

预应力混凝土设计理论的发展

——兼谈部分预应力混凝土

邵厚坤

1、从“材料”观点到“结构”观点的转变

预应力混凝土是在总结了钢筋混凝土结构使用中出现的种种缺陷的基础上发展起来的设计理论。裂缝的存在是钢筋混凝土不可克服的致命弱点,它不仅降低了结构的刚度、耐久性,同时还阻碍了高强度材料的应用。早期的一些研究预应力混凝土的学者,如狄辛格等,都曾从改善和提高钢筋混凝土性能来研究“预应力”的作用。理论和实践都证明,施加“预应力”确能改善钢筋混凝土的性能。由于当时人们对施加预应力后混凝土产生的收缩徐变的影响认识不足,施加上的“预应力”经过一段时间随之消失。因此,这种设想未能在工程实践中获得应用。法国工程师弗莱辛奈在预应力混凝土发展史上的功绩即在于他揭示了“预应力”失效的原因,提出了应用高强度预应力钢材施加“预应力”,使其产生足够的“有效预应力”,从而使预应力混凝土从理论到实践建立在可靠的基础上。弗氏提出的“有效预应力”是指足以抵消结构物内产生的拉应力的压应力,使结构物永远处于受压状态,即“全”预应力。他认为这样就改变了混凝土的性质,成为一种既能抗压又能抗拉的新型

材料,即预应力混凝土。这就是所谓的“材料”观点,也是弗氏始终坚持“全”预应力混凝土和钢筋混凝土之间不存在任何折衷方案的基本理由。

1945年英国工程师阿勃雷斯兴建伦敦电气化铁路几座跨线桥时,由于桥下净空所限,为降低梁高,提出了容许混凝土在使用状态下出现一定限度的拉应力,即“部分预应力混凝土”概念。这实质上是狄辛格等人的观点在新的条件下的发展。他认为所谓“全”预应力是有条件的,也就是说不出现拉应力是以某个荷载阶段为前提的。特别是活载,不论铁路和公路,变异性是很大的。我们不能保证在任何荷载条件下都不出现拉应力,但可以保证在一定荷载条件下是“全”预应力。这可以说是“预应力度”概念的雏型。这个“部分预应力”概念的提出是对“全”预应力观点的首次冲击。鉴于当时对预应力混凝土出现拉应力,甚至出现裂缝之后的性能研究尚不充分,加之受“材料”观点的束缚,相当长的一个时期,未被工程界在理论上予以接受,即使被接受也只是作为权宜之计,看成是预应力混凝土家庭里的“次品”。1962年,美国林同炎教授创立了用预应力混凝土结构设计的“荷载平衡”理论,从力学机理上揭

示了“预应力”的特征,即“预应力”是施加于结构的用于平衡全部或部分外荷的反向荷载。这是对“材料”观点的再次冲击,它促使人们从结构观点来探讨预应力混凝土的机理。此后,一些用于计算预应力混凝土结构的反拱、超静定结构的“次内力”的“等效荷载法”,实质上都已将“预应力”当作一种荷载来处理结构问题。长期的争论使人们认识到预应力混凝土实质上是运用了预应力技术从而改善和提高了钢筋混凝土结构性能。其实,人们运用预应力技术来改变结构物受力性能的例子屡见不鲜,最通俗的就是木桶的箍。工程实践中常见的拱桥调整应力,炮筒外壳预加热再套合等等均属运用预应力技术的现象,不过施加预应力的方式和运用的场所不同罢了。进入70年代以来,人们运用预应力技术创造出许许多多的新型结构,斜拉桥就是显著一例。林同炎教授运用预应力技术对坦拱施加预应力以平衡拱上荷载,建成了跨度达280英尺(85.3米)的旧金山YBC地下商场。广东南海县运用预应力技术平衡拱推力在平原河网地区建成了跨度200米的自锚式中承拱。人们运用预应力技术对一些结构物进行加固,特别是近来兴起的体外预应力结构,都充分说明了预应力是一种改变结构受力性能的手段,是一项技术,将它应用于混凝土结构,就成了预应力混凝土。这种从结构观点出发看待混凝土和钢筋混凝土统称为结构混凝土,它包含了从混凝土到预应力混凝土整个系列,成为混凝土结构设计的主流。

