

中等跨度上承式拱桥深基岩拱脚基础方案研究

李言坤, 李福鼎, 于振华, 严 搏, 吴海彬

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 山区地形起伏大, 深谷、水道较多, 常采用上承式或中承式等跨越性能好的有推力拱桥方案。但不同地区地质多样, 常有不良地层构造, 给有推力拱脚基础的建设带来很大困难。基于深圳市某公园中一座深基础的中等跨度上承式拱桥项目, 分析了常见有推力拱脚类型的适用性特点, 提出了5种拱脚基础结构设计方案, 并采用数值分析方法对比不同方案在山地、河滩2种地质条件下的受力及变形情况。分析结果表明: 在深基岩地区采用大直径斜桩、扩大基础、地下连续墙等基础结构将具有更好的承载性能, 但普通带有斜桩的群桩基础方案经济性最好, 且便于施工, 更适用于水平力不大的拱桥基础结构中; 此外, 普通群桩基础受力对地层特性比较敏感, 应重点关注该类问题。

关键词: 中等跨度上承式拱桥; 深基岩地质条件; 有推力拱脚基础; 结构受力性能; 有限元分析

中图分类号: U443.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0102-07

Research on Deep Bedrock Arch Springing Foundation Scheme of Medium-span Deck Arch Bridge

LI Yankun, LI Fuding, YU Zhenhua, YAN Bo, WU Haibin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The terrain in mountainous areas is highly undulating with many deep valleys and waterways, where the thrust arch bridge schemes with good span, such as deck or half-through types, are often adopted. However, the geology in different regions is diverse, and there are often poor stratum structures, which will bring the great difficulties to the construction of thrust arch springing foundation. Based on a medium-span deck arch bridge with a deep foundation in a park of Shenzhen, the applicability characteristics of common thrust arch springing type are analyzed, five foundation structure design schemes of arch springing are proposed, and the numerical analysis method is used to compare the stress and deformation of different schemes under two geological conditions of mountainous area and river beach. The analysis results show that the foundation structures of large-diameter inclined pile, enlarged foundation and underground diaphragm wall adopted in the deep bedrock area will have the better bearing performance, but the common pile group foundation scheme with inclined piles has the best economy and is convenient for construction, which is more suitable for the arch bridge foundation structure with little horizontal force. In addition, the force of common pile group foundation is more sensitive to the formation characteristics, which should be paid more attention.

Keywords: medium-span deck arch bridge; geological conditions of deep bedrock; thrust arch springing foundation; structural stress performance; finite element analysis

0 引言

拱桥作为一种古老的桥型, 其造型优美, 跨越能力强, 在跨越深切山谷或河道时被广泛采用。通常当桥位处地基条件较好时, 可采用上承式或中承式等有推力拱桥, 但不同地区地质差异大, 尤其山区环境的地质更为复杂, 对基础结构的安全可靠性要求更高, 所以对于有推力拱桥的基础方案选型须进行

针对研究。

基础作为有推力拱桥中最重要且受力最复杂的部分, 其常见类型有: 地下连续墙或沉井基础^[1-3]、大直径斜桩或竖直桩+斜桩组合基础^[4-5]、台阶扩大基础^[6-8]、群桩或附加阻滑体系^[9-10]等。关于不同基础的特点和施工, 国内已有相关学者开展了大量研究。查俊等^[11]针对3种构造的地下连续墙基础进行数值模拟分析, 综合比选其承载性能、变形、施工工艺、工期等特性, 得出了最优构造; 王刚巧^[12]对山区斜坡特大拱桥直-斜组合桩基础承载性能展开研究, 分析了桩长、桩身刚度、桩径、承台约束及斜桩角度对直-斜

收稿日期: 2024-09-03

作者简介: 李言坤(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事市政桥梁设计工作。

组合桩基础受力特性的影响,并给出了设计建议;施智等^[13]分析了厚覆盖层地质条件下斜井桩+竖桩拱脚基础结构受力、施工方法、经济性能等,验证了构造的合理性和经济性。

