

节段式桥梁预应力筋的摩阻损失

曹启汤 编译

摘 要:在许多节段式和整体式箱形梁桥中,正确估算预应力的摩阻损失仍是一个悬而未解的问题。本文根据试验情况,分析了节段和整体式梁之间后张摩擦损失及偏差损失情况,同时对使用涂有润滑剂的预应力筋的优缺点进行了研究。

关键词:节段式梁 整体式梁 预应力筋 摩阻损失 润滑剂

一、引 言

在许多节段式和整体式箱形梁桥中,正确预估预应力摩阻损失仍是一个悬而未解的问题。而结构设计时,总期望所施加的预应力能达到所规定的一个合理而精确的范围内。但是,用拉伸法测得的实际摩阻系数损失只有在桥梁建成后才能得到。因此,精确地预估应力摩阻损失对于设计者和建筑商都具有非常重大的意义。

在节段梁中,由于内部预应力筋使用了许多短导管,因此,相对于整体梁而言,分段中的导管安置要困难得多。而整体梁中使用的长导管在现浇混凝土时却可以较好地保持原位,而且不存在节段梁中导管接头处的联结偏差。这两种施工方法(节段拼装和整体现浇)中的摩阻损失究竟有多大差异需做进一步的定量分析;现行的导管安装容许偏差对预应力损失的影响也需要进行验证。而且从总体上减小摩阻损失的方法也需作进一步研究。在该课题中,通过对整体现浇和分段拼装试件的研究获得了摩阻损失的实测数据。另外,还获得了许多关于用润滑剂来减小后张摩阻损失或防止锈蚀的益处及负作用的资料。

二、研究的重要意义

现在,预应力承包商们大都认为设计者所采用的摩擦系数过于保守,而且节段施工中的摩阻损失要比相应的整体施工时要大。但规范中所规

定的管道摩擦系数和管道偏差系数是不随管道曲率半径、每根管道中的钢束数、预应力筋与管道截面积之比而变化的。过于保守的摩阻系数使得所采用的预应力筋大于所需值,而且还会引起预应力筋的过度拉伸。现在,现代化的施工技术和建筑商的施工经验已经使半刚性导管的偏差损失降低到了可容许的水平。对于长预应力筋,不仅摩擦损失大,而且计算预应力损失的误差也大。在整体式和分段式桥梁设计中使用更精确的摩擦系数或用润滑剂来减小总的摩擦损失均会减小摩擦损失的计算误差。精确的预应力损失计算可使预应力筋的选取更加经济合理,既不会使预应力筋的用量过大,也不会使预应力筋无法提供所需的预应力。

三、试验目的

该项研究的最初目的是定量分析节段和整体式梁之间后张摩擦损失及偏差损失的差异。在节段拼装和整体现浇施工中使用涂有润滑剂的预应力筋的优缺点也进行了研究。另外,根据润滑剂在减小摩擦、保持钢筋与水泥浆粘结性能的效果,对润滑剂的好坏进行了分类。

通过该项研究,预期得出如下成果:为节段式桥梁推荐更精确的摩擦系数;根据现行规范规定的导管在节段联结处的容许安装偏差对摩擦损失的贡献评价其可接受程度;建议哪些润滑剂可用

作减小预应力筋的摩擦损失,哪些必须拒绝使用。

两个大比例试件,除一个整体现浇一个分段拼装外,其他方面完全相同。实验所得出的实测数据用于定量分析这两种不同施工技术所引起的摩擦损失的差异。这两个试件具有相同的长度和曲率,且均采用了两种导管类型,一种导管为下垂式;另一种为直线型。预应力钢束每束由7根钢丝组成,直径为0.5in(12.7mm),抗拉强度为270Ksi(1890MPa),导管采用内径ID为2in(50mm)的镀锌半刚性管。另外,本文不对体外预应力筋和曲率发生急剧变化的体内预应力筋的摩阻损失进行研究。

在节段式桥梁中,导管布置通常是与相应节段的水平曲率相一致的,特别是板底预应力筋。这就使得各节段连接处的转角发生突变,即使得水平曲率梁亦是如此。而且,腹板导管的竖向曲率在一个节段中也频繁发生变化。这就使得内部预应力筋的摩擦损失酷似体外预应力筋。最近Roberts对体外预应力筋和摩擦损失进行了测量。对于半径小于50ft(15m)的体外偏差管,其管道变曲摩擦系数大约为0.25,管道偏差摩擦系数为0.0002/ft(0.0006/m)或更大一些。

