

无应力状态法在钢拱塔斜拉桥组合索张拉中的应用

彭慧

(中建三局 第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430050)

摘要: 钢拱塔斜拉桥由于结构形式和施工顺序与常规斜拉桥有所差异, 拉索张拉顺序和张拉力存在多种可能, 为达到合理的成桥状态, 需进行大量调索测算。文中以随州灞水一桥为例, 采用无应力状态法快速确定终张索力, 并利用索的无应力长度变化量进行索锚头伸出量监控, 完成该桥斜拉索张拉施工。

关键词: 桥梁; 钢拱塔斜拉桥; 无应力状态; 无应力长度; 组合索张拉

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0114-05

斜拉索的初张和调索是斜拉桥设计、施工中的核心环节之一, 施工阶段索力是否张拉到位决定成桥后能否达到设计成桥状态。湖北随州灞水一桥为钢拱塔斜拉桥, 由于其拱塔间存在拉索, 塔为相对柔性的钢拱塔, 且施工顺序为先梁后索, 通过吊挂完成梁索的体系转换, 拉索的张拉顺序和张拉力存在多种可能, 需经大量调索测算才能得出合理方案。目前常用调索方法有刚性支承连续梁法、零位移法、倒拆和正装法、无应力状态法、内力平衡法、影响矩阵法等, 其中无应力状态法采用单元的无应力长度和无应力曲率联系中间状态和成桥目标状态。该桥应用无应力状态法确定终张索力, 并利用无应力索长变化量进行索锚头伸出量监控, 完成拉索张拉。

1 工程概况

灞水一桥改造工程位于随州市曾都区灞水河下游, 全长 268.06 m, 孔跨布置为 2×19.5 m 空心板 + 2×90 m 蝴蝶兰形钢拱塔斜拉桥 + 2×19.5 m 空心板, 全宽 32 m。主桥主梁采用等高度连续钢箱梁, 为带悬臂的双边箱截面, 斜拉索梁端钢锚箱焊接在钢箱梁边箱室外侧。采用由 2 个主塔与 1 个副塔组成的花瓣形桥塔, 塔身采用钢箱截面, 斜拉索塔端钢锚箱设置在塔身内。斜拉索以双索面扇形布置, 全桥共 16 对主梁斜拉索、16 对主副塔间斜拉索, 主梁索在主梁端张拉, 塔间索在主塔端张拉。主梁及桥塔采用 Q345qD 钢材, 拉索为直径 7 mm 平行钢丝成品索, 钢丝标准强度为 1 670 MPa。桥型见图 1。

总体施工方案如下: 先搭设主梁安装支架, 钢箱梁分节段顶推到位并焊接形成主梁; 再搭设桥塔安装支架, 钢拱塔分节段吊装到位并焊接形成钢塔; 最



图 1 灞水一桥效果图

后安装拉索, 通过张拉拉索, 完成桥塔脱架、主梁脱架, 并达到成桥索力。

2 无应力状态法在张拉分析中的应用

2.1 设计方案

先按顺序从 T1~T8 张拉塔间索, 完成钢塔脱架, 拆除钢塔支架; 再按顺序从 S1~S8 张拉主梁索, 完成主梁脱架, 拆除主梁支架; 二期恒载后, 按顺序从 S1~T1 到 S8~T8 进行张拉, 完成调索, 达到成桥索力。拉索布置见图 2, 设计张拉阶段索的张拉力、不考虑砼收缩徐变的成桥索力见表 1。

由表 1 可知: 设计方案中, 塔间索的脱架索力约占成桥索内力的 22%, 主梁索的脱架索力约占成桥索内力的 80%。为保证张拉实施的严谨性, 重新建立模型对设计方案进行复核。根据设计成桥数据建立 MIDAS/Civil 有限元模型, 分别以塔间索成桥索

