

第一章 大跨度桥梁施工控制的重要性

第一节 桥梁施工方法回顾

19世纪中期以前，各种桥梁均采用有支架的施工法。有支架施工是在桥跨位置架设支架，在支架上拼装钢梁或浇筑混凝土主梁，整个施工过程中主梁处于无应力状态。对桥梁的主梁来说，无支架施工是最简单、最可靠的施工方法，但随着科学技术的发展，桥梁跨度不断增大，尤其对跨越大江、大河和深沟的桥梁，若仍然采用有支架的施工方法，将变得非常困难，甚至是不可能的。随着钢铁工业的发展，19世纪中期，美国等国修建了为数不多的连续钢桁梁，但是，在建设和使用过程中，由于温度变化、墩台沉陷等的影响，尤其是多次超静定结构，在当时设计手段落后的情况下，深感设计理论的复杂，由此，连续钢桁梁的应用受到一定的影响。后来在连续梁中采用了铰，把连续桁梁转化为静定的悬臂桁梁，从此，悬臂桁梁获得广泛的采用。悬臂桁梁的出现不仅解决了当时设计上的难题，在施工中，悬臂桁梁的施工应力与营运应力的一致，给悬臂施工即无支架施工方法提供了有力的依据，使无支架施工方法得以广泛采用。与此同时，悬索桥以它固有的特点，使它在19世纪及20世纪中期成为大跨度桥梁采用的惟一桥型。当时美国修建的悬索桥数量最多，其中以最早修建的、1883年完工的跨径486m的纽约勃罗克林桥最为有名。悬索桥的修建，使得最典型、最完善的无支架施工法得以广泛采用。它给了工程界缆索吊机施工方法以很大的启发，以致长达100多年以来，缆索吊机成为一个完善、可靠的主要吊装工具，成功地应用于梁桥、拱桥的无支架施工中。应该特别提出的是，在拱桥无支架施工中，常采用多拱段吊装安装拱圈，为了能够临时固定未合龙的各段拱段，法国工程师首先采用扣索临时扣挂各拱段的方法，使无支架吊装拱桥的施工方法更加完善，一直沿用至今。20世纪70年代，随着预应力混凝土工艺的完善，尤其是后张学会于1976年的成立，使用于桥梁上的预应力混凝土工艺更加成熟。德国工程师率先采用挂篮悬臂浇筑混凝土，修建预应力混凝土连续梁桥，为至今仍采用的悬臂浇筑混凝土连续梁、T型刚构、斜拉桥等无支架施工方法奠定了基础。无支架施工方法的采用，促进了大跨度桥梁的建设，但是，无支架施工方法的采用，在施工中又将带来许多问题。

第二节 桥梁施工控制的重要性

随着交通事业的发展，急需修建更多的大跨度桥梁以跨越大江、大河和海湾，采用更加经济合理的混凝土桥梁，改变过去凡建大跨度桥梁，必然是钢桥一统天下的局面。为了建桥中不中断通航，不设置造价昂贵的河道支架，在混凝土桥施工中引入了钢桥自架设体系的施工方法，即将桥梁的上部结构分节段或分层进行施工，后期节段或后层是靠已浇节段或已浇层来支撑，逐步完成全桥的施工，也就是无支架而靠自身结构进行施工，人们称之为自架设体

系施工法。它的广泛采用，使得混凝土桥得到了较大发展，比如 T 型刚构、大跨度钢筋混凝土拱桥、预应力混凝土斜拉桥等于 20 世纪能在世界各地广泛修建，不能不说是由于自架设体系施工方法采用的结果。自架设体系施工方法的采用，必然给桥梁结构带来较为复杂的内力和位移变化，为了保证桥梁施工质量和桥梁施工安全，桥梁施工控制是不可缺少的。实际上，桥梁施工控制早在以前的施工过程中，就已被人们采用，例如钢桁梁的悬臂架设，为使架设的各杆件最终满足设计标高，设计者采用预设拱度的方法来解决，即将先架设的节点预先抬高来考虑后架设节段的影响。由于钢材的匀质性和制造尺寸的准确性，预设拱度的方法在钢桁梁悬臂拼装过程中是较为成功的方法。但是，自架设体系施工方法应用在非匀质的混凝土桥中就不那么简单。因为混凝土桥除了本身材料是非匀质材料和材质特性不稳定外，它还要受温度、湿度、时间等因素的影响，加上采用自架设体系施工方法，各节段混凝土或各层混凝土相互影响，且这种相互影响又有差异，由此，这些影响因素必然造成各节段或各层的内力和位移随着混凝土浇筑或块件拼装过程变化而偏离设计值。为了保证施工质量，必须要对建桥的整个过程进行严格的施工控制。也可以这样说，桥梁施工控制是桥梁建设质量的保证。衡量一座桥梁的质量标准就是要保证已成桥的线形以及受力状态符合设计要求。对于桥梁的下部结构，只要基础埋置深度和尺寸以及墩台尺寸准确就能达到标准，容易检查和控制，而对采用多工序、多阶段自架设体系施工的大跨度桥梁的上部结构而言，要求结构内力和标高的最终状态符合设计要求，就不那么容易了。比如预应力混凝土刚构桥和斜拉桥在悬臂浇筑 1 号块件时，如预抛高设置不准，可能影响到以后各节段和合龙标高以及全桥的线形。斜拉桥除了主梁的混凝土浇筑或预制块件悬臂拼装中要考虑预抛高，使主梁标高符合设计要求外，还要求在斜拉桥建成时斜拉索的内力也达到设计要求，否则，斜拉索受力不均将影响斜拉桥的使用寿命。因为，斜拉桥是多次超静定结构，在施工过程中主梁标高的调整将影响到斜拉索的内力，某根斜拉索内力的调整又影响到主梁标高和邻近斜拉索的内力。这说明斜拉桥比混凝土刚构桥更加复杂，为确保斜拉桥施工质量，更加急需和不可缺少随施工过程中而进行的施工控制。目前我国计算机的应用已非常普遍，技术人员完全可以对多阶段、多工序的自架设体系施工方法进行模拟，对各阶段可预先计算出内力和位移，称之为预计值。将施工中的实测值与预计值进行比较，若有误差可进行调整，直到达到最满意的设计状态。也就是通过施工控制，使各阶段内力和变形达到预计值，最终达到设计要求，确保建桥的施工质量。我国借鉴国外的经验，从建设第一座斜拉桥起，就注意到施工过程控制的重要性，只是在对这个问题的解决上还存在差异，有个别斜拉桥施工完成后线形不够理想。比如有座 210m+200m 跨径的单塔单索面斜拉桥，在施工中采用劲性骨架悬臂浇筑主梁，浇筑主梁时通过水箱放水减载与浇筑的混凝土重力相平衡，以此保持设计线形（设计标高），理论上是完善的，但由于主梁分边箱和中箱两次浇筑，施工工序除纵向分节段外，横向又分两次完成，工序太多，不容易控制，所以造成该桥完工后，主梁外观呈波浪形，在桥面行车时更为明显，不但影响行车舒适，也造成外观缺憾。而各斜拉索受力是否符合设计要求，就更不得而知了。从而再次说明，为了建设质量高、外形美观的桥梁，施工控制是绝不可少的。桥梁施工控制是确保桥梁施工质量的关键。

