

# 大连市疏港路S形曲线连续箱梁桥预应力摩擦损失试验研究

赵国藩<sup>1</sup> 宋玉普<sup>1</sup> 谭克俊<sup>2</sup> 黄承逵<sup>1</sup> 李晓龙<sup>2</sup> 王清湘<sup>1</sup> 钱彭玲<sup>2</sup> 孙公新<sup>2</sup>

(1.大连理工大学土木系 116023 2.大连市政设计研究院 116184)

**摘要:** 本文为大连市疏港路东一号桥支线S形曲线预应力连续箱梁桥试验研究报告的第一部分, 详尽介绍了该桥预应力摩擦损失试验研究的情况。

**关键词:** 连续箱梁桥 预应力 摩擦损失 试验研究

## 1. 绪论

### 1.1 工程概述

疏港路工程是大连市九五重点市政工程之一, 其中东一号桥支线S形曲线预应力连续箱梁桥(以下简称S形桥)是该工程中较复杂的一项, 本工程由大连市市政工程设计院设计, 由铁道部第十九工程局施工, S形桥结构形式为三跨连续梁, 横截面为变高度单箱四室截面, 桥轴线选型为S形, 主跨跨越大连港3条货运铁路, 跨度为41.22米, 上部结构形式示意图见图1。本S形桥跨度大、线型复杂, 设计中采用了预应力砼结构, 所用材料为: 箱梁主体采用50号砼。预应力钢绞线采用15.0(7 $\phi$ 5.0),  $R_y^b=1500\text{MPa}$ 钢绞线, 预应力钢索共176索, 最长钢索计算长度为63.467米, 最短钢索计算长度为15.205米, 钢索在桥立面分布示意图见图2, 钢索编号X $\xi$ , X为N时是肋中钢索; X为P时是上板钢索, X为W时是下板钢索, i表示所在肋号,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ , j表示钢索序号, 肋中钢索 $j=1\sim 22$ , 上板钢索 $j=1\sim 8$ , 下板钢索 $j=1\sim 10$ 。钢索形式除 $N^{19}_i, N^{20}_i, N^{21}_i, N^{22}_i$ 和 $P^1_i, P^2_i, P^3_i, P^4_i$  ( $i=1\sim 5$ )为平面曲线外, 其余各索均为空间单曲、空间双曲或空间多曲形式, 最长的两组钢索 $N^{11}_i, N^{12}_i$ 的曲线形式见图3。顶、底板钢索及梁肋中 $N^{11}_i,$

$N^{12}_i$ , ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ )钢索采用7根钢绞线为一束, 其它钢索一律采用9根钢绞线为一束, 7根一束的张拉控制力为1091.79kN, 9根一束的张拉控制力为1403.73kN。普通钢筋为II级螺纹钢, 锚具为大连预应力机具厂生产的XM锚具, 采用预埋波纹柔性铁皮管成孔。S形桥外观见图4。

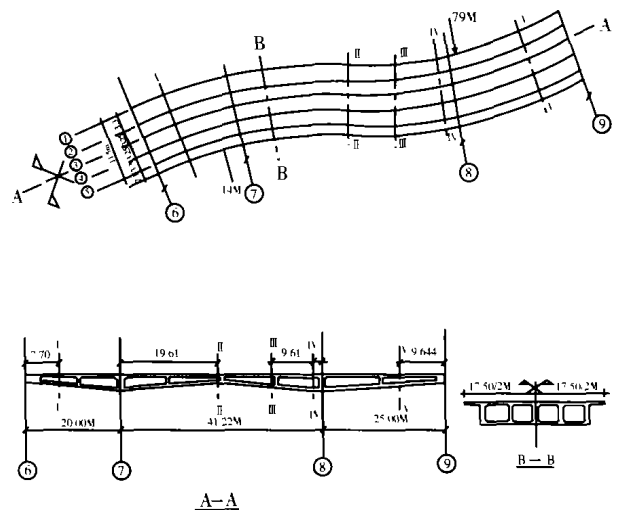


图1 上部结构形式示意图



图2 预应力钢索立面分布图

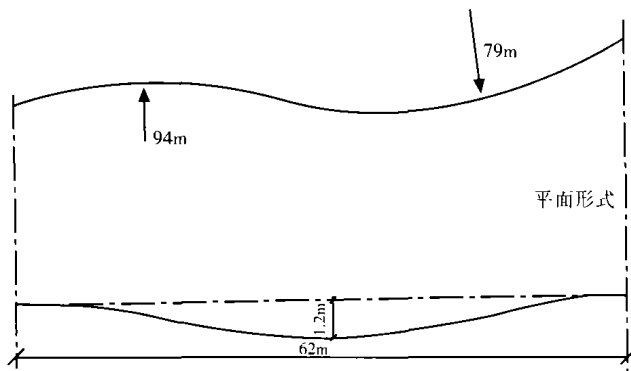
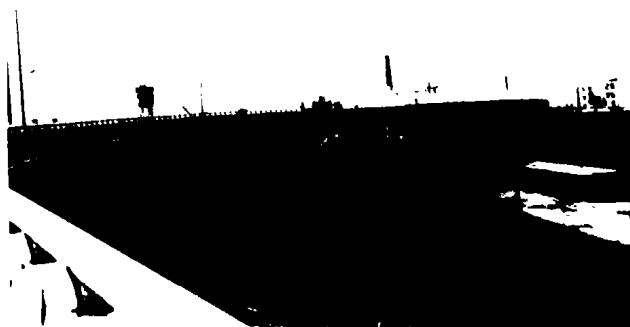
图3  $N_{11}$ 、 $N_{12}$ 的曲线形式示意图

