

# 不对称和弯斜拉桥

葡 A. J. Reis J. O. Pedro

楼庄鸿 译

(北京建达道桥咨询有限公司 100101)

**摘要:** 评述了不对称斜拉桥, 以几个最近设计项目讨论和叙述了审美和结构概念。结合塔柱和拉索布置的概念设计, 评述了平面弯曲的效应。建议采用部分斜拉桥的可能性, 以减小由于梁的平面弯曲引起的高桥墩的附加内力, 并以一设计研究实例来示范。

**关键词:** 不对称斜拉桥 弯斜拉桥 背索 部分斜拉桥方案 外锚固 三向拉索方案

## 1. 引言

不对称和弯曲外形斜拉桥的应用, 可能产生于现场条件的地理限制、审美的考虑或公路的平面线形。与最常用于大跨径桥梁例如主跨200~250m、具有双塔的传统对称斜拉桥相比较, 对不对称和弯斜拉桥的概念设计通常有较高的要求。

对于城市桥梁[1, 2], 不对称的外形可能是下列条件下的最适宜的解答: 处理有关观赏效果的环境要求; 将塔设计成工地的一个标志, 如Rotterdam的Erasmus桥[3]; 或最近通车的位于Liege的Val-Benoit桥, 其塔以玻璃板包裹[4]。

平面弯曲会发生有关拉索的空间外形以及由塔柱上索引起力的平衡的附加困难。值得探索的新领域是将用平衡悬臂法施工的部分斜拉桥[5]应用于弯箱梁桥的可能性。

本文讨论了具有单塔和单索面或三向拉索布置的中等跨径桥的概念设计。在前几年中, 我们用这样的概念设计了如本文所述的几座斜拉桥, 有的已建成, 其他现正在施工中。

## 2. 不对称拉索方案

不对称斜拉桥通常是单塔, 具有单索面(轴向索)或两个索面(侧向索)。然而, 如本文所示, 带有三个索面的解答, 这里称之为三向拉索布置, 可能是直桥或弯桥不对称拉索方案中方便而美观的良好解答。几种采用不对称的、弯的或三向拉索的可能方案示于图1。

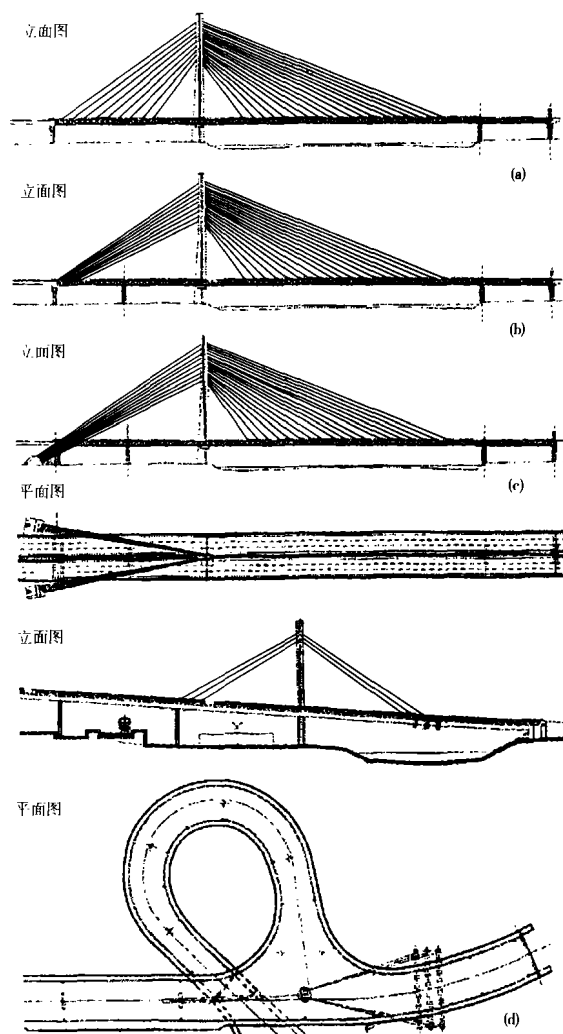


图1 不对称和弯拉索方案

对不对称的拉索方案, 应考虑两种情况:

- 自锚式斜拉桥;
- 外锚式斜拉桥。

前者所有的拉索都锚固在桥面高程上。后者部分拉索—背索—直接锚固在桥梁的基础或桥台

上。塔柱可以是垂直的，也可以是倾斜的。对于自锚式桥的桥面，塔柱中的永久弯矩仅取决于拉索索力。（见图2）

当然，采用三向拉索方案将背索锚固在靠近某一墩的桥面高程处，与锚固在基础处相比，其明显的优点是消除了连接在桥台或过渡墩基础上的基础块。进一步来说，将背索锚固在桥面高程处，允许最直接地将力从拉索传递至桥面，使桥面在纵向自行平衡，这一方案的主要缺点，是在桥面高程处需要两个锚块。

将所有拉索都集中锚固在靠近某一墩的桥面高程处的外锚方案，甚至是自锚方案，其优点是允许选用柔性体系的背索布置，然而这类方案仅在边跨的施工方案不需悬臂施工时才能采用。

如果需要，背索通常直接和连续地锚固在边跨，而不是集中在某一墩的桥面高程处或外锚。因此来自主跨的索力从塔柱处梁的截面起逐渐减少，至端截面处为零。

最后，采用三向拉索方案与拉索轴向布置相比，得到更大的侧向稳定性。因为三向拉索方案中，背索的作用如同两个倾斜的弹簧，当不稳定趋向发生时，其反力就会产生一个水平侧向分力。对于塔柱的弹性稳定效应可作出显著的贡献。众所周知，在轴向拉索方案和塔柱等截面的情况下，塔柱顶部作用由拉索引起的力，当塔柱趋于侧向压屈时，力的作用线总是通过塔柱底面。其结果是悬臂柱的压屈长度为 $L$ ，而不是 $2L$ 。在三向拉索方案中，压屈长度取决于背索引起的水平侧向刚度，可减小至 $0.7L$ 。在任何情况下，由于塔顶转动是自由的，压屈长度不可能再小于此值。

### 3. 外锚式斜拉桥

在倾斜塔柱的背索锚固在桥台的情况下，可考虑两种设想：(1)消除第一根拉索的合成剪力 $V$ ，因而消除了塔柱的永久弯矩 $M$ ；(2)消除基础高程的水平力 $H_D$ 。塔柱倾斜角可用作一个参数，以得到如图2所示的参照条件之一。假定桥面可在塔柱高程上自由滑动，给出平衡条件为：

$$N_s \cos(\alpha + \gamma) = N_{BS} \cos(\beta - \gamma)$$

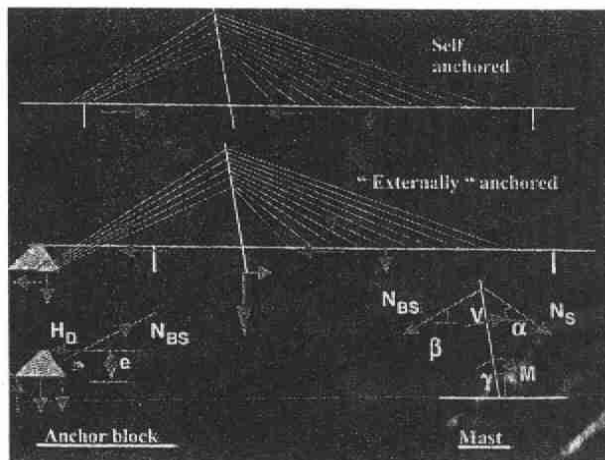


图2 不同拉索方案的平衡

上图：自锚 中图：外锚 下图：左：锚块 右：塔柱

从概念设计的观点来看，我们宁愿调整索力以消除在塔柱中的永久弯矩，以便最大限度地减小永久弯矩引起的徐变效应。当然，最佳的结果包括同时消除 $M$ 和 $H_D$ ，但这在实际上是困难的，在传递到基础的水平分力很小时也往往是不必要的。

除了可能较美观的优点之外，通常外锚方案的主要优点是增大塔柱的水平刚度，减小主跨的竖向变形，并且必然增大其竖向弯曲频率。这方面的情况，可用作者最近设计、现正在施工中的一座不对称斜拉桥来叙述(图3)。该桥的一项创新是采用三向组合桁架，以预制节段来实施。桥面的横截面包括两块预应力混凝土板，由4个倾斜的桁架节间使板分离，并予以固定。每个桁架节间由8根钢斜杆组成，直接连接在长3.75m的预制混凝土板构件上。底板用作人行道，而顶板含有6个公路车道(图4)。拉索方案包括两层31~50根直径15mm的束股，沿主跨间距7.5m；而背索(2X9)布置成两个平面，各具有37~91根直径15mm的束股。背索锚在与过渡墩相连的锚块上。永久力的平衡示于图5。