从“材料观点”转变到“结构观点”有

利于统一混凝土结构设计方法。结构设计的目的在于保证结构物的使用性能,即保证结构物在使用期间不丧失承载能力,不出现过大的变形以及具有一定的耐久性。一个结构物要施加多少预应力也应该从这个基本观念来作出抉择,只要满足使用功能,应该说结构物就是可靠的。因此,合理地选择“预应力度”,即施加预应力的程度,是设计预应力混凝土结构的出发点,而不应该有“全”和“部分”之分,因为它们在使用功能方面的可靠程度是同级的。

2、满足使用功能是结构设计的目标

任何事物都存在两面性,有利必有弊,这是事物的规律,人们总是不断地在兴利除弊过程中促使事物发展的。预应力混凝土结构的应用也是如此。预应力混凝土的应用开创了钢筋混凝土结构的新纪元,极大地扩展了钢筋混凝土结构的使用范围,提高了钢筋混凝土结构的使用性能,但同时通过几十年的实践也暴露出不少问题。这些问题导致人们认识到合理地施加预应力的重要性。很长一个时期,受传统的“材料”观点的束缚,人们设计预应力混凝土结构,片面强调抗裂,不容许混凝土出现拉应力,更不容许开裂。这种片面追求“全”预应力的观点,可以说与没有认识预应力的性质有关。人们往往注意的是外部荷载,而忽略了预应力也是荷载,不过是内部的反向荷载而已。外部荷载中的活载,它的量和作用时间和次数都是变化的,只有恒载和预应力是基本不变的。如果我们从“全”预应力观点来设计结构物,势必使结构物在最不利荷载组合下都不出现拉

应力。这在活载比例较大的情况下是很不利的。举一个例子,笔者曾在林同炎教授指导下设计一座位于飞机场跑道上的跨度 12 米小桥。跑道需降落大型客机,但每天降落次数仅 4—5 次,荷载极大,几达恒载的 3—4 倍。在这种情况下,如果采用“全”预应力结构,必然有大量荷载不能平衡,从而在恒载作用下导致结构物不断起拱,严重影响跑道的平顺度。但采用钢筋混凝土结构,配筋量太多,裂缝难以控制。在这种情况下选用了部分预应力结构,使施加的预应力平衡掉恒载,结构在恒载作用下基本上处于中心受压状态,从而避免了由于混凝土徐变引起的梁的拱起,保证了使用性能。虽然活载作用下出现拉应力甚至开裂,但由于按大偏心受压构件布置了普通钢筋,控制了裂缝开展(应该说,裂缝只有在活载作用下才会出现,活载卸除后即行闭合),且活载作用次数极少,所以,结构物在使用期间得以基本上处于不开裂状态。

设计者们往往把注意力放在承载能力(疲劳强度也是承载能力)而对变形问题有所偏废。可是,有些结构物却需要从控制变形出发来考虑其使用性能,也就是使用阶段极限状态成为控制因素,例如无碴无枕铁路桥梁,从八十年代中期起国内有关单位进行了大量试验研究,七十年代曾在襄渝线、青藏线等线路上应用了数十孔。但由于按“全”预应力设计,上拱度问题难以控制,轨面高度又受扣件调高量所限难以按规定的线路标准调整。从而造成运营单位维修养护的困难,有的梁不得不换下来以有碴桥面替

代。笔者认为这类问题通过合理地选择预应力度来控制徐变变形应该说是不得到解决的,何况日本、德国的城市轻轨铁路都这样做了。

从结构物的使用功能出发合理地选择预应力力度,给设计者提供了广泛的回旋余地,必将促进预应力混凝土结构的发展。前国际桥协主席 Thurlimann 教授于 1982 年中美桥梁和结构工程会议上指出:从设计上讲部分预应力混凝土设计理论将是今后预应力混凝土结构发展的理论支柱(他讲的部分预应力混凝土,从广义上讲即是合理地选择预应力度),笔者认为他所持的根据即在于此。