图4 S形桥外观

## 1.2 实验目的

众所周知，对于后张法预应力砼结构，在施工张拉阶段将会有较大的预应力摩擦损失，尤其对于本工程而言，所采用的预应力钢索很长，且预应力钢索线型复杂，虽然现行规范已给出了预应力摩擦损失的计算模式和有关参数，但是受诸多因素的影响，这些参数的变动很大。确定本工程计算时所采用的有关参数是否准确、能否使结构具有足够的可靠度，是本次试验的一个主要目的。本次试验拟通过在工程施工阶段的现场测试，测取有关预应力摩擦损失参数，以验证设计的可靠性，确保大桥的安全运行。

另外，现行规范只给出了平面单曲型钢索的预应力摩擦损失计算模式，对空间多曲型钢索的预应力摩擦损失计算无明确规定，本次试验拟借助原型试验，对空间多曲线型的预应力钢索在张拉阶段的摩擦损失的计算模型进行研究，以服务于实际工程，并为修改规范提供参考。

## 1.3 试验研究方法

### 1.3.1 数据采集系统

本次试验所采用的数据采集系统是从日本进口的UCAM—10B多通道数据采集系统，是目前国际上最先进的数据采集系统之一。该系统一次最大采集容量500点，可以进行各种大型工程结构的应变测量，且自动采集，自动打印结果。本次试验的采集系统由一台UCAM—10B主机和六个外接扫描器组成，采集总容量300点，采集系统工作图见图5。

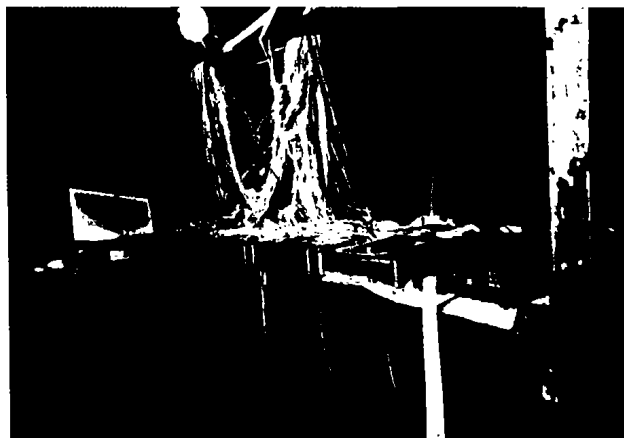


图5 采集系统工作图

### 1.3.2 用荷载传感器测取张拉端和锚固端之拉力

本试验共采用四个电阻应变式荷载传感器，各传感器精度1<sup>#</sup>: 0.971kN, 2<sup>#</sup>: 0.813kN, 3<sup>#</sup>: 0.701kN, 4<sup>#</sup>: 0.692kN, 传感器在试验前后均做了标定，标定工况和使用工况基本相同。传感器采荷系统示意图如图6所示。张拉端工作图见图7。

### 1.3.3 在预应力筋上贴应变片，测取张拉钢索在各控制截面处的应变值

为了测取张拉钢索在各段上的预应力摩擦损失，并验证在正式张拉锚固时张拉钢索中预应力值是否达到要求值，以及在荷载试验时测定各截面应力分布情况，本次试验共选取了五个控制截面，在46根钢索上共贴电阻应变片154片，并在相应的非预应力钢筋上共贴应变片200片（非预应力钢筋贴片情况见§5-1），共使用导线1.83万米。各测试截面连接应变片之导线从桥南侧引出，集中至桥下临时工作室，接入采集系统。图8为联接导线工作图，选取之控制截面I-I-V-V截面位置示意图见图1。各截面形式及预应力筋贴

