

# 加筋混凝土结构计算

赵国藩 著

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书从加筋混凝土結構計算基本原理談起，系統地闡明新導出的計算公式、普遍性計算公式以及抗裂計算方法的研究等。

本书可供水利工程設計技術人員及有關專業院校師生參考之用。

## 加筋混凝土結構計算

趙國藩 著

\*

上海科學技術出版社出版

(上海瑞金二路450號)

上海市書刊出版業營業許可証出093號

新華書店上海發行所發行 各地新華書店經售

上海大東集成印刷廠印刷

\*

開本 850×1168 1/32 印張 24/32 字數 72,000

1961年6月第1版 1961年6月第1次印刷

印數 1—5,000

統一書號 · 15119·1571

定 價 (十四) 0.50 元

## 前 言

在大型水工混凝土结构中，例如非岩性地基上的重力坝、支墩坝、水电站厂房的水下部分、船闸的首部和闸室等常常作成加筋混凝土（少筋混凝土）结构。加筋混凝土是介于纯混凝土和钢筋混凝土之间的材料。从1940年起，苏联学者就已致力于加筋混凝土计算理论的研究。在1948年，苏联杰出的水工专家、技术科学博士П. П. 拉乌普曼首先提出了完善的加筋混凝土的计算理论<sup>[1]</sup>。我国有关设计部门在实际设计中，运用这一先进理论时，曾节约了大量的材料。在加筋混凝土结构计算方法的简化方面，我国学者亦作出了贡献<sup>[5]</sup>。

本书的第一章介绍 П. П. 拉乌普曼于1948年提出的加筋混凝土结构的基本计算理论。

在拉乌普曼的著作中<sup>[1]</sup>，所引用的基本计算公式是以1948年苏联的“混凝土及钢筋混凝土水工结构设计规范(ГОСТ 4286-48)”为依据的。1956年9月苏联部长会议全苏标准委员会对上述规范作了重要的修订，于1957年2月出版了修订后的规范<sup>[3]</sup>。修订后的规范较原规范有很多修改。此外，在混凝土和钢筋混凝土结构中，按破坏阶段计算的公式亦与1948年以前所用的公式不同，例如受弯构件中受压区的应力图形，以前取为三次抛物线形，而现在则为矩形。根据这些情况，就需要重新推导计算公式。在本书的第二章中，根据1956年修订后的规范及现行的混凝土及钢筋混凝土设计规范推导了新的加筋混凝土结构计算公式。

在受弯构件中，受压区应力图形取为矩形来计算破坏弯矩，以与现行规范相适应。裂缝出现时的弯矩亦引用了新的数值。

在偏心受压构件中，由于没有  $C = \frac{\varepsilon}{h} > 1$  和  $C < 1$  的区别，而且计算公式亦较前有重大修改，因此，亦相应地将加筋混凝土偏心

受压构件的公式重新推导。

在偏心距很小的偏心受压构件中，旧的破坏弯矩的计算公式是按照弹性阶段推导的，在第二章中的计算公式则是按照破坏阶段推导的。

对于偏心受拉及轴心受拉构件，亦在第二章中重新推导了新的公式。

对于以上所述各种荷载下的计算，分别讨论了  $\sigma_T = 2500, 2850$  及  $3500$  公斤/厘米<sup>2</sup> 的情形，并在公式中直接引用基本强度特征值——抗拉强度  $R_p$ ——作为计算的参数。

在推导上述公式时，根据 1956 年修订后的规范，是以混凝土极限拉伸值  $\varepsilon_p$  为常数及受拉边缘纤维应力与  $R_p$  之比  $m$  为常数的关系而推导抗裂计算公式的。根据近年来的研究， $\varepsilon_p$  及  $m$  之值不能认为是常数， $\varepsilon_p$  随混凝土标号及配筋率而变，而  $m$  则随截面高度而变<sup>[4]</sup>。因此，为了使计算公式具有广泛的适应性与普遍性，在第三章中，进一步推导了加筋混凝土结构的普遍性公式。第二章的计算公式则为第三章普遍性计算公式的特殊情况。