与施工现场的梁相比,该研究所用大比例试件的预应力筋是平顺下垂的且具有适当偏小的变曲半径。因为人们普遍发现摩擦系数是随着弯曲半径的减小而增大的,所以本试验梁所测得的摩擦系数与偏差数是偏于保守的。

四、试验步骤

为了评估各种润滑剂减小摩阻损失的有效性,做了数组试验。在大比例和小比例试件上均对润滑剂的效果进行了试验。所有润滑剂也在张拉试件上进行了试验以评估它们对钢束和水泥浆粘结性能的影响。所试验的润滑剂(其中有些是防腐剂)标识如下:

L1	Visconorust 8415E
L2	Dromus B
L3	Unocal 10
L4	Unocal 10MS
L5	Texaco D
L6	Rust Veto FB20

L7	Hocut 737
L8	Hocut 4284
L9	Nalco 6667
L10	Sodium Silicate
L11	Wright 502
L12	无润滑剂
L13	Aqualube MX-1
L14	Graphite Flakes #2

大比例整体试件的摩擦试验为摩阻损失计算提供合理的摩擦系数,包括管道弯曲摩擦系数和管道偏差系数。大比例分段拼装试件的导管(形状同整体浇筑试件)是在严格控制各节段连接处偏差的情况下制作的。通过对各节段联结处导管偏差数据的比较,可以检验现行规范中规定的导管对准偏差的合理性,也可进一步了解节段和整体施工中管道偏差摩阻损失的差异。

五、小比例试件的摩擦系数

小比例摩擦试件是由Hamilton和Davis设计的,该试件易于施工,试验速度快,并能给出有重验性的结果。通过试验可得出镀锌导管中润滑与不润滑钢束的静摩擦系数和动摩擦系数。

每个试件首先在不涂润滑剂的情况下试验两次,然后涂上润滑剂再试验两次。试件包括两个3.5in×3.5in×12in(89mm×89mm×305mm)的混凝土块,两试块的接触面上各挖一条,1.25in×12in(32mm×310mm)的凹槽。钢束夹在两混凝土块之间并穿过预制好的凹槽。首先试验机在垂直于钢束方向施加1001b(4450N)的压力,然后用液压千斤顶拉住钢束一端沿其轴向施加一拉力。力和钢束位移曲线由绘图机记录。每组试验中,相应于动摩擦系数(平稳运动)的法向力绘于图1中。

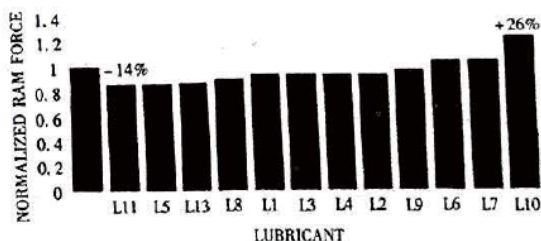


图1 每种润滑剂对应的法向压力图

六、张拉试验

张拉试验由 Kittleman 设计,目的是研究在清洗与不清洗两种状态下,每种润滑剂对七丝钢绞线与水泥间粘结性能的影响。桥梁上的体内后张预应力筋一般都进行管道封浆,一方面防止张拉后钢筋锈蚀,另一方面增强梁截面的极限强度。残留在钢束表面上润滑剂会引起高弯矩区预应力筋长度的增加,而且会降低其极限抗弯能力。

所有进行试验的润滑剂,根据它们对钢束水泥粘结性能的影响进行分类,同时也给出了它们从钢束上清洗掉的难易程度。在去除水溶性润滑剂时,工地现场采用的清洗技术的有效性令人怀疑。残留在钢束上的润滑剂不仅会破坏钢束与水泥的粘结性也会在很长的时间内与钢筋和水泥发生化学反应。

张拉试件包括一个 $12\text{in} \times 8\text{in} \times 8\text{in}$ ($305\text{mm} \times 203\text{mm} \times 203\text{mm}$) 的混凝土块和一根长 12in (305mm)、直径 2in (50mm) 的镀锌半刚性导管。导管沿混凝土块纵向浇筑其中。然后把一根直径为 0.5in (12.7mm) 的七根钢束用水灰比为 0.45 的灰浆浇筑固定于导管中央。试件中的钢束分以下几种情况设置:

- 不润滑,灌浆固定
- 先润滑再装进导管拉伸,最后灌浆
- 润滑,装进导管拉伸,再用高压清洁水通过灌浆管道清洗 5 分钟,最后灌浆。不润滑钢束的试件是一个供核对用的标准试件;未清洗钢束的试件代表可能出现的最不利情况;清洗钢束的试件表示出所用润滑剂的可冲洗性。

所有试件均垂直固定安装在试验机上,以便于钢束施加轴向拉力。试验得出了钢束位移与张拉力的关系曲线。对于钢束不清洗和清洗两种状态,图 2 和图 3 分别给出了相应的滑移力对不润滑钢束滑移力的百分比数值。

七、大比例整体试件的摩擦试验

大比例整体浇筑试件由 Tran 制作并试验。该试验的主要目的是确定管道偏差系数、管道弯曲系数以及润滑剂对二者的影响。在该试件上,对润滑剂 L2, L5, L8, L11 和 L13 进行了试验。

试件是一根 78ft (25.6m) 长, 48in (1219mm) 高, 18in (457mm) 宽的梁。梁内共设置了 10 根管

道,其中有 8 根是下垂式的且具有相同的曲率 ($\Sigma\alpha = 1.311\text{rad}$),另外两根是直的,是为测试管道偏差摩擦损失而设的。该试件中所用的部件均是美国后张法施工中所普遍采用的。

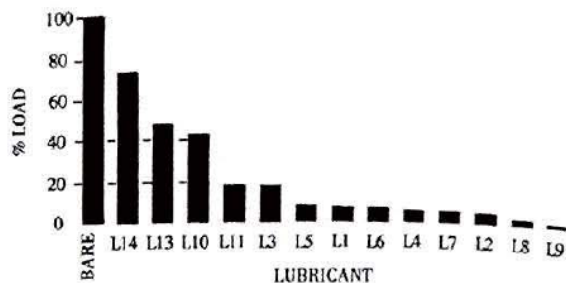


图2 钢束不冲洗时的滑移荷载

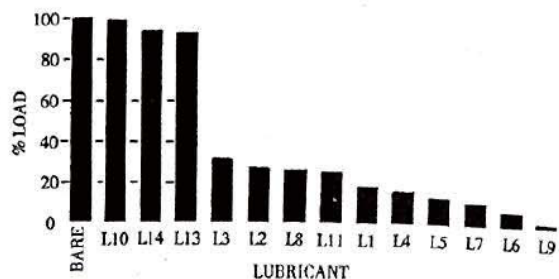


图3 清洗钢束条件下的滑移荷载

预应力钢筋每次按 7 束一组或一束一组在导管中进行张拉。荷载压力盒安装在固定端锚固垫板和锚头之间。带有压力传感器的千斤顶安置在预应力筋活动端锚固板的中央。七束预应力筋逐级张拉至预应力筋极限强度的 80% , 即 230Kips (1024KV)。

从无润滑直线管道试验中提出的管道偏差摩擦系数是一致的,平均值为 $3.83 \times 10^{-4}/\text{ft}$ ($0.00117/\text{m}$),标准差为 $0.01 \times 10^{-4}/\text{ft}$ ($0.0003/\text{m}$)。这表明, 78ft (25.6m) 长的无润滑预应力束将损失 3% 的预应力。

在弯曲预应力筋的试件中,人为的和偶然的(管道偏差)弯曲均存在。为了确定人为弯曲摩擦系数必须首先推断出偶然管道偏差的影响。因此,在计算弯曲摩擦系数时假定管道偏差系数为 $3.83 \times 10^{-4}/\text{ft}$ ($0.00117/\text{m}$)。于是可得无润滑预应力筋的摩擦系数在 0.142 至 0.158 之间,平均为 0.151 ,标准差为 0.0063 。仅有一根导管数值很高,为 0.237 ,这是由于导管破坏使得水泥浆侵入的缘故。润滑过的导管和预应力筋的弯曲摩擦系数在 0.102 和 0.134 之间。润滑后用水彻底

清洗的导管,其摩擦系数的减小量与接触面上涂润滑剂的导管相同。最有效的润滑剂是 L11,其次是 L5。

八、大比例节段拼装试件的摩擦试验

大比例节段试件的几何尺寸与大比例整体试件基本相同。施工方法是所要研究的主要因素。设计大比例节段试件的目的是为了获得以下资料:现行导管安装偏差的合理性以及用润滑剂来减小摩阻损失的有效性。

