

# ·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。”<sup>〔1〕</sup>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<sup>[2]</sup>。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<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。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<sup>[1]</sup>。

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<sup>[4]</sup>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<sup>[5]</sup>。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。

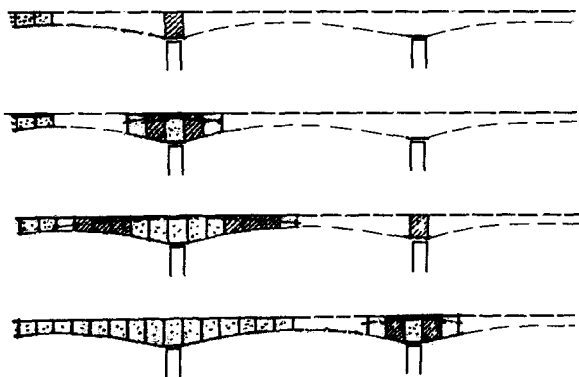


图 1-1 悬臂施工

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<sup>[6][7]</sup>。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

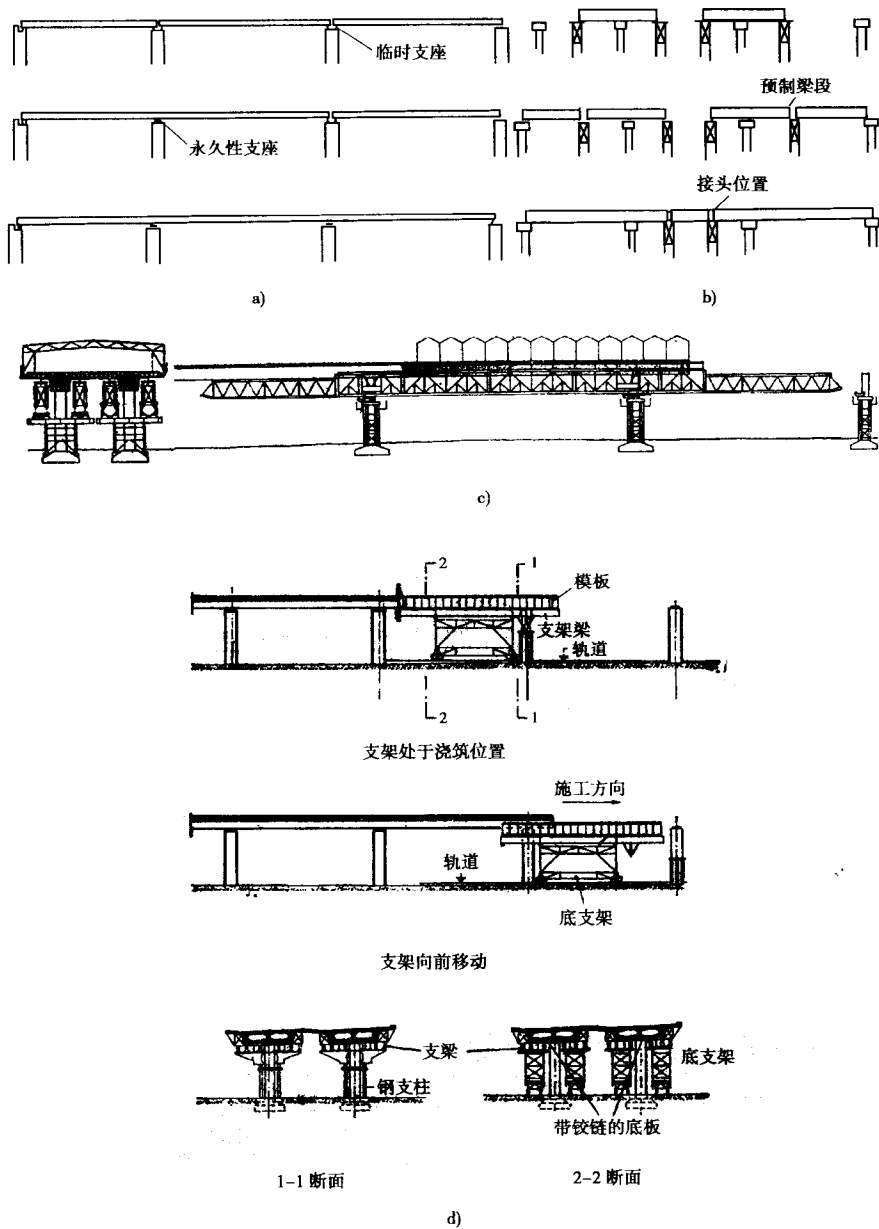


图 1-2 逐跨施工

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<sup>[8]</sup>。

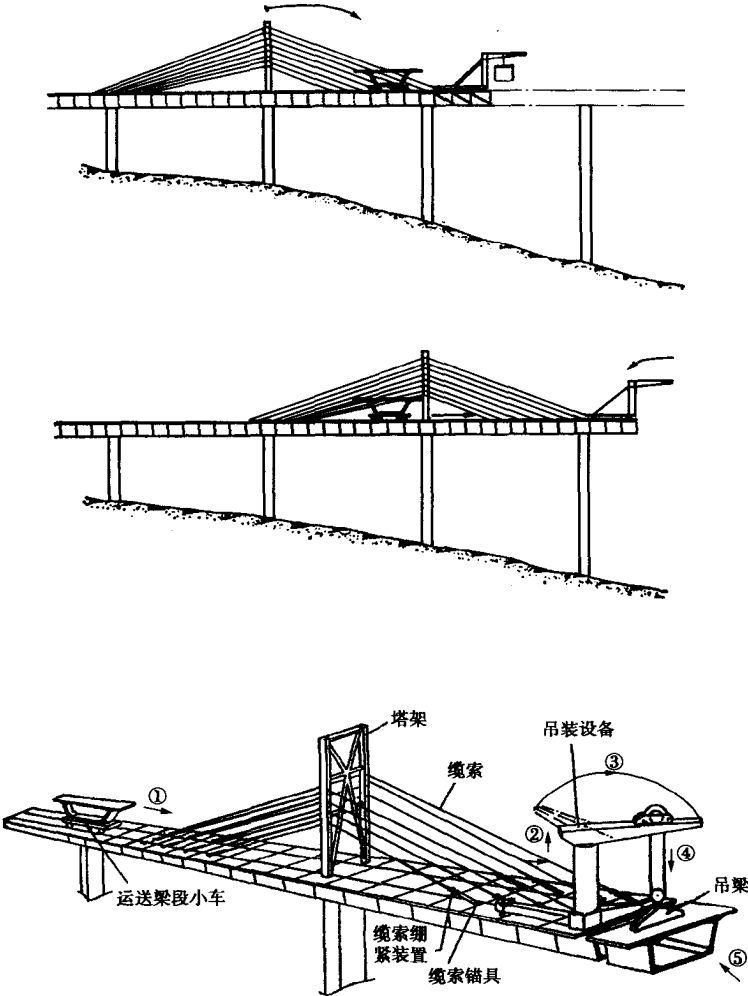


图 1-3 逐段施工

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<sup>[9]</sup>。