桥梁施工控制又是桥梁建设的安全保证。为了安全可靠地建好每座桥，施工控制将变得非常重要。因为每种体系的桥梁所采用的施工方法均按预定的程序进行。施工中的每一阶段，结构的内力和变形是可以预计的，同时可通过监测手段得到各施工阶段结构的实际内力和变形，从而完全可以跟踪掌握施工进度和发展情况。当发现施工过程中监测的实际值与计

算的预计值相差过大时，就要进行检查和分析原因，而不能再继续进行施工，否则，将可能出现事故。这方面实例太多，例如，跨径 548.64m 的加拿大魁北克桥就是因为在施工中两次发生事故而闻名于世的。该桥采用悬臂拼装法施工，当南侧锚碇桁架快架完时，突然崩塌坠落，原因是悬出的桁架太长（悬臂长 176.8m），因此，靠近中间墩处的下弦杆受压力过大，致使下弦杆腹板失去稳定而引起全桁架严重破坏。尽管造成事故的原因是设计问题，但若当时采用了施工控制手段，在内力较大的杆件中布置监控测点，当发现异常现象时，及时停工检查，就不会发生突然崩塌附落事故。由此可知，为避免突发事件的出现，能按时安全地建成一座桥，施工控制是有力的保证。也可以这样说，桥梁施工控制系统就是桥梁建设的安全系统。为确保桥梁施工的安全，桥梁施工控制必不可少，尤其对造价昂贵的大跨度桥梁，更为重要。

施工控制不仅是建桥中的安全系统，也是桥梁营运中安全性和耐久性的综合监测系统。随着交通事业的发展，荷载等级、交通流量、行车速度等必然提高，还有一些不可预测的自然破坏力也将会危及桥梁的安全，若在建设桥梁时进行了施工控制，并预留长期观测点，将会给桥梁创造终身安全监测的条件，从而给桥梁营运阶段的养护工作提供科学的、可靠的数据，给桥梁安全使用提供可靠保证。这方面的反面事例在工程界是存在的。比如韩国圣水桥，于 1994 年 10 月突然在中跨断塌 50m 其中 15m 掉入江中，造成 32 人死亡，17 人受重伤的重大事故，据称造成该桥在行车高峰期突然断裂的原因是该桥长期超负荷运营，钢桁梁螺栓和杆件疲劳破坏所致。又如我国广州海印大桥，因斜拉索的防护措施不够完善、可靠，造成斜拉索超应力，只使用几年就突然断裂，创造了世界损桥年限最短的纪录，不但造成重大的经济损失，而且也带来不良的社会影响。以上实例说明，对于桥梁的营运阶段仍然急需一套长期有效的监测系统，使桥梁养护部门能根据该桥的实际使用情况进行有效的更换和维护，而不是目前只靠外观检查等简单手段，得到粗略的依据进行不切要害的养护。要彻底改变目前我国桥梁养护部门的现状，科学地、较为主动地预报桥梁各部位营运情况，必须在桥梁施工中进行施工控制系统的建立，并使其能长期对桥梁营运阶段进行监测，这样才能确保这些耗资巨大、与国计民生密切相关的大桥的安全耐久。由此可见，桥梁施工控制是现代桥梁建设的必然趋势。

第二章 大跨度桥梁施工控制的发展

第一节 大跨度钢桥的施工控制

钢桥所用钢材具有强度高和拉、压应力相等的特点，在钢桥的架设中，多采用无支架架设方法建桥。大跨度钢桥多采用桁架体系，其架设方法又以最为简便合理的悬臂拼装方法为主。即采用移动式刚腿转臂起重机，在已拼桁架上拼装前端节间杆件，逐节间吊装完后向前移动，完成全桁架的拼装工作。我国在修建跨越长江的第一座大桥——武汉长江大桥时，就非常成功地采用了长悬臂拼装方法，顺利完成三联 $3 \times 128\text{m}$ 的连续桁梁桥的拼装工作。后又在重庆白沙沱长江大桥、枝城长江大桥、南京长江大桥、九江长江大桥施工中成功地采用了悬臂拼装法。在短短的时间内，连续钢桁梁的跨度从 128m 增加到 216m ，积累了钢桁梁大悬臂拼装施工经验。目前的自架设体系施工方法即源于此。采用悬臂拼装的大跨度钢桁梁桥，在施工中出现了如何保证钢桁梁拼装到位、顺利合龙以及成桥后线形和应力是否符合设计要求的问题，这就要求对各悬臂拼装阶段的变形和应力进行控制与调整，也就提出了要进行桥梁施工控制的问题，当时的桥梁建设者已注意到这个问题并进行了这方面的工作，比如，1957年建成的武汉长江大桥，在施工中对钢桁梁悬臂拼装过程中的应力和变形进行了控制，现介绍如下。

1. 安装内力控制

图 2-1 为武汉长江大桥三孔一联的等跨度连续钢桁梁，在设计时，边跨部分杆件的内力大于中跨部分杆件的内力，由此，中跨部分杆件的截面小于边跨部分杆件的截面，在悬臂拼装桁梁时，中跨部分杆件在最大悬臂时将出现超应力现象，为了确保施工安全，又不增加额外的钢材，要解决局部杆件的超应力问题，该桥是这样进行控制的：首先，在悬臂较长时，力求减轻悬臂重力，将多余的待拼装杆件、管路、脚手材料等清除出悬臂孔；其次，为了降低部分杆件的超应力，在拼装过程中对安装应力作了调整。根据具体情况采用了多种方法。现将该桥采用的应力调整措施简述如下：

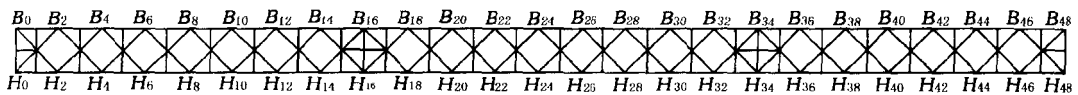


图 2-1

第一联三孔连续钢桁梁在悬臂拼装时的内力调整措施假定以等截面梁来说明。

如图 2-2 所示，图 a) 为连续梁截面和荷载情况，其弯矩图如图 b)。由于中跨 28~30 节点处弦杆截面较小，而该处又在悬臂最大时将产生较大的负弯矩，出现弦杆超应力，为降低 28~30 节点处的弦杆应力，采用了调整支座标高的方法，如图 c) 所示。抬高 32 或 0 支点，或者降低 16 支点的标高，其桁梁产生的弯矩如图 d) 所示，这样增加了 28~30 节点处的正弯矩，但同时也提高了第一孔 8~10 节点处的正弯矩，使 8~10 节点处的杆件因正弯矩增加

