

第一章 概 论

桥梁结构依据其结构构造和受力体系，可将其分类为：梁桥体系、拱桥体系、索桥体系（包括悬索桥和斜拉桥）。从桥梁承载结构的材料划分又可分为：木桥、石桥、钢桥、混凝土桥等；从桥梁的使用用途划分可分为：公路桥、铁路桥、公铁两用桥、农桥、人行桥、管道桥等。从桥梁的施工技术与方法分类可分为：顶推与拖拉法，满堂固定支架法，移动支架法，预制装配法，悬臂灌注与悬臂拼装法。本书重点论述与桥梁悬臂施工法建造桥梁相关的设计理论，施工过程的桥梁结构及临时结构强度、刚度、稳定性控制、施工机械设备及工艺等。下面就桥梁悬臂施工的发展历史予以论述。

第一节 桥梁悬臂施工与设计的发展

桥梁是一个国家历史与文化的象征。我国是世界上文明发达最早的国家之一，自远古以来，我国在桥梁建造技术上有着光辉的成就及灿烂的历史篇章，所建桥梁不计其数，其中多有划时代的杰作，对全人类的文明进步做出了巨大贡献。桥梁悬臂施工与设计不是最近才有的，它的发展与其它桥梁的建造方法一样，有着悠久的历史。

一、伸臂木梁桥

据史料考证，我国伸臂木梁桥的最早建造年代，最迟在距今一千七百年前的公元三世纪初。当时在甘肃与新疆交界地区（现今甘肃安西县到新疆吐鲁番县），由羌族人民在河上建造了“两岸垒石作基陞，节节相次，大木纵横更相镇压两边俱来，相去三丈丛木材，以板横次之”的伸臂木梁桥，“长一百五十步，当地人称其为河厉”。因桥中无墩柱，在险谷陡崖处走过伸臂木梁桥好似飞渡，故有“飞桥”之称。后来这种“飞桥”得以推广建造，如青海扎麻隆桥，见图 1-1 所示。

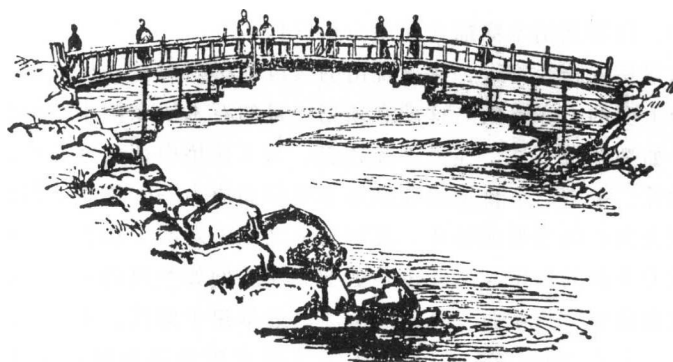


图 1-1 青海扎麻隆桥

因为木、石材料抗弯拉强度的限制，单跨简支桥梁跨度只能达 8m 左右在山区峡谷处谷深流急，很难修筑桥墩，且桥墩不利于泄洪；在一些水运繁忙的较大河流中，8m 跨度难以满足船只航运和筏排通过的要求。因此，我国古代桥工们为了增大木梁桥的跨径，在河谷中少建或不建桥墩，在实践中创造出了伸臂木梁桥，见图 1-2 所示。从图 1-2 可以看出，伸臂木梁桥的建造施工方法是用圆木或方木，纵横相间叠起，层层向河中心挑出，每层排出数尺或丈余，每层纵木（几乎全用圆木）的前端稍向上昂，以便桥梁受荷变形后，桥能平直而不向河心凹曲。两端向河中靠拢到只留下五、六米空缺时，用筒支木（竹）梁搭接成桥东晋义熙（公元 405 ~ 418 年）时，在袍罕（今甘肃临夏）附近宽 40m 的河上修筑过伸臂木梁桥，桥高为五十丈，建造施工了三年才完工，在当时来说其建造规模是极为宏大的。在南北朝时，伸臂木梁桥盛行于我国西北一带。而在江浙、湖南及西藏等西南地区，也有许多伸臂木梁桥修建。

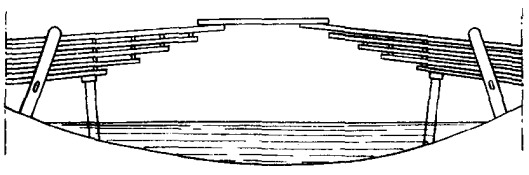


图 1-2 伸臂木梁桥示意图

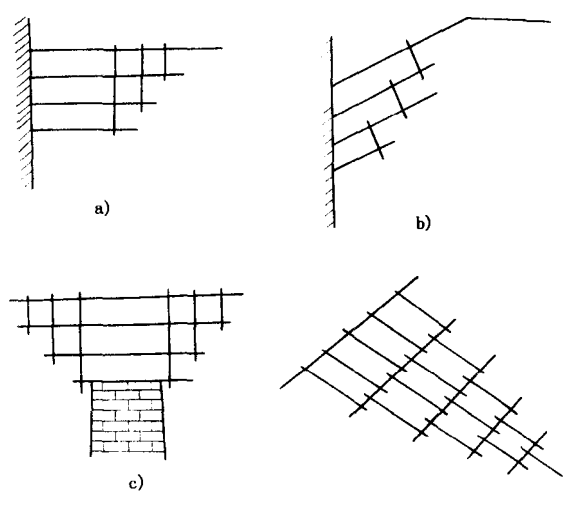


图 1-3 伸臂木梁桥几种型式示意图

伸臂木梁桥大致有以下几种构造及设计型式，详见图 1-3 所示。由图 1-3 可看出，每一种伸臂木梁桥大都使用圆木，层层向跨中挑出，不用或很少用钉子与铁件。比较可知，图 1-3a) 为从桥台处层层叠出向河中心伸出；图 1-3b) 为折线型，近似于伸臂梁与拱之间的刚架式；图 1-3c) 为从河中桥墩处对称向两侧伸臂修建，其刚度及稳定性较好；图 1-3d) 的伸臂梁桥在新疆的山区常可见到，有的跨中只留一根圆木走人，留有二根圆木的可以过牲畜，但这种桥的刚度较差，受荷载后变形很大。新疆伊力喀什河上曾有这种结构形式的伸臂木梁桥一座，主孔跨径为 23m，一端支承在岩石上，

一端悬插在木笼中，用穿梁梢木穿插并配用少量铁件。

要想将伸臂木梁桥的跨径增大，挑梁挑出的长度就必须愈长；挑出的层次愈多，桥的跨度就愈大，桥墩台上受的力亦愈大。这就必须用大量的石木块在挑梁底部填实压住，以免挑梁在跨中受力后，如翘翘板一样，在另一头翘起。为了使桥中荷载逐层传递到桥台上来，须用铁条或立柱等构件，把上、下排挑梁及横压木扎牢固成为一个整体。因此，为了避免桥梁可能产生过大的倾向河心的变形或破坏，我国桥工又创造发明了桥台上修阁，桥墩上建亭的办法，既起到重力平衡的作用，又使桥梁更加美观。例如兰州的屋桥，就是这类伸臂木梁桥的一个代表。它座落在兰州城西、跨越阿干河。最早建于唐代，屡坏屡修，最后一次修复是在清光绪三十年（公元 1904 年）。据 1952 年兰州市建设局对屋桥的实测，桥净跨度达 22.5m，全长 27m，桥高 4.85m，桥宽 4.6m 见图 1-4 所示。后来为了进一步增大伸臂木梁桥的跨径，并增大其刚度和稳定性，我国桥工在建桥实践中又创造了木撑架桥，即把撑木一

