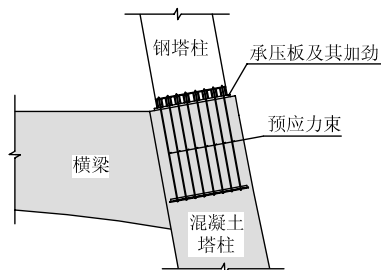


图 2-12 承压锚固式^[1]

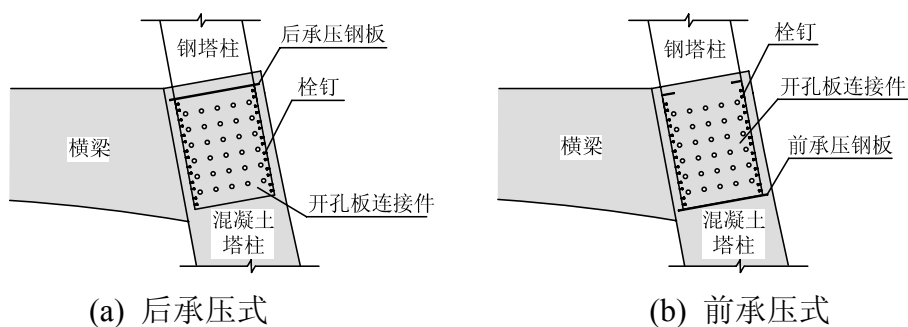


图 2-13 埋入式^[1]

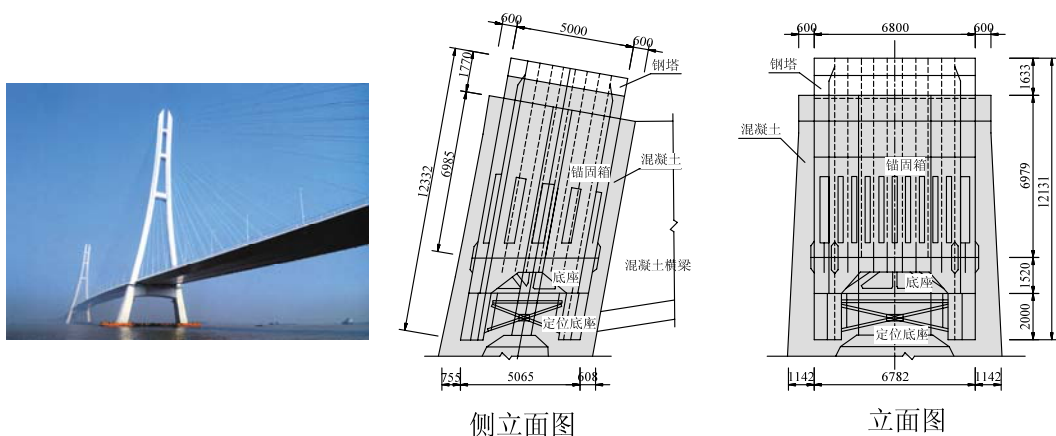


图 2-14 南京长江三桥索塔结合段构造图（单位：mm）^[1]



图2-15 重庆菜园坝长江大桥



图2-16 广西南宁大桥

承压锚固式连接主要是通过混凝土承台中埋设高强度的预应力螺杆或预应力高强度钢绞线实现钢桥塔与混凝土承台的有效连接。在这种连接方式中，塔柱（拱肋）根部的压力通过承压板和板底压浆层传递到混凝土，而弯矩和剪力则是通过锚固螺栓或预应力筋传递，如美国的新港桥、维拉扎诺桥，日本的横滨海湾桥、彩虹桥、生口桥等都采取了承压锚固式连接方式。我国三塔连跨悬索桥泰州长江大桥（ $2 \times 1080\text{m}$ 三塔连跨悬索桥）中塔钢-混结合段亦采用该连接方式，正在建设当中的杭州之江大桥（主跨 248m 拱塔斜拉桥）亦采用该种连接方式，如图2-17~图2-18所示。



图 2-17 泰州长江大桥



图 2-18 浙江瓯江大桥

2.1.2. 混合梁刚构桥设计施工关键技术研究现状

截止目前，混合梁结构绝大多数主要应用于斜拉桥结构当中，国内外许多学者对此开展了细致而深入的研究工作，包括理论分析、试验研究、数值仿真等方面，凝练出一部分研究成果，为混合梁斜拉桥设计与施工提供了科学参考依据。但是，连续刚构桥受力性能与斜拉桥存在明显的差异、例如结合段钢-混凝土界面处在斜拉桥中主要承受轴力作用，而在连续刚构桥中则需要承受较大的弯矩和剪力作用，导致连续刚构桥中的钢-混结合段的构造也要有别于斜拉桥中的结合段。目前，主跨在 200m 以上的混合梁刚构桥仅重庆石板坡长桥大桥进行了初次

尝试,虽然在跨度上创造了世界第一的记录,但是针对该种特定的桥梁结构形式,其中仍然存在许多问题尚未完全得到解答。例如钢-混结合段位置的合理优化设置、体外(内)预应力合理优化布置、钢-混结合段传力机理及承载可靠性、钢-混结合段疲劳性能及耐久性能、钢-混结合段混凝土合理浇筑工艺、钢-混结合段桥面铺装优化设计、大跨混合梁刚构桥的施工控制技术、大跨混合梁刚构桥健康监测与养护管理系统等等,上述这些问题都是混合梁刚构桥应用于工程实践中亟待解决的问题。

(1) 混合梁刚构桥结构整体承载性能

从结构受力宏观层面上看,混合梁刚构桥与混凝土连续刚构桥相似,但是混合梁刚构桥在构件层次上由不同材料组成,两种材料在受力性能上存在显著差异,以往的研究工作主要侧重于混合梁结合段的承载性能和构造措施的研究,而针对混合梁整体承载性能的研究涉及较少。目前,国内尚未有一本完善的混合梁结构桥梁的设计规范或技术指南指导混合梁桥的设计与施工,通常的做法是混凝土梁按混凝土桥设计规范执行,钢梁按钢桥设计规范执行。但是,在我国桥梁设计规范体系中,混凝土桥和钢桥的设计方法存在显著差异,混凝土桥采用基于概率理论基础的极限状态设计方法(JTG D64-2004),钢桥则仍然采用容许应力法(JTJ025-86),同一桥梁同时采用两种设计方法势必造成承载可靠度的混淆不清。另一方面,钢梁和混凝土梁刚度差异大,钢-混结合段是连续刚构桥中的刚度突变点。若设计不当容易造成刚度的跳跃,变形出现折角,桥面系行车不顺,造成跳车等现象,进而产生冲击荷载对结合段附近的钢箱和混凝土梁的桥面系造成局部破坏。此外,温度作用、混凝土收缩徐变、支座沉陷等都会在连续刚构桥中产生附加内力,对桥梁运营安全性产生不利影响,但是目前国内外尚未对此开展细致深入的研究工作。因此,为保证混合梁结构能够安全可靠地传递外部荷载,从设计方法上保证混合梁中两种材料安全度匹配,深入开展混合梁结构整体承载性能方面的研究对保障桥梁安全运营意义非常重大。

此外,大跨径预应力混凝土连续刚构梁桥长期下挠问题一直是困扰工程界的一个难题。主跨采用混合梁结构时,大幅减少了混凝土用量和现场湿作业量,从表面上看,混凝土收缩徐变效应对桥梁结构长期变形的影响相应减弱。但是,在混合梁刚构桥中,混凝土的收缩徐变由于受到钢结构的约束,必然会引起截面应

力的重分布以及结构内力的重分布。连续刚构桥由于架设方法和施工工艺的要求,施工期间存在多次结构体系转换,混凝土梁段受力状态十分复杂,使得分析混凝土收缩徐变等长期效应的影响更加困难。因此,有必要结合试验、数值仿真等研究手段对混合梁刚构桥的长期受力特性进行研究,建立混合梁刚构桥长期变形预测机制。

(2) 混合梁刚构桥结构优化设计

混合梁刚构桥结构优化设计包括混合梁边主跨比、钢-混结合段的合理优化设置、梁高以及梁底曲线指数、体内(外)预应力合理优化配置等方面。预应力混凝土连续刚构桥是一种应用非常广泛的桥梁结构形式,适合主跨跨度区间100m~300m。根据国内外多年的工程实践经验,预应力混凝土连续刚构桥合理边主跨比区间在0.5~0.65范围内,支点梁高约为 $(1/17 \sim 1/20)$ 主跨跨径,跨中梁高约为 $(1/50 \sim 1/60)$ 主跨跨径^{[26]~[28]}。主梁通常采用变高度,梁高沿纵向的变化曲线可以是抛物线、半立方抛物线、正弦曲线、三次曲线、圆曲线。一般常用2次抛物线,但采用2次抛物线的变截面形式,往往在 $L/8 \sim L/4$ 截面区域,底板混凝土应力紧张;采用幂次为1.5~1.8的抛物线,能缓和这个区域底板应力紧张的情况^{[29]~[35]}。

当主跨全部或部分采用钢梁之后,主跨自重显著降低,主跨跨越能力显著增加,而边跨仍然采用混凝土梁形式,一方面给主跨提供很好的配重作用,避免边支点出现负反力,因而边主跨比可以较混凝土连续刚构桥做到更小;另一方面通过调整边主跨比和中跨钢梁段的长度可以对支点负弯矩和中跨正弯矩进行调整,因此针对特定的情况必然存在一个合理边主跨比和结合段合理设置位置,使得混合梁刚构桥在受力和经济之间找到一个平衡点。当结构自重降低之后,混合梁刚构桥的跨越能力自然增加,如果仍然采用预应力混凝土连续刚构桥推荐的设计参数(包括梁高、梁底曲线函数、截面尺寸等),势必造成不必要的材料浪费,同时也不利于桥梁造型和美感,因而有必要寻到一组优化的混合梁刚构桥的设计参数。

此外,当刚构桥主跨采用混合梁结构时,根据受力的需要,通常在预应力混凝土梁内部布置体内预应力筋,同时在全桥(尤其在主跨)会适当布置体外预应力筋,在结合段区段内甚至会布置一些预应力短束。如何设计和合理配置这些预

应力束是混合梁刚构桥设计中所必须面临的问题，也是混合梁刚构桥特有的问题。

(3) 钢-混结合段传力机理及承载可靠性试验研究

对于混合梁刚构桥，其结合段构造是设计的关键。结合段由于结合段两侧采用不同的材料，构造形式复杂多样。根据结合段中各部件的功能作用，结合段的构造一般可以分为以下四个部分^[1]：

1) 填充混凝土的钢格室结构

可以将结合段的钢桥面、腹板及下底板做成双壁结构形成钢格室。钢格室的高度应考虑填充混凝土应力分散所需的面积、格室内进行焊接的操作空间、预应力筋的张拉及锚固作业空间、填充混凝土施工的方便性及构件加工制作可行性等因素。钢格室的长度应考虑从钢格室传递到填充混凝土部分的应力分散、应力传递状态及应力传递所需要的抗剪件配置数量等。

2) 抗剪装置

为防止钢板与混凝土之间的剥离，可在钢桥面板、腹板、下翼缘板及钢格室靠近混凝土的一侧设置抗剪件。抗剪连接件包括栓钉、开孔板连接件等类型，应根据实际需要选用。

3) 预应力

为了使钢箱梁与混凝土箱梁紧密结合，一般应在结合段设置预应力钢筋。预应力的由结合面所需抵抗的弯矩及轴力确定，宜使结合面在各种内力组合下均不出现拉应力。为提高锚固效果，宜采用长短束结合的布置方式。

(4) 钢主梁加强段

为了使钢主梁加强段的钢桥面板、斜腹板及下底板的应力与填充混凝土梁段的应力扩散相一致，可设置加强肋板。这些肋板与钢桥面板、斜腹板及下底板形成了一系列 π 形或U形结构，可使应力扩散更趋均匀。

基于混合梁传力机理的差别，日本曾对结合段的构造连接型式进行分类：

第一是全截面钢板连接的前承压板方案（见图2-19 a）），依靠承压钢板承受梁体的纵向压力。为提高承压板的刚度，在钢梁端设置纵横向隔板形成格室。此方案在连接处的应力分布较均匀，但构造复杂。

第二是全截面填充混凝土的结合方案（见图2-19 b））。为了把钢梁顶、底板

和腹板上的力传递到整个混凝土梁截面，在钢箱梁梁端内部填充混凝土。该方案中钢梁到混凝土梁的应力传递较为均匀，但局部构造也较为复杂。

第三是局部承压方案（见图2-19 c）。钢箱梁内的轴力主要集中在顶、底板和腹板位置，通过在梁端这些部位设置承压板，可以将钢梁内力直接传递到混凝土梁的顶、底板和腹板。这种构造方式传力明确，但为有效传力，承压板的厚度较大，且存在一定的应力突变。

第四是部分填充混凝土的承压板方案（见图2-19 d）。在第三种方案的基础上，钢梁端部的顶、底板和腹板形成双壁构造。施工时在两层钢板内填充无收缩混凝土。这种方案的截面变化较为和缓，应力传递均匀，且可避免使用很厚的承压钢板。

