

# 鋼筋混凝土結構講義

同 济 大 学

建筑工程系圬工教研組編

1961 年 2 月

# 緒 論

## § 1 鋼筋混凝土的一般概念、优缺点、應用範圍

鋼筋混凝土是由鋼筋和混凝土兩種材料所組成的。混凝土構件內放置鋼筋的主要目的是加強構件受拉區域的抗拉能力，因為混凝土是一種人工石料，它的抗压能力很強，但是抗拉能力很弱。當鋼筋混凝土梁（圖 1）承受荷載時，中和軸以上的壓应力由混凝土負擔，中和軸以下，因為混凝土抗拉能力很弱而迅速開裂，拉应力乃由鋼筋負擔。这样就充分利用了混凝土的抗压能力和鋼筋的抗拉能力；和鋼梁相比，用少量的鋼材即可獲得承載能力相同的梁。

鋼筋和混凝土這兩種不同性質的材料所以能够共同合作，是因為混凝土在結硬時，和鋼筋很堅強的粘結，而成為整體的構件。當構件承受荷載而工作時，鋼筋和相鄰的混凝土變形相同，兩者不致有相對的滑動；鋼筋和混凝土有幾乎相同的溫度膨脹係數（前者是 0.000012，後者是 0.000010 至 0.000014），因而溫度的變化也不致破壞鋼筋混凝土構件的整體性，並且混凝土包住鋼筋後，鋼筋有了很好的保護層而不致銹蝕。

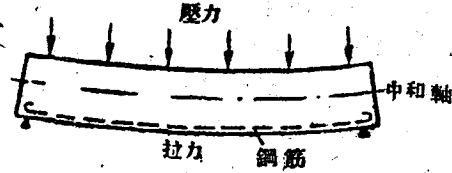


圖 1

鋼筋混凝土除了能充分利用鋼和混凝土兩種材料的性能外，尚有許多優點。其主要者如下：

**就地取材。**鋼筋混凝土構件除了鋼筋和水泥以外，組成構件的絕大部分材料是就地取材的黃砂和石子，因而對於構件的造價和材料的運輸都提供了有利條件。

**耐火性。**鋼筋混凝土結構是耐火的結構，因為鋼筋包在混凝土之內，有混凝土作為保護層，不致因為燃燒而很快地達到鋼的危險溫度。

**耐久性。**根據實際的觀察，建造很久的鋼筋混凝土構件中的鋼筋，仍能保持不銹，並且混凝土本身的強度，反而隨時間而有所增加，所以鋼筋混凝土的耐久性是很多的。暴露在大氣變化中的鋼筋混凝土室外結構，或者是遭受侵蝕性氣體或者是浸在海水中的結構，如能選擇適當的水泥和骨料，經過了妥善的設計，它的耐久性也是很多的。

**可模性。**鋼筋混凝土可以澆成任何形狀和任何尺寸的構件，複雜者如建築的裝飾，巨大者如整座的水壩等。

**抗震性。**鋼筋混凝土結構因為有整體性，故有很好的抗震性能。在地震區域建造高聳的建築物，如塔、煙囪等，採用鋼筋混凝土是比較適宜的。

**節約鋼材。**鋼筋混凝土在相當大的範圍內代替了鋼結構，例如在工業廠房中的吊車梁、柱、以及屋架等，均可用鋼筋混凝土代替鋼結構，非但降低了造價，並且節約了寶貴的材料，使鋼材均能用於更重要的工業方面。

此外，鋼筋混凝土結構的保養和修理費用很少，可以說幾乎不需要。

鋼筋混凝土同時也存在着若干缺點，但是這些缺點有可能加以克服或加以改善。

本身自重重大。設計鋼筋混凝土結構時，最大的困難，往往是構件本身的自重比較大，在受彎構件中更是顯著。在同樣的有效荷載（活重）和同樣跨度的情況下，鋼筋混凝土受彎構件的自重往往比鋼結構受彎構件大得多。跨度越大，則鋼筋混凝土受彎構件的自重和有效荷載的比例愈大。改善的方法，在跨度較大和荷載較大時儘可能採用預應力混凝土構件，改變構件的應力情況，促成高強度材料的利用，從而使構件的截面減小。此外，儘可能用形式比較複雜的裝配式構件，如空心板、薄腹T形梁等，以及儘可能用空間薄壁結構。也可以考慮用輕骨料製成但仍保持適當強度的輕質混凝土。

費工多，費木料多，和必須在模板內養護相當時間。整體澆制的鋼筋混凝土存在着這些缺點；但也有適當地加以改善的可能；而目前裝配式鋼筋混凝土的應用正在日漸增進中，裝配式鋼筋混凝土可以消除這些缺點。在整體式結構中，例如在煙囪或薄殼施工過程中，正在應用移動的模板以減少模板的木料損耗。

施工的季节性。在低溫的情況下，混凝土不易施工，因此，在蘇聯和我們的北方地區均存在着混凝土冬季施工的問題。蘇聯在這方面的研究，有很大的成就；除了盡量應用裝配式構件以外，基本上已解決了保溫的問題。在我國中南地區，又存在着雨季施工的問題；但採用了雨篷等措施，也可以解決雨季施工的困難。

除了上述的缺點以外，鋼筋混凝土隔熱和隔聲的性能較差，以及鋼筋混凝土結構的加固或拆修較困難；但是這些缺點也都可以通過適當的措施來改進。

鋼筋混凝土的應用範圍非常廣泛，幾乎任何土建工程，都可能用到它。在工業廠房中，廣泛地採用鋼筋混凝土的基礎、柱、吊車梁、屋架、屋面板等等；和工業建築有關的特种結構，如高煙囪、水池、水塔等等也大都用鋼筋混凝土來建造。鋼筋混凝土也用來建造高層或防火要求較高的民用建築，以及一般民用建築中的公共過道和樓梯等。特殊的民用建築，如運動場、大跨度的會堂和劇院等，也可以用鋼筋混凝土來建造。

