

预应力混凝土农房构件

冯靖宇 黎万策 徐戊己

卢盛澄 张玉道编

四川科学技术出版社

1985年·成都

目 录

前 言

第一章 预应力混凝土发展简况及基本概念.....	(1)
第一节 预应力混凝土的发展简况.....	(1)
第二节 预应力混凝土的基本概念.....	(2)
第二章 预应力混凝土的组成材料.....	(11)
第一节 混凝土.....	(11)
第二节 钢筋.....	(29)
附录 四川地区混凝土配合比设计计算公式.....	(39)
第三章 预应力混凝土的几项主要特性.....	(41)
第一节 张拉控制应力及控制力.....	(41)
第二节 预应力损失及降低损失值的措施.....	(42)
第三节 锚固长度和传递长度.....	(45)
第四节 构件的挠度、刚度和反拱.....	(47)
第五节 设计安全系数.....	(48)
第六节 最小配筋率.....	(49)
第四章 预应力混凝土的生产设备.....	(50)
第一节 台座.....	(50)
第二节 张拉机具.....	(56)
第五章 预应力混凝土构件生产工艺.....	(66)
第一节 施加预应力的方法.....	(66)
第二节 长线法生产工艺.....	(68)

第三节	混凝土成型的其它工艺·····	(77)
第四节	高强钢丝的使用与压波工艺·····	(84)
第六章	常用预应力构件及新型农房构件·····	(88)
第一节	常用构件及其钢丝代换·····	(88)
第二节	新型农房构件·····	(92)
第三节	农用混凝土电杆·····	(108)
第七章	预制构件质量检验及常见事故防止办法·····	(114)
第一节	原材料及外观质量检验·····	(114)
第二节	结构性能检验·····	(116)
第三节	常见质量事故及防止办法·····	(132)

第一章 预应力混凝土发展 简况及基本概念

第一节 预应力混凝土的发展简况

我国从五十年代中期已开始将预应力混凝土构件应用于房屋建筑。特别是采用冷拔低碳钢丝制作预应力混凝土中小型构件，对于节约钢材、木材起到了很好的作用，也很有实际意义。

近年来，我国在研究用预应力混凝土小构件及小砌块建造农房建筑时，先后成功地研制出组合楼板、T型板、叠合板、檩条、三角小屋架、组合门窗柜等预应力或钢筋混凝土小构件，并分别进行了楼房及平房的试点建筑。新的农房建筑大方、明亮，具有较好的防火、防水能力，改善了农民的居住条件，受到农民的欢迎，为农村住房建设开创了一条新路。

各地在推广中小型预应力混凝土构件的同时，还积极研究新机具、新工艺及新构件，并在这方面积累了不少经验。例如，四川生产的预应力张拉车，几年来已制造了一千多台，供省内外的预应力构件生产单位使用，还制造了100余台混凝土空心板挤压机，编制了各种跨度的预应力混凝土空心板标准图，研究并推广了胶囊抽芯的预应力混凝土电杆、预应力薄板构成的叠合板、高强钢丝的压波工艺，简易拉力机和预应力台面台座等等。

各地的预应力混凝土中小型构件的质量基本上是好的，但也出现过一些质量事故，今后应继续抓好技术培训，狠抓构件质

量，使预应力混凝土中小型构件在城乡住宅建设中发挥更大更好的作用。

国外预应力混凝土的发展各有特点。美国、苏联和东欧各国以房屋建筑为主，西欧则以桥梁和特种结构为主。生产工艺上，有些国家以先张法为主，如美国采用先张法生产的预制件约占80%，法国和西德约占60%，有些则以后张法为主，如日本采用后张法生产的占60~70%。

国外的预应力混凝土主要用于大跨、高层建筑上。其预应力混凝土构件多用高流动性混凝土，坍落度达12~15厘米，但混凝土强度仍很高，预制构件一般为500~700号，现浇混凝土一般为400~600号。预应力钢材多为热轧低合金钢筋、热处理钢筋、高强钢丝和钢绞线等几种。