头插入桥台墩两侧的预留孔眼里，一头顶托在挑梁的顶端。这样又增加了一个承托，使挑梁受力减小，变形减少，结构稳定性增加，如湖南澧陵绿江桥以及云南墨江八字撑架桥等。

因为木桥的使用寿命较短，加之木材的缺乏，国内外已很少修建木桥，但木桥的修建曾在我国历史上发挥过重要的作用。

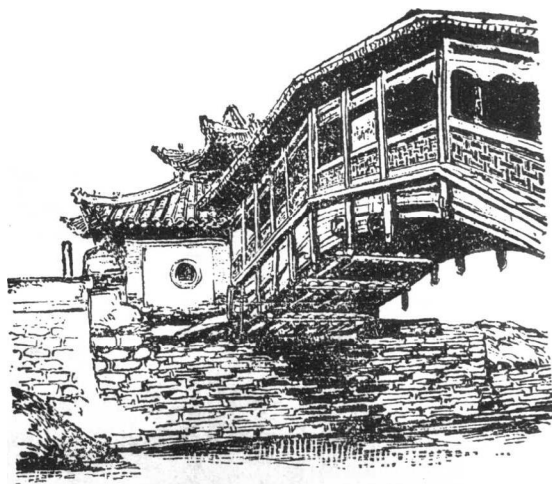


图 1-4 兰州屋桥

二、钢桥悬臂施工与设计的发展

20 世纪前半叶的中国江河上已有钢桥，但大部分是由外国人投资、设计及承包施工。中国钢桥的建设是从 20 世纪 50 年代才开始逐步发展和建设，并在建桥史写下了辉煌的篇章。1957 年，武汉长江大桥的胜利建成，结束了我国万里长江无大桥的历史，也标志着我国修建大跨度钢桥的现代化桥梁技术水平的新起点。武汉长江大桥为公铁两用桥，正桥为 $3 \times 128\text{m}$ 的连续钢桁梁，梁高 16m，桥梁全长 1670.4m。全部工程自办，全部钢梁自造悬拼。1969 年又胜利建成的南京长江大桥，是举世瞩目的巨大工程，已被列为世界上最宏伟的结构之一，是我国桥梁史上极其光辉的篇章。它向世人表明：中国人民从此可以完全依靠自己的技术力量，自行设计、制造、施工国产高强钢材的现代化大型桥梁。这标志着中国桥梁工程技术已达到了国际新水平。南京长江大桥正桥除北岸第一孔为 128m 简支钢桁梁外，其余为 3 联 9 孔，每联为 $3 \times 160\text{m}$ 的连续钢桁梁。上层为公路桥，包括引桥在内公路桥全长为 4589m；下层为铁路桥，全长为 6772m。该桥除攻克了桥址处水深流急，河床地质极为复杂的桥墩基础施工的道道难关外，还在钢梁的设计和施工中首次采用了国产的 16Mn 低合金钢材，在钢梁的悬臂拼装施工中，纵梁的连接第一次采用高强螺栓代替铆钉，同时也试验研究并制造了一系列关键性的施工机具设备和采用了有效的施工工艺，保证了大桥工程的高质量完工。随后我国在成昆铁路线上及其它大江大河上，使用悬臂施工方法，修建了多座铁路钢桥和公路钢桥。如 1992 年建成的九江长江大桥（图 1-5 所示）是一座主桥跨度为 $180\text{m} + 216\text{m} + 180\text{m}$ 的中承钢拱桥，创造了同类桥梁悬臂拼装与吊装的单跨记录。我国现有用悬臂法施工的钢桥其中最大跨径为：

- 铁路简支钢桁梁桥 四川成昆线金沙江三堆子桥 $l = 192\text{m}$ ，1969 年；
- 铁路连续钢桁梁桥 四川宜宾金沙江桥， $l = 176\text{m}$ ，1968 年；
- 铁路斜腿刚架桥 陕西安康汉江桥， $l = 176\text{m}$ ，1982 年；
- 铁路中承钢拱桥 九江长江大桥， $l = 216\text{m}$ ，1992 年；
- 公路连续钢桁梁桥 山东北镇黄河大桥， $l = 120\text{m}$ ，1971 年；
- 公路钢桁拱桥 四川渡口金沙江桥， $l = 180\text{m}$ ，1996 年；
- 公路钢斜拉桥 山东东营黄河斜拉桥， $l = 288\text{m}$ ，1987 年；
- 公路钢主梁与混凝土桥面板结合斜拉桥，上海杨浦大桥， $l = 602\text{m}$ ，1993 年。

国内外的钢斜拉桥与结合梁斜拉桥正在向 1000m 大关挺进，如日本的多多罗（Tatara）斜拉桥主跨已达 890m。本世纪，用悬臂施工法修建 1000m 以上特大跨径的钢斜拉桥完全可