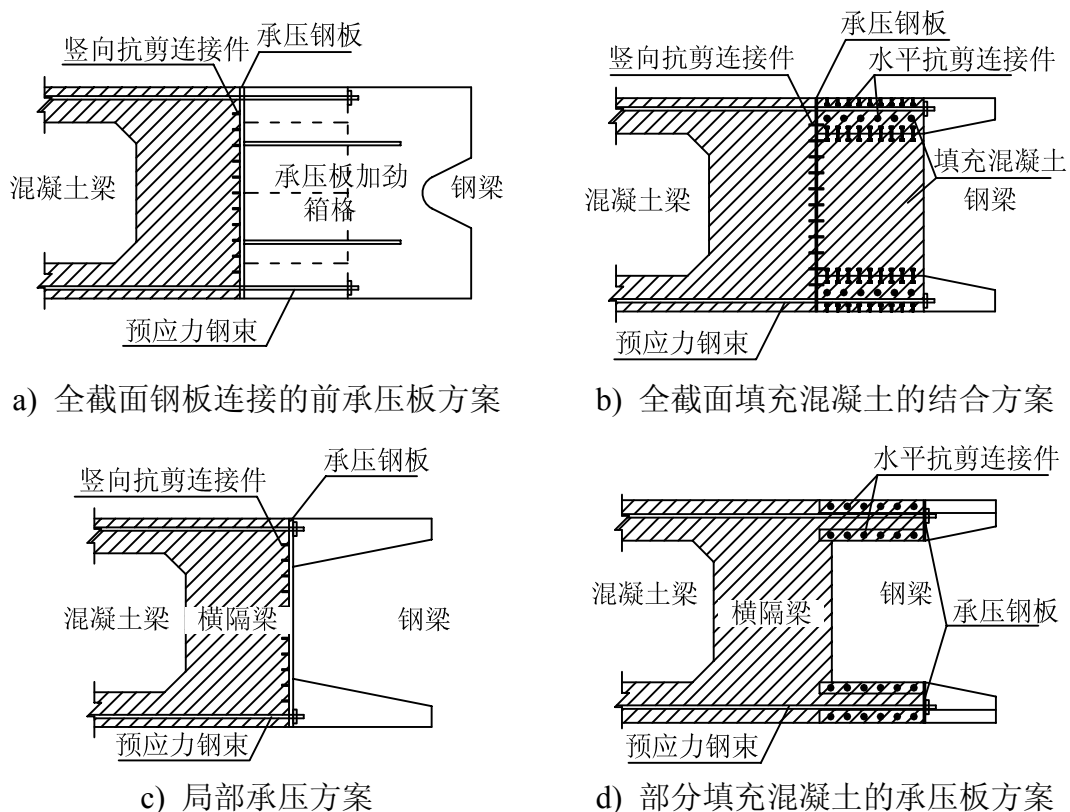


图 2-19 钢-混结合段连接构造形式

结合段是混合梁桥的重要组成部分。结合段位置的合理性与构造的可靠性，是影响混合梁桥设计施工的关键问题。结合段设计时，在功能上应能够使各种内力（轴力、弯矩、剪力、扭矩）在钢梁与混凝土梁之间可靠、顺畅传递。在构造上应使两部分梁体外形协调一致，尽可能避免刚度和强度突变，保证结合段具有良好的抗疲劳性和耐久性。由于混合梁结合段构造形式多样，传力复杂，且无成

熟的设计规范可参照，而结合段的承载可靠性又是混合梁桥设计中的重中之重，因此，国内外大多数混合梁桥结合工程实践，开展了混合梁结合段的模型试验研究和数值仿真等方面的工作，包括鄂东长江大桥^[36]、重庆石板坡长江大桥^[41]、佛山平胜大桥^[37]、佛山东平大桥^[38]、南昌英雄大桥^[39]、舟山桃夭门大桥^[42]、广西南宁大桥、厦门圆博园大桥^[40]等。但是由于受试验条件和模型尺寸的限制，上述混合段比例模型试验均未完成破坏性试验，而仅是验证了工程设计的承载可靠性及安全性。这样做对于寻找混合梁结构的最终破坏形态，研究其传力机理及承载性能是不够的。此外，结合段中的钢格室通常需要布置大量剪力连接件以保证钢梁与混凝土梁的连接性能，剪力连接件成为了结合段构造中十分重要的组成部分。早期混合梁结合段主要采用焊钉连接件形式，但是由于实际工程中需要布置的焊钉连接件数量巨大，现场焊接工作量大，因此在鄂东大桥工程实践中，提出了采用开孔板连接件（PBL）主要用于混合梁传剪，采用开孔板连接件施工相对便捷，且抗疲劳性能好。文献[66]对开孔板连接件的抗剪承载力开展了较为系统的研究工作，并提出的开孔板连接件抗剪承载力简化设计方法，但是对结合段中的连接件抗疲劳性能尚未开展系统的研究工作。

综上所述，虽然国内外针对混合梁结合段受力性能开展了大量的研究工作，也取得了一部分有价值的科研成果，但仍存在以下几方面的不足：1）至今尚未提炼出混合梁结合段承载力计算实用设计方法，工程设计中多以经验为主，辅以试验和数值仿真验证分析；2）对混合梁结合段传力机理尚未完全明确，包括混合梁各部件在结合段中的实际工作状态如何，各部件荷载承担比例等等；3）受试验加载能力、模型试验尺寸等条件限制，对混合梁结合段试验均未进行过破坏性试验，无法评估结合段实际承载性能及安全储备。

(4) 钢-混结合段疲劳荷载谱及疲劳性能试验研究

随着国民经济的快速发展，公路交通量、车辆重量和车速都大幅提高，活载的反复作用使得钢结构在其应力值未达到屈服点时发生疲劳破坏。我们知道，结合段在混合梁桥中的地位是举足轻重的，且其构造十分复杂，一旦出现疲劳破坏，往往是不可修复的，而且疲劳断裂具有突然性，我国现行的《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》（JTJ025-86）颁布使用至今已近二十年之久，与当前钢桥大规模建设和发展极不相称，钢桥规范中的疲劳部分起不到指导设计的作用。针对混

合梁结合段的抗疲劳设计方法（包括连接件的抗疲劳设计方法）目前国内外均无规范可依，因此，开展混合梁结合段的疲劳性能研究是十分必要的。

(5) 海工混凝土强度现场检验与耐久性评估技术

目前，混凝土强度常用的检测方法包括无损检测方法、半（微）破损检测方法、综合检测方法等三类，其中无损检测方法是以前不影响结构或构件混凝土任何性能为前提，以混凝土抗压强度与部分物理量之间相关性为基础的检测技术，较有代表性的有：回弹法、超声脉冲法、射线吸收与散射法、成熟度法等；微破损及综合检测方法有钻芯取样法、拔出法、射钉法，超声-回弹综合法、超声-钻芯综合法、声速衰减综合法等等。其中，回弹法具有仪器构造简单、测试方法易于掌握、检测效率高、费用低廉，影响因素较少等优点，特别适用于施工现场对结构混凝土的强度进行随机的、大量的检验，但是此方法受混凝土表层质量的影响，因而难以精确推定混凝土的内部强度，回弹法已成为我国应用最广泛的无损检测方法之一。但是，目前的回弹法技术规程中的测强曲线对于混凝土的适用龄期相对较短，《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T23-2001）中规定的统一曲线适用龄期为 7-720 天，对于多年甚至长达几十年的桥梁混凝土，若按此种曲线推定混凝土强度，将产生较大的误差。同时，统一测强曲线仅适用于不掺外加剂和非引气剂外加剂的普通混凝土，一般海工混凝土为提高耐久性较普通混凝土通常会掺加较多的粉煤灰和外加剂。因此目前的回弹法检测混凝土抗压强度技术规范难以满足对于海工混凝土长期强度的检测要求。

对于海工混凝土结构则由于海洋环境中氯离子极强的穿透力和去钝化作用而使钢筋钝化膜容易遭到破坏并使其产生锈蚀，钢筋一旦发生锈蚀其体积将逐渐膨胀直至达到原钢筋体积的 2-10 倍，这将对保护层混凝土产生很大拉应力，当拉应力超过混凝土抗拉强度时混凝土保护层将开裂、起层、剥落甚至使结构失效。当混凝土结构有了上述可见劣化特征时钢筋已经严重锈蚀，而且因氯离子引起的钢筋锈蚀多为点蚀，部分钢筋截面的减少很容易在钢筋混凝土结构内部引起应力集中，这不仅使结构使用寿命大大降低，而且维修成本也大幅度提高。因此建立海工混凝土的耐久性评估技术对提高桥梁结构使用寿命、降低维养成本具有十分重要的意义。

(6) 大跨径混合梁刚构桥施工控制技术

对于混合梁的施工，斜拉桥与刚构桥相差较大，混合梁斜拉桥中的钢结构部分主要在主跨范围内而混凝土部分主要在边跨范围内，结合段通常在靠近索塔附近，而混合梁刚构桥的主跨是由钢结构和混凝土结构两部分组成，结合段的位置位于主跨三分之一梁段长度附近。对于混合梁斜拉桥多采用悬臂施工方法，通过调整斜拉索索力控制主梁的标高和线形；对于象瓯江大桥这种主梁采用混合梁的刚构桥而言，在主跨侧的混凝土梁段采用挂篮悬臂施工方法，施工中需对混凝土主梁的线形及标高进行精确控制，才能确保钢箱梁的顺利合龙安装。

由于混合梁钢-混结合段在斜拉桥和刚构桥中的位置不同，导致了结合段施工工艺有所不同。在斜拉桥中结合段靠近索塔附近，通常采用支架施工，对于结合段钢结构的定位、混凝土的浇筑都是在支架上完成；而对于结合段在主跨中间部位的刚构桥首先依靠吊机起吊结合段的钢结构，并通过临时设备来安装定位结合段的钢结构，再搭设浇筑混凝土的模板并浇筑混凝土。由此可见，刚构桥中结合段的安装和施工要比斜拉桥结合段施工复杂和困难。

对于瓯江大桥这种新型结构形式的桥梁，其施工和安装中的误差以及误差对结构的影响与常规的桥梁结构有所不同。这些误差产生有可能来自于混凝土梁段的施工、钢结构梁段的加工制造、结合段的安装定位等等。这些误差对后续结构的安装产生何种影响，以及考虑温度荷载、风荷载等作用引起结构的变形，都会对瓯江大桥的施工速度和质量产生一定的影响。

(7) 瓯江大桥竖向及体外预应力沿程状态感知及控制技术

传统的预应力混凝土连续刚构桥一般采用三向预应力技术，但是由于竖向预应力钢筋长度较短，预应力损失严重，严重的甚至在运营若干年之后预应力损失殆尽。由于混凝土收缩徐变效应及预应力损失行为的存在，导致预应力混凝土桥梁在运营 10~20 年之后便出现了明显的病害，例如腹板开裂，桥梁长期下挠等问题，这些病害犹如混凝土桥梁中的“癌症”，很难彻底根治，且严重影响桥梁运营安全型。因此，工程界十分关心预应力钢束在桥梁中的实际应力分布情况，但目前的检测方法和手段尚达不到这一要求，预应力钢束应力沿程状态感知与识别技术是提高施工质量和服役能力的有效手段。虽然已在理论和设计规范中提供了预应力损失的计算方法，但与预应力实际分布状态尚存差距，诸多不确定因素仍然难以量化。另一方面，瓯江大桥主跨采用混合梁结构，为保证钢梁和混凝土有效

连接并改善其承载性能，在混合梁内部布置了体外预应力束，体外预应力的实际工作状态直接影响到混合梁的承载可靠性。因此，开展瓯江大桥竖向及体外预应力沿程状态感知及控制技术研究具有显著的社会经济效益。

(8) 混合梁刚构桥桥面铺装设计与施工技术

目前我国对钢桥面铺装成败的原因已有比较深刻的了解，对英美日等国的引进技术的优缺点也有了深刻的了解和一定的改进，但还缺少拥有自主知识产权的创新型钢桥面结构和成套铺装技术。常采用的双层 SMA、单层浇注式沥青混凝土、双层环氧沥青混凝土等技术方案，路用效果并不理想，都不同程度出现了比较严重的早期损坏，双层环氧沥青铺装方案虽然也有成功的案例，但由于施工工艺复杂、施工条件苛刻、材料造价高等因素，使其使用效果受到很大限制。针对瓯江大桥，结合段两端的钢梁和混凝土刚度差异显著，在汽车荷载反复作用下，桥面铺装较其他位置更容易出现病害情况，武汉白沙洲大桥（混合梁斜拉桥）“10 年 24 次大修”引起极大的社会影响，同时也为国内同类型桥梁建设提供了前车之鉴。因此，根据瓯江大桥实际情况，非常有必要也有责任针对瓯江大桥现实的交通、荷载和气候，自主研发一套质量可靠度更高、施工更便捷、费用相对更低廉且维修方便的桥面铺装技术。

(9) 基于特征数据的瓯江大桥健康监测与养护管理技术

桥梁结构的安全监测、施工质量控制及结构功能状况是保证桥梁安全施工和运营的重要手段，自 20 世纪 50 年代以来，国内外就逐渐意识到桥梁安全监测的重要性，但由于早期监测手段相对落后，所以在应用上受到一定的限制。近年来，随着大跨径桥梁建设的飞速发展，以及监测分析技术的不断提高，桥梁结构的安全监测已成为国内外学术界、工程界的研究热点。目前，多数国家都在一些在建和已建的大跨径桥梁上进行有益的尝试。国外 80 年代中后期开始建立各种规模的桥梁安全监测系统，如丹麦对跨径 1726m 的 Faroe 跨海大桥（斜拉桥）进行施工阶段及通车后的安全监测，以检查关键的设计参数，监测施工危险阶段并获取桥梁健康记录；泰国和韩国也在一些重要桥梁上安装永久性的实时结构整体与安全性预警设备；建立安全监测系统的典型桥梁还有挪威的 Skarnsundet 斜拉桥（主跨 530m）、美国主跨 440m 的 Sunshine Skyway Bridge 斜拉桥、英国主跨 194m 的 Flintshire 独塔斜拉桥以及加拿大的 Confederation Bridge 桥等。我国自 90 年代

起也在一些大型重要桥梁上建立了不同规模的结构监测系统，如香港的青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥，内地的上海徐浦大桥、江阴长江大桥、苏通长江大桥等。从已经建立的监测系统的监测目标、功能以及系统运行等方面看，普遍存在桥梁施工阶段监测系统与运营阶段监测系统未形成一体化、监测系统与桥梁维护脱节、监测系统与养护系统脱节等问题。此外国内外多数特大桥均在建设期建立了相应的建设项目管理系统和质量控制系统等，对施工质量、进度的有效控制发挥了积极的作用。

从这些前期工作和研究现状可以看出，目前国内外尚未形成系统的桥梁生命过程施工-运营-养护一体化管理与监测系统，在桥梁施工与运营管理信息集成方面还相差甚远。因此针对瓯江大桥开展基于特征数据的施工-运营-养护一体化管理与监测系统研究有十分紧迫和现实的意义。

