

預应力混凝土理論与应用

周念先 張士鐸 曹敬康 合編

上海科学技术出版社



預应力混凝土理論与应用

周念先
張士鐸 合編
曹敬康

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书首先论述预应力混凝土的理论和计算,其中对材料的物理力学性能(包括耐疲劳度)以及各种预加应力法的特殊应力问题均作有详细的介绍和分析;在计算方面则对弹塑性理论进行了比较和商讨。随后介绍了预应力混凝土在工业与民用建筑中的应用情况。最后并对预应力混凝土圆形结构物和预应力混凝土桥梁亦作了详尽的叙述。

本书可供土建工程技术人员,大专师生,以及科学研究人员参考之用。

预应力混凝土理论与应用

周念先 张士鐸 曹敬康 合編

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市书刊出版业营业许可證出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

开本787×1092 1/18 印張16 16/18 字數380,000

1980年2月第1版 1980年2月第1次印刷

印数1—3,500

統一书号: 15119·1409

定 价:(十四)2.35元

序

前中国土木工程学会上海分会,为了配合国家建设的需要和适应多数会员的要求,曾于1957年的学术活动中有系统地举办了“预应力混凝土讲座”,并嘱我们分别担任了下列八讲:

- | | |
|---------------------|-----|
| 一、怎样比较深入地了解预应力混凝土 | 周念先 |
| 二、预应力混凝土的物理性能与安全系数 | 周念先 |
| 三、各种预加应力法及其特殊应力的分析 | 周念先 |
| 四、预应力混凝土杆件断面的选择及其计算 | 張士鐸 |
| 五、预应力混凝土杆件计算理论的商讨 | 張士鐸 |
| 六、预应力混凝土的工业与民用建筑 | 曹敬康 |
| 七、预应力混凝土圆形结构物 | 張士鐸 |
| 八、预应力混凝土桥梁 | 周念先 |

在讲解期间,曾将部分讲稿汇印成册。但因印数有限,未能满足要求。其后分会学术委员会要求我们将其余的讲稿陆续写出,以便成为比较完整的资料,并介绍给上海科学技术出版社出版,用以满足各方需要。

由于我们学校工作比较繁忙,致整理工作时作时辍,直至最近才编写就绪。同时鉴于一年多来国内在预应力混凝土技术方面大跃进的情况和国外最新发展均须及时加以反映,因此将原来的讲稿资料亦重新予以补充和修正,但以时间有限,见闻不广,遗漏和不到之处在所难免,尚望读者多多指正。

周念先 張士鐸 曹敬康 1959年3月

目 录

序

第一章 怎样比較深入地了解預应力混凝土	1
1-1 預应力的发明思想	1
1-2 最适宜于預加应力的材料	2
1-3 預应力在混凝土上的应用及其特点	4
1-3-1 預应力混凝土的基本作用原理	4
1-3-2 預应力对靜載弯矩的影响	5
1-3-3 預应力对剪力的影响	6
1-3-4 預应力对耐勞强度的影响	8
1-4 預应力存在于混凝土里的是力而不是材料	9
1-5 不用鋼或其他材料的預应力混凝土工程	10
1-6 全預应力、半預应力与預加自应力	13
1-6-1 全預应力与半預应力的定义	13
1-6-2 核心与限心	13
1-6-3 全預应力与半預应力的差别	15
1-6-4 預加自应力的定义	15
1-7 預应力混凝土工程的发展情况	15
1-7-1 在建筑物的大小方面	15
1-7-2 在材料方面	16
1-7-3 在理論方面	16
1-7-4 在施工方法方面	16
1-8 我国在預应力混凝土方面的成就与存在的問題	16
附录 1-1 預应力陶土	17
附录 1-2 无預应力的鋼筋在半預应力結構中的問題	26
第二章 預应力混凝土的物理性能与安全系数	33
2-1 預应力混凝土中所用材料的物理性能概述	33
2-2 混凝土的物理性能	33
2-2-1 容重	33
2-2-2 常溫与高低温度的影响	34