以实现。

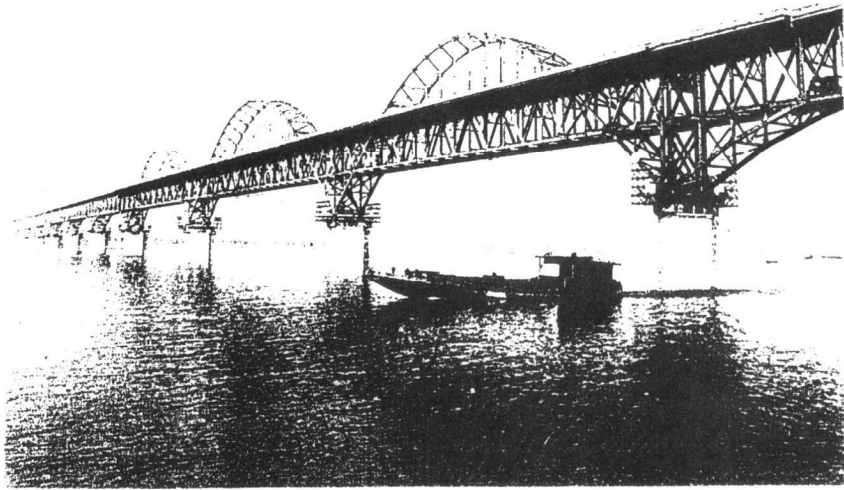


图 1-5 九江长江大桥（公铁两用钢桥）

三、预应力混凝土桥梁的悬臂施工与设计的发展

自从 1824 年水泥研制生产以后，混凝土材料已广泛用于土木工程之中。混凝土桥梁和钢筋混凝土桥梁都相继在国际上建成。到 1928 年，Freyssinet 已用悬臂施工方法建造了主跨为 185m 的钢筋混凝土大跨径拱桥，1930 年又由 E. Baumgart 用悬臂施工法建造了 68m 主跨的钢筋混凝土大跨径梁桥，但由于钢筋混凝土结构容易开裂的材料特性，使其在悬臂施工中造成钢筋的浪费，后来较少采用。国外从 20 世纪 40 年代末开始又将悬臂施工方法用于建造预应力混凝土桥梁，其中拱桥当属南斯拉夫的克拉克桥，最大跨径为 390m。我国是从 20 世纪 60 年代中期，将悬臂施工方法，从钢桥引入到预应力混凝土桥梁施工后，打破了建造预应力混凝土梁桥只能采用预制装配和在支架上现浇施工的单一局面，使预应力混凝土桥梁结构的设计与施工得以全面发展，出现了预应力混凝土 T 型悬臂梁桥，连续梁桥，连续刚构桥，桁架拱桥和斜拉桥等各种新结构。从而使预应力混凝土桥梁成为我国桥梁工程的主要类型，并且在 100~500m 范围内的大跨桥的建设中，打破了钢桥一统天下的局面，在竞标及经济利益比较下，预应力混凝土大跨度桥梁使用悬臂施工方法的方案，往往优于钢桥方案。

我国第一座预应力混凝土桥梁采用悬臂施工的方法是在 20 世纪 60 年代中期建成的第一座 T 型刚构桥。70 年代以后修建了几十座大中跨径的预应力混凝土 T 型刚构桥，如 1971 年建成的福建乌龙江公路大桥，主孔跨为 $3 \times 144\text{m}$ ；1980 年建成的重庆长江公路大桥，该桥共 8 孔，总长为 1000m，最大跨径为 174m。随后使用悬臂施工法还建造了预应力混凝土连续梁桥，连续刚构桥，桁架拱桥，斜拉桥等，图 1-6 示出了武汉长江二桥。这些桥梁各自的代表作分列如下。

1. 预应力混凝土连续梁桥

1983 年，广东容奇大桥，主跨为： $73.3\text{m} + 3 \times 90\text{m} + 73.3\text{m}$ ；

1983 年，常德沅水大桥， $84.7\text{m} + 3 \times 120\text{m} + 84.7\text{m}$ ；

1983 年，黑龙江松花江大桥， $59\text{m} + 7 \times 90\text{m} + 59\text{m}$ ；

1984 年，广州珠海三桥，主跨为 $80\text{m} + 110\text{m} + 80\text{m}$ ；
1985 年，湖北沙洋汉江大桥，主跨为 $62.4\text{m} + 6 \times 111\text{m} + 62.4\text{m}$ （连续长度近 800m ）；
1990 年，云南六库怒江大桥，主跨 154m ；
1992 年，湖北襄樊汉江长虹大桥： $65.8\text{m} + 85\text{m} + 10 \times 100\text{m} + 85\text{m} + 65.8\text{m}$ （连续长度为 1308.2m ）：

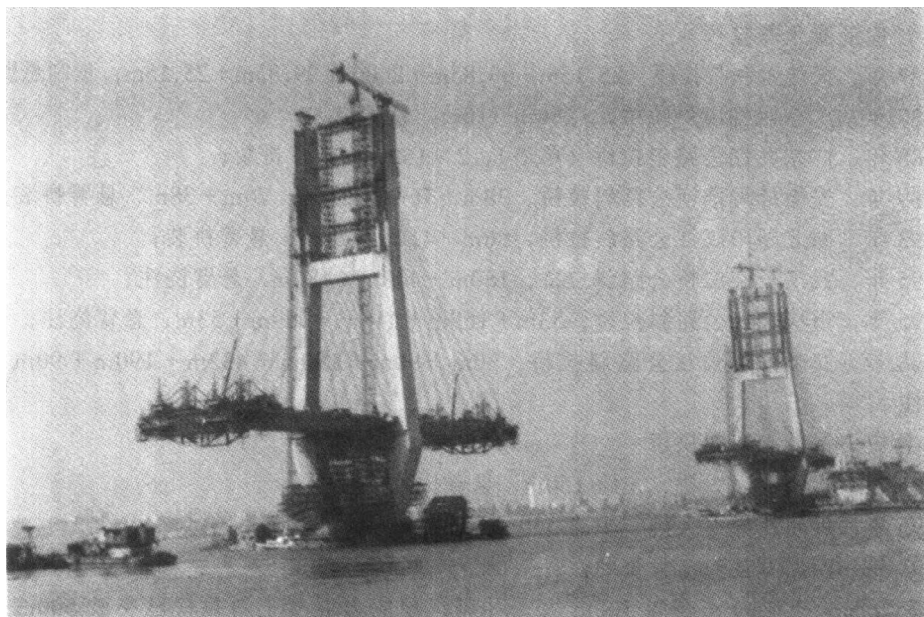


图 1-6 武汉长江二桥公路斜拉桥正桥

1993年(山西西)凤陵渡黄河公路大桥 $5 \times 87\text{m} + 87\text{m} + 7 \times 114\text{m} + 87\text{m}$ 。

2. 预应力混凝土连续刚构桥

1988年,广东洛溪大桥, $65\text{m} + 125\text{m} + 180\text{m} + 110\text{m}$, 悬臂浇注;

1993年,东明黄河大桥, $75\text{m} + 7 \times 120\text{m} + 75\text{m}$, 悬臂浇注;

1994年,三门峡黄河公路大桥, $105\text{m} + 4 \times 160\text{m} + 105\text{m}$, 悬臂浇注;

1995年,黄石长江公路大桥, $162.5\text{m} + 3 \times 245\text{m} + 62.55\text{m}$, 悬臂浇注;

1997年,广东虎门大桥辅航道桥, $150\text{m} + 270\text{m} + 150\text{m}$, 悬臂浇注。

3. 预应力混凝土斜拉桥

1987年,天津永和斜拉桥, $25.15\text{m} + 99.85\text{m} + 260\text{m} + 99.85\text{m} + 25.15\text{m}$, 预制悬臂拼装;

1987年,广东西樵山斜拉桥, $125\text{m} + 110\text{m}$, 悬臂浇注;

1988年,广东九江公路斜拉桥(单塔), $2 \times 160\text{m}$, 悬臂拼装;

1989年,安徽蚌埠淮河公路斜拉桥, $38\text{m} + 76\text{m} + 224\text{m} + 76\text{m} + 38\text{m}$, 悬臂拼装;

1993年,湖北郟阳汉江公路斜拉桥, $86\text{m} + 414\text{m} + 86\text{m}$, 悬臂拼装;

1995年,武汉长江二桥公路斜拉桥, $180\text{m} + 400\text{m} + 180\text{m}$, 悬臂浇注;

1995年,重庆长江公路斜拉桥, $53\text{m} + 169\text{m} + 444\text{m} + 169\text{m} + 53\text{m}$, 悬臂浇注;

1996年,安徽铜陵长江公路斜拉桥, $80\text{m} + 90\text{m} + 190\text{m} + 432\text{m} + 190\text{m} + 90\text{m} + 80\text{m}$, 悬臂浇注。