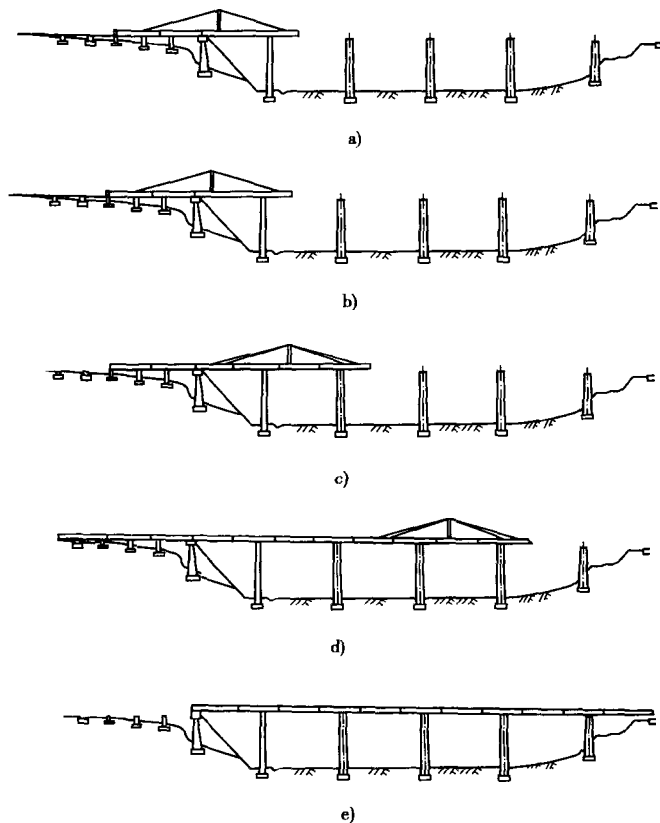


图 1-4 顶推施工

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	-----			-----					

### 1.2.2 主要优点

目前,几乎所有新建桥梁工地都具备采用分段施工法的条件,因而有必要认真总结和归纳分段施工法的优点。

(1)对于各类桥型、各种跨径和不同桥长,分段施工均是一种经济有效的施工方法,并且对于斜坡、弯桥也比较容易调整。

(2)大量的设计投标和实际投资比较表明,分段施工法比整体施工法可以节省 10%~20% 的工程费用,因而合适的分段施工方法往往可以保证较低的投资。

(3)分段施工可以有效缩短施工周期,特别是采用预制拼装式分段施工时,梁段可以在下部结构施工时同时预制,然后到现场快速拼装在一起。

(4)分段施工有利于现场交通组织和桥位环境保护。与整体施工相比,分段施工占用更小的桥位空间。

(5)分段施工对现场施工条件的要求较低,可以结合具体工程实际,建造各种各样美观、新颖的桥型结构。

(6)分段施工通常可以利用当地的材料和劳力,对整个劳动力的要求低于传统的整体施工法。对于预制块件,由于在工厂或工地施工,可以就地取材,避免大量的材料运输。

(7)分段施工的质量比较容易保证。采用预制拼装时,由于预制块件在工厂或预制场施工,其质量当然有保证;即使是现场浇筑,也因为分段浇筑块件的局部性,其质量也要高于整体施工的大体积块件。

(8)由于分段施工技术在整个施工过程中要反复使用多次,无论是机具设备还是操作人员,所进行的都是一种重复性的工作,因此具有很高的安全性和可靠性。

### 1.2.3 存在问题

尽管分段施工法在许多方面都具有明显的优势,但与整体施工法相比也存在一些问题或复杂性。例如:分段施工法一般具有更加复杂和严格的施工程序、需要更多更先进的机具设备、要求数量少但素质高的劳动力等等。而更重要的问题还体现在分段施工过程中结构受力分析和结构状态控制的复杂性上<sup>[10]</sup>。

