

基于 Winkler 地基模型的箱涵结构分析研究

王虎军, 贺小卫

(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 针对基床系数现场试验测定困难, 箱涵结构计算时, 基床系数取值方法各异导致基底弹簧刚度不同, 从而引起计算结果相差较大问题, 基于 Winkler 地基模型假定, 总结提出 3 种不同的弹簧刚度计算方法, 以实例箱涵结构为依托, 采用有限元分析软件对其在不同弹簧刚度取值方法下的内力及地基反力进行分析。结果表明, 采用 3 种不同的弹簧刚度计算方法, 箱涵顶板及侧墙控制弯矩差异较小, 均可指导设计, 底板控制弯矩及基底反力差异较大, 建议采用规范查表法计算确定。分析结论可为类似工程设计及计算提供参考。

关键词: 基床系数; Winkler 地基; 弹簧刚度; 规范查表法

中图分类号: TU992.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0231-04

Analysis and Study of Box Culvert Structure Based on Winkler Foundation Model

WANG Hujun, HE Xiaowei

(Xi'an Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: In view of the difficulty in on-site test determination of the base bed coefficient, when calculating the box culvert structure, the different methods for obtaining the base bed coefficient lead to different stiffness of the base spring, thus causing significant differences in the calculation results. Based on the assumption of the Winkler foundation model, three different spring stiffness calculation methods are summarized and proposed. Relying on the example of box culvert structure, the finite element analysis software is used to analyze its internal forces and foundation reaction forces under different spring stiffness value methods. The results show that three different spring stiffness calculation methods are adopted, and the differences in the control bending moments of the roof and side walls of the box culvert are relatively small, all of which can guide the design. The control bending moment of the base plate and the reaction force of the base vary greatly. It is recommended to use the standard table lookup method for calculation and determination. The analysis conclusion can provide reference for design and calculation of the similar projects.

Keywords: base bed coefficient; Winkler foundation; spring stiffness; standard table lookup method

0 引言

箱涵结构作为一种排水或下穿通道构筑物, 在市政和公路中得到广泛应用^[1]。按其使用功能大致可分为过水箱涵、行车箱涵及箱涵内过水箱涵顶行车等几种形式, 一般为单孔或双孔。目前国内规范主要对箱涵设计时的荷载取值、截面承载力计算等进行规定^[2], 而对结构计算模式、边界约束条件未做说明。

实践中常用的计算方法为沿箱涵纵向取 1 m 长度, 按照闭合框架计算^[3], 箱涵底板与基础之间的边界约束按照 Winkler 地基模型进行设定, 即假定箱涵

底板为置于 Winkler 地基上的弹性基础梁^[4], 通过在底板均匀设置竖向受压弹簧进行模拟计算。受压弹簧刚度的合理选取对框架内力计算结果的精确性及可靠性起重要作用。本文主要探讨弹簧刚度的不同取值方法, 以及对箱涵内力和地基反力的影响。

1 弹簧刚度的取值

1.1 基床系数法

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 及《工程地质手册》(第五版) 等采用基准基床系数来描述荷载与基础沉降的关系^[5-6], 其测定采用平板载荷试验, 方形承压板边长为 30 cm, 按照下式计算:

$$K_p = \frac{p}{s} \quad (1)$$

式中: p 取极限荷载的二分之一, kPa; s 为 p 作用下地

收稿日期: 2025-02-17

作者简介: 王虎军(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政桥涵设计工作。

基的沉降值, m 。

箱涵计算中,底板宽度远远大于承压板的尺寸,因此,需对基准基床系数进行修正,得到实际基础下的基床系数,按下式求解:

对于黏性土地基:

$$K_s = \frac{0.3}{B} \times K_v \tag{2}$$

对于砂土地基:

$$K_s = \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2 \times K_v \tag{3}$$