和国外的先进技术水平相比，在预应力混凝土的应用范围、规模、工艺、材料和机具设备上，我国都还存在一定的差距。随着我国现代化建设工程的发展，预应力混凝土技术同样会获得较大的发展。

第二节 预应力混凝土的基本概念

一、预应力的基本概念

什么是预应力呢？我们在生产和生活实践中，早就会用这个概念了。下面先举两个常见的预加应力的例子来说明它。例如想同时提起平放着的几块砖，可先将双手放在两端，用力夹紧，就

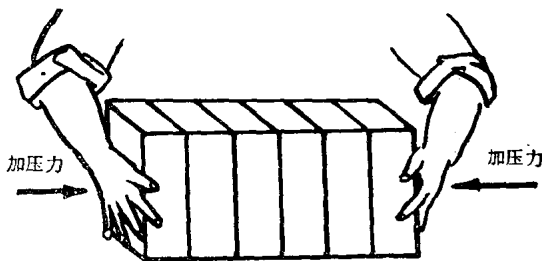
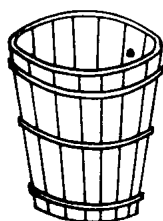


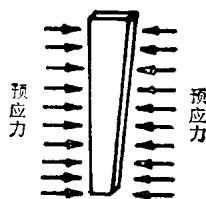
图1—1 预加压力提起一堆砖

能把这几块砖同时提起来（见图1—1）。什么道理呢？因为双手用力夹紧后，使砖和砖之间产生预加压力，预压力引起摩擦力，摩擦力使这几块砖提起来以后不致掉下来

例二、由图1—2知道我国常见的木质水桶是用多块木料围拼成的，外面套上桶箍，用桶箍把它们箍紧成一体，装水后才不会漏。显然，用桶箍箍紧的作用，也是使木块之间产生预压力，即在桶箍边则产生预压力，当木桶装水后，水的压力使木块之间产生拉力。由于桶箍作用产生的预压力比水压作用产生的拉



(a) 木桶



(b) 木板受预压

图1—2 木桶加预应力

力大，所以木桶不会产生缝隙而漏水。

预应力混凝土水池或水塔就是直接利用木质水桶的原理建成的，它是先浇灌圆形混凝土池壁，待混凝土达到一定强度后，在外面再张拉环形钢筋（因为混凝土的抗拉能力很低），使池壁箍紧，即对池壁混凝土施加预压力，这样，水池装水受压后，混凝土不会产生裂缝而造成池壁漏水。

以上的例子，说明用双手或桶箍或其它方法来预先施加压力，可使砖与砖、木块与木块之间或混凝土内产生预压力，以承受荷载引起的拉力。这种在构件或制品承受荷载之前，预先施以应力的方法就叫做“预应力”。

二、预应力混凝土结构

预应力混凝土结构就是在承受荷载前，用钢筋预先给混凝土

加一个压力。为什么要这样做呢？这是由混凝土的特性所决定的。

混凝土象石头一样，属于脆性材料，它受得住压，经不住拉，轴心的抗压强度比抗拉强度高10倍左右。若用素混凝土做一根梁，当梁上放置重物后，会向下弯曲，从图1—3可以看出，此时梁上部产生压力，叫做受压区，下部产生拉力，叫做受拉区。

