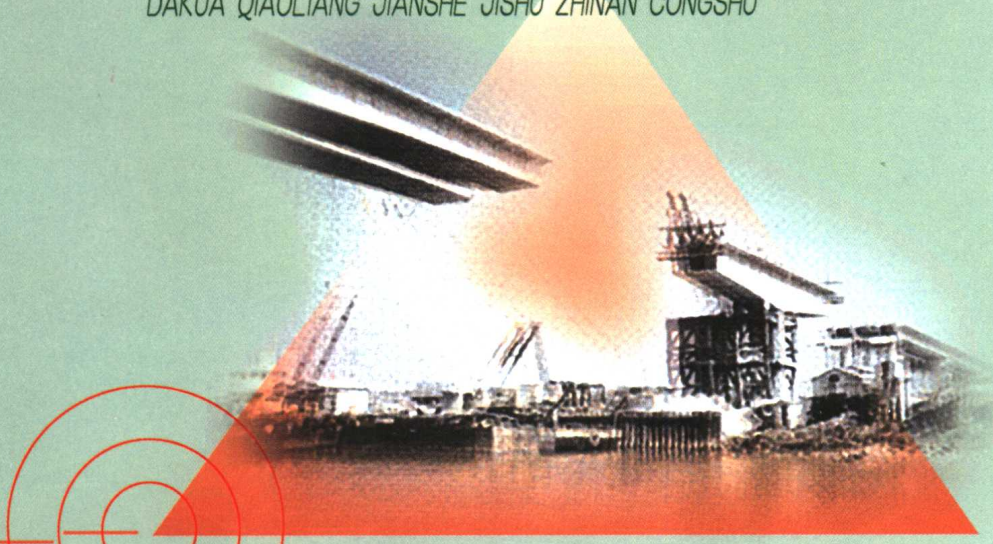


大跨桥梁建设技术指南丛书
DAKUA QIAOLIANG JIANSHE JISHU ZHINAN CONGSHU



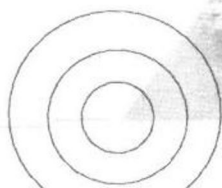
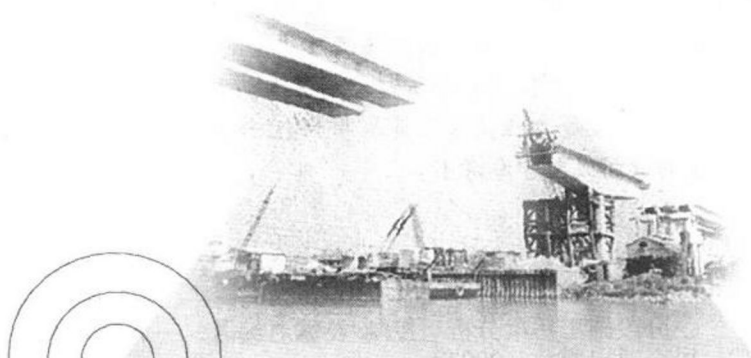
分段施工 **桥梁** 分析与控制

葛耀君 编著



人民交通出版社
China Communications Press

大跨桥梁建设技术指南丛书
DAKUA QIAOLIANJIANSHETECHNICALGUIDANCE



分段施工桥梁 分析与控制

葛耀君 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书以分段施工桥梁的结构分析与工程控制为主线,主要介绍了桥梁分段施工方法及其对结构受力的影响、分段施工过程中桥梁结构几何线形和内力状态跟踪计算、桥梁分段施工系统及其工程控制方法等内容,并结合不同桥型给出了九个分段施工桥梁的分析与控制算例。本书可供从事桥梁工程的研究、设计、施工、监理等工程技术人员参考,并可作为桥梁工程专业或结构工程专业研究生的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

分段施工桥梁分析与控制/葛耀君编著. —北京:人民交通出版社, 2003.5
(大跨桥梁建设技术指南丛书)
ISBN 7-114-04655-3

I.分... II.葛... III.①桥梁架设, 分段—桥梁结构—结构分析②桥梁架设, 分段—桥梁结构—结构计算 IV.U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 026101 号

大跨桥梁建设技术指南丛书

分段施工桥梁分析与控制

葛耀君 编著

正文设计:彭小秋 责任校对:刘 芹 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×980 1/16 印张:20.5 字数:343 千

