

考虑支座摩阻效应柔性墩纵向水平力优化设计

吴子儒

(广东省建科建筑设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:为研究支座摩阻效应对柔性墩台纵向水平力的影响,基于墩顶抗推刚度集成法,提出了考虑支座摩阻效应墩顶纵向水平分配力的二次分配理论框架。基于某一简支梁桥,采用理论方法进行摩阻系数在0,0.02,0.03,0.04,0.05,0.06下的墩顶水平力分析,并获取最优摩阻系数取值。结果表明:墩顶纵向水平力的分配与支座摩阻系数有关,不考虑支座摩阻力会使得墩顶水平力离散性较大,各墩顶水平力差异化明显。在计算汽车制动力对墩顶纵向水平分力影响时,支座的摩阻效应不可忽略。通过对某一实际简支梁桥计算分析,采用摩阻系数为0.03的支座可使得墩顶在纵向水平力分配更为合理。

关键词:柔性墩台;纵向水平力;刚度集成;摩阻力;摩阻系数

中图分类号:U443.22

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)04-0212-04

0 引言

近年来,我国公路桥梁桥墩一般采用柔性墩。柔性墩由于自身柔性使得桥梁上部结构传递的纵向力在下部各墩台之间能保持协同受力状态,可避免桥梁单墩集中受力现象^[1]。桥梁上部结构因直接承受车辆荷载,其承载能力与稳定性是工程师们主要关注的问题。针对桥梁上部结构的安全性与稳定性问题,理论计算方法成熟,分析模型众多。除特殊大桥外,上部结构一般多采用以满足安全性能的上部结构标准图^[2]。另一方面,下部结构设计因跨径、孔数、墩台高度、地基情况多变等原因使得现行结构图标准难以得到匹配,即使采用标准图的尺寸结构,也还需根据实际情况进行验算分析。因此,桥梁下部结构的计算分析逐渐受到众多学者与工程师的重视。

柔性墩台纵向水平力传递和分配是桥梁下部结构重点问题^[3]。柔性墩作为一种考虑柔性变形的超静定结构,在对桥梁进行墩台水平力分析时,首先需要获取目标墩台的柔度或刚度^[4]。在墩台刚度计算中,一般采用的方法有一次迭代法、柔度系数法、刚度集成法等。李靖森^[5]等采用弹簧结构模型模拟了多孔梁桥抗推联合作用并提出了集成刚度模型。袁伦一^[6]运用刚度集成法对柔性墩的制动力、温度影响力和水平风力进行了墩台分配力的计算。周绍烈^[7]提出采用直接刚度法进行水平力计算,并将该法应用于计算机编程当中。刚度集成法在墩顶抗推刚度

以及墩顶水平力的分配上已取得众多研究成果,但在实际工程计算分析时,刚度集成法计算量大,计算过程繁琐,不适宜实际工程的直接应用。张博洋^[8]以能量法理论为基础,推导出高桥墩墩顶水平位移的能量法的实用公式。王伟^[9]针对这一问题利用求解微分方程组对柔性墩台进行内力计算分析,并对这一方法应用至某一墩台水平力计算分析方面^[10]。除墩顶抗推刚度外,墩顶水平力的分配还与桥梁结构支座摩阻力有关。胡祥森^[2,11]认为墩顶设置滑动支座时,如果支座受到的水平力大于支座摩阻力时,则该墩所受的最大水平力即为支座摩阻力,而且同时认定该墩墩顶的集成刚度近似为0。李学有^[12]针对这一问题,采用刚度集成法,综合考虑活动支座的非线性影响和不同作用的加载顺序,提出墩台纵向水平力分配的非线性分析方法。

综上所述,多数学者针对抗推刚度进行了深入研究,但对于支座摩阻力方面涉及较少,文献[12]虽提出了考虑支座的非线性影响对水平力分配的影响,但也仅停留在水平力的二次分配层面。如何考虑支座摩阻力对墩顶结构水平力的分配以及如何根据支座摩阻力对墩顶水平力的分配影响选取最优摩阻系数这方面,学者罕有探究。基于此,本文提出了考虑支座摩阻效应的柔性墩台纵向水平力优化设计整体框架,并将这一理论分析应用至某一简支梁桥上。

