

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.03.006

不同拱轴线反拱基础框架桥力学特性*

王煌森¹, 张军², 徐怀江^{1,2}, 洪太波², 陈静³, 薛松岭¹, 李家伟¹

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 灌云县公路事业发展中心, 江苏 连云港 222299;
3. 江苏宁宿徐高速公路公司, 江苏 宿迁 223911)

摘要: 基于框架桥整体性好、刚度大等优点, 针对深厚海相淤泥软土地质场地设计了一种反拱框架桥结构。为获得其合理的结构形式, 通过对反拱基础框架桥进行应力和变形规律分析, 研究不同反拱轴线底板的反拱框架结构力学特性并进行比选。利用 ABAQUS 有限元软件建立 3 种反拱基础框架桥模型, 在结构自重和车道荷载的作用下, 计算获取结构主应力和沉降、变形数据。结果表明: 该结构的最大主拉应力出现在与桥墩连接处的顶板上表面; 最大竖向变形发生在顶板中跨跨中; 最大纵向变形发生在墩顶塑性铰区范围。在相同条件下, 最大主拉应力、竖向和纵向变形均出现在圆弧拱轴线桥, 分别为 2.272 MPa, 2.428 mm 和 0.131 mm; 但最大沉降出现在抛物拱轴线桥, 为 6.913 mm。因此, 悬链拱轴线桥的受力性能相对更加合理, 结构变形较小, 更适合后期的应用推广。基于此, 根据结构受力和变形特征, 建议在结构设计时宜优先考虑使用悬链拱轴线底板的反拱基础框架桥。

关键词: 反拱基础; 框架桥; 有限元法; 应力; 变形; 位移

中图分类号: U441.5

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2024)03-0043-10

引用格式: 王煌森, 张军, 徐怀江, 等. 不同拱轴线反拱基础框架桥力学特性[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(3): 43-52.

Research on Mechanical Characteristics of Reverse Arch Foundation Frame Bridges with Different Arch Axes

WANG Huangsen¹, ZHANG Jun², XU Huaijiang^{1,2}, HONG Taibo², CHEN Jing³, XUE Songling¹, LI Jiawei¹

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Road Development Center of Guanyun County, Lianyungang 222299, China;

3. Jiangsu Ningsuxu Expressway Co., Ltd., Suqian 223911, China)

Abstract: Based on the advantages of good overall integrity and high stiffness of the framework bridge, this study proposes a reverse arch framework bridge structure designed for deep-sea sediment soft soil geological sites. To obtain a reasonable structural form, stress and deformation patterns of the reverse arch foundation framework bridge were analyzed. Based on this, the mechanical properties of different arch axis bottom plates of the reverse arch framework structure were compared. Three types of reverse arch foundation framework bridge models were established using ABAQUS finite element software. Under the influence of structural self-weight and roadway loads, principal stresses, settlement, and deformation data were calculated. The results show that the maximum principal tensile stress occurs on the upper surface of the top plate connected to the bridge pier. The maximum vertical deformation occurs in the middle of the top plate

* 收稿日期: 2023-11-13; 修订日期: 2024-05-06

作者简介: 王煌森(2000—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向为桥梁工程, (E-mail)2022220435@jou.edu.cn.

通信作者: 李家伟(1975—), 男, 江苏连云港人, 研究员级高级工程师, 研究方向为道路桥梁工程, (E-mail)2018000046@jou.edu.cn.

span. The maximum longitudinal deformation occurs in the plastic hinge zone of the pier top. Under identical conditions, the maximum principal tensile stress, vertical, and longitudinal deformations all occur in the circular arch axis bridge, at 2.272 MPa, 2.428 mm, and 0.131 mm respectively. However, the maximum settlement appears in the parabolic arch axis bridge, at 6.913 mm. Therefore, the stress performance of the catenary arch axis bridge is relatively reasonable, with smaller structural deformations, making it more suitable for later application and promotion. Based on this, it is recommended to prioritize the use of the catenary arch axis bottom plate for the reverse arch foundation framework bridge during structural design, considering the structural stress and deformation characteristics.

Key words: reverse arch foundation; frame bridges; finite element method; stress; deformation; displacement

0 引言

连云港海积平原地区软土具有分布广、埋深浅(平均1~2 m)、厚度大(最厚30 m)的特点^[1]。该软土层上一般具有约2 m厚度的地表硬壳层,该硬壳层虽然不具备作为桥梁结构的地基持力层,但其所具备的一定承载能力可以通过基础结构的优化得以利用。

在深厚海相淤泥软土沉积区建设桥梁,常规中小跨径桥梁设计均需要设置桩基础,使桩基穿透软土形成摩擦桩、端承桩或端承摩擦桩,利用桩侧摩擦阻力和桩底反力来支承桥梁结构自重以及运营荷载作用^[2]。在软土层深厚且其下基岩埋置深度较大的地质条件下,桩基础的造价必然巨大^[3],且施工难度较大^[4],成桩质量难以控制^[5]。故在软土地基上建造的中小跨径桥梁很大一部分会选择框架桥设计,这主要是因为软土地质提供的支撑条件有限,而框架桥结构整体性好、刚度大,并能有效分散载荷,减少地基沉降^[6-7]。因此,对于软土地质条件,框架桥不仅能够保证结构安全,还能降低工程造价。在框架桥基础设计中,可以借鉴拱结构的受力特性,通过倒置拱结构来构建框架桥的基础。拱结构由于其抗压能力强,能够充分利用地表硬壳层和软土层的持力作用,在中小跨径桥梁中替代桩基础结构,已在连云港市某场地得到应用实践。该反拱基础框架桥拥有整体性好、刚度大、施工简便、造价低廉等优点^[8-9]。

