

台阶式拱座基础的计算分析与探讨

顾保贵

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市200092)

摘 要:对于台阶式拱座基础的地基应力计算,根据计算假定和精度要求的不同,主要有传统法、变形协调法和有限元数值分析法3种计算方法。基于某上承式钢筋混凝土拱桥的工程实例,对其中的变形协调法进行了适当的变换思考以适用于本工程,通过有限元数值分析法研究了地基应力沿基础背面和底面的分布情况,同时对3种计算方法的结果进行了比较分析,研究了地基刚度对地基应力的影响以及地基应力沿横桥向的分布规律。研究结论和建议可为类似工程的设计提供参考。

关键词:台阶式拱座基础;基底应力;有限元数值分析法;应力分布;地基刚度

中图分类号: U441.5; U443.23

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0087-04

0 引言

钢筋混凝土上承式拱桥由于具有较大的跨越能力、优美的外观造型和良好的经济性能,在我国公路工程建设中得到了广泛应用。此类型的拱桥适用于地质条件较好的山区,基础常采用台阶式拱座基础。由于拱座基础与地基的相互作用较为复杂,并且关系到拱桥结构的整体安全性,因此基础设计往往成为设计过程中的关键节点。

本文结合某工程实例,对台阶式拱座基础的计算采用多种方法进行对比分析,进而研究了地基刚度对地基应力分布的影响,对拱座的设计提出了一些意见和建议,供类似工程参考借鉴。

1 工程概况

某大桥桥梁总体布置示意图见图1。

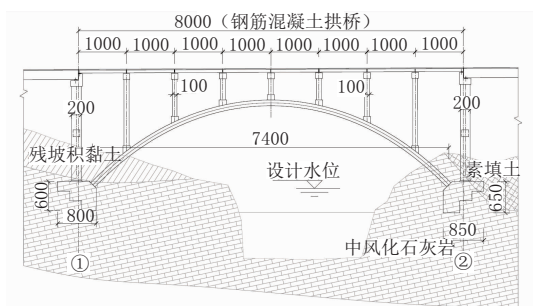


图1 桥梁总体布置示意图(单位:cm)

主桥采用净跨74 m上承式钢筋混凝土拱桥,矢跨比1/4.35,拱肋高1.2 m,宽16.0 m,拱轴线采用悬链线,拱轴系数 $m=1.8$ 。拱上为桥面连续结构简支的空心板梁,桥面总宽为20 m,两岸引桥采

用现浇等高度预应力混凝土箱梁,下部结构采用柱式桥墩,重力式桥台。

2 拱座基础地基应力的计算方法

台阶式拱座基础的计算内容主要包括地基应力验算、抗滑移和抗倾覆验算^[1]。根据计算假定的不同,主要计算方法有传统法、变形协调法和有限元数值分析法3种。

2.1 传统法

传统的台阶式基础地基应力计算方法,是将各台阶底面垂直投影到最下一层台阶底面的投影面进行计算,不考虑基础背面地基的影响。在基础的抗滑移验算时,台阶背面地基水平反力可按 $1/3 \sim 1/2$ 地基容许承载力考虑其贡献^[2]。基于这两方面假定,对拱座基础进行相应的验算,即基底最大应力不大于地基的容许承载力、基础抗倾覆稳定性系数和抗滑移稳定性系数满足规范相应要求。

传统法由于忽略了基础背面反力对地基应力的影响,不符合结构实际受力状况,其计算结果往往偏于保守,从而导致基础规模偏大。

2.2 变形协调法

鉴于传统法理论假定上存在一定的缺陷,文献[3]提出了一种基础底面与背面协同考虑的计算方法,即变形协调法。该方法的原理是:基础在受到外部荷载时,不仅会产生向下和向后的平动,还会发生刚性转动;基础背面地基与底面地基的受力相似,即承受一个偏心力的作用,具体计算公式参见文献[3]。

变形协调法考虑了基础背面地基反力的影响,故不对基础的抗滑移稳定进行验算。该方法对基础背面开挖后的回填材料以及背面的地基提出了较

收稿日期:2020-04-09

作者简介:顾保贵(1987—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

高的要求,一般需回填片石混凝土等变形小的填料,以保证水平力可靠地传至基础背面基岩上。

由图 1 可见,P2 桥墩拱座基础位置处岩面陡峭,基础背面并未完全置于基岩中,若直接利用文献[3]中的公式进行计算存在问题,因此需要进行一定的变换。笔者采用的方法如下:

(1)确定与基岩面接触的有效基础尺寸 $B' \times L'$ 。

(2)将拱座承受的全部荷载转换为作用在有效基础形心 O' 处的水平力、竖向力和弯矩。

(3)对于文献[3]中地基应力计算公式,采用 B' 、 L' 替换拱座的外轮廓尺寸 B 、 L 。

通过变换,变形协调法得到了补充,其适用范围也得到了扩展,从而能够为工程中出现的类似情况提供解决思路。

传统法和变形协调法计算方便,可在设计初期对结构尺寸做出初步的估算,为结构尺寸的进一步优化提供依据。

2.3 有限元数值分析法

随着有限元计算理论与实践的不断发展成熟,采用有限元程序建立实体仿真模型进行分析变得简单易行。对于形状不规则而材料相对连续的钢筋混凝土结构,有限元数值分析可以全面可靠地反映拱座基础自身以及地基的实际受力情况。

在进行拱座基础的有限元数值分析时,基础与地基之间的连接如何模拟,设计师们也进行了很多探索。根据基础与地基接触面有无胶结作用可分为两类:(1)无胶结的混凝土-岩石接触面。文献[4]在拱座模型的基础底面和背面分别施加了竖向约束和水平约束;文献[5]所建立的拱座基础模型中引入弹性支承,通过文克尔弹簧模型来模拟地基与基础之间的相互作用。(2)有胶结的混凝土-岩石接触面。文献[6]采用接触单元建立基础与地基之间的联系,考虑了两者在产生滑移前后接触界面上存在的剪应力;文献[7]则建立了混凝土-岩石胶结面模型,提出了胶结面上的剪应力由胶结作用和摩擦效应共同承担的假设,建立了考虑峰后胶结损伤的胶结面力学模型。

由于胶结状态下混凝土-岩石接触面力学特性的复杂性,关于这方面的试验和理论研究相对较少,其计算结果往往与胶结面的模拟以及参数的选取存在直接的关系。从工程的实用性角度出发,本次计算采用文献[5]中的方法。

3 计算模型及分析

3.1 结构模型

本次以 P2 桥墩拱座基础为例,拱座基础尺寸

见图 2。

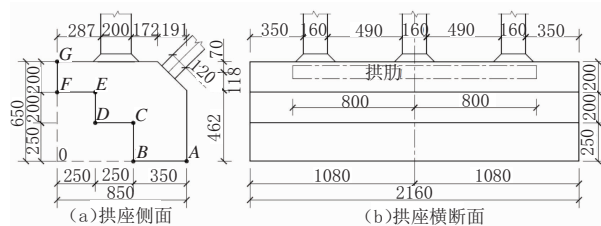


图 2 P2 桥墩拱座构造尺寸图(单位:cm)

为了满足计算效率和精度的双重要求,先利用 Midas/Civil 有限元软件建立全桥模型,考虑作用包括恒载、汽车荷载、人群荷载、温度作用、沉降和收缩徐变等。根据整体分析计算结果,提取标准组合下拱脚处的内力结果作为拱座基础模型的作用荷载。

拱座采用混凝土实体单元,通过弹性支承来模拟地基刚度。弹性支承系数可参照文献[8]相关内容进行取值和计算。由于拱座第 1 个台阶背面未有基岩支承,故不考虑该段范围内土体提供的约束,按自由段处理。拱座基础的有限元三维实体模型见图 3。

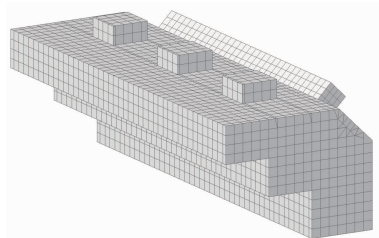


图 3 拱座基础的有限元三维实体模型

计算分为 2 种工况:工况一为拱脚处轴力最大工况,剪力 $N=-59\ 129\ \text{kN}$,弯矩 $M=-9\ 695\ \text{kN}\cdot\text{m}$;工况二为拱脚处弯矩最大工况,剪力 $N=-55\ 724\ \text{kN}$,弯矩 $M=15\ 640\ \text{kN}\cdot\text{m}$;单个立柱传递的轴力 F 统一按 $F=7\ 300\ \text{kN}$ 考虑。

3.2 有限元计算结果

有限元计算的典型剖面处(横桥向中心位置处)的地基反力如图 4、图 5 所示。

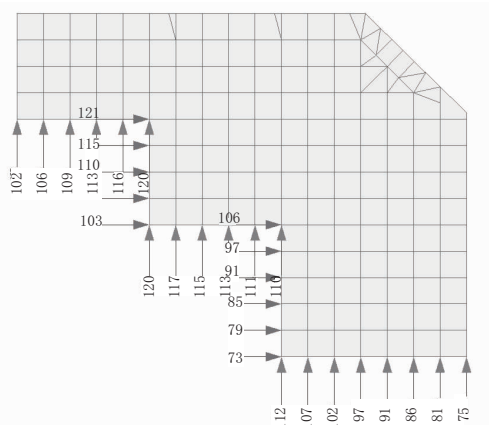


图 4 地基反力图(工况一)(单位:kN)