在城市建築中，鋼筋混凝土應用於海港、船塢、防潮堤、柱、城市內的橋梁、飛機場、道路、電杆、排水管、輸水管、以及電視塔等等。

在交通運輸系統中，鋼筋混凝土應用於橋梁、涵洞、隧道、擋土牆、軌枕等等。

在水工建築中，鋼筋混凝土是很適當的材料，可應用於水壩、水電站、水閘等等。

在軍事工程中，廣泛地應用於各種防禦工事、防空地下室以及防放射性結構物等等。

由於鋼筋混凝土用途的廣泛，不可能詳細敘述，值得提出來的，就是由於技術方面的革新，如預應力等，以及材料、工藝和施工方面的改進，鋼筋混凝土應用的範圍，正不斷地在擴大中。

## §2 鋼筋混凝土發展簡史

鋼筋混凝土雖發展為二十世紀應用最廣泛的建築材料之一，但是它的歷史却是很短的。在十九世紀中葉，初步創造了在鋼筋混凝土受彎構件中配置鋼筋的方法，雖然在形式上也和現代的鋼筋混凝土構件相似，但是那時候水泥和混凝土的質量都很低，並且對於鋼筋和混凝土這兩種混合料的計算方法尚不了解。這一時期鋼筋混凝土的發展是很慢的。直到十九世紀和二十世紀初，鋼筋混凝土乃開始作飛躍的發展。此時各國已經有由鋼筋混凝土所建成的

若干主要的結構物，如碼頭、桥梁、防水堤、房屋等等。更主要的是試驗工作的开展、理論的研究、計算方法的制訂，以及鋼筋和混凝土材料本身的改进。一般認為鋼筋混凝土的历史，应从該时算起，所以鋼筋混凝土的历史到現在尚不过半个世紀多一些的时间；但是历史虽短，而它应用的范围已非常广泛；这是一門年青的科学，存在很大的发展潛力。

試驗研究工作对于鋼筋混凝土結構的发展有特別重要的意义。鋼筋混凝土构件的应力应变情况非常复杂，一切不以試驗为根据的純理論性的計算方法，往往和实际情况有很大的距离。鋼筋混凝土的发展是和試驗研究的結果分不开的。十九世紀末和二十世紀初，各国都从試驗中摸索出自己的一套鋼筋混凝土的规范——俄国在1908年有了第一次的鋼筋混凝土规范。此后的发展在各国間是不很平衡的。苏联自从1917年十月革命以后，各方面都开始飞跃地发展，鋼筋混凝土的試驗研究工作也不例外，1927年起即由中央工业建筑科学院作为試驗研究的中心，做了很多有价值的工作。到現在，在鋼筋混凝土的試驗研究工作方面，以及材料的研究和施工的技术方面，苏联都达到了世界上最高的水平。反映在规范制訂方面已可見一般。苏联自1921年至1934年，规范改了四次。1938年，采用了按破坏阶段設計的规范。1955年，采用了按极限状态設計的规范。而目前最大多数資本主义国家的规范，尚停留在古老的按容許应力設計的阶段。

鋼筋混凝土的发展又反映在材料和施工方法的改进和新技术的应用方面。十九世紀中葉，鋼筋混凝土也曾被人称为“鉄筋混凝土”，可見鋼筋的質量，一定很差。目前鋼筋的質量，大大地提高。用在普通鋼筋混凝土內的鋼筋，因为避免裂縫过大，其流限不宜过高，而在預应力混凝土內鋼筋，其强度可充分利用，故强度最高的鋼絲，其破坏强度高达 $20,000 \text{ kg/cm}^2$ 以上。在水泥方面，从單純的矽酸盐水泥发展成为多种多样的水泥，尽量利用工业废料来制造水泥，例如鋼鉄工业的爐渣、人工炼油工业的頁岩等等；水泥标号也分为多种；而在混凝土强度要求不高的工程中，規定必須利用低标号水泥，避免浪費。混凝土方面也配合各种不同的需要，有不同的种类，至于在混凝土强度方面，常用者是150到200号。对于預应力混凝土有时用到500号以上，而在技术上做到1000以上的混凝土已无問題。

由于对鋼筋混凝土試驗研究的要求愈来愈高，因此过去一般所习用的机械的試驗仪表，往往不能滿足需要；利用电子学、超声波等原理的新式仪器，已在日趋普遍中。

装配式結構是鋼筋混凝土的一个发展方向。苏联尼、謝、赫魯晓夫同志在1954年12月7日的报告中指出“采用装配式結構使我們更可能節約資金，節約建筑材料和提高产量……”。苏联政府并在那时起在三年内拟新建402个工厂和200露天預制場来生产装配式鋼筋混凝土构件，使三年内装配式鋼筋混凝土构件的产量增加四倍。1958年生产装配式鋼筋混凝土 $1,700 \text{ 万 m}^3$ ，超过1953年生产量将达7倍。1965年預定增加的产量，比1958年大約增加1.5倍。我国的发展，虽步骤有所不同，但方向是一致的。

預应力混凝土在跨度和載重方面大大地超越了普通的鋼筋混凝土，在某些范围内代替了鋼結構，因而節約了鋼材和造价。这一个技术革新的产物正在全世界范围内发展着，社会主义国家非常加以重視。我国也正在飞跃地发展着。

总的說来，半世紀多以来，鋼筋混凝土的发展是很慢的，并且今后发展的速度将更慢。必須指出，在鋼筋混凝土发展这个問題上，也可以体现出社会主义制度的优越性。在資本主义国家中，从鋼筋混凝土初創时期直至最近发展預应力混凝土，即使有些成就，如某些預应

力的施工方法和工具等，也不过成为商人賺錢的方法，並沒有推广，有益于全体人民。而在社会主义国家，集中各协作单位的人力、物力、发揚共产主义的优良品德，一切研究成果都是屬於人民的。有新的成就立刻得到推广，在生产建設中起着非常巨大的作用。因此，社会主义国家在鋼筋混凝土工程中，無論在質和量方面都远远超过資本主义国家，那是必然的結果。

### §3 我国的鋼筋混凝土发展情况

在十九世紀末和二十世紀初，我国也开始有鋼筋混凝土的建筑物，以后虽应用漸广，但半世紀来，直到解放前夕，鋼筋混凝土在我国的发展，始終在畸形的状态中。应用的范围不广，国内水泥工业的基础很薄弱，并且掌握在帝国主义者和官僚資產階級的手中。炼鋼工业几乎沒有，鋼筋仰給于資本主义国家。鋼筋混凝土設計规范在国内不統一，并且套用英美或其他資本主义国家的設計规范，内容保守而陈旧，根本談不到鋼筋混凝土方面的科学研究。