反拱底板目前主要应用于水垫塘^[10]、水闸^[11]场景,而反拱基础框架桥的研究相对较少。杨俊华等^[8]将钢筋混凝土片石复合基础应用于软土地基处理,设计成贴合河道断面的弧形筏板(反拱底板),该设计避免了换土处理或使用桩基础。此外,成桥检

测表明,该弧形筏板基础的小桥受力性能良好。田安国等^[9]在软土地区通过拱肋与片石将桥梁基础设计成与河床断面类似的反拱形状,并采用钢筋混凝土浇筑成肋板形式来提高桥梁刚度和整体性,有效降低了地基不均匀沉降引起的不利内力,改善了结构的工作性能,并优化了基础与上部结构的协同作用。此类基础应用于连云港市的3座桥梁均呈现出良好的受力性能,未发现病害。由于国内外相关研究较少,目前缺乏对反拱基础框架桥力学特性的理论基础研究。

在既有反拱基础框架桥的应用中,反拱底板仅采用圆弧拱轴线,且对结构的力学特性尚未进行深入分析研究,同时,圆弧拱轴线与其他常规拱轴线的力学性能对比分析也尚待研究。为此,本文以某软土地区的反拱基础框架桥为背景,采用ABAQUS有限元软件构建圆弧拱轴线反拱基础框架桥模型,分析研究其应力与变形规律。在此基础上,构建3种不同拱轴线底板的反拱基础框架桥模型,分析研究圆弧形、悬链线、抛物线拱轴线反拱基础框架桥的力学性能差异,为此类桥梁的后期设计应用提供参考。

1 有限元建模

1.1 结构模型

本文依托某软土地区的反拱基础框架桥设计,结构模型由顶板、薄壁桥墩、反拱底板3部分组成,采用刚接形成整体框架结构,并在薄壁桥墩与顶、底板结合处作加腋处理。结构总宽7 m、总长20 m、按6 m+8 m+6 m的3跨组合进行布置,其中顶板厚0.35 m、薄壁桥墩厚0.30 m、底板厚0.40 m,反拱底板相对于顶板的矢高为3.20 m。

1.2 基本假设与简化

(1) 反拱基础框架桥为钢筋混凝土结构,采用 ABAQUS 有限元软件中的整体式模型,混凝土材料为 C40,将 HRB400 钢筋通过力学性能等效方法提高组合材料的弹性模量来实现对整体结构的贡献^[12]。

(2) 仅考虑结构自重和车道荷载,忽略底板过水截面的水荷载和水浮力作用^[13]。

(3) ABAQUS 有限元软件仅分析静力效应,不考虑时间效应和动力效应。

(4) ABAQUS 有限元软件分析时将地弹簧竖向连接在底板底部^[14]。

1.3 荷载取值

作用在结构上的荷载主要包括:结构自重 G_1 、车道荷载 Q 。各荷载的分布及数值如图 1 和表 1 所示。取值标准参照《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)确定。

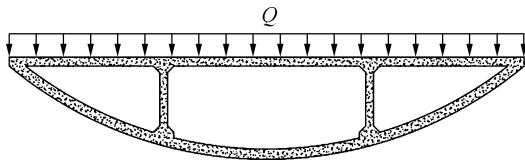


图 1 框架桥荷载分布示意图

Fig. 1 Diagram of loads acting on the frame bridge

表 1 荷载组合及其取值

Table 1 Load combination and its value

荷载名称	荷载取值
结构自重 G_1	有限元模型自动计算,钢筋混凝土自重取 26 kN/m^3
车道荷载 Q	根据规范,车道荷载 $Q=276+(2 \times 3 \times 20 \times 10.5) = 1\ 536(\text{kN})$

1.4 模型建立

反拱基础框架桥采用三维实体单元建模,网格划分采用结构网格,其单元边长为 0.2 m 。该建模采用 C3D8R 单元,其在弯曲荷载下不易发生剪切自锁现象,具有良好的单元特性及对曲线边界的适应性,网格存在扭曲变形时,能保证分析的精度,对变形的求解结果比较精确。模型网格划分见图 2。



图 2 模型网格划分

Fig. 2 Meshing of model

在车道荷载 Q + 结构自重 G_1 的荷载组合中,框架桥仅受到竖向荷载作用,桥体底板的边界条件采用地弹簧。模型边界约束如图 3 所示。

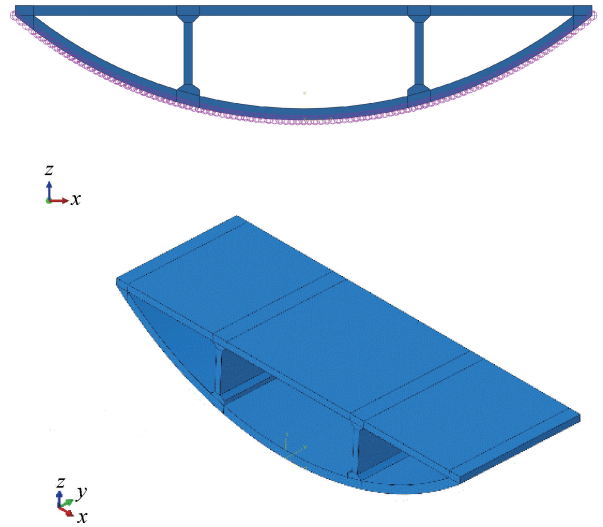


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculating model

2 计算结果分析

2.1 车道荷载作用下圆弧拱轴线反拱基础框架桥力学性能分析

2.1.1 应力结果分析 该数值模拟取桥梁模型纵向中轴线的的第一主应力进行分析,以车道荷载 + 结构自重作为典型作用组合。反拱基础框架桥的应力状态呈现对称性,故分析时取右半部桥体结构为研究对象,以加载前的中跨跨中顶板上表面位置为坐标原点 O ,以水平向右为 x 轴正向、垂直向上为 y 轴正向,描述顶板和底板的应力分布;以加载前的墩顶顶板上表面位置为坐标原点 O ,以垂直向下为 x 轴正向,水平向右为 y 轴正向,描述薄壁桥墩的应力分布。第一主应力分布和计算结果见图 4、图 5 和表 2。