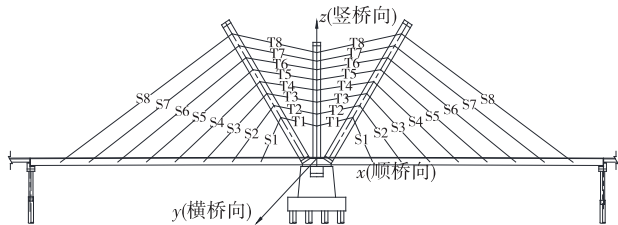


图 2 设计拉索布置

表 1 设计张拉索力及成桥索力

kN

索编号	塔间索张拉索力及成桥索力			索编号	主梁索张拉索力及成桥索力		
	初张力	终张力	成桥索力		初张力	终张力	成桥索力
T1	718.4	3 580.0	2 752.6	S1	1 432.1	2 170.0	1 927.4
T2	638.7	3 550.0	2 742.8	S2	1 648.0	2 420.0	2 085.6
T3	701.9	3 970.0	3 107.6	S3	1 820.1	2 560.0	2 189.4
T4	744.6	3 855.0	3 276.9	S4	1 956.8	2 790.0	2 429.4
T5	789.1	3 800.0	3 515.7	S5	2 061.1	2 805.0	2 556.7
T6	822.3	3 690.0	3 638.3	S6	2 141.1	2 695.0	2 563.8
T7	865.0	3 740.0	3 822.2	S7	2 207.9	2 820.0	2 792.7
T8	921.9	3 966.0	3 966.0	S8	2 263.0	2 830.0	2 862.6

力的 20%、30%、40% 及主梁索成桥索力的 50%、60%、70% 进行组合,分析得塔间索成桥索力 20% 时钢塔脱架、主梁索成桥索力 70% 时主梁脱架。经建模验证,设计方案的初张索力能满足钢塔及主梁的脱架要求,设计方案各施工阶段钢塔、主梁应力、变形及支座反力均满足要求。

2.2 实施方案

2.2.1 理论依据

由于塔间索的张拉锚箱设在主塔塔身内,空间仅有 50 cm,最大只能安装 150 t 千斤顶,而塔间索张拉索力最高 397 t,需调整张拉方案,以满足施工设备要求。

根据无应力状态法,梁、塔单元的无应力曲率和索的无应力长度不随结构体系和外荷载的变化而变化,只要索最后一次张拉时达到目标无应力长度,即可自动达到成桥目标状态,与结构形成过程无关。据此提出是否能在 150 t 以内将塔间索张拉到位,达到目标无应力长度。塔间索的终张拉考虑两种方案,分别为塔脱架后按顺序从 T1~T8 进行张拉和按顺序从 T8~T1 进行张拉。

2.2.2 建立实施模型

按无应力状态法原理,终张拉是否到位影响成桥索力,故初张拉的索力值完成脱架目的即可。由于现场塔架与原设计有所差别,重新建立模型,以塔和梁的自重进行分配计算得到初张力,即脱架索力。

终张力的计算,目前常用的为拟定初始值进行迭代试算,但工作量较大;也可利用施工阶段未知荷载系数功能的方式,但由于该桥钢塔为相对柔性,张拉中变位较大,边界条件难以定义。按照无应力状态法最终状态一定的原理,可按照索一次张拉步骤建立无应力状态法模型,无需施加索初张力,即可得到索无应力长度和各终张阶段索内力。

考虑到脱架,采用双单元建立无应力状态法模型,先施以初张力,再对其进行钝化,得出各终张阶段索内力。以索内力为体外力施加至实施模型,计算成桥索力和索无应力长度,并比较与目标值的差值,再对终张索力进行调整,达到成桥目标状态。

按 T8~T1 顺序的无应力状态法模型和实施模型的张拉索力及各终张阶段索内力见表 2。由表 2 可知:实施模型的成桥索力与设计成桥索力较接近,且塔间索终张力小于 150 t。