4. 预应力混凝土桁架拱桥

1985年,贵州剑河大桥,主跨 150m , 悬臂拼装;

1995年,贵州江界河大桥,主跨 330m , 悬臂拼装。

1997年,四川万县长江大桥劲性骨架拱桥,主跨达 420m 。

预应力混凝土梁桥正在向 300m 大关冲刺;预应力混凝土斜拉桥已突破 500m 跨径向 600m 大关挺进;预应力混凝土桁架拱桥正向 400m 以上大跨发展。可以预计本世纪的世界桥梁发展,随着混凝土和钢材等材料向高强、轻质发展,预应力混凝土桥梁的悬臂建造将会更加繁荣与辉煌。

第二节 桥梁悬臂施工与设计的原理及特点

一、桥梁悬臂施工与设计的原理

桥梁结构的悬臂施工与设计主要指桥梁上部结构在设计和施工时,从桥墩顶开始,对称或不对称地分段悬臂浇注或悬臂拼装施工。如图 1-7 所示。

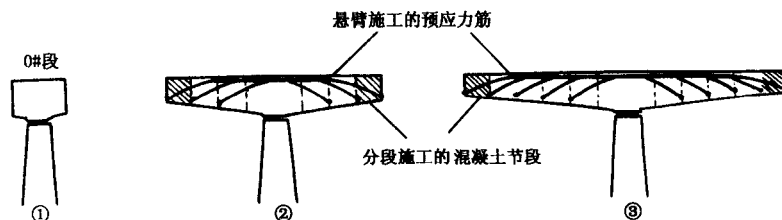


图 1-7 悬臂施工桥梁的原理示意图

悬臂施工适合于梁的上翼缘承受拉应力的桥梁形式，如悬臂梁、连续梁、连续刚构、拱桥及斜拉桥等。悬臂浇注法是用挂篮就地分段现浇，待每段混凝土养护并张拉预应力后，再将挂篮前移，以浇筑下一节段之用。悬臂浇注的每一段将要承受随后浇注段的结构自重及施工机具人员等荷载，并要保持悬臂对称和平衡及安全稳定。一般悬臂浇注的一个节段长3~8m，不宜超过8m。节段太长，将会增加结构与挂篮的静载，也会引起前面节段太大的施工内力。悬臂浇注法施工的桥梁见图1-8所示。

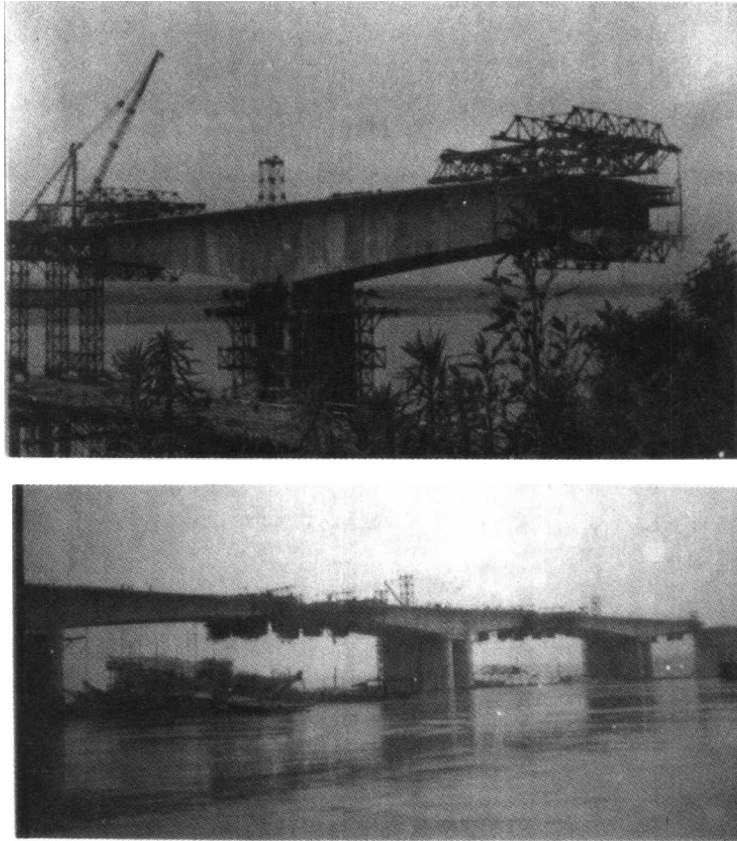


图 1-8 桥梁悬臂浇注施工

悬臂拼装是用已制造好的钢梁杆件或制好的预应力梁节段，用悬拼吊机悬吊于上部结构上将杆件或节段梁逐一拼装。一个节段拼装牢固后，再拼装下一个节段，形成向桥跨中部逐渐增大的悬臂，直至跨中合拢或拼至下一个墩台上去。对于预应力混凝土上部结构的拼装，以及悬臂拼装节段的长度设计，主要取决于悬拼吊机的起重能力，一般为2~5m较合适，若节段过长则块件静载大，需要庞大的起重设备，节段过短则拼装接缝多，对结构受力不利并使工期延长。一般在悬臂根部，因梁较高，体积大静载大，可将节段分短，随悬臂伸展可将节段加长。预应力混凝土斜拉桥的悬臂拼装见图1-9所示。对于钢梁的拼装，也可据杆件受力及静载采用半悬臂拼装至跨中合拢或全悬臂拼装至下一个墩台上。