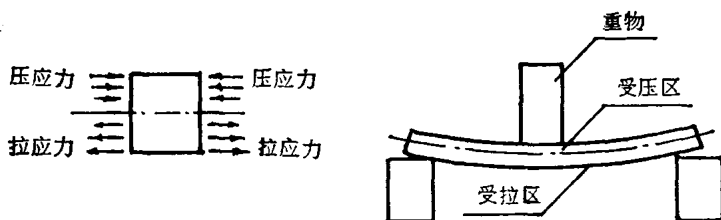


图 1—3 梁的受力图

素混凝土梁上承受重物后，下部混凝土受拉，由于混凝土的抗拉能力差，当拉应力超过混凝土的抗拉强度时，混凝土就开裂，梁就会立即

折断。为了解决混凝土抗拉强度低的矛盾，可在梁的底部（受拉区）放上几根钢筋，承受相同的荷载时，下部混凝土仍会开裂，

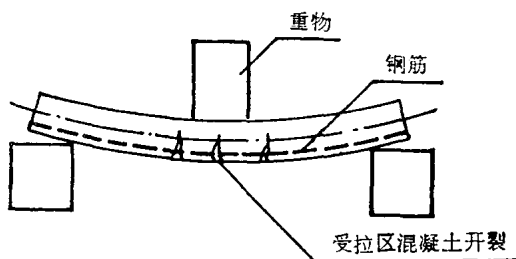


图 1—4 钢筋混凝土梁的受力

但由于钢筋被混凝土握裹住，钢筋可继续承担拉力，这样梁就不会产生折断破坏现象。这种在混凝土内配有钢筋的梁，简称钢筋混凝土梁（见图1—4），或叫做普通钢筋混凝土梁。

钢筋混凝土梁的特点是分别利用混凝土的抗压强度特性和钢

筋的抗拉强度特性，发挥不同材料各自的性能。但钢筋混凝土梁受拉区混凝土开裂时，钢筋的拉应力还很低，仅为300公斤/厘米²左右。我们知道Ⅰ级钢的抗拉强度是2400公斤/厘米²，实际使用时钢筋的允许拉应力可达1700公斤/厘米²，远远大于300公斤/厘米²，若要充分利用钢筋的拉应力（1700公斤/厘米²），钢筋混凝土梁会出现较宽的裂缝。所以，钢筋混凝土梁虽然比素混凝土梁有较高的承载力，但仍有以下缺点：

（1）在标准荷载作用下，如果裂缝宽度超过一定限度（一般为0.3毫米），钢筋会受空气和湿度的影响而产生锈蚀，这样就会缩短梁的使用寿命。

（2）钢筋受的拉力越大，混凝土的裂缝就越宽。要想限制裂缝的宽度，钢筋的应力就不许用得过大，也就是说，钢筋混凝土梁只能用强度较低的钢筋，这样钢筋用量势必加大。

（3）普通钢筋混凝土梁的刚度较差，因为构件多有裂缝，且随使用时间延长而裂缝宽度增大和裂缝条数增多，使构件的刚度降低，而挠度增大。挠度超过一定限度，就会影响正常使用。例如楼板的挠度过大，板和板的接缝就会错开。要使构件的挠度满足使用要求，就需加大构件的断面尺寸，也就增加了构件重量、材料用量和费用。

预应力钢筋混凝土（以下简称预应力混凝土），可以克服普通钢筋混凝土的上述缺点。预应力混凝土就是预先给混凝土施加一定的压应力，这个预压应力可抵销外荷产生的拉应力。通过合理设计，可以使混凝土不开裂或裂缝很小，这就是给混凝土加预应力的主要作用。

三、怎样给混凝土加预应力

首先要弄清楚“力”、“应力”以及“应变”的概念。例如有一块空心板，上面承受500公斤荷重，这500公斤就是一个“力”，是作用在空心板上的压力。

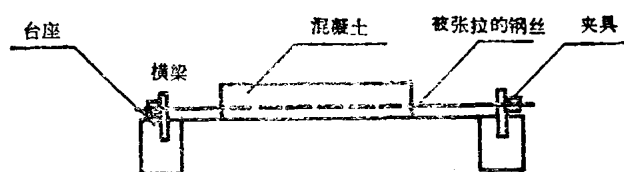
又如一根 $\phi 4$ 毫米的钢丝，承受了500公斤的拉力，这个拉力也叫做“力”。

力可以是压力、拉力或其它形式出现。

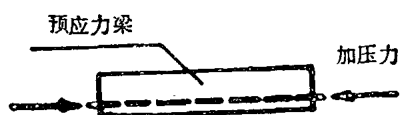
“应力”表示构件或材料受外力作用后，为截面单位面积上的内力，即外力被承受该力的面积去除。例如上面谈到的 $\phi 4$ 钢丝断面面积为0.126平方厘米，500公斤被0.126平方厘米去除，得到4000斤/厘米²，这就是钢丝所承受的拉应力。