而发生超应力现象，故同时再利用试验墩作一个支点（如图 e）其产生的弯矩如图 f），这样既增加了 28~30 节点处的正弯矩，同时又降低了 8~10 节点处的正弯矩。由于以上两种方法的混合采用，消除了 28~30 节点处的超应力现象。同时将 32 支点适当抬高，可以适当消减第三孔悬臂端点下垂过低现象。在第二联与第三联钢桁梁悬臂拼装至第三孔时，也同样发生了 28~30 节点处弦杆超应力现象，除了调整 0、16、32 支点的相对标高外，还在 28~30 节点处加了集中力（压重）如图 g）所示，其产生的弯矩如图 h），这样既增加了 28~30 节点处的正弯矩，同时也减少了 8~10 节点处的正弯矩，最终达到调整部分弦杆超应力的目的，把中跨部分弦杆内力控制在安全范围内。

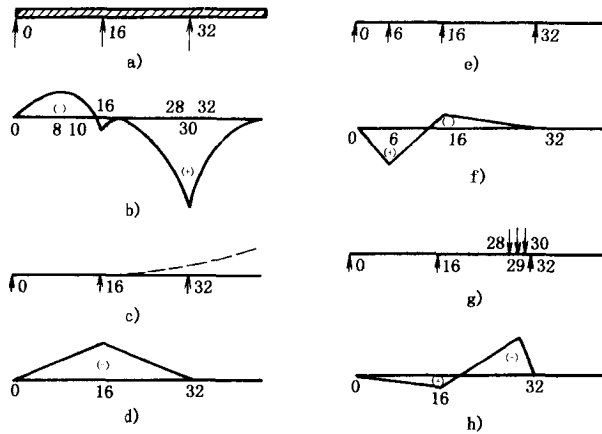


图 2-2 调整应力措施

该桥在设计时端跨跨中的弦杆控制内力约达 $\pm 25\ 200\text{kN}$ ，支点两侧的弦杆内力约为 $\pm 22\ 300\text{kN}$ ，如按此设计杆件截面，当悬臂拼装至全伸臂时，支点弦杆强度不足，必须加强。假如恒载端反力减小 300kN ，相当于端支座下降约 13.8cm 。经过如此调整，不论跨中还是支座附近，主桁最大弦杆内力均约为 $\pm 24\ 600\text{kN}$ ，可以达到弦杆截面受力较均匀的目的，以适合拼装要求。因此，采用调整反力的办法，是有利而且也是必要的，如图 2-3。

调整桁架弦杆内力，也可把钢桁梁在无内力时做成两端向上翘起的预定轮廓外形，钢梁安装后，将支座落于同一水平的各支点上，即端支座标高降低，同样可达到调整反力的目的，并使整个桁架外形适合反挠度的要求。

此调整反力的措施，实质上是给支点预留一些恒载变位，而不改变弹性变形公式的基本内容。由此可见，在连续梁设计中，这是应当充分利用的一个有利因素。表 2-1 为武汉长江

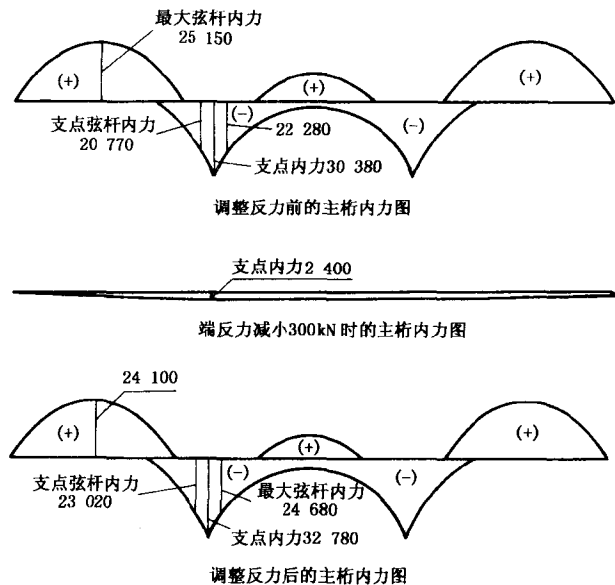


图 2-3 钢梁调整内力图（单位：kN）

大桥通车前的静载试验实测应力，从表可见，所采用的应力调整措施是成功的。

静载试验实测应力表

表 2-1

杆 件		理论计算应力 (MPa)	实测轴心应力 (MPa)	结构校正 系 数
弦 杆	$H_{47}H_{48}$	+6.2	+5.0	0.8
	$H_{40}H_{41}$	+25.6	+19.0	0.74
	$B_{40}B_{41}$	-27.5	-20.6	0.75
	$H_{33}H_{34}$	-22.2	-19.7	0.89
	$B_{33}B_{34}$	+21.2	+16.8	0.79
	$H_{25}H_{26}$	+21.8	+18.6	0.85
	$B_{25}B_{26}$	-22.7	-18.6	0.79
斜 杆	$H_{46}C_{46}$	+25.6	+21.5	0.84
	$C_{47}B_{48}$	+22.0	+25.2	0.87
	$C_{47}H_{48}$	-17.0	-19.0	0.94
	$C_{41}H_{40}$	-11.3	-8.4	0.74
	$C_{33}H_{34}$	+23.1	+19.0	0.82
	$C_{33}H_{32}$	-22.9	+24.8	1.08
	$C_{25}H_{26}$	-16.2	-15.6	0.96
竖 杆	$C_{25}H_{25}$	+23.0	+21.1	0.917

2. 桁梁标高控制

桁梁标高控制的目的是使主桁架在悬臂拼装过程中能顺利通过各桥墩和临时支点，且最终线形符合设计要求。

为了校核悬臂桁梁的挠度是否与理论计算相符，下弦各节点是否按设计要求的预拱度进行拼装，并且为了决定平衡梁的纵向坡度和各节点应有的标高，以及计算梁端至墩旁托架顶或墩顶间的垂直距离是否有足够的容纳顶梁设备的空间，计算拼装过程中各节点的标高便具有重大的意义。因此在设计中，每拼装两个小节间，即悬臂端每向前推进 16m，就要计算一次挠度。但是，计算的挠度是否精确，和锚孔跨上的假定荷载是否与实际相符有着直接的关系。同时，在具体情况下，要把爬行吊机安装构件的进度和锚孔跨上其他临时附加上去的荷载事先予以规定，但荷载一成不变又很难办到，这样，势必使挠度计算趋于复杂。解决这个问题的办法是，把理论挠度划分为两部分：第一部分按固定荷载进行计算，即按主桁架吊机行走道、运料便道、人行便道、吊机和脚手架等自动进行计算，并和预设上拱度叠加，即为悬臂孔各节点的相对挠度；第二部分计算出锚孔内单位荷载所产生的支点处的角变位的影响线，作为参变数，结合实际荷载情况和节点坐标，求得改正值。把这些资料提供给现场工程师，现场工程师就可以根据施工时的实际情况很快地推算出当时的正确挠度，并作为指导和核对拼装工作的依据。由此可以看出，只要严格地按拼装顺序进行施工，并每隔两个小节间监测一次挠度，就可使桁梁拼装工作得以顺利进行，并达到较好的线形。