片位置见图9~13。图中标“△”处为贴片钢索位置，截面外相应位置所标为该索编号。

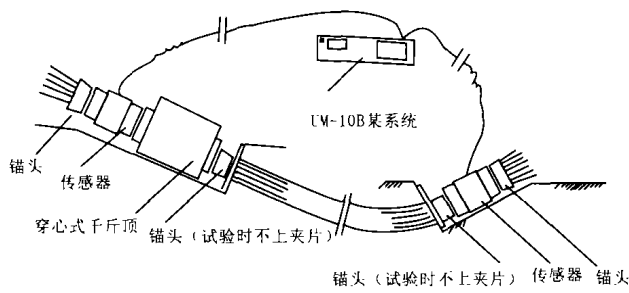


图6 传感器采荷系统示意图



图7 张拉端工作图

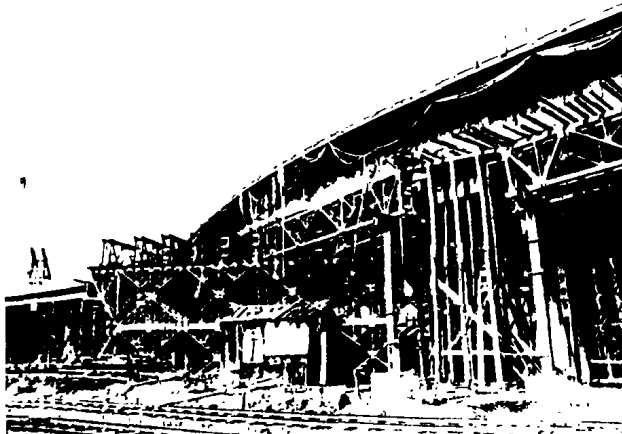


图8 联接导线工作图

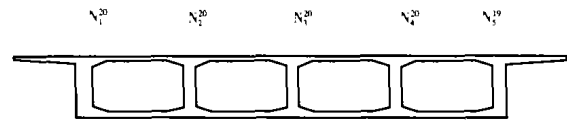


图9 I 截面形式及预应力筋贴片位置



图10 II 截面形式及预应力筋贴片位置

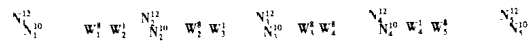


图11 III 截面形式及预应力筋贴片位置



图12 IV 截面形式及预应力筋贴片位置

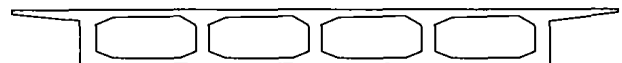


图13 V 截面形式及预应力筋贴片位置

## 2. 平面曲线钢索预应力摩擦损失计算参数的确定

### 2.1 造成摩擦损失的原因

摩擦损失是指预应力筋与周围接触的管道之间发生摩擦造成的应力损失。摩擦损失可以认为由长度效应与曲率效应两个部分组成。长度效应是指直线筋将会遇到的摩擦损失，尽管主观意图是将管道做成直线形，而实际上因受施工条件限制，工程中很难将管道做成完全平直，总会存在局部偏差，这样在张拉过程中，钢筋与管道之间仍然会因刮碰而引起摩擦力，如图14所示。长度效应的大小取决于预应力筋的长度和应力、钢筋与管壁材料的摩擦系数、管道的正直度和成型的方法以及施工质量等。长度效应以局部偏差影响系数k表示。

曲率效应是由曲线筋的曲率摩擦损失引起的，这一损失也取决于材料之间的摩擦系数、预应力筋对管壁的压应力以及接触的长度，而压应力则取决于预应力筋的应力和转角，曲率效应以曲率摩擦系数  $\mu$  表示。

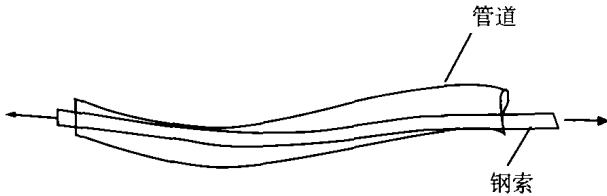


图14 管道局部偏差形成刮碰现象

实验表明  $k$  和  $\mu$  的大小取决于下列因素：钢筋种类、表面特性，成孔管道材料、施工质量及正直度、预应力钢筋面积与管道面积之比（净空余量），此外，还会有一些不确定的意外因素，例如曲线截面中各钢丝或钢绞线的侧向挤压和约束、薄壁金属套管可能在浇注砼时受振捣棒碰撞而变形或接缝处漏浆，使预应力钢筋直接与砂浆接触等，因此，这些系数的准确取值不应是一个确定值，如要求得精确数据，则要进行专门试验，表1列出了《公路钢筋砼及预应力砼桥涵设计规范》（JTJ023-85）对  $k$  和  $\mu$  取值的规定。<sup>[1]</sup>表2列出了国外有关规范对  $k$  和  $\mu$  取值的一些规定。<sup>[2]</sup>

表1 《公路钢筋砼及预应力砼桥涵设计规范》（JTJ023-85）对  $k$  和  $\mu$  取值的规定

管道成型方式	k	$\mu$	
		钢丝束钢绞线光面钢筋	螺纹钢
预埋铁皮管	0.003	0.35	0.40
钢管抽芯成型	0	0.55	0.60
橡胶管抽芯成型	0.0015	0.55	0.60

表2 国外有关规范对  $k$  值和  $\mu$  值的规定

后张束种类	k	$\mu$
用柔性金属套管 钢丝束	0.0033-0.00490	0.15-0.25
7股钢绞线	0.0010-0.0066	0.15-0.25
用刚性金属套管	0.00066	0.15-0.25
涂有油脂的钢丝或钢绞线	0.0010-0.0066	0.05-0.15
涂有玛碲脂的钢丝或钢绞线	0.0033-0.0066	0.05-0.15

## 2.2 k值的确定

根据《公路钢筋砼及预应力砼桥梁设计规范》（JTJ023-85）规定，预应力钢筋与管道之间摩

擦引起的应力损失，可按下列公式计算：

$$\sigma_{s1} = \sigma_k \left[ 1 - e^{-(\mu \theta + kx)} \right] \quad (2-1)$$

式中  $\sigma_k$ —张拉钢筋时锚下的控制应力

$\mu$ —预应力钢筋与管道壁的摩擦系数

$\theta$ —从张拉端至计算截面曲线管道部分切线的夹角之和

$k$ —管道每米局部偏差对摩擦的影响系数

$x$ —从张拉端至计算截面的管道长度，以米计

$$\beta = \sigma_{s1} / \sigma_k = \left[ 1 - e^{-(\mu \theta + kx)} \right] \\ = (\text{张拉端荷载} - \text{锚固端荷载}) / \text{张拉端荷载} \quad (2-2)$$

$\beta$  称为预应力摩擦损失系数。

虽然规范对于  $\mu$  和  $k$  的取值已做了规定，如表1中对于预埋铁皮管， $k=0.003$ ， $\mu=0.35$ ，但这种取值是否能准确表示本工程中管道每米局部偏差对摩擦的影响系数和预应力钢筋与管道壁的摩擦系数尚不能肯定，为了准确地推算本工程中预应力筋在张拉阶段的摩擦损失，应首先根据本工程的实际情况求得准确的  $k$  值和  $\mu$  值。

疏港路一号桥两支线合龙处的70#帽梁中有4束直线预应力钢索，钢索计算长度5.61米，为测取  $k$  值，对该4束钢索做了现场直线张拉试验，使用  $A_1$ 、 $A_2$  两个电阻应变式荷载传感器， $A_1$  在张拉端， $A_2$  在锚固端，加荷装置为油压千斤顶，数据采集使用 YJ-K2 型静态电阻应变仪，应变仪精度  $1 \mu \epsilon$ ，为提高精度，传感器标定系数采用各荷载等级下的标定系数，传感器在各荷载等级下的标定系数及张拉端荷载见表3。