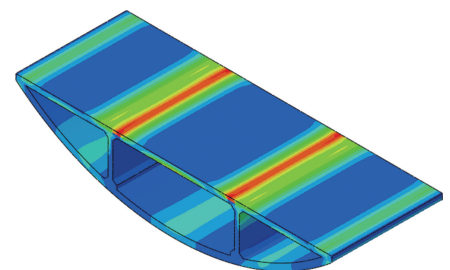
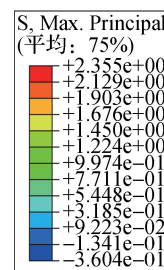


图 4 第一主应力云图

Fig. 4 First principal stress nephogram

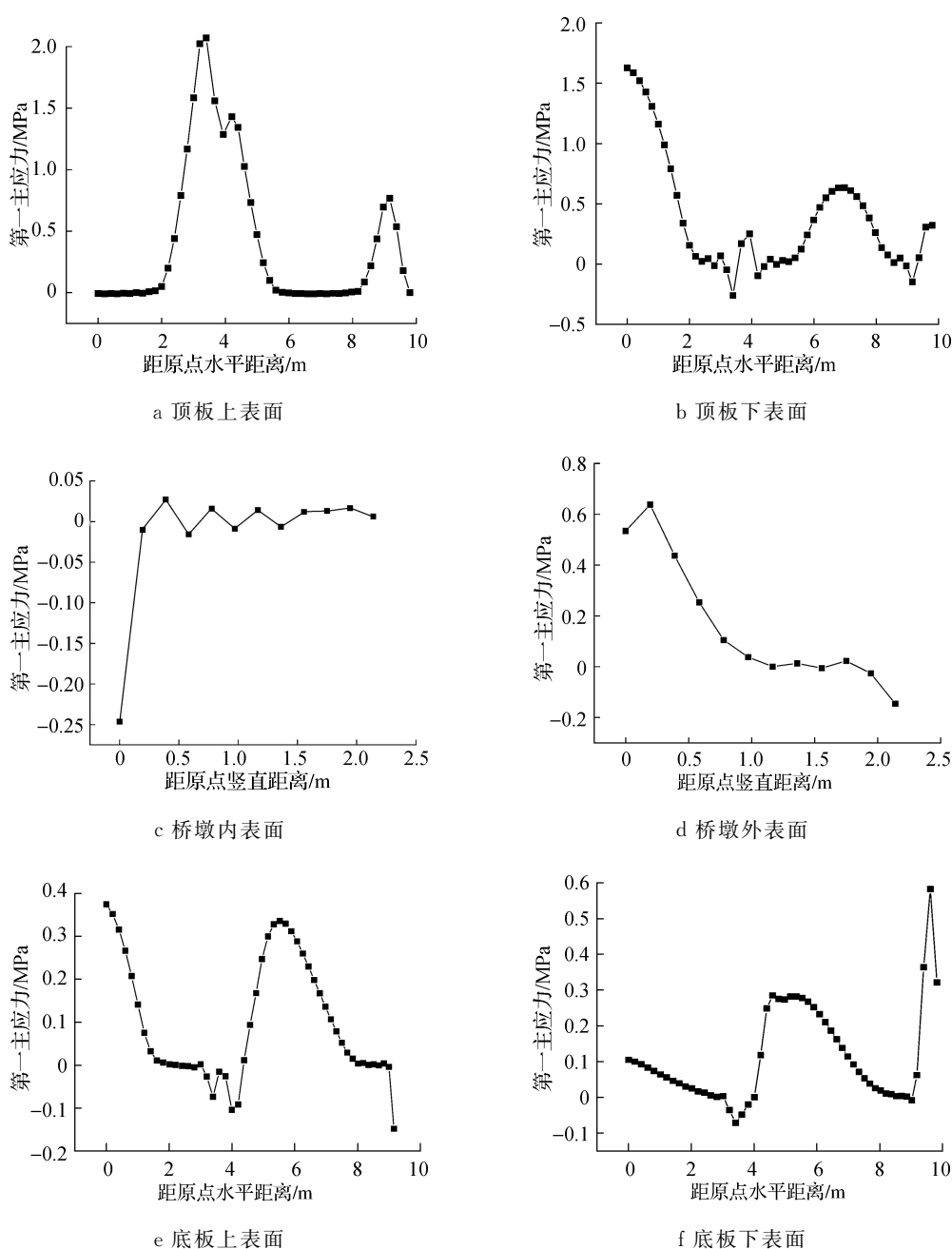


图5 第一主应力曲线

Fig. 5 First principal stress curve

表2 各构件第一主应力

Table 2 First principal stress of each component

主应力	顶板		桥墩		底板	
	上表面	下表面	内表面	外表面	上表面	下表面
最大主拉应力/MPa	2.272	1.641	0.027	0.638	0.382	0.582
最大主压应力/MPa	-0.010	-0.260	-0.246	-0.146	-0.148	-0.071