图 2-4 为钢桁梁的挠度曲线图，从图中可看出，恒载的实际反挠度值与理论计算值不符，其最大差值为 3.1cm，经研究认为，在设计时，曾对按梁的挠度公式和按桁架的挠度公式的计算值进行了比较，结果前者偏小，后者因计算时考虑了腹杆的变形，其结果又偏大，最后按梁的挠度计算结果进行了预拱度的设置，拼装完后，其恒载挠度过大，说明设计中预拱度设置不够，但施工中的标高控制仍然是较为成功的。

第二节 自架设体系桥梁的施工控制

随着预应力混凝土桥跨度的增大，20世纪50年代初出现了模拟钢桁梁悬臂施工方法的悬臂浇筑混凝土或悬臂拼装混凝土节段的自架设体系预应力混凝土桥梁。很快，这种桥梁在体系和跨度上得到迅速发展，它对施工控制亦提出了更高更新的要求。

一、预应力混凝土 T 型刚构桥

世界上第一座自架设体系的预应力混凝土 T 型刚构桥，是前联邦德国于 1953 年建成的沃尔姆斯桥，跨度为 101.65m+114.2m+104.2m 带铰的 T 型刚构，施工中采用悬臂施工的新工艺，使这种桥型的结构性能和施工特点达到高度的协调统一，它为混凝土桥向跨度长大化、施工机械化、装配化等方面发展开辟了新的途径。从 20 世纪 70 年代开始，美国也建造了较多的无支架悬臂施工的预应力混凝土 T 型刚构桥，如 1972 年建成的多美尼加 Rio Higuamo 桥，主跨达 190m，与此同时，我国也修建了不少的 T 型刚构桥，从主跨 60m 的红卫桥到主跨 174m 的重庆长江大桥，在十多年中，全国各地建成了几十座预应力混凝土 T 型刚构桥，这种桥型都采用自架设体系的悬臂施工法，即在桥墩两边平衡悬臂浇筑混凝土或悬臂拼装混凝土预制块。由于施工中各节段或各预制块件是逐步悬伸的，各节段经历了浇筑、张拉、不断地加载等过程，而各节段的混凝土龄期又不同，其收缩、徐变影响较复杂，因此，它的应力和变形比悬臂拼装钢梁要复杂，其对施工控制的要求也就比较高。现以重庆长江一桥的施工控制情况为例说明 T 型刚构桥的施工控制。

重庆长江一桥是我国最大的预应力混凝土 T 型刚构桥，它由五个小 T 和两个大 T 及每孔跨径 35m 的挂梁所组成，全桥布置如图 2-5。

各个 T 构均采用悬臂浇筑混凝土的自架设体系的施工方法，混凝土的浇筑采用斜拉组合挂篮进行悬臂浇筑，如图 2-6 所示。

为了保证施工结束后，T 型刚构的线形符合设计要求，该桥重点对各个 T 型刚构的悬臂浇筑混凝土的标高进行了控制。每悬臂浇筑一个节段要观测六个工况的标高：浇筑混凝土前；浇筑混凝土后；预应力张拉前；预应力张拉后；⑤挂篮移动前；⑥挂篮移动后。同时还要校核已浇相邻节段的标高，观察预拱度变化趋势。为了及时掌握 T 型刚构悬臂预拱度的变化情况，每施工完一个节段，都必须及时整理测量资料，以便决定下一节段施工时是否调整底模标高。由于认真控制了悬臂浇筑各节段底模标高，各个 T 型刚构的预拱度曲线与设计值较为吻合。图 2-7 为大 T 悬臂预拱度曲线。

当各个 T 型刚构的混凝土浇筑完后，要进行挂梁架设，架设挂梁常采用架桥机进行，一般从一端至另一端，这样，必然在 T 型刚构的一个悬臂端产生过大变形及在悬臂根部产生较大的弯矩。该桥从已架孔向南架设时，北端产生的不平衡力矩远远大于 T 型刚构设计时允许的最大不平衡力矩。为了保证各个 T 型刚构在挂梁架设阶段不致产生过大的变形，在各跨挂梁架设及架桥机通过挂梁时，在 T 型刚构南端加平衡重，其平衡重随架梁进度分级增加，原则上架每一片挂梁增加的平衡重的重力就是一片挂梁的重力。当架桥机由 T 型刚构的北端行走至 T 型刚构的南端时，T 型刚构两端荷载发生了变化，这时应分阶段将南端的平衡重分级卸掉，以此来调整两端的标高。图 2-8 为该桥架设大 T 挂梁时的平衡重，采用在箱梁内部加水和在顶面加水袋形成。根据挂梁和架桥机通过时的平衡需要，分别求出各

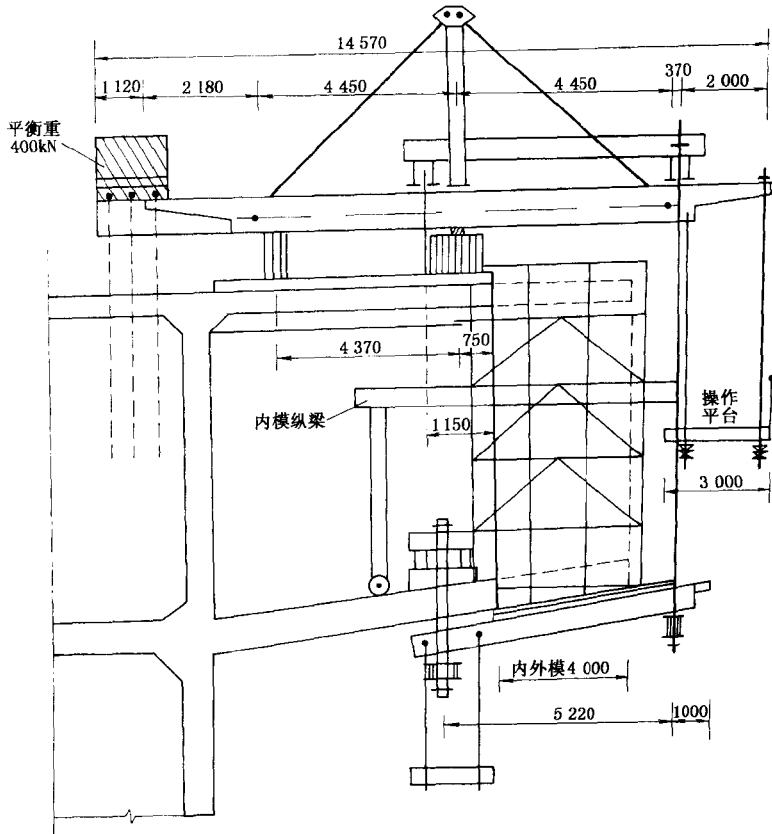


图 2-6 (单位: mm)