2-2-3	凝結与干燥	35
2-2-4	压缩(急变与徐变)	36
2-2-5	混凝土的各种弹性模量	39
2-2-6	水灰比	39
2-2-7	抗压强度	40
2-2-8	预应力混凝土的抗拉强度及其应变	41
2-2-9	粘着力与握裹力	43
2-2-10	混凝土在动载下的耐劳强度	43
2-2-11	对混凝土品质的要求	44
2-3	高强度鋼的物理力学性能	46
2-3-1	比例弹限与各种协定弹限	46
2-3-2	极限与弹限的提高与其相互关系	46
2-3-3	蠕变与徐舒	48
2-3-4	弹性模量与徐舒	48
2-3-5	耐劳强度	49
2-3-6	对鋼品质的要求	50
2-4	预应力混凝土的物理力学性能	51
2-4-1	各种预应力损失的分类、分析及其补救方法	51
2-4-2	在使用过程中预应力的变化与其后果	62
2-4-3	在試驗过程中预应力的变化和各種現象	63
2-5	安全系数	65
2-5-1	混凝土强度	65
2-5-2	鋼的原施应力	70
2-5-3	安全系数的选择	71
2-5-4	設計依据与試驗	73
2-5-5	强度单价与安全系数	74
第三章	各种預加应力法及其特殊应力的分析	75
3-1	各种預加应力法的区分	75
3-1-1	初次錨固	75
3-1-2	鋼的預加应力	77
3-1-3	鋼中拉应力的永久保持	81
3-1-4	錨头与管道注浆对预应力混凝土构件的影响	82
3-2	后張法中錨头下的集中应力	84
3-2-1	概念	84
3-2-2	近似計算理論要点	86
3-2-3	实用計算	88
3-3	先張法中的握裹錨固	89
3-3-1	概念	90

3-3-2 理論.....	92
3-3-3 实用結論与計算.....	94
3-4 先張法中鋼絲兩端的集中应力	97
3-4-1 垂直于鋼絲方向的張裂应力.....	97
3-4-2 混凝土的表面拉应力.....	98
3-4-3 粗鋼筋或鋼絲組之間的拉应力.....	99
3-4-4 鋼絲和鋼筋膨脹的影响.....	99
附录 3-1 預应力混凝土的耐勞强度	100
第四章 預应力混凝土杆件断面的选择及其計算	107
4-1 預应力混凝土杆件断面用古典設計方法設計的概述.....	107
4-2 預应力混凝土杆件断面基本形式及其剛度与强度.....	107
4-3 預应力混凝土杆件断面設計基本原則.....	109
4-4 預应力混凝土杆件断面受弯时的彈性应力平衡設計理論及举例.....	111
4-4-1 容許应力为定值的平衡設計	112
4-4-2 容許应力为变值的平衡設計	116
4-4-3 平衡設計总结	119
4-5 預应力混凝土杆件断面受弯时的彈性容許应力設計理論及举例.....	119
4-5-1 設計用的公式及步驟	121
4-5-2 彈性容許应力設計理論实例	122
4-6 預应力混凝土杆件断面設計的輔助說明.....	124
附录 4-1 应力平衡設計理論的断面特性	128
附录 4-2 断面形状常数	133
第五章 預应力混凝土杆件計算理論的商討	137
5-1 彈性理論概述.....	137
5-2 塑性理論概述.....	139
5-2-1 极限理論	139
5-2-2 极限破坏理論	141
5-3 現行各国預应力规范簡介及对比.....	142
5-4 設計注意事項.....	145
5-5 彈性理論驗算举例.....	149
5-6 极限破坏理論計算举例.....	153
5-7 彈塑性結合計算实例.....	156
5-8 彈塑性理論应用的商討.....	166
附录 5-1 美国公路总局預应力混凝土桥梁設計标准(后張法)	167
附录 5-2 英国預应力混凝土规范草案	168
附录 5-3 各国规范对預应力混凝土容許应力及安全系数的对比	171

第六章 预应力混凝土的工业与民用建筑	172
6-1 概述	172
6-2 工业厂房中的屋面构件	173
6-2-1 屋面版	173
6-2-2 屋面梁和屋面桁架	175
6-3 民用房屋中的梁和楼板	176
6-4 柱、基础及桩	180
6-4-1 柱	180
6-4-2 基础	181
6-4-3 桩	183
6-5 其他型式的屋面结构	184
6-5-1 刚架	184
6-5-2 薄壳	186
6-5-3 悬吊式屋面	188
6-6 螺旋形楼梯	192
6-7 建筑物的修复和加强	193
第七章 预应力混凝土圆形结构物	195
7-1 圆形结构物的概述	195
7-2 蓄液池的设计原理	196
7-2-1 弹性力学的精解	196
7-2-2 设计用简化图表及 N_s 、 M_s 的特解	206
7-2-3 预应力与非预应力蓄液池的讨论及设计注意事项	210
7-2-4 改善预应力蓄液池建筑方法的几点新措施	213
7-2-5 设计举例	214
7-3 预应力蓄液池的施工过程	218
7-4 预应力蓄液池的经济造价比较	221
7-5 预应力水管制造法分类	225
7-6 预应力水管的设计计算	225
7-7 预应力水管的制造过程	226
7-7-1 整体式水管	226
7-7-2 两阶段浇筑法制造的水管	228
7-7-3 自应力混凝土水管	230
7-7-4 先张法制造的水管	231
7-8 预应力水管的经济造价比较	231
7-9 圆形预应力混凝土结构物的新成就	232
附录 7-1 标准蓄液池的结构尺寸及材料用量	235
附录 7-2 蓄液池的应力设计图表	236