第二章及第三章的抗裂计算公式都是建立在截面应力图形为直线分布的假设上。由于混凝土是弹塑性体，这个假设显然是不够合理的。在裂缝出现时，截面受拉区应力分布图形实际上是一个接近于梯形的曲线形。在本书的第四章则根据截面受拉区应力图形为梯形的假设及一些新的参数，提出了一个新的加筋混凝土、混凝土及钢筋混凝土水工结构的抗裂计算方法，这个方法适用于各种荷载作用下的矩形、T形、I形及Π形截面的构件。新的计算公式用试验数据作了初步的校核，表明是可靠和合理的。

上述工作是著者 1957~1959 年在大连工学院结构教研室工作时在党组织的关怀与指导下进行的。书中的附图及表 5 的数字系由焉儒芬同志协助描繪及计算，表 6 及表 7 的数字由王焕典同志协助计算，謹在此致以衷心的感谢。

赵国藩

1960年8月

# 目 录

## 前言

第一章 加筋混凝土结构的计算原理 .....	1
§ 1. 加筋混凝土的定义、受力特点及其计算的基本原理 .....	1
§ 2. 加筋混凝土的范围和特性配筋率 .....	7
§ 3. 安全系数 $K_T$ 及 $K_P$ 随 $\mu$ 而变的关系 .....	8
第二章 加筋混凝土结构的计算公式 .....	12
§ 1. 受弯构件的计算 .....	12
§ 2. 偏心受压构件的计算 .....	19
§ 3. 偏心受拉构件的计算 .....	33
§ 4. 偏心距很小的偏心受拉构件的计算 .....	36
§ 5. 轴心受拉构件的计算 .....	38
§ 6. 按照修订后的规范 ГОСТ 4286-48 的简化算法 .....	40
§ 7. 计算例题 .....	41
第三章 加筋混凝土结构的普遍性计算公式 .....	50
§ 1. 概述 .....	50
§ 2. 受弯构件的普遍性计算公式 .....	51
§ 3. 偏心受压构件的普遍性计算公式 .....	53
第四章 加筋混凝土及钢筋混凝土结构抗裂计算方法的研究 .....	54
§ 1. 概述及基本假设 .....	54
§ 2. 加筋混凝土及钢筋混凝土结构普遍性抗裂计算公式的推导 .....	57
§ 3. 具有普遍实用意义的 I 形截面的抗裂计算公式 .....	60
§ 4. T 形、Π 形及矩形截面的抗裂计算公式 .....	64
§ 5. 数值 $\alpha = R_{PO}/R_P$ 的研究 .....	65
§ 6. $n_c$ 及 $n_P$ 之值的研究 .....	67
§ 7. 简化计算的图表 .....	69
§ 8. 试验的校核 .....	72

§ 9. 計算例題	74
§ 10. 結語	78
附录	80
表 1 加筋混凝土結構的最小 $K_T$ 值	80
表 2 混凝土的計算極限強度(公斤/厘米 <sup>2</sup> )	81
表 3 鋼筋的流限(公斤/厘米 <sup>2</sup> )	81
表 4 鋼筋彈性模量與混凝土彈性模量之比值 $n$	81
表 5 $\alpha$ 值計算表	82
表 6 鋼筋截面面積和重量	83
参考文献	84

# 第一章 加筋混凝土結構的計算原理\*

## § 1. 加筋混凝土的定義、受力特點及其計算的基本原理

在水工建築物中，由於剛度、穩定性以及抗裂性及構造方面的要求，往往做成大體積的結構，構件的截面較大，而相應的配筋率則較小。當鋼筋混凝土構件的配筋率小到某一數值時，按照破壞階段的應力圖形算出來的承載能力（例如受彎構件的  $S_0$ ，這時就遠小於  $0.8 S_0$ ，其承載能力主要取決於受拉鋼筋的強度），就可能比按照純混凝土構件（考慮混凝土受拉區工作）計算出來的承載能力反而小，這顯然是不合乎真實情況的，並且說明了在這種情況下，我們所採用的鋼筋混凝土結構的計算方法已不適用。相應此極限情況的配筋率就是鋼筋混凝土結構的最小配筋率。茲以水工建築物中最常遇到的單筋矩形截面的受彎構件為例來說明。