钢丝受到拉力作用后会产生变形，其单位长度的变形叫做“应变”。例如，1根100米长的钢丝，拉应力为4900公斤/厘米²，其总拉长变形为270毫米，则其受拉应变 = $\frac{270}{100000} = 0.27\%$ 。

下面谈谈怎样给混凝土施加预应力。大家知道，一根橡皮筋受拉力作用就会伸长，放松又缩回到原来的长度。其实钢丝也是一样，只是变形较小，肉眼不易察觉。如上例，100米长的钢丝，在台座上张拉，张拉应力取4900公斤/厘米²，拉应变为0.27%，钢丝拉长值约为270毫米。假设钢丝没有受到任何约束而被放松，则其拉长值也能全部缩回至零。如拉长后浇灌混凝土，且等待浇灌的混凝土达到一定的强度时再放松钢丝。这时钢丝由于弹性作用要恢复原来的长度，会立即产生弹性回缩，但由于钢丝已被混凝土粘结住，不可能全部回缩，只能回缩一部分，则钢丝内部仍保留一定的拉力，钢丝回缩的力便传给了混凝土，致使在混凝土内部建立一定的压力，这就是所谓的预应力。综上所述，预应力混凝土的制做就可以概括为：在台座上张拉钢丝，再浇灌混凝土，待混凝土达到规定的强度时放松张拉好的钢丝。由于钢丝放松后产生回缩，同时，混凝土紧紧地裹住了钢丝，这样钢丝回缩就能给混凝土施加一定的预压应力而形成预应力混凝土构件。这种预加应力的方法叫做先张法。先张法就是先张拉钢丝而后浇灌混凝土的意思，如图1--6所示。常见的中小型预应力混凝土和农房构件都是采用这种方法制作的，因此，本书将着重介绍先张法。



(a) 台座上先张拉钢丝后浇灌混凝土



(b) 剪断钢丝后产生预压力

图 1—6 预应力混凝土构件的制作

另外，还有一种方法叫后张法，这是先制作混凝土构件，在构件中间预留有孔洞，待混凝土达到规定的强度时，从构件的预留孔洞中穿入钢丝或钢筋后再张拉，然后将两端锚固，这样也可给混凝土施加预压力，最后向孔道内压灌水泥浆或砂浆。这种方法多用于大型预应力混凝土构件。

四、预应力混凝土和非预应力混凝土的比较

混凝土构件

或结构分为三类：①素混凝土，②钢筋混凝土，也称为非预应力混凝土，③预应力混凝土。下面从图1—6所示的

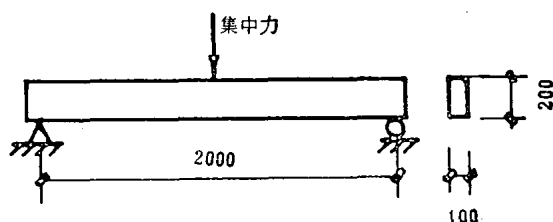


图 1—6 素混凝土梁 (单位：毫米)

例子，看看预应力混凝土构件的优越性。设有一根 2 米长的梁，其宽度和高度各为 100 毫米和 200 毫米，混凝土的设计标号为 300 号，跨中作用一个集中力。

为了便于讨论，对三类混凝土构件分别进行研究：

第一种情况，梁为素混凝土制作的。受力后，下部混凝土的拉应力达到 17.5 公斤/厘米^2 时，梁的混凝土就可能开裂，一旦开裂，梁会立即断裂而破坏。此时反算得到的集中力只有 400 公斤，就是说这根素混凝土梁跨中受到 400 公斤的集中力作用时就可能断裂破坏。