第八章 預应力混凝土桥梁	242
8-1 应用預应力混凝土建造桥梁的理由	242
8-1-1 弯矩方面	242
8-1-2 剪力方面	243
8-1-3 跨度方面	243
8-1-4 施工方面	244
8-1-5 品质方面	244
8-1-6 經濟方面	245
8-2 預应力混凝土桥梁的各种体系概述	246
8-2-1 簡支梁桥	246
8-2-2 連續梁桥	246
8-2-3 悬臂梁桥与吊桥	247
8-2-4 剛架桥	247
8-2-5 拱桥与弓桥	247
8-3 預应力混凝土桥梁的构造要点	247
8-3-1 簡支梁	247
8-3-2 連續梁	259
8-3-3 悬臂梁	264
8-3-4 剛架桥	267
8-4 預应力混凝土桥梁的设计要点	271
8-4-1 比較方案的选择	271
8-4-2 細部設計中的注意事項	274
8-4-3 靜定体系設計中的几个特別問題	277
8-4-4 超靜定体系設計中的几个特別問題	279
8-5 預应力混凝土桥梁的施工要点	280
8-5-1 預制与就地澆筑概述	280
8-5-2 預制梁的制造、运输、拼装与架設	282
8-5-3 預应力混凝土桥梁在就地澆筑中的特点	290
主要参考文献	292

第一章 怎样比較深入地了解預应力混凝土

自从預应力混凝土在我国推广以来,发展迅速,各地生产单位在制作預应力混凝土构件的同时,对預应力混凝土也有了一定程度的理論研究。这里要談的,是在比較深入一些的理論水平上結合实际来解釋有关預应力混凝土的一些問題,希望理論方面的提高,更能促进生产方面的发展。

为了使得叙述比較清晰起見,有些基本問題还是需要簡略地作一些回顾。

下面将先談預应力,然后再談預应力混凝土。

1-1 預应力的发明思想

虽然預应力的应用早已存在于我們熟知的事物中(例如:木車輪、木桶、自行車輪、炮箍等等),可是預应力在材料力学中的理論性創議还有着革命性的意义。

几百年来有关应力的习用公式为

$$\sigma' < KF < \sigma \quad (1-1)$$

式中: F ——作用力;

σ', σ ——两个极限应力,其中 σ 为压应力,用(+)号, σ' 为拉应力,用(-)号;

K ——有单位的系数,包涵着截面特征、結構体系、控制条件、安全系数等因素。

如果以 P 代表人为的預加于結構物的应力,則在假定 $P=0$ 的条件下,式(1-1)可以写成

$$\sigma' < KF + P < \sigma \quad (1-2)$$

可是在采用 $P=0$ 的几百年中,不知浪費了多少材料的潜在力,因为只要 $F=0$ (暂时不計結構物的自重影响),則应力也就等于零,乃致在許多时间里材料并不工作。

如果采用 $P \neq 0$,則在任何时候,無論有无力 F 作用着,只要材料中的任何一点和在任何方向中的应力都不超出 σ 与 σ' 两个限值,材料就有可能被充分的得到利用。

預应力的发明思想就在于突破了几百年来的旧观念,坚决否定了 $P=0$ 这一不合理的假定。

在以后的研究中,我們还可以看到 P 与 K 不但是 F 的函数,并且还是時間的函数。

1-2 最适宜于预加应力的材料

假定在受了力的材料中取某一个 AB 面, 并知在其中心 C 点上作用着一个力 CD , 如果 AB 的面积等于单位面积, 则 CD 力即为 C 点的应力。如此力与此面的法线 CN 成 ψ 角, 则有正应力 σ 与切应力 t , 如图 1-1。