按照蘇聯 1956 年修訂後的規範 (ГОСТ 4286-48)，鋼筋混凝土受彎構件按照破壞階段計算的承載能力為：

$$M_P = \mu \sigma_T \left( 1 - 0.5 \mu \frac{\sigma_T}{R_w} \right) b h^2 \quad (1)$$

按照同一規範，純混凝土受彎構件的承載能力為：

$$M_P = M_T = 1.67 R_P \cdot \frac{b h^2}{6} \quad (2)$$

令(1)式與(2)式相等，解出的  $\mu$  值，即鋼筋混凝土結構的最小配筋率，此時取  $\mu_0 = 0.95 \mu$ ，得：

\* 加筋混凝土結構的計算原理是由蘇聯技術科學博士 П. П. 拉烏普曼提出的，參閱文獻[1]。

$$\mu \sigma_T \left(1 - 0.5 \mu \frac{\sigma_T}{R_u}\right) b h_0^2 = 1.67 R_P \frac{b h_0^2}{0.95^2 \times 6}$$

消去  $b h_0^2$ , 得:

$$\left(0.5 \frac{\sigma_T^2}{R_u}\right) \mu^2 - \sigma_T \mu + 0.308 R_P = 0$$

对  $\mu$  解方程, 得:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sigma_T \pm \sqrt{\sigma_T^2 - 4 \times 0.5 \times \frac{\sigma_T^2}{R_u} \times 0.308 R_P}}{2 \times 0.5 \sigma_T^2 / R_u} \\ &= \frac{R_u}{\sigma_T} \left(1 - \sqrt{1 - 0.616 \frac{R_P}{R_u}}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

由 (3) 式可以对于各种标号的钢筋及各种标号的混凝土算出钢筋混凝土构件的最小配筋率, 如表 1 所示, 以百分率表示。

表 1

混凝土的轴心受拉强度 $R_P$		14.5	17	20	22.5	27.0	31
钢筋的流限 $\sigma_T$	2500	0.190	0.216	0.260	0.291	0.337	0.404
	2850	0.167	0.190	0.224	0.255	0.295	0.355
	3500	0.136	0.154	0.162	0.208	0.240	0.289

1956 年修订后的 ГОСТ 4286-48, 给出钢筋混凝土结构的最小配筋率如表 2 所示。这些数值是表 1 的近似平均值。

表 2

混凝土的轴心抗拉强度 $R_P$	$\leq 15$	17	20	27	31
Cr.0 号钢和 Cr.3 号钢	0.15	0.20	0.25	0.35	0.40
Cr.5 号钢	0.10	0.15	0.18	0.25	0.30

当构件的配筋率大于表 1 或表 2 的数值时, 按照钢筋混凝土结构的计算方法来确定其承载能力。如试验所指出, 当  $S_b < 0.8 S_0$



时，鋼筋混凝土梁在荷載作用下，受拉区混凝土出現裂縫，拉力由鋼筋来承受。当荷載繼續增加时，裂縫繼續扩展，鋼筋的应力到达流限。在这以后，由于鋼筋伸长很大，混凝土截面的受压区縮小而其应力到达极限强度，于是构件就破坏了。对于鋼筋混凝土梁而言，破坏荷載是相应于受拉鋼筋应力到达流限时的荷載。

无筋的純混凝土梁，当第一次裂縫出現后就削弱了截面，因而裂縫就迅速扩展，整个結構就破坏了。因此，对于純混凝土梁而言，出現第一次裂縫的荷載即是破坏荷載。

在純混凝土梁中，由于承載能力是决定于混凝土的自身强度，而混凝土的不匀质性以及偶然的缺陷的存在就很容易影响到承載能力的降低，因此，对于純混凝土結構而言，当其承載能力取决于受拉区的强度时，就要采用較大的防止混凝土到达抗拉极限强度（裂縫出現）的安全系数，其值为 2.8~4.4，如表 3 所示。