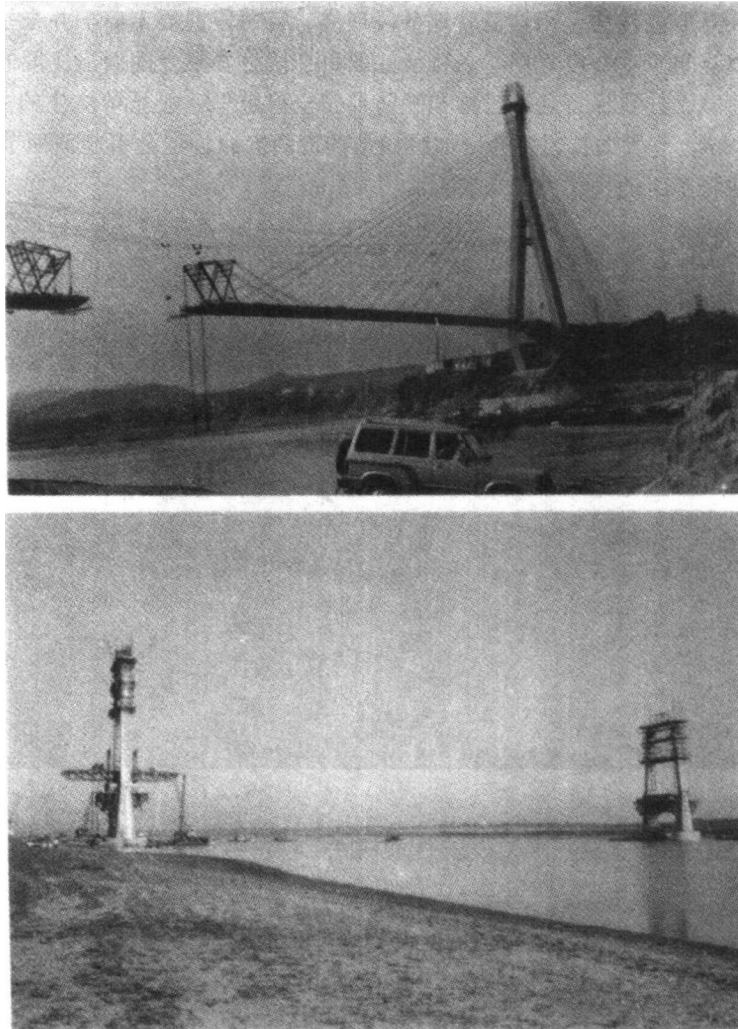


图 1-9 桥梁悬臂拼装施工

二、桥梁悬臂施工与设计的特点

桥梁在设计阶段除了对成桥的强度、刚度、稳定性进行设计外，还要根据悬臂施工的需要，进行一系列施工阶段的结构构造设计与计算，以满足悬臂施工及桥梁结构和受力需要。因此，现代化的悬臂施工方法最早主要用于修建钢桥和预应力混凝土 T 型刚构桥。随着悬臂施工技术的进步和完善，施工机械化程度的提高，加上使用电子计算机辅助进行桥梁结构内力分析计算及施工控制，使悬臂施工法成为现代大跨度桥梁建造的主要施工方法。这推动了桥梁进一步向高强、轻型、大跨方向发展。悬臂施工发展的主要特点，是淘汰了满堂固定脚手架的施工方法，给桥下以宽敞的净空。其优点是可减少施工设备，简化施工工序，如减少所使用的模板数量且能高效周转循环利用。由于实现机械化和循环重复作业，可改进工艺并提高工程质量，容易实现连接及跨中合拢。

桥梁悬臂施工主要适用于下列情况

1. 桥梁位于大江大河之上，桥下水深流急，有通航要求，或有流冰或有较多木排的河流，要求桥梁跨度较大，可考虑用悬臂施工。

2. 桥梁位于深山峡谷之间，桥墩很高，不可能用满布式膺架，或用支架法很不经济时，可考虑用悬臂施工。

3. 桥梁属于立交桥，在施工中不能中断桥下交通，即不能妨碍桥下净空的使用，也应考虑用悬臂施工。

4. 桥梁的上部结构形式有利于悬臂施工时，即悬臂施工的受力与桥梁建成后受力较接近，如悬臂梁桥、连续梁桥、连续刚构桥、斜拉桥等，可考虑用悬臂施工。

5. 当大跨度桥梁施工工期要求很紧时，为加快施工进度，多孔上部结构可同时施工。如预应力混凝土预制梁悬臂拼装施工，每天可悬拼 10m 以上，可考虑用悬臂施工。

6. 为投标竞标节省施工费用，降低工程造价，提高工程质量，可考虑悬臂施工

三、悬臂施工法适用范围

悬臂施工桥梁的跨度范围为 60~600m，最常用的跨度为 70~200m，具体适用跨径见表 1-1 所示。我国最大跨度的悬臂施工桥梁：预应力混凝土悬臂梁桥为重庆长江公路大桥，主跨为 174m；预应力混凝土连续梁桥最大跨径为云南六库怒江公路大桥，主跨为 154m；预应力混凝土连续刚构桥最大跨径为广东虎门大桥的辅航道桥，主跨为 270m；预应力混凝土桁架拱桥为 330m；预应力混凝土斜拉桥最大跨度为 500m；钢梁桥最大跨径为 176m；钢拱桥最大跨径为 216m；钢斜拉桥为南京长江二桥最大跨径为 628m；钢与混凝土结合梁斜拉桥最大跨径为 602m。

悬臂施工方法 适用的跨径

表 1-1

施工方法	跨径 (m)	施工方法	跨径 (m)
悬空模架逐跨施工法	30~50	变高度梁平衡悬臂节段拼装法	60~200
从某墩向两侧逐跨施工法	50~180	平衡悬臂浇注法	60~300
节段拼装法	30~90	悬臂施工的拱桥	90~450
等高度梁平衡悬臂节段拼装法	30~90	悬臂节段施工的斜拉桥	60~600

四、悬臂浇注与悬臂拼装的比较

预应力混凝土桥梁采用平衡悬臂施工，一般是从一个中间墩开始，向两侧对称分段施工，各梁段之间用预应力筋相连接。梁段可以是现浇的，也可以是预制的，两种方法均能取得良好效果。究竟是用悬臂浇注还是悬臂拼装，取决于建桥处的实际情况。现将两种施工方法比较如下。

1. 从设计角度看，两种施工方法需要的混凝土与钢筋的材料用量大致相等，成桥后受力及结构行为基本相同，主要区别在于施工阶段的内力与变形不同。

2. 从施工进度方面看，采用预制梁段的施工速度比现浇快得多，上部结构的梁段预制与桥梁基础及下部工程可平行作业，梁段在预制场提前预制，拼装时仅占用施工周期的运输吊装定位和穿束张拉等工序。一个梁段的施工周期仅 1~1.5 天，每月平均速度可达 200~400m 而悬臂浇注施工要等到桥墩建好后才可进行梁部施工，且梁部施工速度又取决于混凝土的养护时间，每个梁段的施工周期为 5~7 天，每月平均速度可达 40~60m

3 从施工机具设备方面看，悬臂拼装施工需要预制场地和运输及架桥设备，一般需要

起重吊机 50t 以上，因此预制拼装施工对建造重复性高架长桥较经济；悬臂浇注施工对特殊设备投资少，仅需要可反复周转使用的挂篮及 1.5t 以上的吊机即可，因此该法用于建造长跨度短桥，现浇施工则较方便和经济。

4. 从施工质量方面看：悬臂拼装施工的梁段质量容易得到保证，但要注意对预制梁段的接头，必须仔细设计和施工，避免出现因环氧树脂或湿接缝处达不到粘结强度而引起剪切破坏，必须注意梁的整体性。悬臂浇注施工时，梁体的钢筋连续性好，混凝土的整体性也较好，但是应注意高空作业工作量大，工作面小，要从设计和施工方面考虑保证节段混凝土的现浇质量。

5. 从施工变形控制及稳定性安全的方面看，悬臂拼装的施工变形及稳定性控制较难，应特别注意保证中间体系的施工稳定性，必须严格控制几何位置，使相邻截面中因弹性变形、徐变和收缩引起的挠度相协调，以免发生梁体上翘及过大的二次弯矩值。而悬臂浇注时，对施工中的变形控制较易，可以逐节段调整挂篮标高等，但应注意挂篮移动时的稳定性及施工安全措施，避免出现挂篮倾覆落入水中或桥下，造成安全事故。