2003 年 6 月 第 1 版

2003 年 6 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—4000 册 定价:32.00 元

ISBN 7-114-04655-3



19 世纪以前,梁桥和拱桥大都采用满堂支架施工方法,并采用设置预拱度的方法以抵消落架后桥梁在恒载作用下的挠度,使桥梁能按设计线形正确到位。

19 世纪下半叶,在建造钢悬臂桁架桥中首创逐段无支架悬臂拼装方法,同时也提出了分段施工中的结构受力分析和成桥状态的线形控制问题。20 世纪 30 年代,欧洲在建造钢筋混凝土拱桥时创造了分段悬拼跨中合龙的新方法,避免了昂贵的满堂支架在洪汛中被冲毁的危险。

二次大战以后,在预应力技术的推广应用创造了梁桥的逐段挂篮悬浇方法,预制节段的悬拼方法。斜拉桥问世后又发展了钢斜拉桥的悬拼和预应力混凝土斜拉桥的悬浇和悬拼施工技术;20 世纪 50 年代,前联邦德国 Leonhardt 教授首创的“倒退分析法”应当是现代桥梁分段施工结构分析和控制理论的先声。半个世纪间,梁桥和拱桥的跨度从 100m 分别增大为 300m 和 500m,而斜拉桥则已向千米跨度发起挑战,成为悬索桥的有力竞争方案。

随着跨度的增大,桥梁分段施工的结构分析和控制问题也日益成为设计和施工中的关键而备受关注。同济大学在 20 世纪 80 年代初就率先开展了这方面的研究。本书作者葛耀君教授是我指导的第一位涉足斜拉桥施工控制课题的研究生,此后又有多位研究生继续深入这一课题的研究,本书称得上是同济大学近 20 年间在这方面所做理论研究和工程实践工作的总结。

科学技术进步是无止境的。桥梁施工技术也在继续向前发展,新材料、新结构、新工艺的问世,特别是 IT 技术在桥梁施工领域的渗透和应用将会提出许多新问题。在 21 世纪中,智能化的大型建筑机器人和远距离遥控的自动化施工技术也将使桥梁施工现场发生巨大的变化。希望我的学生们继续努力,跟上形势的发展,为 21 世纪中国桥梁的辉煌做出更大的贡献。

项海帆
2002 年 2 月

前 言

桥梁结构分段施工方法及其分段施工技术的发展已经成为土木工程界最引人注目的成就之一,而且得到了国内外工程界的广泛认可。今天,世界各国特别是桥梁建设方兴未艾的中国,都把桥梁分段施工方法看成是一种适用、经济、安全的施工方法。

桥梁分段施工总要经历一个结构体系转换过程,一般意义下的桥梁结构一次落架计算方法只适用于整体施工方法,桥梁分段施工结构的受力状态不仅与分段施工方法而且与分段施工顺序有关。此外,在分段施工阶段,结构刚度小、变形大,尽管恒载较小,仍将产生显著的结构非线性效应,包括材料非线性、几何非线性和时变(混凝土徐变)非线性。再者,分段施工过程中存在着随机误差的影响,这种影响涉及到参数误差、测量误差和操作误差,使得桥梁结构的几何线形和内力状态很难达到期望目标。在电子计算机和现代控制理论迅速发展的今天,有必要也有可能以施工与分析并重、工程与控制结合、结构与系统比拟,探讨合理的分段施工桥梁结构的计算分析与工程控制方法,这正是本书的主要目的。

本书共分十章,从分段施工方法介绍开始,以结构分析与工程控制为主线,遵循深入浅出、结合算例的原则安排次序。其中,第一章介绍悬臂施工、逐跨施工、逐段施工和顶推施工等四种分段施工方法及其对桥梁结构受力的影响;第二、三章分别介绍了分段施工桥梁的结构状态分析问题和工程控制实施问题;第四章以较大篇幅介绍了桥梁结构非线性施工模拟计算,并包括温度荷载和风载作用影响;第五章介绍了梁式桥、拱式桥、斜拉桥和悬索桥等四种桥型的结构理想控制目标确定方法;第六章介绍了目前在桥梁施工控制中用到的确定性、随机性和自适应等三种系统及其控制方法;第七章介绍了分段施工中桥梁结构参数的最优估计原理和方法;第八、九、十章按照确定性控制、随机性控制和自适应控制分别介绍了九个分段施工桥梁的分析与控制计算示例,涉及到梁式桥两座、拱式桥一座、斜拉桥五座和悬索桥一座。

同济大学的桥梁工作者在项海帆教授和范立础教授指导下,自20世纪80年代初期就开始着手进行分段施工桥梁的分析与控制研究工作,除了作者本人在项海帆导师指导下,于1986年初率先完成“斜张桥的工程控制”硕士论文