表 3 混凝土結構的安全系数

破坏的原因	建筑物的級別(按重要性)											
	I			II			III			IV, V		
	力和荷載的組合											
	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的
1. 达到抗压极限强度	2.5	2.3	2.0	2.3	2.1	1.8	2.1	1.9	1.7	2.0	1.8	1.7
2. 达到抗拉极限强度	4.4	4.0	3.3	4.0	3.6	3.0	3.6	3.3	2.8	3.3	3.0	2.8

注：当作用力中計入浮托力时，表 3 內的安全系数，对于澆灌縫之間的各个截面应减小 25%，而对于澆灌縫所在的截面則减小 10%。

在鋼筋混凝土結構中，当构件是由于受拉鋼筋到达流限而开始破坏时，由于鋼筋具有較好的匀质性，因此可以采用較小的防止

表 4 鋼筋混凝土結構的安全系數

破坏的原因	建筑物的級別(按重要性)											
	I			II			III			IV, V		
	力和荷載的組合											
	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的	基本的	基本的加上附加的	基本的和特殊的加上附加的
1. 混凝土到达抗压极限强度或鋼筋到达流限												
a) 在受压构件中	2.2	2.0	1.8	2.0	1.8	1.6	1.8	1.7	1.6	1.7	1.6	1.6
6) 在其他构件中	2.0	1.8	1.6	1.8	1.7	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
2. 混凝土到达抗拉极限强度	1.35	1.3	1.25	1.3	1.25	1.2	1.25	1.2	1.2	1.25	1.2	1.2
3. 混凝土到达抗拉极限强度(主应力)												
a) 当没有斜鋼筋和鋼箍时	3.3	3.0	2.7	3.0	2.7	2.4	2.8	2.5	2.2	2.6	2.3	2.0
6) 当有斜鋼筋和鋼箍时	1.35	1.3	1.25	1.3	1.25	1.2	1.25	1.2	1.2	1.25	1.2	1.2

注: 不論在澆灌縫內和澆灌縫之間的截面內, 都应在不計淨托力的情況下校核截面的強度, 此时应保证各截面具有正常的安全系數。

当假定地基为彈性半平面(或半空間)体来确定地基的反力时, 如果这一計算图形是最不利的, 則在結構的強度計算中的安全系數可降低10%, 而当具有專門的論证时, 則可降低更多一些。

当借簡化的方法来确定地基的反力时, 如果考虑了由于地基土壤的不均匀性(因地基中存在有夹层和棱体) 或由于建筑物的施工次序和地基受載的次序而产生地基反力分布的不均匀性, 則強度安全系數可降低10%, 而当具有專門的論证时, 則可降低更多一些。

根据上述所規定的最小安全系數, 不应小于对特別荷載組合情况(即基本的加上附加的和特殊的)所采用的安全系數。

鋼筋到达流限的安全系数,其值为 1.6~2.0,如表 4 所示。

当受弯构件中配有少量的鋼筋而其数量又小于表 1 或表 2 所示的鋼筋混凝土結構的最小配筋率,亦即就其配筋率而言是介于純混凝土与鋼筋混凝土之間时,則此种結構,称为加筋混凝土結構或少筋混凝土結構,其范围的确定方法見 §2。

在荷載作用下,加筋混凝土梁在裂縫出現之前,受拉区的拉力由混凝土及鋼筋共同承受,但主要是由混凝土来承受(因为鋼筋数量少)。在裂縫出現之后,从計算理論上,拉力应当完全轉移給鋼筋来承受,但由于鋼筋数量很小,不足以抵抗截面受拉区的全部拉力,因此在第一批裂縫出現后,随之构件亦应当破坏,也就是說,在配筋率較小的情况下,裂縫出現时的荷載,从理論上說就是破坏荷載。

