体外预应力混凝土结构的预应力损失估算[3]

熊学玉　顾　炜　　雷丽英

(同济大学 预应力研究所　上海　200092)　　(建筑部标准定额研究所　北京　100835)

摘　要: 体外预应力结构的构造形式及施工方法与有粘结或无粘结预应力结构有较大差别,因此,其产生的预应力损失也不同。结合体外预应力结构自身特点,对其设计阶段预应力损失的估算进行了探讨,并提出了相关的设计计算建议。

关键词: 体外预应力　预应力损失

THE EVALUATION OF PRESTRESSING LOSS IN EXTERNALLY PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURE

Xiong Xueyu　Gu Wei

(Research Institute of Prestress, Tongji University　Shanghai　200092)

Lei Liying

(Research Institute of Standards & Norms of Construction P. R. China　Beijing　100835)

Abstract: The structure and construction method of externally prestressed structures differ greatly from structures with bonded or unbonded tendons, therefore generate the difference in prestressing loss. In this paper, the calculation method of prestressing loss are discussed, and applicable formulae are suggested with regard to the characteristic of external prestressing.

Keywords: external prestressing　prestressing loss

在进行预应力混凝土设计时,需要考虑由于施工因素、材料性能和环境条件等的影响,钢筋中的预拉应力将逐渐减少,这种减少的应力就称为预应力损失。采用体外预应力技术的新建结构和加固结构在结构体系构造形式、施工方法等方面与常规的体内有粘结和无粘结预应力结构有较大差别,因此,其预应力损失的计算方法也有相应的差别。参考现行混凝土规范[1],在体外预应力结构中应考虑下列因素引起的预应力损失:

1) 锚具变形和预应力钢筋回缩引起的预应力损失 σ_{l1};2) 预应力筋的摩擦引起的预应力损失 σ_{l2};3) 预应力钢筋的松弛引起的预应力损失 σ_{l4};4) 混凝土的收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5}。除此之外,还应考虑使用期间的温度损失 σ_{l3}。引起这些预应力损失的原因很多,影响因素复杂,一般应根据试验数据确定,如无可靠试验资料,可按下列方法进行估算。

1　锚具变形和预应力钢筋回缩引起的预应力损失

由锚具变形和预应力钢筋回缩引起的预应力损失可按下列公式计算[1]:

$$\sigma_{l1} = \frac{\alpha}{l} E_s$$

式中　l ——张拉端至锚固端之间力筋的有效长度,直线型布筋(包括通长布置和局部布置、水平布置和倾斜布置)时取张拉端至锚固端间直线距离,折线型布筋取各段力筋长度和;

α ——张拉端锚具变形和钢筋回缩值;

E_s ——预应力钢材的弹性模量。

其中,α 和 E_s 的取值可依据混凝土规范。[1]

2　摩擦引起的预应力损失

力筋与转向装置之间的摩擦力大小取决于相互之间正压力的大小以及摩擦系数。体外预应力的摩擦损失主要为预应力筋纵向各转向装置处摩擦力之和。各转向装置处的摩擦力同样取决于各点的预应力筋与转向装置之间的摩擦系数以及对转向装置的

3　建设部《建筑结构体外预应力加固技术规程》规范编制的研究项目。

第一作者:熊学玉　男　1962 年 8 月出生　副教授　博士　副所长

收稿日期:2004 - 04 - 22

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

压力。

单个转向装置的摩擦损失为:

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con}\left(1 - e^{-\mu\theta}\right)$$

式中,θ为力筋轴心线之间的空间夹角,也可以近似地用力筋在各坐标平面上的投影夹角 θ_x、θ_z 叠加后计算(图 1)。实例计算结果表明,不同的叠加方式对得到的损失值具有不同的影响,直接叠加,即 $\theta = \theta_x + \theta_z$,得出的摩擦损失偏大[2]。建议采用:

$$\theta = \sqrt{\theta_x + \theta_z} \qquad (3)$$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con}\left(1 - e^{-\mu\theta}\right) \approx \sigma_{con}\left(1 - e^{-\mu\sqrt{\theta_x^2 + \theta_z^2}}\right) \qquad (4)$$

摩擦系数 μ 取值见表 1。同时也应当考虑到由于力筋在弯折点对转向块作用力较大,造成转向块的局部变形,可能会增大摩擦系数。建议按表中的上限取值,如有条件,最好采用实测结果。

表 1 摩擦系数 μ 的取值[3]

