

混凝土 叠合结构

设计原理与应用

赵顺波 张新中 编著

37
23



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

混凝土叠合结构 设计原理与应用

赵顺波 张新中 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了混凝土叠合结构的基本概念和优缺点,总结了钢筋混凝土和预应力混凝土叠合结构的工程应用,特别是在水利水电工程中的应用状况;采取理论分析和试验研究相结合的叙述方式,阐述了钢筋混凝土和预应力混凝土叠合结构的梁(板)构件受力性能及其正截面、斜截面承载力的设计方法;使用荷载作用下正截面抗裂度、裂缝宽度和变形的验算方法;使用荷载作用下斜截面抗裂度和斜裂缝宽度的验算方法;叠合面设计与构造的方法,以及预制构件的连接构造设计等。作为工程设计示例,对南水北调中线工程河北段漕河特大型预应力混凝土渡槽叠合结构的设计和施工方法进行了简要介绍。对叠合结构概念在钢筋混凝土柱中的推广应用作了总结。

本书可作为工程技术人员和科研工作者的参考书,也可作为在校研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土叠合结构设计原理与应用/赵顺波,张新中编著. —北京:中国水利水电出版社, 2001. 8

ISBN 7-5084-0801-2

I. 混… I. ①赵…②张… IV. 混凝土结构: 组合结构—结构设计
N. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 062229 号

书 名	混凝土叠合结构设计原理与应用
作 者	赵顺波 张新中 编著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 12 印张 284 千字
版 次	2001 年 10 月第一版 2001 年 10 月北京第一次印刷
印 数	0001—4300 册
定 价	20.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

混凝土叠合结构的产生最初是为了解决大型预制构件安装或解决现浇结构高空支模比较复杂的施工问题,经过研究而发展成为现代混凝土结构的预制和现浇施工工艺与结构设计方法相结合的新型装配整体式结构。我国从20世纪50年代末开始研究混凝土叠合结构的受力性能,到70年代在TJ10—74《钢筋混凝土结构设计规范》中列入了有关叠合构件的设计条款,特别是70年代后期由混凝土结构设计规范标准管理单位中国建筑科学研究院组织成立的“叠合结构科研专题组”,对混凝土叠合结构的受力性能开展了比较系统深入的研究,使我们对混凝土叠合受弯构件的受力特性有了比较深刻的认识,有关研究成果被列入GBJ10—89《混凝土结构设计规范》,对推动混凝土叠合受弯构件在结构工程中的应用起到了积极作用。

本书编著者在混凝土叠合结构方面开展了十多年的研究和推广应用工作,并作为SL/T191—96《水工混凝土结构设计规范》的主要起草人编制叠合式受弯构件的设计条款,取得了系列科研成果。编著者对钢筋混凝土叠合梁斜截面抗裂度和斜裂缝宽度计算方法、对无粘结预应力混凝土叠合梁受力性能和计算方法进行了有益的探索,将叠合结构设计 with 施工方法推广应用于南水北调工程中的大型预应力混凝土渡槽结构是一种新尝试,将连续梁板结构的研究成果与设计方法、叠合结构的预制构件连接构造设计方法、叠合面设计与构造方法等进行比较系统的总结,对于工程设计应用具有重要的参考价值,同时对叠合结构概念在竖向承重构件(柱)中的推广应用进行了具有前瞻性的概括。显然这本书所述的内容已不仅仅限于对现行规范的解说,而是综合了国内外学者在混凝土叠合结构领域取得的整体研究成果,因而可以使读者比较系统的了解混凝土叠合结构的研究、设计和工程应用状况,是一本很好的参考书。

赵国藩

2001年8月

5142-61

前 言

混凝土叠合结构以预制部分的钢筋混凝土或预应力混凝土梁（板）结构承受施工期荷载，待其上现浇混凝土达到设计强度后，再由预制部分和现浇部分形成的整体叠合截面承受使用荷载。相对预制装配结构而言，采用混凝土叠合结构可提高结构的整体刚度和抗震性能，同时还可解决施工现场大型预制构件吊装能力不足的问题。相对现浇整体结构而言，采用混凝土叠合结构可减轻支模工作量（尤其是高空或困难条件下），提高施工效率，节省模板材料，经济效益十分显著。因此近年来，混凝土叠合结构在工民建、水工、道桥及港口工程中得到了日益广泛的应用。

自1990年以来，编著者得到水利水电基金（批准号：89050387）、河南省自然科学基金（批准号：944061800）、大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室基金资助（批准号：LP9106、LP9305）的资助，在混凝土叠合结构理论研究方面取得了系列成果，这些成果分别获1994年河南省科技进步三等奖，1996年水利部科技进步二等奖，1999年水利部科技进步三等奖，并被水利部、电力工业部颁布的国家行业标准SL/T191—96，DL/T5057—96《水工混凝土结构设计规范》所采用。