但是实际情况却不是象理想的情况那样,因为混凝土是不均匀的,而且存在着一些不可避免的缺陷等,因此在混凝土最弱的截面中,当边缘应力尚未到达抗拉强度的平均值时,便已出現了第一批裂縫,如果是純混凝土梁,則出現此裂縫后,随之即将发生破坏。而在加筋混凝土梁中,梁內的鋼筋則及时地在这个最弱的截面中分担由于裂縫出現而由混凝土受拉区轉移給鋼筋的拉力,因此这个截面中产生的裂縫不致于迅速扩展,这样一来,整个混凝土梁还能繼續工作,直到混凝土受拉区边缘应力到达其平均的抗拉强度,鋼筋应力到达流限以后,梁才发生破坏。由此可見,在加筋混凝土結構中,这些为数不多的鋼筋,却起着下面的作用:

(1) 加强結構受拉区混凝土的最弱的部分,在最弱部分出現裂縫之后,可以阻止裂縫的扩展,因而改善了整个混凝土受拉的能力。

(2) 对于加有少量鋼筋的加筋混凝土結構,必須在截面受拉混凝土到达抗拉极限强度和鋼筋亦到达流限之后,才发生破坏,这就为加筋混凝土的防止破坏,創造了双重保证,亦就是說,加筋混凝土結構对破坏的抵抗力是由混凝土的抗拉强度和鋼筋的抗拉强度决定的。

在鋼筋混凝土結構中 ( $S_0 < 0.8S_0$ )，計算的目的是防止鋼筋到達流限。在純混凝土結構中，計算的目的是防止混凝土到達抗拉極限強度(出現裂縫)。那末在加筋混凝土結構中，則不僅要防止混凝土到達抗拉極限強度(出現裂縫)，還要防止鋼筋到達流限。

但是需要指出，在混凝土結構中，由於要防止混凝土到達抗拉極限強度，因此需要採用較大的安全係數  $2.8 \sim 4.4$  (見表 3)；在鋼筋混凝土結構中，由於要防止鋼筋到達流限，因此採用  $1.6 \sim 2.0$  的安全係數(見表 4)，此時受拉區混凝土已經裂開，對於受拉鋼筋不起什麼作用。而在加筋混凝土結構中，防止破壞的是兩種材料(混凝土和鋼筋)的共同作用，他們是可以互相支援的，對於破壞有着雙重保證，所以對於加筋混凝土結構中的防止混凝土到達抗拉極限強度的安全係數以及防止鋼筋到達流限的安全係數就可以比在純混凝土結構和鋼筋混凝土結構中所採用的相應的安全係數為低。

令防止混凝土到達抗拉極限強度(出現裂縫)的安全係數為  $K_T$ ，防止鋼筋到達流限的安全係數為  $K_P$ ，則當鋼筋數量很少時，主要是由混凝土的抗拉強度來防止破壞，而鋼筋(數量很少)則幾乎不起作用，這時，防止混凝土到達抗拉極限強度(出現裂縫)的安全係數  $K_T$  之值應當接近於純混凝土結構的安全係數  $K_{T1}$  ( $K_{T1}$  之值見表 3)。而鋼筋由於它不起什麼作用，防止鋼筋到達流限的安全係數  $K_P$ ，此時可取接近於 1，隨着截面配筋率  $\mu$  的增加，鋼筋作用的比重就越來越大，相對地混凝土抗拉作用在結構總強度中的比重就越來越小。因此，隨着配筋率  $\mu$  的增加， $K_T$  之值應當減小，而  $K_P$  之值則應當增大。當配筋率  $\mu$  增大到鋼筋混凝土結構中的最小配筋率時， $K_P$  之值應接近於鋼筋混凝土結構所採用的安全係數  $K_{P2}$  ( $K_{P2}$  之值見表 4)，此時受拉區的混凝土對於防止破壞而言，已不起什麼作用，因此其安全係數  $K_T$  可接近於 1。

由以上所述可知，在加筋混凝土結構的計算中，需要引用兩個安全係數  $K_T$  及  $K_P$ 。 $K_T$  之值將隨着配筋率  $\mu$  的增大而減小， $K_P$