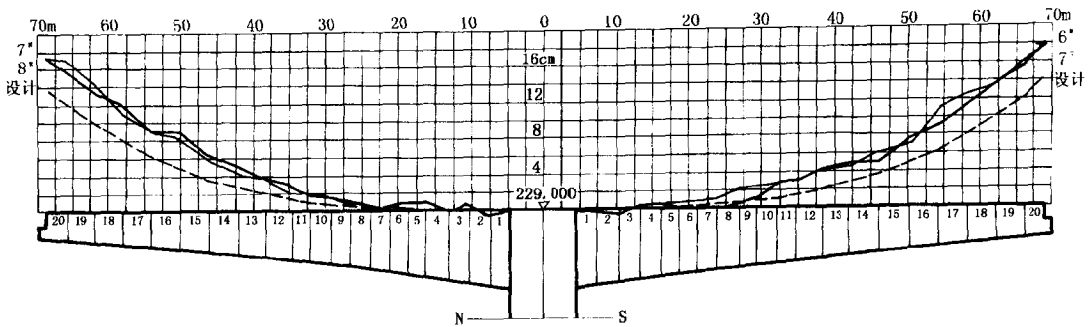


图 2-7 6号、7号 T 构拱度曲线示意图

阶段的加水量和放水量，最后，当各个 T 型刚构相互连通时，变形值逐渐趋于均衡。

对于内力控制，主要反映在预加力的控制上，该桥为保证预加力较为准确，除了预加力严格按施工规范进行外，还对预压及锚口损失值、孔道摩阻损失值、钢丝束张拉伸长值、锥形锚具内缩量等关键数值进行认真测定，求得较为可靠的预应力值。可以看出，当时对自架设体系的预应力混凝土 T 型刚构桥，已十分重视施工中的标高和内力的控制，只是控制的理论和方法还不成熟，控制的效果还不很理想。

二、预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥

近年来，国内外在自架设体系 T 型刚构桥的基础上，相继修建了许多预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥，这两种桥型具有跨越能力大、受力合理、行车平顺、施工方便和养护费用少等优点，它已成为大跨桥梁中的主要桥型。这种桥一般采用的施工方法是：在其各主墩上按“T 构”用挂篮分段对称悬臂浇筑（或拼装），在落地支架上浇筑边跨现浇段，在吊架上现浇跨中合龙段，全桥按对称悬臂浇筑 边跨合龙→中跨合龙的顺序进行施工。对于连续梁桥，在悬臂浇筑节段前还要将主梁与桥墩临时固结，待跨中合龙施加预应力后，再去掉墩顶临时固结，主梁支承于支座上。

由此可见，预应力混凝土连续梁和连续刚构桥的施工过程比 T 型刚构要复杂，它不但要经历 T 型刚构悬臂浇筑（拼装）节段形成主梁的过程，还要经历体系转换的过程，即由对称的单“T”静定结构转变为超静定结构。通过理论计算，可以得到各施工阶段的理想标高和内力值，但实际施工中受各种因素的干扰，可能导致合龙困难，使成桥线形与内力状态偏离设计要求，给桥梁施工安全、外形、可靠性、行车条件和经济性等方面带来不同程度的影响，因此，要求在施工过程中，必须实施有效的施工控制。从某种意义上讲，施工控制成了这两种桥型修建和发展必不可少的保证措施。目前针对这两种桥型的结构及施工特点，已初步研制了施工控制软件，并逐渐改进了应力和变形的监测方法和仪器，初步形成了施工控制的管理系统，使桥梁施工控制得到了进一步重视，桥梁施工控制的内容、理论和方法得到了发展。

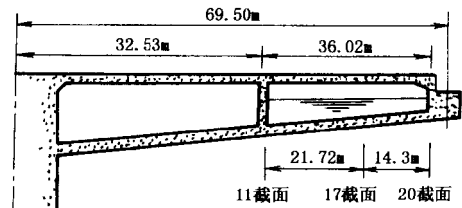


图 2-8 大 T 箱内装水剖面图

三、混凝土斜拉桥

自 1962 年委内瑞拉建成世界上第一座混凝土斜拉桥——马拉开波桥后，世界各地修建了许多混凝土斜拉桥，其最大跨度已达到 530m（挪威斯卡恩圣特桥）。我国在 20 世纪 70 年代中期开始修建斜拉桥，近 20 多年来已建成斜拉桥 40 多座，其中大部分是混凝土斜拉桥，其中最大跨度为即将通车的主跨为 450m 的重庆大佛寺长江大桥。

混凝土斜拉桥多采用自架设体系的施工方法，即采用对称于桥塔的悬臂施工，在边跨和中跨处进行合龙段现浇。斜拉桥是高次超静定结构，其施工方法和安装程序与成桥后的主梁线形和结构内力有密切关系，特别是斜拉桥在施工中要进行索力调整，这势必引起主梁内力和标高的变化，再加上混凝土徐变、收缩的影响，使得混凝土斜拉桥在施工过程中受力十分复杂，因此，必须对斜拉桥拉索张拉吨位和主梁挠度、塔柱位移等施工控制参数的理论计算值，以及施工程序作出明确的规定，并在施工中加以有效的管理和控制，以确保斜拉桥在施工过程中结构始终处于安全范围内，并在成桥后主梁的线形符合设计要求，使结构处于最优受力状态。由此可见，混凝土斜拉桥的施工控制是十分重要和必需的。我国《公路斜拉桥设计规范 试行》(JTJ 027—96) 明确规定，对斜拉桥应进行施工控制。近年来，国内外对斜拉桥施工控制的理论和技术进行了深入研究，大大地促进了桥梁施工控制的发展，下面举例说明斜拉桥施工控制的发展概况。

天津永和桥是一座主跨 260m 的混凝土斜拉桥，其主梁采用悬臂拼装，由同济大学负责

该桥的施工控制工作。除了进行必要的科学试验，以求得各种参数并进行识别外，为了保证成桥状态符合设计要求，首先在该桥主梁安装计算时采用了倒退分析法，编制了“倒拆法”计算程序。为了较准确地调整索力，编制了“恒载自动调索”程序，使施工中的计算较好的接近真实受力状态。在分析中除利用 E_{rnst} 公式修正拉索的垂度影响外，还利用拖动坐标计人大变形影响，以同时考虑大变形、梁柱效应及索垂度等三方面的非线性影响。为了减小徐变影响，还合理安排预制块的养生期，为该桥缩短工期作出了贡献。实践证明，该桥的内力和变形控制良好。