第二种情况，在混凝土梁的下部放置一根 $\phi 16$ 毫米的钢筋（断面积为 2 平方厘米），就成为钢筋混凝土梁。假定钢筋为 I 级钢筋，可查得其设计强度为 2400 公斤/厘米^2 ，计算表明，当梁跨中的集中力加到 480 公斤时，下部混凝土开始裂缝，由于梁的下部有钢筋承受拉力，梁也不会在裂缝后而立即破坏，即梁开裂后仍可继续增加集中力，当集中力达到 1630 公斤时，钢筋才达到设计强度，此时梁的挠度变化会很快，构成梁的破坏。

第三种情况，在混凝土梁的下部配置断面为 2 平方厘米的预加应力钢丝，就成为预应力混凝土梁。假定钢丝为冷拔低碳钢丝，查得其设计强度为 5600 公斤/厘米^2 。梁承受荷载后，随着梁跨中的集中力的不断增加，下部混凝土预压力则不断减小，减小到零后，再转变为拉应力，当混凝土的拉应力达到 21 公斤/厘米^2 时，混凝土才可能开裂。此时反算梁中的集中力高达 2000 公斤。继续加大集中力，钢丝达到设计强度时，梁随之破坏，此时计算的集中力约为 3360 公斤。

上述结果比较列于表 1—1。

从表中的数字比较看出，混凝土梁配置钢筋后，梁的破坏力得到显著提高，但抵抗开裂的能力提高有限。制成预应力混凝土梁后，其抵抗开裂和破坏的能力都大大提高了，从这个例子中可明显地看到预应力混凝土构件的优越性。

表 1—1 三种混凝土梁的比较

	素混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土
配 筋	无	2 cm ² I 级钢	2 cm ² 冷拔钢丝
开裂时的计算集中力 (公斤)	400	480	2000
破坏时的计算集中力 (公斤)	400	1630	3360

如果设计承受同样荷载的钢筋混凝土梁和预应力混凝土梁，则预应力梁不仅断面小，钢筋用量省，而且梁的刚度、抗裂性都比较好。

下面再举两块空心板的例子，一块是钢筋混凝土板，另一块是预应力混凝土板。两种空心板的试压结果比较见表 1—2。

表 1—2 两种空心板经济指标及试压结果比较表

板的类型	尺 寸 (米)	每平方米 混凝土用 量(%)	每平方米 用钢量 (%)	抗裂安全 系 数	强度安全 系 数
钢 筋 混凝土板	0.50×0.15×3.37	100	100	1.2	>1.5
冷拔丝 预应力板	0.5×0.12×3.37	80	40	1.9	>1.9

可见同样跨度的混凝土空心板，抗裂性差别很大。非预应力混凝土板的抗裂安全系数为1.2，预应力混凝土板则达1.9。而且预应力板用钢量可节省60%，混凝土节省20%。可以看出预应力混凝土构件的经济效果是十分显著的。

五、预应力混凝土构件的优缺点

预应力混凝土构件的优点主要是。

(1) 提高了构件的抗裂度和刚度 钢筋混凝土梁或板在标准荷载作用下一般都要产生裂缝，而预应力混凝土梁或板可以做

到不开裂,也就是说预应力混凝土构件的抗裂性得到了提高.由于预应力构件不开裂,再加上剪断钢丝时还可使梁向上起拱,这样,预应力构件在外载作用下的实际挠度就较小,构件的挠度小,它的刚度就大,也就是说预应力构件的刚度比钢筋混凝土构件的刚度更大了。

(2) 提高了构件的耐久性 由于预应力混凝土构件在使用阶段不开裂,钢丝就不易生锈,可以延长构件的使用年限。

(3) 节约钢材和混凝土,减轻自重 钢筋混凝土只允许使用低强度的钢材,预应力混凝土构件则可使用高强度的钢材,这就能节约钢材。如以预应力混凝土构件用的低碳冷拔钢丝和钢筋混凝土构件用的Ⅰ级和Ⅱ级钢相比,则可节约钢材60~40%。

由于预应力构件刚度好,所以构件截面积尺寸可适当减小。和钢筋混凝土相比,可节约混凝土20%左右。由于构件截面积小,自重则可减轻,相应地可节省一定的运输和吊装工程量。