由图4可知,桥梁模型横桥向的应力分布较均匀,故以纵桥向中轴线的第—主应力进行分析具有代表性。由图5、表2可知,最大主拉应力出现在顶

板和桥墩连接处的顶板上表面位置,为2.272 MPa;最大主压应力出现在顶板和桥墩连接处的顶板下表面位置,为-0.260 MPa。

由图 5a,5b 和表 2 可知,顶板上表面在取右半部桥体结构的范围内出现两个拉应力峰值,分别是位于 $x=3.40\text{ m}$ 处的 2.072 MPa , $x=9.16\text{ m}$ 处的 0.767 MPa ;顶板上表面的压应力较小且分布均匀,最大的压应力为 -0.010 MPa 。顶板下表面的最大拉应力位于 $x=0\text{ m}$ 的位置,为 1.641 MPa ,且在边跨的跨中位置也出现较大拉应力;顶板下表面的最大主压应力是位于 $x=3.40\text{ m}$ 处的 -0.260 MPa 。

由图 5c,5d 和表 2 可知,桥墩内表面的拉应力均较小,越往 x 轴正向越趋于平缓,最大的主拉应力为 0.027 MPa ;桥墩内表面的最大压应力位于与顶板连接处,为 -0.246 MPa 。桥墩外表面的最大拉应力位于 $x=0.19\text{ m}$ 处的 0.638 MPa ,并随着 x 轴正向 1 m 的范围内有急速下降的趋势;桥墩外表面的最大压应力位于 $x=2.14\text{ m}$ 处的 -0.146 MPa 。

由图 5e,5f 和表 2 可知,底板上表面的拉应力分别在中跨和边跨的跨中位置,分别为 0.382 MPa 和 0.336 MPa ;底板上表面的最大主压应力为 -0.148 MPa 。底板下表面的最大主拉应力为 0.582 MPa ;最大主压应力为 -0.071 MPa 。

综上所述,可知在车道荷载+结构自重的作用下,反拱基础框架桥的主应力分布呈现出一定变化规律,也从侧面验证了所建立的模型的受力准确性。表面主拉应力在车道荷载+结构自重的组合作用下都相对较大,表面主压应力均较小。当车道荷载作用于顶板上表面时,顶板各跨跨中部分属于正弯矩区段,而顶板和桥墩连接处及端部属于负弯矩区段。

这导致顶板正弯矩区段的上表面受压、下表面受拉,而顶板负弯矩区段的上表面受拉、下表面受压。由于中跨跨径大于边跨,根据力学平衡条件,桥墩会承受部分弯矩以保持顶板和桥墩连接处的内力平衡,使得桥墩内表面受压、外表面受拉。底板下表面承受地弹簧提供的支反力,上表面与桥墩、顶板端部连接处承受车道荷载及结构自重作用,故底板呈现两面受压的状态,底板为了抑制其纵向变形,其内力主要产生拉应力。底板各跨跨中处,上表面没有竖向荷载作用,其拉应力更大。

2.1.2 竖向位移结果分析 该数值模拟采用桥梁顶、底板的竖向位移(包含沉降和变形两部分)进行分析,由于该桥型竖向位移呈左右对称,故取右半部桥体结构为研究对象。以加载前的顶板中跨跨中位置为坐标原点,以水平向右为 x 轴正向、垂直向上为 y 轴正向,描述桥体结构整体的沉降和构件的变形特征;竖向位移云图和计算结果见图 6、图 7 和表 3。

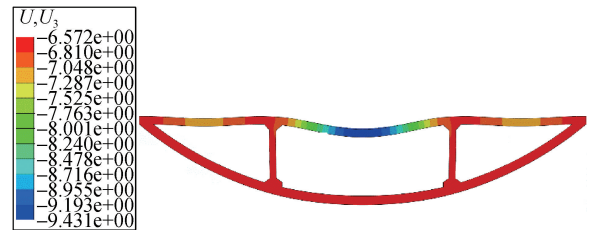


图 6 竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement nephogram

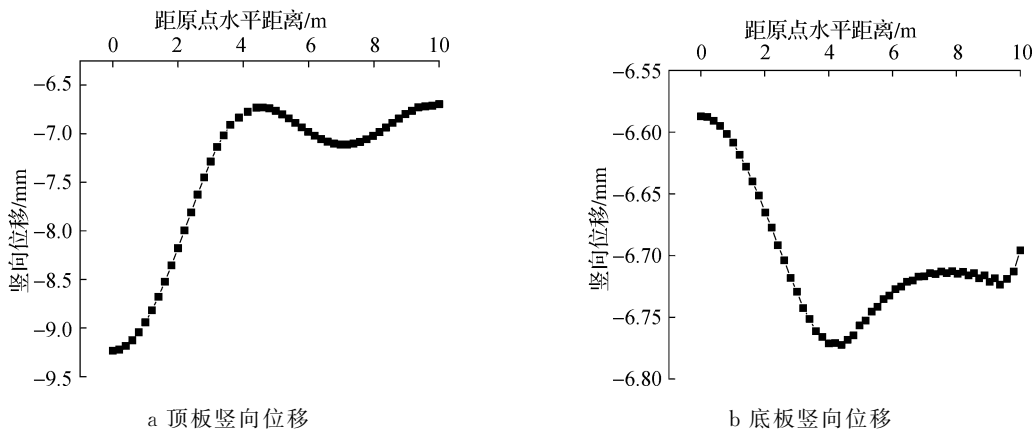


图 7 竖向位移曲线

Fig. 7 Vertical displacement curve

为更直观地反映框架桥的竖向变形,竖向位移云图变形系数放大了 200 倍显示。由图 6、图 7 和表 3

可知,顶板、底板的最大竖向变形均位于 $x=0\text{ m}$ 处,变形分别为 -2.428 mm 和 0.184 mm 。在车道荷载

+结构自重的作用下:顶板中跨出现明显的下挠变形,边跨的竖向变形仅是中跨的1/8;整个底板除受到桥墩传递的局部竖向内力外,还受到地弹簧提供的支反力,故底板中跨和边跨跨中均受弯发生上挠变