1 抗推刚度集成与水平力分析

对于某一柔性墩梁桥,假设各墩顶的集成刚度为 $K_i(i=1,2,\cdots,n)$, n 为桥梁墩柱的个数。在不考虑相邻

收稿日期:2022-04-14

作者简介:吴子儒(1979—),男,工学硕士,高级工程师,从事市政桥梁、隧道设计研究工作。

梁间传递的水平力时,当梁体在荷载作用下的水平力为 F_i 时,那么由此而引起的各墩台的水平力 P_i ($i=1,2,\dots,n$)可表示为:

$$P_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^n K_i} F_i \quad (1)$$

其中:墩顶集成刚度 K_i 与柔性墩的支座刚度 $K_{b,i}$ 、桥墩立柱刚度 $K_{l,i}$ 以及桩基刚度 $K_{z,i}$ 有关。

1.1 支座摩阻系数与抗推刚度 $K_{b,i}$

在桥梁设计分析中,一般忽略活动支座摩阻力对桥梁结构的影响。因此在进行墩台水平力分析时,支座摩阻力往往难以受到重视。研究表明,支座摩阻力对混凝土结构产生的应力有可能达到恒载应力的5%以上^[13]。因此完全忽略支座摩阻力是不合理的。

支座摩阻力 F_f 标准值可按公式(3)进行计算:

$$F_f = \mu W \quad (3)$$

式中: W 为作用于活动支座上由上部结构重力产生的重力; μ 为支座的摩阻系数。

现行桥涵设计规范给出的支座摩阻系数推荐参考值为橡胶支座、平板支座及弧形支座摩阻系数 0.1~0.2,滚动支座或摆动支座摩阻系数 0.05^[13]。试验表明,滑移支座摩阻系数通常较小,一般为 0.01~0.03,常温下为 0.03^[14]。综合以上数据,本文采用的摩阻系数分别取 0,0.02,0.03,0.04,0.05,0.06 进行计算分析。

板式橡胶支座是桥梁工程师应用较广的柔性支座,单个板式橡胶支座抗推刚度为:

$$K_b = \frac{n A G_e}{t} \quad (3)$$

式中: n 为横排支座个数; A 为单个支座平面面积,取 87 500 mm²; G_e 为橡胶支座的剪变模量,取 1.1 MPa; t 为支座橡胶层总厚度,取 45 mm。

1.2 桥墩立柱、桩基抗推刚度

假定桩顶与地面平齐,墩顶至桩顶的高度为 h ,那么墩顶的抗推刚度可按公式(4)进行计算:

$$\bar{K}_i = \frac{k}{\delta_{i1} + \delta_{i2}} = \frac{k}{h^3/3 \times 0.8 \times E_c I_c + \delta_{MM}^{(0)} h^2 + 2\delta_{MH}^{(0)} h + \delta_{HH}^{(0)}} \quad (4)$$

式中: $\bar{K}_i$ 为 i 号墩墩顶刚度; k 为一个单排桩桥墩墩柱数; E_c 为桩的混凝土抗压弹性模量; I_c 为柱毛截面惯性矩;0.8 为折减系数; $\delta_{MM}^{(0)}$, $\delta_{MH}^{(0)}$, $\delta_{HH}^{(0)}$ 为与 m 法计算桩基时的有关系数,具体计算方法参考《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[15]。

由于同一桥墩的支座刚度与墩顶刚度属于串联关系,根据求解出的支座抗推刚度与立柱墩台集成

的抗推刚度进行串联,得出总体墩台的集成刚度为: $K_i = \bar{K}_i K_b / (\bar{K}_i + K_b)$ 。

2 纵向水平力理论框架

桥墩承受的纵向水平力 F_i 主要由梁体结构收缩、徐变,温度升降,支座摩阻力以及汽车制动力等组成。如果某工况作用下水平力 F_i 使得墩顶的纵向水平分配力大于支座摩阻力 F_f 并引起支座滑动,则该墩所受的水平力即为支座摩阻力,且同时还认为该墩墩顶的集成刚度为 0,那么其余各墩台纵向水平力则需进行二次分配计算,计算流程如图 1 所示。根据图 1 的流程图计算不同摩阻力下各墩顶水平力的标准差,选取最低的标准差对应的摩阻系数为该桥梁结构的最优解。

