

边坡加固机理探讨

孙学毅

(柳州欧维姆工程有限公司 柳州 545005)

摘要: 笔者根据参与的十几个岩土边坡加固设计、审查和施工体验对边坡加固中预应力锚索传力深度、自由段概念、削坡开挖边坡安全系数、群锚形成“岩壳”、补偿张拉等问题进行了讨论。文中介绍了边坡治理中开挖控制变形工法。工法的主要素为:安全监测、超前支护、分层分段开挖、及时进行坡面支护、加强边坡底部支护和施工工艺管理。文中着重讨论了预应力锚索钻孔中水泥砂浆芯柱受力分析,把问题归结为压杆稳定提出了预应力锚梁结构。该结构大大提高了预应力锚索的承载力。

关键词: 控制变形 岩壳效应 预应力锚梁

1. 现有边坡加固机理、加固手段综述

1.1 荷载性质与分布

据笔者所知,多数情况下设计者仅考虑重力荷载的作用——体力。确定体力的途径有地质调查、计算分析与人为推测认定一个假想滑动面,从而求算滑动力——极限平衡法则。

1.2 加固手段

目前公知的边坡加固手段主要有预应力锚索、预应力锚杆、锚杆、抗滑桩等。

(1) 抗滑桩

顾名思义,就是抗滑的结构。据笔者考证这是一种概念清楚、效果可靠的古典结构。在笔者设计、审查与施工过的边坡工程中,这是事后比较放心的一种结构。

(2) 锚杆

用于边坡加固的锚杆多采用全长粘结的螺旋钢筋水泥砂浆锚杆,杆体一般采用 $\phi 25 \sim \phi 38$ 螺旋钢筋。锚杆加固边坡的机理一般认为约束边坡体变形,同时杆体有一定的刚度为边坡体提供一定的抗滑力。

(3) 预应力锚杆

预应力锚杆是在锚杆外端施加一个预应力。预应力的作用是改善边坡表面岩体的受力状态,利用边坡内部稳定的岩体加固表面岩体。

(4) 预应力锚索

索体采用高强度、低松弛钢绞线,利用水泥砂浆将假想滑动面以下部分与钻孔壁全长粘

结,滑动面以上部分是自由的。假定锚索轴线与假想滑动面垂直,当给锚索施加一个预应力(正压力)后,锚索给边坡提供的抗滑力为:

$$P_{抗} = f \cdot p \quad (1)$$

式中 $P_{抗}$ —锚索的抗滑力;

f —摩擦系数;

p —锚索预应力。

2. 现有边坡加固力学模式的疑虑

2.1 应力传递深度讨论

给锚索预应力 P ,疑虑作用在假想滑动面上的正压力并不是 P ,而远小于 P ,现分析如下。

给锚索施加一个预应力,锚索对边坡的作用:

(1) 按平面问题考虑,可归结为半平面体在边界上受集中力^[1]。

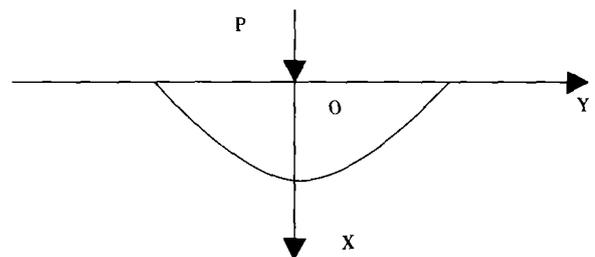


图1 半平面体边界上受集中力 P 力学模型

$$\sigma_x = \frac{2PX^3}{\pi(X^2+y^2)^2} \quad (2)$$

当 $y=0$ 时,

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi X} \quad (2)'$$

(2)' 式表明作用在边坡表面的集中力在边坡体内随着远离边坡表面距离而减小。

(2) 按空间问题考虑, 可归结为半空间体在边界上受法向集中力^[2]。

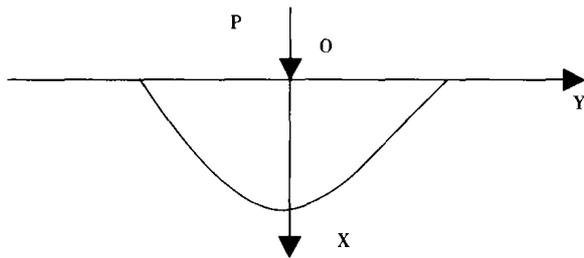


图2 半空间体边界受法向集中力P力学模型

这个问题布希涅斯克得出了公认的答案,

$$\sigma_x = \frac{3PX^3}{2\pi[(X^2+y^2)^{5/2}} \quad (3)$$

当y=0时,

$$\sigma_x = \frac{3P}{2\pi X^2} \quad (3)'$$

(3)' 式表明作用在边坡表面的集中力作为空间问题考虑, 在边坡体内随着远离边坡表面距离平方而减小。

水力部西北勘测设计研究院在李家峡水电站工程对预应力锚索传力深度进行了实测, 结果如下^[3]:

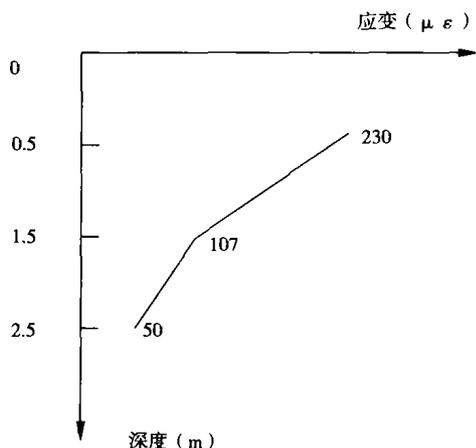


图3 李家峡600kN级预应力锚索岩体竖向应变与深度关系实测曲线

现场实测表明600kN级锚索传力深度约为2-4m, 1000kN级锚索传力深度约为3-8m, 3000kN级锚索传力深度约为3-10m。

冶金部建筑研究总院、长江科学院在三峡船闸高边坡锚索施工中对3000kN级锚索传力深

度进行了实测, 结果如下^[4]:

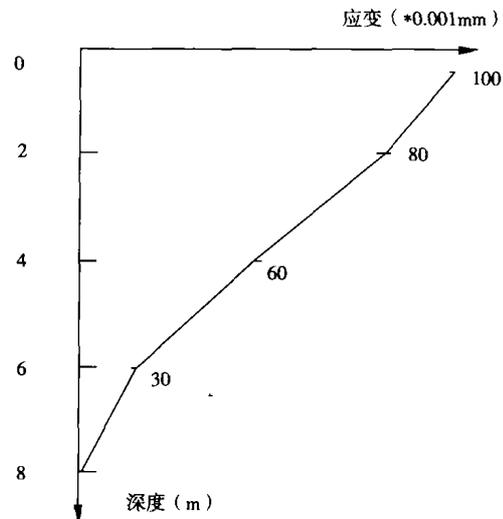


图4 长江三峡船闸边坡3000kN级锚索岩体竖向应变

2.2 自由段概念讨论

预应力锚索用来加固边坡工程, 其加固机理前提是边坡体存在一个假想滑动面。滑动面上的锚索体部分与孔壁之间没粘结力, 称之为自由段; 滑动面下面的锚索体与孔壁粘结在一起, 称锚固段。初期应用的锚索自由段张拉前不灌浆, 这种结构的锚索称为拉力集中型锚索。大约15年前刘玉堂把自由段部分的索体涂上黄油, 套上塑料管, 自由段与锚固段同时灌浆。这样, 张拉时自由段部分钢绞线仍然与孔壁之间没有粘结力, 但自由段的水泥砂浆柱与孔壁粘结, 这种结构的锚索称为改进拉力集中型锚索。

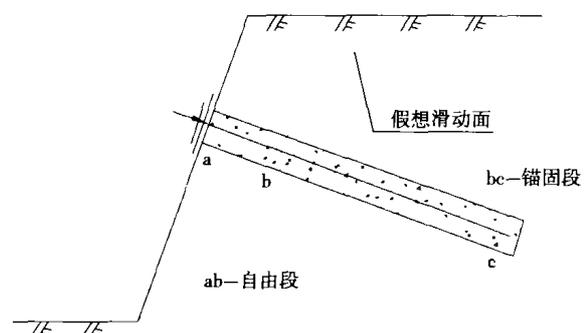


图5 边坡体假想滑动面、自由段、锚固段结构示意图

分析图五可知, bc段水泥砂浆芯柱滑动时必须克服ab段水泥砂浆芯柱与孔壁的粘结力。这就是说, 改进型预应力锚索锚固力并不只是bc段起作用。当我们进一步考虑时, 必须注意