3、结构设计理论的统一

预应力混凝土结构构件设计,本质上属于偏心受压构件设计。但它在以下几点与一般的偏心受压构件不同:1)这个偏心压力不是从外部加上去的而是一组由截面上的预应力筋中的拉力和截面上的混凝土压力自相平衡形成的等效内力。因为是等效内力,这个力必然作用在预应力筋的重心上。2)随着外荷载的作用,这个力的作用点将向截面上方或下方移动(视外荷产生的弯矩符号而异,正弯矩向上、负弯矩向下),亦即引起偏心距的改变。3)这个等效内力(扣除预应力筋中的各项损失后)基本上是常量。我们说“基本上”是略去了荷载作用下处于受拉区预应力筋的拉应力的增量(见第三部分),这个增量在截面未开裂前,将使混凝土压应力增加,从而推迟拉应力出现的阶段。但此影响对“全”预应力状态截面应力变化的影响不大可以略去,对开裂后的截面应力计算则此影响必须计

入。从当今的预应力混凝土结构截面应力计算理论来看,实质上就是钢筋混凝土大偏心受压的计算理论,不过随着荷

载阶段不同,偏心值改变而已。从偏心值变化(图 1)这个角度来看“全”预应力在恒载和最不利荷载作用下, 偏心值则位

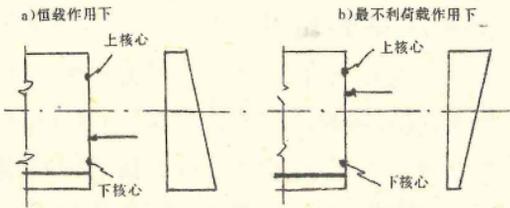


图 1-1: “全”预应力混凝土

于核心范围之内,而“部分”预应力则在恒载作用下偏心值仍位于核心范围之内(即所谓恒载下不得消压),而在最不利荷载作用下偏心值将超出核心范围,即产生拉应力。如拉应力控制在容许值之内,截面尚未开裂,计算时仍可采用与偏心值位于核心范围之内的同样方法处理。这就是目前所定义的 A 类部分预应力混凝土构件。如拉应力超出容许值,则认为截面已开裂,应按不计受拉区混凝土的钢筋混凝土大偏心受压构件计算。这就是目前所定义的 B 类部分预应力混凝土构件。由此可见,从“全”预应力到部分预应力甚至钢筋混凝土,其计算理论是统一的。因而,从合理选择“预应力力

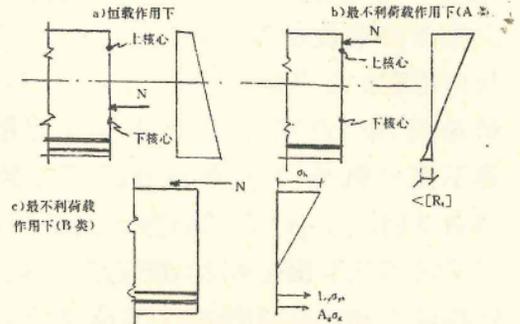


图 1 图 1-2: “部分”预应力混凝土

度”出发来设计预应力混凝土结构,无论从理论到实践,其可靠性是无容置疑的。

4、截面开裂后偏心压力的计算

截面内拉应力不超过容许值的 A 类部分预应力混凝土构件,前面说过,由于可认为全截面仍起作用,其计算方法仍与“全”预应力混凝土构件相同。容许开裂的 B 类预应力混凝土构件,由于此时受拉区混凝土退出工作,直观上看,其性质如同大偏心受压构件。实质上,因为压力是通过施加预应力后在结构内的截面上形成的等效力,对外力来说,它并未改变结构物受力的性能。所以,它的计算还有别于一般的大偏心受压构件。这个区别,就在于预应力筋中力的变化。今对此