解放以后，在党的正确领导下，全国大兴土木，基本建設規模宏大，远非旧时代所能比拟。大規模的經濟建設，要求尽量節約鋼材和木材；这就促使鋼筋混凝土結構成为工程結構中最主要的形式，几年来通过学习苏联先进經驗，鋼筋混凝土在我国的发展情况，起了根本的变化。

在水利工程方面：例如1952年开始的治淮工程，其中著名的佛子岑水庫的連拱高壩，1952年荆江分洪工程的进洪閘和节制閘工程；黄河綜合规划中的一系列水壩，最大者如三門峽水电站等；在东南及西南所兴建的許多水电站，最大者如新安江水电站等；都是非常艰巨的工程。

在工业与民用建筑方面；我国学习苏联，广泛采用模数化、标准化的装配式結構，大大地縮短了基本建設的时间。重工业建筑方面例如长春第一汽車厂，各地的重型机器厂，鞍鋼，包鋼及武鋼等不少重型車間，以往慣例采用鋼結構的，也都由鋼筋混凝土結構代替。某厂所采用鋼筋混凝土柱高达29m，吊車梁的跨度为12m，吊車起重量达150t。目前已試制成功跨度为60m的預应力混凝土屋架，并在研究起重达360t的吊車梁。輕工业建筑方面，除一般的框架結構外，已比較广泛地采用了空間薄壳屋盖，在紡織工业厂房中，采用尤为普遍。此外，在工业企业内还有許多輔助性的特殊构筑物，例如水池、水塔、筒仓、容量較大的浅仓、較高的烟囱、設備基础等，也普遍采用鋼筋混凝土或預应力混凝土結構。

在民用建筑方面：各地兴建的政府机关办公大楼、大批职工住宅、学校和医院建筑、剧院、文化宮、展覽館等，多层房屋一般采用承重砖墙和鋼筋混凝土楼盖結構，較高的往往采用整体式骨架結構；而且逐漸由整体式向装配式，由小型預制构件向大型板材构件发展。北京民族館就采用了高层装配式骨架結構。同时已成功地試建了普通大型板材以及用压軌法制造的大型板材的實驗性房屋。壳体結構在大跨度民用房屋中也得到了推广应用，例如天津大学学生館厅采用跨度为25m、波寬10m、壳厚7.5cm的长壳，北京火車站中央大厅及高架候車室采用了双曲扁壳，其中最大的跨度为35m×35m，总矢高7m，壳厚8cm，边部逐漸增加到15cm。北京天文館采用鋼片網配筋的半球形薄壳屋頂。

在交通運輸系統以及采矿、海港、城市建設等方面，鋼筋混凝土及預应力混凝土也都有飞跃的进展。

在材料供应方面：水泥及鋼材的产量逐年高速度增长，1953年起即推行了多品种多标号水泥。目前鋼筋品种有低碳鋼 $\text{A0}$ 、 $\text{A3}$ 軋制而成的圓鋼筋，中碳鋼 $\text{A5}$ 及合金鋼 $25\text{r}$ 制成的熱軋螺紋鋼筋、各种高强度鋼絲，以及鋼絞綫，并已試制成功新的合金鋼 $60\text{r}2$ 。为了进一步节约鋼材，进行了竹筋混凝土、玻璃絲混凝土等的研究。

在规范方面：1952年东北地区首先頒布了破坏阶段設計的规范，1955年中央建工部制訂了全国統一规范（規結—6—55），修正了东北规范中的安全系数值。1957年及1958年起，各設計部門先后参考苏联关于鋼筋混凝土及預应力混凝土按极限状态設計的新规范进行設計。同时在建工部领导下結合我国具体情况，編制了預应力結構設計规范草案及极限状态計算的鋼筋混凝土結構設計规范草案。

在科学研究方面，以建工部建筑科学研究所土木建筑研究所为中心，配合着各地設計和施工机构以及各大学的科学研究，几年来主要結合生产进行了許多工作，但同时對基本构件計算理論，进行了适当的研究，并取得了一定的成果。

装配式結構和預应力混凝土也是我国的发展方向。自1953年开始在工业建筑上应用装配式結構以来，已建立了数以百計的預制构件厂，打下了建筑工业化的初步基础。預应力混凝土自1956年开始推广，經過三次全国性經驗交流会的推动，1958年已达到年产量約20万 $\text{m}^3$ ；但是这些还远不能与我国大規模的基本建設要求相适应，不过是一个开始。

在大跃进的时代里，随着工业的大規模发展，鋼筋混凝土在我国的发展，正以空前的速度向前迈进。

# 第一章 鋼筋混凝土

## 材料的主要物理和力學性能

### 第一節 混 凝 土

#### § 1—1 混凝土材料概述

保證鋼筋混凝土結構中混凝土的質量，必須嚴格地注意選用的材料，它的組成、水灰比、澆灌及養護的方法等。

在普通混凝土中，主要的組成材料為水泥、骨料及水。

我國目前使用的水泥有矽酸鹽水泥、火山灰質矽酸鹽水泥、礦渣矽酸鹽水泥和混合矽酸鹽水泥。在鋼筋混凝土中，水泥的標號不應低於 200 號<sup>①</sup>。

一般地上工程主要採用矽酸鹽水泥或混合矽酸鹽水泥。

混凝土中的骨料分細骨料（砂）及粗骨料（碎石、卵石或其他）。

水泥、骨料及水的質地和要求，以及它的適用範圍，選擇原則，在我國現行規範（規結—6—55）<sup>①</sup>中有詳細規定，設計時應遵守。

混凝土中的水泥、骨料和水之間的配合應以重量表示，其中水與水泥的重量比例稱為水灰比。

在一定的水灰比之下，混凝土所需要的強度與骨料的數量及粗細骨料顆粒的組成有關。選擇顆粒組成，應該在水泥漿（水和水泥）中加進最多骨料的情況下，能夠得到所需要的稠度。

為了保證一定的質量，澆制混凝土應儘量使用機械拌和與震動，並且應該注意養護；這些都要影響混凝土的強度。

在建築工程中，近來由於裝配式或預應力結構獲得很大的發展，為了提前拆模和施加預應力，要求快硬；換言之，要求提高混凝土的早期強度。使混凝土快硬的方法很多，例如：使用快硬水泥，增加水泥細磨程度，降低水灰比，加快凝劑，用高頻率震搗以及蒸汽養護等。