预应力张拉后不单边坡体表面的岩土体受到压缩,自由段的水泥砂浆芯柱孔口部分也受到压缩。预应力张拉后,在假想滑动面处,自由段的水泥砂浆芯柱也受到压缩,而滑动面下面锚固段的水泥砂浆芯柱却处于受拉状态。对于水泥砂浆这样柱状固体而言,压缩必然产生横向膨胀,拉伸必然产生横向缩小。然而水泥砂浆这种材料拉、压的弹性模量 E 和泊桑比 μ 并不相同。

基于上述分析,自由段的锚固力在预应力锚索设计时不但要考虑,而且还要研究自由段、锚固段水泥砂浆芯柱的变形。我们必须清楚:水泥砂浆芯柱是在钻孔内的,是在侧壁有约束条件下产生变形,它的变形规律决定(影响)孔壁剪力应力的分布规律。

近年来开始采用无粘结钢绞线作为预应力锚索索体,并创生了压力集中型、压力分散型锚索。压力集中型锚索是在锚索体的内端安装一个承载体,压力分散型锚索是在锚索体内端、中部安装几个承载体。从受力角度分析,压力集中型锚索、压力分散型锚索实质上是改进拉力型锚索的发展和演变。

基于上述预应力锚索结构的发展,笔者认为自由段的概念需要讨论其内含。从极限平衡理论出发,研究边坡稳定必须假定一个滑动面,但预应力锚索并不一定非要定义一个自由段不可。

2.3 研究钻孔中水泥砂浆芯柱变形的必要性

前面叙及到钻孔中水泥砂浆芯柱变形对锚固力的影响。下面笔者再进一步强调研究水泥砂浆芯柱变形的必要性。笔者认为对现有的锚索类型而言,研究水泥砂浆芯柱的变形和破坏过程是确定锚索锚固力的基础。以往的研究仅限于锚索受力的研究,20年前李锡润、林韵梅应用明德林解答研究过锚杆内端受力分布[5]。

“七五”、“八五”期间,水利部东北勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、清华大学、中国科学院武汉岩土力学所等单位都对预应力锚索受力进行过深入研究,并得出一些可喜的成果。以下几点认为很有启发:

(1) 研究表明,自由段浆体强度的形成可改变内锚根段受力状态。

(2) 拉力型锚索,超张拉时拉力达到1.3~1.5倍拉力设计值时,砂浆芯柱开始破裂,轴向力向根部传递,启动了根部变形。

(3) 压力集中型、压力分散型预应力锚索预应力张拉后水泥砂浆芯柱处于受压状态。在轴向压力作用下,水泥砂浆芯柱必然产生侧向膨胀,其结果将导致水泥砂浆芯柱给孔壁一个径向压力,这必然使水泥砂浆芯柱与孔壁之间的摩擦力增加,有利于增加锚索的锚固力。

(4) 水电部西北勘察设计院通过对比600KN级、1000KN级预应力锚索张拉后50天观测得出以下结论:

靠初期超张拉吨位消除初期预应力损失的作法收效是有限的,实践表明靠补偿张拉才是达到设计吨位的有效措施。

2.4 群锚加固效果的启示

(1) 边坡锚固现有的主要指导思想是提高假想滑动面的抗滑力。但“85”期间我国的设计、研究和高等院校等单位通过现场量测证实群锚加固后可提高边坡体变形的均匀性、整体性。大约经过50天的变形调整时间使岩体的整体性、岩体强度有较大提高。

(2) 实测结果表明,群锚的效应与效果已远超出单锚效果的迭加。经过加锚的岩体已经形成一种复合材料,这种复合材料的变形性能和强度比未加锚的岩体有很大的提高。

(3) 基于以上两点研究结果,我国的学者们提出群锚产生“岩壳效应”概念。岩壳效应的含意类似于地下工程加锚后形成承载拱的作用。

3. 几点看法

3.1 关于安全系数K的看法

目前边坡或建筑深基坑设计时通常给定一个整体安全系数 K 。

(1) 对于现存的安全系数大于1的边坡,因其安全系数不能满足长期稳定要求进行加固设计时给一个整体安全系数是可行的,但并不一定完全合理。

(2) 对于由上往下开挖的边坡或深基坑而言, 如果不进行分层开挖、分层支护, 则边坡或基坑壁就要失稳或发生塌滑。在这种情况下必须分层考虑其稳定, 即每个分层必须给定一个安全系数 K , 而且每个分层开挖前必须进行超前支护。超前支护结构设计根据分层安全系数确定较为合理。