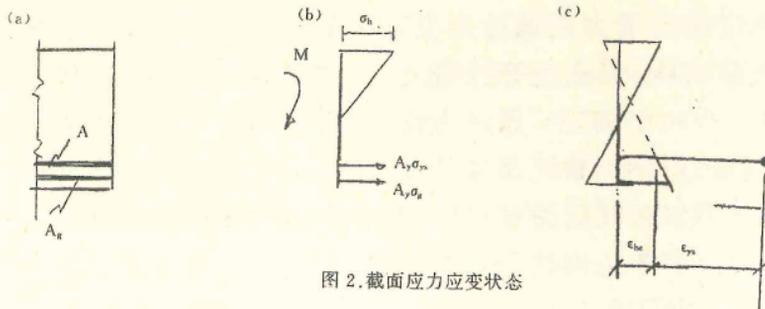


图 2. 截面应力应变状态

问题作一说明。设如图 2 所示的截面上作用有弯矩 M 后,其受拉区退出工作,形成图 2(b)所示的应力状态。而在梁体开裂之前的任一荷载状态,截面的变形如图 2(c)中的虚线所示,开裂后转换为图 2(c)中的实线,因为截面变形从虚线转为实线过程中,构件中混凝土压应力逐渐消失,而预应力筋中的压应力却随之增加。在截面未开裂前,预应力筋中获得的拉应力增量,在截面上必须与混凝土中的压应力平衡。因此,欲使混凝土中的预压应力消失,根据预应力筋重心水平线上预应力筋和混凝土之间的变形协调原理

(因为两者之间有粘着力,如无粘着力,例如应用无粘结筋,此关系需另行推算)预应力筋在外荷作用下必须等于相应于该处混凝土压应变的应变增量。

如图 2(c)所示, ϵ_{ys} 和 ϵ_{hc} 分别为开裂以前某一荷载阶段预应力筋中的拉应变和相应于该处的混凝土压应变。随着外荷的增加, ϵ_{ys} 逐渐增大, ϵ_{hc} 逐渐减少直至为零,达到消压状态。下面将证明,不论虚线以某种荷载状态为准, $\epsilon_{ys} + \epsilon_{hc}$ 始终为一常量。这就给按大偏心钢筋混凝土受压构件计算开裂后截面应力所需确定的轴压力值提供了准则。

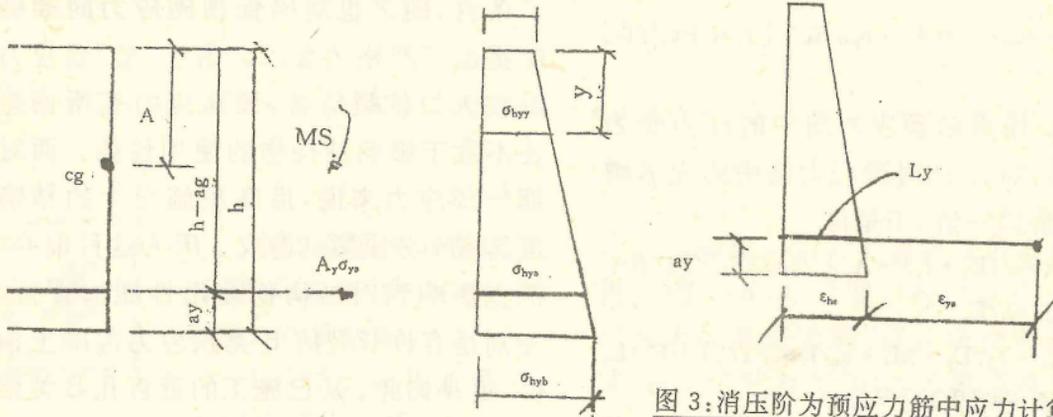


图 3: 消压阶为预应力筋中应力计算简图

如图 3 所示,设在弯矩作用 M_s 作用下 (M_s ——任一荷载阶段产生于截面中的弯矩),在开裂之前,混凝土上、下缘应力分别为 σ_{hyt} 和 σ_{hyb} ,相应于预应力筋中的应力为 σ_{ys} 。根据力系平衡方程得:

$$\sum H = 0 \quad A_y \cdot \sigma_{yt} = \int_A \sigma_{hty} dA \quad (1)$$

对顶部取矩 $\sum M_t = 0$

$$A_y \cdot \sigma_{ys} (h - a_y) = M_s + \int_A \sigma_{hty} \cdot y dA \quad (2)$$

$$\sigma_{hty} = \sigma_{hyt} + (\sigma_{hyb} - \sigma_{hyt}) / h \cdot y \quad (3)$$