式中: B 为基础宽度; K_s 为实际基础下的基床系数。

然而,实际工程中,箱涵基础均具有一定埋深,测定基床系数需开挖大直径的探井。受场地条件及经济性等因素影响^[7],市政工程勘察报告中一般不提供岩土的基础系数,设计人员通过规范查表或采用 Terzaghi 经验公式计算得到基床系数。

(1) 规范查表

《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012)等规范给出基床系数的经验值范围,部分土质基床系数经验值见表1^[8]。

表1 基床系数经验值

岩土类别	状态/密实度	垂直基床系数 $K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$
新近沉积土	黏性土	软塑 5~15
		可塑 10~25
	粉土	稍密 12~18
		中密 10~25
黏性土		流塑 4~10
		软塑 8~22
		可塑 20~45
		硬塑 30~70
		坚硬 55~90
砂土		松散 5~15
		稍密 12~30
		中密 20~40
		密实 25~65

(2) Terzaghi 经验公式

国内外规范及部分学者结合现场试验数据与理论分析提出多种基床系数的经验公式^[9-10],其中“土力学之父”太沙基提出的经验公式^[11]较为权威,主要通过压缩模量及标贯锤击数进行换算,分别按下式求解:

黏性土地基的基床系数:

$$K = \frac{E_s}{B \times (1 - \nu^2)} \tag{4}$$

式中: K 为基床系数; E_s 为土的压缩模量; B 为基础宽度; ν 为泊松比(一般取 0.4~0.5)。

砂土地基的基床系数:

$$K = \frac{C \times N}{B} \tag{5}$$

式中: N 为标贯锤击数; C 为经验系数,通常取 $C=12\,000$ (当基础宽度 $B \leq 0.3\text{ m}$ 时)。当基础宽度 $B > 0.3\text{ m}$ 时,应考虑基础的尺寸效应,公式修正为:

$$K = \frac{3\,600 \times N}{B^2} \tag{6}$$

1.2 m 法

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)在计算弹性桩水平位移及作用效应^[12]时采用 m 法,即深度为 z 时,地基水平抗力系数 $C_z=mz$,竖向抗力系数为 $C_0=m_0z$,当 H 小于 10 m 时,取 $C_0=10m_0$ 。其中 m 为非岩石地基水平向抗力系数的比例系数, m_0 为非岩石地基竖向抗力系数的比例系数。

地基竖向抗力系数 C_0 表征为单位沉降所需竖向荷载,与基床系数的定义一致,可代替基床系数进行结构计算分析。求解 C_0 首先需明确 m_0 ,通常采用试验确定,无试验资料时,根据地基土的类别及状态,按表2查用。

表2 非岩石类土的 m_0 值

土的名称	$m_0/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-4})$
流塑黏土 $I_L > 1.0$, 软塑黏土 $1.0 \geq I_L > 0.75$	3 000~5 000
可塑黏土 $0.75 \geq I_L > 0.25$, 粉土, 稍密砂土	5 000~10 000
硬塑黏土 $0.25 \geq I_L > 0$, 细、中砂, 中密粉土	10 000~30 000
坚硬, 半坚硬黏土 $I_L \leq 0$, 密实粉土, 粗砂	20 000~30 000
角砾, 圆砾, 砾砂, 碎石, 卵石	30 000~80 000
密实卵石夹粗砂, 密实漂, 卵石	80 000~120 000

1.3 刚度换算

利用基床系数或地基竖向抗力系数计算弹簧刚度,当取单位长度箱涵框架结构时,弹簧刚度按照下式求解:

$$S = K(C_0) \times L \tag{7}$$

式中: S 为弹簧刚度; $K(C_0)$ 为考虑基础宽度修正后的基床系数或地基竖向抗力系数; L 为相邻单元的长度平均值。

2 工程实例

2.1 工程概况

某箱涵位于西安站北侧循环路,下穿规划铁路,属于重要的市政工程项目。项目地基土自上而下为:人工填土,第四系全新统冲洪积黄土状土、粉质黏土、砂类土及碎石类土,第四系上更新统风积黄土、冲积粉质黏土等。实例箱涵基底位于第四系全新统冲洪积黄土状土。