6. 从对自然环境的要求看，悬臂施工不需要支架，在桥下场地受到限制时仍可施工。比较而言，悬臂浇注适应性更强一些，用挂篮现浇一般不受桥孔下的地形、地质、水文、船只、建筑物或市区交通的影响。而悬臂拼装则要求能运送预制块件，吊装预制梁段的施工作业从对温度及湿度要求来看，悬臂拼装及预制节段时，受气候的影响较少。拼装时若用干接缝结合，则不怕低温影响，若用环氧树脂接缝，也有在摄氏零下 15℃ 施工成功的桥例。而悬臂浇注施工时，因混凝土养生的问题，希望气温和湿度较高，使混凝土易于早强，若冬季施工，则需蒸汽养生，则较困难一些。

钢桥的施工，主要是在工厂将杆（板）件制造好，到桥梁工地进行悬臂拼装施工，拼装时可利用墩旁附着式托架法及吊索塔架法等。而对于拱桥悬臂施工可有塔架斜拉方法，斜吊式悬浇法，刚性骨架与塔架斜拉索联合法和悬臂桁架拼装法等。

第二章 悬臂施工与设计的桥梁的材料与施工设备

第一节 钢 材

用于桥梁工程中的钢材通常为普通碳素钢和低合金钢。

普通碳素钢分甲、乙、特三类。甲类钢(A)主要按机械性能供应；乙类钢(B)按保证化学成分供应；特类钢(C)按保证机械性能及化学成分供应。桥梁结构所用钢材一般为甲类钢，乙类钢由于没有机械性能方面的保证不能用于承重结构，特类钢则价格较高，采用不多。

按钢材含碳量的大小，碳素钢又可分为低碳钢、中碳钢和高碳钢。

低碳钢的含碳量小于0.24%，用于制造铆钉、钢筋、钢桥材料及一般钢结构。

中碳钢的含碳量为0.25%~0.60%之间，强度较高，塑性、韧性和可焊性较差，主要用于制造机械零件及节点螺栓。

高碳钢的含碳量为0.60%~1.60%之间，因硬度大，故用做切削工具、弹簧、轴承等。

按钢的不同硬度，将碳素钢分为7种钢号，从1到7，此外还有0号钢，它是不合格的等外钢。钢号越高，表示含碳量越多，越不易进行剪切、冲压和弯曲加工。目前桥梁结构上应用最广的是甲3(代号A3)钢，含碳量为0.14%~0.22%，属于低碳钢，是平炉冶炼的甲类3号镇静钢。

根据钢中磷、硫等杂质元素的含量不同，碳素钢又可分为：普通碳素钢、优质碳素钢和高级优质碳素钢。优质碳素钢和高级优质碳素钢与普通碳素钢的主要区别在于钢中所含磷、硫等杂质元素较少，两者的含量分别不大于0.040%和0.045%。

优质碳素钢的钢号用两位数表示含碳的万分数。例如45号钢表示钢中平均的含碳量为0.45%。

桥梁结构中常用的低合金钢为16锰(16Mn)和16锰桥(16Mn9)钢。16锰钢具有强度高，塑性、韧性和可焊性好，公路桥梁中主要采用这种钢材。16锰桥钢是专用于桥梁的16锰钢，它的低温抗冲击韧性和强度均比16锰钢高。

另外为了配合桥梁结构工程某些构件的特殊要求还采用一些特殊的钢种，如支座需用不小于铸钢-25(ZG25)的碳素钢，高强螺栓需用40硼(40B)钢或45号钢，螺母、垫圈用45号钢，铆钉需用铆螺2(ML₂)号钢等。

下面将介绍桥梁结构中所用到的钢筋(普通钢筋和预应力钢筋)及钢板、型钢。

一、普通钢筋

常用的钢筋按外形特征可分为光圆钢筋和变形钢筋两大类。变形钢筋又可分为螺纹钢、人字形钢筋和月牙钢筋。

我国钢材按化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两大类。碳素钢除含铁元素以外，还有少量的碳、锰、硅、硫等元素。其中含碳量越高，钢筋的强度愈高，但钢筋的塑性和可焊性就愈差。在碳素钢中加入少量合金元素就成为普通低合金钢，如 20MnSi、25MnSi。

我国国家标准 (GB1499—84) 对混凝土结构使用的热轧钢筋按强度分为五个等级，各类热轧钢筋的机械性能见表 2-1。

热轧钢筋机械性能的规定

表 2-1

品 种		牌 号	直 径 mm	屈服点 MPa	抗拉强度 MPa	伸长率 δ_5 %	冷 弯 $D =$ 弯芯直径 $d =$ 钢筋直径
外形	强度等级			不 小 于			
光圆钢筋	I	A3、AY3	8~25	235	370	25	180° $D = d$
			28~50				180° $D = 2d$
变形钢筋	II	20MnSi	8~25	335	510	16	180° $D = 3d$
		20MnNb6	28~50	315	490		180° $D = 4d$
	III	25MnSi	8~40	370	570	14	90° $D = 3d$
	IV	40Si2MnV	10~25	540	835	10	90° $D = 5d$
		45SiMnV	28~32				90° $D = 6d$
		45Si2MnTi					
5号钢	A5	10~40	280	500	19	180° $D = 3d$	

二、预应力钢筋

(一) 预应力钢筋种类

目前使用的预应力钢筋主要有钢筋、钢丝和钢绞线三大类。钢筋又分为冷拉热轧钢筋和热处理钢筋。

1. 冷拉热轧钢筋

预应力混凝土结构中采用的钢筋，一般是指经过冷拉后提高了抗拉强度的热轧低合金钢筋。根据目前国内生产情况可供选用的冷拉钢筋有：冷拉 II 级、冷拉 III 级、冷拉 IV 级钢筋和 5 号钢筋。鉴于目前生产的低合金钢的屈服强度都较低，而屈服强度与极限强度的比值（即屈强比）却较大，为充分挖掘钢材强度的潜力，钢材在使用前，在常温下，用卷扬机或千斤顶等设备将热轧钢筋进行拉伸，使其拉伸控制应力 σ_k 超过屈服强度 σ_s ，但小于抗拉极限强度 σ_b ，如图 2-1 所示，此时与冷拉应力 σ_k 相应的应变为 ω_1 ，称为冷拉率。如果将钢筋放松，则钢筋在卸荷时的应力应变曲线，将沿 ao 平行线回到 o_2 ，产生残余应变 ω_2 ，若又随即再张拉，则应力应变曲线按 o_2kcd 变化，此时 k 点成了钢筋冷拉后新屈服点，其屈服强度由冷拉前的 σ_s 提高到冷拉后的 σ_k ；如果在钢筋冷拉后不是立即张拉，而是停留一段时间后再拉伸，则其 $\sigma-\epsilon$ 曲线变成为 $o_2Hlc'd'$ 曲线，屈服强度由 σ_s 提高到 σ_H ，而不是 σ_k 。通常把冷拉后这种随时间延续而逐渐硬化的现象称为时效（或叫时效硬化），经时效后的