日本白屋桥为混凝土斜拉桥，其现场施工控制体系如图 2-9 所示。监测内容有主梁和主塔变形；主梁的应力及温度应力；斜拉索张力等。现场监测系统由三大块组成，图的右上角为大型计算机设计计算系统，按各施工程序进行设计计算，该系统提供结构的资料、变形及应力的计算值；斜拉索索力调整量；主梁的预拱度等。左上角框图是施工顺序，依次为吊篮移动；安装模板、钢管、斜索；浇筑混凝土，施加预应力；斜索张拉；斜索最终张拉；施工終了。图中间部

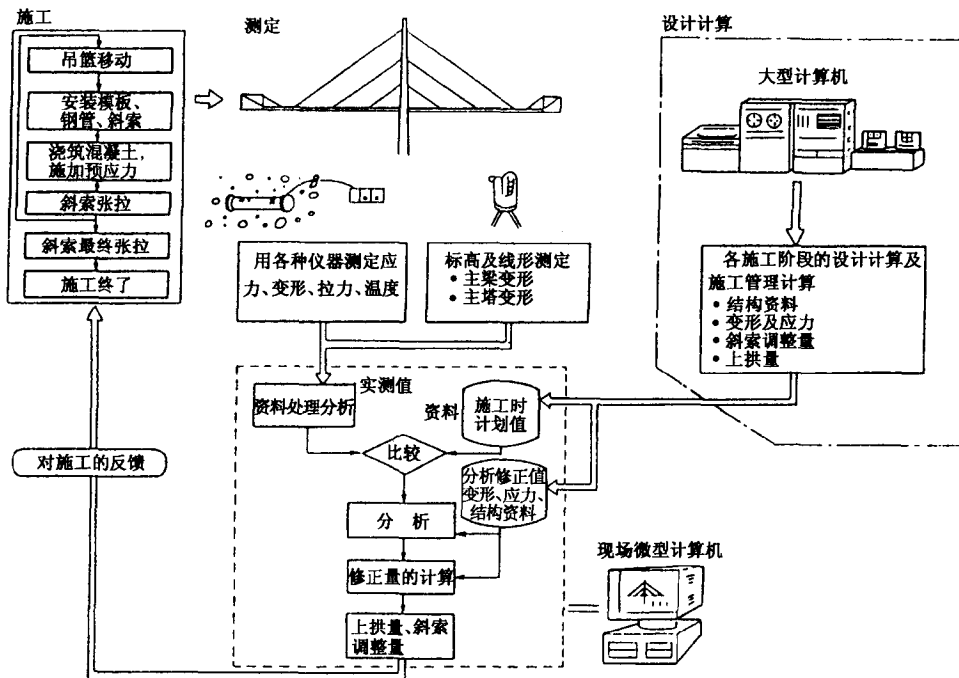


图 2-9 日本白屋桥施工现场管理系统

分是根据设计计算系统提供的施工时的计划值和经分析计算的修正值，经对变形、应力、结构资料与实测值进行比较、分析，然后，对比进行修正量的计算，对预拱度和斜拉索调整量提出修正值，由此对施工进行控制。从图中可以清楚的看出，标高和线形测定、主塔变位、主梁的位移均由仪器自动测量获得，数据的收集、迅速、处理迅速，完全自动的进行现场控制。对于应力、变形、拉力、温度等均采用精密仪器测定，并与计算机联网，保证测试数据的精确和快速。图 2-10 为混凝土埋入式应力计，其工作原理是一根钢弦，与国内



图 2-10 埋入式应力计

采用的钢弦应力仪一样。从此例可以看到，日本对一座跨度仅 100m 左右的斜拉桥，就进行了如此严密的施工控制，值得我们学习和借鉴，以更加完善我国的施工监控工作。

四、大跨悬索桥及混凝土拱桥

应该说悬索桥是自架设体系施工方法采用最早的桥型，因为任何一座悬索桥必须先架设主缆，然后才安装吊杆，再逐段安装加劲梁。早期修建的悬索桥，由于计算技术的限制，在施工中没有跟踪各工序的理论值和实测值，一般采用主缆架好后通过调整主缆长度来保证主缆线形，调整吊杆长度来保证桥面标高，这对跨度不很大的悬索桥是可行的，但随着大跨度现代悬索桥的修建，其主缆和吊杆的调整幅度减小，就必须要对各工序跟踪分析和控制，例如我国广东虎门大桥的施工控制，就是把重点放在各参数（主索弹模、构件自重、结构几何形态参数等）的测定、识别和可靠的控制分析计算上，并对每一工序进行监测、控制与调整，保证了成桥状态的索股张力与设计吻合，其最大偏差小于 4%；上下游两根主缆的标高比设计值分别高出 9.9cm 和 10.7cm；箱梁跨中预拱度为 3.177m 与设计值 3.140m 非常接近。可见，对虎门悬索桥实施施工全过程监控，取得了显著成效。

拱桥是我国修建最多的桥型，近年来在大江大河上修建了不少大跨度的混凝土拱桥，其最大跨度达到 420m（重庆万县长江大桥），是世界上跨度最大的混凝土拱桥。这种拱桥一般采用无支架施工方法，由于拱圈又高又宽，拱圈混凝土不可能全截面一次浇筑，例如万县长江大桥的拱圈为高 7m、宽 16m 的单箱三室箱形截面，施工中采用钢管混凝土拱形桁架作为劲性骨架，混凝土分层分段浇筑，先中箱，后边箱，每个箱室又按底板—下侧板—上侧板—顶板的顺序进行，如图 2-11 所示，这样必然造成各层混凝土先后参与受力和各层之间混凝土龄期的差异，随着各层混凝土的浇筑，拱圈的截面和刚度不断变化，其内力和变形也随着