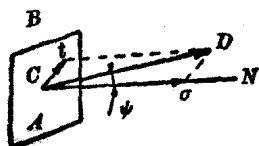


图 1-1

在保持 ψ 角不变的条件下, 如果 CD 不断增长, 则 CD 大达某一数值时, 该材料即遭破坏; 但如保持 CD 的大小不变而使 ψ 角不断变化, 该材料也可在某一角度下遭致破坏。因而某一材料的破坏强度也是 ψ 的函数。如让 ψ 在平面中变化, 则可得出成曲线形的 D 点的轨迹 (若 ψ 在空间变化, 则可得出曲线的旋转面), 如图 1-2。这条曲线就被称为该材料的“内在强度曲线” (即 Courbe Intrinsèque de la Résistance des Matériaux 或 Intrinsic Strength Curve)。

因为 D 点可以被 CD 的分力 σ 与 t 肯定, 所以这类曲线就可由属于 $f(\sigma, t) = 0$ 这一类型的公式来表示。实际上它就是一系列莫尔圆的包线, 所以对脆性材料来讲, 则为具有敞口形的曲线, 如图 1-3。

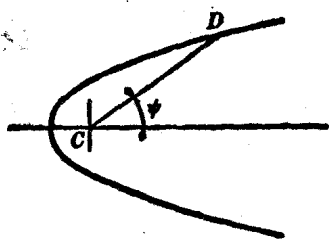


图 1-2

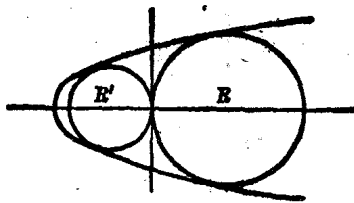


图 1-3

由于内在强度曲线的两肢基本上是拉应力圆 R' 与压应力圆 R 的公切线, 所以当此两圆的直径相差越大时, 曲线敞口的形状就越厉害; 也就是说: 如果能把应力圆推向曲线敞口的一边, 则圆的直径就越能放大, 所以对于脆性材料应当加的预应力——唯一有利的——是预压应力。单向加预应力时, 已可将耐拉的 R' 圆扩大到耐压的 R 圆; 如果双向预加应力, 则更可扩大 R 圆以减少剪力破坏的危险程度。

加了预压应力以后, 不但可以全部抵消了拉应力, 并且还能大大地减小主拉应力, 见图 1-4 及 1-12。

相反地, 对于弹性材料, 当拉应力圆的直径与压应力圆的直径相同时, 它的内在强度曲线则几乎是由两根平行线所组成, 如图 1-5。

由此看出, 不管把那个应力圆推向左边或右边, 它们的直径都不可能放大, 因此, 对于象钢这一类的弹性材料, 预加应力是没有好处的 (除了在能利用高强度钢而不产生很大变形和较经济等方面的好处外, 对于材料本身并无改善之处)。

而对脆性材料来说, 预加应力则可大大地提高材料的内在强度, 在现代土木工程

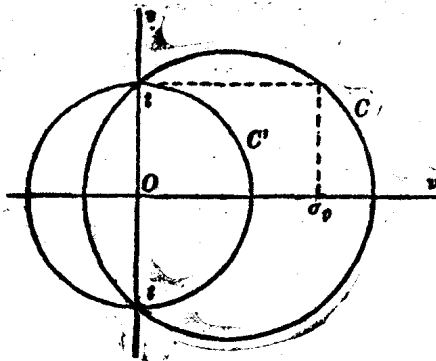


图 1-4

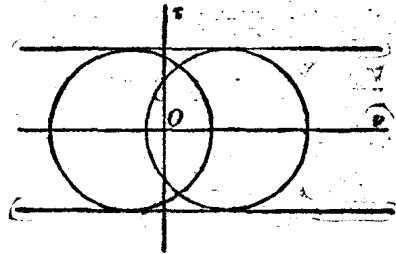


图 1-5

方面所用的脆性材料中,混凝土最适宜于预加应力。在房屋建筑中,陶土也适宜于预加应力,并且有广大的发展前途(详见附录 1-1)。

不仅由于混凝土是脆性材料,它的抗拉强度很低而抗压强度可以提高(400、500 乃至 1000 公斤/平方厘米),还因为它是比较耐久和比较便宜的材料。预加应力是很费钱的,所以只有对既便宜而又有很高抗压强度的脆性材料才适宜。

既然钢不适宜于预加应力,何以自行车轮和炮箍又是很好的预应力应用?