1995年，编著者参与了南水北调中线工程河北省和河南省境内的渡槽结构设计研究工作，其中以河北省漕河特大型预应力混凝土渡槽为设计对象提出的叠合结构设计与施工方案，经河北省水利厅组织专家会议鉴定（鉴定证书：冀（97）水技鉴字第15号），认为“叠合施工方法具有广泛的应用和推广价值，研究成果达到国际先进水平”。获1998年河北省水利科技进步一等奖。

1997年，《混凝土结构设计规范》国家标准管理组委托本课题组为“钢筋混凝土和预应力混凝土叠合结构设计方法”研究课题负责单位，并列入规范第六批科研专题。

通过上述工作，使我们能够有机会比较系统地对钢筋混凝土和预应力混凝土叠合结构受力性能 and 设计方法进行研究。为此，编著者深感混凝土叠合结构在土木工程建设中的地位日益重要，加之国内其他学者在该科学领域取得了较多的研究成果，从理论高度系统地分析总结钢筋混凝土及预应力混凝土叠合结构的研究成果和设计方法，已成为十分重要的科学课题。相信本书的出版，将会补充完善现行GBJ10—89《混凝土结构设计规范》和SL/T191—96《水工混

混凝土结构设计规范》的有关内容，特别是SL/T191—96《水工混凝土结构设计规范》系首次列入叠合式受弯构件的设计条款，本书可作为其背景科研成果的详细解说，将对工程设计人员在设计与施工中具体应用提供有益的参考。

本书阐述了混凝土叠合结构的基本概念和优缺点，总结了钢筋混凝土和预应力混凝土叠合结构的工程应用，特别是在水利水电工程中的应用状况；采取理论分析和试验研究相结合的叙述方式，阐述了钢筋混凝土和预应力混凝土叠合结构的梁（板）构件受力性能及其正截面、斜截面承载力的设计方法；使用荷载作用下正截面抗裂度、裂缝宽度和变形的验算方法；使用荷载作用下斜截面抗裂度和斜裂缝宽度的验算方法；叠合面设计与构造方法，以及预制构件的连接构造设计等。为了便于工程设计人员参考应用，每章列有相应的计算例题。此外，作为工程设计示例，对南水北调中线工程河北段漕河特大型预应力混凝土渡槽叠合结构设计和施工方法进行了简要介绍。同时，对叠合结构概念在钢筋混凝土柱中的推广应用也作了总结。

德高望重的中国工程院院士赵国藩教授对本书编写给予了热情鼓励，并在百忙之中为本书作序。在本书付梓之时，编著者谨表示衷心地感谢。

本书第一章至第六章、第十二章由赵顺波编写，第七章至第十一章由张新中编写，全书由赵顺波统稿审定。本书的许多研究成果是在华北水利水电学院李树瑶教授的指导下完成的，在此表示衷心感谢。编著者感谢在我校攻读硕士学位的研究生王运霞、黄和法、潘丽云、赵志方等同志，他（她）们尽心尽力，刻苦学习，钻研新的科学知识，在完成的硕士学位论文中，对本专题的研究作出了很大贡献。同时，编著者感谢同事陈文义副教授、朱尔玉博士后和大连理工大学近海与海岸工程国家重点实验室和结构分室的各位老师们在相应研究工作中给予的友好合作。

由于水平所限，本书一定存在着不妥和需进一步改进之处，尚祈工程技术界的同仁不吝赐教指正。

编著者

2001年3月于郑州

作者简介



赵顺波

1964年生于河北省武邑县。毕业于大连理工大学土木建筑学院结构工程专业，1989年获工学硕士学位。

1997年获工学博士学位。1999年获得首批“国家一级注册结构工程师”注册资格。现任华北水利水电学院土木工程系副主任、教授、水工结构工程专业硕士生导师，兼任中国土木工程学会——混凝土与预应力混凝土分会——纤维混凝土委员会委员。主要从事高强混凝土、纤维混凝土、预应力混凝土材料与结构设计理论研究、教学和工程应用。在国内外发表学术论文30余篇，编写出版教材《工程结构试验》一部。系国家行业标准SL/T191-96《水工混凝土结构设计规范》主要起草人，参加中国工程建设标准化协会标准《纤维混凝土结构技术规程》编写工作。研究成果获省部级科技进步奖共4项。

张新中



1963年生于山西省侯马市。1984年毕业于武汉水利电力学院建筑工程专业，1990年获哈尔滨建筑大学结构工程专业工学硕士学位。1999年获得首批“国家一级注册结构工程师”注册资格。现任华北水利水电学院勘察设计院副院长、高级工程师。主要从事土木建筑工程教学、设计和科研工作，曾获国家科技进步二等奖、建设部科技进步一等奖及河南省教委科技进步奖和优秀设计奖多项，发表论文10余篇。