表 2 两模型张拉索力及索内力对比

kN

索编号	塔间索张拉索力及索内力				索编号	主梁索张拉索力及索内力			
	初张力	终张后 索内力	成桥索力			初张力	终张后 索内力	成桥索力	
			无应力法模型	实施模型				无应力法模型	实施模型
T1	591.0	1434.3	2 748.0	2 752.0	S1	1 432.1	2 830.4	1 930.3	1 939.2
T2	268.0	1143.1	2 735.9	2 738.7	S2	1 648.0	2 946.5	2 090.4	2 095.0
T3	270.0	660.5	3 097.7	3 101.9	S3	1 820.1	2 977.5	2 189.6	2 192.7
T4	271.0	491.4	3 272.3	3 275.0	S4	1 956.8	3 149.3	2 426.9	2 429.4
T5	274.0	489.3	3 509.6	3 511.5	S5	2 061.1	3 077.9	2 555.8	2 557.3
T6	280.0	432.6	3 627.1	3 625.6	S6	2 141.1	2 892.8	2 559.6	2 561.2
T7	293.0	524.6	3 811.9	3 806.6	S7	2 207.9	2 953.5	2 792.9	2 794.1
T8	502.0	755.7	3 955.3	3 936.6	S8	2263.0	2853.6	2853.6	2853.3

建立 T1~T8 顺序的无应力状态法模型,其塔间索最大终张力为 211.7 t,说明塔间索脱架完成后按顺序从 T8~T1 完成终张拉能满足张拉设备要求,初步确定可行。

2.2.3 无应力长度计算

在轴向力 T 及自重作用下,斜拉索呈悬链线形状,索单元变形及索受力见图 3。该桥拉索垂度较小,用抛物线代替悬链线。抛物线的弧长 S 为:

$$S = L_c + 8f_m^2 / (3L_c) \quad (1)$$

由外力弯矩平衡可得:

$$f_m = L_c^2 q \cos \alpha / (8T) \quad (2)$$

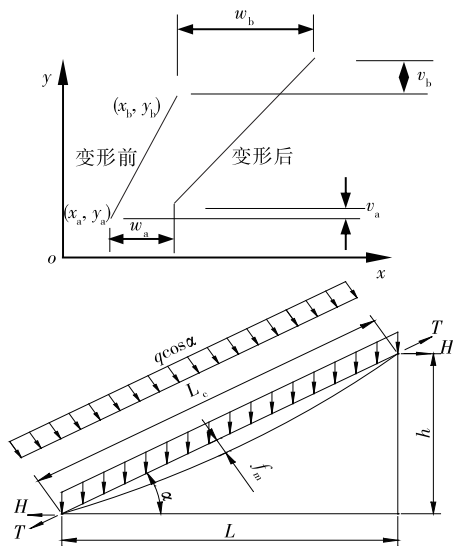


图3 索单元变形及索受力示意图

为简化处理,忽略斜拉结构因自重产生的垂度等非线性因素的影响,拉索单元受到轴向力后的几何长度 L_c 为:

$$L_c =$$

$$\sqrt{[(x_b + w_b) - (x_a + w_a)]^2 + [(y_b + v_b) - (y_a + v_a)]^2} \quad (3)$$

斜拉索的无应力长度 L_0 为:

$$L_0 = L_c - TL_c / (EA) + L_c^3 q^2 \cos^2 \alpha / (24T^2) \quad (4)$$

$$L_0 = [L_c + L_c^3 q^2 \cos^2 \alpha / (24T^2)] / [1 + T / (EA)] \quad (5)$$

式中: $\Delta L_e = TL_c / (EA)$ 为弹性伸长量; $\Delta L_f = S - L_c$ 为垂度影响的伸长量; $S = L_0 + TL_0 / (EA)$ 。

利用式(4)、式(5)计算得该桥无应力长度最大差值为 0.5 mm,考虑到式(5)更合理,采用该公式进行无应力长度计算。计算所得两模型的成桥无应力索长见表 3。

2.2.4 索力调整

(1) 无应力长度差值调索方式。分析拉索张拉前后两种状态,张拉前拉索几何长度 $S_1 = L_{01} + T_1 L_{01} / (EA)$,张拉后拉索几何长度 $S_2 = L_{02} + T_2 L_{02} / (EA)$,两式相减并忽略二阶量,得索力增量 $\Delta T_{12} = EA [(S_2 - S_1) - (L_{02} - L_{01})] / L_{02}$,根据 ΔT_{12} 即可进行调索。应用该调索方式,通过多次分析两模型的状态变化和同一模型两个张拉分级的状态变化,按照计算出的索力增量 ΔT_{12} 进行调索后,