降低水灰比，是提高強度的重要方法；另一方面，如果水灰比太大，使游离水分太多，會降低混凝土的密實度。

干硬性混凝土的水灰很小，在強度不變的條件下，可以大量節省水泥（16—33%）和提高早期強度，因此在我國工地得到大量的推廣。干硬性混凝土在澆制時，必須使用較高頻率的振搗設備以保證混凝土充分搗實。

為了減少混凝土的水灰比，還可以加塑化劑以增加可塑性，採用真空作業，加壓以及用

---

<sup>①</sup> [1—1]

离心法捣实混凝土以排除游离水分。

另一方面,为了节省水泥,在水泥中掺入“水泥晶胚”以提高水泥的活性。

在冬季施工中,由于加热法成本较高,近来逐渐采用浓氯盐溶液拌和的方法,混凝土的拌合料可以在不加热的条件下浇灌。虽然在严寒的季节,混凝土照样凝结和普通混凝土硬度一样,这就是所谓“冷”混凝土。但是由于浓氯盐溶液对钢筋有腐蚀的作用,因此在钢筋混凝土结构中冷混凝土应受到某些限制,在氯盐的用量上亦须遵守一定的规定。

随着薄壁结构的发展,多采用空气压缩的喷射混凝土,它的优点是强度高和密实度大。

在加固和自应力混凝土结构中,应采用膨胀水泥。

## §1-2 混凝土的受力性能

### (一) 混凝土受压强度:

#### (1) 立方强度及标号

在混凝土和钢筋混凝土结构中,混凝土主要是承受压力。混凝土的受压强度受到许多因素的影响,例如水泥的品质和用量、集料的性质、混凝土的组成、水灰比、温度、施工的方法龄期以至于荷重的性质、试件形状、大小和试验的方法等等。

由于混凝土的强度受许多因素的影响,一般采用所谓“立方强度” $R_{\odot}$ (每边为20cm的立方体在温度为 $15^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{C}$ 相对湿度不小于90%的情况下,保养28天的试件的抗压极限强度)作为混凝土强度的衡量;并以这个强度作为混凝土的标号。

苏联现行规范(НГТУ123—55<sup>②</sup>)规定(按极限状态设计)混凝土的标号:

对于重混凝土(容重为 $1,800\text{ kg/m}^3$ 及其以上)分为:50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500和600号。

混凝土标号的选择取决于技术经济的指标。高标号混凝土对受压构件特别有利。在普通钢筋混凝土梁中,采用较低标号混凝土,较为合算。

在选择混凝土标号时,应考虑到制造、施工以及使用的情况。

苏联规范规定:在钢筋混凝土结构中不得采用小于100号的重混凝土;受弯构件不得低于150号;薄壁构件以及按强度计算确定的受压构件不得低于200号;用重混凝土制造的装配式钢筋混凝土构件不得低于150号。

混凝土的受压强度与试验的方法有着密切的关系。如果在试件的表面和压力机压板之间加上一层油脂,受压强度将低于不加油脂的试件很多,并且破坏的情况也不相同。因为试件的表面和压力机压板之间有向内的摩擦力存在(图1-1,a),摩擦力好象

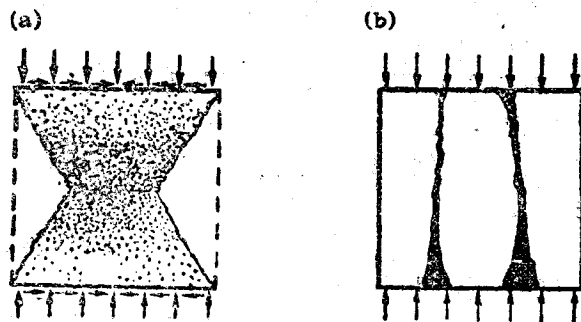


图 1-1 混凝土立方体的破坏情形  
(a) 在支承上有摩擦力存在; (b) 无摩擦力。

① 在各个不同国家采用其他不同形状和尺寸的试件;例如:在美国采用圆柱体,其直径为6英吋(15.2cm)高为12英吋(3.05cm)。

② [1-2]



箍一样阻止試件的横向形，因而提高了試件的受压强度。但在試件上涂过油脂以后，这种摩擦力就会大大的减少，因此，强度较低，同时也改变了試件破坏的性质（图 1—1, b）。

試件的强度还和加荷的速度有关。加荷速度快，则强度较高；速度慢则强度较低。

此外試件的尺寸愈小，强度愈大，这是由于試件愈小，硬结愈快，摩擦力作用的影响也愈大。

我国现行规范（规范—6—55）①规定：对于每边小于 20cm 的立方体，应将试验所得的强度乘以下列系数：

立方体边长为 10cm——0.85

立方体边长为 15cm——0.90

立方体边长为 20cm——1.00

混凝土的受压强度和龄期有着重要的关系。试验证明，只要在一定的湿度和温度之下，混凝土的强度在开始时增长很快，以后随龄期而增长较慢，但是这个增长可以延续许多年（图 1—2）。

## （2）棱柱强度

上面提到过，混凝土的受压强度要受試件形状的影响。

当試件高度大于三倍方形边长，以及試件本身不是由于失去稳定而破坏时，所得到的受压强度称为棱柱强度。按照苏联格伏兹捷夫（А. А. Гвоздев）教授的經驗公式，棱柱强度  $R_{np}$  和立方强度  $R$  的关系为：

$$R_{np} = \frac{1300 + R}{1450 + 3R} R \quad (1-1)$$

上述公式适用于标号为 300 以下的普通混凝土；对于更高标号的混凝土，在未获得更精确的试验资料前可取  $R_{np}$  等于  $0.7R$ 。

## （3）弯曲时受压强度

许多试验证明：在钢筋混凝土梁中，混凝土弯曲时受压强度高于棱柱强度，并在低标号时接近于立方强度或等于立方强度。

按照（规范—6—55）规定的的数据，混凝土弯曲时受压强度  $R_n$  和棱柱强度  $R_{np}$  之间的关系为：

$$R_n = 1.25 R_{np} \quad (1-2)$$

## （4）局部受压强度

混凝土局部受压的强度  $R_{cm}$  大于全部受压的强度，其相互关系为：

$$R_{cm} = R_{np} \sqrt[3]{\frac{F'}{F_{cm}}} \quad (1-3)$$

式中： $F'$  为全部截面积； $F_{cm}$  为受压面积； $\sqrt[3]{\frac{F'}{F_{cm}}}$  的数值当只有局部荷载时应不超过