后继续桥梁施工控制研究之外,桥梁工程系陈德伟副教授、李国平教授、肖汝诚教授、石雪飞教授等都曾多年从事这方面的理论与工程实践,积累了丰富的经验。虽然作者负责全书所有章节的撰写和定稿,实际上本书是集体智慧的结晶,特别是第五章和第七章内容分别是根据肖汝诚和石雪飞的博士论文改写的,而广东虎门大桥算例由潘永仁博士提供,桐庐富春江桥算例由李国平教授提供,350m斜拉桥算例由石雪飞教授提供,重庆大佛寺大桥算例由陈德伟副教授提供。对于他们无私的同学之情和同事之谊表示衷心的感谢。此外还要感谢为本书打印、制图和排版付出辛勤劳动的杨咏昕博士以及李永君、李默、陈斌、杜柏松、邹小洁、张志田、周峥、张伟等研究生。

在本书编写过程中,始终得到作者的导师——项海帆院士的鼓励与支持,他在百忙之中对全书进行了认真的审阅,提出了宝贵的意见并为本书作序,在此表示诚挚的谢意!

限于作者水平和编写时间,书中定有不当之处,恳请读者批评指正。

葛耀君

2003年1月于同济大学桥梁馆

目 录

第一章 分段施工方法概述	1
1.1 分段施工法的形成	1
1.2 分段施工法的特点	8
1.3 施工方法对结构受力的影响	10
1.4 施工顺序对结构受力的影响	13
1.5 分段施工中的结构内力演变	15
1.6 分段施工中的结构变形及调整	18
参考文献	22
第二章 分段施工桥梁的结构状态问题	23
2.1 分段施工荷载	23
2.2 结构状态分析	26
2.3 结构状态误差	31
参考文献	33
第三章 分段施工桥梁的工程控制问题	34
3.1 开环控制思想	35
3.2 闭环控制实践	44
3.3 自适应控制探索	49
3.4 桥梁施工控制系统	58
参考文献	65
第四章 分段施工中的结构分析	71
4.1 施工过程模拟计算	71
4.2 非线性分析方法	80
4.3 分段施工跟踪计算	100
4.4 结构温度影响计算	110

4.5 结构风载作用计算	121
参考文献	131
第五章 结构理想控制目标确定	134
5.1 梁式桥理想控制目标	135
5.2 拱式桥理想控制目标	140
5.3 斜拉桥理想控制目标	143
5.4 悬索桥理想控制目标	148
参考文献	155
第六章 工程控制理论与方法	156
6.1 确定性系统及其控制	157
6.2 随机性系统及其控制	164
6.3 自适应系统及其控制	168
参考文献	173
第七章 结构参数最优估计	174
7.1 参数估计准则	174
7.2 最小二乘估计原理	175
7.3 卡尔曼参数估计原理	178
7.4 分段施工中的参数估计	182
7.5 参数估计工程应用	191
参考文献	201
第八章 确定性控制计算示例	202
8.1 上海卢浦大桥钢拱肋施工状态分析	202
8.2 广东虎门大桥悬索桥施工仿真控制	213
8.3 桐庐富春江连续梁桥施工实时控制	234
参考文献	240
第九章 随机性控制计算示例	242
9.1 天津永和大桥斜拉桥施工仿真控制	242
9.2 上海浏港大桥斜拉桥施工实时控制	259
9.3 T形刚构桥悬臂施工仿真状态估计	264
参考文献	269
第十章 自适应控制计算示例	270
10.1 主跨 350m 斜拉桥施工仿真参数估计	270
10.2 宁波甬江大桥斜拉桥施工实时控制	282

10.3 重庆大佛寺大桥斜拉桥施工实时控制	294
参考文献	315

· 第一章 · 分段施工方法概述

“近 30 年来,土木工程界最重大而又引人注目的成就之一,就是预应力混凝土桥梁分段施工方法的形成及其分段施工技术的发展,而且得到了世界各国工程界的广泛承认。”^[1]桥梁结构分段施工方法之所以能迅速地形成并得到推广,主要归因于它是建立在坚实的结构建筑原理基础之上的。今天,世界各国特别是桥梁建设方兴未艾的中国,都把桥梁分段施工方法看成是一种安全、经济、适用的施工方法。