表3 两模型无应力索长对比

mm

索编号	塔间索无应力索长			索编号	主梁索无应力索长		
	设计模型	实施模型	差值		设计模型	实施模型	差值
T1	11 537.04	11 539.04	-2.00	S1	14 275.83	14 272.29	3.54
T2	13 673.95	13 676.82	-2.87	S2	20 884.78	20 879.91	4.87
T3	15 828.96	15 832.79	-3.83	S3	28 032.13	28 026.21	5.92
T4	17 985.48	17 990.29	-4.81	S4	35 406.08	35 399.16	6.92
T5	20 212.81	20 218.58	-5.77	S5	42 889.97	42 882.01	7.96
T6	22 443.63	22 450.52	-6.89	S6	50 456.92	50 448.15	8.77
T7	24 755.45	24 763.16	-7.71	S7	58 084.72	58 074.71	10.01
T8	27 081.93	27 090.59	-8.66	S8	65 830.61	65 820.35	10.26

结果不收敛,成桥索力和索无应力长度与目标值偏差加大。其原因可能是由于该桥的钢塔和钢梁结构相对柔性,索张拉过程中塔和梁的位置变化较大, $S_2 - S_1$ 随着索的张拉而变化, ΔT_{12} 只能通过上一阶段已发生的 $S_2 - S_1$ 求得,难以预估 ΔT_{12} 所对应的预计 $S_2 - S_1$ 值,故 ΔT_{12} 并不准确。

(2) 索力差值迭代调索方式。按照目前较常用方式,根据成桥索力差值对实施模型进行迭代调索,结果出现收敛,迭代 7 次后,成桥索力及索无应力长度基本达到设计值,再继续迭代,将完全达到设计成桥索力及索无应力长度。迭代的成桥索力和索无应力长度分别见表 4、表 5。

表 4 迭代调索成桥索力对比

kN

索编 号	塔间索索力					索编 号	主梁索索力				
	第 1 次迭代		第 7 次迭代				第 1 次迭代		第 7 次迭代		
	终张索力	成桥索力	终张索力	成桥索力	与设计的差值		终张索力	成桥索力	终张索力	成桥索力	与设计的差值
T1	1 434.8	2 748.9	1 442.4	2 752.5	0.1	S1	2 818.1	1 933.8	2 805.3	1 927.6	−0.2
T2	1 146.6	2 738.9	1 155.2	2 742.5	0.3	S2	2 937.0	2 089.3	2 928.9	2 085.9	−0.3
T3	666.9	3 102.8	678.1	3 107.0	0.6	S3	2 974.5	2 191.4	2969.5	2 189.6	−0.2
T4	493.9	3 271.3	507.0	3 276.5	0.4	S4	3 149.4	2 430.5	3 146.5	2 429.5	−0.1
T5	494.2	3 511.3	508.0	3 515.2	0.5	S5	3 076.9	2 556.5	3 076.4	2 556.8	−0.1
T6	446.1	3 638.3	456.4	3 637.9	0.4	S6	2 895.1	2 563.2	2 895.5	2 563.8	0.0
T7	540.1	3 817.5	554.8	3 821.7	0.5	S7	2 952.0	2 791.1	2 953.5	2 792.7	0.0
T8	777.9	3 950.0	812.5	3 964.7	1.3	S8	2 862.6	2 862.6	2 862.6	2 862.6	0.0