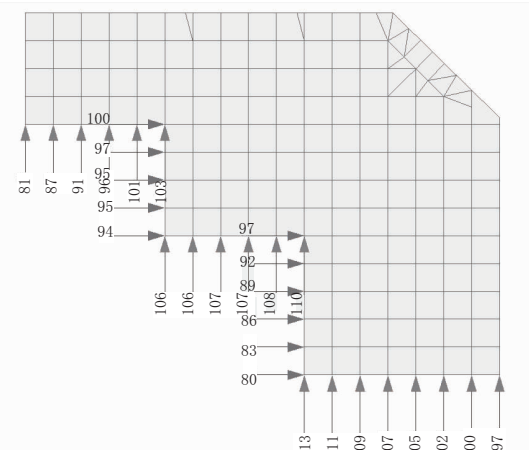


图 5 地基反力图(工况二)(单位:kN)

根据基础底面的应力变化情况,将拱座底面总宽分为 3 段,即 FE 、 DC 、 BA (见图 2);同样,根据基础背面的应力变化情况,将拱座总高分为 3 段,即 BC 、 DE 、 FG (见图 2)。地基应力沿基础底面和背面的分布情况见图 6 和图 7。

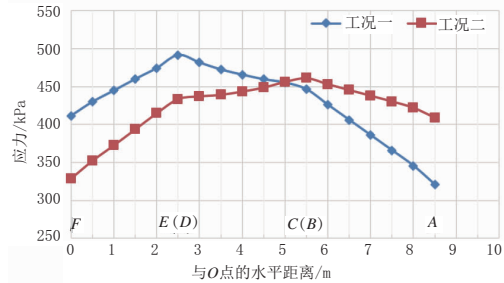


图 6 基础底面应力分布

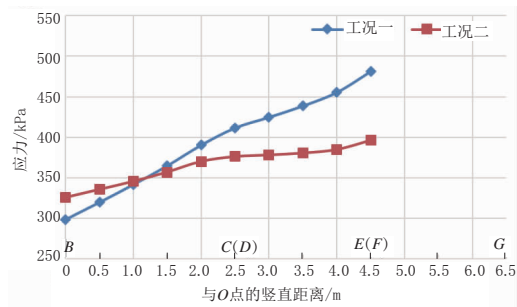


图 7 基础背面应力分布

由图 6 可知,在工况一和工况二下,基础底面应力在 FE 、 DC 、 BA 各自宽度范围内基本呈线性分布,在台阶折角处会出现应力曲线斜率的突变,基底应力峰值出现的位置跟计算工况有关,工况一出现在 E 点,工况二则出现在 C 点。

由图 7 可知,在工况一和工况二下,基础背面应力在 BC 、 DE 各自高度范围内也大致呈线性分布, FG 段由于是自由面故不产生应力,在台阶折角处也会出现应力曲线斜率的突变,基础背面应力峰值出现在最高点 E 点处。

需要说明的是,图 6 和图 7 的应力分布规律

只适用于本工程,地基应力的分布跟拱座的构造形式等因素直接相关,应具体情况具体分析。

3.3 计算结果对比

将有限元数值分析法与按 2.1 节(传统法)和 2.2 节(变形协调法)计算所得到的应力结果进行比较,3 种方法计算结果对比见表 1,表中 $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为拱座基础底面或背面的最大、最小应力。

表 1 3 种方法计算结果对比					kPa
项目		底面		背面	
		P_{max}	P_{min}	P_{max}	P_{min}
工况一	传统法	944.2	0	0	0
	变形协调法	552.9	350.5	385.8	231.0
	有限元分析法	480.4	298.4	484.8	294.0
工况二	传统法	793.8	0	0	0
	变形协调法	576.8	304.5	389.0	180.8
	有限元分析法	450.4	324.0	400.0	320.8

由表 1 可知,对于台阶式拱座基础,3 种方法在计算结果上存在较大的差别。传统法计算简便,但由于其忽略了基础背面反力的影响,其结果较其他 2 种方法增大很多。变形协调法计算结果相对较好,但由于其未考虑基础变形和地基刚度,与有限元分析法相比,存在一定的差异。有限元分析法可以与变形协调法相结合,对地基应力做综合的判断。

