

斜拉桥用拉索的技术建议

段建华 编译

1. 目的
2. 背景
3. 推荐
4. 现有指导

1. 目的 为斜拉桥的拉索的下列主题提供指导

- a. 主张力单元(拉索);
 - b. 护套;
 - c. 防腐;
 - d. 鞍座
2. 背景.

在美国关于斜拉桥的最重要的部分,即斜拉索本身,已经出现了几个版本。此技术建议的目的是将此问题文件化,并发表对所有未来的斜拉索的建议。

a. 主张力单元

有好几种“索”可以用于做斜拉桥的拉索,索的配置形式决定于它的构造;索可以由平行钢棒 (ASTM A722), 平行钢丝束 (ASTM A421), 平行绞线束 (ASTM A416), 以及单排或多排钢绞线束 (ASTM A586), 或者密封钢绳。在美国已不再使用结构钢绳或密封钢绳: 平行钢丝 (ASTM A421) 在市场上也不再供应; 钢筋 (ASTM A722) 的允许应力很低、比绞线 (ASTM A416) 更低的疲劳强度。因此平行钢筋索的直径将比平行钢绞线索更大, 大的直径将影响暴露在风中的直径、锚具的尺寸和附属物的细节。

b. 护套

(1) 德国 Stuttgart 的 Seillerstrasse 人行天桥于 1961 年完工, 是第一座采用护套和注浆系统的

斜拉桥。拉索由一平行钢丝束封入 PE 套管后注入水泥浆组成。拉索被检查了很多次, 没有被腐蚀的迹象。美国第一次采用这种体系是 1978 年完工的 Pasco - Kennewick 桥。聚乙烯管有低密度、中密度和高密度, 由于具有更好的耐久性, 现在斜拉索应用上习惯采用高密度聚乙烯。

(2) 护套的用途有两方面: 为注射水泥浆提供一个空腔, 和作为斜拉索的防腐护套。

第三个目的有时称为在动载能力中起作用。但是, 联邦高速公路管理局 (FHWA) 从控制索尺寸考虑不将护套考虑成承载构件。已用过两种护套: 高密度聚乙烯 (PE) 管和钢管。

(3) PE 护套是一种不透气的材料, 6mm 厚度即有相当于 10.7m 混凝土墙的气相阻隔能力, 但是黑色聚乙烯的热膨胀系数大约是沙浆和钢管的六倍, 即与管道内的其它材料不兼容。因此, 采用白色或浅色的聚氟乙烯 (PVF) 带包缠, 以控制温度变化, 减少应力差的大小。

(4) 斜拉索的钢护套通常是无涂覆的钢管。一般一根根钢管是在工地对焊在一起的。钢管应涂漆以防止腐蚀, 应采用浅色以减少吸热。漆系统的选择应考虑暴露在紫外线下的效果。此外, 要求适当处理钢及焊接面的表面, 避免结合不牢或漆系统的退化。

(5) 经常说钢管比 PE 管耐用, 且更不容易开裂。关于耐久性, 从 1961 年到 1988 年间全球建了 53 座斜拉桥, 采用 PE 做斜拉索防腐护套。没有发生过换索, 在已完成的 48 个结构中 (在上述期间), 仅有 2 座桥 (4%) 有与 PE 管有关的事故。在这两个项目中不是所有的索均开裂, 如果按拉索的总数计, 实际比例要更低。这两个项目中的

开裂的主要原因是灌浆操作期间的超张拉。掌握了这些事故的原因,并在现有规范中加以考虑。在这些结构中损坏的PE管被修复好或换好。

世界上有六座桥(在同一时期)采用了钢管做拉索护套,其中之一服役不到10年后,在护套的接头处出现腐蚀,即16%的已完成钢护套出现事故。现场的对焊点受到由风对索作用及动载负荷导致的循环应力,最终导致焊接点的疲劳开裂(腐蚀的出现加深了疲劳开裂敏感性)以及后来的裂纹发展。由于太靠近高强度的钢绞线,现场焊接是不现实的。焊接的热输入将逆转绞线中钢丝的金相结构。钢护套开裂后,除了拆除和更换外没有实用的一个翻新程序。从护套耐久性考虑,此类应用的钢管没有足够的显示与PE管对比耐久性的追溯记录。