箱涵采用钢筋混凝土框架结构,总长 207.3 m,净高 5.4 m,净宽 12.4 m,断面从南至北布置为:0.85 m 检修道+11 m 机动车道+0.55 m 防撞墙。箱涵顶板厚 120 cm,底板厚 120 cm,侧墙厚 100 cm,顶板与侧墙设 150 cm×50 cm 倒角。

2.2 有限元建模分析

采用 MIDAS Civil 有限元软件进行箱涵数值模拟分析,验算弹簧刚度在不同取值方法下结构的受力情况。

(1) 模型建立

沿箱涵轴线方向取单位长度,采用闭合框架梁单元进行模拟,单元标准长度 0.5 m,箱涵底板底支撑采用仅受压弹簧单元模拟^[13]。箱涵主要荷载包括顶板顶铁路荷载、底板顶汽车荷载、覆土自重及侧土压力等。其中,铁路荷载采用 ZKH 图式,汽车荷载采用城-A 级。箱涵底边界条件采用仅受压弹簧单元模拟,同时单侧角点处限制结构水平位移。查阅工程实例地勘报告,箱涵基底位于第四系全新统冲洪积黄土状土层,状态为硬塑~可塑,压缩模量为 7.5 MPa,液性指数为 0.27。

采用上述不同弹簧刚度取值方法计算受压弹簧刚度,结果见表 3。

表 3 不同取值方法下弹簧刚度数值

取值方法	规范查表	Terzaghi 经验公式	m 法
弹簧刚度/(kN·m ⁻¹)	18 750	4 702	49 000

表 3 中,采用规范查表法时,基底土体处于可塑~硬塑,结合试验液性指数,基床系数取可塑上限与硬塑下限的平均值,即 37.5 MPa/m;采用 Terzaghi 经验公式计算时,泊松比取 0.45;采用 m 法时,根据液性指数内插,得 $m=9\ 800\text{ kN/m}^4$,基底埋深小于 10 m,取 $h=10\text{ m}$ 。

(2) 内力分析

实例箱涵在荷载基本组合下的弯矩分布如图 1 至图 3 所示。

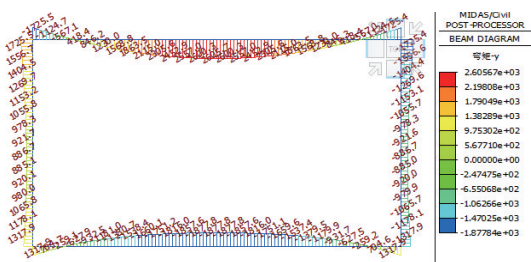


图 1 规范查表法箱涵弯矩(单位:kN·m)

由图 1 至图 3 可见,3 种弹簧刚度不同取值方法下,箱涵框架结构的弯矩分布规律基本一致。顶板

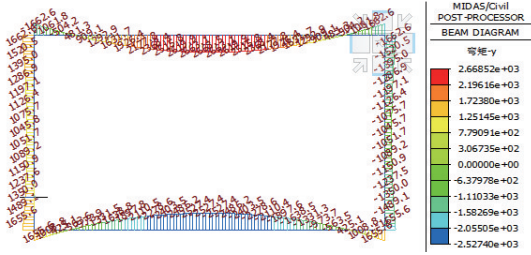


图 2 Terzaghi 经验公式法箱涵弯矩(单位:kN·m)

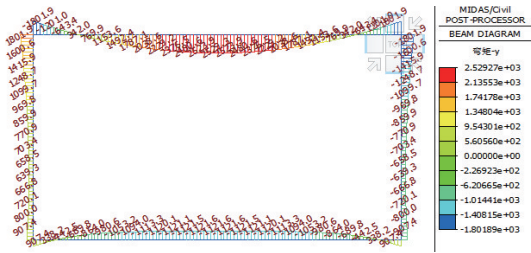


图 3 m 法箱涵弯矩(单位:kN·m)