(4) 降低工程造价

按每平方米构件的造价计算,预应力混凝土构件与钢筋混凝土构件相比可降低造价10~20%。

预应力混凝土也有自身的一些问题,主要是它需增加一些设备,如张拉用的台座、张拉机、夹具、卷扬机等设备。另外,对材料的质量、操作和技术方面的要求都比钢筋混凝土严格等等。但是,采用冷拔钢丝的预应力混凝土中小型构件的生产设备是比较容易解决的,操作技术也不难掌握。因此,冷拔丝预应力混凝土中小型构件和农房构件在我国推广量是最大的,一般的乡镇混凝土预制厂也都愿意推广采用。

第二章 预应力混凝土的组成材料

预应力混凝土结构是由两种不同性能的材料——预应力钢筋和混凝土所组成。要了解 and 掌握预应力混凝土结构的特性以及相应的生产特点，首先应很好地了解预应力混凝土的组成材料。

第一节 混 凝 土

一、混凝土的组成材料

混凝土是由胶凝材料水泥和粗细骨料石子、砂子和水按一定比例拌和后硬化而成的一种复合材料。下面分别介绍组成混凝土的几种原材料。

1. 水泥：水泥是混凝土中的胶凝材料。混凝土常用水泥有五种，即硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥。

硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的早期强度高，在低温环境下（10℃以下）混凝土硬化速度比其它水泥快，最适合制做预应力混凝土构件。矿渣硅酸盐水泥亦可制做预应力混凝土，但早期强度较低，凝结较慢，特别是低温条件下凝结更慢，不可过早施加预应力。另外，由于它抗冻性能差，故不宜在冬季使用。另两种水泥早期强度低，收缩大，不得用来制做预应力混凝土构件。

从1980年起，国家开始实行新的水泥标号鉴定方法，即水泥软练标号，代替过去的硬练标号。水泥软练分为225、275、325、425、525、625六个标号。一般预应力结构的混凝土标号均要求在300号以上，要求水泥标号不应低于325号，尽量采用425号以上的

水泥。

用于预应力结构的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥及矿渣硅酸盐水泥应符合国家标准 (GB175—77) 及 (GB 1344—77) 中的规定。水泥进场时, 必须附有质量证明文件, 并按此对其品种、标号、包装出厂日期等进行检查验收, 不应使用情况不明或过期、受潮结块的水泥。对水泥质量有怀疑时, 使用前应按有关技术标准进行复查检验, 并按检验结果使用。对于生产质量不够稳定的厂所制造的水泥, 在选购时要特别慎重。

2. 石子: 石子是混凝土的粗骨料, 其粒径大于 5 毫米。石子分为卵石和碎石两类。卵石是岩石在江河水流冲刷下自然形成的, 表面光滑; 碎石是选用坚硬、耐磨的天然岩石经开采破碎而成。石子的质量应符合部颁标准《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》(JGJ 53—79) 的规定。

3. 砂子: 砂子是混凝土的细骨料, 其粒径小于 5 毫米, 主要作用是填充石子间的空隙, 与石子一起构成骨架。根据产地不同, 砂子可分为河砂、海砂、山砂, 在生产中常采用的是河砂。砂子按其细度模数 M_x 可分为粗砂 (M_x 为 3.7~3.1)、中砂 (M_x 为 3.0~2.3)、细砂 (M_x 为 2.2~1.6) 和特细砂 (M_x 为 1.5~0.7)。砂子的质量应符合部颁标准《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》(JGJ 52—79) 的规定。

4. 水: 在混凝土中, 水的主要作用是与水水泥发生水化作用形成胶结浆, 将砂、石胶凝成一体。

混凝土的拌合用水应遵守国家标准《钢筋混凝土工程施工及验收规范》(GBJ204—83) 的规定。一般应是能饮用的自来水或清洁的天然水, 且要求水中不含有影响水泥正常凝结、硬化的有害物质, 如酸、碱、油脂及糖类等, 工业废水、海水、污水、pH 值小于 4 的酸性水和 pH 值大于 9 的碱性水, 以及硫酸盐含量 (按 SO_4 计) 超过水重 1 % 的水, 也不得使用。