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 混凝土叠合结构的基本概念	1
第二节 混凝土叠合结构的发展及工程应用概况	1
第三节 混凝土叠合结构的优缺点	6
第二章 混凝土叠合结构的设计计算原则	8
第一节 概述	8
第二节 结构设计的实用设计表达式	8
第三节 正常使用极限状态的结构功能限值	10
第三章 钢筋混凝土叠合梁正截面的受力性能与计算方法	16
第一节 概述	16
第二节 钢筋混凝土叠合梁正截面的受力性能	17
第三节 钢筋混凝土叠合梁正截面的承载力计算	24
第四节 钢筋混凝土叠合梁正截面的抗裂验算	24
第五节 钢筋混凝土叠合梁的裂缝宽度验算	25
第六节 钢筋混凝土叠合梁的变形验算	30
第四章 钢筋混凝土叠合梁斜截面的受力性能与计算方法	39
第一节 概述	39
第二节 钢筋混凝土叠合梁斜截面的受力性能	39
第三节 钢筋混凝土叠合梁斜截面的承载力影响因素分析	45
第四节 钢筋混凝土叠合梁斜截面的承载力评估	47
第五节 钢筋混凝土叠合梁斜截面的承载力设计	51
第六节 钢筋混凝土叠合梁斜截面的抗裂验算	55
第七节 钢筋混凝土叠合梁的斜裂缝宽度验算	57
第五章 预应力混凝土叠合梁的受力性能与计算方法	60
第一节 概述	60
第二节 预应力混凝土叠合梁的受力性能试验研究	60
第三节 预应力混凝土叠合梁正截面的承载力计算	64
第四节 预应力混凝土叠合梁斜截面的承载力计算	66
第五节 预应力混凝土叠合梁的抗裂验算	68
第六节 预应力混凝土叠合梁的裂缝宽度验算	70

第七节 预应力混凝土叠合梁的变形验算·····	72
第六章 叠合连续梁的受力性能与设计方法·····	80
第一节 概述·····	80
第二节 叠合连续梁正截面的受力性能·····	80
第三节 叠合连续梁斜截面的受力性能·····	92
第四节 叠合连续梁的设计计算方法·····	100
第七章 叠合板的受力性能与设计方法·····	104
第一节 概述·····	104
第二节 四边简支钢筋混凝土叠合双向板的受力性能·····	104
第三节 预应力混凝土薄板叠合连续板的受力性能·····	108
第四节 叠合连续板的设计方法·····	111
第八章 叠合面受剪的承载力设计·····	112
第一节 概述·····	112
第二节 叠合面抗剪强度的试验研究·····	112
第三节 叠合面受剪的承载力计算·····	122
第九章 低周反复荷载下叠合梁、板的受力性能与计算方法·····	129
第一节 概述·····	129
第二节 低周反复荷载下钢筋混凝土叠合连续梁的受力性能与计算方法·····	129
第三节 低周反复荷载下叠合板受力性能的试验研究·····	132
第十章 预应力混凝土渡槽的叠合结构设计·····	137
第一节 概述·····	137
第二节 渡槽结构形式的选择·····	137
第三节 渡槽结构叠合方案的确定·····	143
第四节 渡槽结构的设计与构造·····	144
第五节 预应力筋的施工顺序·····	151
第十一章 叠合结构的节点构造设计·····	152
第一节 概述·····	152
第二节 柱与梁的连接·····	152
第三节 梁与梁的连接·····	165
第四节 梁与板的连接·····	167
第十二章 钢筋混凝土叠合柱的概念与工程应用·····	171
第一节 概述·····	171
第二节 钢筋混凝土叠合柱的设计概念·····	171
第三节 钢筋混凝土叠合柱的工程应用·····	174
参考文献·····	176

第一章 绪 论

第一节 混凝土叠合结构的基本概念

混凝土叠合结构最初是为了解决全预制结构吊装能力不足,或者是为了解决现浇整体结构现场浇筑混凝土时施工模板支撑困难,或占用工期较长等施工问题而发展起来的。一般是指在预制的钢筋混凝土或预应力混凝土梁(板)上后浇混凝土所形成的两次浇筑混凝土结构,按其受力性能可以分为“一次受力叠合结构”和“二次受力叠合结构”两类。

图 1-1 所示为典型的混凝土叠合梁板结构,若施工时预制的梁板吊装就位后,在其下设置可靠的支撑,施工阶段的荷载将全部由支撑承受,预制梁板只起到叠合层现浇混凝土的模板作用,待叠合层现浇混凝土达到强度后再拆除支撑,由两次浇筑后所形成的叠合截面便能够承受使用期的全部作用荷载了,整个截面的受力是一次发生的,从而构成了“一次受力叠合结构”。

同样是图 1-1 所示的混凝土叠合梁板结构,若施工时预制的梁板吊装就位后,直接以预制部分的钢筋混凝土或预应力混凝土梁(板)作为现浇层混凝土的模板并承受施工期荷载,待其上现浇层混凝土达到设计强度后,再由预制部分和现浇部分形成的叠合截面承受使用荷载,叠合截面的应力状态是由两次受力产生的,便构成了“二次受力叠合结构”。