未经润滑的钢绞线对钢制转向块	0120～0125
涂抹油脂的钢绞线对钢制转向块	0116～0120
装在塑料管内的钢绞线对钢制转向块	0116～0120

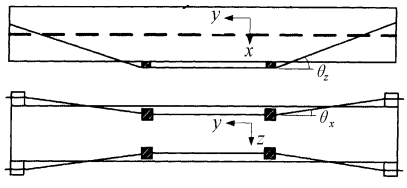


图 1 力筋在坐标平面上的投影夹角

布置多转向装置时,摩擦损失的精确计算应分段考虑力筋的实际初始张拉应力。从张拉端开始,第一个转向装置处的摩擦损失为:

$$\sigma_{l2,1} = \sigma_{con}\left(1 - e^{-\mu\theta_1}\right) \qquad (5)$$

第 i 段力筋的实际初始张拉应力为:

$$\sigma_i = \sigma_{con} - \sum_{j}^{i-1}\sigma_{l2,j} \qquad (6)$$

第 i 个转向装置处的摩擦损失为:

$$\sigma_{l2,i} = \left(\sigma_{con} - \sum_{j}^{i-1}\sigma_{l2,j}\right)\left(1 - e^{-\mu\theta_i}\right) \qquad (7)$$

实际工程中,有粘结和无粘结预应力结构的摩擦损失还受预应力筋与管道壁之间的刮碰作用影响,它与预应力筋长度有关,通常引入常数 κ,以附加曲率来处理。体外预应力筋与转向装置的接触长度一般说来比力筋长度小得多,刮碰作用影响可以忽略不计。但在另外一些情况下,如文献[4]中采用单端张锚(见图 2),力筋在非张锚端与转向装置有较长段的接触,且弯折角近 180°,在该处的摩擦损失应计入刮碰作用影响。

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con}\left(1 - e^{-(\mu\theta + \kappa x)}\right) \qquad (8)$$

此处的 x 应取力筋接触段的实际长度,而不是 x 方向上的投影长度。

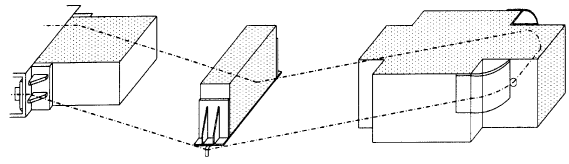


图 2 单端张锚体系示意

对有力筋在空间交叉现象的情况,应考虑先张拉和后张拉力筋之间由于摩擦引起的预应力损失,此时的预应力摩擦损失项应计入后张拉力筋,可以认为对先张拉力筋无影响。

3 钢筋松弛引起的损失

钢筋松弛损失的取值与预应力材料密切相关。现阶段体外预应力结构的力筋材料主要包括:普通松弛预应力钢丝或钢绞线,低松弛预应力钢丝或钢绞线,热处理钢筋等,其产生的松弛损失可根据规范规定取值,并注意区分不同张拉控制应力下的适用公式[1]。实际设计中体外预应力结构为保证可靠性,张拉控制应力取值一般较体内预应力结构为小,当 $\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} \leq 0.5$ 时,松弛损失可以不予考虑。

4 混凝土收缩与徐变引起的应力损失

新建体外预应力结构或新建结构因使用功能变更而需采用体外预应力技术补强,其徐变损失可以按规范中新建结构取值[1]。

尽管混凝土的徐变增长可延续数十年,但大部分在前 1～2 年内出现。徐变试验表明,应力持续时间为 5 年的混凝土徐变值是应力持续时间 30 年的 92 %。加载时混凝土龄期越长,起始徐变和极限徐变越小,已有试验表明,当加载时混凝土龄期为 365 天时,其单位徐变仅是龄期 28 天的 0.35～0.50[5];加载时混凝土龄期更长的情况下,该系数趋于稳定。因此可以认为,5 年以上的既有结构的混凝土收缩和徐变已基本完成。即可近似取混凝土收缩、徐变损失 $\sigma_{l5} = 0$。

对已建 5 年以内的结构,如有必要,可以根据工程特点选择合适的线性徐变计算理论按实际时间计算混凝土的徐变,然后根据该徐变值计算预应力的徐变损失值。

体外预应力施工时,通常要求对一片梁的多根力筋或多片梁的力筋同时张拉,但由于张拉设备的

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

限制,不可能对所有的力筋同时进行张拉。对多片梁分批张拉时,张拉顺序可由中梁开始,逐步向两侧边梁对称张拉,亦可由一侧边梁开始,逐片张拉。无论采用哪种张拉顺序,后张拉梁通过横隔梁的传递作用,对先张拉梁产生弹性压缩,引起先张拉梁的混凝土弹性压缩预应力损失。工程上可采取对先张拉钢筋超张拉或重复张拉的方法,调整各梁的预加力,使得各梁最后的实际有效预加力基本相等[6]。

各梁的实际张拉控制应力可按下式计算:

$$\sigma_{\mathrm{con},i} = \mu_i \sigma \tag{9}$$

式中 σ——单梁的设计张拉应力;

$\sigma_{\mathrm{con},i}$——第 i 片梁的实际张拉控制力;