本文根据实际工程案例,分析了不同有推力拱脚基础的构造和适用性特点,然后对 5 种深基岩地质条件下拱脚基础的结构受力、变形进行模拟计算,并研究了地质条件的影响。

1 工程概况

跨高峰水库桥为深圳市侨城东北延通道项目中唯一一座跨水域桥梁,位于阳台山森林公园内,为上承式钢结构拱桥(见图 1)。其中主桥左、右幅分别为 80 m+90 m+80 m 和 90 m+90 m+80 m 三连拱,中拱脚位于水库中,边拱脚位于山脚斜坡之上,为有推力拱脚,其基础方案选择为该桥梁的重点。



图 1 跨高峰水库桥效果图

阳台山属海岸山脉高丘陵地。桥址上覆地层为素填土、坡洪积含砾粉质黏土、残积砂质黏性土;下伏基岩为中粒花岗岩的全、强、中、微各风化层,基岩面埋藏深度约 20 m。选择拱脚基础时,综合考虑受力、施工难度和对环境的影响,采用竖桩+斜桩群桩基础方案,同时辅以削竹式护坡,以减少基础施工开挖面积。竖桩+斜桩群桩基础见图 2;削竹式护坡示意图见图 3。

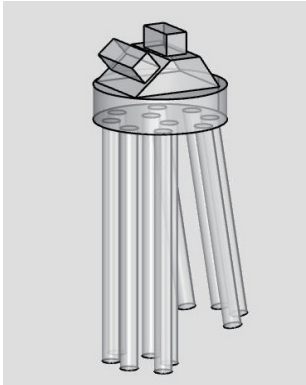


图 2 竖桩+斜桩群桩基础

2 常见有推力拱脚基础形式对比

现有工程中有推力拱脚的建造方案主要可归纳为以下几种类型:



图 3 削竹式护坡示意图

(1)台阶式扩大基础。台阶式扩大基础通过多个台阶层叠而成,有助于分散基础所受荷载,较大的底面面积有助于增强基础在水平方向和垂直方向上的稳定性,减少基础因荷载作用而产生的变形和沉降。使用该类型的代表项目有唐家河特大桥^[7]、总溪河大桥^[8]等。

(2)地下连续墙和沉井基础。地下连续墙和沉井基础整体性强,稳定性好,能承受较大的水平及竖向荷载。因其埋置深度大,是一种适用于深厚覆盖层地区的基础形式,常见平面形状有圆形、矩形、圆端形等,典型案例有广东博罗大桥^[14]、平南三桥^[3]。

(3)斜井桩/斜撑基础。采用斜井桩和普通竖桩组成的受力体系,共同承担主拱产生的巨大竖向力和水平推力,斜井桩通常顺着拱肋轴线的切线方向布置,传力过程简单、明确、高效。典型案例有夜郎河大桥^[4]、合山红水河特大桥^[13]。

(4)群桩基础或辅助阻滑体系。当施工场地开阔、具备施工空间,且拱脚的水平推力不太大时,可采用群桩基础,如在中小桥的边拱脚或多联拱桥的中拱脚位置。其施工工艺简单,安全性高,代表案例有 G3 合铜黄高速拱桥^[15]。若边拱脚基础位置地质情况较差,也可采用群桩基础+台后阻滑体系的施工措施,如竹屿湖大桥^[10]等。

不同拱脚方案类型的典型案例见图 4。

由上述可知,不同的基础方案有其一定适用性。不同类型的拱脚基础优缺点和对应的适应性条件见表 1。

3 有推力拱脚基础方案设计

3.1 桥位处地质情况分析

为研究不同有推力拱脚基础的受力特性,以跨高峰桥右幅小里程拱脚为对象进行分析。该桥梁所在桥位处于阳台山坡脚下,地形上陡下缓,斜坡角度 α 为 $30^{\circ}\sim60^{\circ}$,桥位整体走向沿山脊方向;由于风化较