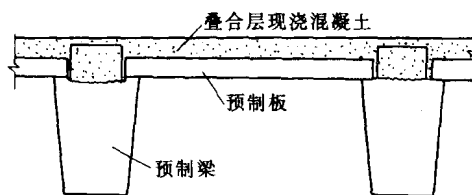


图 1-1 叠合梁板结构示例

“一次受力叠合结构”除在必要时需做预制与现浇混凝土的界面——叠合面抗剪强度验算外,其余设计计算方法与普通混凝土结构相同。因此,本书除有关叠合面受剪承载力设计一章注明的内容外,混凝土叠合结构泛指“二次受力叠合结构”。

第二节 混凝土叠合结构的发展及工程应用概况

由于我国在工业与民用建筑、水利水电工程、道桥及港口工程建设方面的行业发展的不平衡性,使得混凝土叠合结构在各领域范围的发展和工程应用也不尽相同,下面分别做一概括总结。

一、在工业与民用建筑结构中的应用

混凝土叠合结构在工业与民用建筑中的应用起始于 50 年代末,1959 年原国家一机部一院编制了预应力混凝土叠合梁标准设计图,对这种叠合构件的工程应用起到了积极的推动作用。1961 年同济大学研制了一种装配整体式密肋楼板,预制部分为工字形小梁和薄板,面层为现浇混凝土。经过试验,预制部分和现浇部分能很好地共同工作,是一种较好的楼面结构形式^[1]。到 70 年代,民用建筑中预应力混凝土预制小梁与现浇板相结合的混凝土叠

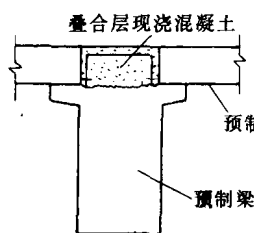


图 1-2

合屋面得到发展，并且在国家标准 TJ10—74《钢筋混凝土结构设计规范》中列入了有关叠合构件设计方法的条款^[2,3]。期间，原国家建委建筑科学研究院等单位试验成功用冷拔低碳钢绞线生产预应力混凝土叠合梁板，为这种结构扩大了应用范围^[4]。

进入到 80 年代以后，混凝土叠合梁板结构除在多层建筑中得到更加广泛的应用外^[5~8]，在高层建筑中的应用也得到比较迅速的发展，结构形式也根据建筑使用要求不同而丰富变化^[9~17]。就混凝土叠合梁板结构而言，根据具体情况或为预制板

搭在预制梁上通过现浇板和梁上的叠合层混凝土形成整体（图 1-1），或为全预制板搭在叠合梁的预制部分通过现浇梁上叠合层混凝土形成整体（图 1-2）。叠合梁的预制截面形式也丰富多变，如槽形、倒 T 形、花篮形和 L 形等。图 1-3 所示为武汉金源世界中心大厦梁板结构的次梁叠合组成方式，在预制构件厂利用胶囊和钢模生产成分片拼装箱形截面和抽孔空心截面，即可节约混凝土用量，以减小自重荷载、节约钢筋，又便于运输吊装^[9]。

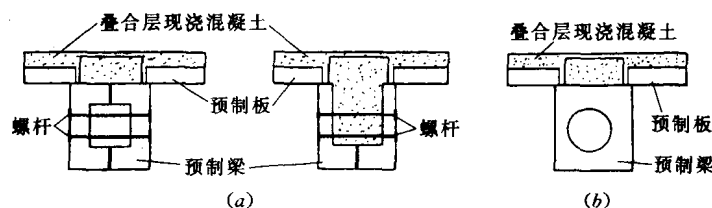


图 1-3 分片拼装箱形截面和抽孔空心截面叠合梁

(a) 分片拼装箱形截面；(b) 抽孔空心截面

为了预制构件运输和施工的便利，无结合筋楼面叠合板的研制，突破了国家标准 TJ10—74《钢筋混凝土结构设计规范》规定的“在组合截面构件中，预制预应力混凝土构件的箍筋应有一部分伸入现浇的混凝土中，截面面积不宜小于叠合面面积的 0.15%”，采用平板压坑和滚筒压痕等方法使叠合面粗糙凹凸不平，或采用冲模一次成型工艺制成带肋叠合面，从而提高了叠合面的抗剪能力。在不降低叠合面抗剪能力的前提下，无结合筋叠合板具有加工制作方便、节约钢材的特点。叠合板的预制截面基本形式如图 1-4 所示。

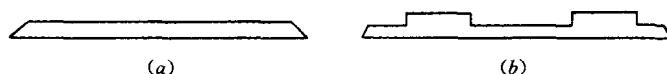


图 1-4 叠合板预制截面的基本形式

(a) 平板式；(b) 肋板式

在砌体结构中采用叠合式钢筋混凝土圈梁则扩展了叠合结构的应用范围^[18]，同时，将混凝土叠合结构用于建造公共场馆是这一结构更加新颖的应用领域^[19]。

在工业与民用建筑工程领域内，混凝土叠合结构的受力性能研究得到了许多单位和专家的重视，并结合混凝土结构设计规范的修订做了大量的试验工作，构成了国家标准 GBJ10—89《混凝土结构设计规范》更加全面科学地制定有关叠合式受弯构件设计方法的科研基础^[5]。