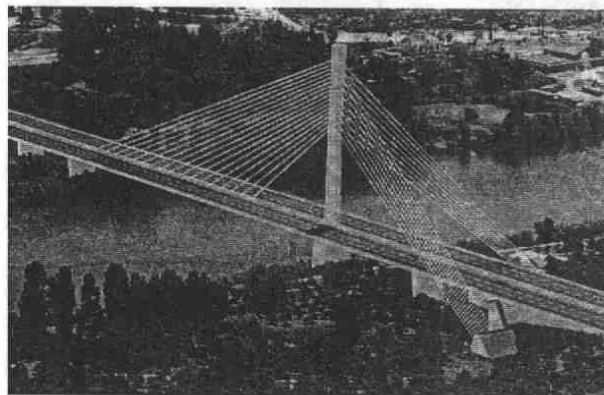


图3 葡萄牙的欧洲桥透视图

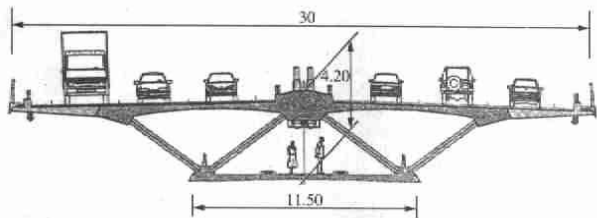


图4 欧洲斜拉桥的横截面

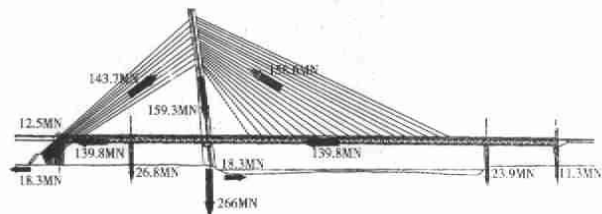


图5 欧洲桥永久力的平衡

在设计中对背索考虑了两个方案：(1)这些索用单索面，锚固在桥面上；(2)采用三向方案将索锚固在过渡墩的基础上。

采用数量几乎相同的钢索时，外锚方案较自锚方案(图1a)增加刚度约22%。当然，如图6所示，如将背索锚固在靠近某一桥墩的桥面高程处(图1b)，用自锚方案可具有同样的优点。对这座位于Oporto正在施工中的桥梁，这是可能的，因为桥梁的主跨和宽度仅分别为120m和18m，比上述桥梁的186m和30m要小。因此，锚固在桥面高程的背索数量，后者(图6)远比前者要少(图3)。

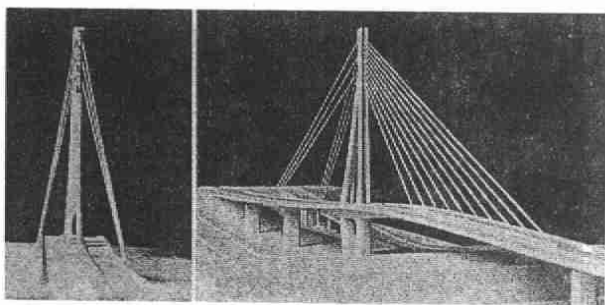


图6 Oporto的高架斜拉桥透视图

桥面的横截面由一个单室混凝土箱梁及预应力钢斜杆组成(图7)。拉索方案包括单层10根拉索，各有43根直径15mm的束股，主跨索距8m。背索(2X3)布置成两个平面，各有67根直径15mm束股。这些背索用预应力混凝土横梁锚固在桥面高程处，在塔顶作三向锚固布置。