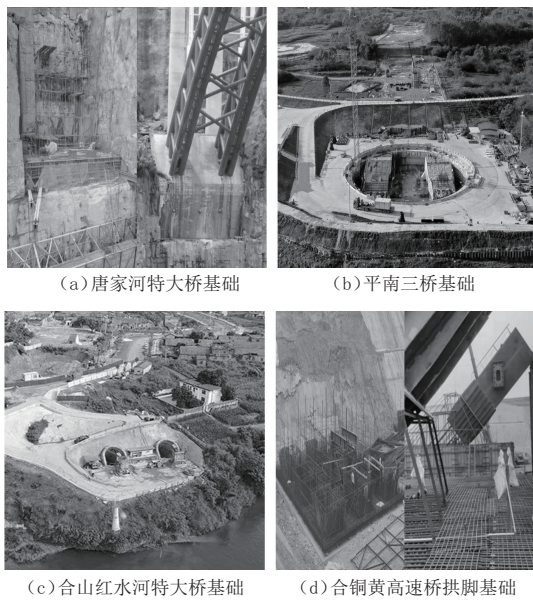


图4 不同拱脚方案类型的典型案例

好,基岩上有较厚地表填土及风化土层(地层1~地层4),如图5所示,地质特性较均匀,其基岩埋深约20 m。桥

梁基础属于深基础类型,且邻近水源保护地,所以其拱脚基础方案选型需重点考虑结构受力的合理性、施工的便利性及对景区环境和邻近水源的保护效果。

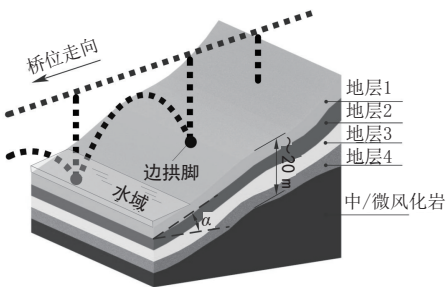


图5 桥位处地形地质情况

3.2 拱脚基础构造

跨高峰水库主桥右幅边拱脚横断面尺寸为6.0 m×2.0 m,拱轴线与水平线夹角50°,拱脚承台上接交界桥墩立柱,柱底尺寸为4.0 m×2.0 m。根据主拱、立柱构造和地质条件特点,提出了5种适用于深基岩地区的拱脚基础方案,不同方案特点对比见表2。

表1 不同有推力拱脚基础方案优缺点及适用性对比

类型	优点	缺点	适用性
台阶式扩大基础	承载能力强、适应性强、施工速度快,工艺简单、开挖稳定性好	台阶式扩大基础通常需要进行大开挖施工,对施工场地和周边环境有一定的要求	适用地质条件较好地区,在易塌方及有流砂地区难以达到设计深度,应少用
地下连续墙和沉井基础	有较大的刚度和良好的整体性,在施工中能够同时起到挡土和隔水的作用,提高了基坑开挖的安全性	施工工期长,且在特定地质条件下(如粉砂、细砂类土)易发生流砂现象,造成沉井倾斜或下沉困难	适用于深度较大的基坑工程,适用于围护结构亦作为主体结构一部分,且对防水、抗渗有较严格要求的工程
斜井桩/斜撑基础	承载能力高,刚性大,开挖工程量相对实体基础而言较小、受地质条件限制少	斜桩基础断面过大,致使普通桩基础施工工艺无法满足要求,倾斜的大直径桩施工难以控制,支护工程量较大、工程成本较高	适用于多种需要承受水平荷载或需要提高结构稳定性的场合,如不良地质条件,地震多发地区等
群桩或带阻滑体系的桩基础	阻滑体系与主拱结构之间密切协同作用,结构的稳定性好,且结构施工简单,危险性小	要分别承受竖向和水平荷载,需要严格控制桩身的水平位移和沉降,此外带阻滑体系的桩基础施工作业面较大,施工周期长	带阻滑桩的主拱基础通常设置于地质条件较为复杂的坡地或山区

表2 不同有推力拱脚基础方案特点对比

构造和图形	方案一:斜井桩+竖桩	方案二:台阶式扩大基础	方案三:竖桩+斜桩群桩基础	方案四:地下连续墙基础	方案五:群桩基础+阻滑体系
构造形式	单根5 m×5.6 m弧形断面斜井桩+2φ3 m钻孔竖桩	4级台阶式扩大基础,台阶尺寸2 m×3.5 m	φ1.6 m钻孔桩,6根竖桩+4根斜桩(角度9°)	圆环形构造,外径12 m,墙身厚1 m	9根φ1.6 m钻孔竖桩+60根φ0.6 m阻滑管桩
图形示意/m					