值得注意的是,混凝土叠合结构的概念正在进一步从叠合梁板结构的水平结构体系向叠合柱的竖向结构体系及由它们构成的三维结构拓展,使得叠合结构的研究和应用领域进一步拓宽,本书第十二章对这一趋势进行了概括介绍。

二、在水利水电工程中的应用^[20]

混凝土叠合结构在水利水电工程中的应用起始于60年代的刘家峡水电站,其尾水管扩散段顶板采用预制倒T形梁承重模板上后浇混凝土的施工方法。以后的石泉、安康、龙羊峡、万安、乌江渡、黄龙滩、葛洲坝、隔河岩等水电工程相继在不同工程部位采用了混凝土叠合结构,大致可归纳为以下几个方面。

1. 高度较大的孔口顶板

水电站进水口顶板、尾水管扩散段顶板、尾水平台、溢流坝胸墙、排沙底洞顶板等部位,由于孔口高度大,顶部混凝土浇筑立模困难,多采用预制钢筋混凝土或预应力混凝土倒T形梁(或梯形厚板)排列成承重模板,在其上分层现浇混凝土组成叠合结构。部分工程实例如图1-5所示。为保证倒T形梁在施工过程中的稳定性,防止倾覆,保证倒T形梁与现浇混凝土的有效连接,一般设连接钢筋或构造角钢将预制倒T形梁连成一体,并设插筋伸入现浇混凝土。

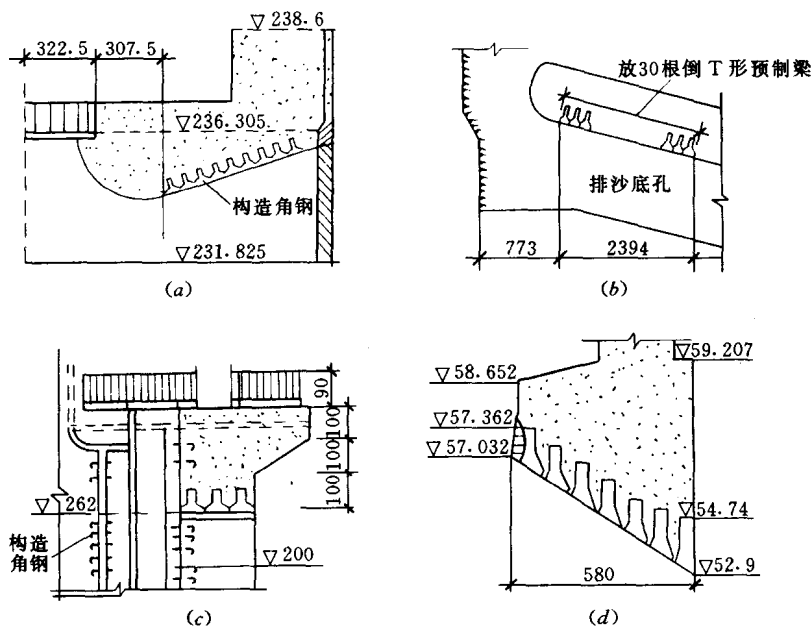


图 1-5 采用预制倒T形梁做承重模板的部分工程结构布置

(尺寸单位除高程以m计外,其余均为cm)

(a) 安康水电站小机厂房尾水管扩散段; (b) 葛洲坝大江排沙底孔顶板; (c) 安康水电站小机厂房尾水平台; (d) 葛洲坝大江电站8号~21号机进口检修墙

黄龙滩水电站混凝土重力坝在河床中部溢流坝顶设有六个带胸墙的溢流孔,孔口尺寸 $10\text{m} \times 12\text{m}$,胸墙底缘选用 $1/4$ 椭圆曲线,采用预制倒T形梁作承重模板(图1-6),较常规的支模全部现浇混凝土施工方法,缩短工期54天(近 $1/2$),节约木材 230m^3 及大量支模配件,施工质量良好,取得了较好的经济效益^[20]。

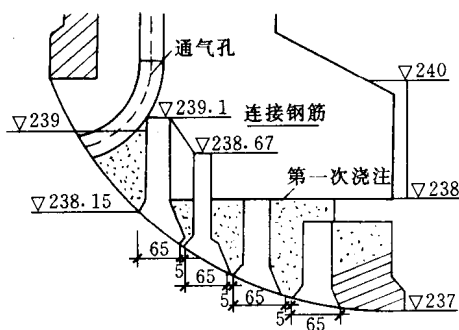


图 1-6 黄龙滩溢流坝胸墙预制梁结构布置
(尺寸单位除高程以 m 计外, 其余均为 cm)