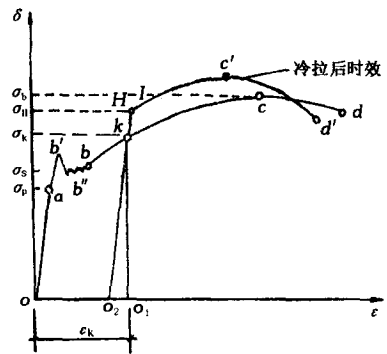


图 2-1 冷拉后的应力应变曲线

冷拉钢筋，不仅可提高抗拉强度，而且弹性模量也可以恢复到冷拉前的数值。钢筋的时效硬化速度与冷拉后的温度有关。在常温下需要 20d 左右才能完成时效，称为自然时效；若人为地将钢筋温度提高到 100℃，则 2h 内就能完成时效，称为人工时效。但是，如果将钢筋温度继续提高，则可能得到相反的效果。例如把冷拉钢筋加热到 450 时，其伸长率虽有增加，但强度有所下降；当温度达到 700 时，钢筋冷拉硬化效应全部消失，将完全恢复到冷拉前的钢筋力学性能。因此，需要焊接的钢筋，必须进行焊接，然后再进行冷拉。

钢筋经过冷拉，不仅提高了使用强度，可以节约大量钢材，而且是一种非常有效的质量检验手段，它逐根检验了钢材的使用强度和延伸性能，使不合格的钢材得以剔除。

值得注意的是，必须注意合理控制冷拉参数。由图 2-1 可以看出，合理选择冷拉应力 σ_k 是保证冷拉钢筋质量的关键，因为 σ_k 愈大，强度提高愈多，但相应塑性下降亦愈多；如果 σ_k 过小，强度提高较小，失去冷拉意义。因此，为了保证冷拉质量，国家标准（GB1499—84）对各级钢筋进行冷拉时的控制应力和冷拉伸长率均作了相应的规定，见表 2-2。

钢筋冷拉参数

表 2-2

钢筋种类	双 控		单 控
	控制应力 (MPa)	冷拉率 (%) 不大于	冷拉率 (%)
II 级钢筋	450	5.5	3.5~5.5
III 级钢筋	530	5.0	3.5~5.0
IV 级钢筋	750	4.0	2.5~4.0
5 号钢筋	450	6.0	4.0~6.0

进行冷拉操作时，若同时控制拉应力和冷拉伸长率，称为“双控”；若只控制其中一项（从施工方便出发，一般采用控制伸长率）的，则称为“单控”。单控操作简便，只要有冷拉设备，便可以方便地控制其伸长率；双控操作，除了冷拉设备外，还需测力设置，但双控对冷拉质量控制更有保证。

由于钢筋中含碳量和所加合金元素对低合金钢的焊接性能有一定的影响，对于钢筋接长较为困难。为解决这一问题，可以在钢筋端部的冷轧螺纹采用套筒接长，也可以采用精轧螺纹钢筋，在其端部用螺纹套筒进行连接接长。精轧螺纹钢筋是用热轧方法在整根钢筋表面上轧出不带纵肋的螺纹外形成型的。其机械性能见表 2-3。

在公路桥梁工程中最常用的主要是冷拉 IV 级钢筋（直径 $\phi 25$ ， $\phi 32$ 两种）与精轧螺纹钢筋（直径 $\phi 25$ ， $\phi 32$ 两种）

精轧螺纹钢筋机械性能

表 2-3

钢筋强度级别	δ_s 或 $\delta_{0.2}$ (MPa)	δ_b (MPa)	δ_s (%)	冷弯 90° (d)
75/100	≥ 750	≥ 1000	≥ 7	7
95/100	≥ 950	≥ 1200	≥ 8	8

注：1000h 松弛值均不大于 3%。

2. 热处理钢筋

热处理钢筋是由中碳低合金钢经淬火和回火的调质热处理而成。先加热至 900 左右，并保持恒温，然后淬火，以提高钢筋的抗拉强度，再经 450 左右的中温或低温回火处理，以改变其塑性性能。

成品热处理钢筋直径为 6mm~10mm，以盘圆供应，盘卷直径一般为 2m，开盘后自行伸值。这种钢筋具有强度高，弹性模量高，松弛小及成本低等特点，其机械性能见表 2-4。它可以直接应用于预应力混凝土结构中，因而在施工中免去冷拉，对头焊接等工作。

热处理钢筋机械性能

表 2-4

公称直径 (mm)	钢 号	屈服强度 $\delta_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 δ_b (MPa)	伸长率 $l_0=80\text{mm}$ (%)
6	40Si2Mn	1325	1470	6
8.2	48Si2Mn	1325	1470	6
10	45Si2Cr	1325	1470	6

3. 高强钢丝

高强钢丝（又称碳素钢丝）是用含碳量为（0.7~1.4）%的优质碳素钢盘条加热至 850℃~950℃，并经 500℃~600 铅浴淬火，然后经过酸洗冷拔而成。预应力钢丝按交货状态分冷拉和回火矫直两种。预应力钢丝经过矫直回火（350℃~400℃）处理后，可消除钢丝冷拔中产生的残余应力，提高钢丝的比例极限、屈服强度和弹性模量，并改善塑性；同时解决了钢丝的伸直问题。为了保证钢丝与混凝土粘结可靠，可将钢丝表面刻痕，这种钢丝称为刻痕钢丝。常用的预应力钢丝技术标准见表 2-5a)~c)。

消除应力钢丝的力学性能 GB/T 5223—1995)

表 2-5a)

公称直径 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	规定非比例 伸长应力 σ_p (MPa) 不小于	伸长率 ($L_0=100\text{mm}$) % 不小于	弯 曲 次 数		松 弛			
				次数/180° 不小于	弯曲半径 (mm)	初始应力相 当于公称抗 拉强度的百 分数, %	1 000h 应力损失, % 不大于		
							I 级松弛	II 级松弛	
4.00	1 470	1 250	4	3	10	60	4.5	1.0	
	1 570	1 330							
5.00	1 670	1 410		4	4	15	70	8	2.5
	1 770	1 500							
6.00	1 570	1 330		4	4	20	80	12	4.5
7.00	1 670	1 420							
8.00	1 470	1 250		4	4	25	80	12	4.5
9.00	1 570	1 330							

注

- I 级松弛即普通松弛 II 级松弛即低松弛它们分别适用所有钢丝。
- 屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 值不小于公称抗拉强度的 85%。

冷拉钢丝的尺寸及力学性能 (GB/T 5223—1995)

表 2-5b)

公称直径 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	规定非比例 伸长应力 σ_p (MPa) 不小于	伸长率 % ($L_0=100\text{mm}$) 不小于	弯 曲 次 数	
				次数/180° 不小于	弯曲半径 mm
3.00	1 470	1 100	2	4	7.5
	1 570	1 180			10
4.00	1 670	1 250	3	5	15
5.00	1 470	1 100			
	1 570	1 180			
	1 670	1 250			

注：规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ 值不小于公称抗拉强度的 75%。

刻痕钢丝的力学性能 (GB/T 5223—1995)

表 2-5c)

公称直径 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	规定非比例 伸长应力 σ_p (MPa) 不小于	伸长率 ($L_0=100\text{mm}$) % 不小于	弯 曲 次 数		松 弛		
				次数/180° 不小于	弯曲半径 (mm)	初始应力相 当于公称抗 拉强度的百 分数, %	1 000h 应力损失, % 不大于	
							I 级松弛	II 级松弛
≤ 5.00	1 470	1 250	4	3	15	70	8	2.5
	1 570	1 340						
> 5.00	1 470	1 250			20			
	1 570	1 340						