4 不同有推力拱脚基础受力分析对比

4.1 地层及结构材料特性

通常拱桥有跨越山谷和水道2种使用场景,二者

地质构造有明显差异。为了对比不同地质情况对基础受力的影响,分别对处于山地和河滩2种地质条件下的基础结构进行受力分析,并比较不同有推力拱脚基础方案的适用性。

常规山地地质的地层从上至下可大致分为第四系土层、风化带、基岩层等构造。假设岩土体中无溶洞、破碎带等不良地质情况,地层分布均匀,取基岩覆盖地层从上至下分布为:素填土、粉质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩,基岩为中风化花岗岩(见图6(a))。

对于河滩地质而言,由于河流经过泥沙沉积而形成了天然滩涂,沉积物较丰富,土质较差,土壤结构松散,砂砾含量较高。假设基岩覆盖地层从上至下分布为:淤泥质土、粉质黏土、中砂、强风化花岗岩,基岩为中风化花岗岩(见图6(b))。

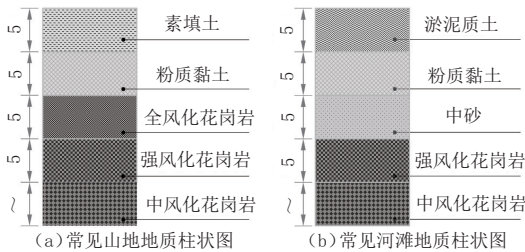


图6 不同地质条件对比(单位:m)

模型中岩土体及基础结构参数见表3。其中岩土体结构采用各向同性摩尔-库伦模型,拱脚基础如承台、桩基、钢管桩等采用弹性本构模拟。地基计算参数取值于工程勘察设计成果及工程试验,基础结构参数选取参照相关设计规范。

表3 模型中岩土体及基础结构参数

参数名称	淤泥质土	素填土	粉质黏土	中砂	全风化花岗岩	强风化花岗岩	中风化花岗岩	台座	灌注桩	钢管桩
弹性模量 E /MPa	0.50	3	5	15	200	2 000	10 000	32 500	31 500	210 000
泊松比 ν	0.45	0.38	0.35	0.32	0.30	0.26	0.24	0.20	0.20	0.30
容重 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	15.0	18.2	18.3	18.6	20.0	23.0	26.0	25.0	25.0	74.0
K_0	0.95	0.83	0.74	0.66	0.58	0.58	0.43			
黏聚力/kPa	3	13	20	0	25	35	38			
内摩擦角/($^\circ$)	3	10	15	20	25	25	35			

4.2 模型参数

采用 MIDAS GTS 建立拱脚基础-岩土体和 5 种基础结构的三维有限元分析模型,如图7、图8所示。
岩土体和基础结构均以实体单元模拟,模型四周及底部固定,土体与基础结构接触面采用耦合约束,模型整体单元网格划分尺寸为 1 m,网格在基础结构局部位置进行加密。

为了避免土层边界效应对基础结构受力产生影响,取地层平面投影尺寸为 75 m×75 m,其尺寸大于基础长边尺寸的 5 倍;地层高度为 25~65 m,其中基础位置的地层厚度不小于基础结构高度的 2 倍;此外,为分析基础受力的一般规律,简化模型覆盖地层 1~4 层厚度均为 5 m,且各层土体性质均匀。

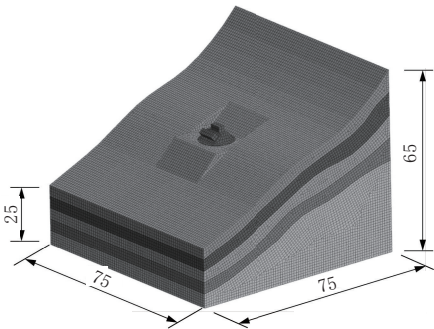


图7 拱脚基础-土层三维有限元分析模型(单位:m)