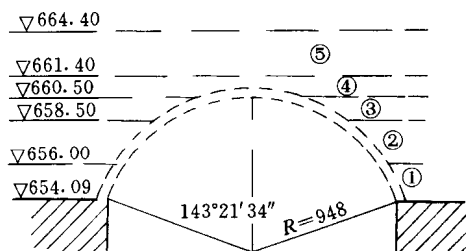


图 1-7 乌江渡坝内副厂房预制薄拱及现浇混凝土分层示意图

2. 坝内孔洞顶拱

空腹坝的空腹、坝内厂房、廊道及各种孔洞封顶施工, 很多工程采用了预制钢筋混凝土拱模, 吊装就位后再分层现浇混凝土的施工方法, 如石泉水电站空腹坝段空腹和葛洲坝水电站坝内廊道的拱顶等。

乌江渡水电站坝内副厂房 7~11 坝段采用净跨为 18m、半径为 9.48m 的圆弧拱顶, 封顶长度上游侧为 85.52m, 下游侧为 78.68m, 内部为多层钢筋混凝土框架结构。施工中采用预制薄拱(厚 20cm、宽 143cm、半径 9.48m)整体吊装, 安装成承重模板后分层现浇混凝土的方法, 如图 1-7 所示。不仅解决了落地脚手架支模困难和多层作业的施工干扰, 而且较一般采用钢木混合承重拱架立模施工节约各类技工 1190 工日、钢材 13t、木材 316m³, 技术经济效益十分显著。乌江渡主厂房拱顶也采用了同样的施工方法^[22]。

3. 水电站厂房等部位的板梁结构

水电站厂房屋盖、屋盖梁、楼板、变压器平台及坝顶门槽盖板等, 由于受工地起吊能力的限制, 广泛采用了厚度较小的预制梁板做承重模板与现浇混凝土构成叠合梁板的施工方法。如龙羊峡水电站主、副厂房分别以部分预应力混凝土倒 T 形梁和钢筋混凝土倒 T 形梁排列成承重模板, 其上混凝土分两次浇筑(先浇至与倒 T 形梁顶齐平, 再浇至所需厚度)成整体屋盖。安康水电站小机厂房屋盖梁以矩形截面梁做承重构件, 其上现浇混凝土成为 T 形截面叠合梁, 11~15 坝段坝顶表孔门槽盖板采用了矩形截面叠合板。葛洲坝水电站的船闸底部、电站厂房底部各层楼板、主变压器平台等部位大量采用了各种外形尺寸的

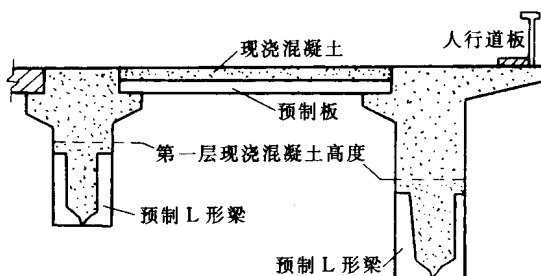


图 1-8 安康水电站 11~15 坝段表孔门机叠合行车梁和表孔叠合盖板

钢筋混凝土预制板作承重模板, 再与现浇层混凝土构成叠合结构的方法。

4. 坝顶门机行车梁

当坝顶门机行车梁的预制截面尺寸受到工地起吊设备能力限制时, 也采用了各种形式的叠合梁, 并且这种叠合梁的预制和现浇截面较为复杂。图 1-8 为安康水电站表孔坝段门机行车梁, 其底部采用两根 L 形预制梁, 上面分层现浇混凝土。葛

洲坝水电站则采用了 T 形和 U 形预制梁上现浇混凝土的叠合门机梁。

5. 水工渡槽结构

叠合结构在水工渡槽工程中也有应用,陕西汉中的沥水沟渡槽为 U 形装配式排架渡槽,由于受起吊能力限制,槽箱的底壳与边墙分别采用了预应力混凝土和钢筋混凝土预制构件,槽底与边墙之间以高强现浇混凝土经超振施工联接,该渡槽运行未发生异常现象。安徽青弋江综合利用工程——花园渡槽,采用了预制工字形截面预应力混凝土大梁,吊装就位后在大梁上搭支架浇筑底板、侧墙和联系杆的叠合结构(图 1-9)^[23]。编著者在南水北调大型预应力混凝土渡槽结构设计研究中,也提出了新型的叠合结构^[24],具体内容见第十章。