1.1 分段施工法的形成

在分段施工中,桥梁结构一般是由称之为梁段的钢构件或混凝土构件组成,借助紧固件或预应力钢筋将梁段连成整体。一般认为,桥梁结构分段施工始于悬臂施工法,这种施工方法以对称的形式由墩顶连续向两边悬伸,一个梁段一个梁段地分段施工,一个桥孔一个桥孔地连续作业,最后完成整个上部结构的施工。随着悬臂施工法的不断深入发展,结合分段施工原理,又形成了一些其它的分段施工方法,例如逐跨施工法和顶推施工法等,从而丰富了分段施工的作业形式,扩大了分段施工的应用范围,完善了分段施工的技术体系。

1.1.1 分段施工概念

与整体施工法或满堂支架施工法相比,桥梁结构分段施工是指桥梁结构的主要受力构件是由称之为梁段的单个块件,按预制或现浇(混凝土桥梁)的方式分段连成整体的施工过程。按照这一分段施工概念,结合桥梁结构特别是混凝土桥梁结构的架设特点,桥梁分段具有三种基本形式,即“纵向分段施工”、“横向分段施工”和“竖向分层分段施工”。但在实际工程中,“横向分段施工”通常被称为“装配式桥梁施工”,而“竖向分层分段施工”又被看作是“组合桥梁施工”,唯有梁段纵向连接的施工方法——“纵向分段施工”,才是真正意义上的分段施工。

1.1.2 分段施工回顾

分段施工中最古老的形式是分段悬臂施工。悬臂施工的历史可以上溯到公元四世纪,位于日本日光城的肖冈(Shogun)桥是有史以来最古老的一座悬臂桥^[2]。不丹境内的万迪包尔(Wandipore)桥建于17世纪,该桥把大量的原木用托梁的方法由两端的圪工桥台逐渐伸出,中间用一根轻梁将两个悬臂端连接成整体^[2]。19世纪末,随着钢铁冶炼技术的发展,金属构件预制技术结合悬臂施工在许多桥梁中获得成功,例如著名的英国福思湾桥和加拿大魁北克(Quebec)桥^[3]。这些桥梁建筑物足以证明早期分段施工概念的成功应用。

现代混凝土桥梁的分段施工,得益于预应力混凝土技术的发展。法国预应力之父 Freyssinet 在1945年至1948年间率先在预应力混凝土桥梁中采用了预制分段施工方法,并在法国巴黎附近的马恩河上先后架起了五座采用预制拼装分段施工的预应力混凝土桥。此后不久,德国工程师 Finsterwald 在建造跨越莱茵河的 Worms 桥时,首创预应力混凝土悬臂梁桥挂篮悬浇的分段施工新技术,并使预应力混凝土梁式桥首次突破100m跨度。1952年,继采用悬臂拼装施工方法修建了跨越莱茵河的三跨预应力混凝土桥梁后,悬臂拼装施工体系很快在德国得到了广泛的应用。从1950年到1965年的15年间,欧洲建造了300多座跨径在76m以上的悬臂施工预应力混凝土桥梁。至此,分段施工方法开始在世界其它地区盛行^[1]。

我国在桥梁分段施工方面起步较晚。20世纪50年代初,我国开始在桥梁结构中采用预应力混凝土工艺,并随着起重能力的提高,建造了相当数量的中小跨径预应力混凝土简支梁桥。这些装配式混凝土简支梁桥,大多数采用分片式整体预制,安装后横向整体化,即采用“横向分段施工”方法。20世纪50年代中期,悬臂施工法从钢桥施工中引伸到混凝土梁桥施工。混凝土梁桥可以从桥墩两侧对称分段悬臂浇筑施工或悬臂拼装施工,从而使预应力混凝土悬臂梁桥、预应力混凝土T形刚构桥和预应力混凝土连续梁桥得到了很大的发展,桥梁的跨径也达到了100多米,桥梁的截面形式也从简单的T形和工字形截面发展到了箱形截面和桁架梁结构,但与当时国外先进的戴维达克式的挂篮悬臂施工仍有一定的差距。1959年,我国首次运用顶推法施工预应力混凝土连续梁桥。随着多跨长桥和高架桥梁的大量建造,又出现了与之相适应的逐跨移模施工和逐段延伸施工。

近30年来,现浇或预制分段施工工艺已经在世界范围内得到了迅速的发展。在最初的阶段,往往仅限于平衡悬臂施工法,但后来,其它分段施工方法如逐跨施工、逐段施工和顶推施工也都得到了大量的应用。在任何一种分段