这是因为在自行车轮中的辐射向钢丝太细,为了防止挠曲,所以才预加拉应力于钢丝,使它经常受拉而不受压,于是不致挠曲。

至于炮管加箍,是由于靠管内壁的一层在很高的内压力下受到极大的张力,而靠管外壁的一层则受到较小的张力,如图 1-6,预应力是用来调整这个差别而不是用来增加材料的强度。

根据弹性力学,圆管受了内压力后,在管壁的厚度里,拉应力并非均匀分布,而是按照距圆心的距离 ρ 变化的:

$$t_{\rho} = \frac{-r^2 p}{R^2 - r^2} \left(1 + \frac{R^2}{\rho^2} \right)$$

当 $\rho = r$ 时得 $t_{\max}$, 当 $\rho = R$ 时得 $t_{\min}$, 其比值为

$$\frac{t_{\max}}{t_{\min}} = \frac{1 + (R/r)^2}{2} = \alpha$$

如 $R = 2r$, 则 $\alpha = 2.5$ 。若用 $\rho = \frac{R+r}{2}$, 在此 $\rho = 1.5r$, 则 $\alpha_{\rho} = 1.625$ 。

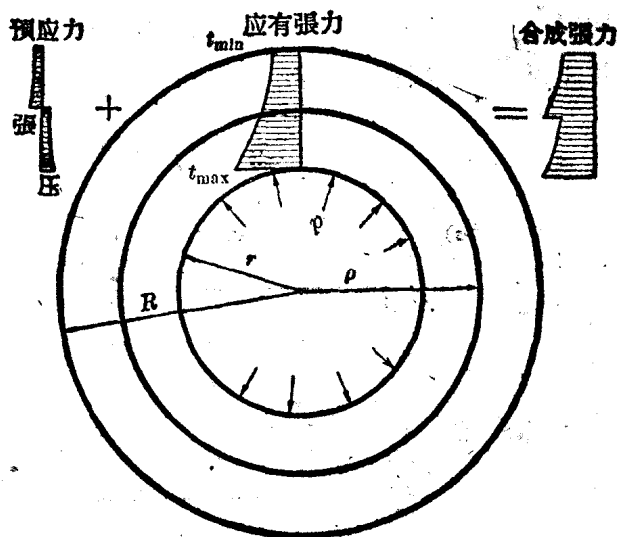


图 1-6 炮箍的预加应力作用

这里,预应力的作用仅在于调整这个差额,使得受拉力过大的部分减轻一些负担,而使受拉力较小的部分多负担一些而已,虽有好处,但远不及也不象预应力在混凝土中所起那样大的本质变化。

1-3 预应力在混凝土上的应用及其特点

在普通的钢筋混凝土建筑物中我们采用钢筋的作用是:一方面代替不能抗拉的混凝土来承受弯矩,另一方面帮助和代替混凝土来承受剪力。

在一般濒危的钢筋混凝土工程里,所看到的破坏情况,多半不是弯矩破坏,而是剪力破坏。所以把预应力应用到混凝土上时,不但要全部消除在弯矩作用下所产生的拉应力,并且还要消除或至少大大地减低在剪力作用下所产生的主拉应力。

让我们在回顾一下预应力混凝土的基本作用原理以后,再进一步去了解预应力所能产生的抗弯与抗剪作用。

1-3-1 预应力混凝土的基本作用原理

图 1-7 表示一根矩形截面的简支梁在受到轴向中心预加压力 N 以后,在全部截面中产生了 $\frac{1}{2} R$ 的预压应力,此项应力可以用来抵消日后由于承受活载时所产生的拉应力 $-\sigma$ (暂时假定梁的自重 $=0$),为了使得

$$\frac{1}{2} R - \sigma \geq 0 \text{ 和 } \frac{1}{2} R + \sigma \leq R$$

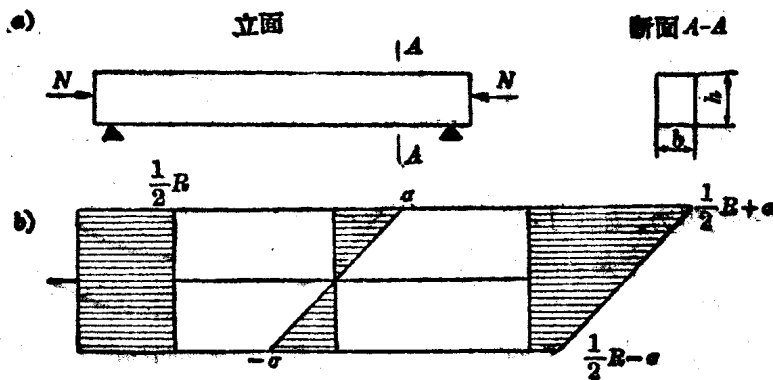


图 1-7

所以活载所能产生的应力 σ 最多只能等于 $\frac{1}{2} R$, 这就表明加得不适当的预应力反而消耗了一部分原有储备。由此看来梁的抗弯能力尚未能全部发挥。