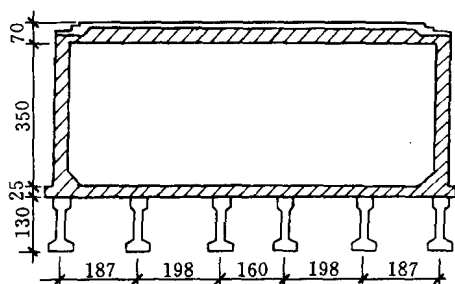


图 1-9 安徽花园渡槽槽身横断面

与工民建混凝土叠合结构比较,水电工程的混凝土叠合结构具有以下特点。

(1) 从截面角度讲,水工结构尺寸较大,预制构件作为承重模板,其截面尺寸与叠合后结构的截面尺寸相比较小,叠合面高度较低。预制构件的截面形状较为复杂,如底边为曲线的倒 T 形梁、T 形梁、L 形梁、U 形梁等,叠合面也较复杂。

(2) 从施工角度讲,除少量与工民建梁板式叠合构件类似外,一般排列成承重模板,其上混凝土分多次浇筑后形成整体结构,不属于典型结构构件。

(3) 从受力角度讲,类似于工民建梁板式叠合结构的预制部分,为二次或三次受力,叠合面受力复杂。对于 L 形或 U 形截面,受压区混凝土为预制混凝土与二期混凝土共同受力,与矩形或 T 形截面基本由二期混凝土受力相比具有不同特点。浇筑二期混凝土后形成板式承重模板的倒 T 形梁预制构件,均为多次受力,由于每层混凝土的龄期强度不同、各叠合面的特征不同,使得每层混凝土及其叠合面的受力性能也会有所不同。边缘预制构件在二期混凝土浇筑时,由于流态混凝土的侧向推力,使其受力由单向弯剪变为双向弯剪甚至受扭。

三、在桥梁结构和港口工程中的应用

混凝土叠合结构在桥梁结构的宽翼 T 形截面梁、箱形截面梁及桥面板等有着广泛的应用,在港口工程往往用于码头的装卸机械轨道梁、引桥梁等结构和混凝土平台,叠合层现浇混凝土往往起到将预制简支梁、板转换为连续梁、板结构的作用,从而改善了结构的受力状态^[26~30]。图 1-10 为预应力混凝土工型组合梁桥通用构造图,其预应力

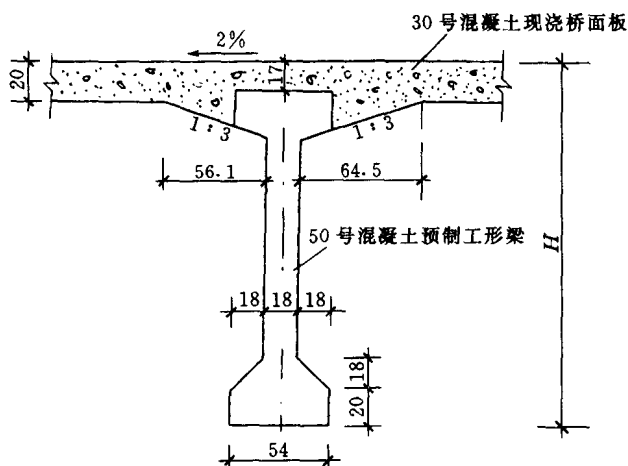


图 1-10 预应力混凝土工型组合梁桥通用构造图

混凝土工型梁在现场预制并吊装就位后, 将作为钢筋混凝土现浇桥面板和横隔梁的模板支撑, 待现浇桥面板和横隔梁的混凝土达到设计强度后, 便形成了整体受力结构^[28]。图 1-11 为我国 1977 年援建赞比亚的卢阿普拉河上 7 孔跨度 20m 的槽形梁组合板梁桥, 每孔 4 片先张预应力混凝土槽形梁和 7 块预应力混凝土空心车道板通过预制成批生产, 施工时, 将槽梁架设就位后, 上铺车道板, 再利用现浇桥面混凝土将二部分结合成整体箱梁^[29]。

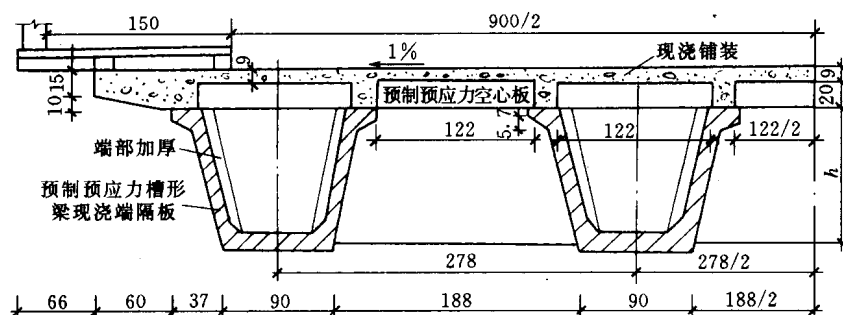


图 1-11 箱型组合梁桥

第三节 混凝土叠合结构的优缺点

混凝土叠合结构的优点, 是较为明显的。

(1) 从受力性能上看, 相对全预制装配结构而言可提高结构的整体刚度和抗震性能; 在配置同样的预应力筋时, 相对于全截面的荷载作用受拉边缘而言, 在预制截面上建立的有效预压应力较大, 从而提高了构件的抗裂性能。在同样抗裂性能的前提下, 则可节省预应力筋用量。同时, 混凝土叠合结构的二次受力特点减少了连续结构支座截面的负弯矩, 从而减少了相应的钢筋量。