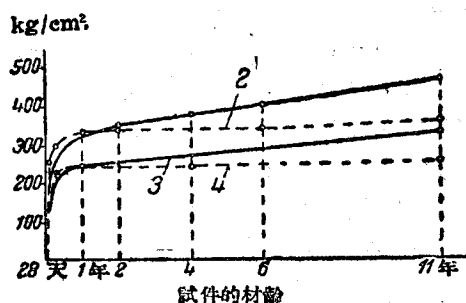


图 1—2② 组成为 1: 3: 7 (体积比) 混凝土的强度  
1: 6% 的水及潮湿环境下；2: 6% 的水及前七天在潮湿环境下，以后即在干燥环境下；4: 8% 的水及在潮湿的环境下；3: 8% 的水及前七天的潮湿环境下，以后即在干燥的环境下。

1.5, 当局部荷载和其他荷载共同作用时应不超过 2。

如局部荷载作用中心与截面面积  $F$  的形心不重合, 則計算中应考虑  $F$  的一部分面积, 該部分面积的形心与局部荷载作用中心重合。

## (二) 混凝土受拉强度:

### (1) 中心受拉强度

混凝土中心受拉强度  $R_p$  和受压强度  $R$  一样, 受着同样因素的影响, 但是影响的程度并不一样; 例如水灰比的增大, 对于受拉强度的减少不如受压强度大; 提高混凝土的标号时,  $R_p$  的增加不如  $R$  来得快。增加混凝土受拉强度, 較好的方法是增加混凝土的密实度。

混凝土受拉强度很小, 只有受压强度的  $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{17}$ 。但是要从試驗中求得  $R_p$  的真实限值却很困难, 因为試驗时很小的偏心会严重地影响  $R_p$  值。根据試驗,  $R_p$  值与混凝土标号的关系为:

$$R_p = \frac{1}{2} \sqrt{R^2} \quad (1-4)$$

### (2) 弯曲时受拉强度

試驗指出: 按照普通材料力学公式 ( $R_{np} = \frac{M}{W}$ ) 計算所得的混凝土弯曲时受拉强度比中心受拉强度大 (約 1.62—2.31 倍)。而实际上两者应相同, 这說明普通材料力学公式不能正确地应用于混凝土的計算; 因为它沒有考虑混凝土的塑性性質。故如引用材料力学公式計算时, 根据苏联斯克拉程大耶夫 (Б. Г. скрамтаев) 教授研究的結果, 建議弯曲时受拉强度为:

$$R_{np} = 1.7 R_p \quad (1-5)$$

按照結構物工作条件, 当有必要作混凝土弯曲时受拉强度試驗时, (規結—6—55) 要求梁的尺寸应为  $15 \times 15 \times 120 \text{ cm}$ , 并規定了具体的試件制作和試驗方法。

## (三) 混凝土受剪及受切强度:

过去曾經进行过无数試驗来决定混凝土受剪和受切的强度, 但是試驗的本身就很难提供出准确的混凝土受剪和受切的工作, 因此确定这两种强度非常困难。

### (1) 受剪强度

混凝土受剪的工作应该符合图 1—3 的情况。

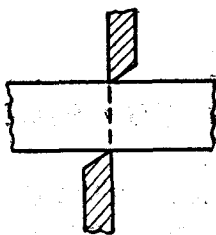


图 1—3 混凝土受純剪

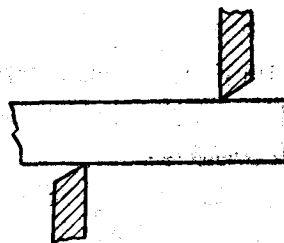


图 1—4 混凝土受切

虽然实验还不能得出准确的数值, 但是可以肯定: 混凝土的受剪强度比起受拉强度要大得多。苏联格伏兹捷夫教授领导的試驗結果指出, 受剪强度和立方强度的比值  $R_{0p}/R$  为

0.166~0.195 ①。

混凝土受切的工作應該符合圖 1—4 的情況。混凝土在彎曲和偏心受壓時有受切的工作。

雖然受切的強度不能被精確地用實驗肯定下來，但是已知混凝土受切的強度也大于中心受拉強度（大于 2 倍）。

### § 1—3 混凝土的變形

#### （一）在荷載作用下的變形：

混凝土在荷載作用下的變形增長與加荷方法、荷載作用的久暫、溫度濕度及試件的形狀尺寸等因素有關；其中加荷的方法和荷載作用的時間尤為重要。

##### （1）初次變形

試驗混凝土試件時，在初次加荷中，可以發現總變形  $\varepsilon_0$  是由兩個部分所組成：彈性變形部分  $\varepsilon_y$ ——荷載加在試件上立刻得到的變形；塑性變形部分  $\varepsilon_n$ ——荷載加在試件上發生彈性變形之後，雖然不再加大荷載，但變形仍繼續增長，起初變形增長較快，隨後逐漸緩慢。

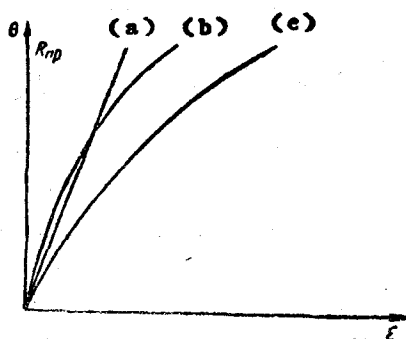


圖 1—5 彈性、塑性及總變形（初次的）曲線

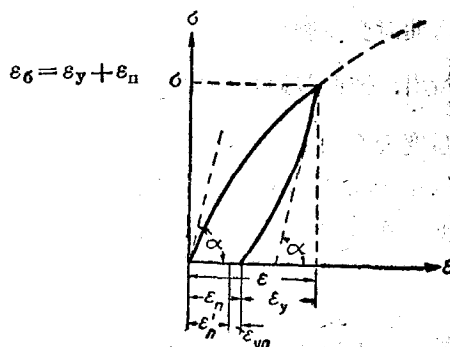


圖 1—6 加荷卸荷的變形曲線

圖 1—5 中：(a) 所示系混凝土彈性變形曲線；(b) 系混凝土塑性變形曲線；(c) 系混凝土總變形曲線。

如果加荷速度很快，變形曲線將接近 (a)；加荷速度較慢，變形曲線的形狀將類似 (c)。

如果按均勻速度加荷使應力達到  $\sigma$ ，然後卸荷至零，變形曲線將如圖 1—6。在卸荷時，變形由  $\varepsilon$  減至  $\varepsilon_n$ ；如等候相當時間，由於彈性後，數變形將減至  $\varepsilon_n'$ 。