(6)其它关于钢管的考虑问题如下:

(a)在护套管的接头处要求有内衬筋,以获得透深的焊接,这样护套管的外径要增加,以确保衬筋不阻碍钢绞线在拉索中的自由通过。这个直径增加将增加灌浆量,增加拉索的静负荷,以至影响拉索的当量模量。

(b)将钢护套与动载能力隔离是很困难的。

(7)国家桥梁检验协会(NBIS)要求每两年检查桥梁,现有的拉索建造/制造技术并未使拉索易检验。—FHWA资助的研究计划成功地发展了一种斜拉索的无损监测方式,采用了磁场扰动(perturbation)方式(MPC)。但是钢管拉索护套严重地阻碍了MPC设备的成功使用。

c. 防腐体系

(1)防腐体系可以是单相或双相的。在双相方式中,永久防腐层是作为结构施工的最后一道施加的,这意味着在可能达到2到4年的施工期要有临时防腐。如果发生未预期的施工延期,这个时期可达6年甚至更长,大多数临时防腐的有效性是有限的,因此要在规定时间间隔内进行补加。无论什么原因,如果补加忽视了或未完成,在施加永久防腐前很明显有腐蚀攻击发生的明显的风险,这可能导致换索。现在有一个采用单相防腐保护体系的趋势,它同时提供临时及永久防腐系统,即一个为索提供从生产到整个索寿命期保

护的系统。

(2)早期的斜拉桥大多数缆索用了涂锌或镀锌的密封钢绳。例如,Venezuela的Maracaibo湖桥(1962年建造)。多数情况下这些钢绞线也涂有漆,锌涂层或镀锌有搬运及安装时不易损坏和不贵的优点,但它是一种“牺牲”涂层,即在攻击性环境中随时被消耗。在Maracaibo湖的严酷环境中,镀锌的密封钢丝绳(galvanized locked-coilstrands)使用18年后不得不在1980年更换,现在换上的索再次受到腐蚀。德国Mannheim的KurtSchumacher桥使用17年后开始出现腐蚀。很多其它采用这种拉索防腐系统的腐蚀消息被报道。

(3)镀锌工艺影响钢的机械性能。

据报道,镀锌后钢材的极限强度可降低5%,疲劳强度达20%。对于有些成分,可改变钢的韧性。怀疑有因镀锌工艺导致的氢脆敏感的可能,但没有有力的证据支持此观点。在镀锌钢丝或绞线封如沙浆中的情况下,锌层可与一些水泥反应,释放氢气,此反应决定于水泥碱、钢的种类及锌层的成分。当镀锌钢绞线埋入水泥浆中时,锌的腐蚀被加速,结果锌作为阳极或“牺牲”的金属涂层,与在大气中表现不同。

(4)直到结构安装结束和全部拉索张力的最终调整完成之后,拉索仍未灌浆。预应力钢的安装和灌浆的时差可达数年,特别是有未预期到的工程推延时,需要对预应力钢进行临时防腐。设计及建设时应考虑临时防腐的平均寿命和补充的方式。在适度的腐蚀环境中,可能要求每三个月重复施用水溶性的缓蚀剂。

(5)所有类型的护套一般有一个望远镜式的套筒细节,位于拉索的一端(顶部或底部),以避免产生给护套的静载和安装应力。在此位置的预应力钢建设时被暴露,在滑筒与护套永久连接和拉索灌浆之前,要求有临时保护措施。如果保护不当或临时防腐体系消耗尽了或未及时补充,都可能发生预应力钢的腐蚀。对这些细节考虑不足会导致昂贵的受损钢绞线的更换,包括材料费用、劳动力费用及工程延迟费用。

(6)水泥沙浆的碱性性能为预应力钢提供了

活性的防腐保护。但是,最近对灌浆拉索疲劳试验的样品分析证实了在循环载荷下沙浆的破碎和开裂。每25-50毫米沙浆中发生发纹开裂。同样,护套将受到由钢护套有缺陷的焊接引发的护散裂纹或PE护套周向过张造成的危害,这样为攻击性的腐蚀性物质提供了直接的路径。