表 5 迭代调索成桥索无应力长度对比

mm

索编 号	塔间索无应力长度				索编 号	主梁索无应力长度			
	第 1 次迭代		第 7 次迭代			第 1 次迭代		第 7 次迭代	
	成桥无应力长	与设计的差值	成桥无应力长	与设计的差值		成桥无应力长	与设计的差值	成桥无应力长	与设计的差值
T1	11 538.86	—1.82	11 538.20	—1.15	S1	14 272.66	3.16	14 273.64	2.19
T2	13 676.49	—2.54	13 675.42	—1.47	S2	20 880.57	4.21	20 882.17	2.61
T3	15 832.32	—3.36	15 830.77	—1.81	S3	28 026.98	5.15	28 029.20	2.92
T4	17 989.74	—4.25	17 987.64	—2.15	S4	35 400.04	6.04	35 402.91	3.17
T5	20 217.83	—5.02	20 215.21	—2.40	S5	42 883.13	6.85	42 886.64	3.34
T6	22 449.42	—5.79	22 446.31	—2.68	S6	50 449.31	7.60	50 453.51	3.41
T7	24 761.97	—6.52	24 758.27	—2.82	S7	58 076.31	8.41	58 081.17	3.55
T8	27 089.26	—7.33	27 084.84	—2.91	S8	65 821.38	9.23	65 827.07	3.54

2.2.5 方案确定

经上述调索确定的张拉顺序及张拉力能达到成桥状态,塔间索终张索力最大为 144.2 t,能满足张拉设备要求。进一步分析各阶段的梁和塔的应力,得出施工阶段最大应力位于主塔结构,最大组合应力为 89.4 MPa,比设计方案的最大组合应力 131.3 MPa 小;主梁最大负弯矩为 39 852.6 kN·m,比设计方案主梁最大负弯矩 40 921.4 kN·m 小。施工阶段结构变位、成桥线形、支座反力等均与设计方案接近,其中最大位移位于主塔结构,为 19.0 mm,与设计方案 18.3 mm 非常接近。因此,塔间索脱架后按照 T8~T1 的顺序完成终张拉,再进行主梁索脱架和终张拉的方案合理,能满足成桥目标状态和现场施工要求,可作为实施方案。

3 无应力状态法在过程控制中的应用

3.1 临时荷载影响

该桥张拉施工中需进行塔架拆除、索力监测等,会用到吊车,桥面上会出现临时荷载。为探索采用

无应力状态法指导施工正装过程中临时外荷载的出现对成桥状态的影响,在最初实施模型中加入 2 辆 25 t 吊车荷载,假设两种情况:第一种情况(模型 1)为吊车在 S2 初张拉阶段开始停在桥面上,于 S4 初张拉时离开;第二种情况(模型 2)为吊车在 S2 终张拉阶段开始停在桥面上,于 S4 终张拉时离开。两种模型下成桥索力见表 6。

由表 6 可知:第一种情况即初张拉阶段,临时荷载对成桥状态几乎无影响;第二种情况即终张拉阶段,临时荷载对成桥状态有一定影响,尤其是对临时荷载加载时正终张和已终张的索影响稍大,最大影响量为 2.5%;对比 3 个模型各终张阶段索的无应力长度,长度差值均与索力差值相对应,模型 1 与实施模型的索无应力长度最大差值为 S2 索的-0.15 mm,模型 2 与实施模型的索无应力长度最大差值为 S3 索的-3.11 mm。其原因是结构相对柔性,临时荷载造成结构变位,同样的张拉索力引起的无应力长度改变量不相同,导致成桥索力不同。为保证张拉的准确性,终张阶段应严格控制桥面的临时荷载。