综上所述，混合梁刚构桥充分利用钢材和混凝土优越的受力性能，具有显著的社会经济效益，是一种值得广泛推广的桥梁结构形式。根据国内外文献调研结果，钢-混凝土混合梁在国内外许多大跨度桥梁工程中（尤其是混合梁斜拉桥）得到了广泛应用，且取得较为显著的社会经济效益。由于混合梁结构构造形式多样，受力十分复杂，国内外针对混合梁结构开展了大量的研究工作，取得部分研究成果，但主要针对混合梁斜拉桥这一类桥型。混合梁刚构桥的受力模式与斜拉桥存在明显的差异，目前，我国在混合梁刚构桥方面建设经验较少，开展的科学研究工作相对较少，针对混合梁刚构桥许多特有的关键技术问题尚未得到很好的解答，例如混合梁刚构桥的整体承载性能及结构优化设计、钢-混结合段的传力机理及抗疲劳设计方法、海工混凝土现场强度检测及耐久性评估技术、混合梁刚构桥过渡段桥面铺装处理技术、混合梁刚构桥整体吊装施工控制技术、混合梁刚构桥预应力状态感知及控制技术、混合梁刚构桥健康监测及管理系统等等。上述这些问题是混合梁刚构桥设计与施工中所必须面临的问题，也是瓯江大桥建设亟待解决的问题。

因此，有必要以瓯江大桥为示范工程，结合工程建设情况，从设计、施工、检测、管理等方面开展深入系统的研究工作，对上述关键问题进行技术攻关和整体提升。一方面科研成果直接服务大桥建设，为大桥安全、有序、标准化建设提供技术支撑；另一方面凝练桥梁行业共性技术，形成混合梁刚构桥设计施工成套

关键技术，为今后同类型桥梁建设提供科学参考依据，丰富我国桥梁建设经验，提高我国桥梁建造技术国际竞争力。

2.2. 现有工作基础

2.2.1. 工作基础

本项目团队包括温州市瓯江通道建设有限公司、交通运输部公路科学研究所、浙江省交通规划设计研究院、中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司、同济大学、中交第一公路工程局有限公司等多家单位，科研和技术力量雄厚。

课题承担单位之一交通运输部公路科学研究院，在大跨径桥梁设计、施工、监测和科研方面有大量的工作业绩，具有承担本项目的工作基础。在结构方面，对钢结构包括钢箱梁设计与施工存在的主要技术问题、钢-混凝土组合结构设计及施工存在的关键技术问题、对预应力混凝土连续箱梁三向预应力设计及存在的主要技术问题、大桥健康监测与养护管理及存在的主要技术问题等方面都积累了丰富的科研成果，具备良好的研究基础；在计算分析方面，公路所具备国内一流的计算机工作站，自主研发桥梁专业化计算分析软件（GQJS），成功服务国内许多大型桥梁工程设计与施工。同时熟练掌握目前常用的结构分析软件如 Abaqus、Marc、ANSYS、TDV、MIDAS 和桥博等。在桥梁结构模型试验方面有较好的基础，如虎门悬索桥全桥模型试验、泰州大桥全桥模型试验、高墩大跨径弯桥模型试验，以及桥面铺装、索塔锚固区、预应力摩阻试验等方面有较多的工程业绩。在健康监测与养护管理方面，先后承担广东虎门大桥、南京二桥、江阴长江大桥、军山大桥、南京三桥、黄石大桥、杭州湾跨海大桥、广东珠江黄埔大桥、杭州下沙大桥、苏通大桥和杭州瓯江大桥等健康监测系统或维护手册的编制及养护管理系统的研发工作，这为实现特大型桥梁实时监测系统提供了有利的经验。

2.2.2. 承担的相关课题

课题承担单位之一交通部公路科学研究院，是交通部公路交通领域唯一一所直属交通部的科研院所，是我国公路交通领域综合性的技术研究开发基地，多年来一直从事与公路桥梁等土木工程学科相关的科学研究工作。建议单位与本课题相关的专业方向为桥梁工程，在这个领域有丰富的科研基础，长期以来承担了国家相关部门、交通部和一些省市的重大科研项目。其中，已完成国家重大科

技攻关项目11项，正在承担着国家科技支撑计划2项、863项目5项、交通部下达的重大科研任务30余项，承担国家与部级交通行业标准规范的制定、修订工作及研究课题90项。自2005年至2009年我院共获科研成果130余项，共获得国家和省部级科技进步奖40余项。项目承担单位承担的相关科研项目如表2-3所示。

表 2-3 项目组承担的主要相关科研项目

序号	项目名称	项目来源
1	多塔连跨悬索结构及工程示范	国家科技支撑项目
2	预制节段拼装波形钢腹板 RPC 箱梁抗弯性能研究	国家自然科学基金项目
3	波形钢腹板预应力组合箱梁的动力特性及动力响应研究	国家自然科学基金项目
4	钢桥设计施工成套技术研究	西部交通建设科技项目
5	钢桥面沥青铺装养护及维修技术研究	西部交通建设科技项目
6	超长钻孔灌注桩承载性能的研究	西部交通建设科技项目
7	钱塘江三桥桥面铺装项目研究	工程配套科研项目
8	杭州湾大桥健康监测系统预研	工程配套科研项目
9	杭州湾大桥健康监测	工程配套科研项目
10	拱形钢塔斜拉桥建设和养护关键技术与工程示范	工程配套科研项目
11	嘉绍大桥设计与施工关键技术研究	工程配套科研项目
12	山东鄞城桥：70m+11×120m+70m 波形钢腹板预应力混凝土箱形连续梁施工控制	工程配套科研项目
13	河南桃花峪黄河大桥：（75+135+75）m 施工控制	工程配套科研项目
14	既有桥梁结构测试数据采集优化、识别及安全评价研究	西部交通建设科技项目
15	桥梁无线检测技术的研制与开发	西部交通建设科技项目
16	基于 SMA 的智能混凝土梁桥性能研究	西部交通建设科技项目
17	斜拉桥旧桥加固、换索与调索技术研究	西部交通建设科技项目
18	大跨径预应力混凝土梁桥主梁下挠原因分析与对策研究	西部交通建设科技项目
19	大跨径桥梁监测、加固、养护成套技术研究	西部交通建设科技项目
20	预应力桥梁三维有限元仿真及力学性能研究	西部交通建设科技项目
21	山区不对称连续刚构桥设计与施工技术与工程示范	西部交通建设科技项目
22	高墩大跨径弯桥设计与施工技术研究	西部交通建设科技项目
23	波形钢腹板预应力连续梁桥设计与施工技术研究	西部交通建设科技项目

2.2.3. 试验手段及协作条件

项目团队具有较先进的试验手段及协作条件。公路所配备大型桥梁结构试验室，在桥梁损伤评估、桥梁结构耐久性、结构疲劳、桥梁动力特性等前沿学科方向具备了突出的研究能力。装备有目前国内加载能力最大的电液伺服试验加载系统（单个促动器加载能力 2000kN，总加载能力 7700 kN），最大的多功能人工气候老化箱，国内最大的桁架式桥梁检测平台（臂展 21.5m），具有国际先进水平的自动电位滴定仪、电化学测试系统、氯离子扩散性测试系统、混凝土渗透仪、磁粉探伤仪、磁通量检测仪、混凝土雷达检测仪、GPS 变形测试系统、预应力钢绞线松弛试验机等先进的试验仪器，另外还有大量具有国内先进水平的桥梁试验检测设备，为从事桥梁工程技术研究提供了较完善和坚实的基础硬件条件。



图 2-20 电液伺服试验加载系统

此外，公路所具备一台足尺路面试验系统，是目前国际上比较先进的试验验证手段，加速加载试验系统(Accelerated Loading Facility 简称 ALF)是一套可移动式野外足尺路面试验设备，可对桥梁路面施加可控制的车轮荷载，在足尺试验结构上、模拟实际交通荷载对桥梁路面结构的破坏作用。ALF 系统于 1984 年由澳大利亚新南威尔士州公路局研制完成，目前全世界共有 5 台加速加载试验系统应用于沥青路面性能研究，其中美国联邦公路局 Turner-Fairbank 公路研究中心 2 台，路易斯安那州公路研究中心 1 台，澳大利亚道路研究所和我国交通部公路研究所各 1 台。



图 2-21 加速加载试验系统(Accelerated Loading Facility)



图 2-22 加速加载试验系统(Accelerated Loading Facility)

参考文献

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M].北京: 人民交通出版社,2011.
- [2] 徐国平, 刘高, 吴文明, 唐亮. 钢-混凝土结合部在桥梁结构中应用新进展[J].公路, 2010, (2) : 18-22.
- [3] 若下藤纪. 混合斜拉桥. 日本: 桥梁与基础, 1985(8): 75-80.
- [4] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.
- [5] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [6] 刘玉擎. 混合梁接合部设计技术的发展[J]. 世界桥梁, 2005, (4): 9-12.
- [7] 陈开利, 余天庆, 习刚. 混合梁斜拉桥的发展与展望[J]. 桥梁建设, 2005, 2: 1-4.
- [8] 刘士林. 斜拉桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [9] 宋晖. 舟山大陆连岛工程桃天门大桥创新设计[C]. 2006 年全国桥梁学术会议, 北京: 人民交通出版社, 89-96.
- [10] <http://www.google.com.hk>
- [11] <http://www.baidu.com>
- [12] Toshifumi Nawata, Yoshihide Takada, Teruyuki Kimoto, etc. Design and construction of

- Shinkawa bridge (Steel/PC Mixed Superstructure). Kawada Technical Report, 2000,19: 41-46.
- [13] 邓文中, 代彤. 重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计. 桥梁建设, 2006(6): 28-32.
- [14] 刘安双, 刘雪山, 代彤, 等. 重庆石板坡长江大桥复线桥钢-混凝土接头设计. 桥梁建设, 2007, 37(2): 51-54.
- [15] 胡建华, 陈冠雄, 向建军, 刘榕. 平胜大桥设计构思与创新技术[J]. 桥梁建设, 2006(2): 28-31.
- [16] 范碧琨, 梁健, 广东佛山东平大桥主桥设计方法及成果[J]. 西南公路, 2004,(1):27-31.
- [17] 陈开利, 刘海燕编译.木曾川桥、揖斐川桥 PC 梁与钢梁连接部位的设计和施工[J].世界桥梁, 2005 (2): 11-15.
- [18] 王军文, 倪章军, 李建中,孙峻岭. 石板坡长江大桥钢混结合段局部应力分析[J]. 公路交通科技,2007, (8).
- [19] 谢铁坚. 南京长江第三大桥钢混结合段施工技术[J]. 湖南交通科技, 2007, (3).
- [20] 蔡少云. 南京三桥北主塔钢混结合段施工测量技术[J]. 现代测绘,2004,(6).
- [21] 张勇. 南京长江第三大桥桥塔钢混结合段结构特性研究[D]. 西南交通大学: 西南交通大学,2005.
- [22] 崔冰, 孟凡超, 赵灿辉, 董萌, 唐亮. 南京长江第三大桥主塔钢-混结合段设计研究[C]. 人民交通出版社, 2005.
- [23] 胡冬勇, 李宗平. 南京长江第三大桥北塔钢-混结合段施工技术[C], 人民交通出版社, 2005.
- [24] 李乔, 武焕陵, 唐亮, 崔冰. 南京长江三桥桥塔钢混结合段内力分布规律研究[C].人民交通出版社, 2005.
- [25] 张松,梁智奎. 重庆石板坡长江大桥钢混结合段局部应力分析研究[C]. 人民交通出版社, 2006:
- [26] 刘林石水. 五跨连续刚构桥设计参数分析及优化设计研究[D]. 福州: 福州大学硕士学位论文, 2004.
- [27] 胡雄伟. 大跨连续刚构桥主梁设计参数的优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, 2008.
- [28] 赵小由, 刘士林. 连续梁桥与连续刚构桥技术经济分析[C]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会, 1995.
- [29] 周军生,楼庄鸿. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报,2000,13 (1) :31-37.
- [30] 刘效尧, 赵立成. 梁桥(下册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 540-540.
- [31] 刘作霖, 徐兴玉, 等. 预应力 T 型刚构式桥[M]. 北京:人民交通出版社. 1982.
- [32] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
- [33] 史尔毅. 中国预应力混凝土公路桥[M].北京:人民交通出版社,1988.
- [34] 王文涛.刚构—连续组合梁桥[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [35] 马保林.高墩大跨连续刚构桥[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [36] 刘明虎,徐国平,刘峰. 鄂东大桥混合梁钢-混凝土结合部研究与设计[J]. 公路交通科技. 2010, V27(12): 78-85.
- [37] 胡建华, 沈锐利, 张贵明, 唐茂林, 王忠彬. 佛山平胜大桥全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, V40(5):17-25.
- [38] 梁会东. 钢-混凝土接头试验研究与受力性能分析[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2006.