(7)近几年中,为克服前面所述的护套和灌浆系统潜在问题,开发了多层防护体系。此概念是简单地增加防腐系统中的保护,所以,连同外层的护套和灌浆材料,创造了三部分、四部分甚至5部分的阻碍系统。通常,这些额外的防护层以下列两种方式之一提供:

(a)单根涂脂并涂包的钢绞线(单根绞线方式)

应注意这里的“脂”材料可以是油脂、石蜡、环氧沥青或其它合适的材料。

(b)直接给绞线施加涂层,如镀锌、涂环氧,或可能是一种陶瓷材料。所有这些系统是在运输前做好或施加。因此,他们不仅合入全套的防腐体系,还为运输、存储期提供了临时防腐,从安装后直到最终灌浆及在服役期间。

(8)拉索用的单根绞线体系(无粘结)是从用于停车库或平板结构的单根绞线技术上改变或者说转换来的。由15毫米无粘结预应力钢绞线平行束组成的拉索,钢绞线逐根涂脂和加护套,装入PE管中后灌浆。

(9)传统护套绞线的一个最新创新是直接在15毫米钢绞线的七根钢丝直接涂防腐材料,然后每根绞线挤压一聚乙烯套。涂覆防腐材料时,七丝绞线穿过一退绞装置(“鸟笼”式,一定长度),每根钢丝的全部表面都涂上,待绞合到原状态,用PE挤覆。

防腐材料是一种软的石化蜡,可在室温涂覆,并将钢表面的湿气排除,软化点高于260℃,并提供了优越的防腐性能。

(10)在寻找防腐方式及材料时,考虑了直接施加给预应力钢的涂层。与传统的钢筋相比,预应力钢涂层更加需要。对于预应力钢,涂层应能够承受张拉时的伸长而不开裂,即有张拉兼容性。镀锌钢绞线(或钢丝)已用于一些多层保护的体

系。正如前面讨论过,镀锌预应力钢不应再使用,因为它与水泥浆直接接触,设计者应该知道镀锌对钢材料性能的影响。在很短的一段时间里,涂环氧的钢绞线曾被认为是防腐挑战的答案。根据多个桥的拉索组件疲劳试验的结果,对单根绞线的内部空隙长期防腐提出了疑问,最近的一个新发展是环氧填充式的钢绞线,单丝之间的空隙用环氧树脂填满。这样就不需要考虑腐蚀介质进入绞线内,并改善了疲劳性能。应注意预应力钢的环氧配方和厚度与钢筋是不同的。拉索中单根绞线的环氧涂层为绞线提供了临时及永久的防腐保护。

d. 拉索鞍座

(1)拉索鞍座是用于使拉索连续通过一个支撑(塔),即在塔上的锚固位置单根拉索(塔的各侧)不截断,这意味着在最初的施工和安装以及未来因任何原因进行应力调整时,需要在两端同时协调地进行拉索的张拉(在塔两侧的桥板锚固点),而且需要换索时,与在塔上锚固的结构相比,拉索的更换长度要加倍。

(2)由于腐蚀及其它的考虑,拉索基本上仅有两种有用的体系:填芯式涂环氧钢绞线和单根钢绞线体系(无粘结)钢绞线体系。填芯式涂环氧钢绞线是一种有专利权的系统,因此要有一种可选择的系统——无粘结体系。填芯式涂环氧钢绞线的环氧表面应有足够的嵌入沙粒(grit),以提供排除在受荷条件下避免钢绞线在鞍座中滑动的摩擦。但是,这可能对拆除拉索带来困难。

由于结构决定了无粘结钢绞线不能提供鞍座中不滑动的条件,要求每根索在塔上有单独的端锚。因此,如采用鞍座,每座斜拉桥的设计中要有基于斜拉索体系和鞍座或单锚替代设计细节。所以,看来好象应设计这几种拉索体系,这样用单个拉索锚具在塔上结束,即不应用鞍座。(如果使用鞍座,每个斜拉索的设计都需要基于斜拉索体系和鞍座或单锚的替代设计细节,因此将拉索桥设计成结束于塔顶显得更适当,即拉索鞍座不应采用。)