(3) 笔者认为各分层的安全系数不应该取同一个数值。笔者建议上部分层的安全系数只要保证1.1~1.2即可, 中部分层安全系数保证1.2~1.3即可, 底部分层安全系数取1.5~2.0较为合适。

以上安全系数分层取值法笔者首先在深基坑分层开挖中应用, 经过实践检验后才将其推广到边坡工程。笔者的设计思想是: 强调考虑开挖过程, 考虑各分层位置的重要性对各分层的安全系数进行合理调整, 而边坡的整体安全系数必须满足规范要求。

3.2 “岩壳效应”分析

近年来采用无粘结钢绞线作锚体, 创生出压力集中型锚索。压力集中型锚索是在孔底有一个承载体, 当锚索进行预应力张拉后在边坡表面和岩体内部形成一个双向压缩区, 如下图所示。

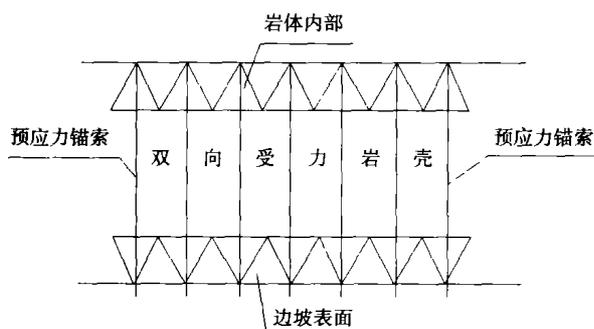


图6 “岩壳效应”示意图

图中表明, 压力集中型群锚锚索预应力张拉后在边坡体表面形成一个双向受压“岩壳”, 由于“岩壳”的形成, 自然提高了边坡外部岩体的强度。此时我们仿效地下工程锚固支护的作法来加固边坡。

(1) 采用短而密的压力集中型预应力锚索, 张拉后形成一定厚度的“岩壳”。

(2) 采用较长的压力集中型锚索把“岩

壳”锚固在边坡深部稳定的岩体中。

3.3 地面开挖控制变形工法介绍

10年前笔者提出地面开挖控制变形工法。该工法是在地下开挖“新奥法”(NATM)基础上提出的。在沿海城市软土深基坑应用几年之后形成一套完整的施工方法。为了保护笔者的劳动成果, 现已获得中国发明专利。该工法的指导思想是控制开挖引起的变形, 把变形控制在允许范围内。如水电工程的边坡必须严格控制变形, 则加固结构刚度要大, 工程造价高。对于公路边坡, 并不需要严格控制变形, 加固结构设计可以释放一部分岩土体的变形。工程实践和理论分析表明在同样安全程度条件下释放一部分允许的岩土体变形, 工程造价可减少很多。或者在同样造价条件下释放一部分允许的岩土体变形, 使支护结构的安全储备增大, 工程的安全程度会提高很多。

地面开挖控制变形工法有6个主要素: 安全监测、超前支护、分层分段开挖、紧跟开挖面敷设钢筋网喷射混凝土及时封闭开挖面、加强底部支护结构和施工工艺管理。

3.4 预应力锚梁结构的提出

(1) 工程实践表明, 边坡工程主要还是考虑体力(重力)的作用。因此无论是锚索、锚杆加固边坡结构都需要具有一定的抗弯剪能力。目前的锚索、锚杆结构满足不了工程中对其抗弯剪性能的要求。

(2) 将一根锚杆近于水平方向置入边坡体内, 当边坡体变形时在某种程度上相当于受重力荷载的梁。为了合理利用材料, 对梁的截面形状必须进行研究。

(3) 基于前人研究的成果笔者提出预应力锚梁结构, 并获得中国实用新型专利。预应力锚梁是由中空有外翼的钢梁和无粘结钢绞线组合而成。将预应力锚梁置入边坡体的钻孔中, 通过钢梁中空部分进行注浆, 注浆体充满钢梁内外钻孔空间。当注浆体达到设计强度时进行预应力张拉, 即可实现对边坡体的加固作用。