表6 临时荷载下的成桥索力对比

kN

索编号	塔间索成桥索力					索编号	主梁索成桥索力				
	模型 1	模型 2	实施模型	差值			模型 1	模型 2	实施模型	差值	
				模型 1	模型 2					模型 1	模型 2
T1	2 751.7	2 750.0	2 752.0	0.3	2.0	S1	1 939.6	1 987.2	1 939.2	−0.4	−48.0
T2	2 738.3	2 734.9	2 738.7	0.4	3.8	S2	2 092.6	2 072.4	2 095.0	2.4	22.6
T3	3 101.5	3 096.1	3 101.9	0.4	5.8	S3	2 192.6	2 140.0	2 192.7	0.1	52.7
T4	3 274.7	3 270.9	3 275.0	0.3	4.1	S4	2 429.4	2 438.4	2 429.4	0.0	−9.0
T5	3 511.2	3 509.3	3 511.5	0.3	2.2	S5	2 557.1	2 563.5	2 557.3	0.2	−6.2
T6	3 625.5	3 625.0	3 625.6	0.1	0.6	S6	2 561.1	2 564.9	2 561.2	0.1	−3.7
T7	3 806.5	3 807.0	3 806.6	0.1	−0.4	S7	2 794.0	2 796.0	2 794.1	0.1	−1.9
T8	3 936.6	3 937.8	3 936.6	0.0	−1.2	S8	2 853.3	2 853.3	2 853.3	0.0	0.0

3.2 索张拉的拔出量控制

为保证索张拉控制的准确性,该桥索张拉采用千斤顶、压力环、频谱法和拔出量进行控制,其中拔出量的控制基于无应力状态法原理。在温度变化、风力荷载和桥面临时荷载等对索力造成影响时,是否张拉到位、能否达到成桥状态,拔出量的控制起着

关键作用。

该桥初张拉和终张拉均按调索后实施模型索力张拉值的50%、80%、100%分级进行,每级张拉完成后量测索的拔出量,并与设计值对比,若差值较大,则进行索力复测。索终张拉80%~100%时的拔出量见表7。

表7 索终张拉80%~100%时的无应力长度及拔出量

mm

索编号	塔间索终张拉无应力长度及拔出量			索编号	主梁索终张拉无应力长度及拔出量		
	80%时无应力长	100%时无应力长	拔出量		80%时无应力长	100%时无应力长	拔出量
T1	11 541.80	11 538.20	3.60	S1	14 285.57	14 273.64	11.93
T2	13 679.04	13 675.42	3.62	S2	20 899.85	20 882.17	17.68
T3	15 832.95	15 830.77	2.18	S3	28 052.35	28 029.20	23.15
T4	17 989.79	17 987.64	2.15	S4	35 430.16	35 402.91	27.25
T5	20 217.80	20 215.21	2.59	S5	42 918.10	42 886.64	31.46
T6	22 449.27	22 446.31	2.96	S6	50 487.37	50 453.51	33.86
T7	24 762.65	24 758.27	4.38	S7	58 119.89	58 081.17	38.72
T8	27 105.63	27 084.84	20.79	S8	65 870.63	65 827.07	43.56

4 结论

(1) 索的张拉顺序和初张力与最终状态无关,只有索终张是否达到目标无应力长度才决定能否达到目标成桥状态,符合无应力状态法理论。

(2) 按照索张拉步骤建立无应力状态法模型,不施加索初张力,即可得到较合理的成桥状态索无应力长度和终张索力值。

(3) 对于张拉过程中发生非线性变位的索,通过索的无应力长度差值求取所需索力增量时,由于结构变位引起的差值无法预估,索力增量求取较困难,需进一步研究和探索。此时采取索力差值迭代调索方法,效率更高。

(4) 对于刚度不大的结构,临时外荷载对索的终张施工稍有影响,为确保张拉准确度,应严格控制桥面临时荷载。

(5) 通过进行分级张拉,监控每一级拔出量,能确保索张拉到位。这在张拉时索力容易受外界影响而使索力检测不准的情况下尤其重要。

参考文献:

- [1] 秦顺全.桥梁施工控制:无应力状态法理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [2] 董宇航,张谢东,郭子会,等.异形拱塔斜拉桥桥塔结合部受力研究[J].公路与汽运,2018(6).
- [3] 韩志星,房建宏,张冬兵.影响矩阵法确定斜拉桥施工

(下转第122页)

3 结语

跨孔透射与平斜测综合方法采用的声测管的电缆上有2个声波换能器,其具有发射和接收双重作用;每个深度位置的射线路径有4条,既有平行射线又有倾斜射线,可实现基桩缺陷体在深度和水平方向的准确定位。采用超声波检测基桩完整性三维成像技术,基于双声波换能器自发自收功能对基桩实行跨孔透射与平斜测综合测试,可对基桩声波速度和低速缺陷体进行三维立体成像,实现基桩缺陷体在深度和水平方向的准确定位,客观判定基桩的完整性。

参考文献:

- [1] JTG/T F81-01-2004,公路工程基桩动测技术规程[S].
- [2] JGJ 106-2014,建筑基桩检测技术规范[S].