施工方法中,都可以采用现浇块件或者预制块件进行施工,或两者混合施工。因此,目前几乎在任何工地条件下,都可以借助各种设计方案和施工方法去经济有效地进行分段施工。

1.1.3 分段施工分类

桥梁结构一般可以按基本用途区分为公路桥、铁路桥和公铁两用桥等等,也可按基本受力形式划分为梁式桥、拱式桥、斜拉桥和悬索桥等等。但是,分段施工桥梁最有意义的分类可能是按分段施工形式来区分。虽然分段施工方法随着设计者和施工者的创造能力会有程度不同的差别,但是基本上可以分为三或四类,例如日本道路协会公路桥梁设计规范将分段施工分成悬臂施工法、顶推施工法和移动支架施工法等三类^[4],而美国各州公路和运输工作者协会公路桥梁设计规范将分段施工分成悬臂施工法、逐跨施工法和顶推施工法等三类^[5]。为了突出各种方法自身的特点,下面将分段施工法分为四大类,即悬臂施工、逐跨施工、逐段施工和顶推施工。

1. 悬臂施工

悬臂施工(又称平衡悬臂施工)是在已建成的桥墩上,沿相邻两个跨径方向平衡对称地逐段施工的方法,见图 1-1。采用悬臂施工的必要条件是在整个施工过程中必须保证墩顶与梁体的固结,并且桥墩能承受施工过程中的最不利非平衡弯矩。由于在悬臂施工时梁体内出现负弯矩,对混凝土桥必须在梁体的上缘逐段施加预应力,使其与已完成的梁段连成整体。因此,悬臂施工法适用于刚架桥(例如 T 形刚构桥)、梁式桥(例如悬臂梁桥和连续梁桥)、连续桁架桥、斜拉桥等其它类型的桥梁。由于这些桥梁的施工受力状态与运营时的受力状态相近,不至于因施工临时需要而增加过多的材料用量。

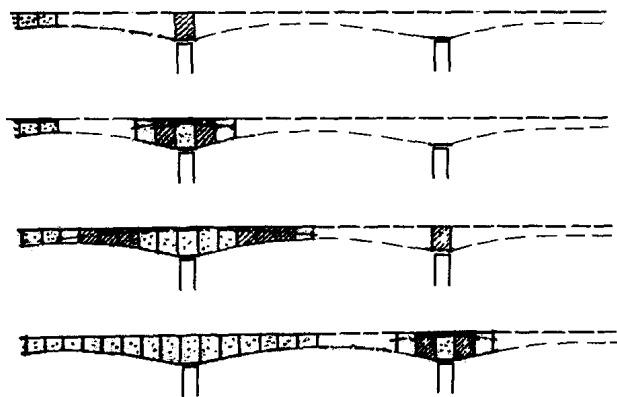


图 1-1 悬臂施工

悬臂施工法一般可分为悬臂浇筑施工和悬臂拼装施工两种形式。悬臂浇筑是在桥墩两侧对称逐段就地现浇混凝土,待混凝土达到一定强度后张拉预应力筋,移动机具模板(挂篮)继续悬臂浇筑;悬臂拼装是用吊机将预制梁段在桥墩两侧对称起吊,安装就位后,固定紧固件或张拉预应力筋,使悬臂不断接长,直至合龙。

2. 逐跨施工

逐跨施工(又称连续逐跨施工)是将上部结构按同一方向,借助移动支架或悬吊模架连续一整跨一整跨地分段施工的方法^{[6][7]}。最简单的逐跨施工方法就是简支变连续(图 1-2a))或悬臂变连续(图 1-2b)),此外还有悬吊模架施工(图 1-2c))和移动支架施工(图 1-2d))。采用逐跨施工的主要特点在于施工操作的逐跨连续性、施工接缝位置的可选择性和体系转换的复杂频繁性。由于梁体连续逐跨延伸,便于预应力筋的接长,不仅简化了施工操作,而且可以按最优的位置布置索筋,节省高强度材料;施工缝或剪力铰通常设在恒载挠曲线反弯点处以利于受力;逐跨施工中的结构受力体系将随着施工中结构的不同形式,频繁地发生变化,且变化的结构体系形式多种多样。

逐跨施工适合于中等跨径的梁式桥(例如悬臂梁桥和连续梁桥)、刚架桥(例如斜腿刚架桥)和其它类型的多跨桥梁结构。它使用一套施工设备从桥梁的一端逐跨施工,桥愈长、桥跨愈多、施工设备的周转次数愈多,其经济效益愈高。

逐跨施工法一般可分为逐跨预制安装施工和逐跨移模现浇施工两种形式。逐跨预制安装是按跨长将上部结构分成若干个梁段,预制时对梁段或梁跨施加一部分预应力,以承受结构自重,然后逐跨吊装、施工接缝混凝土和连续梁跨中的预应力筋;逐跨移模现浇是利用一跨支架或吊机和模板现浇混凝土,当混凝土达到设计强度后,张拉预应力筋,然后移动支架或吊机和模板,现浇下一跨混凝土,直至施工结束。