(1)分段施工法最终形成的成桥状态结构受力与整体施工法一次落架的受力状态相比,存在很大的差异。整体施工成桥后结构受力状态与施工过程无关,而采用分段施工时,成桥后结构受力状态不仅与不同的分段施工方法相关,而且还与相同分段施工方法中不同的施工顺序密切相关。因此,确定各个

施工阶段和成桥状态的结构受力状况显得尤为重要。

(2)分段施工过程中的结构受力体系不断变化,各个施工阶段的受力状态既相互影响又相互独立,这使得施工过程中的结构受力分析变得更加复杂,但却更加重要。为了确保整个施工过程的安全性,必须对关键施工阶段进行实时结构受力状态的跟踪分析和实测监视。

(3)分段施工要经历许多施工阶段,每个阶段都不可避免地会存在施工误差、测量误差和环境误差,例如风载和温差等引起的误差。如何消除或修正这些误差,使得成桥后的最终结构受力状态更好地逼近于所确定的合理状态,这是桥梁分段施工中所面临的最大问题。

分段施工法经过对现有材料(例如钢材和预应力混凝土)特性的进一步改进和各种适用范围的选择以及各项主要优点的发挥,与其它施工方法相比,已经显示出越来越大的优越性。如果能克服分段施工过程中的结构受力分析和结构状态控制方面的问题,分段施工法可以在更广阔的应用范围内更具竞争力<sup>[11]</sup>。

### 1.3 施工方法对结构受力的影响

桥梁结构特别是大跨度桥梁结构的分段施工,一般总是要经历一个长期而又复杂的施工过程以及结构体系转换过程。随着施工阶段的推进,桥梁结构形式、支承约束条件、荷载作用方式等都在不断地变化。一般意义下的桥梁结构分析认为,整个结构施工是一次形成的,即所谓的一次落架计算法。这种分析方法对于按整体施工法形成的桥梁结构的受力分析是可以接受的,但对分段施工只是一种近似计算模型,并不能真实反映实际结构的受力性能。分段施工中的结构受力状态是逐工况逐阶段累计形成的,每个工况或每个阶段的结构受力分析必须独立进行,而中间施工阶段或最终成桥状态的结构受力是已经完成的各个工况或各个阶段的结构受力状态的叠加结果,因此有必要掌握和了解施工阶段和成桥状态的结构受力性能,以及施工方法和施工顺序对这种结构受力性能的影响。