之值將隨着  $\mu$  的增加而增大。安全係數  $K_P$  及  $K_T$  隨着截面配筋率的变化而变化的特点是加筋混凝土結構計算的第一個基本原理。

## § 2. 加筋混凝土的範圍和特性配筋率

在加筋混凝土結構中，如果配置的鋼筋數量很少，雖然亦可以提高防止截面最弱處裂縫擴展的能力，也就是說，此時所採用的防止裂縫出現的安全係數  $K_T$  照理亦可以比純混凝土結構所採用的安全係數為低。但是在這種情形下，極少量的鋼筋對於結構防止破壞所起的作用較難估計，亦即安全係數  $K_T$  的降低較難作出數值的估計，因此為了簡單起見，我們取  $K_T = K_{T1}$  及  $K_{P1} = 1.0$  時求得的配筋率  $\mu_1$  作為是加筋混凝土的最小配筋率。當  $\mu < \mu_1$  時，即不考慮此極少量鋼筋的作用，而作為是純混凝土結構來計算。

$\mu = \mu_1$  就是加筋混凝土與純混凝土交界處的配置率，亦即加筋混凝土配筋率的下限，與之相應的安全係數  $K_T = K_{T1}$ ,  $K_P = K_{P1} = 1.0$ 。

隨着配筋率  $\mu$  的增加，加筋混凝土逐漸向鋼筋混凝土過渡。作為鋼筋混凝土結構的低限，可以取用表 1 或表 2 的鋼筋混凝土最小配筋率，但是如前所述，在確定這個最小配筋率之值時，並未引入安全係數的關係。

在這種情況下，可以設想引用  $K_T$  等於鋼筋混凝土結構的抗裂安全係數  $k_{Tmin}$  (根據表 4 此值為 1.20~1.35)， $K_P$  等於鋼筋混凝土結構的防止破壞的安全係數  $K_{P2}$ ，來確定加筋混凝土與鋼筋混凝土交界處的配置率  $\mu_2$ ，作為是加筋混凝土配筋率的上限。但是為了簡單起見，此時取  $K_T = K_{T2} = 1.0$ ，對於實際計算結果影響不大，因此就取  $K_T = K_{T2} = 1.0$  及  $K_P = K_{P2}$  時求出的配筋率  $\mu_2$  作為是加筋混凝土配筋率的上限。

除了上述的加筋混凝土配筋率的下限  $\mu_1$  及上限  $\mu_2$  而外，為便於推導受彎構件計算公式，還引入了一個特性配筋率  $\mu_0$ ，它是當防止裂縫出現的安全係數與防止破壞的安全係數相等時，即  $K_{T0} = K_{P0}$  時求得的。

### §3. 安全系数 $K_T$ 及 $K_P$ 随 $\mu$ 而变的关系

前面指出, 在加筋混凝土结构的计算中, 其第一个特点便是安全系数  $K_P$  及  $K_T$  是随配筋率  $\mu$  而变的,  $\mu$  的变化范围在其上限 ( $\mu_2$ ) 及下限 ( $\mu_1$ ) 之间。

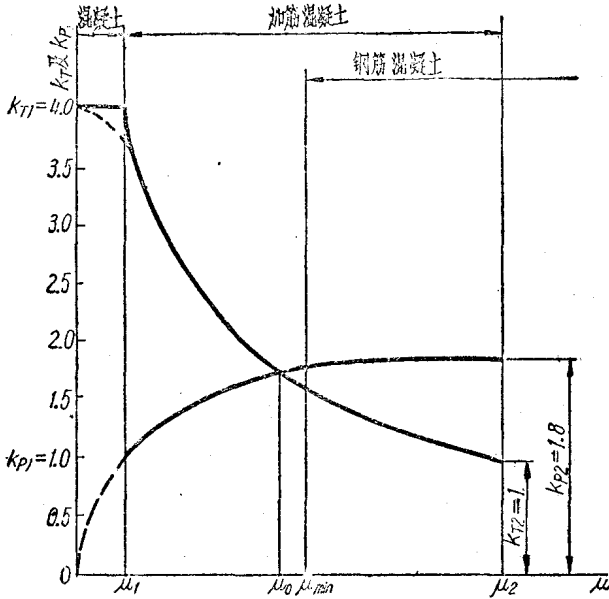


图 1 a (对于 II 级水工建筑物, A 组荷载组合)