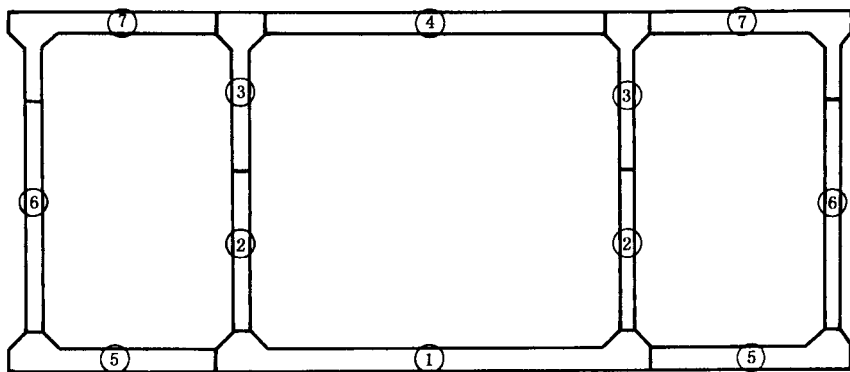


图 2-11

施工过程不断变化，它的施工过程与其他自架设体系施工方法的桥型是一样的，为了确保施工安全和成桥符合设计要求，必须对施工全过程进行监控。该桥在现场建立了应力、应变观测系统，误差分析与反馈控制系统，对影响该桥应力和变形的主要参数进行了较准确的识别，提出了最终状态能符合设计的预计值，并提出了合理的施工工序，保证了全桥施工安全和质量，并为成桥状态符合设计要求提供了可靠的手段。

总之，桥梁施工控制已愈来愈受到工程界的重视，其理论、内容和方法在不断的发展和完善，它已逐渐成为桥梁建设中不可缺少的一个重要组成部分。

第三节 桥梁施工控制的发展趋势

桥梁施工控制在外国起步较早，目前，国外发达国家已将桥梁施工控制纳入施工管理工作中。控制方法已从人工测量、分析与预报发展到自动监测、分析与预报的计算机自动控制，已形成了较完善的桥梁施工控制系统。国内起步较晚，20世纪90年代以前在桥梁施工中已注意到结构应力调整和预拱度的设置，但并未将系统控制概念引入，桥梁在施工中垮塌和成桥状态不符合设计要求的情况时有发生，在某种意义上制约了大跨度桥梁的发展。20世纪90年代以后，人们逐渐从理论与实践认识到桥梁施工控制的重要性，特别对于采用自架设体系施工的大跨度桥梁是必不可少的，但对施工控制的理论研究得还不够，控制手段落后，影响因素研究不透，预测和判断精度不高，还未建立起一套完善的施工控制系统。因此，深入研究施工控制理论，研制更加合理和实用的控制软件，提高监测的精度和自动化程度以及建立起一套完善的控制系统，是今后桥梁施工控制必须进行的工作。

目前，国外除了重视桥梁在施工过程中的控制外，也十分重视桥梁服役状态的控制工作，在桥梁中埋设测点进行长期观测、预报和分析，以随时了解服役桥梁的健康状况，避免突发事件的发生。图2-12为Salzar桥北侧桥塔从架设到使用后约四年间的应力变动状况，数据由自动记录装置记录。

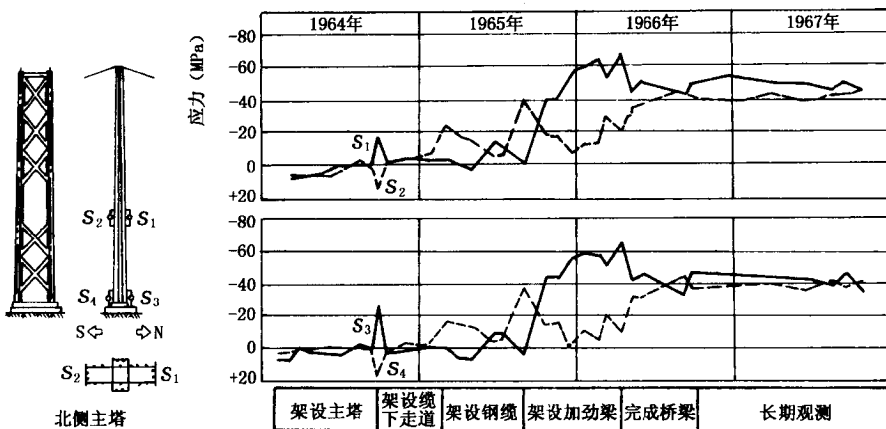


图 2-12

在这方面国内起步更晚，目前主要靠目测和荷载试验来了解服役桥梁的情况，对桥可能存在的危险因素无法起到预报和避免的作用。但人们已开始认识到对桥梁服役状态进行监控的重要性，比如对上海杨浦大桥、香港青马大桥等特大桥已开始进行长期监控工作，但还处于初级阶段，其理论和方法急需研究解决。

智能控制是桥梁工程控制（施工控制和服役桥梁控制）的发展趋势。大型桥梁工程，结构复杂、规模巨大，已难以用一般的手段来监测与控制，必须通过埋设新型传感器（如光纤传感器）和应用先进的信号处理技术，以及建立在线（服役）桥梁专家系统，形成智能控制系统，提高工程控制的科学性、可靠性和可操作性，这是桥梁工程控制的发展方向。

第三章 大跨度桥梁施工控制的内容和方法

第一节 大跨度桥梁施工控制内容

一、结构变形控制

桥梁结构尺寸的控制是施工控制的基本要求。但结构在施工形成过程中均要产生变形，加之施工过程中各种误差的积累，因此任何一个结构不可能达到与设计尺寸准确无误的吻合，故要尽量减少结构尺寸与设计尺寸的偏差，并将其降低到允许的程度。桥梁施工中对结构的最终误差应按《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—89) 的规定，把尺寸偏差控制在一定范围内。现将主要条文抄录于后，以便参考。

(1) 混凝土、钢筋混凝土基础及墩台允许偏差见表 3-1。

混凝土、钢筋混凝土基础及墩台允许偏差 (mm)

表 3-1

项次	项目		基础	承台	墩台身	柱式墩台	墩台帽
1	断面尺寸		±50	±30	±20		±20
2	垂直或斜坡				0.2% H	0.3% H ≤ 20	
3	底面高程		±50				
4	顶面高程		±30	±20	±10	±10	
5	轴线偏位		25	15	10	10	10
6	预埋件位置				10		
7	相邻间距					±15	
8	平整度						
9	跨径	$L_0 \leq 60\text{m}$			±20		
		$L_0 > 60\text{m}$			$\pm L_0/3000$		
10	支座处 顶面高程	简支梁					±10
		连续梁					±5
		双支座梁					±2

注：表中 H 为结构高度； L_0 为标准跨径。

(2) 预应力混凝土预制梁允许偏差见表 3-2。

表 3-2

项次	检查项目		允许偏差 (mm)
1	长度	梁、板	+5, -10
2	宽度	梁、板	干接缝 ±10
			湿接缝 ±20
			箱梁顶面宽 ±30
3	高度	梁、板	±5
			箱梁 +5, -10
4	腹板厚度		+10, -0
5	跨度	支座中心至中心	±20
6	支座板平面高差		2