3. 逐段施工

逐段施工(又称悬伸逐段施工)与逐跨施工相似,都是由结构的一端开始施工,持续进行,直到另一端。但是,逐跨施工的阶段划分是以桥梁结构的跨长为依据的,即一整跨一整跨地施工,而逐段施工中的梁段划分,可以根据实际施工中梁段的支承条件、模架承受的重量、吊装设备的能力等条件,作出有选择的划分,不受逐跨施工时的限制。逐段施工法的开创也是为了避免悬臂施工中出现的施工干扰,因为平衡悬臂施工法必须在各个桥墩的两侧进行对称施工,而逐段施工是将梁段由每个桥墩同一侧连续地悬伸就位。当梁体延

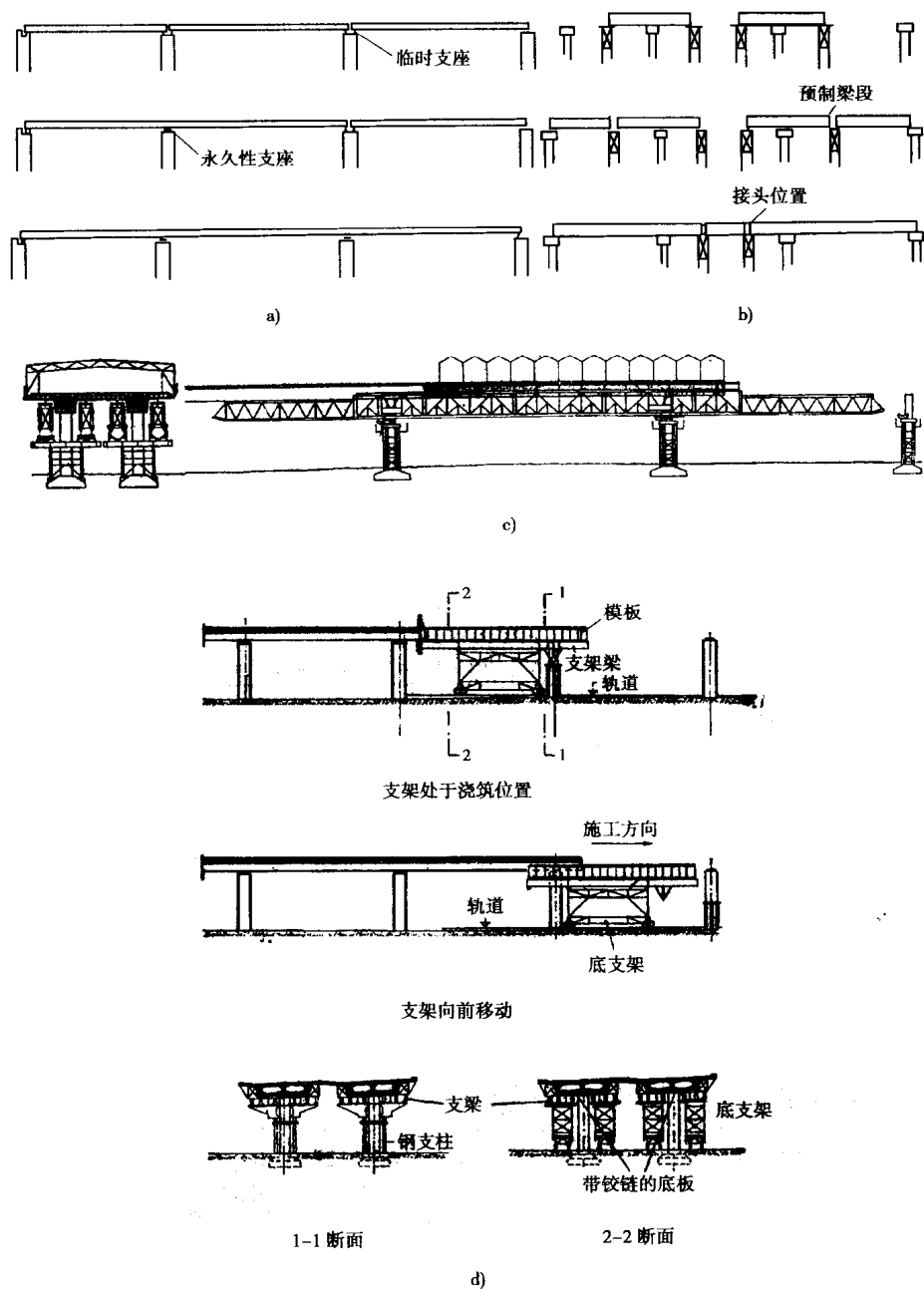


图 1-2 逐跨施工
a)简支变连续;b)悬臂变连续;c)悬吊模架;d)移动支架

