

体外预应力材料及系统

廖海学 林奕辰 译

1. 总 则

1.1 体外预应力

此报告是关于预应力体外索应用的总体阐述,并且描述了与体外预应力有关材料问题,和解决它们的方法。

1.2 定义

在此说明一些与体外预应力有关的定义。

预应力索:预应力索由预应力钢筋及相关部件组装成,包括保护层、管子、锚具和附件。

体外索:位于结构横截面外的预应力索。

预应力筋(PC 钢):高强钢材,如高强钢丝及绞线。

锚具:是将张拉后预应力筋应力保留及传递给结构的机械装置。

预应力筋孔道:是包在预应力筋周围,以防腐蝕和防机械损伤的封套。

索鞍:在拐点处支承预应力筋的结构。索鞍是偏转器的一部分。

磨损:是两个金属表面的相对运动造成的伴随着偶然的化学反应的磨损,这会降低索的抗疲劳性。

偏转器:在体外索弯曲处将力传给结构的部件。

1.3 应用范围

体外预应力曾经有人应用过,最近又被重新发掘出来,并与目前的预应力技术发展相适应。体外索预应力的应用有如下几个方面:

①混凝土结构的建造、修理和加固。

②钢结构的预应力。

③桁架的预应力。

④在梁下的部分静态锚索系统(可以认为斜拉索和结构下拉索是体外预应力的特殊应用。这些需要特别的分析,如疲劳设计)。

⑤临时用的预应力混凝土结构。

作为与现有方法的竞争,进一步的应用有:

⑥逐跨的预制节段施工。

⑦以体外索作为连续索的采用同心体外预应力的连续顶推施工。

在与体内索相结合并共同应用的结构中,体外索的优势更为明显。在这里体内索抵消施工荷载及静载。

1.4 结构和设计的考虑

选择预应力度时(体外和体内有粘结索结合)应注意在建造阶段和恒载作用下不应产生裂缝。

有粘结、体内预应力的设计原则对体外预应力同样适用,如极限状态检查和变形检查、裂缝、位移、防火和结构使用的其它一些标准。各种预应力体系的制造商会在产品介绍、设计文件中给出与有粘结和无粘结预应力有关的设计参数。

如果都是体外索,开裂条件可能将与标准的后张结构不同。

通常说来,在极限状态,体外索不会达到最大极限应力。在应用中应参考欧洲暂行标准 ENV1992 中的 1.5“无粘结和体外预应力筋”。

然而,在应用体外预应力筋时应特别注意以下几点:

①最好选择大吨位的预应力索,以减少预应力管道和索的用量,并减少转向装置。选择体外索和预应力筋数量时,应考虑使用期内换索的需要。

②使用更短的预应力筋,如在柱端使用交错重叠的形式比采用连接器使预应力筋横穿几跨效果要好。因为这样更容易安装。

③应特别注意预应力筋锚固和拐点。设计这些高应力的部件时应特别仔细,以限制混凝土结构的开裂。比如说这可以用三维预应力来处理。

1.5 体外索的一般要求

由于体外索易受环境的影响,必须用可靠的体系防止它们腐蚀和损伤。

为了充分利用暴露条件和体外索易于安装的优点,并且为了达到更好的结构质量,应注意以下条件:

①结构的设计应允许检查和监测(无损试验的可行性)

②对于锚具需要更换和预应力筋需要放松和重张的特殊情况,设计时也应注意。

为了更好的保证预应力筋质量的可靠性,有时需要在工厂加永久的保护层,如 PE 保护层加油膏的钢绞线。

对于特殊情况,我们甚至可将已做好防腐及防护的预应力索运至现场,只有安装张拉需在现场进行。

2. 材料

在表 1 中所列的材料可以组合成不同形式的体外索。此表不包括锚具,因为它取决于采用何种预应力体系。体外索的锚具通常与有粘结预应力使用的相同。

2.1 预应力筋规范

大多数体外索的重要性质之一是塑性。当需要考虑索鞍处的承载力影响时犹为如此。由 FIP 第 2 委员会准备的,最新介绍的挠曲拉伸试验可以作为预应力筋附加的质量标准。尽管各国和国际标准没有广泛的把它包括在内,但在多轴线张拉的情况下,保证预应力筋有可能接受的特性是必要的。因此,建议在挠曲拉伸试验中,预应力筋不应超过最大值 D。这在 FIP 报告中有完整的描述,(见表 2)。

2.2 预应力管道的要求

制造体外预应力筋管子的材料可以是刚性的管材,弹性塑料管或由金属板加强的塑料管。管子必须能够承受灌浆压力。以下是其它一些重要的性质:

①在结构的寿命期内,预应力管道,连接器都应完全防水,并且能够抵抗所有想得到的环境影响。

②它们应该能与预应力筋和防腐材料相容,应该能够毫无损伤的抵抗在预应力筋制造、握持、

安装和使用期间产生的应力。

③对于塑料,特别是聚乙烯,应该考虑长期蠕变、温度及紫外线的影响,特别是在高应力的部位。

④塑料材料不应含有氯原子。

⑤管接头的制作应特别小心。可采用热缩套,夹具及其它适当的方法焊接。

2.3 防腐保护材料的要求

防腐材料可以是普通水泥或油膏、石蜡、蜡、沥青产品。也可采用聚亚胺胺水泥添加剂(如抑制剂)。

2.3.1 水泥浆

后张预应力筋的灌浆应根据 FIP 指导进行。使用塑料管时,要考虑灌浆时温度的影响。管的机构性能和尺寸应与灌浆压力相适应,其压力取决于后张构件尺寸和管的径向允许变形(通常为 1—2%)

2.3.2 其它材料

FIP 的“无粘结筋防腐建议”推荐的保护材料是实用的。

无机保护材料的主要要求如下:

①在注入过程中应用液态,并且在筋的全长应密实,无气泡。

②在预定的温度范围内,制造、运输、存贮、安装、浇筑、张拉和使用的过程中,防腐应该不能转变为液态,并保持弹性且无裂缝。

表 1 材料

1. 预应力筋	2. 管子	3. 防腐保护材料	4. 预埋管	5. 偏转器或索鞍
(a) 光面绞线或钢筋 (b) 镀锌绞线或钢丝 (c) 涂油膏, 涂蜡或其它软保护并有外套的单根钢绞线 (d) 涂环氧的钢丝、绞线或钢筋	(a) 刚性或波纹钢管 (b) 聚乙烯或聚丙烯 (c) 经金属管加强的聚乙烯管	(a) 水泥灌浆 (b) 油膏或组合 (c) 石蜡 (d) 环氧焦油 (e) 沥青产品 (f) 聚胺水泥混合物	(a) 钢或聚乙烯(HDPE)管, 或两者结合	(a) 钢或聚乙烯(HDPE)管, 或两者结合 (b) 铜梳、铜叉、银铁或预制粒

表 2 预应力筋特性摘要

预应力类型	名义直径 (mm)	名义面积 (1) (mm ²)	名义抗拉强度 (2) (N/mm ²)	最小破断力 (3) (kN)	最小破断力 (4) (kN)	弹性模量 (5) (N/mm ²)	疲劳应力范围 (6) (N/mm ²)
钢丝 (5)	5 7	19.6 38.5	1770 1670	29.8 55.3	34.7 64.3	205000	200
7 丝钢绞线 (6)	12.5 13.0 15.2 16.0 16.0	93 100 139 150 150	1860 1860 1770 1770 1860	147 158 209 225 237	173 186 246 265 279	195000	190

各种直径绞线的变曲拉伸试验:

最大D值:28%

$$D = \sum D_i / n$$

$$D_i = (1 - F_A / F_r)$$

试验用绞线数据:

n: 试验的数量:(最小5次)

F_A : 最大试验荷载

i: 试验次数

F_r : 同一批最少两个试件的破断力

③填弃材料不应包括如氯化物、硫酸、硝酸等杂质,除非处于无害状态。

可以使用防腐油膏。然而它们应满足以下性能标准:

- 隔离潮湿和空气
- 防水
- 贮存碱性,保持长期酸碱平衡
- 不含易燃或与保护层材料反应的溶解物残渣。

保持材料性能可根据建议2.3.2来实现

2.3.3 预埋管和弯曲

对于索保护层,预埋管可以由钢或塑料组成(见4.1)。外部是钢,内部是HDPE是最常见的组合。聚乙烯的壁厚需足以抵抗弯曲点产生的应力。

切线摩擦力会对管子产生摩擦。在此情况下须考虑聚乙烯管的长期蠕变和温度影响。

3. 预应力筋要求

当应用体外预应力时,完全依靠锚具和转向装置(索鞍)来将预应力传给砼。在静载、冲击荷载和循环荷载作用下,体外索和锚具及转向装置的可靠性和锚固效率比体内索更显重要。建议对火灾或人为破坏作额外分析。

3.1 锚具

锚具应满足“FIP后张预应力体系验收建议”中对疲劳强度和向砼传力及锚固效率的要求。应考虑下列方面:

- ①锚具的设计应允许随时检查。
- ②允许调整索力。
- ③特殊情况下允许换索。
- ④明确长期锚座损失。
- ⑤用适当方法对锚具进行防腐,如环氧层、油膏、保护罩等。

⑥锚具设计允许产生 $\pm 1.5^\circ$ 的误差,且不明显降低锚固效率。

3.2 转向点与索鞍

预应力筋的相关试验显示,在高达 6kN/cm^2 的横向高压情况下,预应力筋的抗拉强度并未显著降低。

在承载力、静载锚固效率及抗疲劳方面,转向装置或索鞍的要求与锚具一样。索鞍应能允许 2° 的误差。

通常情况下,在转向点处会产生很大的侧向压力。如果相关装置与锚索平行并合理分布,这侧向力对预应力筋并无影响。

然而,有时预应力筋与钢管间磨损的影响需要考虑,它可以通过疲劳试验检查。预应力筋与钢管间磨损的影响已有报导。

磨损试验的对象为弯曲的 $19 \times 7\text{mm}$ 高强钢丝束,该钢丝束套有用波纹铁皮管加强的PE外套。在试验中,半径为5m的索鞍对钢丝产生了范围为 196N/mm^2 的应力。夹具用来防止索鞍的高点管子松脱变位。即使在如此高的应力范围,预应力束经过1.0M次循环荷载也没有失效。

预应力筋与管的摩擦与相对运动的影响可以在索鞍下加滑动物来避免。

当应用PE保护套时,应校核伴随着预应力筋位移的横向压力的长期影响,这些组合的影响不能对PE产生伤害。并且通过试验。

Karl sruhe大学已与瑞士的体外预应力先驱项目联合作了此试验。

我们用带软防腐材料和PE套的 78×7 高强钢丝束,根据现实桥梁设计应力范围,在半径5m的索鞍上进行了2.0M次的循环荷载试验。用变化温度来模仿长期作用。保护套和钢丝承受了横向压力与位移的组合影响,并且没有失效,见图1。

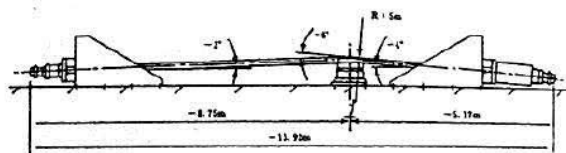


图1 试验装配细节

德国对采用油膏与PE的单根钢绞线,在转点的状态进行了试验研究,试验安排与条件如图

2 所示:

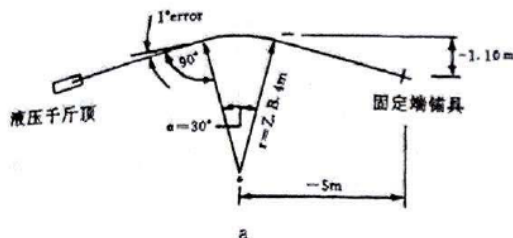


图 2

必须考虑曲线的半径和多轴线状态。当半径小于正常后张的半径时,必须用试验证明此半径对结构安全不会产生有害影响。

图 3 列出了法国后张预应力专家提出的转向装置的布置形式。

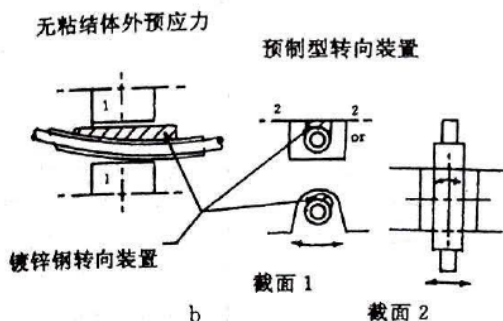


图 3 油脂与 PE 钢绞线的布置

注:①半径=4.0m

②应力上限=1250N/mm²

③应力范围=50N/mm²

④索鞍处的位移=0.173mm

⑤索鞍处摩擦系数=0.06

4. 体外索的防腐保护系统总结

4.1 典型的防腐保护方法

表 3 列出了各种体系的布置,基本上可以分成两类,如:

- ①无粘结,可换索(A)
- ②有粘结,不可换索(B)

4.2 典型防腐保护措施表的补充

表 3 中总结的各种保护措施有各自的特点,这些问题需要彻底的研究和注意。

4.2.1 系统 NO.1

预应力筋装在预设的钢管或 PE 管内。张拉后进行灌浆。此系统属于(B)类。

需注意的要点是:

①锚具效率,特别是夹片锚具系统,灌浆后是否能发展锚具的极限应力?