μ_i——第 i 片梁的超张拉系数。

对于全结构整体工作的各主梁来说,后张拉梁引起的先张拉梁的预应力损失,表现为先张拉梁的拱度有所减少。即可以用分批张拉引起的各梁的跨中挠度的变化规律,来描述各梁体外力筋中预加力的变化。而各梁跨中挠度的变化规律,又可通过荷载横向分布系数来描述,这样就可通过荷载横向分布系数来计算各梁的超张拉系数。当计算张拉第 j 片梁对先张拉的第 i 片梁的影响时,可通过第 j 片梁对应的第 i 片梁的荷载横向分布系数 η_{ij} 来表示。超张拉系数可表示为:

$$\mu_i = 1 + \sum_{j}^{n} \eta_{ij} \tag{10}$$

式中 i——张拉筋所在的梁号,$i = 1, 2, \cdots, n$;

j——按序张拉时,尚未张拉的各梁号,$j \geq i + 1$,$j \leq n$;

n——横向主梁片数;

η_{ij}——张拉第 j 片梁对先张拉的第 i 片梁的影响量,即第 i 片梁对应的横向分布影响线的坐标。

计算表明,由梁的一侧逐片向另一侧张拉的超张拉系数要小于由中梁开始逐片向两边对称张拉时的超张拉系数。试验结果已证明了上述方法的正确性。但用上面公式计算张拉控制力时应注意被张拉钢筋的应力不应超过其控制应力的 1115 倍。否则,应采取降低分批张拉损失的措施,例如分阶段张拉。

经过超张拉或重复张拉工艺,可以认为分批张拉损失近似为零,且可以认为张拉后各梁的体外力筋拉力均能达到设计值。

5 温差引起的损失

由于体外预应力筋在梁体混凝土截面之外,当由于昼夜温差、季节温差等外界环境因素导致在使用阶段体外预应力梁的温度高于张拉施工时的温度,钢材与混凝土的线膨胀系数的差异将引起一项应力损失。此项损失可按下式计算[6]:

$$\sigma_{l3} = \left(\alpha_{\mathrm{p}} - \alpha_{\mathrm{c}} \right) \Delta t E_{\mathrm{s}} \tag{11}$$

式中 Δt——年最高温度差;

α_{p}、α_{c}——体外预应力筋和混凝土的线膨胀系数,如无实测资料时,可取 $\alpha_{\mathrm{p}} = 112 \times 10^{-5}$,$\alpha_{\mathrm{c}} = 110 \times 10^{-5}$。

由于体外预应力筋和混凝土的线膨胀系数相差较小,年最高温差一般也较小,因而该项损失的计算结果较小。

6 张拉控制应力的确定

张拉控制应力的大小是预应力结构设计中的一个重要问题。为充分发挥预应力筋的强度,张拉控制应力不宜定得过低。对体外预应力结构,特别是体外预应力加固结构,建议适当采用较低的张拉控制应力,原因在于:

首先,体外预应力结构使用中由于混凝土部分的变形会引起力筋的应力增量,张拉应力过大有可能使力筋内的实际应力接近材料极限强度,产生脆性破坏。

其次,力筋长期工作状态下的应力较低,对结构的可靠性有利。特别是在体外预应力加固工程中,既有结构本身力学特性的离散性较大,这一点就显得尤为重要。

第三,较低的应力有利于减小应力腐蚀。应力腐蚀通常与力筋材料的冶金敏感性、持续应力时间和环境等因素有关,体外预应力筋在锚固处、弯折处和拔丝操作中有可能会产生微裂,使用阶段表面防护不如有粘结或无粘结预应力筋,因此更易受应力腐蚀的影响。因为只有当拉应力大于力筋的应力腐蚀临界值时,应力腐蚀裂纹才会扩展,所以采用较低应力有利。

最后,在单根力筋中可以减小上文中提到的摩擦和松弛两项预应力损失。

此外,在转向块与力筋的接触区域,由于横向挤压力的作用和力筋弯曲后产生的内应力,力筋的强度将下降,这也是张拉控制应力选取中应考虑的问题。CEB2FIP 模式规范对体外力筋弯折处的曲率半径和转角作出限制[7],力筋弯折点的转角必须小于 15°,曲率半径 R_{tond} 应满足:

$$R_{\mathrm{tond}} > \alpha \Phi_{\mathrm{n}} N\mathrm{P}n \tag{12}$$

式中 α——系数,对光滑接触面,$\alpha = 20$;

Φ_{n}——钢绞线或钢丝公称直径;

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

N ——同一束预应力钢绞线或钢丝的根数;

n ——传递径向分力的预应力钢绞线或钢丝的根数。

如果不满足以上条件,要求进行试验确定预应力筋的强度。

在实际应用中,该要求无法得到满足的情况相当常见,在无试验依据时,有必要降低张拉控制应力。因此建议,在使用消除应力钢丝、钢绞线时的控制应力限值取为 $0.40 f_{ptk} \leq \sigma_{con} \leq 0.60 f_{ptk}$[4]。