二、混凝土配合比

混凝土配合比的设计, 主要根据构筑物(构件)设计要求的混凝土标号、施工条件、原材料的性能等因素, 按一定公式进行试算, 经过试验室试配, 再作适当调整后, 找出经济合理而又满足设计和施工要求的配合比。

混凝土配合比试算的步骤是:

- (1) 计算出所要求的试配强度 R_h ;
- (2) 选取每立方米混凝土的用水量 W_0 ;
- (3) 按试配强度 R_h 计算出所要求的水灰比值 W/C ;
- (4) 根据用水量 W_0 及水灰比 W/C 算出每立方米混凝土的水泥用量 C_0 ;
- (5) 选取合理的砂率值 S_p ;
- (6) 计算粗、细骨料的用量, 定出供试配用的配合比。

1. 计算混凝土的试配强度 R_h : 考虑到实际施工条件与试验室试配条件存在的差异, 根据《钢筋混凝土工程施工及验收规范》(GBJ204—83)第四章混凝土工程中的第二节混凝土配合比的第4.2.2条的公式来计算混凝土的试配强度 R_h 。

2. 选择用水量 W_0 : 每立方米混凝土的用水量, 应根据施工要求的和易性(坍落度或工作度)及使用的骨料情况(种类和粒径), 按各地经验确定。

1982年开始试行的部颁标准《普通混凝土配合比设计技术规定》(JGJ 55—81), 提出了混凝土用水量选用表(见表2—1)。

3. 计算水灰比值 W/C : 混凝土的水灰比是每立方米混凝土中的用水量 and 水泥用量之比。可按(JGJ 55—81)中提出的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥及矿渣硅酸盐水泥, 用中砂配制时混凝土强度的计算公式, 导出其水灰比的计算公式如下:

$$\text{用卵石时: } \frac{W}{C} = \frac{0.48R_c}{R_h + 0.293R_c} \quad (2-1)$$

表 2—1 混凝土用水量 (公斤/米³) 的选用表

所需坍落度 (厘米)	卵石最大粒径 (厘米)			碎石最大粒径 (厘米)		
	1.0	2.0	4.0	1.5	2.0	4.0
1.0~3.0	190	170	160	205	185	170
3.0~5.0	200	180	170	215	195	180
5.0~7.0	210	190	180	225	205	190
7.0~9.0	215	195	185	235	215	200

注: (1) 本表用水量系采用中砂时的平均取值, 如采用细砂, 则每立方米混凝土可增加用水量 5~10 公斤, 采用粗砂则可减少 5~10 公斤; (2) 掺用各种外加剂或掺合料的, 可相应增减用水量; (3) 混凝土的坍落度小于 1.0 厘米时, 用水量按各地现有经验或经试验取用; (4) 本表不适用于水灰比小于 0.4 或大于 0.8 的混凝土。

$$\text{用碎石时: } \frac{W}{C} = \frac{0.46R_c}{R_b + 0.239R_c} \quad (2-2)$$

式中: W/C ——混凝土所要求的水灰比值;

R_b ——混凝土试配强度 (公斤/厘米²);

R_c ——水泥的实际抗压强度 (公斤/厘米²)。

在无法取得水泥实际强度数值时, 可用式 (2-3) 计算。

$$R_c = K_c R_c^b \quad (2-3)$$

式中: R_c^b ——水泥标号数;

K_c ——水泥的标号富余系数。

水泥的标号富余系数可按各地区实际统计资料定出, 在无统计资料时可取 $K_c = 1.13$ 试算。若取 $K_c = 1.13$ 代入式 (2-3), 则 $R_c = 1.13 R_c^b$; 将此式代入式 (2-1) 式和 (2-2), 则得:

$$\text{用卵石时: } \frac{W}{C} = \frac{0.54 R_c^b}{R_b + 0.331 R_c^b} \quad (2-4)$$

$$\text{用碎石时: } \frac{W}{C} = \frac{0.52 R_c^b}{R_b + 0.27 R_c^b} \quad (2-5)$$