模型外部荷载值施加取全桥基本组合下拱脚的最不利受力工况,即最大拱脚轴力时和最大拱脚弯



图8 5种基础结构的三维有限元模型图

矩时分别对应的荷载情况,具体数值如表4所列。

表4 拱脚基础外施加荷载参数值

工况	拱脚轴力/ kN	拱脚弯矩/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	拱脚剪力/ kN	立柱轴力/ kN
最大拱脚轴力	-19 000	16 000	-3 000	18 000
最大拱脚弯矩	-13 000	-17 000	-100	18 000

4.3 山地地质条件下拱脚基础受力对比

在山地地质条件下,最大拱脚轴力、弯矩工况下的 5 种基础结构受力见图9、图10。

由图9可知:在最大拱脚轴力工况下,采用不同

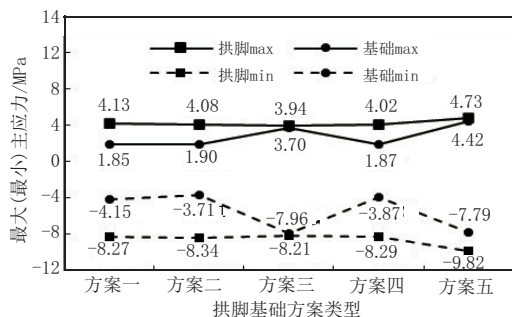


图9 山地地质条件下,最大拱脚轴力工况下5种基础结构受力分析

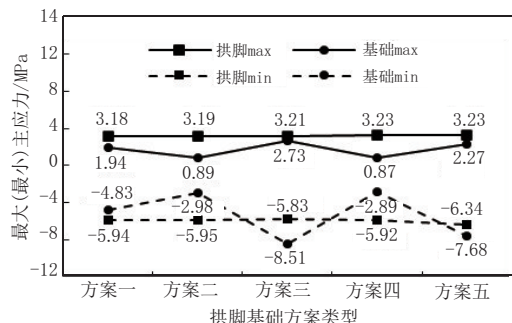


图10 山地地质条件下,最大拱脚弯矩工况下5种基础结构受力分析

方案,拱脚位置最大、最小主应力总体变化不大;但对于下部基础结构应力而言,则是方案一、二、四相对于方案三、五更佳。由图10可知:在最大拱脚弯矩工况下,方案二、四受力性能最佳,方案三受力最不利。

此外,拱脚位置在最大拱脚弯矩工况下的主应力均明显小于最大拱脚轴力工况下的主应力,可见拱脚结构的承载能力取决于拱脚所受最大轴力时的工况;而对比同一基础结构方案下的2种工况可知,方案二、四在最大拱脚弯矩工况下的应力相对较小,有斜桩的方案一、三在最大拱脚轴力工况下的应力相对较小,可见前者方案有较好的抗弯能力,后者方案能较好地抵抗拱脚轴力带来的影响。