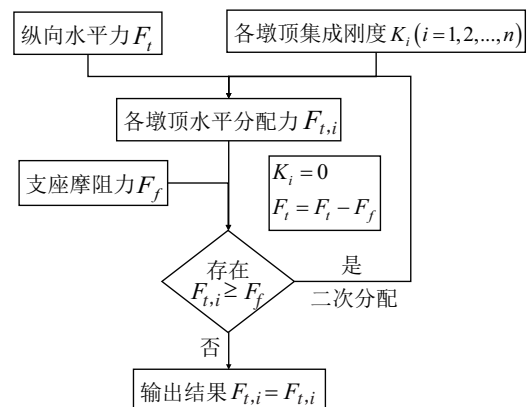


图1 墩顶水平力二次分配流程图

2.1 收缩、徐变、温度降低影响力的计算

由对于某一联连续桥面柔性墩梁桥,当梁体有效温度变化为 Δt 时,上部梁体均匀向两侧联伸长或缩短,在梁体上必定存在一个伸缩不动点 S.P.,其距 0 号台的距离 x_0 可按公式(6)进行计算。 x_0 出现负值,则说明 S.P.点设在 0 号墩支座处,如果 $x_0 > L_n$ 则表示 n 号墩上摩阻力很大,S.P. 应设在 n 号墩支座处:

$$x_0 = \frac{C \sum K_i l_i + \sum (\pm \mu_i R_i)}{C \sum K_i} \quad (6)$$

式中: C 为收缩系数; l_i 为第 i 号桥墩至 0 号墩台的距离。

根据 S.P.的位置计算各墩墩顶的温度影响力。梁体的收缩、徐变影响力可换算为等效温度降低来进行计算^[6]。

$$P_{ti} = (L_i - x_0) K_i C \quad (7)$$

2.2 汽车制动力计算

一般来说,汽车荷载制动力按车道荷载的 10%

取值。公路Ⅰ级汽车荷载制动力为 165 kN,公路Ⅱ级汽车荷载制动力为 90 kN^[13]。当多车道时,该值在乘上车道数后再进行折减。对于柔性墩台,制动力采用支座与墩台刚度集成方法进行传递和分配。计算出墩顶各项水平力后,将温度影响力、收缩影响力、徐变影响力、汽车制动力进行汇总得出各墩顶的初始抗力水平。根据这一计算方法研究不同摩阻系数下的墩顶分配力状况。

3 工程算例

某单跨跨径为 30 m 简支梁桥,桥面宽度 9 m,如图 2 所示。在 3 号墩采用固定的板式橡胶支座,其余各墩采用活动板式橡胶支座。下部结构为双柱式圆墩,直径为 1.3 m,钻孔灌注桩直径为 1.5 m,桩基高度统一设置为 30 m。假定当地月平均气温高度为 35℃,月平均最低气温为 0℃。桥梁安装施工温度为 15~25℃。计算温度上升为 20℃,温度下降为 25℃,混凝土收缩、徐变及温度下降,均属于同一性质,三者加起来相当于降温 55℃。桥梁结构线膨胀系数为 0.000 01℃⁻¹。柱高分别为 7.0 m,8.5 m,9.0 m,8.0 m。桥梁横截面布置如图 2 所示。

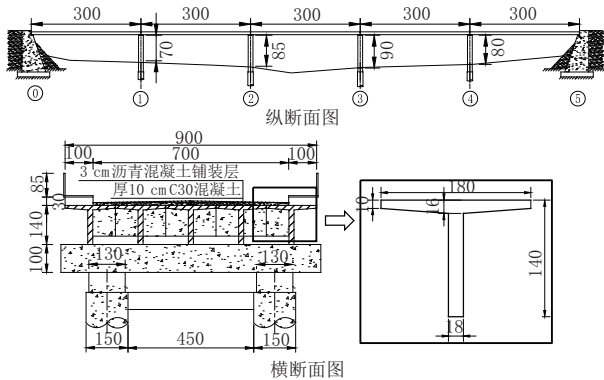


图 2 纵横断面图(单位:cm)

墩顶上有两排支座并联,两排支座并联后再与墩顶刚度串联,串联后的刚度便是支座顶部由支座桥墩联合的集成刚度。根据式(5)计算各墩台的组合刚度分别为 $K_1=4\ 167.8\text{ kN/m}$, $K_2=3\ 061.4\text{ kN/m}$, $K_3=2\ 780.6\text{ kN/m}$, $K_4=3\ 381.5\text{ kN/m}$ 。按照规范规定^[13],公路Ⅱ级汽车荷载制动力为 90 kN,本文车道数为 2,折减系数为 1.0,那么制动力取为 180 kN。为考虑不同支座摩阻系数对分配力的影响,本文摩阻系数分别取为 0,0.02,0.03,0.04,0.05,0.06。其中,摩阻系数为 0 表明计算时不考虑支座的摩阻力作用。根据桥面横截面尺寸可求结构作用在单个支座的恒重为 1 569.9 kN,根据计算可得对应的单个支座摩