形,但变形量较顶板小。桥墩作为受压结构具有足够的强度和刚度,墩顶总位移为 -6.804 mm ,墩底位移 -6.771 mm 计作沉降量,可得桥墩发生了 0.033 mm 的弹塑性压缩变形。结构整体沉降为 -6.771 mm 。

表3 结构竖向位移数据

Table 3 Vertical displacement data of structure

结构变形响应	顶板				桥墩	底板			
	中跨跨中	墩顶	边跨跨中	桥台		中跨跨中	墩底	边跨跨中	桥台
x 轴位置/m	0	4.00	7.18	10.00	4.00	0	4.00	7.87	10.00
总位移/mm	-9.232	-6.804	-7.112	-6.696	-6.804	-6.587	-6.771	-6.712	-6.696
沉降/mm	-6.804	-6.804	-6.804	-6.804	-6.771	-6.771	-6.771	-6.771	-6.771
变形/mm	-2.428	0	0.308	0.108	-0.033	0.184	0	0.059	0.075

综上所述,反拱基础框架桥顶板的跨径越大,下挠变形幅度越明显。其底板的竖向变形幅度相对顶板小很多,可见反拱底板具有更大的竖向刚度。桥墩在加载情况下产生微小弹塑性变形,桥梁整体结构基本处于均匀沉降,在荷载和地弹簧反力共同作用下,顶板和底板发生相反方向的挠度变形,同一竖向位置的位移差变大。反拱底板和顶板、薄壁桥墩

构成三角稳固、耐压结构,使得边跨具有更大的整体刚度,位移差减小。

2.1.3 纵向变形结果分析 该数值模拟取桥梁右边薄壁桥墩为研究对象,以加载前的桥墩墩顶位置为坐标原点,以水平向右为 x 轴正向,垂直向下为 y 轴正向,描述薄壁桥墩的纵向变形特征。纵向变形云图和计算结果见图8、图9。

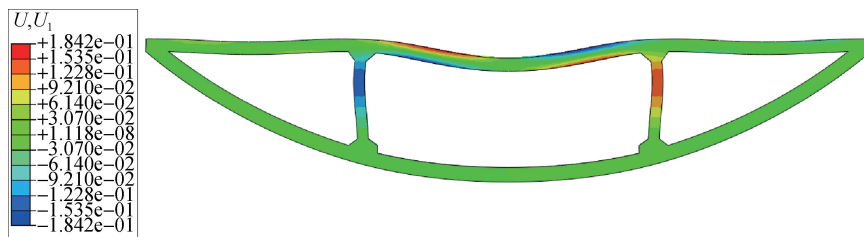


图8 纵向变形云图

Fig. 8 Longitudinal deformation nephogram

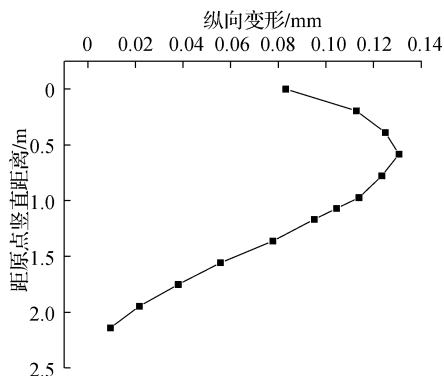


图9 桥墩纵向变形曲线

Fig. 9 Longitudinal deformation curve of pier

同样将纵向变形云图变形系数放大200倍显示。由图8和图9可知,框架桥最大纵向变形出现在桥墩上,均为向外侧凸起,通过对桥墩的应力分析

可知墩顶存在弯矩,这导致桥墩呈现弯曲趋势。特别是在墩顶潜在塑性铰区范围,这种变形现象尤为集中,最大的纵向变形量为 0.131 mm 。顶板和底板因水平受力平衡且水平刚度较大,故其纵向变形较小。

2.2 3种拱轴线反拱基础框架桥力学性能分析

通过ABAQUS有限元软件分别建立圆弧拱轴线、悬链拱轴线、抛物拱轴线3种反拱底板基础框架桥的模型,研究分析其对桥体力学特性的影响。本节有限元模型材料的参数和边界条件与“2.1”节相同。

3种拱轴线的反拱基础框架桥,均以“2.1”节圆弧反拱基础框架桥的构造尺寸为基础,保持矢跨比、荷载组合及其取值、模型计算边界约束不变。3种反拱轴线方程见表4。

表 4 拱轴线方程

Table 4 Arch axis equation

名称	拱轴线方程
圆弧拱	$y = -\sqrt{15.652^2 - x^2}, x \in (-10, 10)$
悬链拱	$y = 14.38145 \left(\cosh\left(\frac{x}{14.38145}\right) - 1 \right), x \in (-10, 10)$
抛物拱	$y = 0.036x^2, x \in (-10, 10)$

2.2.1 应力结果分析 该数值模拟取 3 种拱轴线反拱基础框架桥的第一主应力为研究对象。因其第一主应力变化规律相似且计算结果具有对称性,故分析时取右半部桥体结构进行研究,设置坐标轴同“2.1.1”节,其第一主应力分布和计算结果见图 10 和表 5~表 7。