各个预应力材料生产厂家也针对自己的产品提出了相关建议,表 2 分别列出了 VSL 公司、OVM 公司和 HVM 公司的建议取值。

表 2 力筋的最小半径 m

力筋规格	VSL	OVM	HVM	
			锚固区附近	转向处
7 <1512	*N*PA	210	310	210
12 <1512 和 5 - 19(VSL 钢筋束)	215	215	315	215
19 <1512 和 5 - 31(VSL 钢筋束)	310	310	410	310
27 <1512	*N*PA	315	415	315
37 <1512 和 5 - 55(VSL 钢筋束)	410	410	510	410

7 结 论

体外预应力结构中预应力钢筋总的应力损失为:

$$\sigma_l = \sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l3}$$

上述各项损失按其发生的时间可分为两组:

1) 预压前发生的第一批损失:

$$\sigma_l^{\mathrm{I}} = \sigma_{l1} + \sigma_{l2}$$

2) 预压后发生的第二批损失:

$$\sigma_l^{\mathrm{II}} = \sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l3}$$

一般说来,温差损失 σ_{l3} 数值较小,在设计人员有相关经验或实测数据的情况下,可以忽略不计。

通过以上分析可以看出,由于体外预应力结构在结构形式和施工方法上与有粘结和无粘结预应力结构有所差别,因而其预应力损失的产生原因、影响因素、计算方法都有特殊之处。本文通过对各项预应力损失的详细讨论,提出了符合体外预应力结构自身特点的损失计算方法,可以供相关人员参考使用。

参考文献

1 GB 50010 - 2002 混凝土结构设计规范

2 陈晓宝,等. 预应力混凝土结构中空间索线筋的预应力摩擦损失计算. 土木工程学报,2003,36(6):26～30

3 华毅杰,熊学玉,黄鼎业. 体外预应力结构加固设计方法的探讨. 见:世纪之交的预应力新技术. 北京:专利文献出版社,1998

4 华毅杰,熊学玉,刘华波. 体外预应力技术在加固和改造工程中的应用. 结构工程师,1999(4):38～41

5 过镇海. 钢筋混凝土原理. 北京:清华大学出版社,1999

6 孔保林. 体外预应力加固体系的预应力损失估算. 河北建筑科技学院学报,2002,19(3):27～29

7 Comité Euro2International du Béton. CEB2FIP Model Code. 1990

8 熊学玉,蒋志贤. 预应力摩擦损失的合理设计建议. 结构工程师,1997(4)

9 郑毅敏,熊学玉,耿耀明. 体外预应力混凝土结构设计若干问题的探讨. 工业建筑,2000,30(5):24～28

会 讯·

《第六届全国建筑腐蚀与防护学术交流会》征文通知(第 01 号)

为了定期交流我国在建筑腐蚀与防护领域的新成果、新经验和新动态,进一步推动防腐蚀新技术、新工艺、新材料的应用,本委员会定于 2004 年 10 月召开《第六届全国建筑腐蚀与防护学术交流会》,会议具体时间和地点及会议安排将于第 02 号通知中公布。本次会议交流内容比较广泛,征文内容如下:

1) 建筑腐蚀与防护综述及国内外最新动态。2) 建筑(钢结构、钢筋混凝土结构)防腐蚀设计及相关规范的经验交流与总结。3) 建筑防腐蚀新技术、新工艺、新材料的研究与应用(包括钢结构涂料、混凝土保护材料、阻锈剂、树脂地面材料、树脂玻璃钢材料、衬砌材料、阴极保护技术等)。4) 受腐蚀破坏的建筑的鉴定与检测方法。5) 受腐蚀破坏的建筑的加固修复新技术、新材料的研究与应用。6) 公路、铁路、桥梁、水利、电力等构筑物的腐蚀与防护技术。7) 奥运会场馆钢结构涂装技术。8) 古代建筑的防护修复技术。9) 建筑辅助设备、槽罐、管道等的腐蚀与防护技术。10) 融雪剂对道路、桥梁、地下构筑物的腐蚀影响及防护措施。

欢迎建筑腐蚀与防护有关的科技人员、管理人员积极投稿,凡录用论文均收入会议论文集。请先将 300 字左右的论文提要、作者简介及联系方式以邮件或电子邮件的方式于 2004 年 4 月 30 日前寄交大会筹备工作组。

联系地址:北京市海淀区西土城路 33 号　　**邮　编**:100088

中国腐蚀与防护学会建筑工程专业委员会　　**联系人**:王东林　张　剑

电　话:010282227241、82227255、82227253　　E2mail:naifeng @public. bta. net. cn

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.