- [39] 张仲先, 黄彩萍, 党志杰, 混合梁斜拉桥钢混结合段静力试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010V38(4): 121-124.
- [40] 樊健生, 聂建国, 吕坚锋, 张革军, 杨晓滨. 斜拉桥钢箱梁-混凝土索塔结合段的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, V41(7): 61-66.
- [41] 文曙东, 卫星, 李俊, 强士中. 重庆石板坡长江大桥钢-混凝土结合段疲劳试验荷载研究[J]. 世界桥梁, 2007, (2):51-54.
- [42] 陈开利, 王戒躁, 安群慧. 舟山桃夭门大桥钢与混凝土结合段模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, V39(3): 86-90.
- [43] Ollgaard J G, Slutter R G, Fisher j W. shear strength of stud connectors in light weight and normal weight concrete [J]. 1971, 8(2): 55-64.
- [44] Johnson, Ruckby. Composite Structures of steel and Concrete[M]. London: 1986.
- [45] Oehlers D J, Johnson R P. Strength of Stud shear connections in composite beams[J]. Structural Engineering, partB: R & D Quarterly, 1987, 65B(2): 44-48.
- [46] Hanswille G, Porsch M, Ustundag C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading: PartI : Experimental study[J]. Journal of Constructional Steel Research , 2007, 63(4): 475-484
- [47] Hanswille G, Porsch M, Ustundag C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading: PartII : Analytical study[J]. Journal of Constructional Steel Research , 2007, 63(4): 485 — 493.
- [48] Celik O C, Berman J W. Cyclic testing of braces laterally restrained by steel studs[J]. Journal of Structural Engineering. 2005, 131(7): 1114-1124.
- [49] Slutter, fisher. Fatigue strength of shear connectors[R]. Newyork: 1966.
- [50] Mainstone, Menzies. Shear connectors in steel-concrete composite beams for bridges[J]. Concrete, 1967, 1:9-10.
- [51] Hallam. The behaviour of stud shear connectors under repeated Loading[R]. Sydney: 1976, 1:9-10.
- [52] 崔玉萍. 部分剪力连接钢-混凝土叠合板组合梁强度及变形的试验研究[D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 1996.
- [53] 廖崇庆. 钢-混凝土连续组合梁群钉连接件抗剪承载力试验研究[D]. 上海: 同济大学硕士学位论文, 2007.
- [54] GB 50017-2003. 钢结构设计规范江[S]. 2003.
- [55] 日本道路桥示方书同解说-钢桥篇
- [56] BS 5400 Part 5, Steel - Concrete Composite Bridges[S].
- [57] Eurocode 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 2[S].
- [58] Leonhardt F, Andrae W, Andrae H P, et al. New Improved Bonding Means for Composite Load bearing Structures With High Fatigue strength[J]. beton-und Stahlbetonbau, 1987, 82(12): 325-331.
- [59] Roberts, Heywood. An Innovation to increase the Competitiveness of Short span steel concrete composite bridges[J]. Canada journal of Civil engineering: 1994, 1160-1171.
- [60] Veldanda M R, Hosain M U. Behavior of perfobond rib shear Connectors in composite beams[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19: 1-10
- [61] Oguejiofor E C, Hosain M U. Tests of full-size composite beams with perfobond rib connectors[J]. Canadian journal of civil engineering, 1995, 22(1):80-92.
- [62] Oguejiofor E C, Hosain M U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib

- connectors [J]. Computers and Structures, 1997, 62(4):617-624.
- [63] Oguejiofor E C, Hosain M U. Parametric study of perfobond rib connectors[J]. Canadian journal of civil engineering, 1994, 21(4):614-625.
- [64] 宗周红, 车惠民. 剪力连接件静载和疲劳试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 1999, 27(6): 61-66.
- [65] 刘玉擎, 周伟翔. 开孔钢板连接件的受力性能及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (增刊): 381-384.
- [66] 刘玉擎, 周伟翔, 蒋劲松. 开孔板连接件抗剪性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2006, (6): 1-4.
- [67] 李宇峙, 李家庆, 李星星, 等. 环氧树脂混凝土抗压强度和弹性模量的试验研究[J]. 公路, 2007 (9): 168-171.
- [68] 李星星, 李宇峙, 邵腊庚, 等. 耐高温环氧树脂胶粘剂在钢桥面黏结层中的应用试验研究[J]. 公路, 2007 (1): 161-164.
- [69] 沈桂平, 曹雪琴. 正交各向异性钢桥面板铺装的疲劳承载力试验研究[J]. 上海铁道大学学报. 1996, 17(3): 100-108
- [70] 伍波, 方萍. 钢桥面铺装的有限元分析与环道模型设[J]. 公路 2001(1): 24-27
- [71] 东南大学交通学院. 南京长江第二大桥钢桥面环氧沥青混凝土铺装技术及应用[R]. 南京: 东南大学, 2000.
- [72] 东南大学交通学院. 润扬大桥钢桥面铺装技术研究(总报告)[R]. 南京: 东南大学. 2004.
- [73] 刘振清. 大跨径钢桥桥面铺装关键技术研究[D]. 南京: 东南大学博士学位论文, 2004.
- [74] 东南大学交通学院. 润扬长江公路大桥钢桥面铺装研究(总报告). 南京: 东南大学. 2005.
- [75] 杨树荣, 冯芳霞, 刘美爽. 环氧沥青混合料钢桥面铺装复合结构试验研究 [J]. 森林工程, 2009 (6): 64-69.
- [76] 黄卫, 林广平, 钱振东. 正交异性钢桥面铺装层疲劳寿命的断裂力学分析 [J]. 土木工程学报, 2006(9): 112-116.

3. 项目研究背景、必要性和推广前景

3.1. 研究背景

随着我国经济快速发展, 我国桥梁建设已经进入到“百花齐放, 蓬勃发展”的阶段, 各种新型结构形式桥梁不断涌现。瓯江大桥采用了钢-混凝土混合梁刚构桥形式, 混合梁刚构桥是一种崭新的桥梁结构形式, 能够显著降低结构自重, 大幅提高桥梁跨越能力, 符合桥梁轻型大跨发展方向。但是, 国内外混合梁刚构桥的建设经验相对较少, 目前主跨在200m以上的混合梁刚构桥仅重庆石板坡长江大桥一座。虽然混合梁结构在斜拉桥中广泛应用, 但混合梁刚构桥与混合梁斜拉桥受力性能差异显著, 针对混合梁刚构桥的研究罕见报道, 尤其在混合梁整体承载性能、结构优化设计、钢-混结合段传力机理及承载性能、钢-混结合段桥面铺装结构、钢箱整体吊装控制等方面还存在诸多问题亟需攻关解决或优化提升,

以提高我国混合梁刚构桥设计施工技术水平。

本项目正是基于这一背景立项研究。

3.2. 研究必要性及目的

目前,混合梁结构主要应用于斜拉桥和自锚式悬索桥桥型,而在连续刚构桥中的应用较为少见。国内已建成的主跨跨径在 200m 以上的桥梁仅重庆石板坡长桥大桥(主跨 330m)一座,本桥建成后将成为第二大跨径混合梁刚构桥。混合梁刚构桥是一种崭新的,具有显著竞争力的桥梁结构形式,恰好填补了梁式桥在跨度区间 200~300m 范围内经济指标不理想的尴尬局面。但是,国内外关于混合梁刚构桥的工程建设经验相对较少,针对混合梁刚构桥的研究工作严重滞后于工程建设需求,这种现象在国内更为明显,针对混合梁刚构桥特定的一些关键技术问题至今尚未得到很好的解答,例如在混合梁整体承载性能及结构优化设计、钢-混结合段传力机理及承载可靠性、钢-混结合段合理构造及施工工艺、混合梁桥面铺装结构、钢箱整体吊装施工控制等方面还存在诸多问题需要攻关解决或优化提升。

开展混合梁刚构桥的研究是瓯江大桥建设的需要,是桥梁行业科技进步的需要,也是培养人才跻身世界桥梁建设舞台的需要。通过本项目 7 个子课题的研究,有望达到如下目的:

- (1)掌握混合梁刚构桥的结构受力行为特性和长期性能,提出混合梁刚构桥长期性能分析及应对策略,并指导现场施工;
- (2)提出混合梁刚构桥结构优化设计参数,形成混合梁刚构桥设计技术指南,为今后同类型桥梁设计提供科学依据;
- (3)研发混合梁钢-混结合段适宜连接构造、结合段合理施工工艺与质量控制方法、结合段混凝土浇筑抗裂等关键技术,并指导现场施工;
- (4)掌握混合梁钢-混结合段传力机理和抗疲劳特性,提出混合梁钢-混结合段承载可靠性评定标准和抗疲劳设计方法;
- (5)提出海工混凝土抗压强度现场检测技术及耐久性评估技术,为现场施工提供指导;
- (6)提出瓯江大桥适宜的桥面铺装形式与施工控制技术,并指导现场施工;
- (7)提出瓯江大桥竖向及体外预应力状态感知与可视化监测技术,确保大桥

运营安全；

(8)提出基于特征数据的桥梁结构健康监测、诊断与智能决策养护管理技术，为大桥正常运营服务；

3.3. 推广应用前景

我国幅员辽阔，水系众多。随着国家公路基础设施的快速发展，大跨径桥梁将会不断涌现。连续刚构桥具有桥下净空大、节省支座、造型美观、桥面平顺性好和抗震性能高等优点，特别适合于城市立交、跨线桥、跨铁路桥和跨河桥梁。当修建跨线、跨河桥梁时，采用整体吊装钢梁，既可以在不中断桥下交通的情况下完成桥梁施工，带来显著的社会经济效益。同时，采用混合梁刚构桥可以有效降低结构高度，改善桥梁的造型和美感。钢-混凝土组合结构由于能够充分发挥不同材料的受力特性，也是目前桥梁工程重点发展的方向之一。混合梁刚构桥在跨中采用钢主梁其余部分采用混凝土主梁，有效解决了单纯采用钢主梁导致的钢箱梁底板和腹板厚度过大的问题，也突破了单纯采用混凝土主梁导致自重过大引起的跨径瓶颈问题。已建工程实例表明，混合梁刚构桥在跨径 150m~300m 范围内具有显著的竞争优势，尤其对有施工、景观等要求较高的城市立交和跨线桥梁更具有独特的优越性。

本项目研究内容涉及混合梁刚构桥的设计与施工、海工混凝土和桥面铺装耐久性能、大桥养护管理与健康监测等几方面，所形成的设计方法、指南、工法、试验参数、施工工艺、质量控制标准等技术成果，可以应用到同类型设计与施工的相关领域。通过本项目的研究可促进混合梁刚构桥整体结构、钢-混结合段、钢箱梁等设计技术，以及大桥施工运营养护一体化技术的发展，为大跨径桥梁的建设提供技术支撑，尤其混合梁刚构桥整体承载性能及结构优化设计、钢-混结合段适宜连接构造与施工工艺、海工混凝土强度现场检测技术、钢箱梁整体吊装施工控制等都是创新技术，有推广价值；还有竖向及体外预应力的监测技术与装置，大桥健康监测和管理系统有望带动相关产业的发展；总之，本项目研究的整体技术成果将推动我国桥梁技术向前发展。

4. 项目研究和实施方案

4.1. 研究内容

本项目研究内容覆盖混合梁刚构桥设计、施工、海工混凝土及预应力检测、大桥养护管理与健康监测等方面，共分为 7 个专题研究内容，如图 4-1 所示。考虑到温州抗震设防烈度为 6 度，满足构造抗震要求即可，因而专题研究内容中未列入混合梁刚构桥抗震性能研究方面内容。本项目预期科研成果包括设计方法、指南、工法、试验参数、施工工艺、质量控制标准、大桥健康监测及管理系统等，最终形成混合梁刚构桥设计施工成套技术，直接服务于瓯江大桥工程建设，为瓯江大桥建设提供技术支撑，有力促进瓯江大桥设计、施工以及管理水平。

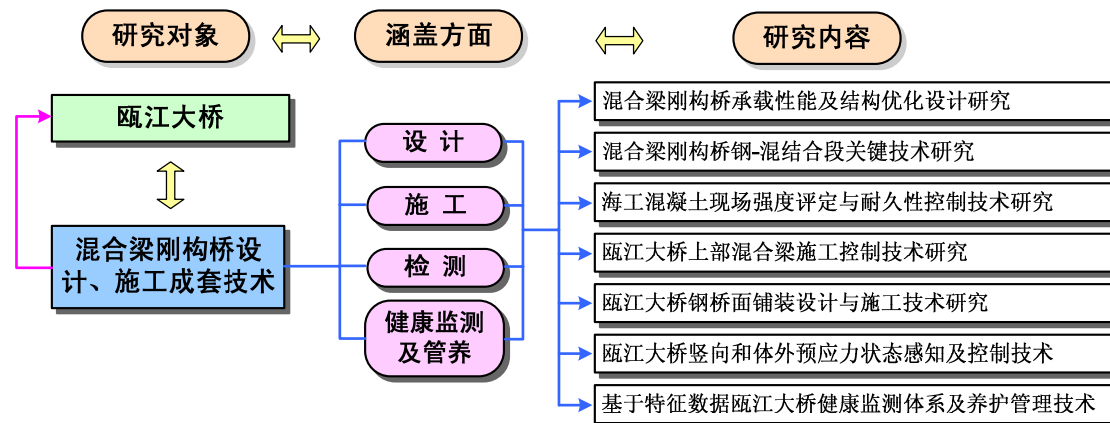


图 4-1 本项目研究内容

专题 1：混合梁刚构桥承载性能及结构优化研究

- (1) 国内外混合梁刚构桥设计技术总结分析
- (2) 混合梁刚构桥整体承载性能试验研究

以瓯江大桥为原型，通过数值仿真、全桥模型试验等技术途径，研究混合梁刚构桥工作机制及承载可靠性能，寻找结构最终破坏形态及安全储备，并检验结构设计承载安全性。

(3) 混合梁刚构桥结构优化设计研究

以瓯江大桥为原型，选取混合梁刚构桥边中跨比、钢-混结合段位置、梁高以及梁底曲线指数等控制参数，以用材最省为目标函数，兼顾桥梁施工、景观等需求，开展混合梁刚构桥结构优化设计研究，提出混合梁刚构桥结构设计参数推荐区间。

(4) 混合梁刚构桥长期性能研究

建立混凝土收缩、徐变预测模型，分析混凝土收缩徐变对混合梁刚构桥整体受力性能的影响。变化的参数包括混凝土的加载龄期、施工方法、预应力施加方式以及混凝土等级等。根据混合梁刚构桥收缩徐变效应的研究，提出相应的计算方法和应对策略。

(5) 混合梁刚构桥设计指南

在前面四项研究基础上，综合国内外关于混合梁刚构桥的关键技术研究，形成“混合梁刚构桥设计指南”。

专题 2：混合梁刚构桥钢-混凝土结合段关键技术研究

(1) 国内外钢-混结合段设计施工技术总结分析

(2) 钢-混结合段传力机理及承载可靠性试验研究

以瓯江大桥为原型，通过数值仿真、模型试验等技术途径，研究钢-混结合段传力机理及承载性能，检验设计计算结果，并通过试验结果及分析对现连接方式进行优化研究。

(3) 钢-混结合段适宜连接构造及施工工艺研究

选取混合段中构造复杂、受力较为不利的钢格室进行混凝土浇筑试验，试验后对混凝土浇筑工艺进行质量评定，总结提出结合段关键部位的施工工艺及质量控制方法。通过对钢-混结合段传力机理和施工工艺等方面研究，对现有结合段连接构造方式进行改进，完善混合梁结合段连接构造形式，并推荐混合梁刚构桥适宜连接构造形式。

(4) 钢-混结合段疲劳荷载谱及疲劳性能试验研究

通过开展桥位区域交通荷载调查，研究提出疲劳荷载模型；对钢-混结合段疲劳破坏细节进行分析，验算疲劳损伤度；通过疲劳细节试验，对钢-混结合段关键构件（包括连接件）的疲劳性能进行试验评估，提出钢-混结合段抗疲劳设计方法。