表3 传感器在各级荷载下的标定系数及张拉端荷载

荷载分级 (kN)	300	600	900	1200	1500	1800	1900
A1传感器在本级荷载下之标定值( $\mu \epsilon$ )	378	755	1120	1478	1865	2230	2360
A1传感器在本级荷载下之标定系数(KN/ $\mu \epsilon$ )	0.794	0.795	0.804	0.812	0.804	0.807	0.805
张拉端加载时A1传感器读数( $\mu \epsilon$ )	363	730	1101	1475	1848	2223	2347
张拉端荷载(kN)	288	580	885	1198	1486	1794	1890
A2传感器在本级荷载下之标定值( $\mu \epsilon$ )	315	625	935	1248	1542	1849	1959
A2传感器在本级荷载下之标定系数(KN/ $\mu \epsilon$ )	0.952	0.96	0.963	0.962	0.973	0.973	0.97

现场测试时，采用与标定时完全相同的导线和仪器，各钢索测试数据见表4-7。表中  $\beta$  为预应力摩擦损失系数。

表4 1#钢索预应力摩擦损失测试值

张拉端荷载(kN)	288	580	885	1198	1486	1794	1890
锚固端传感器读数( $\mu \epsilon$ )	300	600	903	1206	1507	1800	1904
锚固端荷载(kN)	285	576	869	1160	1466	1752	1847
$\beta$ (%)	1.04	0.7	1.81	3.17	1.35	2.34	2.28

表5 2#钢索预应力摩擦损失测试值

张拉端荷载(kN)	288	580	885	1198	1486	1794	1890
锚固端传感器读数( $\mu \epsilon$ )	298	578	858	1137	1416	1698	1782
锚固端荷载(kN)	284	555	826	1093	1377	1653	1782
$\beta$ (%)	1.4	4.31	6.67	8.71	7.34	7.86	8.57

表6 3#钢索预应力摩擦损失测试值

张拉端荷载(kN)	288	580	885	1198	1486	1794	1890
锚固端传感器读数( $\mu \epsilon$ )	298	587	882	1181	1476	1776	1879
锚固端荷载(kN)	284	564	849	1136	1436	1729	1822
$\beta$ (%)	1.4	2.76	4.07	5.18	3.36	3.62	3.6

表7 4#钢索预应力摩擦损失测试值

张拉端荷载(kN)	288	580	885	1198	1486	1794	1890
锚固端传感器读数( $\mu \epsilon$ )	299	603	903	1195	1494	1789	1891
锚固端荷载(kN)	289	579	869	1149	1453	1742	1834
$\beta$ (%)	1.04	0.2	1.81	4.1	2.22	2.9	2.96

分析以上数据, 1#钢索在各级荷载下的预应力摩擦损失系数平均值为1.81%, 2#钢索为6.42%, 3#钢索为3.43%, 4#钢索为2.18%, 可以看出, 1#、3#、4#钢索的预应力摩擦损失系数相差不大, 而2#钢索的摩擦损失系数则明显偏大, 这可能是因为2#钢索之预埋管道存在过大的局部偏差所致, 所以在确定k值时不应采用该组数据。现以1#、3#、4#钢索的预应力摩擦损失系数之平均值2.47%为确定k值之参数。

$$\text{根据公式(2-2)} \quad \beta = \sigma_{sl} / \sigma_k = [1 - e^{-(\mu \cdot \theta + kx)}]$$

其中:  $\theta = 0$ ,  $x = 5.61\text{m}$ ,  $\beta = 0.0247$

求得:  $k = 0.0045$

本次S形桥预应力摩擦损失试验中的管道每米局部偏差影响系数就以以上求得之k值为准, 取为0.0045。

规范中预埋铁皮管的k值定为0.003, 现测定的k值为0.0045, 比规范取值大0.5倍, 这是因为在本工程中, 施工情况相当复杂, 预埋铁皮管从钢筋网中穿插到位, 施工难度大, 导致较大的局

部偏差, 另外在浇注砼时因没有泵车和布料斗, 采用手推车整车倾倒浇注, 以及由于肋中铁皮管间距较小, 在浇注砼时振捣棒可能导致管壁变形, 都有可能引起预埋管局部偏差, 较大的局部偏差必然导致k值偏大, 所以测得 $k = 0.0045$ 。

通过预应力摩擦损失现场张拉试验可以看出, 在加载初期, 预应力摩擦损失百分比比较大, 后随荷载增加预应力损失百分比逐渐减小, 当张拉端拉力达到设计张拉力的60%左右时, 预应力损失百分比基本达到稳定。在本次S形桥预应力摩擦损失试验中, 大多数钢索在试验张拉时因受千斤顶行程的限制, 其试验张拉力只能达到设计张拉力的70%左右, 所以试验中所确定预应力损失值就以最后一级荷载下所测得的损失值为准, 这可能会造成一定的误差, 但不会太大, 因为在正式张拉阶段从张拉钢索上贴的电阻应变片所显示的数据分析, 当张拉力超过设计张拉力的70%时, 其摩擦损失百分比基本保持恒定, 所以取用了70%左右的设计张拉力下的摩擦损失值。