如使预加力 N 的着力点下移,对截面重心产生 $h/6$ 的偏心,则从图 1-8 可以看出,无论是在受荷前或受荷后,梁的截面都被充分利用了。

在暂时不考虑梁的自重影响的情况下,预应力混凝土梁比钢筋混凝土梁固然强

得多,即与一般钢梁比较,它也有较高的利用指标。

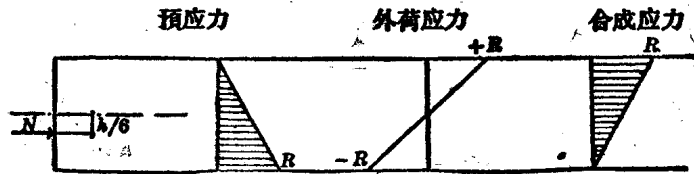


图 1-8

这是预应力混凝土梁中最可贵的一个特点——在空间与时间两方面都充分利用了材料的强度,——这种不可估计的经济收获,就是从否定了式 1-2 中的 $P=0$ 得来的。

1-3-2 预应力对静载弯矩的影响

静载中最主要的组成部分是自重,在一般预应力建筑物中(包括桥梁在内),中小跨度的自重是不会需要额外消费来负担的。

更简略地说:自重是可以免费负担的。

这个问题也不难理解,图 1-9 可以说明这点:

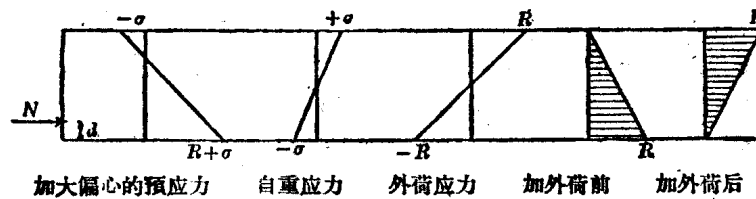


图 1-9

由图 1-9 看来,只需将 N 的着力点比图 1-8 中的地位更多向下移一些,使再加上一个偏心 e , 即可产生一个负弯矩 $N \times (-e) = M_g$ (设 M_g 为自重弯矩), 于是在自重的作用下(事实上自重是和预应力同时作用的),便得到合成预应力 $(0, +R)$, 亦即准备好承受外荷的预应力状态。

可是 e 不能太大,对于理论性的合力 N 讲来, $e < h/3 - d$ (d 为保护层), 实际上如果 N 力是由许多材料(例如钢丝,钢索……)来传递的,则最下一根应当满足保护层的要求。乃致 N 的着力点还要在净保护层之上。

因此,自重免费负担是有一定限度的,不过即使只能负担一部分,它依然比钢筋混凝土好得多,因为它可以节省很大一部分储备力量来为外荷服务。

当自重可以全部免费负担时,梁的腹设计全由外荷弯矩 M_p 来决定。

$$M_p = N \times \text{截面的核心}$$

对矩形而言,见图 1-10, 则为

$$M_p = N \times h/3 \quad (1-3)$$

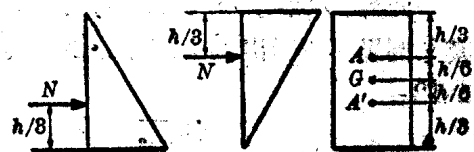


图 1-10

自重能免費負擔的程度可由 M_g 與 M_p 來確定, 即

$$\frac{M_g}{M_p} = \frac{h/3 - d}{h/3} = 1 - \frac{3d}{h} \quad (1-4)$$

如 $d \approx 0.1h$, 則 $M_g \approx 0.7M_p$ 。

如果兩種荷載都是均勻分布的, 則 $g \approx 0.7p$ (g 與 p 皆以公斤/米計)。

1-3-3 預应力對剪力的影響

討論簡支梁的彎矩問題時, 總先考慮跨中截面, 但是滿足跨中截面要求的條件未必對支點截面有利, 例如图 1-9 中的預应力, 在加大偏心的情況下, 梁的上緣便出現拉应力, 如果維持 N 的着力點一直到梁的兩端, 則支點上的 $M_g = 0$ 并不能抵消這種不利的拉应力, 即使將梁端的 N 着力點提高到图 1-8 的地位, 也不夠好, 雖然 N 可