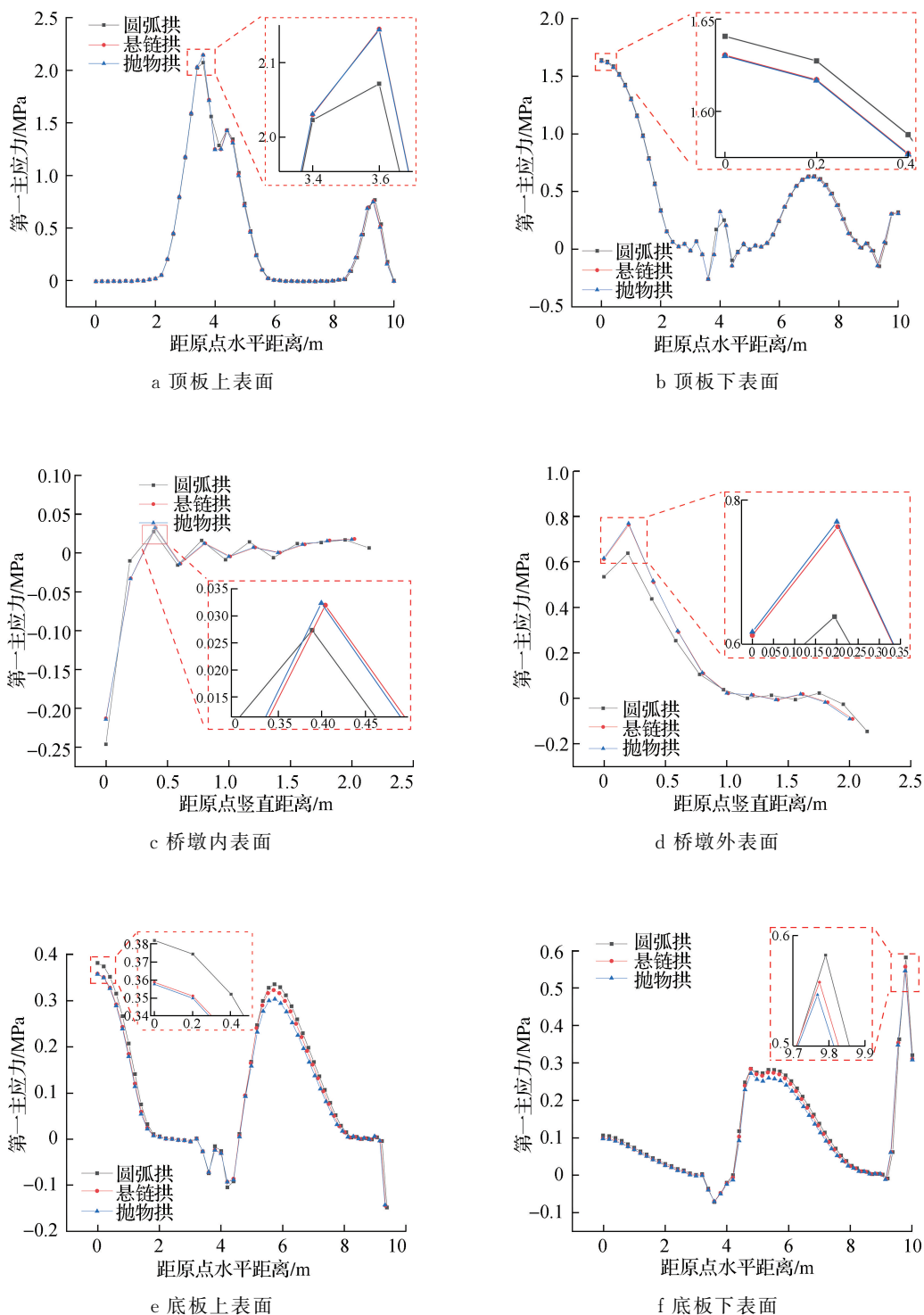


图 10 不同拱轴线的第 一主应力曲线

Fig. 10 First principal stress curve of different arch axes

表 5 顶板第一主应力

Table 5 First principal stress of top plate

名称	位置	最大主拉应力/MPa	最大主压应力/MPa
圆弧拱	上表面	2.272	-0.010
	下表面	1.641	-0.260
悬链拱	上表面	2.145	-0.010
	下表面	1.631	-0.260
抛物拱	上表面	2.144	-0.010
	下表面	1.630	-0.259

表 6 桥墩第一主应力

Table 6 First principal stress of pier

名称	位置	最大主拉应力/MPa	最大主压应力/MPa
圆弧拱	内表面	0.027	-0.246
	外表面	0.638	-0.146
悬链拱	内表面	0.032	-0.213
	外表面	0.763	-0.091
抛物拱	内表面	0.032	-0.214
	外表面	0.770	-0.091

表 7 底板第一主应力

Table 7 First principal stress of bottom plate

名称	位置	最大主拉应力/MPa	最大主压应力/MPa
圆弧拱	上表面	0.382	-0.147
	下表面	0.582	-0.071
悬链拱	上表面	0.359	-0.143
	下表面	0.557	-0.069
抛物拱	上表面	0.357	-0.143
	下表面	0.546	-0.070

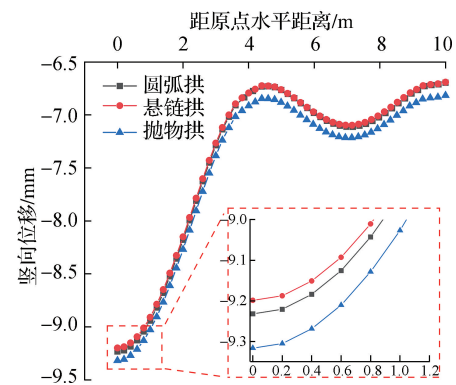
由图 10a, 10b 和表 5 可知, 3 种拱轴线桥对应的顶板上表面最大主拉应力的位置相同, 分别为 2.272, 2.145, 2.144 MPa, 最大主压应力均为 -0.010 MPa; 顶板下表面的最大主拉应力均位于 $x=0$ m 处, 分别为 1.641, 1.631, 1.630 MPa, 最大主压应力基本一致。

由图 10c, 10d 和表 6 可知, 3 种拱轴线桥对应的桥墩内表面最大主拉应力分别为 0.027, 0.032, 0.032 MPa, 最大主压应力分别为 -0.246, -0.213, -0.214 MPa; 外表面的最大主拉应力分别为 0.638, 0.763, 0.770 MPa, 最大主压应力分别为 -0.146, -0.091, -0.091 MPa。