桥梁施工是以桥梁结构最终成桥状态的结构受力(包括几何线形和截面内力)达到原定理想状态为目标的。采用整体施工法时,这一目标比较容易实现,即所谓一次落架达到理想状态。但当采用分段施工法时,这一目标的实现要复杂得多。造成这一复杂性的主要原因在于:一方面分段施工要经历多个施工阶段,每个施工阶段的结构受力都将伴随着结构体系、约束条件和荷载作用的变化而变化;另一方面不同的施工方法在确保桥梁结构几何线形实现成

桥状态预期目标的前提下，由于施工中结构体系的不同，对超静定结构将形成不同的成桥状态截面内力。

为了阐明各种施工方法对成桥状态截面内力的影响，现以图 1-5 所示等截面三跨连续梁为例，分别分析计算按整体施工法、悬臂施工法、逐跨施工法、逐段施工法和顶推施工法等所形成的最终成桥状态截面内力。

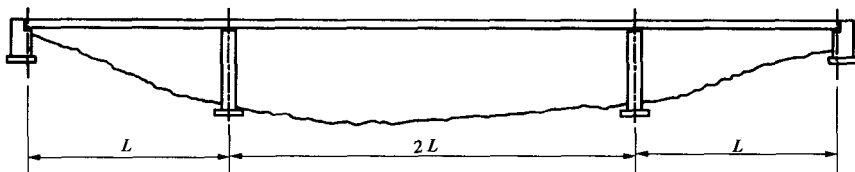


图 1-5 三跨连续梁结构

### 1.3.1 整体施工形成的成桥状态内力

当按整体施工法形成结构时，最终成桥状态截面内力的计算，相当于将等截面桥跨结构的均布荷载  $q$  以一次落架方式作用在最终形成的三跨连续梁结构上，求解超静定结构内力。因此，其成桥状态截面弯矩图很容易求得，即为一次落架弯矩图如图 1-6 所示其中墩顶负弯矩为  $0.28qL^2$  中跨正弯矩为  $0.22qL^2$  边跨正弯矩为  $0.02qL^2$ 。

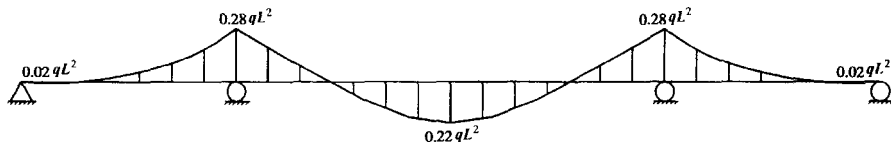


图 1-6 整体施工法弯矩图

### 1.3.2 悬臂施工形成的成桥状态内力

当按悬臂施工法形成结构时，成桥状态的截面弯矩是通过逐个梁段的悬伸逐步形成的。由于图示三跨连续梁的中跨跨径正好是边跨跨径的一倍，因此，可以设想一种最简单的施工顺序，即从两个桥墩墩顶平衡对称悬臂施工直至两边桥台和中跨跨中。采用这种方式形成的成桥状态截面弯矩在整个三跨连续梁结构上将不会出现正弯矩，而墩顶负弯矩达到  $0.5qL^2$  如图 1-7。



图 1-7 悬臂施工法弯矩图

### 1.3.3 逐跨施工形成的成桥状态内力

当按逐跨施工法形成结构时，为了改善施工接缝断面处受力，一般总是将施工接缝设在按一次落架计算的弯矩较小的截面处，而最好的选择就是弯矩为零截面，由此得到的最终成桥状态的截面弯矩如图 1-8 所示，竟然与一次落架弯矩完全相同。值得注意的是，如果施工接缝偏离弯矩为零截面，最终成桥状态的截面弯矩会有别于一次落架弯矩，但是这一差别较小，仍可近似采用一次落架法计算成桥状态截面内力。