伸到一个桥墩时,就安装永久支座,然后,梁体继续按施工方向进行。通常采用的逐段施工是逐段拼装施工,在施工时,预制梁段通过建成的桥面部分被送到悬伸孔的端部,再利用旋转式吊机将梁段一个接一个地拼装起来。用斜缆式架桥机逐段拼装施工是比较成熟的逐段施工方法(图 1-3)。当然,逐段施工方法也可用于逐段现浇施工^[8]。

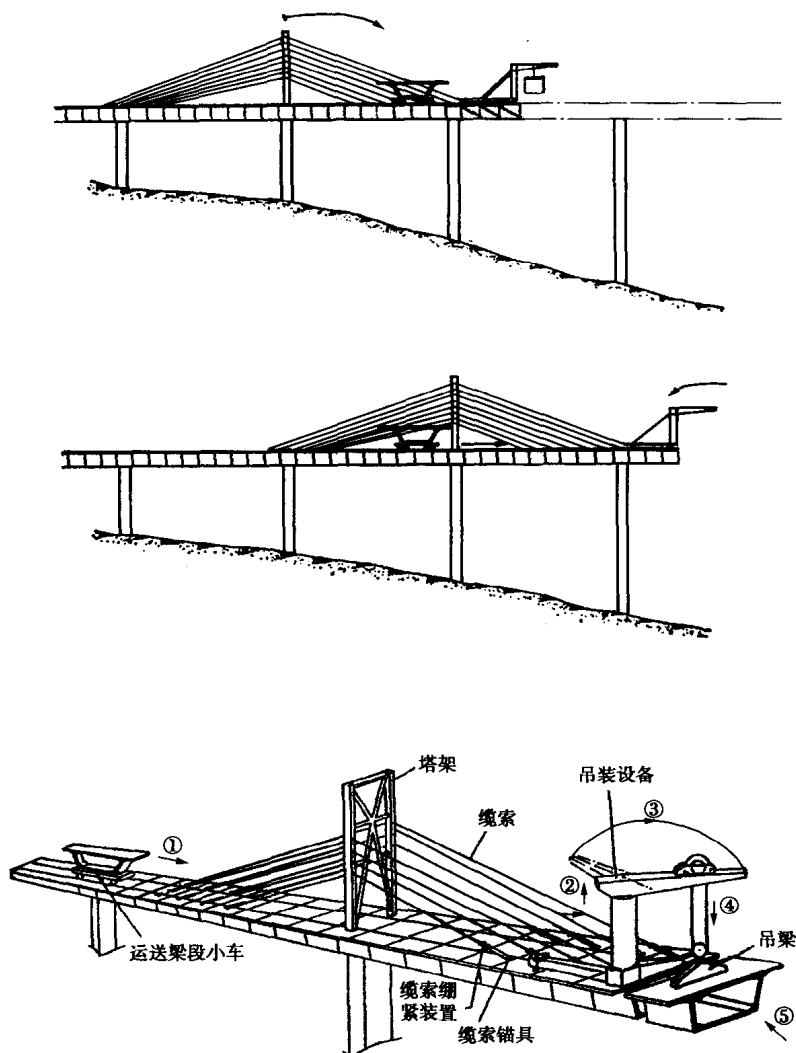


图 1-3 逐段施工

逐段施工法与逐跨施工法一样,适合于中等跨径的梁式桥、刚架桥和其它

类型的多跨长桥。

4. 顶推施工

顶推施工(又称顺序顶推施工)是将梁体沿桥纵轴方向分段顶推的施工方法,见图 1-4。顶推施工是在沿桥纵轴方向的桥台后侧设置预制场地,分段预制上部结构,并用纵向预应力筋将预制梁段与梁体尾部连成整体,并通过水平千斤顶施力,将梁体逐渐向前顶推出预制场。然后,继续在预制场进行下一梁段的预制,直至施工完成^[9]。