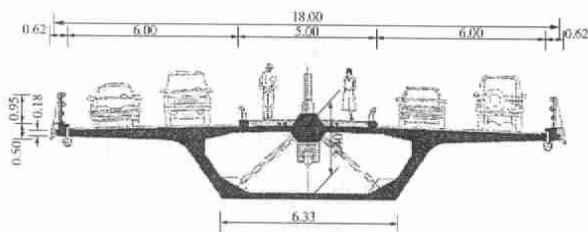


图7 Oporto高架斜拉桥的桥面

几年前西班牙修建的Lerez和Ebro河桥，是不对称斜拉桥的著名实例(图8)[6]。由C.Casado设计公司设计的这两座桥，采用了单索面方案，河岸上设一单塔。补偿跨的存在，导致了单一的结构方案：三向拉索，背索与主索形成约 $120^\circ$ 的夹角；背索锚固在位于车道两侧的平衡重上，该平衡重用来补偿背索荷载的竖向分力；水平分力则由地下的柱抵抗，该柱将平衡重连接在主塔基础上。

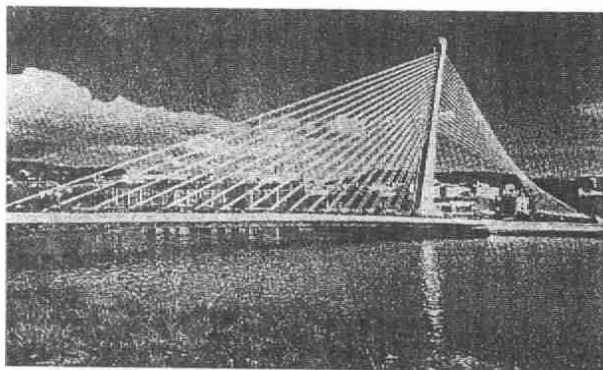


图8 西班牙的Lerez外锚式斜拉桥[6]

#### 4. 弯斜拉桥或部分斜拉桥

对由于道路平面线形造成的弯斜拉桥，主要的问题是：

—拉索的布置要满足水平弯曲和公路上竖直净高的要求：

—如果采用轴向拉索方案，要调整索力以平衡桥面高程处的侧向水平分力或塔柱中的永久弯矩：

—在与上部结构刚接的高墩中，减小其永久横向弯矩。

第一个问题，从地形要求和审美上来看，轴向拉索是最常用的方案。然而，对于大跨径平面弯曲斜拉桥，在塔柱拉索布置范围中产生很高、变化很大的力，需在支承截面处以侧向

拉索予以平衡。为满足这些条件,看来采用多孔斜拉桥是一个很有吸引力的解决方案,如几年前由J.Arenas和MePantaleon设计的高架桥(图9)[7]。

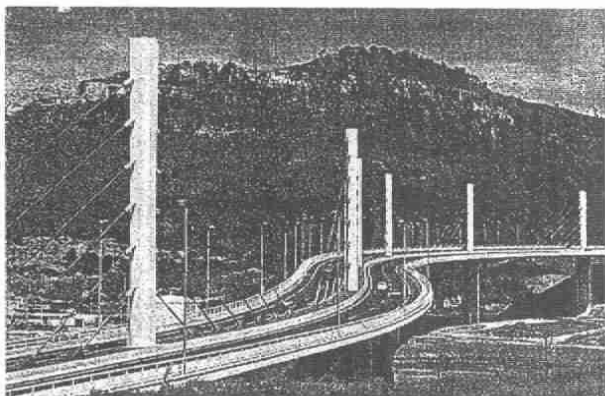


图9 西班牙的Arena多孔高架斜拉桥[7]

另一种可能性,是采用一根“外塔柱”,即位于桥面以外的塔柱,如我们研究的Oporto人行桥那样(图10)。塔柱可以是竖直的,也可以是倾斜的,带有侧向的背索以完全平衡永久弯矩。当然,这个解决方案要求对桥面有一个总体的拉索布置方案,也即桥面不能支承在塔柱截面处。完全悬吊的桥面总长98.5m,采用高度仅1.1m的预应力混凝土箱梁。地面上高约30m的塔柱为一变直径的混凝土圆柱,顶部直径1.0m,底部2m。塔柱与垂直方向倾斜 $6^\circ$ ,支承13对拉索,锚固在桥面上的索距约为10m。方案的主要问题是:

- 桥面的偏心悬吊;
- 人行交通下桥面的动力性能;
- 桥面的空气动力稳定;
- 塔柱力的侧向平衡;
- 抗震性能。

当然,箱梁桥面可解决前三个问题。对第4个问题,采用了横向拉索。对于抗震性能,在桥面的端截面上设有液压动力设施,以控制上部结构的纵向位移。在行人的动力作用下,垂直加速度主要与第二振型有关,带有一个垂直位移的相关参与系数,频率为0.95Hz。第一振型主要是侧向振动,频率0.53Hz,对在行人动力作用下桥面的水平振动是相当重要的。如果梁的水平挠曲没有完全为拉索的水平侧向力平衡,