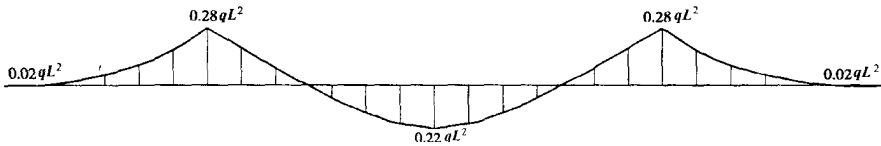


图 1-8 逐跨施工法弯矩图

### 1.3.4 逐段施工形成的成桥状态内力

当按逐段施工法从左端桥台开始向右端形成结构时，结构体系发生了多次变化。在施工到左侧桥墩之前，必须将左侧桥台与台顶梁体临时固结直到梁体悬伸至左侧桥墩形成简支梁；然后按静定单悬臂梁方式向右侧桥墩悬伸直至形成两跨连续梁；最后按超静定单悬臂梁方式向右端桥台悬伸，直至最终形成三跨连续梁。采用这种方式施工形成的成桥状态截面弯矩如图 1-9 所示。与悬臂施工法相似，整个三跨连续结构上弯矩非零即负，所不同的是，弯矩图是非对称的。其中右侧墩顶负弯矩与悬臂施工时相同为  $0.5qL^2$  而左侧墩顶负弯矩由于中跨悬臂施工的原因高达  $1.67qL^2$ 。如果采用斜缆式架桥机，墩顶负弯矩会有明显改善，但成桥状态截面内力计算会比较复杂。

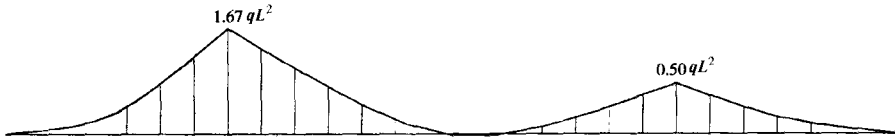


图 1-9 逐段施工法弯矩图

### 1.3.5 顶推施工形成的成桥状态内力

当按顶推施工法形成结构时，尽管在顶推过程中结构体系发生了多次变换，但最终成桥状态截面弯矩如果忽略混凝土徐变影响，与整体施工时的一次落架弯矩完全相同，如图 1-10 所示。

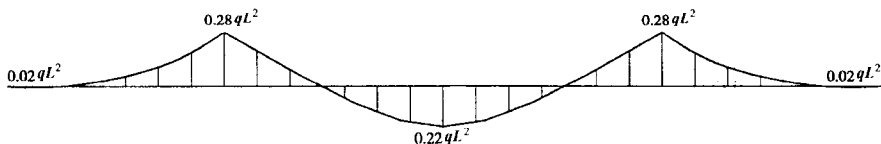


图 1-10 顶推施工法弯矩图

根据对上述五种施工方法所形成的三跨连续梁成桥状态截面弯矩的计算分析,不难发现,不同施工方法对成桥状态的结构受力确有很大影响。就这种影响而言,上述五种施工方法可以分成两大类:即可以采用或近似采用一次落架法计算成桥状态截面内力的施工方法,如整体施工法、逐跨施工法(必须选择弯矩零点为接缝)和顶推施工法;以及必须按照施工过程中的结构体系逐段计算截面内力并最终累加起来计算成桥状态截面内力的施工方法,如悬臂施工法、逐段施工法和逐跨施工法(注意接缝)。尽管上述结论是从简单三跨连续梁计算分析中得到的,但它同样适合于其它形式的超静定体系桥梁结构。

## 1.4 施工顺序对结构受力的影响

根据上述对施工方法的分类,整体施工法、顶推施工法和逐跨施工法等第一类施工方法对成桥的结构受力影响较小,即可以近似采用一次落架法计算成桥状态的截面受力。如果忽略混凝土徐变影响,逐跨施工或顶推施工顺序的变化可能引起各个施工阶段结构受力的变化,有时甚至是很大的变化,但对最终成桥状态结构受力几乎没有影响。即采用第一类施工方法形成桥梁结构时,无论施工顺序怎样改变,成桥状态结构受力将接近于一次落架计算结果。