表8所列六根钢索的张拉记录, 均取最后一

表8 测试钢索张拉记录

采集荷载(KN) 索号 项目	荷载采集							确定值 $\beta$ (%)	
	一	二	三	四	五	六	七		
N <sup>1</sup>	张拉端	217	358	459	533	574	775	911	24.1
	锚固端	120	214	294	367	412	584	692	
	损失(%)	44.6	40.3	36.1	31.2	28.3	24.7	24.1	
N <sup>2</sup>	张拉端	256	387	444	561	682	793	857	24.0
	锚固端	157	259	323	413	513	603	651	
	损失(%)	38.9	33.2	27.3	26.4	24.8	24.0	24.1	
P <sup>1</sup>	张拉端	248	307	340	420	582	631		19.8
	锚固端	182	230	265	329	463	506		
	损失(%)	26.6	25.1	22.1	21.6	20.3	19.8		
P <sup>2</sup>	张拉端	179	270	374	430	569	658		20.1
	锚固端	107	178	283	336	450	526		
	损失(%)	40.2	34.1	24.3	22.0	20.9	20.1		
P <sup>3</sup>	张拉端	175	262	373	490	573	654	713	1 24.2
	锚固端	96	169	252	334	417	490	540	
	损失(%)	45.1	35.5	32.4	29.3	27.2	25.1	24.2	
P <sup>4</sup>	张拉端	199	262	370	493	583	675	730	22.47
	锚固端	121	174	255	350	423	526	566	
	损失(%)	39.2	33.6	31.1	29.0	26.6	23.0	22.47	

级荷载等级下的损失值为该索摩擦损失值, 根据公式  $\beta = 1 - e^{-(\mu \theta + kx)}$  求出相应的  $\mu$  值, 列表9。

表9  $\mu$  值计算表

索号	X (m)	$\theta$	$\beta$ (rad)	k	$\mu$
N <sub>2</sub> <sup>20</sup>	31.172	0.332	0.241	0.0045	0.407
N <sub>1</sub> <sup>20</sup>	29.099	0.310	0.240	0.0045	0.463
P <sub>1</sub> <sup>8</sup>	21.290	0.270	0.198	0.0045	0.462
P <sub>3</sub> <sup>8</sup>	22.060	0.279	0.202	0.0045	0.448
P <sub>1</sub> <sup>8</sup>	19.000	0.241	0.240	0.0045	0.795
P <sub>1</sub> <sup>5</sup>	20.440	0.260	0.225	0.0045	0.625

现将表9所得六个  $\mu$  值平均, 求得  $\mu = 0.53$ 。

现行规范规定预埋薄铁皮管成孔时钢绞线预应力损失计算中的曲率摩擦系数  $\mu = 0.35$ , 通过以上测试数据求得  $\mu = 0.53$ , 比规范规定约大0.5倍, 导致  $\mu$  偏大的原因, 可能仍是由于施工困难造成预埋管局部变位, 预埋管接头可能漏浆, 预埋管壁生锈等等因素。根据文献3所提供的资料看, 北京东便门立交桥施工中预应力摩擦损失测试也曾测得  $k = 0.006$ ,  $\mu = 0.43$ 。

### 2.3 对于k值和 $\mu$ 值的验证

现由N<sub>1</sub><sup>20</sup>、N<sub>3</sub><sup>20</sup>、P<sub>3</sub><sup>8</sup>、P<sub>5</sub><sup>4</sup>四根钢索在试验张拉时相应贴片位置的电阻应变片读数计算钢筋的应力及摩擦损失值, 并与取  $K = 0.0045$ 、 $\mu = 0.53$  计算所得摩擦损失值比较, 验证k值与  $\mu$  值的准确性。

表10所列为该四根钢索试验张拉时实测摩擦损失系数  $\beta'$  与计算摩擦损失系数  $\beta$  之比较, 其中  $\theta$  和  $x$  是钢索从张拉端到应变片读数截面的平面转角和计算长度, 计算损失系数根据公式  $\beta = 1 - e^{-(\mu \theta + kx)}$  求得, 取  $k = 0.0045$ ,  $\mu = 0.53$ ,  $\eta$  为最末一级试验荷载下, 由电阻应变片读数求得之钢索在测试截面的轴力  $N$  与张拉端荷载  $Q$  之比,  $\beta'$  为实测损失系数,  $\beta' = (Q - N) / Q$ 。| $\beta' - \beta$ | 为计算摩擦损失系数与实测摩擦损失系数之差, 有关标定系数和电阻片灵敏系数修正将在第二部分中详细介绍。

表10  $\mu$  值计算表

索号	X (m)	$\theta$ (rad)	$\beta$ (%)	$\eta$ (kN/kN)	$\beta'$ (%)	$\beta' - \beta$   (%)
N <sub>1</sub> <sup>20</sup>	24.525	0.261	22.02	22.02	19.84	2.18
N <sub>3</sub> <sup>20</sup>	22.435	0.239	20.36	20.36	24.35	3.99
P <sub>3</sub> <sup>8</sup>	13.84	0.175	14.36	14.36	15.21	0.85
P <sub>5</sub> <sup>4</sup>	14.781	0.187	15.26	15.26	19.8	4.54

分析以上数据, 可以看出 | $\beta' - \beta$ | 虽有较大离散, 但均不超过5%, 考虑到电测中难免会有误差, 所以存在5%之内的偏差是可以的, 以上四根钢索的张拉试验结果表明本项试验中取  $k = 0.0045$ ,  $\mu = 0.53$  是可信的。

## 3. 空间多曲线型钢索预应力摩擦损失试验研究

### 3.1 概述

不管预应力筋的线型如何复杂, 张拉阶段预应力筋在孔道中形成的摩擦损失无非是由两部分组成, 一部分是由长度效应即局部偏差引起的刮碰作用导致的摩擦损失, 另一部分是由曲率效应即曲率摩擦损失和管道位置偏离引起的摩擦损失。对于长度效应而言, 如果施工质量一致, 则k值应与平面单曲型相同, 当然由于张拉钢索长度的增加, 线型的复杂在施工中有可能引起更大的局部偏差, 从而导致k值增大, k值是否增大, 留待下一步验证, 在此姑且认为k仍为0.0045。而对于曲率效应而言, 线型的复杂将直接导致曲率的变化,  $\theta$  值将会变大。规范所规定的预应力摩擦损失计算公式  $\beta = 1 - e^{-(\mu \theta + kx)}$  中的  $\theta$  是平面单向弯曲型预应力筋从张拉端至计算截面的转角。对于平面多曲线型预应力筋的计算, 一般采用分段算法, 即将各反弯点之间的单曲段按公式  $\beta = 1 - e^{-(\mu \theta + kx)}$  逐段计算出其损失, 用前一线段终点降低后的应力来计算下一线段的摩擦损失, 如此类推。如图15所示三跨连续梁预应力筋由张拉端至中间跨跨中的摩擦损失, 就可以分为AB, BC, CD三段逐段计算。