- [3] 吴桂林,刘宗明,赵宾.公路工程基桩的声波透射检测应用研究[J].公路,2014(6).
- [4] 邓国文,王齐仁,化得钧,等.声波透射法在基桩检测中的应用[J].工程勘察,2013(6).
- [5] 李廷,徐振华,罗俊.基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J].岩土力学,2010,31(10).
- [6] 马深.超声波透射法在桥梁桩基完整性检测中的应用[J].公路与汽运,2014(6).
- [7] 彭汉杰.灰色聚类在基桩超声波检测中的评估研究[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(10).
- [8] 陈向阳,王志鑫.模糊数学在超声波检测桩基完整性中的应用[J].公路与汽运,2016(2).
- [9] 苗熹,惠冰,彭汉杰.超声波透射法测桩异常结果的研判[J].山东交通科技,2017(4).
- [10] 惠冰,张立,苗熹.声波透射法检测桩身完整性非缺陷因素的敏感性分析[J].公路,2017(9).

收稿日期:2019-02-17

(上接第62页)

- [7] Prowell B D, Zhang J, Brown E R. Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt[R]. NCHRP Report, 2005.
- [8] P K Oduroh, K C Mahboub, R M Anderson. Flat and elongated aggregates in superpave regime[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2).
- [9] 沈小俊,石飞,李铁军,等.沥青路面集料标准化加工技术和工艺探讨[J].公路与汽运,2014(2).
- [10] 卢亮,王端宜,詹小丽.针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响及其降低途径[J].公路,2007(5).
- [11] 何静,宋涛,黄维蓉,等.针片状含量与沥青混合料性能的关系分析[J].公路与汽运,2014(2).
- [12] 程平均,朱建秋.针片状颗粒含量对路面沥青混合料的性能影响研究[J].广东科技,2014(24).
- [13] 贾娟,张肖宁.沥青混合料车辙试验方法的比较分析[J].公路,2004(11).

- [14] 沈佳,王慧.APA车辙试验方法的研究进展[J].中外公路,2016,36(2).
- [15] 李卫勇,张雷,杨建华,等.圆柱形试件用于国标车辙动稳定度试验的可行性分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2017,36(12).
- [16] 王慧.使用APA评价场道沥青混合料抗车辙性能[J].中外公路,2013,33(5).
- [17] 陈祥义,吴剑.国外沥青混合料抗车辙性能试验方法评价[J].中外公路,2007,27(1).
- [18] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [19] 刘占良,郝景贤.粗集料性能对沥青混合料性能的影响[J].公路,2015(7).
- [20] 马士宾,袁文瑞,王清洲,等.集料棱角对沥青混合料性能影响研究[J].中外公路,2015,35(2).

收稿日期:2019-03-11

(上接第118页)

- 阶段初拉索力[J].公路与汽运,2017(6).
- [4] 邵旭东.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 徐达,王定文,王华,等.MIDAS/Civil桥梁结构分析技巧与实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [6] 周水兴,王小松,田维锋.桥梁结构电算—有限元分析方法及其在MIDAS/Civil中的应用[M].北京:人民交通出版社,2013.

- [7] 周国玲,丁少凌,顾双春.无应力索长控制法在斜拉桥调索中的应用[J].公路与汽运,2012(4).
- [8] 陈俊城.悬臂现浇拱桥施工索力优化研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [9] 蒋陈陈.无背索斜拉桥成桥索力优化研究[D].西安:长安大学,2012.

收稿日期:2019-02-21