3.4 其他探讨

3.4.1 地基刚度对地基应力分布影响分析

以工况二为例,调整地基刚度分别为原始地基刚度的 0.1、0.2、0.5、2.0、5.0、10.0 倍,将不同地基刚度下的地基应力进行统计,结果见表 2。

表 2 不同地基刚度下地基应力对比表				kPa
地基刚度调整 比例系数	底面		背面	
	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$P_{\max}$	$P_{\min}$
0.1	381	332	337	308
0.2	392	310	345	294
0.5	418	256	365	254
1.0	450	194	400	205
2.0	490	126	464	139
5.0	582	36	544	62
10.0	668	-2	622	23

由表 2 可知,地基刚度对地基应力的影响很大,地基刚度越小,地基应力分布越均匀,而地基刚度越大,地基应力分布差异越大。在工程设计

时,必须要对地基刚度有基本的判断,必要时可设置一个刚度范围,取刚度的上下限值分别计算,取不利结果指导设计。

3.4.2 地基应力在横桥向的分布

传统法和变形协调法均是基于拱座基础横桥向单位宽度的受力情况,当拱肋与拱座同宽时,一般可认为地基应力沿横桥向基本呈均匀分布。对于本工程,拱肋宽度为 16 m,拱座基础宽度为 21.6 m,势必造成地基应力在横桥向分布不均。选取图 2 中的 C 点,以工况二为例,将该处的基础底面应力和台背应力在横桥向的分布情况绘制于图 8。

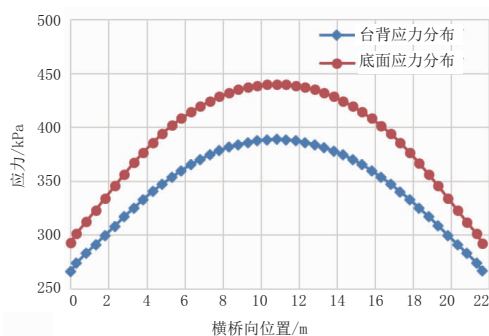


图 8 基础底面应力和台背应力在横桥向的分布

由图 8 可知,地基应力沿横桥向分布也存在较大的差异,两端相对较小,而中部相对较大,中部地基应力约为端部应力的 1.5 倍,分布曲线总体呈钟形。

同样,调整地基刚度分别为原始地基刚度的 0.1、0.2、0.5、2.0、5.0、10.0 倍,将不同地基刚度下 C 点的基础底面应力在横桥向的分布情况绘制于图 9。

由图 9 可知,地基刚度对地基应力横向分布影响也很大,地基刚度越小,地基应力分布越均匀,而地基刚度越大,地基应力分布差异越大。

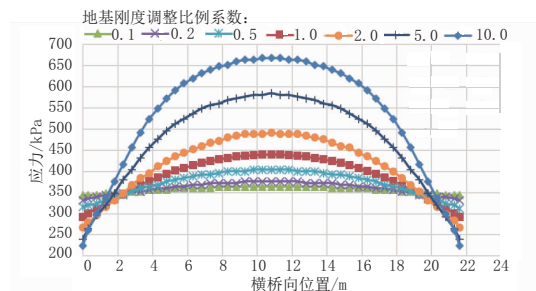


图 9 不同地基刚度下基础底面应力在横桥向的分布

4 结 语

对于台阶式拱座基础的地基应力计算,传统法由于忽略了背面基岩的影响,其计算结果偏于保守,往往会造成基础规模过大,造成工程浪费。变形协调法考虑了背面基岩的支撑作用,认为地基应力在拱座底面和背面均呈线性分布,可用于设计初步估算。有限元数值分析方法的适用性广泛,可以考虑不同地基刚度对结构的影响,能够较为真实的反映结构的实际受力状态。需要指出的是,设计时必须对地基刚度有明确的判断,或根据文献[8]手册查表粗略得到,或要求勘察单位按照试验方法给出以作为设计参数依据。

参考文献:

- [1] JTG D63—2007,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [2] 江祖铭,王崇礼.公路桥涵设计手册—墩台与基础[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [3] 于淑兰,姚翔,沈光玉.拱座台阶基础基底应力计算[J].北方交通,2007(1):73-76.
- [4] 叶柯,胡圣江,钟国东.拱座台阶基础基底应力仿真计算[J].广东公路交通,2011(3):15-17.
- [5] 肖韩.拱座台阶基础基底应力分析[J].华东公路,2014(1):33-36.
- [6] 唐必刚,赵怡彬.基于 ANSYS 接触分析的拱座台阶基础计算[J].公路工程,2017(3):170-174,191.
- [7] 田洪铭,陈卫忠,郑朋强,等.芙蓉江大桥拱座混凝土—基岩抗滑稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2014(7):1407-1414.
- [8] 常士骧,张苏民.工程地质手册(第4版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

电话:021-55008118 传真:021-55008850 投稿及联系邮箱:cdq@smedi.com