分段拼装的设计和施工满足 AASHTO 节段混凝土桥梁的设计和施工规范要求。梁分十段拼装。中间八节段长 8ft (2.62m),两锚固段长 7ft (2.30m)。分段拼装摩擦试验试件中所有部件均是美国后张法施工中所普遍采用的。试验中所采用的预应力筋安装方法和预应力施加过程与 Tran 所实验的整体本质上是相同的。大比例公段摩擦实验对 L11, L13 和 L14 润滑剂进行了测试。

节段试件有八根弯曲导管和三根直导管。三根直导管在施工时九个连接处设置了人为的偏差。八根弯曲导管也在拼装处故意设置了施工偏差。在张拉过程中,预应力筋总是拉偏,从而使摩擦损失达到最大。

现行 AASHTO 对导管接合处的容许偏差是 $1/8\text{in}$ (3mm),为了确定按此偏差设置的导管是否会极大地增加摩擦,分段拼装试件中的导管在梁长方向每一接头处设置了三种人为的偏差:0in, $1/8\text{in}$ (3mm) 或 $1/4\text{in}$ (6mm)。这种直接比较试验给出了导管设置偏差与摩阻损失的有关关系。于是可评估出现容许偏差的合理程度。

直导管中偶然偏差摩擦系数不论接头处的人为偏差是 0in, 还是 $1/8\text{in}$ (3mm) 基本上是相同的,平均值为 $5.16 \times 10^{-4}/\text{ft}$ (0.00157/mm),标准差为 $0.55 \times 10^{-4}/\text{ft}$ (0.00017/m)。人为偏差是 $1/4$ (6mm) 的导管,其偏差摩擦系数为 $6.41 + 10^{-4}/\text{ft}$ (0.00195/m)。采用直导管试验中所测得的管道偏差摩擦系数,可得出无润滑弯曲导管的摩擦系数在 0.140 至 0.159 之间,平均为 0.151,标准差为 0.0072。仅有一根导管所测数值偏高,为 0.173。这是由于该导管损坏后浸入

环氧树脂造成的。相应润滑后的弯曲导管和摩擦系数从 0.133 到 0.164。L14 是最有效的一种润滑剂,其次是 L11 和 L13。

九、结 论

1. 摩擦系数

从小比例动、静摩擦试验中所测得的平均摩擦系数为 0.24 或更大一些。该系数仅适用于镀锌导管中的无润滑钢束。它比施工现场的变曲导管的摩擦系数要高一点,与 AASHTO 所建议的弯曲摩擦系数的上限是一致的。在各种情况下,外观检查表明钢束均切入了导管的表面。在小比例摩擦试验中所施加的法向力代表了变曲半径为 30ft (10m) 的导管中预应力筋所产生的法向力。

在大比例模型试验中,预应力筋固定端的力在张拉完成后的 5 分钟内仍继续增加。即使预应力筋张拉端的各千斤顶卸掉部分荷载后,固定端的预应力仍会增加千斤顶总张拉力的 2% 左右。预应力筋松弛完成后的偏差摩阻损失被用来计算管道偏差摩阻系数,这是因为预应力筋固定端力 2% 的增加量减小了变曲导管的总摩擦损失,而不仅仅是管道偏差产生了摩擦损失。这种情况是小弯曲半径导管的特点,特别是 Roberts 所述的体外预应力筋,即使张拉端锚固后预应力筋仍会松弛。在大比例模型试件中,弯曲导管 70% 的长度范围内,弯曲半径大于 100ft (33m),平均最小半径为 63ft (21m),只有一处的最小绝对半径为 19ft (6.2m)。在预估按规定建筑的大比例模型试验导管中的预应力损失时,较慎重地选取了摩擦系数值:弯曲摩擦系数为 0.16;对于整体浇筑试件,偏差摩擦系数为 0.0004ft (0.0012/m);而分段拼装试件为 0.0005ft (0.0015/m)。

2. 润滑剂的作用

在施工现场,润滑剂已被成功地用来减小后张预应力摩擦损失。Bezouska 使得水溶油作润滑剂,摩擦损失减少了高达 27%; Dywidag 用 L13 减少了 35%。在大比例整体浇筑模型试验中,Tran 所测得的最大总摩阻损失减少量为 22%,所用润滑剂为 L5。而在大比例分段拼装模型试验中,使用润滑剂后预张应力损失最大减少量仅为 15%,相应润滑剂为 L14。在所研究的小比例模型试验