阻力分别为 15.70 kN,23.5 kN,31.39 kN,39.25 kN,47.10 kN。那么每个墩顶在支座作用下的摩阻力分别为单个支座摩阻力的 2 倍。根据式(6)、式(7),并按照图 1 中的流程对各个墩顶纵向水平力在工况为收缩、徐变及温度影响(1)、温度上升变化影响(2)、汽车制动力(3)、(1)+(3)、(2)+(3)五种工况下分配计算。计算结果如表 1 至 3 所示。

表 1 收缩、徐变、及温度变化影响力

摩阻系数	墩号							
	收缩、徐变及温度降低影响力(1)/kN				温度上升变化影响力(2)/kN			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	96.38	20.28	27.46	89.19	35.05	7.37	9.99	32.43
0.02	31.40	8.87	53.93	31.40	31.40	41.65	21.15	31.40
0.03	47.10	25.32	68.88	47.10	35.05	7.37	9.99	32.43
0.04	62.80	41.77	83.82	62.80	35.05	7.37	9.99	32.43
0.05	78.50	58.23	98.76	78.50	35.05	7.37	9.99	32.43
0.06	94.19	21.00	26.80	88.39	35.05	7.37	9.99	32.43

表 2 汽车制动力、徐变及温度影响力 + 制动力

摩阻系数	墩号							
	汽车制动力(3)/kN				徐变及温度影响力 + 汽车制动力(1)+(3)/kN			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	56.02	41.15	37.37	45.45	152.40	61.43	9.91	43.74
0.02	—	—	—	—	31.40	31.40	85.81	31.40
0.03	47.03	44.11	40.07	48.73	47.03	47.03	38.72	47.09
0.04	56.02	41.15	37.37	45.45	62.80	38.90	35.33	42.97
0.05	56.02	41.15	37.37	45.45	78.50	33.69	30.60	37.21
0.06	56.02	41.15	37.37	45.45	94.19	28.48	25.87	31.46

表 3 温度上升影响力 + 汽车制动力

摩阻系数	墩号			
	温度上升影响力 + 汽车制动力(2)+(3)/kN			
	1	2	3	4
0	20.98	33.78	47.36	77.89
0.02	85.81	31.40	31.40	31.40
0.03	49.47	36.34	47.03	47.03
0.04	48.80	35.85	32.56	62.80
0.05	56.02	41.15	37.37	45.45
0.06	56.02	41.15	37.37	45.45

由表 1 可知,在不考虑支座摩阻力($\mu=0$)或 $\mu=0.06$ 时,各个墩顶在混凝土收缩、徐变及温度降低影响力下的水平力分配不均匀。以 $\mu=0$ 为例,水平力最大值为 96.38 kN,最小值为 20.28 kN。考虑支座摩阻力可使得墩顶纵向水平力之间的差距减少。以 $\mu=0.03$ 为例,最大水平力处于 3 号墩处,水平力的大小

为 68.88 kN 为不考虑摩阻系数的 0.71 倍。而另一方面,当 $\mu=0.06$ 时,最大的水平力为 94.19 kN 与摩阻力一致,但是在整体而言,依旧存在较大的水平力差值,说明在考虑支座摩阻力时,支座摩阻系数的取值不应过大。摩阻系数对于墩顶在温度上升变化影响力作用下的分配影响较少,原因是结构温度升高引起的水平力多数没有达到墩顶支座所提供的摩擦力。仅在 $\mu=0.02$ 时,1 号墩在温度升高影响力的分配下产生的水平力为 35.05 kN,高于摩阻力 $15.7 \times 2=31.4$ kN。此时,存在微小的分配波动,但总体依旧保持不变。