(3) 悬臂浇筑混凝土梁允许偏差见表 3-3。

表 3-3

项次	检查项目	允许偏差 (mm)
1	轴线偏位	10
2	挠度	±20
3	梁顶面宽度	±30

(4) 预应力混凝土预制箱形拱箱允许偏差见表 3-4。

表 3-4

项次	检查项目	允许偏差 (mm)	项次	检查项目	允许偏差 (mm)
1	每段拱箱内弦长	+0, -10	5	拱箱接头尺寸及倾角	±5
2	内弧偏离设计弧线	±5	6	预埋件位置	10
3	拱箱宽度及高度	+5, -10	7	顶底板及侧板厚度	+10, -0
4	轴线的偏离	10			

(5) 混凝土斜拉桥允许偏差 (mm)。

索塔：

轴线偏位	±10
断面尺寸	±20
倾斜度	$< H/1500$
塔身横向挠曲半径 R	$\leq 20H$ (塔高)
塔顶标高	±10

主梁：

主梁采用悬臂浇筑时，按表 3-3 进行控制；主梁采用预制梁段悬臂拼装时，主梁尺寸允许偏差为：

主梁拼接中线水平方向	±10
主梁梁段尺寸	±20
主梁拼接高程	±10

(6) 钢梁安装后允许偏差见表 3-5。

表 3-5

序号	项 目	允许偏差 (mm)	
一	钢梁与设计中线和高程关系		
1	墩台处钢梁中线对设计中线偏差	± 10	
2	简支梁与连续梁间、两联(孔)间相邻横梁中线相对偏差	± 5	
3	墩台处钢梁底部与设计高程偏差	± 10	
4	两联(孔)相邻横向相对高差偏差	5	
二	支座与设计中线关系		
5	支座纵横线扭转偏差	± 1	
6	固定支座纵横线中点 与设计位置顺桥向偏差	连续梁或 60m 以上 简支梁	± 20
		60m 以下简支梁	± 10
7	辊轴或活动橡胶支座位置偏移(按设计气温安装灌注定位前)	± 3	
8	支座底板四角相对高程	2	

(7) 悬索桥。

悬索桥由索塔、主缆、锚碇、加劲梁等主要结构组成，为确保结构各部尺寸符合设计要求，也应对其施工过程进行严格监控。

索塔：

悬索桥桥塔施工中的允许偏差，按斜拉桥桥塔的有关规定处理。

锚碇：

锚碇为重力式锚，可按表 3-1 混凝土、钢筋混凝土基础及墩台允许偏差处理。

主缆线形和索鞍偏移值：

主缆线形和索鞍偏移值应尽量符合设计要求，至于在施工过程中及最终的允许偏差，现行规范没有明文规定。现将国内几座大跨度悬索桥在施工中的跟踪监测值与设计值的误差进行统计后，给出允许偏差的建议值供参考。

主缆线形建议竖直标高 $\pm 50\text{mm}$

索鞍偏移值 $\pm 5\text{mm}$

二、结构应力控制

结构应力控制好与否，在外观检查时不易发现。但是，如果结构实际应力状态与设计应力状态不符，将会给结构造成危害，并较之结构变形的影响为大，所以，在对桥梁进行施工控制时，尤其要注意对结构应力的监控。

1. 施加预应力的一般规定

(1) 张拉机具与锚具应在进场时进行检查和校验。千斤顶与压力表应配套校验，以确定张拉力与压力表读数之间的关系曲线。所用压力表的精度不宜低于 1.5 级；校验千斤顶用的试验机或测力计的精度不得低于 $\pm 2\%$ 。

(2) 预应力钢材用应力控制方法张拉时，应以伸长值进行校核，实际伸长值与理论伸长值之差应控制在 6% 以内。

2. 其他桥梁体系内力控制

除预应力混凝土结构主要控制预加力外，其他桥梁体系的结构应力状态应尽量与设计应力状态相符，若产生偏差，则其偏差不超过 $\pm 5\%$ 。

- (1) 斜拉桥复测斜拉索张拉力允许偏差为 $\pm 5\%$ ；
- (2) 悬索桥主缆和吊杆拉力允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

三、结构稳定控制

桥梁结构的稳定关系到桥梁的安全，它与桥梁的强度有着同等重要的意义。

世界上曾经有过不少桥梁在施工过程中，由于失稳而导致全桥破坏的例子，最典型的要数加拿大的魁北克（Quebec）桥。该桥在南侧锚定桁架快要架完时，由于悬臂端下弦杆的腹板翘曲而发生突然崩塌坠落。我国四川州河大桥也因悬臂体系的主梁在吊装主跨中段时承受过大的轴力而失稳破坏。因此，桥梁施工过程中不仅要严格控制变形和应力，而且更要严格地控制施工各阶段结构构件的局部和整体稳定。

目前，桥梁的稳定性已引起人们的重视，但人们只注重桥梁的稳定计算，而对施工过程中可能出现的失稳现象还没有可靠的监测手段，尤其是随着桥梁跨径的增大，受动荷载或突发情况的影响，还没有快速反应系统，所以，很难保证桥梁施工安全，更难保证营运时的安全（通车后由于失稳而致全桥破坏的例子也不少）。为此，应建立一套全面监控系统，对桥梁进行终身监控，确保桥梁安全施工、安全营运。

桥梁的稳定安全系数是衡量结构安全的重要系数，但现行规范中未详细列出各种材料、各种结构在不同工况下的最小稳定系数，有待今后完善。现在在规范中已明确的条文列出，以备参考。

1. 钢桥

- (1) 钢桥在施工架设过程中应保证横向和纵向的倾覆稳定性，稳定系数不小于 1.3。
- (2) 结构单肢长细比应小于规范容许值。

2. 钢筋混凝土及预应力混凝土结构

钢筋混凝土及预应力混凝土结构的稳定，应按轴心受压计算公式验算。当长细比 λ 大于规范所列数值时，可按临界力控制稳定，其稳定安全系数应大于 4~5。考虑到施工过程时间短，其稳定安全系数至少大于 3。

第二节 大跨度桥梁施工控制方法

近 20 年来，大跨度桥梁的施工控制已逐渐被工程界所重视，并形成了一些实用的控制方法，目前主要有三种：一是采取纠偏终点控制的方法，即在施工过程中，对产生主梁线形偏差的因素跟踪控制，随时纠偏，最终达到理想线形，这种方法常用 Kalman 滤波法和灰色理论等。显然，这种方法工作量大，有时控制效果不一定理想。二是应用现代控制理论中的自适应控制方法，即对施工过程中的标高和内力的实测值与预计值进行比较，对桥梁结构的主要基本设计参数进行识别，找出产生实测值与预计值（设计值）产生偏差的原因，从而对参数进行修正，达到双控的目的。这种方法的重点在于对影响结构变形和内力的主要设计参数的识别上，而一般只要及时对产生偏差的主要参数进行修正（一般由计算机自动进行），则实测值与预计值拟合得就非常理想。这是我国大跨度桥梁施工控制中常采用的方法。我国某在建斜拉桥自适应控制实施框图如图 3-1。