中,所用大多数润滑剂均能有限地降低摩阻损失。具有相同弯曲导管的并列试验需在施工现场进行,以确定每种润滑剂在这些导管中减小摩擦的有效性。当采用能产生低法向力的管道时,水溶性油和肥皂具有明显的效果。

在所测试的润滑剂中,除 L13 和 L14 外,大多数会破坏钢束与水泥浆的粘结,即使用水彻底清洗后也不能避免。因为 L13 还不能确定是否与钢筋发生反应(肥皂基),所以建议采用 L14 来减小摩擦损失。

3. 导管容许安装偏差

在分段拼装模型试件中,因为偏差为 0in 和 1/8in(3mm)的直或曲导管中的摩擦损失几乎没有什么区别,因此现行 AASHTO 中采用的 1/8in(3mm)的容许偏差看来是合适的。对直径为 2in 的镀锌半刚性导管也进行了试验。导管直径越大,容许偏差对导管的影响应该越小。当导管设置偏差为 1/4in(6mm)时,偏差摩阻损失会大大增加。

4. 总结和建议

在该项研究中,制做了两个大比例摩擦试验模型并对其进行了测试。其中整体浇筑模型有两条直管道和八条下垂式管道;分段拼装模型有三条直管道和八条下垂式管道,这些管道与整体浇筑模型中的管道是相同的。摩擦试验表明,整体浇筑和分段拼装施工中的摩擦损失是不同的。除此之外,用水溶性油和其他润滑剂对这两个模型分别进行了润滑预应力筋试验。

另外,对小比例模型也进行了试验,以便对润滑剂的性能进行比较。根据润滑剂减小摩擦的能力,以及它们对钢束的水泥浆粘结性能的影响,对所试验的润滑剂进行了排序。所有试验结果被用来:

- 确定下垂式镀锌半刚性导管中预应力钢束更精确的摩擦系数和管道偏差系数。
- 推荐减小摩阻损失的适宜润滑剂。
- 检查现行 AASHTO 建议的导管分段连接处的容许设置偏差。

根据以上试验结果,可得出下列建议和结论:

- 平顺下垂的体内预应力筋的推荐摩擦系数

如图 6 所示。

- 在试验中,最有效的润滑剂能将弯曲摩擦系数减小 30% 左右。当预应力筋的弯曲半径比模型试件中的弯曲半径更大时,使用润滑剂摩擦损失会减得更多。

- 所试验的水溶性油基润滑剂均会大大地降低钢束和水泥浆的粘结强度。当粘结强度很重要时,应使用 Graphile 或 Aqualuble MX-1(肥皂基)润滑剂,且 Graphite 润滑剂能更大地降低摩擦(摩擦系数能降低 20%)。

- 所试验的大多数润滑剂仅能有限地降低摩擦损失。

- 在安装预应力筋之前,导管先用油或肥皂润滑,再进行冲洗,摩擦损失的减少大于等于导管和预应力筋完全润滑的情况。

- 现行 AASHYO 所规定的导管连接处 1/8in(3mm)的容许设置偏差是适当的,不会造成太大的摩擦损失。

- 粘结剂或环氧树脂侵入导管后比无破损导管造成的摩擦损失更大。

- 即使张拉端卸掉部分荷载后,预应力筋固定端的力在张拉完成后 5 分钟之内仍会持续增加。

- 导管不润滑产生的摩阻损失比相应润滑导管增加约 2%。

镀锌半刚性导管中的七线钢束	最小弯曲半径	μ	施工方法	$K(f^{-1})$
	$R > 100ft$	0.16	整体浇筑	0.0004 (0.0012/m)
	$100ft > R > 50ft$	0.16 - 0.25	分段拼装**	0.0005 (0.0015/m)
	$R < 50ft$	0.25		

** 对于长度小于 8ft 的节段,偏差摩擦系数可能会更大

图 6 平顺下垂体内预应力筋的推荐摩擦系数

十、致谢

本文所作的研究是得克萨斯运输局各联邦公路局联合资助的一项大的研究计划中的一部分。与本课题有关的子课题是如何降低摩擦损失和桥梁体内后张预应力筋的防腐。研究工作是在奥斯汀得克萨斯大学的 Phil M. Ferguson 结构工程实验室做的。另外,本文的建议和结论是作者提出的,也许能或不能代表其他主办人的意见。