$K_T$  的曲线应当满足边界条件:

$$\mu = \mu_1 \text{ 时, } K_T = K_{T1};$$

$$\mu = \mu_2 \text{ 时, } K_T = 1.0$$

由  $\mu = 0$  至  $\mu = \mu_1$  之间, 如前所述, 略去  $K_T$  减小的影响, 因此  $K_T$  曲线在这一部分为一段水平直线(参阅图 1 a)。由  $\mu = \mu_1$  起至  $\mu = \mu_2$  之间,  $K_T$  曲线由  $\mu = \mu_1$  时的  $K_{T1}$  起逐渐减小至  $K_T = K_{T2} = 1.0$ , 呈双曲线的性质(因为当  $\mu = 100\%$  时, 亦即距原点  $\mu = 0$  很远时,  $K_T$  接近于 0, 横坐标轴为曲线之渐近线)参阅图 1 a。 $K_T$

的倒数  $\frac{1}{K_T}$  与  $\mu$  的关系则成直线的关系。因为  $\frac{1}{K_T}$  和  $\mu$  的曲线亦应满足边界条件:

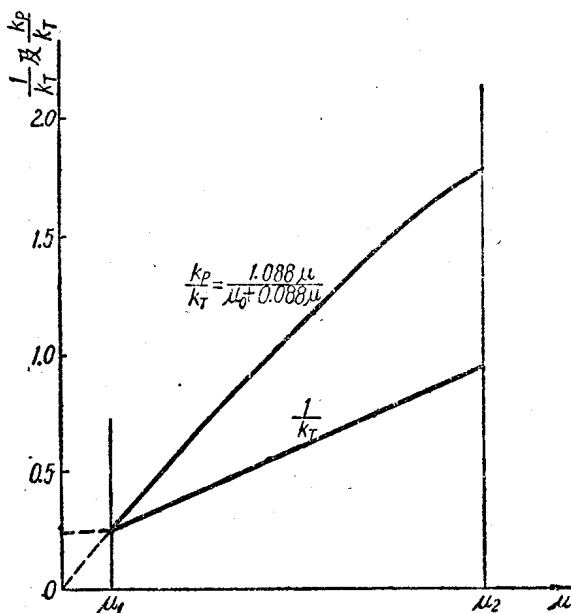


图 16 (对于  $\sigma_T = 2850$  公斤/厘米<sup>2</sup>)

$$\mu = \mu_1, \quad \frac{1}{K_T} = \frac{1}{K_{T1}};$$

$$\mu = \mu_2, \quad \frac{1}{K_T} = \frac{1}{K_{T2}} = \frac{1}{1} = 1$$

所以

$$\frac{1 - \frac{1}{K_T}}{\mu_2 - \mu} = \frac{1 - \frac{1}{K_{T1}}}{\mu_2 - \mu_1}$$

因此, 得出  $\frac{1}{K_T}$  的方程为如下形式:

$$\frac{1}{K_T} = 1 - \left(1 - \frac{1}{K_{T1}}\right) \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1} \quad (4)$$

由(4)式可以根据  $\mu$  值而求出  $K_T$  值, 該式中的  $\mu_1$  及  $\mu_2$  为边界配筋率。  $K_{T1}$  根据混凝土结构的规范来确定(表3)。

$K_P$  曲线应当满足边界条件:

$$\begin{aligned} \mu = \mu_1 \text{ 时, } & K_P = K_{P1} = 1.0; \\ \mu = \mu_2 \text{ 时, } & K_P = K_{P2} \end{aligned}$$