### 1.4.1 悬臂施工中的施工顺序影响

对于第二类施工方法中的悬臂施工法,仍以图 1-5 所示的三跨连续梁为例,分别考虑悬臂施工中四种不同的施工顺序: a)墩顶悬臂施工段长度很小或  $L_1 = 0$ (极限状况),两个边跨和中跨吊装三根简支梁后连成整体,其成桥状态结构弯矩图如图 1-11a)所示;b)悬臂施工段长度  $L_1 = 0.33L$  这样来选择,使其合龙形成三跨连续结构时,成桥状态结构弯矩正好等于一次落架计算结果如图 1-11b);c)墩顶对称悬臂施工段长度  $L_1 = 0.8L$  两个边跨先合龙然后吊装  $0.4L$  长度的简支梁使得中跨合龙,便形成了图 1-11c)所示的成桥状态结构弯矩图;d)采用图 1-7 所示的悬臂施工顺序,如图 1-11d)。从图 1-11 中不难发现,尽管采用的都是同一种悬臂施工法,但是由于施工顺序的变化,使得成桥状态结构弯矩发生了很大的变化,几乎可以通过施工顺序的选择来实现成桥状态结构内力的选择。

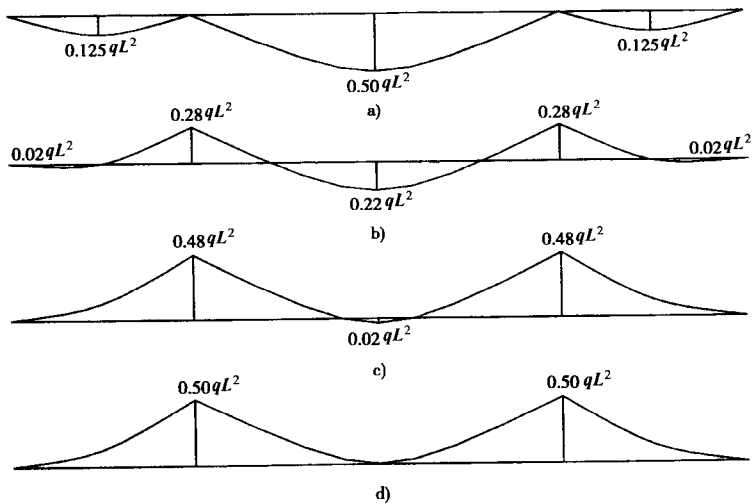


图 1-11 各种悬臂施工顺序形成的成桥状态弯矩

a)悬臂长度  $L_1 = 0$ ; b)悬臂长度  $L_1 = 0.33L$ ; c)悬臂长度  $L_1 = 0.8L$ ; d)悬臂长度  $L_1 = L$

#### 1.4.2 逐段施工中的施工顺序影响

第二类施工方法中的逐段施工法同样具有这种性能，即一方面施工顺序影响成桥状态结构受力，另一方面可以通过选择施工顺序来达到选择成桥状态结构内力的目的。现以跨径为 80m 的多等跨连续梁为例，每跨由 26 个长为 3m 的梁段组成 (不包括墩顶梁段) 图 1-12 表示在逐段施工时三个连续施工阶段主梁和临时斜缆间的弯矩分配。开始的 9 个梁段是以悬臂方式施工的，接着 15 个梁段的施工中两组斜缆参与了受力，而最后一个梁段和临近墩顶块件不依靠斜缆施工。随着悬臂长度的增加，主梁承受的弯矩比例由最初 5 个梁段时的 83% (图 1-12b)) 到 10 个梁段的 65% (图 1-12c)) 再到 15 个梁段全部就位后的 43% (图 1-12d))。显然主梁和斜缆之间的弯矩分配可以通过改变斜缆拉力，即改变施工顺序的方法来实现。

综上所述，按第一类施工方法形成超静定桥梁结构时，成桥状态的结构受力与施工方法和施工顺序无关；而按第二类施工方法形成超静定桥梁结构时，成桥状态结构受力不仅与施工方法有关而且与施工顺序有关，成桥状态的理想结构状态 (包括内力与变形) 可以借助于选择不同的施工方法和不同的施工顺序得以实现。但是，除了整体施工法以外，无论是第一类方法中的逐跨施工法或顶推施工法，还是第二类方法中的悬臂施工法或逐段施工法，其施工阶段