最大拱脚轴力、弯矩工况下的5种基础结构位移见图11、图12。

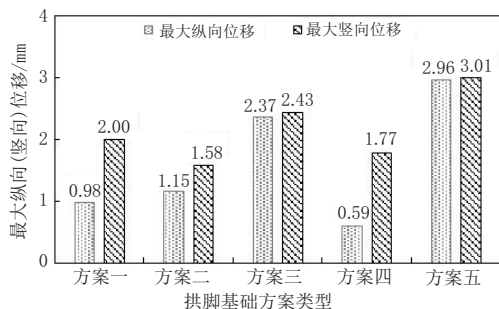


图11 山地地质条件下,最大拱脚轴力工况下5种基础结构位移分析

由图11、图12中拱脚基础的最大纵向位移和竖向位移可知:方案一、二、四均有较好的抵抗变位的

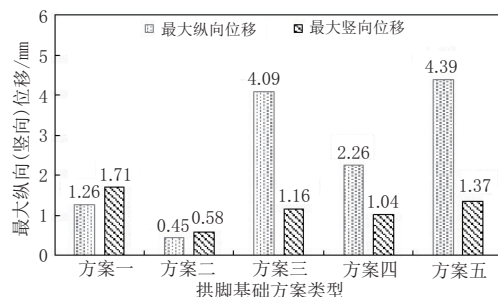


图12 山地地质条件下,最大拱脚弯矩工况下5种基础结构位移分析

能力;方案三、五的性能一般且总体水平相当。

4.4 河滩地质条件下拱脚基础受力对比

在河滩地质条件下,最大拱脚轴力、弯矩工况下的5种基础结构受力见图13、图14。

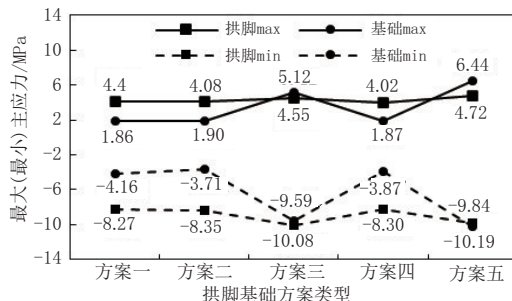


图13 河滩地质条件下,最大拱脚轴力工况下5种基础结构受力分析

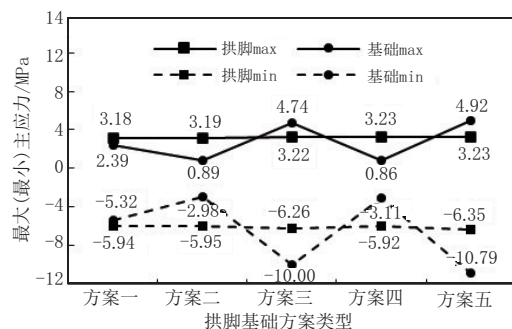


图14 河滩地质条件下,最大拱脚弯矩工况下5种基础结构受力分析

由图13、图14可知,其总体受力规律与在山地地质条件下一致,但方案三、五基础下部结构受力对地质情况的变化更加敏感,当深基岩上覆土层的土质状况较差时,普通桩基结构受力明显更不利,而采用大直径斜桩、扩大基础和地下连续墙等方案时,结构受力影响较小。

最大拱脚轴力、弯矩工况下的5种基础结构位移见图15、图16。

由图15、图16可知:在河滩地质条件下,方案一、二、四的结构变位相比在山地地质条件下有略微增大,但总体抵抗变形能力仍然较好;方案三、五在河滩地质条件下的结构变位相比山地地质条件下有