这个方案的桥面横向弯矩就会出现一些困难。图10的设计场合下,用一根仅260kN有效永久力的拉索来平衡柱顶侧向水平位移时,即会出现困难。

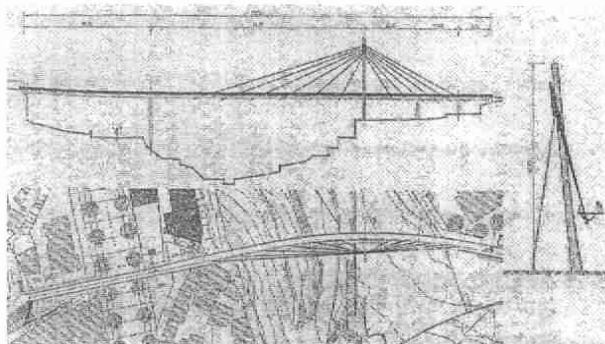


图10 葡萄牙一座人行弯斜拉桥的研究

图11所示的设计场合,我们采用了三向拉索方案,以平衡边跨61m,平面弯曲半径120m这样严峻条件下的弯曲效应(图1d)。对主跨采用了典型跨径为31m的相同空心板,连同一组2X3拉索,每根具有37根直径15mm的束股;3条背索,每条有70根束股,直接锚固在墩截面上,如图1所示。藉调整拉索中的永久力来保证塔柱的平衡。

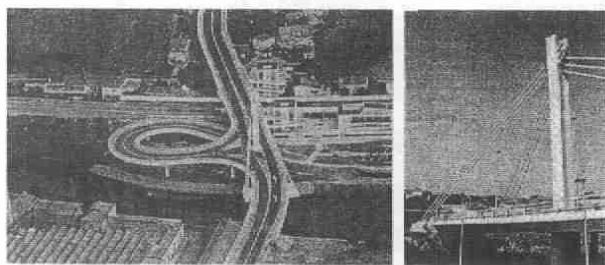


图11 跨越Ave河的St.Tirso桥——一座三向拉索弯斜拉桥

在平面小曲率的情况下,仍可考虑另一种可能性,即采用沿箱梁的单层拉索和单塔柱。当然,考虑了桥梁的水平弯曲,拉索不是一个平面,而形成一个演变的曲面。这个很不普遍的解决方案为Alzette斜拉桥所采用[8]。该桥水平曲率半径1750m,有两跨相同的130m跨径。塔柱承受由桥梁弯曲引起的侧向弯矩。为处理这种状况,Alzette河桥的塔柱截面是不对称的,并需引入18索竖向预应力,每索包含19根直径15mm的束股。

同样的概念早在1987年修建的葛饰新上平

井竖琴式斜拉桥中采用(图12)。在该桥中，S形弯斜拉桥中包括4个不对称的孔跨：220m长主跨和40.5m、134m和60.5m引跨。桥梁具有两个高度不同的单塔柱。