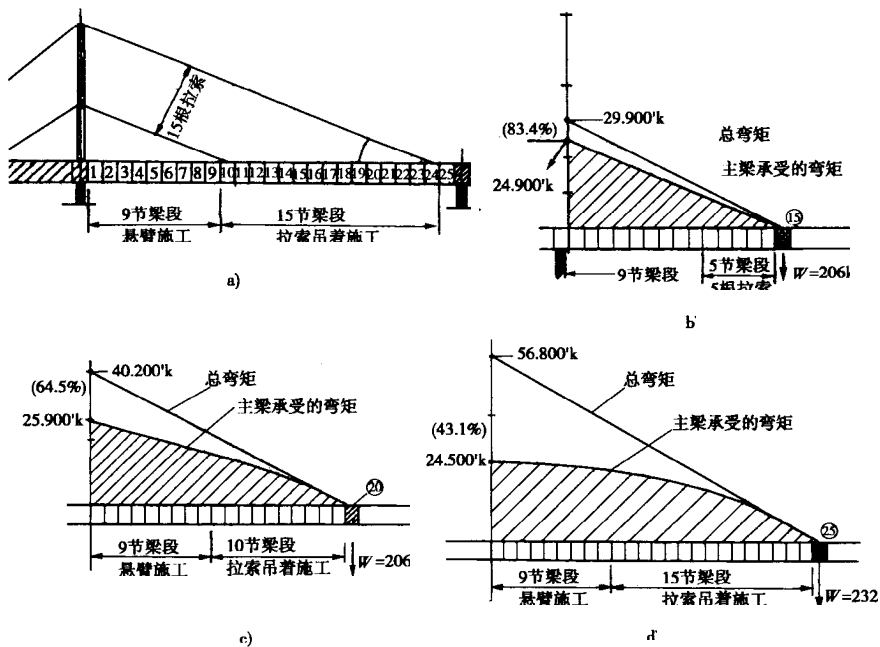


图 1-12 逐段施工中的结构弯矩分配

a) 临时斜缆逐跨施工 ; b) 5 个梁段弯矩 ; c) 10 个梁段弯矩 ; d) 15 个梁段弯矩

的结构状态与成桥状态相比可能会有很大的差异。因此，对于按分段施工法形成的超静定桥梁结构，按施工过程跟踪计算结构受力，监测结构状态是非常必要的，也是比较复杂的。

### 1.5 分段施工中的结构内力演变

按分段施工法形成桥梁结构时，施工阶段和成桥状态的结构内力与施工顺序密切相关，为了分析和说明分段施工过程中结构内力演变过程，仍以图 1-5 所示三跨连续梁悬臂施工为例。无论是采用悬臂浇筑或悬臂拼装施工，其施工顺序都是从墩顶 0 号块件形成开始并将 0 号块与桥墩临时锚固，形成固端能承受一定的非平衡弯矩再从 0 号块件两边伸展悬臂，形成静定 T 形刚架如图 1-13 所示然后边跨梁体合龙形成超静定固端梁(图 1-14)拆除 0 号块临时锚固，梁体结构由超静定固端梁过渡到静定单悬臂梁，如图 1-15 所示；最后中跨梁体合龙，形成最终的三跨连续梁结构(图 1-16)。三跨连续梁按上述步骤施工时，其结构内力计算可以分成下列四个主要施工阶段。

### 1.5.1 梁段悬臂施工内力

从墩顶 0 号块件开始的梁段双悬臂施工时的结构受力状态与静定 T 形刚架的受力相似，因此，在整个梁段悬臂施工中，最不利受力状态出现在最长双悬臂时即梁段悬臂施工的最后阶段其结构施工状态和不计施工荷载的结构弯矩如图 1-13 所示其中最大墩顶负弯矩为  $0.32ql^2$