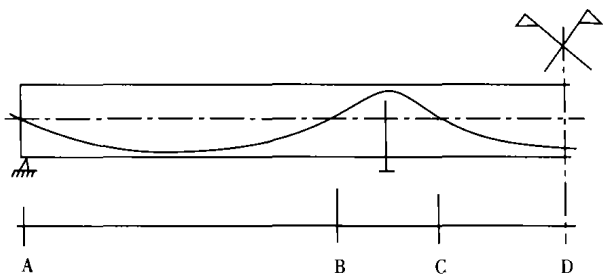


图15 三跨连续梁预应力钢索分段计算摩擦损失示意图  
在逐段计算时,可将公式(2-1)做如下变化:

$$\sigma_{s1} = \sigma_k \left[ 1 - e^{-(\mu \theta + kx)} \right]$$

$$\sigma_k - \sigma_{s1} = \sigma_k e^{-(\mu \theta + kx)}$$

若每一段起点应力为  $\sigma_1$ , 终点应力为  $\sigma_2$ ,

则上式可写为:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \left[ 1 - e^{-(\mu \theta + kx)} \right] \quad (3-1)$$

其中以  $\xi$  代替  $e^{-(\mu \theta + kx)}$ , 即  $\xi = e^{-(\mu \theta + kx)}$ ,

$\xi$  与预应力摩擦损失系数  $\beta$  的关系是  $\beta = 1 - \xi$ 。

利用公式(3-1), 只要求出各段上的  $\xi$  值, 并将该值连乘, 就可以求出总的  $\xi$  值。对于图15所示三跨连续梁, 若从A端张拉, 张拉应力为  $\sigma_k$ ,

则达到D点时钢索应力  $\sigma_2$  为:<sup>[2]</sup>

$$\sigma_2 = \xi_{AB} \times \xi_{BC} \times \xi_{CD} \times \sigma_k$$

$$\sigma_2 = \sigma_k - \sigma_{s1}$$

$$\sigma_k - \sigma_{s1} = \xi_{AB} \times \xi_{BC} \times \xi_{CD} \times \sigma_k \quad (3-2)$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_k (1 - \xi_{AB} \times \xi_{BC} \times \xi_{CD})$$

则总的预应力摩擦损失系数为:

$$\beta = 1 - \xi_{AB} \times \xi_{BC} \times \xi_{CD} \quad (3-3)$$

本章所涉及的多曲线型预应力钢索摩擦损失计算均采用以上各公式计算。

对于空间多曲线型的预应力筋摩擦损失计算, 同样可以采用分段计算。由于预应力筋在平面和立面上都有弯曲, 使得  $\theta$  值的选取比较困难, 但是对于任何空间曲线, 我们必然能找出该曲线各微段的空间曲率中心, 某微段与其曲率中心点组成一个平面, 这样就使得该微段成为平面弯曲线, 可以用公式(2-1)计算该段摩擦损失值, 将各微段积分就可以求出总的摩擦损失值。

用这种空间积分法计算比较复杂, 工程中涉及的空间多曲线型式一般为平面圆弧与立面抛物线的组合(如图3所示), 平面圆弧半径  $R = 30 \sim 150m$ , 立面抛物线一般为  $y = ax^2 + bx + c$  的二次抛

物线, 对于这样的空间曲线, 可以很容易用空间解析几何公式求出某单曲段几个等分点处的空间曲率半径, 将其平均就可以求得该空间单曲段的近似空间曲率半径, 再根据弧长  $x$  求得其转角  $\theta$  值, 采用逐段累加的办法利用公式(3-1), (3-2), (3-3)就可以算出空间多曲线型预应力筋的摩擦损失。

### 3.2 本工程中长预应力钢索的摩擦损失计算

本S形桥最长的两组钢索  $N^{11}_i$ 、 $N^{12}_i$  的示意图如图4所示, 对于这种形式的钢索, 其预应力摩擦损失完全可以根据上节所述方法进行计算。为确定长度增加和线型复杂是否引起  $k$  值的变化, 首先对近似平面多曲线型钢索  $N^{10}_i$  进行计算, 用计算结果和实测值进行比较, 以确定  $k$  值的变化。 $N^{10}_i$  的曲线型式如图16所示, 该钢索在平面上是双向弯曲线, 在立面上40米跨径内仅有0.3米挠曲, 立面形式可以近似认为是直线, 从而将该钢索按平面弯曲线分段计算, 取  $k=0.0045$ ,  $\mu=0.53$ 。对于  $N^{10}_3$ , 计算结果如下:

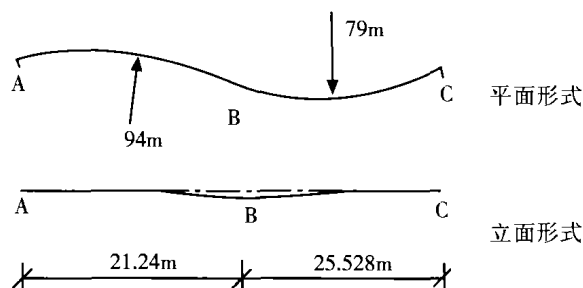


图16 N曲线型式示意图

设从A端张拉, 则

$$\xi_{AB} = e^{-(\mu \theta_{AB} + kx_{AB})}$$

$$x_{AB} = 21.24m \quad \theta_{AB} = x_{AB} / R = 21.24 / 94 = 0.226$$

求得  $\xi_{AB} = 0.806$

$$\xi_{BC} = e^{-(\mu \theta_{BC} + kx_{BC})}$$

$$x_{BC} = 25.528m \quad \theta_{BC} = dx / R = 25.528 / 79 = 0.323$$

$$\xi_{BC} = 0.7512$$

求得  $\beta_{AC} = 1 - \xi_{AB} \times \xi_{BC}$

$$= 1 - 0.806 \times 0.7512$$

$$= 0.395$$

用相同的算法, 计算  $N^{10}_1$ 、 $N^{10}_2$ 、 $N^{10}_4$ , 求得  $\beta$  分别为0.390、0.393、0.397, 可以看出, 由于各索计算长度相差很小, 求得之  $\beta$  平均值与  $N^{10}_3$  索之  $\beta$  值基本相同。根据现场张拉测试,  $N^{10}_1$ 、 $N^{10}_2$ 、 $N^{10}_3$ 、 $N^{10}_4$  四束钢索的测试损失分别为41.2%、38.1%、39.8%、43.7%, 平均为

40.7%，与以上计算值基本相同，因而可以认为多曲线时k值仍可取为0.0045。

下面对最长的一组钢索 $N^{11}_i$ 进行分段计算，并与测试结果相比较。

在计算中 $N^{11}_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的计算长度均以 $N^{11}_3$ 为准。

$N^{11}_i$ 的平立面形式如图17所示，平面由两段圆弧组成，R分别为94m和79m，反弯过渡段为直线段，长1.16m，反弯点在C点，C点所在截面即测试第Ⅱ截面，AB段为平面弯曲，R=94m， $X_{AB}=9.84m$ ， $\theta_{AB}=0.105$ ，BC段为空间弯曲，在计算中近似取AC段R=94m，CE段R=79m，立面为二次抛物线，抛物线方程为 $y=-0.0028x^2+0.116x$ ，其中 $0 < x < 41.22m$ 。 $X_{BC}=18.613m$ ， $X_{CD}=22.607m$ ， $X_{BD}=41.22m$ ，DE段为平面弯曲，R=79m， $X_{DE}=12.248m$ ， $\theta_{DE}=0.155$ 。

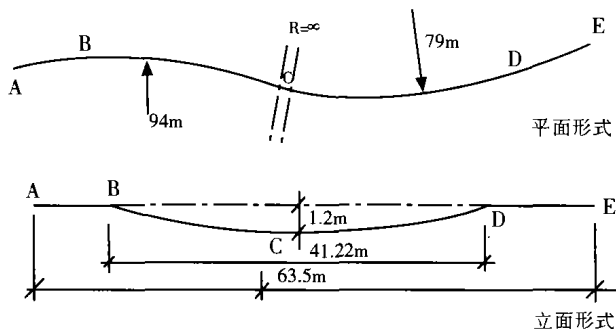


图17 N平立面形式

设由A端张拉，则  $\xi_{AB} = e^{-(\mu \theta_{AB} + kx_{AB})}$

$$= 0.905$$

$$\xi_{DE} = e^{-(\mu \theta_{DE} + kx_{DE})}$$

$$= 0.872$$

对于BC和CD段，需先求出其平均空间曲率半径  $\rho$ 。根据空间解析几何公式：[3]

$$y = -0.0028x^2 + 0.116x$$

$$y' = -0.0056x + 0.116$$

$$y'' = -0.0056$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{y'}{R}\right)^2 + y''^2}}{(1+y'^2)^{2/3}} \quad \gamma \text{ 为空间曲率。}$$

$$\rho = 1 / \gamma$$

分别将BC、CD两段的起点，中点，终点三点处的空间曲率  $\gamma$  和半径  $\rho$  求出，平均这三个值求出两段的平均曲率半径，根据平均曲率半径和弧长求出空间转角  $\theta$ 、 $\xi_{BC}$  和  $\xi_{CD}$  计算结果列于表11：

表11 BC、CD损失计算表

区段		$\gamma$	$\rho$	$\rho$	$\theta$	$\xi$
BC	起点	0.0119	83.924	83.460	0.223	0.817
	中点	0.0120	83.273			
	终点	0.0121	83.183			
CD	起点	0.1384	72.248	72.342	0.313	0.765
	中点	0.1383	72.293			
	终点	0.1379	72.486			

根据公式(3-3)求得总的损失系数为：

$$\beta_{AE} = 1 - \xi_{AB} \xi_{BC} \xi_{CD} \xi_{DE}$$

$$= 1 - 0.905 \times 0.817 \times 0.7065 \times 0.872 = 0.507 = 50.7\%$$

设从A端张拉，到达C点时预应力摩擦损失系数为：

$$\beta_{AC} = 1 - \xi_{AB} \xi_{BC}$$

$$= 1 - 0.905 \times 0.817 = 0.2606 = 26.06\%$$

这一损失系数可以认为是两端张拉时跨中截面的预应力摩擦损失系数。

钢索 $N^{12}_i$ 的长度仅次于 $N^{11}_i$ ，其长度为57.9米，其空间弯曲形式可以认为跟 $N^{11}_i$ 完全相同，只是AB段长度为7.38米，DE段长度为9.14米，中间段长度和转角与 $N^{11}_i$ 相同，可按以上方法求得 $N^{12}_i$ 的损失系数  $\beta_{AE} = 47.6\%$ 。两端张拉时跨中截面的预应力摩擦损失系数  $\beta_{AC} = 24.3\%$