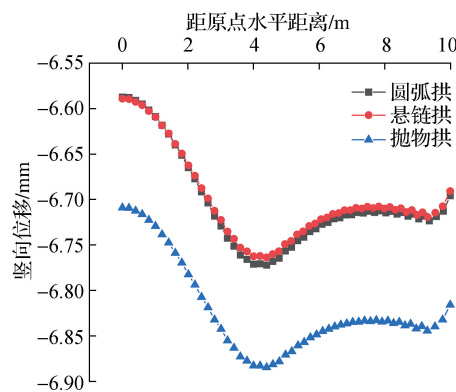
由图 10e, 10f 和表 7 可知, 3 种拱轴线桥对应的底板上表面最大主拉应力均位于 $x=0$ m 处, 分别为 0.382, 0.359, 0.357 MPa, 最大主压应力分别为 -0.147, -0.143, -0.143 MPa; 底板下表面的最大主拉应力均位于 $x=9.7$ m 处, 分别为 0.582, 0.557, 0.546 MPa, 最大主压应力分别为 -0.071, -0.069, -0.070 MPa。

综上所述, 3 种拱轴线桥对应的顶板, 其上、下表面第一主应力曲线交错重叠, 应力变化趋势一致, 未出现差值较大的应力波动, 应力峰值出现在相同的位置; 顶板的主压应力虽然相近, 但主拉应力以圆弧拱轴线对应的最大。3 种拱轴线桥对应的桥墩, 其内、外表面的主应力主要集中在墩顶的塑性较区范围; 外表面的主拉应力均较内表面大很多, 而主压应力均较内表面差别不大; 主拉应力的最小值和主压应力的最大值均在圆弧拱轴线桥出现。3 种拱轴线桥对应的底板, 其中跨和边跨跨中部分均呈现受拉状态, 且由于底板的上挠变形, 其上表面的主拉应力均大于下表面; 而底板上、下表面的主压应力相近, 且圆弧拱轴线桥的主拉应力最大, 对底板的受力较不利。

2.2.2 竖向位移结果分析 该数值模拟取 3 种拱轴线反拱基础框架桥的顶、底板竖向位移(包含沉降和变形两部分)进行分析。由于其竖向位移变化规律相似且计算结果具有对称性, 故分析时取右半部桥体结构进行研究, 设置坐标轴同“2.1.2”节。竖向位移计算结果见图 11 和表 8。



a 顶板竖向位移曲线



b 底板竖向位移曲线

图 11 不同拱轴线的竖向位移曲线

Fig. 11 Vertical displacement curve of different arch axes

表 8 不同拱轴线的结构竖向位移数据

Table 8 Vertical displacement data of different arch axes structures

不同拱轴线桥 变形响应		顶板				桥墩	底板			
		中跨跨中	墩顶	边跨跨中	桥台		中跨跨中	墩底	边跨跨中	桥台
圆弧拱	x 轴位置/m	0	4.00	7.18	10.00	4.00	0	4.00	7.87	10.00
	总位移/mm	-9.232	-6.804	-7.112	-6.696	-6.804	-6.587	-6.771	-6.712	-6.696
	沉降/mm	-6.804	-6.804	-6.804	-6.804	-6.771	-6.771	-6.771	-6.771	-6.771
	变形/mm	-2.428	0	-0.308	0.108	-0.033	0.184	0	0.059	0.075
悬链拱	x 轴位置/m	0	4.00	7.15	10.00	4.00	0	4.00	7.82	10.00
	总位移/mm	-9.199	-6.793	-7.097	-6.691	-6.793	-6.589	-6.762	-6.708	-6.691
	沉降/mm	-6.793	-6.793	-6.793	-6.793	-6.762	-6.762	-6.762	-6.762	-6.762
	变形/mm	-2.406	0	-0.304	0.102	-0.031	0.173	0	0.054	0.071
抛物拱	x 轴位置/m	0	4.00	7.15	10.00	4.00	0	4.00	7.75	10.00
	总位移/mm	-9.317	-6.913	-7.215	-6.816	-6.913	-6.709	-6.883	-6.833	-6.816
	沉降/mm	-6.913	-6.913	-6.913	-6.913	-6.883	-6.883	-6.883	-6.883	-6.883
	变形/mm	-2.404	0	-0.302	0.097	-0.030	0.174	0	0.050	0.067

由图 11 和表 8 可以看出,3 种拱轴线桥的最大竖向变形均位于顶板中跨跨中($x=0$ m)位置,其变形分别为-2.428,-2.406,-2.404 mm,在相同荷载的作用下,抛物拱轴线桥整体结构的总位移量较大,而圆弧拱轴线桥顶板和底板的竖向变形均较大。3 种拱轴线桥桥墩发生的弹塑性压缩变形量基本一致,结构的整体沉降分别为-6.771,-6.762,-6.883 mm。

综上所述,3 种拱轴线桥的顶、底板竖向位移变化规律一致。但抛物拱轴线桥因其底板与地弹簧接触面的竖向分力更大,故其沉降量最大,总竖向位移也最大,说明在相同荷载作用下,不同的拱轴线底板对沉降的影响是有差异的;圆弧拱轴线桥的竖向变形量最大,故其竖向变形刚度较其他两类拱轴线桥更小;悬链拱轴线桥的沉降最小,故其底板受到的竖向分力更小。

2.2.3 纵向变形结果分析 数值模拟取 3 种拱轴线反拱基础框架桥的薄壁桥墩纵向变形进行分析。由于纵向变形规律相似,故设置坐标轴与“2.1.3”节相同。不同拱轴线的桥墩纵向变形曲线和计算结果如图 12 和表 9 所示。