$$\varepsilon_n' = \varepsilon_n - \varepsilon_{yn}$$

##### （2）重複荷載變形

在重複荷載作用下，混凝土的變形有着重要的變化。

試驗證明，用小于稜柱強度的荷載加在試件上，然後卸荷，如此反復進行加卸荷，經數萬次後，試件因疲勞而破壞。

實驗證明，混凝土的疲勞極限，大約在  $0.47 R_{np}$  到  $0.6 R_{np}$  之間變動。可以採取  $0.5 R_{np}$ ，即重複荷載引起的應力不超過稜柱強度極限的一半，就不會引起混凝土破壞。

##### （3）極限變形

混凝土的受拉和受壓極限變形，受試驗方法和加荷速度的影響很大。

① [1—10]

根据试验资料，混凝土一般受压极限变形  $\varepsilon_R = 0.0015 \sim 0.002$ ，甚至到 0.003。在破坏阶段，梁的受压区的单位变形可以达到 0.002~0.007，甚至个别情况下到达 0.01。

混凝土的受拉极限变形比受压极限变形小得多， $\varepsilon_p = 0.0001 \sim 0.00015$ ，并和水泥的品质、龄期、抗拉极限强度等有关。

根据苏联米哈依洛夫 (В.В. Михайлов) 教授的研究<sup>①</sup>指出：当混凝土和弹性材料相連，而弹性材料又承担全部拉力 60% 以上的时候，混凝土受拉极限变形竟可增长十倍之多。米哈依洛夫在钢制的空心梁中填以混凝土作受弯试验时，实测混凝土受拉变形的结果证实了这一点。

#### (4) 横向变形

混凝土的泊桑比可采用下列数值：在弹性阶段  $\nu = \frac{1}{6}$ ；接近破坏时  $\nu = 0$ 。

#### (二) 混凝土的收缩及膨胀：

混凝土在空气中硬結时，发生体积收缩的现象；在水中硬結时，发生体积膨胀的现象 (图 1-7)；而且收缩比膨胀值要大得多。

混凝土的收缩和许多因素有关：如水泥的品质和用量、骨料的性质、养护的条件、浇制的紧密度等。

许多实验说明：混凝土的收缩和水泥有很大的关系，高标号水泥收缩大，同一标号的各种水泥也不相同；水泥用量越多，则收缩越大，例如龄期为 5 年的纯水泥浆 (胶块) 的，试块最大收缩值为每 1m 3mm，而混凝土的一年收缩值为每 1m 0.2~0.4mm。

密实的、弹性模量大的骨料制成的混凝土的收缩要小得多。

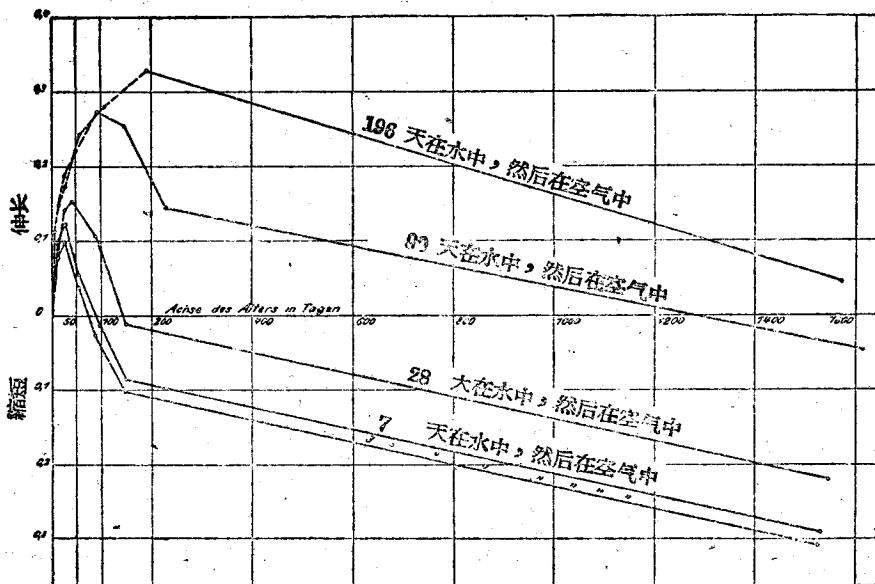


图 1-7 混凝土在水中不同天数养护后，再放置在空气中的变形。

将混凝土试件在空气中凝結之前先放在水中，在水中的天数对于以后在空气中凝結的收

① [1-11]



通过上述以及其他方式的試驗得出以下的結論：

(1) 徐变和荷重作用時間長短的关系是：起初增加得快，后来逐漸緩慢，但徐变可以延續很久（图 1—9）。

可是，变形曲線的性質与应力大小有关，可区别为两种情况：逐漸收斂的綫性关系和不收斂导致破坏的非綫性关系，后者是由于沿荷載方向出現微小的裂縫，在无筋的試件中，隨徐变而增大，終于破坏。这两种曲線的分界綫大致在  $0.6R_{np} \sim 0.5R_{np}$  左右。