(3)对于一个大的单鞍座(在此所有拉索会合到塔的顶端),沿着管不发生载荷传递,一直到

塔都是这样,所有负荷都要在一个局部细节传递。因此任何人都不能沿其长度用钢管任何可感知的载荷传递,为此必须在张力状态下升起管子。如果太早建立粘结,在管道中将产生很高的应力。

(4)当所有拉索聚合到塔顶的普通鞍座处时,拉索聚合和索之间的空间减少产生另外一个问题,没有足够的空间容下 Tedlar 带缠绕机或(MPC)检查设备。

(5)建设期间的风荷对于开门的桥(主跨未合龙)是严重的威胁,在采用平衡悬臂施工期间,为了处理半个平衡悬臂周期的不平衡静载,必须将索“过拉”(overpull)。对于轻的钢/混凝土复合桥,施加静载时拉索足够小,鞍座摩擦阻力大约刚达到。静载不平衡最大时的风荷可导致滑动,即使桥本身不出问题,仍可毁坏桥上所有的调节装置。由此,关注在此滑动载荷下安全系数不易达到是非常重要的。滑动是摩擦系数 μ 及倾斜角度的函数,对于给定情况这些都是常数。对于实际的跨鞍座索力不平衡,需要很大的摩擦才能达到正常的安全系数。因此,对于较轻的桥板要达到常规的安全系数(大约1.5)是不实际的,即使是静载条件下也如此。

(6)采用索鞍座的最大优点在于成本,材料本身虽便宜,但系统却不便宜。施工必须严格要求做好平衡,包括桥两端的全部操作,并“分离”悬臂吊。(例如:在一侧升起钢材后再在另一侧升起,然后回到第一侧,交替进行)。另外,值得注意的是桥板施工必须从水中进行,而不是从桥上进行。对于多数情况,水上的人工及设备成本比陆上要高,考虑额外费用及保险,有些情况下差别达到了30%,甚至更多。这些成本可以靠鞍座的材料节省去平衡掉。

(7)最有效的安装斜拉桥的方式是“靠近几何控制”(close geometric control)。除非桥板的刚性足以影响索的力量,桥不能靠力去有效地去完成好安装控制,过程类似于在线上挂一个砝码,如何靠测量线的力量去控制上升?索长度是控制桥梁建设最简单的方式。有鞍座时,索长度不容易

被控制,采用预制索时,长度控制相对简单。如果鞍座上存在上端锚具,采用现场钢绞线索时更加困难,但不是不可能。使用鞍座时是不可能的。桥板起升过程中必须有几何控制,这比没有控制要好,但应随桥板负荷和温度而变。如果未张拉索的长度可以控制,所有这些效应都可避免。

3. 建议 从七十年代初期开始,斜拉桥的拉索设计和建造规范在美国得到了发展。以下是关于设计和建造规范的建议,基于最新的知识(state-of-the-art)、美国对开展此技术的经验、及从国际项目取得的经验。

a. 主张力单元

斜拉桥的索由平行钢绞线组成,直径约15mm,符合 ASTM A416-90a(或最新版本)且必须是无焊和低松弛级。斜拉索采用的涂环氧钢绞线应符合 ASTM A882 标准,用于斜拉索时,涂环氧的钢绞线必须是中心填实型,直径约15毫米,无焊和低松弛级。平行钢棒不应用于拉索。

b. 护套

护套为高密度聚乙烯(HDPE)管,决定于公称直径,应符合 ASTM D3035 或 ASTM F714。需工程师批准,如果有与黑色 HDPE 管相同或更好的防紫外线能力,承包商可提议白色或浅色的 HDPE 管。钢管不应用于斜拉索的护套。

c. 防腐

防腐体系应是多层的,单相体系同时提供,临时及永久(保护)系统,即提供从生产开始,到全部寿命期的一个保护体系。这包括填心式涂环氧钢绞线和无粘结钢绞线。(涂油脂并加护套)。鞍座所有的拉索都接到塔上的适当锚具上,鞍座不应用于斜拉桥。

FHWA 认可这些斜拉桥设计的建议,不包括如下几点:

- 钢棒不能用于斜拉索的主张力单元;
- 斜拉索不应采用钢管做护套;
- 鞍座不应用于斜拉索;
- 所有斜拉桥要求做疲劳试验:不接受以往的疲劳试验结果。