注：规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ 值不小于公称抗拉强度的 85%。

4. 钢绞线

钢绞线是由多根高强度钢丝在绞线机上以一根直径稍粗的钢丝为轴心，其余钢丝沿一个方向围绕其进行螺旋状绞合，再经低温回火处理而成的。其规格有 2 股、3 股、7 股、19 股等。常用的是 7 股钢绞线。常用的钢绞线技术标准见表 2-6。

用钢绞线作预应力钢筋有许多特点：一根钢绞线可以代替多根钢丝，锚固一根钢绞线比锚固多根钢丝简单，可简化工艺；钢绞线比钢筋和钢丝束柔软，盘弯容易，运输方便，可以减少现场的钢丝成束工序；钢绞线表面呈螺旋形，与混凝土粘结较好。由于经绞制的钢丝呈螺旋形，故普通钢绞线的弹性模量较单根钢丝为低，它的强度也比单根钢丝低，应力松弛损失大，因此国内使用高强度、低松弛钢绞线将成为主要趋势。

日本、英国等国研制了一种叫模拔钢绞线，它是在普通钢绞线成型时通过一个模子拔制，并对其进行低温回火处理而成。这种钢绞线由于每根钢丝在挤压接触时被压扁，使用钢绞线的内部空隙和外径都大大地减小，提高了钢绞线的密度，且周边与锚具接触的面积增

加，有利于锚固。

钢绞线尺寸及拉伸性能 (GB/T 5224—1995)

表 2-6

钢绞线结构	钢绞线公称直径 (mm)	强度级别 (MPa)	整根钢绞线的最大负荷 (kN)	屈服负荷 (kN)	伸长率 (%)	1000 h 松弛率, % 不大于				
			不 小 于	不 小 于		I 级松弛		II 级松弛		
						初 始 负 荷				
						70% 公称最大负荷	80% 公称最大负荷	70% 公称最大负荷	80% 公称最大负荷	
1×2	10.00	1720	67.9	57.7	3.5	8.0	12	2.5	4.5	
	12.00		97.9	83.2						
1×3	10.80		102	86.7						
	12.90		147	125						
1×7	标 准 型	9.50	1860	102						86.6
		11.10	1860	138						117
		12.70	1860	184						156
		15.20	1720	239						203
	1860		259	220						
	模 拔 型	12.70	1860	209	178					
15.20		1820	300	255						

注

- I 级松弛即普通松弛级，II 级松弛即低松弛级，它们分别适用所有钢绞线。
- 屈服负荷不小于整根钢绞线公称最大负荷的 85%。

(二) 预应力钢筋的特性

1 应力-应变曲线

预应力钢筋的应力-应变曲线是研究预应力混凝土结构性能和施工工艺的基础。预应力钢丝或钢绞线，与冷拉热轧钢筋和热处理钢筋的强度和变形在量级上是不同的，但基本力学性质相似。预应力钢丝或钢绞线的应力-应变曲线如图 2-2 所示。由图可见，预应力钢丝或钢绞线从开始加载到拉断为止，不像热轧钢筋那样具有明显的流幅，屈服点不明显。为了便于应用，在实际工程中协定取用残余应变为 0.2% 时的相应应力作为假定的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。

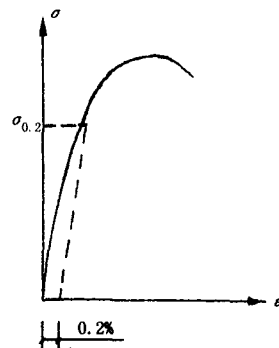


图 2-2 高强度钢丝应力-应变曲线

各类预应力钢筋设计强度和标准强度及弹性模量见表 2-7、表 2-8。

2. 应力松弛

应力松弛是指钢筋受到一定的张拉力之后，将其长度保持不变，则钢筋中的应力将会随着时间的延长而降低，这种现象称为钢筋的应力松弛，又叫徐舒。此降低值称为应力松弛损失。应力松弛与时间、钢筋种类、初始应力及温度等因素有关。

应力松弛初期发展最快，受拉后第一小时内松弛量最大，相当于 1000h 的 15%~35%。24h 内完成约 50% 以上，以后逐渐稳定。

钢筋松弛量的大小与钢筋品质有关，钢丝与钢绞线的应力松弛值比热处理钢筋大。初始张拉应力越高，其应力松弛愈甚。

此外，钢筋应力松弛还将随温度的升高而增加，这将对采用蒸汽养护的预应力构件会有所影响。

预应力筋设计强度和标准强度 (MPa)

表 2-7

预应力筋的种类		抗拉设计强度 R_y		抗压设计强度 R'_y	R'_y	
冷拉 II 级钢筋	双控	450		340	450	
	单控	420				
冷拉 III 级钢筋	双控	530		380	530	
	单控	500				
冷拉 IV 级钢筋	双控	750		400	750	
	单控	700				
冷拉 5 号级钢筋	双控	450		280	450	
	单控	400				
热处理钢筋 (V 级钢筋)		1200		400	1500	
冷拔低碳钢丝		I 组	II 组	360	I 组	II 组
	$\phi^b 3$	600	560		750	700
	$\phi^b 4$	560	520		700	650
	$\phi^b 5$	520	480		650	600
碳素钢丝	$\phi^s 2.5$	1520		400	1900	
	$\phi^s 3.0$	1440			1800	
	$\phi^s 4.0$	1360			1700	
	$\phi^s 5.0$	1280			1600	
钢绞线	$\phi^j 7.5$ ($7\phi^s 2.5$)	1440		380	1800	
	$\phi^j 9.0$ ($7\phi^s 3.0$)	1360			1700	
	$\phi^j 12.0$ ($7\phi^s 4.0$)	1280			1600	
	$\phi^j 15.0$ ($7\phi^s 5.0$)	1200			1500	

预应力钢筋弹性模量 (MPa)

表 2-8

钢筋种类	弹性模量 E_y
冷拉 II 级钢筋、冷拉 III 级钢筋、冷拉 IV 级钢筋、冷拉 5 号钢筋、热处理钢筋 (V 级钢筋)、碳素钢丝、刻痕钢丝	2.0×10^5
钢绞线	1.9×10^5
冷拔低碳钢丝	1.8×10^5

注：表中冷拉钢筋的弹性模量系指冷拉后的数值，冷拉未经时效的弹性模量取 1.8×10^5 MPa

为了减少应力松弛损失，可采取超张拉工艺和采用低松弛钢筋。

(三) 对预应力钢筋的要求

1. 强度要高

预应力混凝土结构要求钢筋强度要高，否则，就无法克服由于各种因素所造成的应力损失，从而不能有效地建立预应力。

2. 要有较好的塑性和焊接性能

为了保证结构在破坏以前有较大的变形能力，必须保证预应力钢筋有足够的塑性性能；良好的焊接性能则是保证钢筋加工质量的重要条件。

3. 具有良好的粘结性能