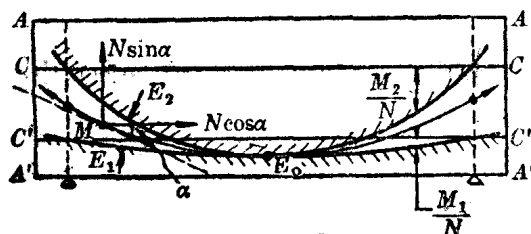


图 1-11 梁內 M 點受力示意图

以着力在梁高中部的三分之一內任何一點, 上下緣的应力虽都未曾超出限值, 但是為了梁端截面的受力均勻與便于布置傳力的构件(錨頭), 以及為了在抗剪方面發生最良好的作用起見, 宜乎將 N 在梁端截面中提高到重心附近, 如图 1-11。

設在通過 M 點的截面上所受靜載

剪力為 V_g , 活載剪力為 V_p , 則在預应力的影響下, 先後發生下列剪力:

$$\text{無外荷時} \quad V_1 = V_g - N \sin \alpha \quad (1-5)$$

$$\text{有外荷後} \quad V_2 = V_g - N \sin \alpha + V_p \quad (1-6)$$

經濟條件要求 V_1 與 V_2 方向相反而絕對值相等, 即

$$V_g - N \sin \alpha = -(V_g - N \sin \alpha + V_p)$$

$$\text{或} \quad N \sin \alpha = V_g + \frac{V_p}{2} \quad (1-7)$$

于是(1-5)與(1-6)兩式變為

$$V_1 = V_g - V_g - \frac{V_p}{2} = -\frac{V_p}{2} \quad (1-8)$$

$$V_2 = +\frac{V_p}{2} \quad (1-9)$$

由此可見, 如能按照(1-7)式選擇 $N \sin \alpha$, 則不但無須負擔靜載剪力 V_g , 并且對外荷剪力只需負擔一半, 如果 $V_g = V_p$, 則在總剪力中將減少 $3/4$ 。

此外, 水平分力 $N \cos \alpha$ 對梁產生了縱向壓应力 σ , 从莫爾圓里可以看出, 它可以大大地降低主拉应力 θ , 见图 1-12。

$$\theta = \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + t^2} = -\frac{1}{2}(\sqrt{\sigma^2 + 4t^2} - \sigma) \quad (1-10)$$

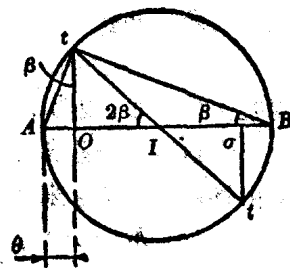


图 1-12

当 σ 大过 t 很多时, 可以略去根号中的 $4\left(\frac{t}{\sigma}\right)^4$ 不计, 并可写成

$$|\theta| = \frac{1}{2} \left[\sigma \left(1 + \frac{2t^2}{\sigma^2} \right) - \sigma \right] = t \times \frac{t}{\sigma} \quad (1-11)$$

由此可知, σ 越大, θ 减小的倍数也就越大, 但是在单向加应力的条件下, θ 永远不会等于零。若要完全消除主拉应力, 就要双向预加应力。实际上, 在梁轴竖面中可以预加应力, 其值并不需要多大即可。当 $\theta < 5 \sim 6$ 公斤/平方厘米时, 尤其是 $\theta < 2 \sim 3$ 公斤/平方厘米时, 主拉应力可以全由混凝土承受, 不必另置剪力钢筋(这点在理论上是完全正确的, 但在实际处理问题时, 还由于其他一些因素, 往往仍需布置少数剪力钢筋, 以策安全)。

根据上述两种作用看来, 在预应力混凝土梁中的残余主拉应力往往只是同样的钢筋混凝土梁中的 $1/5 \sim 1/10$ 。

梁内各个截面上的剪力与弯矩都不相同, 乃致储备的抗剪能力也不应相同, 所以应当合理地定出 M 点的轨迹, 从图 1-11 中看来, M 点轨迹可在它上下两条抛物线弯矩图的限度内选择适当的位置。即

$$y = \frac{M_0 + KM_p}{N} \quad (1-12)$$

$K=0$ 时, 符合下限, 即 $M_1 = M_0$; $K=1$ 时, 符合上限, 即 $M_2 = M_0 + M_p$ 。

当 α 角度不大时(实际的确是如此)

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{1}{N} \cdot \frac{d(M_0 + KM_p)}{dx} \quad (1-13)$$

$$\text{由于 } \frac{dM}{dx} = V, \text{ 所以 } \sin \alpha = \frac{V_0 + KV_p}{N} \quad (1-14)$$