由图 12 和表 9 可以看出,3 种拱轴线桥桥墩的纵向变形变化趋势基本一致,在墩顶处均发生约 0.08 mm 的纵向变形,最大纵向变形位于 $y=0.6$ m 处,分别为 0.131,0.119,0.118 mm。当 $y>0.6$ m 时,纵向变形迅速减小。通过对比可以发现,桥墩的纵向变形,圆弧拱轴线桥最大,而悬链拱和抛物拱轴线桥均较小,这说明圆弧拱轴线桥的纵向抗弯刚度较小。

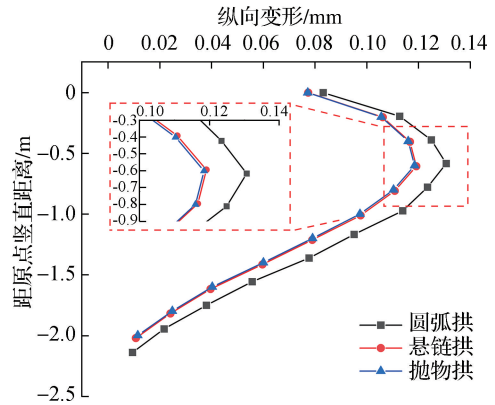


图 12 不同拱轴线的桥墩纵向变形曲线

Fig. 12 Pier longitudinal deformation curve of different arch axes

表 9 不同拱轴线的桥墩纵向变形

Table 9 Pier longitudinal deformation of different arch axes

名称	最大纵向变形/mm	最小纵向变形/mm
圆弧拱	0.131	0.009
悬链拱	0.119	0.011
抛物拱	0.118	0.012

3 结论

基于 ABAQUS 有限元软件,在相同车道荷载和结构自重的作用下,以圆弧拱为基础,描述其各构件的第一主应力和变形的特点,从而引申分析 3 种不同拱轴线反拱基础框架桥的应力、沉降、变形特性差异,主要得到以下结论。

(1) 反拱基础框架桥最大主拉应力发生在顶板和桥墩连接处的顶板上表面,最大主压应力发生在

顶板和桥墩连接处的顶板下表面;最大竖向变形发生在顶板中跨跨中;最大纵向变形发生在墩顶塑性铰区范围内。

(2) 在相同条件下,圆弧拱轴线桥除桥墩拉应力较小外,其他构件应力均较大,容易出现更大变形。抛物拱轴线桥的桥墩拉应力较大,且沉降量偏大。相比之下,悬链拱轴线的受力性能更加合理,且具有较优秀的抗变形能力。

(3) 在进行结构设计时,根据结构受力和变形特征宜优先考虑使用悬链拱轴线底板的反拱基础框架桥。

参考文献:

- [1] 庄潇轩,宗钟凌,黄蕴晗,等.海相软土地区 GFRP 套管压力注浆螺旋钢管桩抗拔性能试验研究[J].江苏海洋大学学报(自然科学版),2021,30(4):55-59.
- [2] 赵妮妮.运营期深淤软土区桥梁桩基受力性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.
- [3] 赵奕皓,梁威,王超.软土地基上桩基础多方案经济指标的探讨[J].工程建设与设计,2023(5):3-6.
- [4] 王德华.软土地基铁路桥型选择和桥路比较分析[J].铁道勘察,2014,40(1):30-33.
- [5] 郑妙芳.软土地基桩基质量问题分析及处理[J].福建地质,2023,42(1):62-69.
- [6] 李鹏浩.框架桥在土压力下的力学性能分析[J].四川水泥,2018,259(3):28.
- [7] 夏润禾.高速铁路软土地基框架桥涵施工技术研究[J].高速铁路技术,2011,2(4):48-51.
- [8] 杨俊华,田安国.钢筋混凝土片石复合基础在软土地基处理中的应用[J].建筑技术,2002(3):193-203.
- [9] 田安国,姚锦文.拱肋复合基础在软土地区中小跨径桥梁中的应用[J].公路,2005(9):37-40.
- [10] 徐建荣,彭育,辜晋德,等.平底型与反拱型水垫塘动水荷载对比试验研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):131-135.
- [11] 黄冰强.水闸反拱底板有限元法分析及效果[J].水科学与工程技术,2022(4):34-36.
- [12] 陈劲超.装配式空心板桥破坏机理与加固技术研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [13] 刘伟,黄福云,罗英,等.软土地基的大跨高深框架桥受力性能研究[J].公路交通科技,2022,39(1):88-95.
- [14] 刘双臣,洪晓莉,聂建立,等.模态移频法的仿真研究[J].环境技术,2019,37(6):124-128.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:张昌保)

著作权使用声明

为适应我国信息化建设发展的需要,有力地促进科研学术信息的交流和信息资源的开发利用,扩展广大作者的学术交流渠道和促使科研成果的迅速转化,本刊已先后加入了《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》、由国家科技部组织实施的原中国科技信息研究所万方数据网络中心具体负责运作的“万方数据网”、由科学技术部西南信息中心所创办的大型综合性《中文科技期刊数据库》,并成为上述《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》《中国学术期刊综合评价数据库》《中国核心期刊(遴选)数据库》以及“万方数据——数字化期刊群”《中文科技期刊数据库》全文收录期刊,它们将以网络和光盘等不同的方式向社会提供文献信息服务。凡向本刊所投稿件,稿件发表后,所有署名作者自愿将稿件的出版权(包括但不限于纸版、复制、汇编、发行、信息网络传播等)转让给本刊,同意稿件进入本刊所加入的文献数据库,各数据库的著作权使用费与文章评审费相抵,不再另行支付。如有不同意者,请另投他刊或特别声明需另作处理。

《江苏海洋大学学报(自然科学版)》编辑部