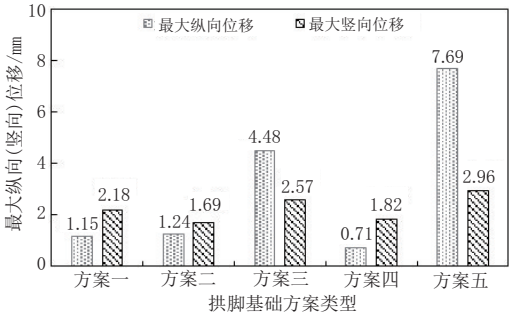


图 15 河滩地质条件下,最大拱脚轴力工况下 5 种基础结构位移分析

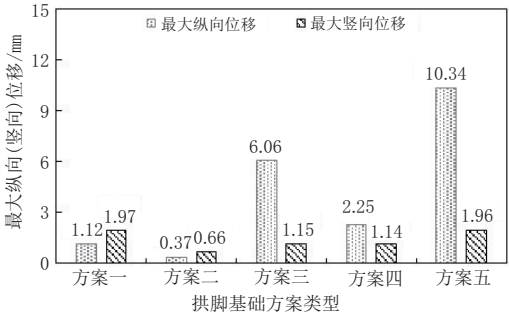


图 16 河滩地质条件下,最大拱脚弯矩工况下 5 种基础结构位移分析

明显增加,且抵抗变形的能力较差。因此,当地质条件不好时,对于采用普通桩基的有推力拱,需重点关注其基础抵抗变位的问题。

4.5 地质条件对拱脚基础受力的影响

由以上分析可知,虽然不同基础方案在 2 种地质条件下的受力特性有所不同,但受力的影响程度却大不一样。分析地质条件对基础受力的影响,可以得出不同方案的适用性特点。

不同地质条件下 5 种基础结构的最大、最小主应力见图 17、图 18。

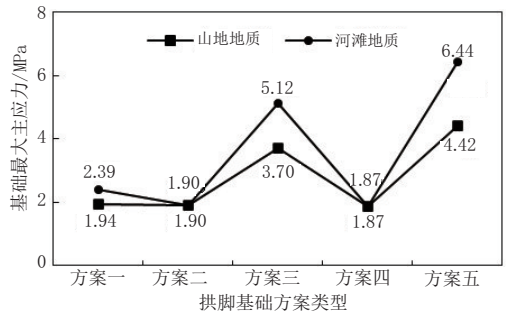


图 17 不同地质条件下 5 种基础结构的最大主应力

由图 17、图 18 可知,地质条件变差时,基础受力总体有增大的趋势。其中:方案二、四在 2 种地质条件下最大、最小主应力基本无差别;方案一有一定差异,但不超过 20%;方案三、五的差值比接近 40%,且总体应力明显高于其他 3 种方案。

不同地质条件下,5 种基础结构的最大水平位

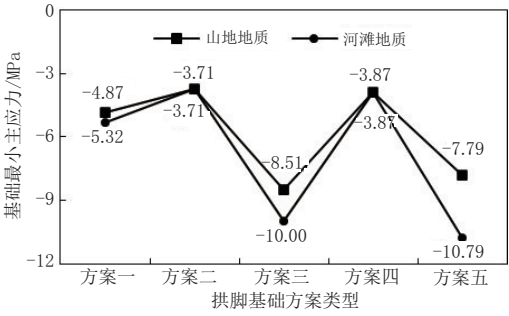


图 18 不同地质条件下 5 种基础结构的最小主应力移、竖向位移见图 19、图 20。

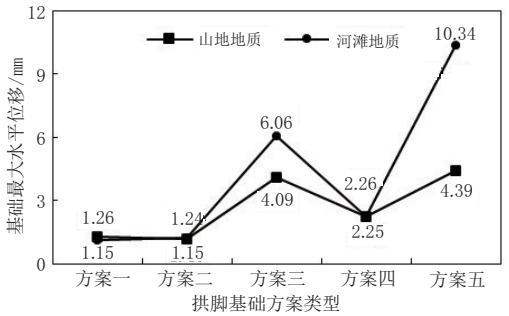


图 19 不同地质条件下 5 种基础结构的最大水平位移

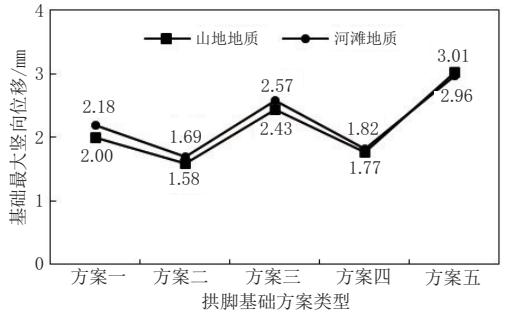


图 20 不同地质条件下 5 种基础结构的最大竖向位移

由图 19、图 20 可知:地质条件不同时各种基础结构的竖向位移变化不大;不同地质特性对方案一、二、四的水平位移同样影响较小,而方案三、五在地质条件较差时,其水平位移显著增大。由此可见,当地质条件不好时,选择桩基作为有推力拱的基础不是一个好的方案。

4.6 综合性能对比

表 5 给出了以上分析的 5 种基础结构的耗材、净占地面积、受力性能及施工难度等各项指标,综合对比各种方案的优缺点。

由结构的体积和基础平面面积可知:方案一、三、四的耗材最小,且占地面积小,则基础施工开挖对于环境影响较小,比较适合对建筑景观要求较高的工程中。从受力特性而言,方案一、二、四具有较好的承载能力和抵抗变形的能力,但其施工难度较大,经济性不佳;方案五的施工工艺较简单,但承载能力和抵抗变形的能力一般,且施工作业面大,常规山条

件不适用,对于开阔环境下的中小桥有一定的适用性;方案三结构受力特性一般,但施工对环境影响小、工期短,经济性最好,所以对于地质条件适中、拱脚推力不大的中小型拱桥而言,采用方案三有非常大的优势。