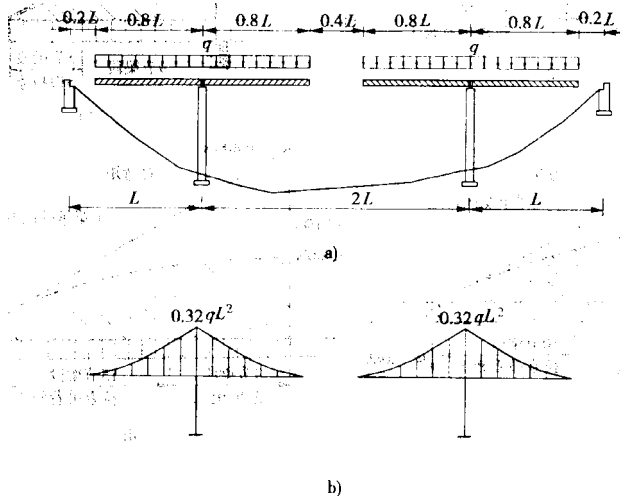


图 1-13 梁段悬臂施工内力  
a) 施工状态 b) 结构弯矩

### 1.5.2 边跨梁体合龙内力

边跨梁体合龙段是在支架上施工的（图 1-14a），施工完成后一次性拆除施工支架因此合龙段荷载以一次落架方式作用在 - 端固定（桥墩），另一端简支桥台的超静定固端梁上，解一次超静定结构即可求得结构弯矩图（图 1-14b）将边跨梁体合龙引起的结构弯矩（图 1-14b）与梁段悬臂施工引起的结构弯矩（图 1-13b）叠加，即可得到边跨梁体合龙后的结构累计弯矩，如图 1-14c 所示。其中，墩顶两侧负弯矩分别为  $0.41ql^2$  和  $0.32ql^2$  而不平衡弯矩  $0.09ql^2$  由 0 号块临时锚固体系承受，并传递给桥墩立柱

### 1.5.3 拆除临时锚固内力

当边跨合龙以后，梁体形成一次超静定体系，此时已经不再需要 0 号块与墩顶的锚固作用来维持体系平衡，而锚固体系承受的不平衡弯矩也完全可以释放。因此，选择拆除临时锚固，这一作用相当于在静定单悬臂结构墩顶作用一对大小相等方向相反的作用力  $P = \Delta M/d$  其中  $\Delta M$  为不平衡弯矩，而  $d$  表示临时锚固体系两个约束之间的距离（图 1-15a），由此引起的结构弯矩如

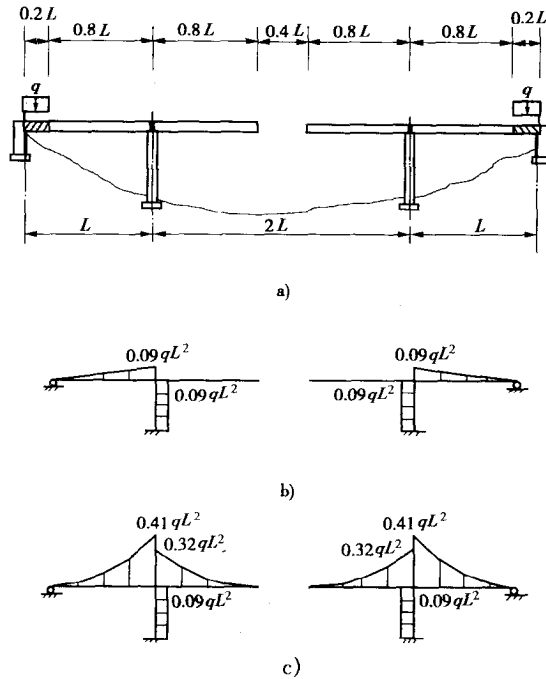


图 1-14 边跨梁体合龙内力  
a) 施工状态 ; b) 结构弯矩 ; c) 结构累积弯矩

图 1-15b) 所示 将拆除临时锚固引起的结构弯矩 (图 1-15b) 与上一施工阶段结束时的结构弯矩 (图 1-14c) ) 相叠加, 即可得到拆除临时锚固后的结构累积弯矩 (如图 1-15c) 所示。其中, 墩顶负弯矩为  $0.32qL^2$ , 而边跨最大正弯矩为  $0.016qL^2$ , 此时的结构累积弯矩与单悬臂梁一次落架计算结果完全相同, 但是如果计入预加力的二次力或混凝土徐变影响力, 两者将会有所不同。

#### 1.5.4 中跨梁体合龙内力

中跨梁体合龙阶段的结构内力计算, 应该分成两个阶段进行。在中跨合龙段与单悬臂梁连接成整体前, 其重力  $W$  由吊杆平均传至两个悬臂端, 如果不计吊杆等施工荷载的重力, 则  $W = 0.4qL$  (图 1-16a)), 由此引起的结构弯矩如图 1-16b) 所示 当合龙段两端形成固端 整个结构变成连续梁后 吊杆传递的重力  $W$  应当卸去, 而代之以合龙段本身的均布重力  $q$  (图 1-16c)) 由此产生的结构弯矩如图 1-16d)。如果不计吊杆等施工荷载的重力, 则  $W = 0.4qL$  因此支点弯矩为  $0.18WL - 0.072qL^2 = 0$ , 而中跨最大负弯矩也为  $0.22WL - 0.088qL^2 = 0$  只有中跨跨中正弯矩为  $0.09qL^2 - 0.22WL = 0.002qL^2$  将形成整体前后的结构弯矩相叠加可得中跨梁体合龙阶段的结构弯矩 (如图 1-16e)