(2) 从制作工艺上看, 叠合结构的主要受力部分在工厂制造, 机械化程度高, 易于保证质量, 采用流水作业生产速度快, 并且可提前制作, 不占工期。现浇混凝土以预制部分做模板, 较全现浇结构可减轻支模工作量 (尤其是高空或困难条件下), 节省模板材料, 提高施工效率, 缩短工期。同时, 工厂预制易于实现较复杂截面形式的制作, 对于开发构件承载潜力, 降低结构自重具有明显的优势。

(3) 长期的科学试验和工程实践结果表明, 混凝土结构工程中采用叠合结构可取得十分显著的经济效益。当结合采用高强钢筋时, 钢筋用量可大大降低, 节省钢材 50% 左右。当结合采用空腹预制截面时, 节省混凝土 30%~40%。模板可节约 75%~85%, 工期可缩短 1/5~1/3。尽管增加了预制加工和运输吊装环节, 但工程总造价仍可降低 10% 以上。

混凝土叠合结构的基本构件一般为叠合梁和叠合板, 截面由预制混凝土截面和后浇混凝土截面组成, 它们的共同工作性能依赖于新旧叠合面的抗剪性能。因此, 混凝土叠合结构设计除需要进行预制构件和叠合构件的正截面、斜截面设计外, 叠合面的抗剪设计是非常重要的组成部分。可见混凝土叠合结构的设计要复杂一些, 将增加设计工作量。显而易见, 混凝土叠合结构的施工技术含量也有较大的提高, 特别是在施工质量管理方面向施工

单位提出了更严格的要求。

尽管混凝土叠合结构的受力性能研究与工程应用已经历了半个多世纪的历程，但其发展仍方兴未艾。随着新型建筑材料的出现，叠合结构的组成也有了新的变化，例如将钢纤维混凝土应用于简支叠合梁（板）的预制部分，用于连续叠合梁（板）的预制部分和承受负弯矩的现浇混凝土部位，用于叠合梁板结构节点区域等^[31,32]，其受力性能也在改变，这对于混凝土叠合结构领域的扩展具有十分重要的意义。

第二章 混凝土叠合结构的设计计算原则

第一节 概 述

同整浇结构一样,混凝土叠合结构的设计要从符合技术先进、经济合理、安全适用、确保质量的基本要求出发,满足结构安全性、适用性、耐久性等结构可靠性要求。一般来说,结构的可靠性和结构的经济性是相互矛盾的,正确的设计应是在结构的可靠性和经济性之间寻求一种最佳方案,使结构既有必要的可靠性又有合理的经济指标。为此,采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。

同时,为了保证叠合结构在施工阶段的安全性,并间接满足正常使用阶段的适用性,在设计时首先必须对预制截面高度 h_1 占叠合后截面总高度 h 的比例加以控制。根据编著者的研究成果,SL/T191—96《水工混凝土结构设计规范》规定,当 $h_1/h < 0.3$ 时,必须在施工阶段设置可靠支撑。由于该规定是建立在更加广泛的低叠合面钢筋混凝土叠合梁受力试验研究和工程实践基础上的,较之GBJ10—89《混凝土结构设计规范》规定的 $h_1/h < 0.4$ 时必须在施工阶段设置可靠支撑,对于扩展叠合结构的适用范围、减轻预制构件重量、降低对施工现场吊装设备能力的要求是有益的^[7,25]。

第二节 结构设计的实用设计表达式

一、承载能力极限状态设计的表达式

结构按承载能力极限状态设计时,应考虑荷载效应的基本组合和偶然组合。

1. 基本组合

叠合结构应对叠合构件及其预制部分分别进行计算。其荷载效应基本组合分别按下列两个阶段进行计算。

第一阶段:叠合层混凝土未达到强度设计值前的阶段,预制构件按简支构件计算。此时,荷载考虑预制构件自重、预制板自重、叠合层自重以及本阶段的施工活荷载。

第二阶段:叠合层混凝土达到强度设计值后的阶段,叠合构件按整体结构计算。此时,荷载考虑下列两种情况,并取其较大值:Ⅰ施工阶段,考虑叠合构件自重、预制板自重、施工阶段的永久荷载以及施工活荷载;Ⅱ使用阶段,考虑叠合构件自重、预制板自重、使用阶段的永久荷载及可变荷载。

(1) SL/T191—96《水工混凝土结构设计规范》规定,对应于荷载基本组合的承载能力极限状态设计表达式为

$$\gamma_0 \Psi S \leq \frac{1}{\gamma_d} R \quad (2-1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \gamma_{Gi} C_{Gi} G_{ki} + \sum_{j=1}^m \gamma_{Qj} C_{Qj} Q_{kj} \quad (2-2)$$