将式(3)式代入式(1)(2)并注意

$$\int_A y dA = A \cdot \bar{y} \cdot \int_A y^2 dA$$

$$= I_0 + A \cdot \bar{y}^2$$

于是式(3)和(2)转化成

$$A_y \sigma_{ys} = \sigma_{hyt} \cdot A (1 - \bar{y}/h) + \sigma_{hyb} \cdot A \cdot \bar{y}/h \quad (4)$$

$$A_y \sigma_{ys} (h - a_y) = M_s + \sigma_{hyt} [A \cdot \bar{y} - (I_0 + \bar{A} y^2)/h] + \sigma_{hyb} (I_0 + \bar{A} y^2)/h \quad (5)$$

$$\text{解之得 } \sigma_{hyt} = A_y \cdot \sigma_{ys} \cdot [1/A - e_0 \bar{y}/I_0] + M_s \cdot \bar{y}/I_0 \quad (6)$$

$$\sigma_{hyb} = A_y \cdot \sigma_{ys} \cdot [1/A + e_0 (h - \bar{y})/I_0] - M_s \cdot (h - \bar{y})/I_0 \quad (7)$$

预应力筋重心处的混凝土应力

$$\sigma_{hys} = \sigma_{hyt} + (\sigma_{hyb} - \sigma_{hyt}) / h \cdot (h - a_y)$$

$$= A_y \cdot \sigma_s \cdot [1/A + e_0^2/I_0] - M_s \cdot e_0/I_0 \quad (8)$$

式中 $e_0 = h - a_y - \bar{y}$, 即预应力筋的偏心距。

注意到, 以上推导公式(6)~(8)时, σ_{ys} 是相应于 M_s 作用下预应力筋中的应力。它包括两部分: 其一为初始预应力(即扣除损失后的有效预应力) σ_{yo} , 其二是在 M_s 作用下的应力增量 $\Delta\sigma_{yo}$ 。 σ_{yo} 应是一已知值, $\Delta\sigma_{ys}$ 则不然, 它是 σ_{yo} 和 M_s 综合的结果。应用叠加原理, 仅有预应力作用时, 预应力筋重心处的混凝土压应变为

$$\epsilon'_{hy} = \epsilon_{hys}/E_h = A_y \cdot \sigma_{yo}/E_h \cdot [1/A + e_0^2/I_0] \quad (9)$$

而当 M_s 作用后预应力筋中的应力变为 $\sigma_{ys} = \sigma_{yo} + \Delta\sigma_{yo}$ 。此时预应力筋中的变形增量必须协调一致, 于是得

$$M_s \cdot e_0/(E_h \cdot I_0) - A_y \cdot \Delta\sigma_{yo}/E_h \cdot [1/A + e_0/I_0] = \Delta\sigma_{yo}/E_y$$

$$\Delta\sigma_{yo} = E_y/E_h \cdot M_s \cdot e_0/I_0 \cdot [1/(1 + E_y/E_h \cdot A_y(1/A + e_0^2/I_0))] \quad (11)$$

求得 $\Delta\sigma_{yo}$ 后, 即求得相应于 M_s 作用下预应力筋中的拉应变为

$$\epsilon_{ys} = \sigma_{ys}/E_y = (\sigma_{yo} + \Delta\sigma_{yo})/E_y = \sigma_{yo}/E_y + M_s \cdot e_0/E_h I_0 \cdot [1/(1 + E_y/E_h \cdot A_y(1/A + e_0^2/I_0))] \quad (12)$$

将式(10)和式(12)相加经化简后得

$$\epsilon_{he} + \epsilon_{ys} = \sigma_{yo}/E_y + \sigma_{yo} \cdot A_y/E_h \cdot (\frac{1}{A} + e_0^2/I_0) \quad (13)$$

可见 $\epsilon_{he} + \epsilon_{ys}$ 为一常量, 式(13)中的第一项为有效预应力产生的拉应变, 第二项则为消压时, 预应力筋所获得的拉应变增量。于是, 消压时, 预应力筋中的拉力, 即截面中的等效偏心压力为

$$N = E_y \cdot (\epsilon_{he} + \epsilon_{ys}) \cdot A_y = \sigma_{yo} \cdot A_y \cdot [1 + n \cdot A_y(\frac{1}{A} + e_0^2/I_0)] \quad (14)$$