根据式 (1-7) $N \sin \alpha = V_0 + \frac{V_p}{2}$, 则 K 应当等于 $\frac{1}{2}$,

亦即为了使得预应力抗剪发生最好的作用, 在 M_0 与 M_p 都是抛物线时, N 着力点的轨迹应当是它们之间的平均线。

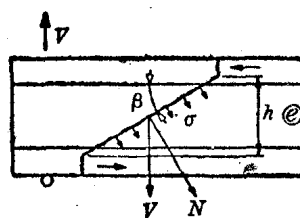


图 1-13

单纯抗剪的试验较难做, 所以试验结果也不多。根据有些不用弯起钢筋的工字梁的试验结果, 破坏时的裂缝比钢筋混凝土中的 45° 倾斜度要平缓得多, 约为 27° 左右。换言之, 由于 $\operatorname{tg} 45^\circ = 1$ 而 $\operatorname{tg} 27^\circ \approx 0.5$, 所以预应力混凝土梁的抗剪强度是钢筋混凝土梁的双倍。从图 1-13 中可以看出, 在剪裂面上的法向抗剪力 N 为 $\sigma \times l \times b$, 亦即 $\sigma \frac{h}{\sin \beta} b$, 而其垂直投影 V 则为 $\sigma \frac{h}{\sin \beta} b \cos \beta = \frac{\sigma h b}{\operatorname{tg} \beta}$ 。由此可以得知抗剪能力的大小与 $\operatorname{tg} \beta$ 成反比(式中: l 为斜裂缝长度; b 为腹板厚度; β 为斜裂缝对水平线的角度)。

1-3-4 预应力对疲劳强度的影响

承受动载的结构,如桥梁和机器基础等,必须具备相当高的疲劳强度。

如欲材料能很经济地被利用而又不会因疲劳而破坏,则应使材料经常受到很大的应力,但是应力变化幅度的百分比不应过大。这一点对钢筋混凝土和钢来说,都是比较难以做到的。因为这个应力增长的百分比是和动载成正比的。在 $M_p/M_{(g+p)}$ 的比值中, M_p 在钢筋混凝土中所占成分并非极大,在钢中就更小得多,而在预应力混凝土中,当动载尚未作用之前,在 M_p 与预应力共同作用之下,钢丝中的应力已是相当高的,乃致 M_p 的影响便很小了。例如在预应力混凝土桥里,钢筋应力在活载之下几乎无大变化,所以说预应力的存在,不但没有增加结构的危险,反而提高了它的疲劳强度。

对于预应力钢筋中的应力几乎无大变化的情况,从表面看来是较难理解的。但是实际上是如此,并且可以用下列简明的公式来证明:

在动载作用下,预应力钢筋中的应力增长为

$$\Delta\sigma_a = \Delta\varepsilon_a E_a$$

因为预应力钢筋与其周围的混凝土同伸缩,故

$$\Delta\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_b = \frac{\Delta\sigma_b}{E_{bt}}$$

这里要注意的, E_{bt} 为混凝土的瞬时弹性模量,因为在动载作用下,单位应变很小,这种弹性模量的数值对 400 级混凝土来说总在 400000 公斤/平方厘米以上,而高强度钢的 E_a 只不过是 2000000 公斤/平方厘米~1800000 公斤/平方厘米之间,因此

$$\Delta\sigma_a = \Delta\sigma_b \frac{E_a}{E_{bt}} \approx (4 \sim 5) \Delta\sigma_b$$

如果混凝土的最大边缘应力变化为 120 公斤/平方厘米~0,则在预应力钢筋重心高度上的应力变化将为

$$\Delta\sigma_b = 110 - 10 \text{ 上下, 也就是 } \Delta\sigma_b = 100$$

由此可知: $\Delta\sigma_a \approx 400 \sim 500$ 公斤/平方厘米。

这个应力变化的本身数值已不算大,另一方面同预应力钢筋中的永存应力比起来就更觉微小了。

在通常预应力钢筋用高强度钢丝的预应力混凝土梁中,钢丝的极限强度一般在 15000 公斤/平方厘米以上,其相应的永存应力也在 10000 公斤/平方厘米以上,所以 400~500 公斤/平方厘米的变化幅度只不过是 4~5% 而已。即使用了强度较低的钢,这个比值也不容易超过 10%。

这比钢筋混凝土结构与钢结构中的应力变化百分比要小得多。

所以只要钢中永存应力比它的极限疲劳强度(一般在一百万次下只比它的静力