现将 $N^{11}_i$ 、 $N^{12}_i$ 的测试损失系数与计算值比较列于表12：

表12  $N^{11}_i$ 、 $N^{12}_i$ 预应力摩擦损失计算值与测试值比较

索号	计算损失系数	测试损失系数(%)					测试损失系数平均
		i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	
$N^{11}_i$	50.7	44.3	48.1	53.9	52.1	50.2	49.7
$N^{12}_i$	47.6	54.2	47.1	43.3	42.1	46.3	46.6

根据表中所列数据可以看出，各钢索预应力摩擦损失系数测试值与计算值符合很好，这充分验证了本节所建议的计算模式的正确性。

这种分段求取空间曲线的空间曲率半径和空间转角然后逐段累加计算预应力摩擦损失的计算模式对于设计人员而言并不复杂，借助电算会更方便，而且根据以上验证，这种计算模式准确性较好，从概念上讲也比较直观，因此本文推荐该



模式为空间多曲型预应力钢索的预应力摩擦损失计算模式。

### 3.3 正式张拉阶段钢索应力测试

为了测取正式张拉时各钢索的预应力摩擦损失和锚固损失的大小,并将正式张拉阶段长钢索的预应力损失与计算值相比较,本次试验选取了 $N_i^{12}$  ( $i=1, 2, 3$ )和 $N_i^{11}$  ( $i=4, 5$ )共五根钢索在正式张拉时做现场测试,该五根钢索弯曲形式相同,计算长度基本相同,贴片位置在跨中即第II截面,控制张拉力 $Q_1$ 为1091.79kN。上节已提到根据计算, $N_i^{11}$ 在两端张拉时跨中截面预应力损失系数计算值为 $\beta=24.3\%$ , $N_i^{12}$ 在两端张拉时跨中截面预应力损失系数计算值为 $\beta=26.06\%$ ,现将该五根钢索正式张拉时的有关数据列于表13。其中 $Q_2$ 为钢索两张拉端拉力均达到控制拉力时该钢索跨中截面处由读数算得的拉力,预应力摩擦损失系数测量值 $\beta'=(Q_1-Q_2)/Q_1$ , $Q_3$ 为锚固结束五分钟锚固损失完成后应变片读数稳定时由读数算得的钢索跨中截面处拉力。锚固损失系数 $\beta_m=(Q_2-Q_3)/Q_2$ 。

表13 正式张拉时五钢索有关数据

序号	$Q_1$ (kN)	$Q_2$ (kN)	$\beta'$ (%)	$\beta$ (%)	$Q_3$ (kN)	$\beta_m$ (%)
$N_i^{12}$	1091.79	844	22.7	24.3	826	2.1
$N_i^{12}$		861	21.1		844	2.0
$N_i^{12}$		829	24.1		815	1.7
$N_i^{11}$		821	24.8	26.06	792	3.5
$N_i^{11}$		817	25.2		801	2.0

从上表中可以看出,锚固损失较小,平均为2.26%,在正式张拉时,跨中截面处预应力摩擦损失系数测量值与计算值相比符合较好。实测 $\beta'$ 比正式张拉前实测的 $\beta$ 略有偏小,这是由于试验钢索在正式张拉前已做过一次试验张拉,使得管道内受阻状况有了改善而引起的。

### 3.4 结论

3.4.1通过现场张拉测试,推算得钢索在张拉阶段预应力摩擦损失计算参数 $k=0.0045$ , $\mu=0.53$ 。

3.4.2工程中的空间多曲型钢索在张拉阶段的

预应力摩擦损失计算可采用本文推荐的分段求取空间曲线的空间曲率半径和空间转角,逐段累加计算预应力摩擦损失的计算模式,用这种计算模式求得的结果与实测值符合较好。

3.4.3在正式张拉阶段,由张拉钢索上所贴应变片的数据分析,最长钢索在主跨跨中的预应力摩擦损失为张拉控制应力的25.2%,所测五根的平均值为23.58%,最大锚固损失为3.5%,平均为2.26%。

### (上接第17页)

面有所突破,可能是合理选择横向刚度控制指标,促使墩身设计更经济的一个思路。随着铁路大跨度桥梁的进一步发展,铁路桥梁的横向刚度问题将成为新型高墩、大跨桥发展的制约条件,因此,也会引起工程界的重视。

### 4. 结语

清水河大桥集深基,高墩,大跨于一体,是西南山区铁路桥梁的典型代表。从河底至桥面高达183m,是目前我国最高的铁路桥梁;4号主墩柱高100m,为目前铁路桥的最高墩;主跨128m是目前我国干线铁路上同类型桥梁的最大跨度。在一定范围内反映了我国90年代铁路桥梁的建筑水平。清水河大桥的建成使我们对铁路高墩大跨度桥梁有了新的认识,给西南山区铁路选线也提供了较大的自由度,使人们在深谷、高山、宽壑面前不再绕行,钢梁也不再是铁路大跨桥梁的唯一选择。

清水河大桥是铁道部在南昆铁路结合工点的重点科技攻关项目,由铁二院设计并实施以设计为主体的工程总承包。桥的建成是众多科技工作者与桥梁建设者智慧与辛勤劳动的结晶,在此特向参加本桥各科研子项目的同志表示感谢;在大桥的各个设计阶段,得到了许多桥梁前辈与同仁的指导和帮助,在此也向他们致以衷心的感谢。

清水河大桥主桥是在不到16个月的时间里建成的,在建桥的过程中铁十六局五处的桥梁建设者们创造了多项桥梁建设纪录;大桥局桥研院主管的武汉桥梁建筑工程监理公司(建设部甲级)担任本桥的建设监理,在建桥过程中也付出了辛勤劳动;另外,我们还得到铁道部领导、南昆指挥部领导和南昆铁路“四桥”专家组的指导与帮助,也在此表示衷心的感谢。