最大正弯矩在跨中位置,最大负弯矩在两端角部;底板最大负弯矩在跨中位置,最大正弯矩在两端角部;侧墙最大弯矩在顶端角部,最小弯矩在跨中附近,弹簧刚度越大,越靠近底板。

提取箱涵结构关键部位截面弯矩,对 3 种弹簧刚度不同取值方法下弯矩绝对值进行对比,如图 4 至图 6 所示。

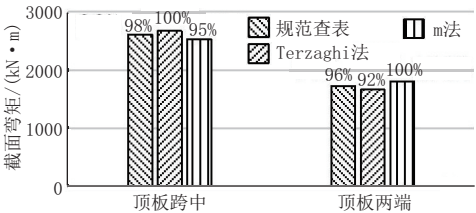


图 4 弹簧刚度不同取值方法下顶板弯矩对比

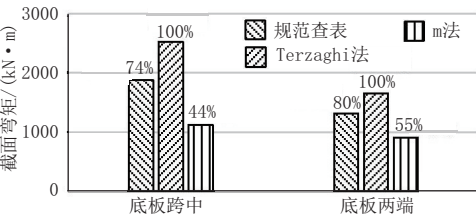


图 5 弹簧刚度不同取值方法下底板弯矩对比

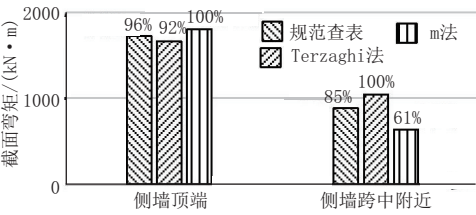


图 6 弹簧刚度不同取值方法下侧墙弯矩对比

由图 4 可见,顶板跨中最大正弯矩由 Terzaghi 经验公式法求得,为 2 668.5 kN·m,最小负弯矩由 m 法求得,为 2 529.3 kN·m,两者比例为 95%;两端最大负弯矩由 m 法求得,为 1 801.9 kN·m,最小负弯矩由

Terzaghi 经验公式法求得,为 $1\,662.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,两者比例为 92%。

由图 5 可见,底板跨中最大负弯矩由 Terzaghi 经验公式法求得,为 $-2\,527.4\text{ kN}\cdot\text{m}$,最小负弯矩由 m 法求得,为 $-1\,121.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,两者比例为 44.4%;两端最大正弯矩由 Terzaghi 经验公式法求得,为 $1\,655.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,最小正弯矩由 m 法求得,为 $907.4\text{ kN}\cdot\text{m}$,两者比例为 54.8%。

由图 6 可见,侧墙跨中附近最大弯矩由 Terzaghi 经验公式法求得,为 $1\,045.8\text{ kN}\cdot\text{m}$,最小弯矩由 m 法求得,为 $639.3\text{ kN}\cdot\text{m}$,两者比例为 61%。角点最大弯矩由 m 法求得,为 $1\,801.9\text{ kN}\cdot\text{m}$,最小弯矩由 Terzaghi 经验公式法求得,为 $1\,662.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,两者比例为 92%。

由以上分析可知,3 种不同弹簧刚度取值方法下,箱涵顶板及侧墙控制弯矩相差较小,均可指导结构设计;底板内力受弹簧刚度影响较大,设计时应考虑其影响。

(3) 反力分析

实例箱涵在荷载基本组合下的反力分布如图 7 至图 9 所示。

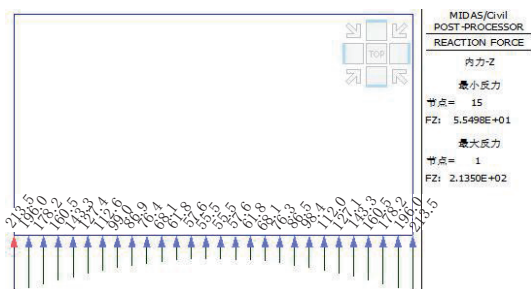


图 7 规范查表法箱涵反力(单位:kN)