表5 不同拱脚基础方案综合对比

方案类型	结构体积/ m ³	基础平 面积/m ²	受力 性能	抵抗变 位性能	施工 难度	工期 控制
方案一	1 826.7	131.5	好	佳	较困难	长
方案二	3 446.7	250.9	好	最佳	较困难	长
方案三	917.2	107.5	一般	一般	易	短
方案四	1 344.1	113.1	好	较佳	较困难	较长
方案五	1 297.5	247.8	一般	一般	易	较长

注:不同基础类型的结构受力、施工难度和经济性应综合考虑各种因素,该表仅以本文所提出的案例作说明。

5 结 语

(1)大直径斜桩、扩大基础、地下连续墙等基础结构在外部轴力荷载和弯矩荷载等不同受力状况下均表现较好,且抵抗基础变位能力强,对于拱脚基础所受外力较大的工程结构有较好的适用性。

(2)在深基岩地区采用普通带有斜桩或阻滑桩的群桩基础方案,其抵抗拱脚推力效果不如扩大基础、地下连续墙、大直径斜桩等类型好。但是其优点为结构施工速度快、难度低,其中普通带有斜桩的群桩基础经济效果最好,所以在拱脚推力不大的中小型拱桥中采用该方案具有一定优势。

(3)不同地质条件对拱脚基础受力有一定影响。地质条件不好时,基础结构在外部推力荷载作用下应力和变形均会增大,但对于大直径斜桩、扩大基

础、地下连续墙等基础总体影响较小;普通群桩基础结构对地质特性较敏感,若地基条件较差时,有推力拱应尽量避免选用该种类型的基础结构形式。

参考文献:

[1] 胡小康,黄浩.地下连续墙基础在大跨度有推力拱桥中的设计分析[J].工程与建设,2019,33(1):101-103.

[2] 陈虎成,刘明虎,陈晓东.地下连续墙基础在刚架拱桥优化设计中的应用[J].中外公路,2010,30(5):222-224.

[3] 廖宸锋,欧阳平,罗富元.平南三桥北岸拱座基础方案比选[J].中外公路,2021,41(6):157-160.

[4] 王秋会,汶文钊,曹俊鑫.大断面斜井施工技术用于拱桥单桩拱座基础[J].铁道建筑,2019,59(4):67-70.

[5] 罗毅.组合式拱座基础斜撑开挖技术研究[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2021,20(1):8-12.

[6] 王乐冰,梅新咏,苏杨.成贵铁路鸭池河特大桥主桥结构设计[J].桥梁建设,2020,50(增刊2):99-103.

[7] 王景宇.唐家河特大桥拱座施工技术研究[J].冶金丛刊,2019,4(2):217-218.

[8] 刘新华,师少辉,彭元诚.总溪河大桥主桥结构设计[J].桥梁建设,2016,46(5):95-99.

[9] 邓剑韬,刘伟国,肖宗杰.软土地基拱桥桥墩台设计探讨[J].福建建设科技,1995(3):22-22;24.

[10] 叶际斌.深厚软土地基拱桥台后阻滑体系设计与研究[J].低碳世界,2017(9):202-203.

[11] 查俊,邵羽,马少坤,等.3种大跨拱桥拱座地连墙基础适用性研究[J].广西大学学报(自然科学版),2022(4):862-872.

[12] 王刚巧.山区斜坡特大拱桥直-斜组合桩基础承载性能研究[D].成都:西南交通大学,2021.

[13] 施智,罗吉智,胡腾飞.厚覆盖层地质条件下有推力拱桥基础研究[J].世界桥梁,2021,49(1):76-82.

[14] 任娜.博罗大桥病害成因及加固设计要点[J].内蒙古公路与运输,2023(4):29-31;42.

[15] 宋明泽.大跨有推力拱桥矩形群桩基础承载特性研究[D].南京:东南大学,2021.

(上接第101页)

界,2025(7):158-160.

[2] 杜文平.空心板梁桥组合加固受力性能及其效果评估研究[D].南京:东南大学,2024.

[3] 王佩.服役空心板梁静动力学性能试验研究[D].重庆:重庆交通

大学,2025.

[45] 崔浩.既有公路预应力混凝土空心板梁抗剪承载力加固性能研究[D].济南:山东交通学院,2025.

[5] DBJT 08-101—2024,先张法预应力混凝土空心板(桥梁)[S].