(5) 钢-混结合段设计施工技术指南

在前面四项研究内容基础上，综合国内外关于钢-混结合段的关键技术研究，形成“混合梁桥钢-混结合段设计指南”。

专题 3：海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术研究

(1) 海工混凝土强度现场检验与评定方法研究

主要研究海工混凝土材质与材性对回弹特性的影响，重点研发高强度海工混凝土现场强度检验方法与评定技术，目标是编制用于工程现场的《海工混凝土强度现场检验与评定技术规程》。

(2) 新拌海工混凝土耐久性现场检测指标与控制标准研究

主要研究选择新拌混凝土的相关性能指标对结构耐久性的影响，提出控制混凝土结构耐久性的新拌混凝土现场检测指标，研究其控制标准，目标是建立基于耐久性的新拌混凝土检测指标体系和控制标准，编制《新拌海工混凝土现场检测与施工控制指导书》。

(3) 基于施工状况的海工桥梁混凝土结构耐久性预评估技术研究

主要研究基于施工期相关性能检测的耐久性指标统计规律，研究重要的耐久性失效构件和部位，建立桥梁混凝土结构耐久性预评估方法，目标是提出《瓯江大桥混凝土结构耐久性劣化关键时间节点预评估分析报告》，用于桥梁养护决策。

专题 4：瓯江大桥上部混合梁施工控制技术研究

(1) 主跨混凝土节段线形及标高控制技术研究

混合梁主跨侧的混凝土梁段虽然采用挂篮悬臂施工方法，但因受中间钢结构部分的影响，对线形控制须十分到位。研究节段线形及标高精细化控制方法确保混凝土主梁的线形及标高达到中间钢梁合龙的要求。

(2) 钢箱梁吊装过程不平衡吊装力的影响分析与对策研究

钢主梁吊装过程中，由于吊点多不可避免地会产生不平衡力，分析不平衡力对钢主梁受力、变形以及对后续安装钢主梁精度的影响，研究减少多个吊点起吊主梁过程中不平衡力的措施和方法。

(3) 钢箱梁合龙技术及误差控制措施研究

研究提高主梁快速安全合龙的临时连接技术措施并提出调整方法，根据以往的大型结构吊装施工经验，研制大吨位、高精度、数字控制的三维可调主梁吊装设备；根据瓯江大桥钢主梁与结合段现场安装所需的安装精度要求，研究提高现场安装精度和相关措施。

专题 5：瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术研究

(1) 瓯江大桥钢桥面铺装适宜结构体系与材料组成设计研究

依据施工条件、施工控制、重载超载、养护管理和混合梁刚构桥钢箱结构特点,通过比较环氧沥青混凝土和浇注式沥青混凝土铺装方案,提出瓯江大桥钢桥面铺装适宜结构体系,并在此基础上研究材料组成设计。

(2) 瓯江大桥钢-混结构过渡段桥面铺装处理方法研究

钢箱梁与混凝土桥面交接处存在1.8m的过渡段,由于钢箱梁和混凝土箱梁的刚度相差较大,应研究过渡铺装方案并提出相应的质量控制措施。

(3) 瓯江大桥钢桥面铺装施工工艺、质量控制与检评方法研究

针对已确定的钢桥面铺装方案,研究施工工艺、质量控制与检评方法。

专题 6: 瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术的研究

(1) 竖向预应力全过程状态感知及控制方法的研究

瓯江大桥竖向预应力采用满足二次张拉工艺的专用锚具,其效果如何应进行评定。研发可以全过程状态感知的超声脉冲检(监)测方法及装置,并根据检(监)测数据提出改进措施。

(2) 钢-混结合段体外预应力状态感知及控制方法的研究

瓯江大桥钢-混结合段体外预应力,一端锚固在结合面处,一端在钢箱上设钢锚箱锚固。由于局部体外束长度有限,其预应力效果如何应进行评定。研发可以状态感知的检(监)测方法及装置,并根据检(监)测数据提出改进措施。

专题 7: 基于特征数据的瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术的研究

(1) 基于施工过程特征数据的瓯江大桥健康监测体系与方法的研究

在建立瓯江大桥健康监测系统时应对大桥施工过程的特征数据进行分析 and 提取,以作为大桥健康监测数据的初始值。研究统筹施工与使用状态的结构监测体系与特征数据的提取方法。

(2) 基于健康监测特征数据的瓯江大桥养护管理技术的研究

在建立瓯江大桥养护管理系统时应对大桥健康监测特征数据进行分析 and 提取,以作为大桥养护决策的依据,并在此基础上研究基于寿命周期的桥梁结构健康诊断与安全评估方法,编制瓯江大桥全寿命周期养护管理手册。

4.2. 拟解决的关键技术问题

(一)、混合刚构桥整体承载性能及结构优化研究

关键技术问题包括:

- 混合刚构桥整体承载性能及钢箱梁与混凝土梁设计安全度匹配；
- 混合刚构桥结构最优化设计及合理参数区间；
- 混合刚构桥长期受力性能分析及应对策略。

(二)、钢-混结合段适宜构造及施工工艺研究

关键技术问题包括：

- 钢-混结合段传力机理及承载可靠性；
- 钢-混结合段疲劳荷载谱及抗疲劳设计方法；
- 钢-混结合段适宜构造及施工工艺。

(三)、海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术

关键技术问题包括：

- 海工混凝土强度现场检验与评定方法；
- 新拌海工混凝土耐久性现场检测指标与控制标准；
- 基于施工状况的海工桥梁混凝土结构耐久性预评估技术。

(四)、混合梁刚构桥施工控制技术

关键技术问题包括：

- 钢箱梁吊装过程不平衡吊装力的影响分析与对策；
- 钢箱梁合龙技术及误差控制措施；

(五)、瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术

关键技术问题包括：

- 钢桥面铺装适宜结构体系与材料组成设计；
- 钢-混过渡段桥面铺装处理措施及质量控制标准；
- 瓯江大桥钢桥面铺装施工工艺、质量控制与检评方法研究。

(六)、瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术

关键技术问题包括：

- 竖向预应力全过程沿程状态感知及控制方法；
- 钢-混结合段体外预应力沿程状态感知及控制方法。

(七)、瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术

关键技术问题包括：

- 基于施工过程特征数据的瓯江大桥健康监测体系与方法；

- 基于健康监测特征数据的瓯江大桥养护数字化管理技术。

4.3. 技术路线

在对国内外混合梁刚构桥设计与施工技术调研基础上,通过理论研究、数值仿真、模型试验、工艺试验、产品研发、软件研制,以及网络、传感、监控等技术手段,针对瓯江大桥设计、施工、管理及运营养护等诸方面展开研究,重点突破混合梁刚构桥设计、施工关键技术和运营养护、管理、监测方面的关键技术,形成一批指南、工法、专利和装置,为瓯江大桥建设服务。

专题 1: 混合梁刚构桥承载性能与结构优化研究

混合梁刚构桥整体承载性能及结构优化设计研究是本项目研究中的重要创新点,拟采用如下方法开展本专题的研究工作:

1) 资料收集及调研:对国内外已建混合梁刚构桥进行现场调研和资料收集,特别注重了解混合梁刚构桥存在的设计技术难点,了解已建混合刚构桥的病害情况和设计中存在的不足之处,对调研资料进行技术总结,形成调研分析报告。

2) 混合梁刚构桥整体承载性能试验研究:根据模型相似比原则,对瓯江大桥原型进行缩尺,开展混合梁刚构桥整体承载性能试验研究。通过在模型试件上上布设位移、应力应变传感器,考察混合梁刚构实际工作机制。在试验条件允许的情况下,对模型试件进行破坏性试验,从而明确结构破坏机制。在试验研究基础上,同时建立缩尺模型试验构件有限元模型和实桥模型,通过数值仿真反演出混合梁刚构桥的真实工作状态,变化各种参数,总结其中共性规律,以提炼出混合梁刚构桥承载性能实用设计方法。同时,通过有限元分析得到其动力行为特性、控制部位应力与变位状态,提取用于施工过程控制和指导交工验收荷载试验的结构控制应力、变位数据,并在此基础上对其特征结构如钢-混结合段、钢箱梁等适宜性进行分析论证。

3) 混合梁刚构桥结构优化设计研究:以瓯江大桥为原型,选取混合梁刚构桥边中跨比、钢-混结合段位置、梁高以及梁底曲线指数等控制参数,以用材最省为目标函数,兼顾桥梁施工、景观等需求,开展混合梁刚构桥结构优化设计研究,提出混合梁刚构桥结构设计参数推荐区间。

4) 混合梁刚构桥长期性能研究:结合现场混凝土收缩徐变实测数据,建立混凝土收缩徐变预测模型,考虑温度、混凝土加载龄期、施工方法、预应力施加

方式以及混凝土等级和养护条件的影响，提出混合梁刚构桥长期性能分析方法，并用于瓯江大桥长期性能分析，计算分析结果实时反馈大桥施工，并提出混合梁刚构桥长期变形控制技术，研究成果直接应用于瓯江大桥工程建设。

在上述四项研究内容基础上，参考大跨径预应力混凝土桥梁和钢-混凝土组合结构设计规范和细则，综合本专题研究成果，编写混合梁刚构桥设计指南和编制说明。

本专题技术研究路线如图 4-2 所示：

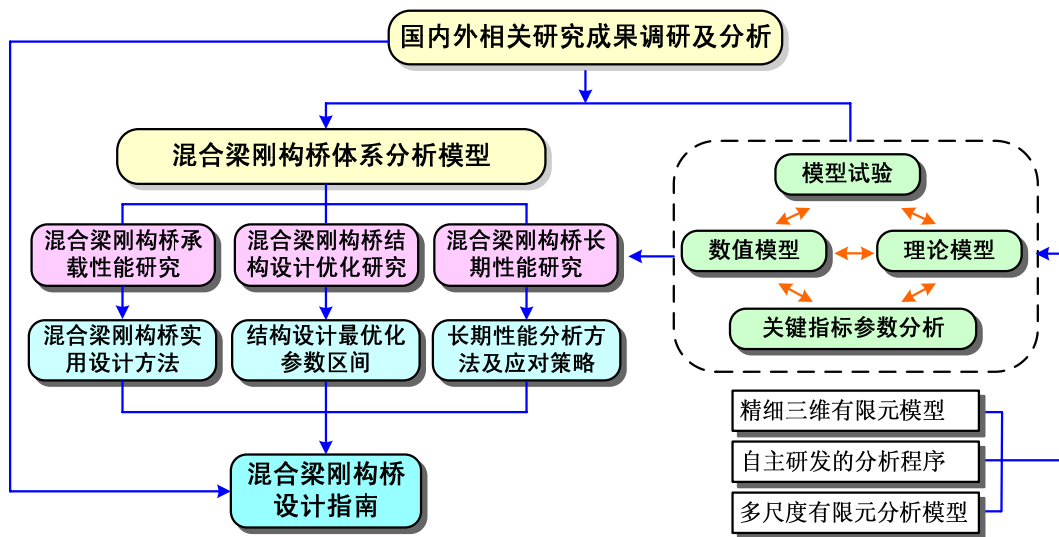


图 4-2 专题 1 技术研究路线

专题 2:混合梁刚构桥钢-混结合段关键技术研究

钢-混结合段是混合梁刚构桥中的关键受力部位，拟采用如下方法开展本专题的研究工作：

1) 资料收集及调研：对现有国内外各个桥梁钢混结合段进行资料收集，特别注重于对国内已建和已设计桥梁的钢混结合段进行调研，了解其病害情况和设计不足之处，对上述调研资料进行初步分析研究。

2) 结合段传力机理研究：建立钢-混结合段精细有限元分析模型和全桥多尺度有限元模型，考虑材料及几何非线性行为，对钢-混结合段在工作状态下工作机制进行深入的分析，计算荷载工况包括正常使用极限状态组合、承载能力极限状态组合以及破坏状态。在有限元分析基础上，进一步明确结合段的传力机制，寻找结合段构造的薄弱点，验证大桥设计安全性，并对结合段构造措施提出改进意见。

3) 模型静力试验研究：按照相似理论，使模型与实桥应力等效原则进行模

型设计，模型比例拟采用 1: 3；模型采用与实桥一致的钢材及同样的焊接工艺制造。根据设计内力值组合，分级施加试验荷载。测试钢箱梁、混凝土箱梁、钢格室、PBL 键的应变值，测试钢箱梁、混凝土箱梁及结合部位位移值，观察结构在该状态下破坏部位、方式，分析破坏机理。如果结构试验不能加载到破坏，则根据仿真计算确定“危险”部位，研究破坏机理，对结构的设计提出改进和优化建议。

4) 关键构件疲劳试验研究：针对桥梁交通状态，制定适合该地区交通特点的车流模型，通过整体结构分析得到结合段内力历程，结合有限元和静力模型试验结果，选择一个格室制作足尺模型，按照损伤等效原则在试验机上加载 200 万次，同时开展关键部件（连接件）的疲劳细节试验，对结合段关键构件的疲劳性能进行试验评估，提出钢-混结合段抗疲劳设计方法。