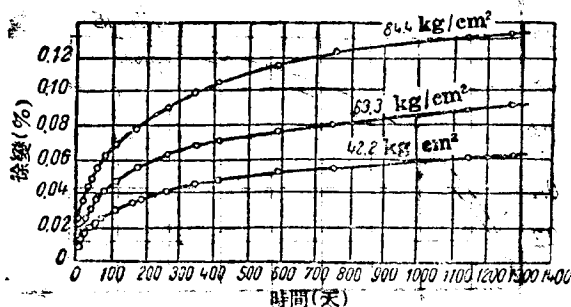


图 1—9 各种荷載下在各時點混凝土变形（徐变）的增长。

(2) 徐变和应力的关系是：应力越大徐变越大。由图 1—9 中可看出三种不同应力的試件各有不同的徐变。

(3) 加荷时混凝土的齡期越小，則徐变越大（图 1—10）。

(4) 水灰比越大，徐变也越大（图 1—11）。

(5) 骨料的弹性模量越高，徐变越小。

(6) 水泥的品种对徐变有很大的影响。普通矽酸盐水泥所制成的混凝土徐变最大；高級及礬土水泥所制成的混凝土，徐变要小得多。

(7) 混凝土的組成对徐变有很大的影响。在水灰比不变的条件下，水泥含量越多，則徐变越大（图 1—11）。

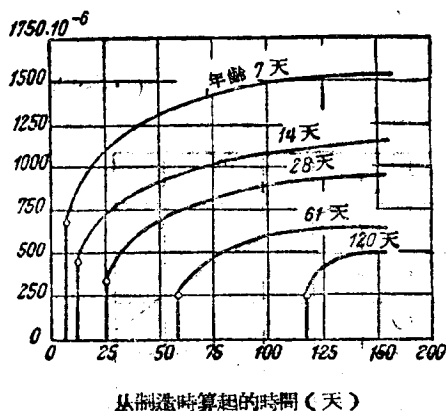


图 1—10① 混凝土在不同年齡時加荷載后徐变的变形。

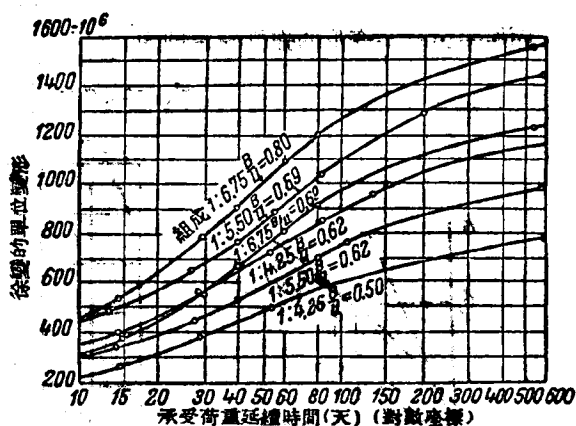


图 1—11② 混凝土組成对徐变变形的影响。

(8) 使用振動器可以減少水泥用量因而減少徐變。在水中保養也可以減少徐變。

此外，試件的尺寸增大，徐變變形反而減小（圖 1—12）。

同時，試驗指出，當長期荷載卸去後，除去一部分變形立刻恢復外，還有很小一部分變形在相當時間內要逐漸恢復。恢復變形的總數超過加荷時彈性變形的部分，這就說明徐變中也有一部分是可以恢復的。這種後來恢復的過程叫做彈性後效。圖 1—8 中  $D$  表示立刻恢復的部分， $E$  表示逐漸恢復的部分， $F$  表示永久變形。

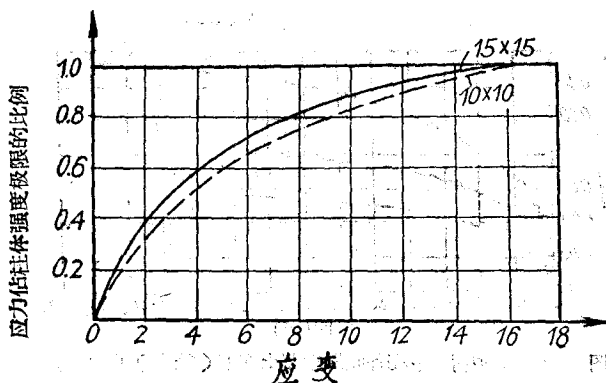


圖 1—12

#### § 1—4 混凝土的彈性模量

混凝土試件不論在受拉或受壓時，變形总比應力增加得快，兩者之間並不是成正比的直線關係，因此混凝土的彈性模量並不是常數。對混凝土的彈性模量也有不同的解釋。圖 1—13 所示系混凝土在受壓下的應力應變圖。所謂起始模量系指：

$$E_0 = t_{an} \alpha_0 \quad (1-6)$$

在曲線上的任一點為  $E$  值應為：

$$E = t_{an} \alpha'_0 = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1-7)$$

而能給出真實變形的彈性模量則為

$$E_\sigma = t_{an} \alpha = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (1-8)$$

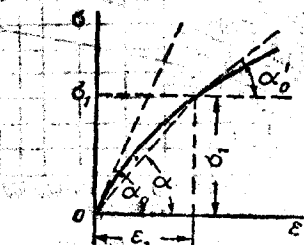


圖 1—13 混凝土應力應變圖。

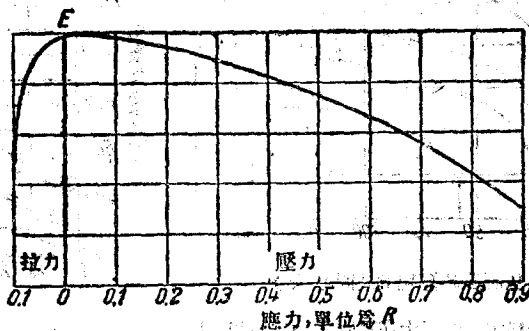


圖 1—14 混凝土的彈性模量。

混凝土彈性模量值隨應力而變化，應力越大彈性模量越小（圖 1—14），而且受拉彈性模量減小得更快。

在重複荷載作用下，混凝土彈性模量也要減少。

混凝土彈性模量和立方強度有着近於一致的關係。實驗指出：影響強度的許多因素如：齡期、水泥比、組成、骨料的性質、混凝土的密實度，以至於施工方法等，同樣影響着彈性模量。