②保证预应力筋在管子内正确的摆放,特别是在转向装置处:

a. 最小半径是多少?

b. 可否认为是不动点(预应力筋间与索鞍之间有没有位移,有没有粘结破坏?)

c. 预应力筋与管的摩擦。

d. 转向装置的容许误差,特别是在出口处避免尖锐的转角或转折。

无粘结体外预应力转向装置

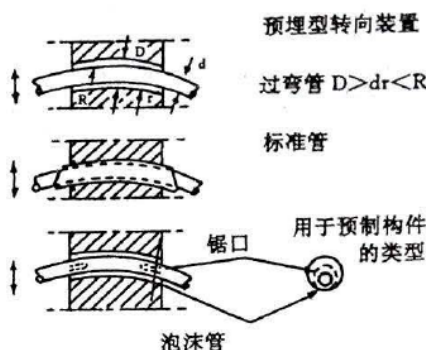


图 4 转向装置的布置

4.2.2 系统 NO.2

与系统 NO.1 不同,预应力筋置于钢管或 PE 管内,并且张拉后注入软有机保护材料。此系统可换索。

需注意的要点是:

①与系统 NO.1 相同的几点。

②管中绞线的平行,特别在转向装置处。

③软保护材料膨胀或收缩产生的应力。

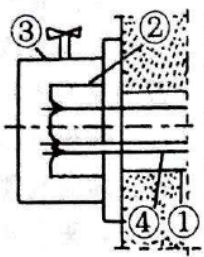
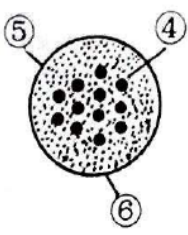
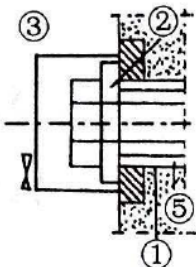
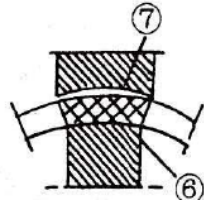
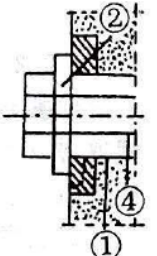
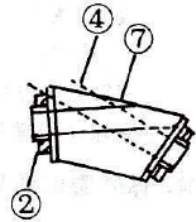
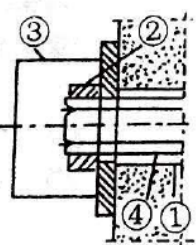
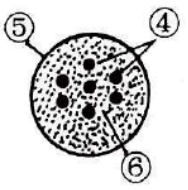
④管道的密封与联接。

4.2.3 系统 NO.3

与系统 NO.1 与 NO.2 不同,它在锚具和索鞍处使用特殊的预埋管(一般由钢制成),允许绞线

表 3

典型的防腐保护方法

系统 & 类型	描述 & 特别补充	锚具细节	自由段防腐保护	转向细节
1. (B)	预应力筋加水泥灌浆, 或带 PE 套的绞线或钢丝, 安装在预设管道内, 张拉后灌浆	 ①预埋管 ②锚具 ③保护罩 ④	 ④预应力筋 ⑤钢管或 PE 管 ⑥水泥灌浆	 考虑: 固定点的最小半径, 与管线的摩擦, 索鞍在出口处的误差 ⑤ ⑦钢管或 PE 管
2. (A)	钢或 PE 管内的钢绞线或钢筋, 有机防腐混合物—预应力筋安装在预设管内后, 再注入防腐材料	与 1 相同	与 1 相同 但⑥处是防腐混合物而不是水泥灌浆	与 1 相同
3. (A)	钢或 PE 管内的可换索预应力筋, 双层预埋管—有机防腐—防腐混合物, 预应力筋, 水泥灌浆, 在预设管内安装索, 灌浆后张拉	 ①预埋管 ②锚具部件 ③保护罩 ④预应力绞线或钢筋 ⑤	与 1 相同 ⑤钢或 PE 管 ⑥水泥灌浆或防腐混合物	 ⑥水泥灌浆 ⑦PE 或钢管索鞍
4. (A)	镀锌绞线或钢筋 锚具部件也镀锌。转点有两套锚具。绞线可更换	 ①预埋管 ②锚具部件 ④	④镀锌绞线或钢筋	 ②锚具 ④ ⑦钢结构
5. (A)	预应力筋安装在钢管或 PE 管内, 双层预埋管—有机防腐—防腐混合物		 ③油脂或塑料单根绞线 ④PE—管 ⑤水泥灌浆	如果在张拉前灌浆, 索鞍与 3 相同。 如果有事先说明, 张拉后灌浆是适用的。