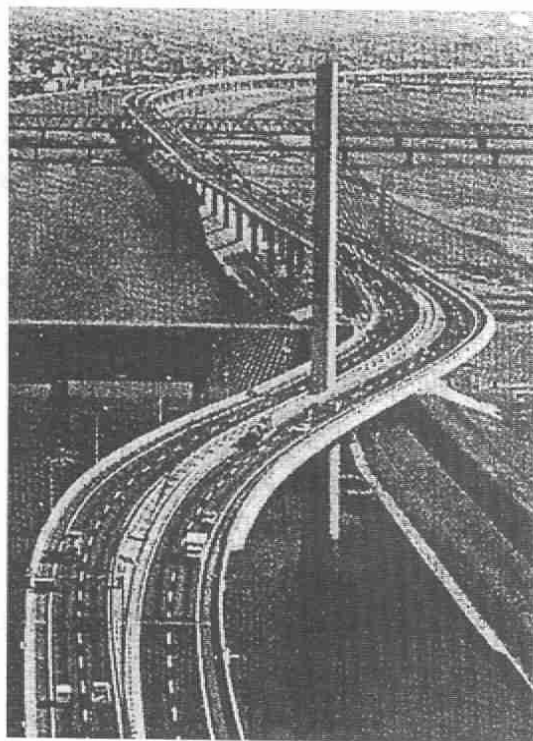


图12 日本葛饰新上平井竖琴式斜拉桥

最后，本文建议了部分斜拉桥方案概念[9]，以减小用平衡悬臂方法施工的弯箱梁桥的高墩中的横向弯矩。这种可能性，我们在南斯拉夫共和国黑山亚得里亚海Bokokotorian海湾的一座桥梁中加以研究。图13为该桥南桥位建议的桥梁方案，平面曲率半径为400m，主跨为220m，由两个与上部结构刚接的高墩支承。如果采用部分斜拉桥方案，有两方面的优点—籍拉索的作用，将垂直荷载从梁跨托起，传递至塔柱，以减小梁的永久悬臂弯矩，减小墩中的横向弯矩。

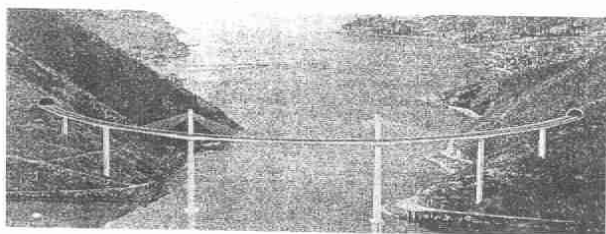


图13 黑山Bokokotorian海湾斜拉桥的方案透视图

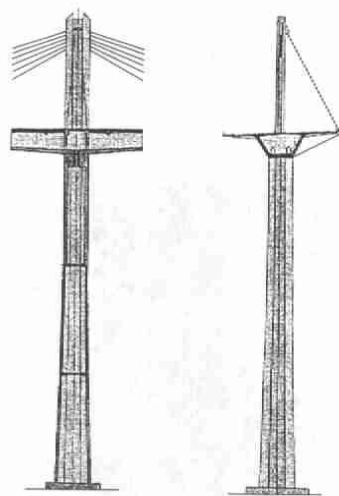


图14 Bokokotorian海湾斜拉桥：带有横向拉索的塔柱

如图15所示，主跨作用均布活载时，桥面的跨中弯矩和桥面支承截面处的扭矩，受拉索横截面面积的影响较小。主墩顶(即桥面正下方的截面)由均布活载引起的横向弯矩示于图15，其值为每根钢拉索横截面面积的函数。钢索的面积等于零时，即为没有任何拉索的平衡悬臂施工。对于平均为50根直径15mm束股的拉索，减小弯矩近40%。自然，这些拉索引起塔柱顶部水平力的变化，需用如图14所示的横向背索来平衡。

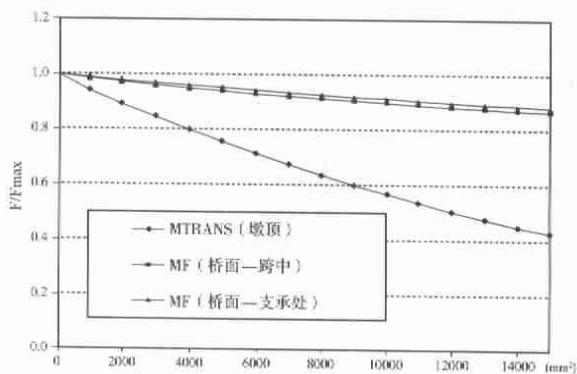


图15 钢索截面积

### 5. 结论

叙述了几种不对称和弯斜拉桥的拉索方案。探索了自锚和外锚方案的概念，讨论了这些方案的优点和缺点。

叙述了采用弯部分斜拉桥的可能性，其显著的优点为减小高墩中的横向弯矩。

(下转第16页)

为了保证质量和进度,根据具体情况,采用专门设计的YC60-100型千斤顶,该千斤顶穿心孔径40cm,质量30kg。在施工现场自己加工撑脚和“扁担”。

张拉步骤:

首先,用型钢垫平挂篮前缘下端,以免因张拉使挂篮前倾。

其次,由下往上依次装连接器、专用张拉螺纹钢、“扁担”、千斤顶、张拉螺母。

最后,装上压力表,接上油管,开始张拉。张拉示意图如图3

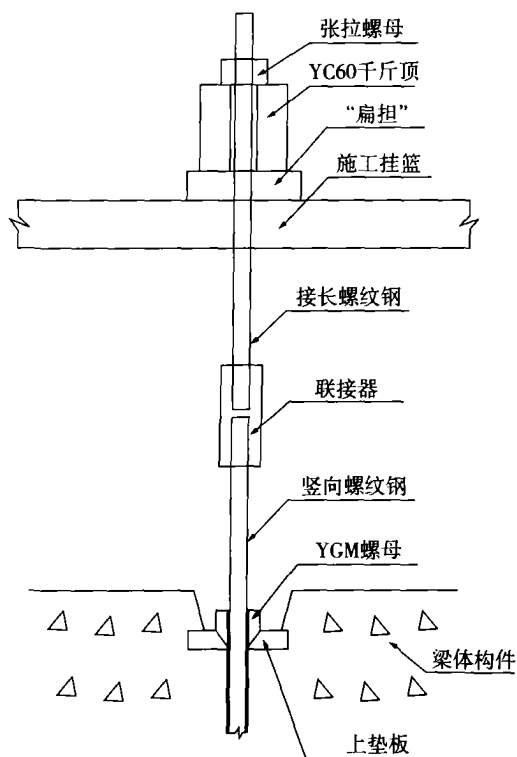


图3 竖向螺纹钢张拉示意图

注意事项:

① 张拉过程中,加压要求平缓,以免影响连接器联接的可靠性。

② 张拉完锚固时,GYM螺母要拧到位,尽可能减少预应力损失。

③ 张拉完后,采用超张拉措施,进一步减少预应力损失。

#### 4. 孔道压浆

孔道压浆是后张预应力施工的一道非常重要的工序,经过压浆,孔道内受张拉力的钢绞

线得到保护且与结构本身成为一个整体。本工程压浆采用UBC3.0型压浆泵产生压力,普通灰浆搅拌机拌浆。水泥浆水灰比为0.4,稠度30S,水泥为晋牌P042.5,孔道压浆要求从低处往高处灌,直到排浆孔冒浓浆,压力0.5~0.7MPa,保压2分钟。

#### 5. 结束语

仁义河特大桥为同类型结构中跨度最大的桥梁之一,其中主要受力构件为预应力筋。预应力施工是挂篮施工的必要条件,预应力施工直接关系到整个工程质量和进度。我们按设计标准,施工质量高、进度快,于2002年12月5日完成了所承担的任务,工程质量为优良。

(上接第34页)

#### 参考文献

- [1] A.J.Reis;A.Pereira; J.O.Pedro; D.Sousa—Cable-Stayed Bridges for Urban Spaces—IABSE Conference—Cable-Stayed Bridges: Past, Present and Future. Proceedings. Malmo, June 1999.
  - [2] A.J.Reis—Urban Bddges: Exploring Ideas and Design Cases—16<sup>th</sup> IABSE Congress—Urban Transportation Challenges. Lucerne, September 2000.
  - [3] J.Reusink; J.Keusink; M.Kuijpers—Designing the Erasmus Bridge, Rotterdam—Structural Engineering International, Vol.8, NO. 4, 1998.
  - [4] J-M.Cremer—The Val-Benoit Cable-Stayed Bridge—IABSE Conference—Cable-Stayed Bridges; Past, Present and Future. Malmo, June 1999.
  - [5] K.Takenouchi—Single Pylons for Curved Cable-Stayed Bridges—Structural Engineering International, Vol.8, NO. 4, 1998.
  - [6] L.F.Troyano; J.Manterola; M.Astiz—The Inclined Towers of the Ebro and Ierez Bridges—Structural Engineering International, Vol. 8, No.4,1998.
  - [7] J.J.Arenas; M.J.Pantaleon—Puentes mixtos atirantados—Puentes mixtos: Estado actual de su tecnologia y analisis. Barcelona, Noviembre 1992.
  - [8] R.Biwer; F.Huben; J-M.Cremer; V.Ville de Goyet—Cable-Stayed Bridge upon Alzette—International Conference AIPC-FIP. Deauville, October 1994.
  - [9] A.J.Reis—Innovative Solutions for Bridges: A Challenge for Designers—Proceedings of the International IABSE/FIP Confefence—New Technologies in Structural Engineering. Lisbon,1997.
- (译自“Asymmetric and Curvsvd Cable-stayed Bridges”, IABSE 索支承结构会议论文集, 2001年)