(4) 现有的压力集中型预应力锚索, 施加预应力后, 锚索的水泥砂浆芯柱可归结为一根

有侧向约束受压的长杆。由于侧壁约束不同，可能出现以下几种形式破坏。

①当孔壁的强度很低（土或软粘土层），孔壁与水泥砂浆芯柱界面先发生剪移破坏。随之水泥砂浆芯柱产生弯折破坏。

②当孔壁的强度较高（如中等强度灰岩），可能发生的破坏是水泥砂浆芯柱被破坏。

③当孔壁的强度很高（如花冈岩、玄武岩），可能水泥砂浆芯柱不发生破坏。

现举例分析如下：给定预应力锚索为2000KN级压力集中型锚索，钻孔直径140MM，水泥砂浆芯柱单轴抗压强度取4KN/cm²。

[例一]

孔壁强度较高，水泥砂浆芯柱在侧向约束条件下压坏值取2×4KN/cm²。预应力张拉后，承载体作用在水泥砂浆芯柱上的应力为：

$$Q_{\text{压}} = 2000\text{KN} / (14\text{cm} \times 14\text{cm} \times 3.14 \div 4) = 13\text{KN/cm}^2$$

由于13KN/cm²>2×4KN/cm²，此时可能在内锚端处水泥砂浆芯柱被压坏。

[例二]

孔壁强度很高，水泥砂浆芯柱在侧向约束条件下压坏值取4×4KN/cm²。预应力张拉后，承载体作用在水泥砂浆芯柱上的应力乃为13KN/cm²，由于13KN/cm²<4×4KN/cm²，此时内锚端处水泥砂浆芯柱不产生破坏。

[例三]

假定锚索设置在淤泥质粘土中，孔壁给水泥砂浆芯柱的侧向约束很小。当预应力张拉后，因水泥砂浆芯柱细长，在未达到屈服点时会因弯折而破坏。对于压力集中型预应力锚索的水泥砂浆芯柱可归结为两端铰接的压杆，根据欧拉公式^[6]得：

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (4)$$

式中：P—锚索预应力；

E—水泥砂浆芯柱弹性模量；

I—水泥砂浆芯柱截面模量；

L—水泥砂浆芯柱长度。

分析（4）式可得以下几点认识：

①水泥砂浆芯柱越长，允许的预应力P越小，即允许的预应力P与水泥砂浆芯柱L平方成反比。

②允许的预应力P与水泥砂浆芯柱弹性模量E成正比。

③允许的预应力P与水泥砂浆芯柱截面模量I成正比。

3.5 预应力锚梁结构特点分析

基于前面对水泥砂浆芯柱受力——破坏过程分析，预应力锚梁结构是针对克服现有预应力锚索结构弱点而提出的。

（1）预应力锚梁是用一根弹性模量E大，截面模量I也大的钢梁结构与水泥砂浆芯柱组合而成，用来取代水泥砂浆芯柱。无粘结钢绞线固定在锚梁的内端，预应力张拉时受到压缩的是钢梁与水泥砂浆芯柱的组合物。现仍以2000KN级压力集中型预应力锚索为例，假定钢梁的弹性模量为水泥砂浆芯柱弹性模量的8倍，钢梁的截面模量为水泥砂浆芯柱截面模量的4倍，则在其它参数相同条件下，允许的预应力值可提高8×4=32倍。

（2）前面已经分析过，不论是锚杆还是锚索所承受的主要是体力（重力）作用。工程实践表明，近于水平方向置于边坡体内的锚杆、锚索，当边坡体在重力作用下产生垂直变形时，锚杆、锚索必然产生弯曲。这就要求锚杆或锚索具有抗弯剪的能力。预应力锚梁在某种程度上克服了目前现有锚杆、锚索抗弯剪能力低的缺点。

由于锚梁具有中空异缘形状的截面，它具有较大的截面模量。锚梁与螺纹钢筋锚杆体相比，在截面积相同的条件下锚梁的截面模量为螺纹钢筋锚杆体截面模量的4倍。作为抗弯剪构件而言，在具有相同抗弯剪能力条件下，锚梁比螺纹钢筋锚杆节省4倍材料。在所用的材料截面积相同的条件下，锚梁所具有的抗弯剪能力为锚杆的4倍。