注: (A) 无粘结, 可换索; (B) 有粘结, 不可换索

保护层(大多由 PE 制成)从预埋管中穿过。

由于绞线在结构内任一点均无粘结,因此它可以完全更换。防腐保护可以是水泥或软防腐材料。如果选择了软保护系统加 PE 保护层,可以在工厂套上永久的保护层。

需注意的要点是:

①采用灌浆时锚具的效率

②采用软保护时 PE 管及接头的防水性、密实性

③在索鞍处应注意的问题:

a. 在横向压力和 PE 管内绞线位移的影响下 PE 护套的长期性能(见 3.2)

b. PE 管与索鞍可以相对运动吗?

c. 管道是钢管时的磨损

4.2.4 系统 NO. 4

在低应力梁的模型试验中,该系统是成功的。如果要求索的例行检查,该系统是一个好办法。此系统的特点是没有索鞍,它采用钢结构在转点处让绞线的锚具通过。这样,在两个转向点处的绞线

都是直的,便于换索。

如果只考虑使用镀锌绞线或钢筋,必须保证绞线束,特别是锚具处的排水。在平行的绞线或钢筋间保持几毫米的距离是有利的。如果环境恶劣,镀锌的基础上再使用 PE 或软保护。

4.2.5 系统 NO. 5

此系统的特征是体外索由多根涂油脂及有 PE 护套的无粘结绞线置于一个大的外套管内组成。如果采用水泥灌浆,最好在灌浆后完全张拉。如果绞线平行,且在索鞍处有传力装置,可以张拉绞线至 10% 强度后进行灌浆。该系统可以逐根张拉。

除了更换整根索,如果设计正确,还可以更换单根绞线。

需注意的要点是:

①由于在夹片及锚具处,PE 套需除去,该处需有充分的防护。

②在横向压力和 PE 管内绞线位移的影响下单根绞线护套的性能。

(上接第 33 页)

3) 预应力筋的防腐保护处理

a. T 梁顶体外钢绞线采用常规处理:两端 1m 左右长采用压浆处理,桥面绞线随桥面钢筋砼一起浇筑,使 T 梁顶的预应力钢绞线埋入了砼内,既和砼很好粘结,又不用再进行防腐保护。

b. T 梁底体外预应力筋即钢丝束处理,采用无缝钢管分三级套配,能滑动伸缩,穿束装配时,除中间滑动处采用塑料热缩套管封紧,其它节点都预先焊死。由于 T 形梁承受动、静载较大,故对预应力筋的封裹留出一个弹性段,即用建筑油脂封满,另一端采用水泥浆密封,中间采用 Q235 密封板隔离。为了确保各端的封裹密实性,各段端部及中点设置出气孔。

4) 张拉控制应力与伸长值:

梁顶束:

$$\sigma_{con} = 0.78f_{ptk} = 0.78 \times 1860 = 1450.8 \text{ MPa}$$

$$N = \sigma_{con} \times A_p = 1450.8 \times 140 = 203112 \text{ N}$$

取 $N = 200 \text{ kN}$

梁底束:

$$\sigma_{con} = 0.57f_{ptk} = 0.57 \times 1570 = 894.9 \text{ MPa}$$

$$N_s = 894.9 \times 19.6 \times 9 = 157860 \text{ N}$$

取 158 kN

$$N_{18} = 894.9 \times 19.6 \times 18 = 315720 \text{ N}$$

取 316 kN

伸长值: 钢丝线 1 束 = 113.7mm

2 束 = 95.5mm

3 束 = 80.2mm

钢束: 11 束 = 73mm

12 束 = 53.6mm

4. 加固后的效果

整体加固完毕后进行了载重试验,用四辆 30t 载重卡车分两排行驶通过测得, T 梁悬臂端部的挠度为 3.96mm, 设计值为 17mm。跨中梁底部挠度为 3.67mm, 设计值为 14mm。实测值均小于设计值, 达到和超过了加固的要求, 证明用体外预应力加固该险桥是成功的。

通过这次对芜湖中江桥的加固过程, 收益不少, 当然在某些节点的处理上, 采用其它一些新材料可能更简单, 这将在以后加固险桥时改进探讨, 总之, 用体外预应力法来加固危桥是一种既方便又经济的加固方法。