$K_P$  的曲线到  $\mu = \mu_2$  以后, 即到了钢筋混凝土结构的范围内, 应成为一水平直线  $K_P = K_{P2}$ , 因此曲线在  $\mu = \mu_2$  的地方, 应当与  $K_P = K_{P2}$  的水平直线平滑地连接起来。在  $\mu = 0$  时,  $K_P$  应等于 0, 在  $\mu = \mu_1$  时,  $K_P$  增大为 1, 此后, 随着  $\mu$  的增大而逐渐增大, 曲线具有抛物线的性质, 此抛物线的顶点在  $\mu = \mu_2$  及  $K_P = K_{P2}$  的一点, 参阅图 1 a。

为了使结构的材料得到最经济的利用, 应当同时充分利用混凝土和钢筋的强度, 例如对于受弯构件而言, 就要求:

$$M = \frac{M_T}{K_T} = \frac{M_P}{K_P} \quad (5)$$

式中,  $M$  为容许弯矩,  $M_T$  为裂缝出现时的弯矩,  $M_P$  为破坏时的弯矩。

这个保证充分利用混凝土和钢筋强度的关系式(5)就是加筋混凝土结构计算的第二个特点, 也是它的第二个基本计算原理。

根据这个原理, 亦即关系式(5), 可以得到  $K_P$  与  $K_T$  之间的关系为:

$$\frac{K_P}{K_T} = \frac{M_P}{M_T} \quad (6)$$

将以后所述的对于受弯构件的  $M_P$  值及  $M_T$  值代入后, 并经过简化, 即可得到  $\frac{K_P}{K_T}$  的关系。

例如, 当  $\sigma_T = 2850$  公斤/厘米<sup>2</sup>时, 参阅(17')式:

$$\frac{K_P}{K_T} = \frac{1.088 \mu}{\mu_0 + 0.088 \mu}$$

当  $K_T$  之值由(4)式确定后, 就不难由上式求得  $K_P$  与  $\mu$  的关系为:



$$K_P = K_T \frac{1.088 \mu}{\mu_0 + 0.088 \mu}$$

$$= \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{K_{T1}}\right) \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1}} \cdot \frac{1.088 \mu}{\mu_0 + 0.088 \mu} \quad (7)$$

这样一来,就得到了  $K_P$  与  $\mu$  的关系曲线。但是为了找到一个不通过  $K_{T1}$  而直接由  $\mu$  来确定  $K_P$  的式子以简化计算,就需要找寻另外一个能与(7)式所示曲线很接近的曲线,并能满足  $K_P$  曲线的边界条件,拉乌普曼给出了下述两个可以代替(7)式的曲线:

$$K_P = K_{P2} - 0.7(K_{P2} - 1) \left[ 0.43 + \left( \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1} \right)^3 \right] \left( \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1} \right)^8 \quad (8)$$

或

$$K_P = K_{P2} - (K_{P2} - 1) \left( \frac{\mu_2 - \mu}{\mu_2 - \mu_1} \right)^5 \quad (9)$$

(8)式较(9)式更为接近于(7)式所表示的关系,但计算则略为繁重。

采用由(4)式及(8)式或(9)式所给出的安全系数  $K_T$  及  $K_P$ , 根据拉乌普曼引用数理统计学的论证,可以保证加钢筋混凝土结构的安全度比钢筋混凝土结构及混凝土结构的安全度还略高一些,这就说明加钢筋混凝土结构计算的基本原理是可靠的和谨慎的。

加钢筋混凝土结构的计算理论在我国很多水利工程中得到了广泛的采用,例如在黄坛口水电站的进水口直井胸墙施工栈桥桥墩及主厂房的防水墙设计中,应用加钢筋混凝土的理论进行计算的结果,就节约了大量的钢材。

在加钢筋混凝土结构中,实际上遇到的截面几乎都是矩形截面,而且由于截面较大,因此压应力一般都不太大,没有必要使用受压钢筋,因此我们以后在讨论受弯构件及偏心受压构件和大偏心受拉构件时,均指的是单筋截面(即只有  $F_a$ , 而  $F'_a = 0$ )。只是对于小偏心受拉构件及轴心受拉构件(全部截面产生拉应力),才讨论双筋截面。