其中: σ_{yo} 为初始预应力, $\sigma_{yo} \cdot A_y(1 + e_0^2/I_0)$ 为预应力重心处的混凝土有效压应力。所以 N 值实质上是有效预应力与消除预应力重心处的压应力预应力筋中获得的应力增量。求得 N 值后, 以下的计算即可按钢筋混凝土大偏心受压构件进行。

5. 加强施工控制和试验研究, 促进预应力结构的发展

以结构观点来设计预应力混凝土构件固然给设计者优化预应力的取值提供了条件, 随之也对确保预施应力的准确度提出了严格的要求。由于“全”预应力有较大的抗裂储备, 预施应力有所偏差还不致于影响结构物的使用性能。而对部分预应力来说, 提高预施应力的精确度具有十分重要的意义。因为这种偏差, 严重影响到对结构物使用性能的评价。特别是容许开裂的 B 类预应力混凝土构件, 更是如此。从已施工的近百孔 B 类梁来看, 静载试验结果有的差别悬殊。当然, 其中有检验方法不完善的一面, 更主要的是施工质量控制不善。例如: 90—92 年贵溪生产的跨度 24 米和 32 米梁, 静载试验加载至设计荷载均未开裂(这可能与未计入开裂前预应力筋的增量有关)。孙口黄河桥引桥所用跨度 24 米梁加载至设计荷载亦未开裂。深圳 III 线铁路高架桥所用跨度 10 米梁, 在进行静载破坏试验过程中测得其开裂荷载较设计大 20%。可是京九线店子干渠大桥所用的跨度 24 米整孔箱梁, 前几次静载试验都表明预应力度偏低未满足设计要求。经

施工跟踪检测,发现产生预应力不足的原因在于:1)锚夹片摩阻过大,设计值为张拉力的2.5%,实测值达8.4%;2)管道摩阻较设计值大13%。这就严重影响了张拉值的准确度。此后,调整了张拉力,才解决了此问题。因此,在施工过程中必须严格控制管道的平顺(管道摩阻增大基本上与此有关),同时应设法消除锚夹片的摩阻(因为此项损失在进行管道摩阻试验时是无法测定的),并研究在施工过程中监测预应力筋应力状态的手段,把预应力值控制住了,理论和实践才能真正达到统一,否则,即使按正确的理

论设计的结构物,也将由于施工质量控制不佳失去其应有的价值。

预应力混凝土设计理论的更新,相应地会提出许多需要进一步研究的问题。国外围绕这方面正在进行大量的工作以促使理论更趋完善。我国铁路上由于历史条件的限制,观念上尚未更新,因而在这方面的研究与国外比起来相形见绌。但愿加强这方面的研究以促进预应力混凝土在我国铁路桥梁上取得更大的发展。

邵厚坤:中国工程设计大师



本刊编辑部邮售以下书籍(邮寄费另加收10%),欢迎选购。

1、《岩土锚固工程技术的应用与发展》16K精装本,售价:41元

该书为国际岩土锚固工程技术研讨会论文集,共收入包括日本、德国、瑞士、奥地利、俄罗斯及中国的

二、三、四次全国岩土锚固学术会议论文集,共收入论文87篇。内容包括:岩土锚固技术的最新进展、理论研究与现场测试、施工工艺与工程设计、隧道与地下工程的锚固、边坡锚固与滑坡治理、深基坑支护、坝体与闸墩锚固、锚固材料、锚固机具和测试仪表等,并有国内重点工程及各大典型岩土锚固工程实例,可供水电、建筑、铁道、公路、冶金、煤炭、地矿、军工等部门从事岩土锚固工程设计与施工的技术人员参考。全书共61万字,人民交通出版社1996年10月出版。

的学者和专家所撰写的60多篇论文,涉及岩土锚固技术领域的各个侧面,基本上反映了当前国内外岩土锚固技术的新进展与新成就。全书共51万字,万国学术出版社1996年11月出版。

2、《岩土锚固工程技术》16K简装本,售价:35元

该书为中国岩土锚固工程协会第