在計算靜不定體系計算剛度、裂縫開展以及溫度影響時，須要知道彈性模量值；並且受壓、受拉、受彎及受切都有不同的數值。

根據試驗結果受壓彈性模量計算公式為：

$$E_c = \frac{1,000,000}{1.7 + \frac{360}{R}} \quad (1-9)$$

上述公式在工作應力範圍內（0.4~0.6） $R_{np}$  方為正確。

受拉的彈性模量和受壓彈性模量不同，但還沒有研究出很好的數據足資應用。

計算靜不定結構時，受彎構件的彈性模量可取為  $0.625E_c$ ，切力模量取  $G=0.425E_c$ ，以上  $E_c$  為柱體受壓彈性模量。

## 第 二 節 鋼筋的力學性能及其型式

### § 1—5 鋼筋的力學性能、硬化現象

在普通鋼筋混凝土結構中，主要採用鋼號為  $\text{光}0$ ， $\text{光}3$  及  $\text{光}5$  製成的軟鋼。在預應力混凝土結構中，則多用高強度鋼絲和經過各種冷加工的硬鋼。

軟鋼含碳量較低，特點是具有明顯的流限  $\sigma_{r0}$ 。軟鋼的受拉應力應變圖形可如圖 1—15 所示：開始時應力應變按比例增加；超過彈性極限  $a$  點之後，變形比應力增加要快得多，到達流限  $b$  點，應力不增加而變形增加很大（達 1%~2%）；越過流幅以後（ $c$  點），鋼筋進入硬化階段，一直到最高點強度極限  $d$  為止；過  $d$  點後，試件發生頸縮及斷裂。

硬鋼含碳量較多，特點是沒有明顯流限，延伸率小。經過機械硬化的軟鋼也具有和硬鋼相同的性質。

經過機械冷加工（通常有冷拉、冷拔、冷軋）可以提高鋼筋的流限和強度極限，由冷加工使鋼筋變形以後得到硬化的現象，叫做變形硬化。

冷拉是把鋼筋拉到超過流限，例如到達圖 1—15 上的  $k$  點，然後放鬆，應力應變中的卸荷線為  $kl$ ，平行於  $ao$ ，鋼筋中產生了永久變形  $ol$ ，如立刻重新加荷，應力應變圖將遵循  $llcd$  線，圖形的曲折點為  $k$  點，高於  $b$  點。

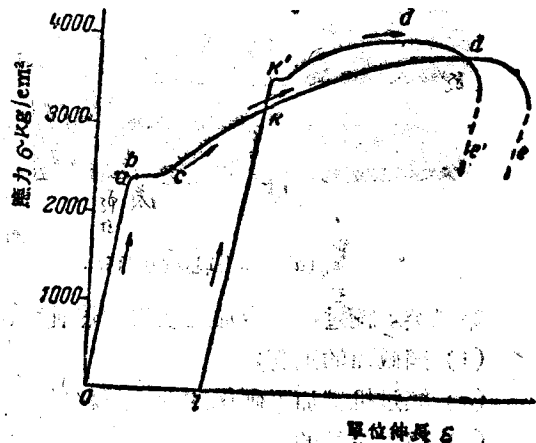


圖 1—15 軟鋼受拉圖形



如果放松后經過了相当時間，然后重新加荷，則图形的曲折点将进一步提高到 $k'$ ，鋼获得了新的流限，塑性台阶縮短，应力应变图将遵循 $lk''de'$ 綫，强度极限也略为提高，最后延伸率减小一些，这种现象叫做时效硬化。

冷拔鋼筋是把鋼筋拉过比本身直径为小的硬質合金鋼模，使鋼筋截面减小。冷拔鋼筋的强度极限可以提得很高，这随鋼絲的直径、种类、鋼号及应用条件不同而介于 $3,500 \sim 21,000 \text{ kg/cm}^2$ 之間。

冷轧鋼筋是将鋼筋通过特制的車床，軋成規律变形的鋼筋。效果最好的是阿瓦科夫(А.И.АВАКОВ)車床，在两个相互垂直的方向有交替排列的齿印。經過冷轧的鋼筋最高可以达到 $6500 \text{ kg/cm}^2$ 的强度极限。

經過冷加工的鋼筋受到高温作用时，其力学性能将发生变化。当加热到 $220^\circ\text{C}$ 时，鋼料强度性能略有提高；当加热到 $450^\circ\text{C}$ 时，鋼料的强度将稍見降低；当温度达到 $700^\circ\text{C}$ 时，鋼料原有的力学性能又告恢复，流限和极限强度均降低。

硬化的消失和原有性能的恢复是需要一定的延續時間进行的。因此采用适当的焊接方法，将热效应的持續時間加以控制，不至于造成鋼筋流限和强度的过分降低。苏联规范(И-122-65)①容許将冷拉鋼絲及冷压扁規律变形鋼筋用点焊制成焊接網。

## § 1-6 鋼筋的型式

### (一) 柔性鋼筋:

柔性鋼筋是普通鋼筋混凝土結構中的主要鋼筋型式。按照目前使用的鋼筋可以分成两大类:

第一类。未經机械加工硬化的热轧鋼:

- (1) 光0及光3的圓截面热轧鋼筋;
- (2) 光5热轧螺紋鋼筋(图1-16a);
- (3) 25Г2С热轧規律变形鋼筋(图1-16b)。

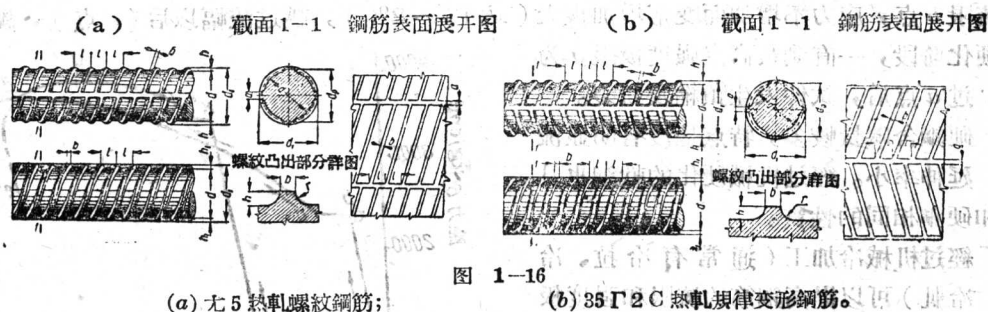


图 1-16

第二类。經過机械冷加工硬化的热轧鋼:

- (1) 圓截面的鋼筋;
- (a) 經過机械加工硬化的冷拔鋼絲;
- (b) 經過冷拉的鋼筋。
- (2) 經過阿瓦科夫車床軋制的規律变形鋼筋(图1-17)。

① [1-22]