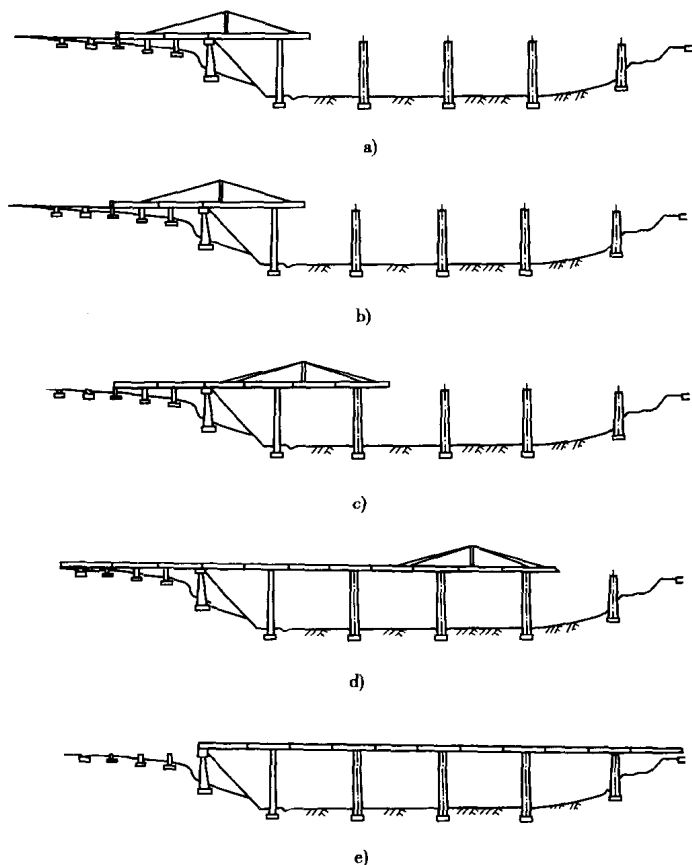


图 1-4 顶推施工

顶推施工的梁体是在一个桥台背后设置的临时预制场中浇筑的,因而能保证混凝土的施工质量,并且可以减少在传统现浇施工时所必须的临时支架、模板和其它一些应急设施,以及在传统预制拼装施工时所必备的吊装设备。顶推施工除了在一固定位置浇筑和组装梁段外,可以看作是一种水平滑模施

工。此外,顶推施工时的梁体受力状态变化很大,结构体系不断转换,因此会增加一定数量的材料用量,特别是高强预应力筋。

顶推施工法最适宜于在等截面连续梁桥中使用,也可在结合梁、斜拉桥等的主梁施工中应用。顶推施工法一般适合于具有平面直线线形的上部结构,但是如果上部结构的轴线是平曲线,而且曲率保持不变,仍能采用顶推法施工。

1.2 分段施工法的特点

分段施工法的变革促进了桥梁结构体系和桥梁跨越能力的发展,扩大了钢桥和混凝土桥梁的实用范围。目前,大部分新建桥梁都首先考虑采用分段施工方法,主要原因在于分段施工法具有一系列的特点。

1.2.1 适用跨径

根据实际运输、起吊、支承和立模等条件的限制,预应力混凝土悬臂施工的桥梁跨径可以达到 300m,当采用斜拉体系后,桥梁跨径可以提高到 450m,而悬臂施工法常用的跨径为 60m ~ 180m,其中悬臂浇筑的跨越能力大于悬臂拼装;预应力混凝土逐跨施工的桥梁跨径可以达到 150m,而常用跨径为 20m ~ 80m,其中逐跨现浇的跨径略大于逐跨拼装,逐跨施工方法修建的桥梁全长不宜小于 300m;预应力混凝土逐段施工的桥梁跨径可以达到 100m,而常用跨径为 20m ~ 60m,逐段现浇与逐段预制的跨越能力相差不大;预应力混凝土顶推施工的桥梁跨径可以达到 140m,不采用支架或导梁的跨径也可以达到 60m,而常用跨径为 20m ~ 60m,从一端顶推的桥梁全长一般不宜超过 800m。

虽然,跨径很大的预应力混凝土桥梁的分段施工对设计和施工都提出了严峻的挑战,但是,分段施工法在中等跨径和场地有限的桥位上得到了大量的应用,尤其在施工困难的城区或生态控制的工地,分段施工已经被证明是一种很有价值的技术,随着可用材料的增多,跨径可望达到更大。表 1-1 汇总了各种分段施工方法所适用的桥跨范围。

分段施工法的适用跨径

表 1-1

施工方法	桥 梁 跨 径 (m)								
	20	60	100	140	180	220	260	300	340
悬臂施工									
逐跨施工									
逐段施工									
顶推施工									