（3）锚梁与无粘结钢绞线组合施加预应力

后除了具有上述分析的特点以外,还具有建筑结构中预应力钢筋混凝土梁的特性。建筑结构中预应力钢筋混凝土梁的优点是人所共知的。

(4)如果在锚梁的内端、中部都固定有无粘结钢绞线,施加预应力后,此时的预应力锚梁将具有压力分散型预应力锚索的功能。

(5)预应力锚梁与现有锚杆、锚索相比,还具有施工简便、安装可靠等优点。预应力锚梁利用中空孔注浆,不用专用注浆管。由于锚梁的刚度大,安装时不需要锚索那样多的对中架。

3.6 预应力锚梁加固设计探讨

(1)设想一根锚梁近于水平方向置入边坡体内。一部分锚固在假想滑动体内,另一部分锚固在非滑动体内。当假想滑体产生垂直变形或欲产生滑动时,其滑体的重力荷载将作用在

锚梁上。此时锚梁可视为一端固定,另一端悬壁受分布荷载作用的梁。

(2)假想滑动面可以算出,锚梁的长度可以确定。由于边坡表面形状、假想滑动面已定,则作用在锚梁上的分布荷载已定。因此一端固定,另一端悬壁的锚梁完全可以设计。

参考文献

- [1]、[2] 徐芝伦·弹性力学·北京:中国人民教育出版社,1980年
- [3] 水利部西北勘测设计研究院·“85期间预应力锚索课题研究报告”
- [4] 程良奎、范景伦等·岩土锚固·北京:中国建筑工业出版社,2003
- [5] 李锡润、林韵梅·全长锚杆受力分析·沈阳:东北大学学报,1983年2期
- [6] 刘鸿文主编·材料力学·北京:高等教育出版社,1979

(上接第16页)

3.5.3 张拉应力的控制

体外索采用应力控制方法张拉时,以伸长值进行校核。实际伸长值与理论伸长值的差值必须符合设计要求,按照设计规定,实际伸长值与理论伸长值的差值控制在 $\pm 6\%$ 以内。

3.6 锚头密封筒灌浆

张拉完成后,在锚固端的锚头及密封筒内,按设计要求灌环氧树脂。利用专门灌浆泵从锚板灌浆孔灌浆,当排气孔冒出浓浆后堵住排气孔停止灌浆再封堵灌浆孔。

在锚板端面的5cm处用手提砂轮机平整地切除锚头两端的多余钢绞线,盖好保护罩,并在保护罩内灌注环氧砂浆。

3.7 安装焊接减震装置

把减振器装置安装在体外索成品索自由段上,距离转向节端3m,上下螺栓卡紧,每个隔箱1套并与箱梁底板连接,见图9。

3.8 安装防松装置保护罩

按照要求切除锚头两端的多余钢绞线后,安装防松装置,拧紧螺母,以达到有效地防止夹片松动的目的。安装保护罩,拧紧螺母,使

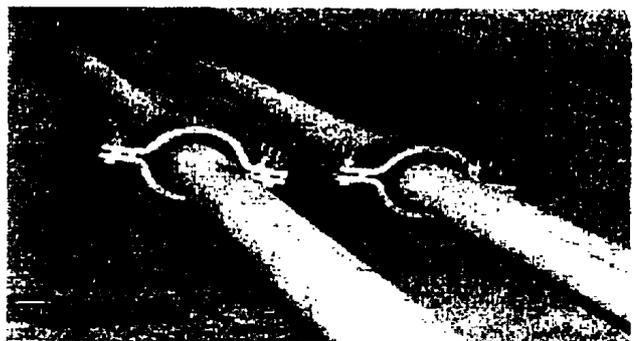


图9 减振装置

与之与锚垫板连接,保护锚头,同时向保护罩内注防腐油脂,防止端头裸露钢绞线受腐蚀。

4. 结语

在天津市快速环路工程高架桥中首次采用体外预应力技术,使该桥建设的技术含量有了进一步的提高;通过施工应用体外预应力的优点也得到不同程度的体现,为以后同类体外预应力的设计、施工提供了一些技术参数。但是,尽管体外预应力混凝土结构的优点显著,但也有它自身的缺陷。目前体外预应力技术的工程应用还不多,很多问题有待于进一步的探索和研究。