5) 钢-混结合段混凝土浇筑工艺研究：选取钢-混结合段中构造复杂，受力最不利的钢格室，进行混凝土浇筑工艺试验研究，混凝土硬化之后对其进行质量评定。

在上述 5 项研究内容基础上，综合本专题研究成果，编写钢-混结合段设计与施工指南和编制说明。

本专题技术研究路线如图 4-3 所示：

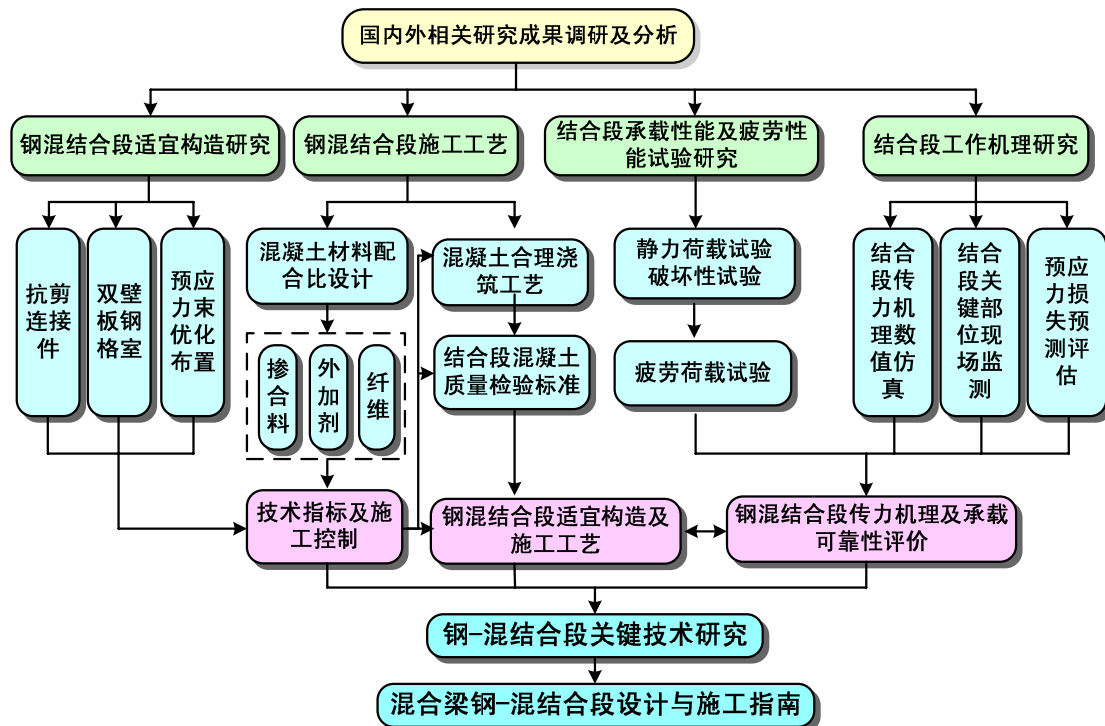


图 4-3 专题 2 技术研究路线

专题 3：海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术研究

结合瓯江大桥海工混凝土组成特点和本专题研究内容，拟采用如下方法开展本专题的研究工作：

1) 海工混凝土强度现场检验与评定方法研究：研究海工混凝土材质与材性对回弹特性的影响，研发高强度海工混凝土现场强度检验方法与评定技术，编制用于工程现场的《海工混凝土强度现场检验与评定技术规程》。

2) 新拌海工混凝土耐久性现场检测指标与控制标准研究：研究选择新拌混凝土的相关性能指标对结构耐久性的影响，提出控制混凝土结构耐久性的新拌混凝土现场检测指标，研究其控制标准，建立基于耐久性的新拌混凝土检测指标体系和控制标准，编制《新拌海工混凝土现场检测与施工控制指导书》。

3) 基于施工状况的海工桥梁混凝土结构耐久性预评估技术研究：研究基于施工期相关性能检测的耐久性指标统计规律，建立桥梁混凝土结构耐久性预评估方法，提出《瓯江大桥混凝土结构耐久性劣化关键时间节点预评估分析报告》，用于桥梁养护决策。

本专题技术研究路线如图4-4所示：

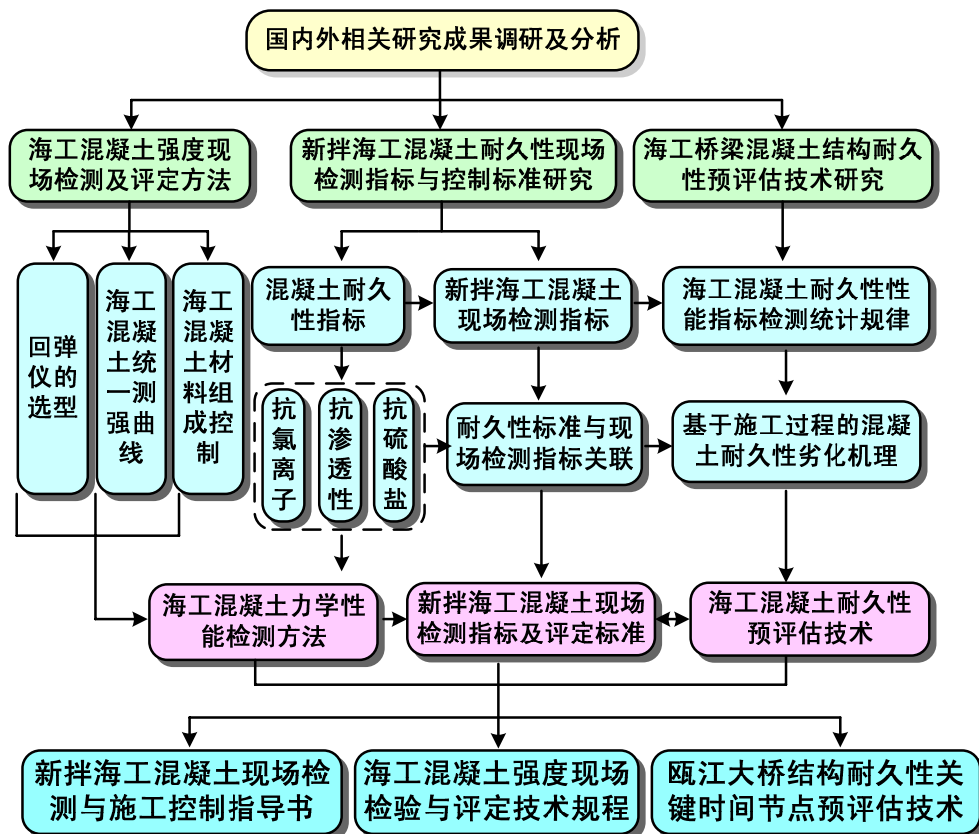


图 4-4 专题 3 技术研究路线

专题 4：瓯江大桥上部混合梁施工控制技术研究

根据混合梁刚构桥的结构特点和本专题研究内容，拟采用以下方法对各部分内容开展研究。

a) 瓯江大桥混凝土节段施工及钢箱梁吊装仿真分析研究

采用通用有限元程序建立瓯江大桥有限元分析模型，模拟每个施工过程，包括混凝土梁段逐段浇筑、预应力张力、结合段安装与浇筑过程中以及钢箱梁整体吊装过程，分析混凝土梁、结合段以及钢箱梁在施工期间的受力特征。

b) 瓯江大桥钢主梁吊装过程的不平衡吊装力的影响与对策研究

瓯江大桥钢主梁吊装过程中多个吊点不可避免产生的不平衡力，采用大型通用有限元程序建立钢主梁节段的板壳空间模型，分析在不同的吊点不平衡力下钢主梁受力、变形，研究减少多个吊点起吊主梁过程中的不平衡力的措施和方法。

c) 瓯江大桥钢与混凝土结合段安装精度的影响与对策研究

根据瓯江大桥的施工方法和结构特点，分析可能产生的各种误差，并根据空间有限元模型计算分析各种误差对结构受力的影响程度，并研究这些误差对后续施工工序的影响。

d) 瓯江大桥主梁合拢技术和施工误差控制方法研究

根据瓯江大桥的结构特点、施工方法和现场环境等条件，计算分析瓯江大桥合拢前的结构变形，提出合拢段的技术指标，研究提高主梁快速安全合拢的临时连接及永久连接结构技术措施并提出调整方法，研制大吨位、高精度、数字控制的三维可调主梁吊装设备，并根据瓯江大桥钢主梁与结合段现场安装所需的安装精度要求，研究提高现场安装精度和方便施工的方法和相关措施。

本专题技术研究路线如图4-5所示：

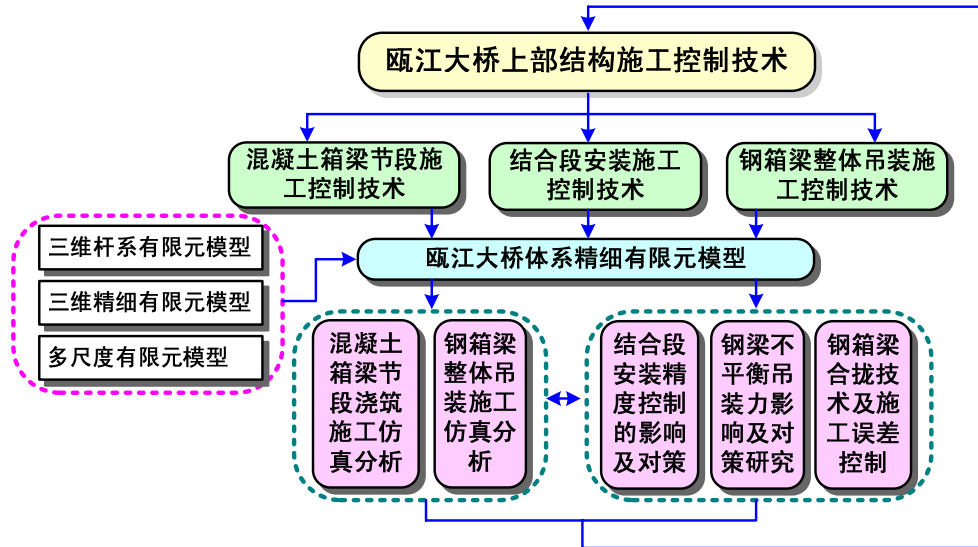


图 4-5 专题 4 技术研究路线

专题 5：瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术研究

结合瓯江大桥桥面铺装结构体系和本专题研究内容，拟采用如下方法开展本专题的研究工作：

1) 国内外钢桥面铺装设计与施工技术调研分析：调研目前国内外钢桥面铺装结构形式、使用性能、设计方法、主要破坏形式、交通荷载和交通量、气候（降雨和温度）等进行调研，为本专题研究提供技术支撑。

2) 钢桥面铺装适宜结构体系研究：根据调研结果和分析，提出瓯江大桥交通荷载与气候条件的标准，并根据这些外部条件，开展钢桥面铺装主要病害机理研究、瓯江大桥桥面铺装技术和适应性研究，最终确定瓯江大桥钢桥面铺装适宜结构体系。在桥面铺装方案确定情况下，为解决铺装与钢板协同受力的问题，拟通过试验，沥青混合料配合比设计与路用性能、桥面铺装组合结构复合件试验方法等进行研究。

3) 钢桥面铺装耐久性研究：在完成瓯江大桥桥面铺装结构与材料设计研究基础上，考虑环境作用和实际车辆荷载作用，结合有限元分析和试验研究方法，研究基于环境作用-荷载-结构混杂系统的钢桥面铺装承载性能与耐久状态。

4) 钢-混过渡段桥面铺装处理方法研究：通过数值仿真、室内比例模型试验对过渡段桥面铺装受力性能进行研究，研究过渡铺装方案并提出相应的质量控制措施。

5) 制定瓯江大桥桥面铺装设计方法、施工工艺及检验评定标准：在上述研

究基础上,开展施工工艺、试验检测最小抽样频率、铺装原材料质量检验频率与评定标准、质量检验频率与评定标准等项研究。

综合上述研究成果,编制针对瓯江大桥钢桥面铺装设计和施工技术指南和质量检评标准。

本专题技术研究路线如图4-6所示:

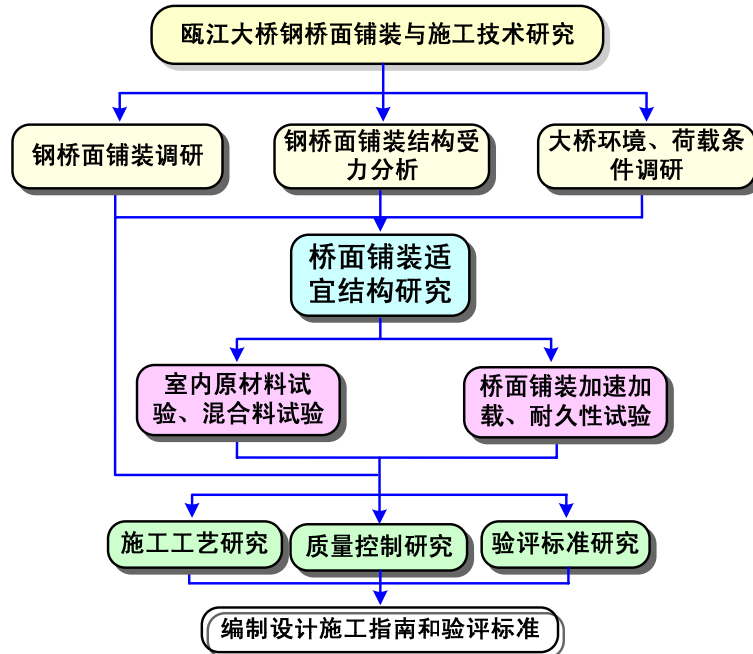


图 4-6 专题 5 技术研究路线

专题 6: 瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术的研究

根据混合梁刚构桥预应力布置特点和本专题研究内容,拟采用以下方法对各部分内容开展研究。

1) 沿程预应力测试的适宜传感器研究: 根据本项目工程特点及技术要求,对比常用传感器的精度、强度、耐久性等指标,优选并制定适用的传感器方案;通过室内试验,对传感器精度、可靠性进行验证,室内试验分别对单根预应力钢束、预应力梁体模型进行试验;通过工程应用,对传感器数据进行基于实际桥梁应用的校验及修正。

2) 沿程预应力感知传感器植入技术研究: 提出确保传感器在实际桥梁环境中正常工作的措施;分析施工过程对传感器及数据传输线路的影响因素,提出可靠和可行的传感器及数据传输采集系统的安装工艺,保证传感器及采集系统工作正常、测试结果可靠;进行梁模型室内试验,验证传感器及采集传输系统的工作可靠性。

3) 沿程预应力感知与可视化集成系统研发: 根据传感器的工作原理, 通过遴选可靠数据采集传输设备, 形成数据采集传输系统; 研究传感器数据处理方法, 通过离散点实测应力, 提出算法获得预应力钢束沿程分布应力值; 编写相关的数据采集和可视化软件, 实现预应力钢束沿程分布应力可视化, 形成感知及可视化集成系统, 为提高桥梁预应力张拉施工质量提供技术保障。

本专题技术研究路线如图4-7所示:

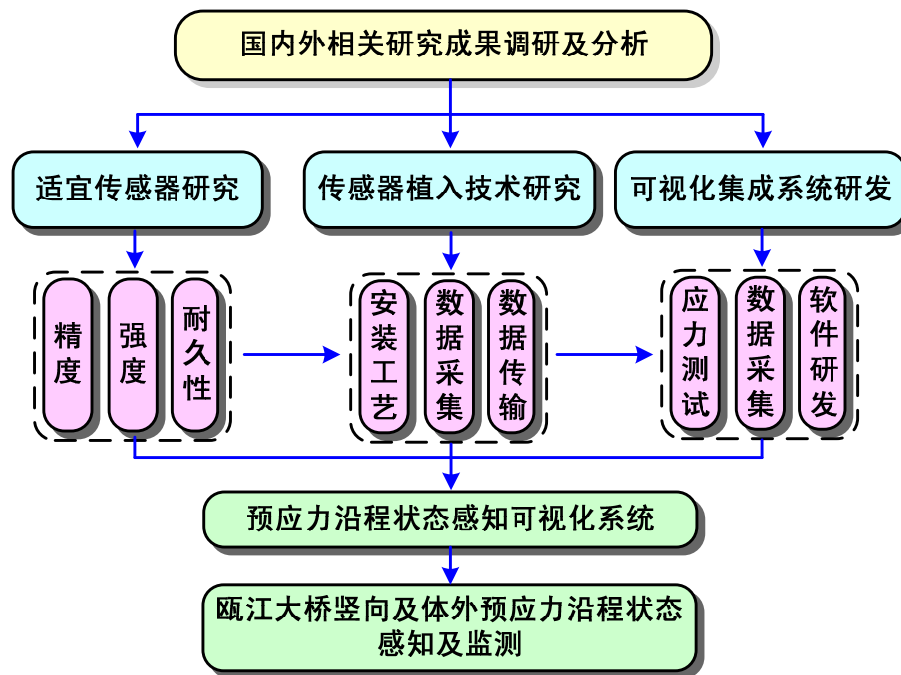


图 4-7 专题 6 技术研究路线

专题 7: 基于特征数据的瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术的研究

将施工过程与使用状态的应力测点布置和变形监测位置统筹考虑, 通过无线传输技术, 建立全过程数据采集、分析处理系统, 研究全过程应力应变动态监测技术、模态参数测试与识别技术。

为快速处理大桥健康监测海量数据, 需根据结构受力特点和主要构件失效模式, 建立判别参数或准则, 通过数据库技术, 研究基于桥梁使用阶段健康状态自诊断的施工过程特征数据提取方法, 并以实桥验证。

在桥梁施工, 运营全过程内分析桥梁安全的危险源, 研究安全风险和易损点, 以及损伤发展演变规律, 建立以初始特征数据为基础的健康自诊断评价方法标准, 构建状态评估方法, 并形成指导养护的策略。

通过分析桥梁状态退化规律, 研究建立桥梁状况退化模型, 建立模型分析梁

式桥在全寿命过程中以费用优化为目标的养护策略和智能决策方法。

基于桥梁建设,运营的监测和养护需求,结合桥梁退化模型的全寿命养护策略和措施,研究规划瓯江大桥监测和综合管理系统设计方案,并以此完成各相关功能开发。

本专题技术研究路线如图4-8所示:

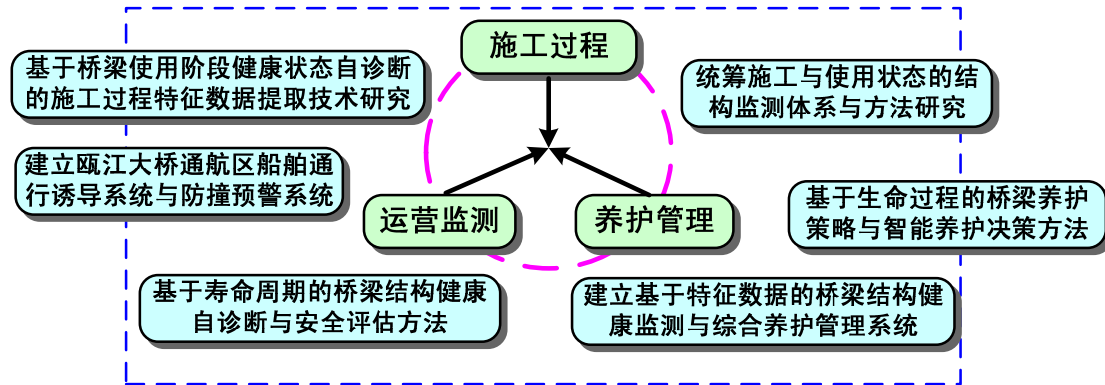


图 4-8 专题 7 技术研究路线

5. 考核目标和技术经济指标

5.1. 考核目标

本项目的研究将紧密结合依托工程,在整个研究过程中注重研究成果在工程中的应用、检验与反馈。因此,各个专题也将结合工程实施进度和研究内容,将项目的考核目标分别落实到具体的施工阶段。分阶段的考核目标如下:

主桥上部结构施工阶段

- 提交国内外混合梁刚构桥设计技术总结分析报告;
- 提交混合梁刚构桥整体承载性能试验研究报告;
- 提交混合梁刚构桥结构优化设计分析研究报告;
- 提交混合梁刚构桥结构优化设计建议;
- 提交混合梁刚构桥长期性能分析研究报告;
- 提交混合梁刚构桥长期性能控制技术及其应对策略;
- 利用精细化分析手段,提出瓯江大桥结构静动力分析及行为特性研究报告;

- 提交国内外钢-混结合段设计、施工技术总结分析报告；
- 依托瓯江大桥，提交混合梁钢-混结合段承载性能试验研究报告；
- 依托瓯江大桥，提交混合梁钢-混结合段疲劳特性试验研究报告；
- 提出瓯江大桥钢-混结合段适宜性构造论证报告及改进建议；
- 提出海工混凝土抗压强度现场检测方法及其评定标准；
- 提出海工混凝土统一测强曲线和海工混凝土抗压强度检测方法；
- 提新拌海工混凝土现场检测与施工控制指导书；
- 提交瓯江大桥混凝土结构耐久性劣化关键时间节点预评估分析报告；
- 提出瓯江大桥钢箱梁整体吊装作业工法；
- 提出混合梁刚构桥整体吊装施工技术发明专利；
- 提出瓯江大桥桥梁线型控制、钢箱梁整体吊装施工控制方案；
- 形成用于施工过程控制和指导交工验收荷载试验的结构控制应力、变位数据报告；
- 提出竖向及体外预应力国内外检（监）测技术现状及发展趋势调研分析报告；
- 提交瓯江大桥预应力状态感知检测技术方案；
- 提出预应力钢束应力沿程测试方法，研发相应的自感知测试装置，形成技术专利，制订检（监）测技术应用指南。

主桥桥面系及附属设施施工阶段

- 提出我国钢桥面铺装设计施工技术总结分析报告；
- 提出我国服役钢桥面铺装使用现状调研分析报告；
- 提出瓯江大桥钢桥面铺装适宜结构体系分析论证报告；
- 提出瓯江大桥钢桥面铺装结构与材料组合设计方法研究报告；
- 提出瓯江大桥钢桥面铺装试验验证成果报告，编制瓯江大桥钢桥面铺装施工图设计；
- 提出瓯江大桥混合梁过渡段桥面铺装处理方案和质量控制方法；
- 提出瓯江大桥钢桥面铺装施工工艺、质量控制与质量检评方法研究

报告；

- 提出瓯江大桥钢桥面铺装使用性能观测体系设计文件，开发瓯江大桥钢桥面使用性能数据库，制订观测实施手册。

成桥验收阶段

- 提出瓯江大桥统筹施工与运营两种状态需求的结构监测指标体系和监测方法；
- 提出基于特征数据的瓯江大桥自诊断方法和标准，建立瓯江大桥结构安全可靠评估指标体系和方法；
- 提出基于生命过程的桥梁养护策略与智能养护决策方法，编制瓯江大桥全寿命周期养护管理手册；
- 开发基于特征数据的桥梁结构健康监测与综合养护管理系统；
- 制订瓯江大桥关键工程质量风险点及防控措施手册；

科研成果汇总整理阶段

- 完善混合梁刚构桥设计方法、施工工法及控制技术；
- 制订瓯江大桥钢桥面铺装设计、施工技术指南；
- 制订瓯江大桥钢桥面铺装设计、施工质量检评标准；
- 制订混合梁刚构桥设计指南，提出编制说明；
- 制订《海工混凝土强度现场检验与评定技术规程》，提出编制说明。

5.2. 技术经济指标

1、本项目将编制 2 本以上的混合梁刚构桥建设相关技术指南、手册和指导书，相关的研究成果可为国内同类工程的建设提供技术指导和行业标准。

2、本项目研发钢桥面铺装设计与施工技术，并提出适宜的铺装结构和材料体系，可以延长桥面铺装寿命 2~4 年。

3、本项目自主开发预应力状态感知测试设备与控制技术将形成 2 项以上的国家专利。

4、本项目研究成果直接服务于示范工程——瓯江大桥。通过模型及仿真分析，验证混合梁连续刚构桥设计的合理性；通过结合段模型试验检验结合段的安

全可靠性；通过钢桥面及铺装模型试验验证设计计算；通过检测预应力状态，评估有效性，提升结构安全性，并在瓯江大桥建设和使用过程中产生 1.6 亿元以上的直接经济效益（详见经济效益评估）。

5、在国、内外期刊上发表论文 20 篇以上。

6. 项目研究进度

6.1. 实施年限

本项目计划从 2011 年 9 月起至 2014 年 9 月完成，历时 3 年。

6.2. 年度计划安排与阶段目标

本项目研究工作分为五个阶段：

(1) 项目可研阶段（2011 年 6 月～2011 年 9 月）：

- 完成项目建议书；
- 完成项目可行性研究报告。

(2) 项目准备阶段（2011 年 11 月～2011 年 12 月）：

- 明确研究单位和任务分工；
- 编制研究大纲；
- 启动课题研究。

(3) 研究与工程示范阶段（2012 年 1 月～2013 年 12 月）：

- 开展研究、试验和分析；
- 提交中期研究成果（预计 2013 上半年）。
- 示范工程的技术应用；
- 示范工程的技术检验。

(4) 技术集成阶段（2013 年 12 月～2014 年 5 月）：

- 各子课题研究的技术集成；
- 完成研究与应用技术总结报告。

(5) 验收鉴定阶段（2014 年 5 月～2014 年 9 月）：

- 研究与应用技术总结报告审核；
- 组织项目鉴定和验收。

项目实施进度如表 6-1 所示。

表 6-1 项目实施计划图（季度）

研究阶段	工作任务	2011 年				2012 年				2013 年				2014 年			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
研究准备	项目建议书		■														
	项目可研报告			■													
	课题任务分解			■													
	启动课题、落实措施				■												
课题研究	研究大纲评审			■	■												
	试验、研究																
	中间检查							■				■					
	中期成果											■					
应用示范	示范、检验																
成果总结	检验结果分析															■	
	最终研究成果															■	
验收鉴定	项目验收																

7. 第一承担单位及承担单位概况

7.1. 承担单位概况

温州瓯江通道建设有限公司于 2005 年 6 月 14 日注册成立，注册资本 1 亿元。由温州市交通投资集团有限公司（出资 55%）、永嘉县国有资产经营有限公司（出资 25%）及温州能源投资有限公司（出资 20%）共同组建。公司以科学发展观为统领，以“求真务实、精简高效、量才适用、不拘一格”为原则，正逐步打造一支结构合理、素质优良的人才队伍。

公司主要从事诸永高速公路温州段延伸线的投资、建设、经营、开发以及道路配套服务等。该项目起于永嘉县北岙，与绕城高速公路北线连接，与诸永高速公路永嘉枢纽形成复合式枢纽，沿楠溪江东侧向南，经三江，跨瓯江，终点位于市区矮凳桥路北侧，与民航路相接，路线全长约 8.1Km，是城市外围高速公路与温州市区城市快速路沟通的重要通道，也是贯通温州市区南北向的中轴线中的关键一环。该项目建成后，可大大缩短温州至杭州的距离，比经甬台温高速公路和金丽温高速公路分别缩短 47 公里和 81 公里，同时开辟了市区至诸永高速公路的最短路线，相对绕行国道和省道缩短里程约 12 公里，对加速温州经济发展，拉大温州城市框架，促进瓯江两岸开发建设等具有十分重要的意义。

交通运输部公路科学研究所：是交通运输部直属的公路科研机构，是我国规模最大的公路交通领域多学科、综合性技术研究开发基地。主要从事道路工程，桥梁工程，交通工程与智能交通，公路运输工程，汽车运用工程，公路环境工程的科学研究与技术开发工作。全所拥有位居亚洲第二的交通部公路交通试验场、2 个国家级试验检测中心、6 个部级研究中心、6 个检测试验中心，3 个交通行业重点实验室，共设九个研究室，拥有齐全、先进的试验和测试设备，主要承担国家和交通部下达的重大科技项目，国家级和部级技术标准、规范的制订等任务。全所共获科研成果 602 项(自 1978 年)，其中国家和省部级科研成果奖励 226 项，该所科研力量雄厚，拥有工程院院士 1 人，博士生导师 5 人，博士 30 余人，硕士 90 余人，有高级和中级技术职称的人员占全所总人数的 60%以上。科研经验丰富，试验设备先进，具有丰富的技术储备。近两年来，我院完成国家重大科技攻关项目 5 项，08 年新承担国家自然科学基金项目 3 项，交通部下达的重大科研任务近 30 项，承担国家与部级交通行业标准规范的制定、修订工作及研究课题 190 项。自 2007 年至 2008 年我院共获科研成果 150 项，共获得国家和省部级科技进步奖 38 项。其中“公路养护关键技术及系列装备的研究”项目于 2005 年获国家科技进步二等奖，“公路旧桥检测评定与加固技术研究及推广应用”获 09 年国家科技进步二等奖。交通运输部公路科学研究所已建成的实验室和研究中心，以及这些年来公路工程示范工程的研究与建成都为本项目的实施提供了可借鉴的经验，也为较好地完成本项目打下了坚实的基础。

浙江省交通规划设计研究院：简称 ZJIC，拥有公路、水运、勘察、市政、建筑、综合试验检测等 8 个甲级以及水土保持、测绘、地质灾害治理等 5 个乙级资质，拥有对外援助项目资质、对外经济合作资格证书和进出口企业资格证书，并通过质量、环境和职业健康安全管理体系认证及浙江省计量认证资质认定。为浙江省勘察设计行业综合实力十强、浙江省高新技术企业、省博士后科研工作站试点单位，中国优秀勘察设计院，交通部优秀设计单位。建院来主持工程咨询和工程勘察设计国内高速公路 3500 多公里、海外公路 700 多公里，国、省道等主要公路 10000 多公里，市政道桥工程 400 多公里，大型、特大型桥梁 500 多座，隧道 600 多座；设计港区、码头 500 多座，航道 4500 多公里，先后获得国家和省部级以上设计咨询奖 100 多项，部省级科学技术奖 20 多项。全院现有职工 700