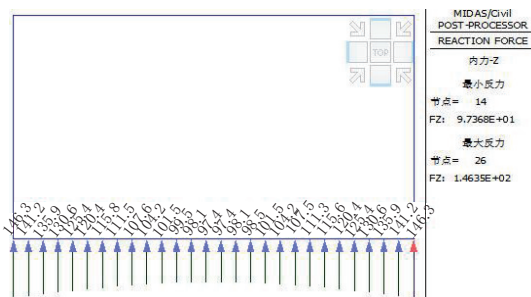


图 8 Terzaghi 经验公式法箱涵反力(单位:kN)

由图 7 至图 9 可见,3 种弹簧刚度不同取值方法下,箱涵框架结构基底的反力分布规律基本一致,最大反力在底板两端,最小反力在跨中位置,弹簧刚度越小,反力分布越均匀。

对 3 种弹簧刚度不同取值方法下基底最大、最小反力进行对比,如图 10 所示。

由图 10 可见,底板两端最大反力由 m 法求得,为

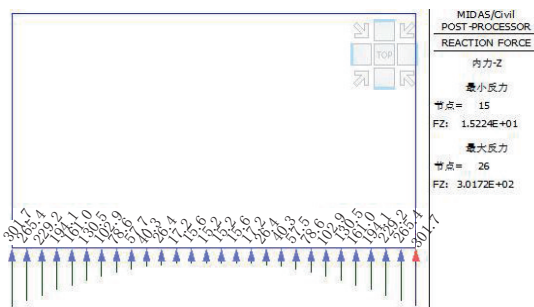


图 9 m 法箱涵反力(单位:kN)

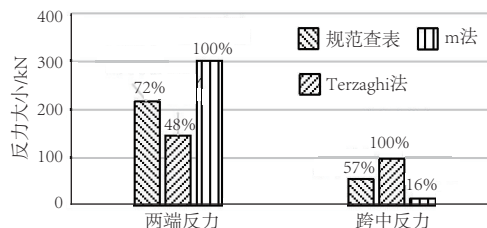


图 10 弹簧刚度不同取值方法下反力对比

301.7 kN ,最小反力由 Terzaghi 经验公式法求得,为 146.3 kN ,两者比例为 48%;底板跨中最大反力由 Terzaghi 经验公式法求得,为 97.4 kN ,最小反力由 m 法求,为 15.2 kN ,两者比例为 16%。

3 结 论

本文基于 Winkler 地基模型假定,以箱涵为研究对象,探讨了 3 种不同的弹簧刚度计算方式,并对箱涵内力及反力进行分析,得到以下结论:

(1) Terzaghi 经验公式法缺乏理论基础,在求解黏性土基床系数时,仅考虑了压缩模量及基础宽度,未考虑基础埋深及黏聚力等影响^[14-15],由此计算的弹簧刚度与规范查表法及 m 法差值过大,不宜用于箱涵基底弹簧刚度计算。

(2) 基于 3 种不同的弹簧刚度计算方式,箱涵顶板及侧墙控制弯矩差值在 10% 以内,能满足实际工程中配筋计算需要;底板控制弯矩差值较大,不能忽略其影响, m 法求得的跨中弯矩最小,偏安全的建议采用规范查表法计算。

(3) 综合考虑 Terzaghi 经验公式法求得的弹簧刚度偏离值较大, m 法求得的箱涵底两端地基反力过大,常规地基处理方式难以满足承载力要求,建议采用规范查表法求解地基反力并进行地基处理。

参考文献:

- [1] 顾克明,苏清洪,赵嘉行.公路桥涵设计手册(涵洞)[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [2] 周兴府,杨毅.箱涵结构设计的几点探讨[J].有色冶金设计与研究,2008,29(6):29-31.
- [3] 梁启元.地基抗力系数对箱涵结构的影响及结构优化[J].中外公

(下转第 251 页)