值得注意的是,当 $\mu=0.02$ 时,由汽车制动力产生的所有墩顶纵向水平力均大于摩阻力 31.4 kN。表明桥梁在支座提供的摩阻力之和小于汽车的制动力,在这桥梁设计中是不允许的,因此摩阻系数为 0.02 的支座不能在本工程中使用。综合表 2、3 可知,不同摩阻力对不同工况下结构的纵向水平力影响不同。以 $\mu=0.05$ 为例,此时结构摩阻力为 78.50 kN,工况三的汽车制动力(3)(均小于 78.5 kN)与工况五(2)+(3)的分配力均小于摩阻力而不需要进行调整,而对工况四(1)+(3)(1 号墩顶纵向分配力为 152.40 kN)则进行了相应的调整。应当注意的是当温度上升影响力与汽车制动力组合时所求的解小于单独汽车制动力的取值,是因为两者在纵向水平力的方向不一致的原因引起的。

为了对比各墩顶纵向水平力在不同摩阻力下的调配结果,对各墩顶的水平力进行统计分析,得出不同摩阻系数下,不同工况对应的水平力标准差,计算结果如图 3 所示。

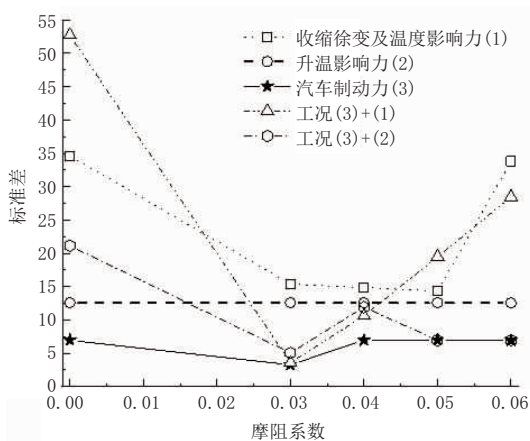


图3 摩阻系数对墩台纵向水平力标准差的影响

如图 3 所示,与不考虑摩阻力相比,考虑摩阻系数得到的各墩水平力标准差较小。进一步说明摩阻系数可减少墩顶水平力的离散性,可达到各个墩顶

水平力分配差异性减少目的。支座摩阻力对升温影响力作用下的墩顶纵向水平力没有影响,原因在于升温引起的墩顶水平力均小于摩阻力,此时墩顶水平力不存在二次分配现象。对于收缩徐变及降温影响力,墩顶标准差随着摩阻系数的增加呈现由 34.64 减少至 14.33 后再增加至 33.82。初始增大摩阻系数使得支座的摩阻力增大,此时部分墩顶的水平力高于摩阻力,墩顶之间存在水平力的二次分配。当持续增大摩阻系数时,多数墩顶水平分力低于支座摩阻力,无需要进行二次分配,只有少数部分的墩顶进行二次分配,故墩顶的标准差逐渐出现增加现象。通过对比不同摩阻系数下墩顶的水平力标准差可知摩阻系数为 0.03 时,五种工况下的标准差均处于较低水平,工况一至工况五的标准差分别为 15.40, 12.3, 3.28, 3.61, 5.08,说明此时各墩顶水平力分配较为合理。因此,摩阻系数为 0.03 的支座可认定为该梁的最佳支座选项。

5 结论

本文依据刚度集成法提出了考虑支座摩阻力的墩顶纵向水平分配力分析理论框架,并基于这一理论方法计算了最佳支座摩阻系数的取值。最后结合某一梁桥对该方法进行了应用。得出结论如下:

(1)墩顶纵向水平力的分配与支座摩阻系数有关。不考虑支座摩阻力效应使得墩顶水平力离散性较大,各墩顶水平力差异化明显。

(2)支座摩阻系数对升温影响力作用下墩顶水平力分配影响较少,对于汽车制动力作用下的墩顶水平分离影响较大。在主要考虑汽车制动力时,支座摩阻效应不可忽略。

(3)采用摩阻系数为 0.03 的支座,可使得本文桥梁各墩顶水平力的分配达到最佳分配状态。

(4)本文计算结果均是基于某一特定类型桥梁结构,未对影响墩顶集成刚度的不同桥墩立柱深度以及桩基埋深进行分析,具有一定的局限性。因此,基于这一理论框架对不同埋深以及不同土质类下的桥墩进行水平力分配研究是进一步需要研究的方向。

参考文献:

- [1] 王伯惠,徐风云.柔性墩台梁式桥设计[M].北京:人民交通出版社,1991.
- [2] 胡祥森,段亚军,傅科奇,等.连续桥面梁桥柔性墩纵向水平力分析与计算[J].公路交通技术,2015(3):57-61.
- [3] 王伟.水平力作用下岩土工程结构内力计算方法研究[D].长春:吉林

(下转第 225 页)

公路预防性养护中,铺筑完成 0.8 ~ 1 cm 的冷铺薄层,如图 3 所示。



图3 冷铺薄层试验段展示

铺筑后进行了回访,封水效果依旧如初,为原路面抵御水损坏起到了很好的保护作用,进而延缓了原路面老化和开裂。

4 结 语

冷铺薄层对于防水抗水的要求非常高,本次研究遴选性能优异的冷拌沥青混合料,通过试验研究分析了沥青用量和水泥用量两大关键因素变化对其水稳定性的影响,并根据相关结论辅助了试验工程。结果如下:

(1)存在一个最佳 SBS 改性乳化沥青用量值使冻融 TSR 值最大。过多和过少的乳化沥青用量都会降低厂拌冷铺超薄混合料的水稳定性,本次试验段推荐为 4.0%。

(2)当水泥用量小于 1.0%时,TSR 值大幅提升;超过 1.0%时,厂拌冷铺超薄混合料水稳定性改善不明显。

(3)使用 SBS 改性乳化沥青的厂拌冷铺超薄的工程试验段性能良好,封水能力较好,很好地延缓了原路面老化和开裂。

参考文献:

- [1] 熊远凡,夏金魁,许安军,等.一种 SBS 水乳液的制备方法:湖南,CN1554700[P].2004-12-15.
- [2] 韩萍,赵队家.液体沥青改性剂的制造方法:中国,CN1618862[P].2005-05-25.
- [3] 秦健,顾旻.G60 公路拓宽改建工程沥青路面加罩补强设计[J].城市道桥与防洪,2011(9):32-36,319.
- [4] Brûlé B, Brion Y, Tanguy A. Paving asphalt polymer blends: relationships between composition, structure and properties (with discussion) [C]//Association of Asphalt Paving Technologists Proc. 1988:57.
- [5] 交通运输部公路科学研究院,交通运输部.公路工程沥青及沥青混合料试验规程[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [6] 傅星恺.改性乳化沥青在微表处和冷再生中的应用研究[D].上海:同济大学,2018.
- [7] Cai H M, Wang T, Zhang J Y, et al. Preparation of an SBS latex - modified bitumen emulsion and performance assessment[J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(10): 987-996.
- [8] 钱卫民.SBS 改性乳化沥青生产技术探讨[J].石油沥青,2005, 19(3): 51-53.
- [9] 吴昉怀,杨奇竹,杨海清.新型乳化 SBS 改性沥青的研制与评价[J].中外公路,2007, 27(1): 159-162.

(上接第 215 页)

- 大学,2015.
- [4] 陈宝银,何山清,史会东.桩基础梁桥柔性墩纵向水平力分析[J].武汉工业学院学报,2012,31(4):69-72,85.
- [5] 李靖森,胡达和.梁桥抗推联合作用的计算(弹模结构法)[J].重庆交通学院学报,1982(3):51-61.
- [6] 袁伦一.连续桥面简支梁桥墩台计算实例[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [7] 周绍烈.梁桥墩台设计水平力的计算方法[J].西南交通大学学报,1993(5):30-36.
- [8] 张溥洋.山区高桥墩墩顶水平位移计算分析[D].西安:长安大学,2012.
- [9] 王伟,王磊.基于微分方程组法的柔性墩台内力计算分析[J].吉林大

学学报(工学版),2015,45(1):121-126.

- [10] 王伟.基于符号计算法的桥梁墩台水平力计算分析[J].市政技术,2017,35(3):56-59,71.
- [11] 温超,李楠.桥墩顺桥向水平力分配计算[J].交通科技,2009(S1):23-26.
- [12] 李学有,李顺波.桥梁墩台顺桥向水平力分配计算[J].中外公路,2021,41(2):135-139.
- [13] JTG D60—2015.公路桥涵通用设计规范[S].
- [14] 徐光辉,赵军.支座摩阻力对长大连续梁桥上部结构的影响[C]//全国桥梁结构学术大会论文集.上海:同济大学出版社,1992:845-852.
- [15] JTG 3363—2019.公路桥涵地基与基础设计规范[S].