多人，各类专业技术人员占 85%左右。高级以上专业技术人员近 200 人，中初级专业技术人员 300 多人。拥有交通部“新世纪十百千人才工程第一层次”、浙江省“新世纪 151 人才工程第二、三层次”、浙江交通“283 拔尖人才”第一、第二层次人选约 30 人，各类注册师 100 多人，教授级高级工程师 40 多人，先后有 10 人享受国务院特殊津贴。拥有国内一流的智能化设计、科研大楼和先进的生产、管理设备，并建立了以网络为支撑、各专业 CAD 技术为基础、工程信息管理为核心的现代化信息、管理系统。

中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司：简称中铁大桥局桥科院，始于 1959 年，2003 年 9 月通过建立现代企业制度整体改制，系伴随着新中国桥梁事业而成长起来的国家高新技术企业。主持完成了南京长江大桥、九江长江大桥、芜湖长江大桥、武汉长江二桥、江阴长江大桥、汕头海湾大桥、东海大桥、杭州湾跨海大桥、舟山西堠门大桥、武汉阳逻长江大桥、武汉天兴洲长江大桥、深圳湾西部通道跨海大桥、南京大胜关长江大桥、郑州黄河公铁两用大桥等特大型桥梁的科研项目近千项。其中 200 余项分别获国家、铁道部、有关省市和中国中铁科技进步奖；获得 14 项国家专利。公司在册员工 318 名，其中教授级高级工程师 10 人，高级工程师 60 余人，本科以上学历 210 人。公司拥有大量的试验研究设备，在国内外桥梁及结构工程专项研究和现场试验研究方面具有很强实力，在解决各类大型桥梁与建筑工程设计施工的关键技术问题以及监理咨询等方面颇有建树，声誉显赫。

同济大学：是国内外著名的综合性大学，其土木工程一级学科的综合实力在国内排名第一，桥梁工程学科充分利用上海市“重中之重”学科建设、“十五 211 工程”建设、国家教育部“985”二期平台建设及国家教育部高等学校重点学科建设等一系列机遇，目前本学科的综合实力和学术水平保持了国内领先地位并继续力争跻身于世界前列，已经成为国内外一流的我国桥梁建设事业高层次人才培养、高水平科学研究和高新技术成果转化的重要基地。同济大学在桥梁工程学科具有很高学术水平的科研梯队及雄厚的科研实力；同时又具有土木工程防灾国家重点实验室和先进土木工程材料教育部重点实验室等的研究基地，最近又建成了 2000 吨静载加载系统和 MTS 动载加载系统，科研设备完全具备。同济大学参加了国内许多重大工程项目中的相关科研工作，积累了完成各种科研项目的技术资

源与组织实施经验。

中交第一公路工程局有限公司：原名路桥集团第一公路工程局，简称中交一公局。前身是贡献卓越的中国人民解放军公路一师，现隶属于中国交通建设股份有限公司。中交一公局以承建国内外高等级公路、特大型桥梁为主，集施工、设计、监理、科研、检测、机械制造为一体的国家大型公路工程施工总承包特级企业，全局下属 9 个公路一级总承包企业，10 个市政一级总承包资质，1 个交通部甲级设计院，1 个交通甲级实验室和技术中心，1 个监理咨询公司，10 个公司同时具备路基、路面、桥梁、隧道等专业一级承包资质，交通安全设施、钢结构专业公司各 1 个，同时设有 6 个海外办事机构。截止目前，中交一公局承接了大量的技术含量高、施工难度大、工艺结构复杂的特、难、精、尖的全国重点工程，创建出一大批国家级精品工程，完成了斜拉桥、长大隧道、深水基础、高墩等施工成套技术和工法，站到了公路施工技术制高点。截止 2008 年底中交一公局已在国内外修建各种等级公路 8500 余公里，其中高速公路占全国已建成高速公路总里程的 10%；修建各类桥梁 1200 余座。在参建的工程中，获得中国建筑工程“鲁班奖”5 项、中国土木工程“詹天佑”大奖 6 项、国家优质工程银质奖 12 项、中国企业新纪录奖 5 项、中国施工企业工程建设企业管理现代化管理成果奖 8 项、省部级以上优质工程奖 64 项，全国“五一”劳动奖 2 项，还多次获得全国交通系统两个文明建设先进单位、中央国家机关文明单位标兵、全国文明单位等光荣称号。

7.2. 项目负责人简介

张劲泉，项目负责人，男，1963 年 6 月出生，1984 年毕业于同济大学桥梁工程专业，现任交通运输部公路科学研究所副所长，研究员，交通青年科技英才，享受政府特殊津贴。出版专著七部，近五年在国内外学术期刊发表论文 20 余篇。指导硕士研究生 10 名、博士后研究人员 5 名。曾主持交通部“九五”科技攻关项目：“虎门悬索桥上部结构施工监控技术研究”、“虎门悬索桥钢箱梁架设与拼接程序研究”、“虎门悬索桥竣工验收试验与评价”、交通部规范项目：“公路桥梁承载力检测评定规程”、西部交通建设科技项目：“公路旧桥检测评定与加固技术研究及其推广应用”的研究工作。“桥梁检测与试验设备研究”、“公路桥梁使用功能评定方法研究”获交通部科技进步三等奖；“虎门大桥成套技术研究”获交通部科技

进步特等奖、国家科技进步奖二等奖；参建的虎门大桥工程获第二届詹天佑土木工程大奖。主持承担西部交通建设科技项目：“公路旧桥检测评定与加固技术研究及其推广应用”获中国公路学会科学技术一等奖和国家科技进步二等奖。“钢管混凝土拱桥设计、施工与养护关键技术研究”获湖南省科技进步一等奖。

8. 研究经费预算及资金筹措情况

项目经费预算见表 8-1。

表 8-1 项目经费预算表

单位：万元

经费来源预算		经费支出预算		
科 目	预算数	科 目	总经费	工程款
来源预算合计	1,090	支出预算合计	1,090	1,090
一、拨款	1,090	一、人员费	171	171
二、贷款		其中：项目负责人	36	36
三、地方配套		主要研究人员	134	134
四、单位自筹（含工程配套）		二、相关业务费	610	610
五、其它来源		1、材料费	164	164
		2、燃料及动力费	55	55
		3、试验费	218	218
		4、会议费	65	65
		5、差旅费	109	109
		三、设备费	200	200
		1、购置费	109	109
		2、试制费	91	91
		四、管理费	55	55
		五、其他费用	55	55

各子课题项目经费分配算见表 8-2。

表 8-2 子课题项目经费分配表

单位：万元

序号	项 目	经费（万元）
1	课题1：混合梁刚构桥承载性能与结构优化研究	180
2	课题2：混合梁刚构桥钢混结合段关键技术研究	180
3	课题3：海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术研究	120
4	课题4：瓯江大桥上部混合梁施工控制技术研究	110
5	课题5：瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术研究	130
6	课题6：瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术的研究	100
7	课题 7、基于特征数据的瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术的研究	120
8	项目打包费用	150
合计		1090

各子课题研究任务拟承担单位见表 8-3。

表 8-3 子课题研究任务拟承担单位情况

序号	项 目	拟 承 担 单 位
1	课题1：混合梁刚构桥承载性能与结构优化研究	部公路所、设计院
2	课题2：混合梁刚构桥钢混结合段关键技术研究	中铁大桥局桥科院、中交一公局
3	课题3：海工混凝土现场强度评定与耐久性控制技术研究	部公路所、中交一公局
4	课题4：瓯江大桥上部混合梁施工控制技术研究	部公路所、同济大学、中交一公局
5	课题5：瓯江大桥钢桥面铺装设计与施工技术研究	省交通厅、设计院、部公路所
6	课题6：瓯江大桥竖向和体外预应力状态感知及控制技术的研究	部公路所、设计院、中交一公局
7	课题 7、基于特征数据的瓯江大桥健康监测体系及养护管理技术的研究	部公路所、设计院、中交一公局

9. 经济效益和社会效益评估

9.1. 经济效益评估

本项目研究成果直接服务于示范工程——瓯江大桥，预计在瓯江大桥建设和

使用过程中产生的直接经济效益 1.6 亿元以上，评估过程如下：

通过混合梁刚构桥承载性能及结构优化设计研究，改善混合梁刚构桥整体受力性能，使主梁上部结构构造更加合理，应力分布更加平顺，对混合梁刚构桥长期性能建立预测及报警机制，预估延长大桥使用寿命 5%~10%，按瓯江大桥主桥造价 8 亿元计，使用期内直接经济效益约 $(5\% \sim 10\%) \times 8 \text{ 亿} = (0.4 \sim 0.8) \text{ 亿}$ ；

通过钢-混结合段关键技术研究，提出钢-混结合段的适宜构造及施工工艺，改善混凝土浇筑工艺，降低返工率，节约用工、机械台班、材料等费用，预计直接经济效益 300 万元；通过钢-混结合段传力机理及承载可靠性试验研究，提高钢混结合段传力的可靠性，降低使用过程中的维护费用，预计可以延长使用寿命 5%~10%，约 $(5\% \sim 10\%) \times 5000 \text{ 万元} = (250 \sim 500) \text{ 万元}$ 。

通过混合梁刚构桥上部结构施工控制技术研究，解决整体钢箱梁吊装施工关键技术难题，提出合理的钢箱梁整体吊装及其控制技术，降低在钢箱梁在制造、预拼装和现场安装环节的拼装返工率，减少钢材和节段的浪费预估在 20%左右，直接经济效益可达 $20\% \times 1600 \text{ 吨} \times 0.6 \text{ 万元/吨} = 192 \text{ 万元}$ 。

通过瓯江大桥桥面铺装设计与施工技术研究，提出适宜的铺装结构和材料体系，预计可以延长铺装寿命 2~4 年，直接经济效益可达 $(2 \sim 4) / 8 \times 8000 \text{ 万元} (\text{铺装造价}) = (2000 \sim 4000) \text{ 万元}$ 。

通过瓯江大桥竖向及体外预应力沿程状态感知与监测技术研究、基于特征数据的桥梁结构健康监测、诊断与智能决策养护管理技术的研究，提高桥梁的检测质量，及时、便捷地提供可靠的结构性能数据，提出合理养护策略，可以节约养护资金，延长桥梁结构使用寿命 5~10 年，预估直接经济效益 $(5 \sim 10) / 100 \times 10 \text{ 亿元} = (0.5 \sim 1) \text{ 亿元}$ 。

9.2. 社会效益

通过本项目研究，在混合梁刚构桥的设计、施工、检测、养护等方面形成系列的工艺标准、施工指南、设计手册和系列的专利以及产品，社会效益巨大，具体表现在以下三个方面：

(1) 延长结构使用寿命，减少资源浪费：通过研究构建瓯江大桥施工运营养护一体化管理与监测系统，不仅能够服务于瓯江大桥工程建设与运营全过程管理，延长结构使用寿命，充分发挥结构使用性能，还能够为国内其他特大桥的建

设与运营养护科学化管理提供借鉴。通过项目研究，降低信息取得成本，加强不同阶段信息的共享，以推动全寿命周期科学化管理方法在我国的应用和推广。

(2) 支撑同类桥梁建设发展：项目研究将提出一系列有关混合梁刚构桥设计施工的核心技术标准、规程和指南，申请一批专利技术，编制一批国家级、省级工法，最终形成一整套完善的混技术体系、方法与标准。这些成果可被借鉴或直接应用于其他有类似景观需求桥梁上，具有广阔的产业化前景。

(3) 推动行业技术进步：预期研究成果解决混合梁刚构桥设计施工关键技术问题，为混合梁刚构桥结构夯实工程实践基础，这对我国重大工程建设和社会经济发展将起到重要的支撑作用。混合梁刚构桥设计施工成套技术将大大提升我国大跨径刚构桥的建设水平，形成品牌，提升我国桥梁建设的世界认可度。

10. 其它需要说明的问题

(1) 本项目将采用产学研相结合的实施机制。温州市瓯江通道建设有限公司将充分发挥科研与技术管理优势，不断加强监督与协调力度，保证项目顺利实施；高等院校、科研机构将充分发挥智力资源优势，不断加强技术支持力度，保证研究水平。企业将充分发挥工程经验丰富，设备、技术力量雄厚的优势，保证研究成果的检验与推广应用。

(2) 为增强自主创新能力，并充分了解和掌握国内外该领域的研究动态和发展趋势，项目研究过程中需开展多种形式的国际和地区科技合作与交流。积极主动参与国际桥梁工程学术组织和学术会议。建立培训制度，提高温州市瓯江通道建设有限公司参与国际学术交流的能力。项目承担单位协同有关单位联合举办学术研讨会，积极促进我国大跨径桥梁建设的经验交流。

(3) 本项目研究内容多、技术难度大，为达到项目的预期研究成果，完成项目各阶段拟定的考核指标，各参研单位项目研究团队需齐心协力、互相配合。同时也希望参研的各单位能对本项目给予支持和帮助，这将是项目高质量完成的有力保障。

(4) 课题参研单位较多，研究经费有限，在课题研究开展的过程中，应充分结合依托工程的实施过程，将试制、试验、测试等工作与实际工程紧密结合，合理、高效的使用项目的研究经费。

11. 编写人员名单

(见附表 1);

12. 第一承担单位意见

(见附表 2)。

附表 1

交通运输部科技项目可行性研究报告编写人员名单

序号	姓 名	工 作 单 位	所学专业	现从事专业	职称/职务	签 名
1						
2	张劲泉	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	研究员/副院长	
3						
4						
5						
6						
7						
8	李万恒	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	副研究员/主任	
9	杨 昀	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	教授级高工/副主任	
10	赵尚传	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	研究员/主任工程师	
11	孟书涛	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	研究员/副主任	
12	王国亮	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	副研究员/副总经理	
13	王晓晶	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	副研究员	
14	傅宇方	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	副研究员/主任工程师	
15	谢 峻	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	副研究员	
16	曹一山	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	副研究员	
17	李法雄	交通运输部公路科学研究所	桥梁工程	桥梁工程	助理研究员	

附表 2

第一承担单位意见:

(公 章)

单位负责人（签字）：

年 月 日