

波纹钢板综合管廊施工期力学性能研究

李勇, 符锌砂, 李百建*

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 波纹钢板综合管廊设置有内支架,其受力模式异于波纹钢桥涵,为研究内支架对波纹钢板综合管廊力学性能的影响,结合依托工程的现场试验,测试安装内支架和未安装内支架的管廊关键截面应变,利用等效梁理论计算截面内力。结果表明:波纹钢板综合管廊未安装内支架时,截面承受压力和拉力,截面轴力和弯矩随着填土高度增加基本趋于稳定;安装内支架时,截面几乎全部承受压力,压力随填土高度增加较快,弯矩增加较慢;安装内支架与未安装内支架时相比,截面最大压力增加,最大正弯矩和最大负弯矩减小,说明内支架对管廊受力是有利的;管底楔形部分的填土压实不足导致管底斜向 45° 截面内力增长较快。

关键词: 波纹钢板综合管廊; 施工期; 力学性能; 轴力; 弯矩

1 引言

波纹钢板综合管廊是在工厂内将波纹钢板分片制造成型,现场采用拼装工艺将其拼接为整体的综合管廊。波纹钢板综合管廊相比于传统的混凝土综合管廊是一项新应用,具有施工便捷、经济环保、抗变形能力强等优势。波纹钢作为一种典型的薄壳柔性结构,通过土与钢的相互作用将部分荷载转移到周围土体上,大大提高了结构强度,是一种较为理想的地下结构。美国、加拿大、韩国等在波纹钢桥涵结构这一领域开展了大量研究和应用,并制定了波纹钢桥涵结构的设计施工规范。中国的波纹钢板管廊研究起步较晚。目前,中国对波纹钢结构的力学性能试验研究主要集中在桥涵工程,但对波纹钢板综合管廊施工期的力学性能尚未开展过多的研究。波纹钢板综合管廊同桥涵的工作环境、设计理念、施工方法不同,桥涵的设计规范并不能有效指导波纹钢板综合管廊的设计与施工。此外,波纹钢板综合管廊内部支架对波纹钢的支撑作用,使波纹钢板综合管廊的受力模式异于波纹钢桥涵,因此,完全有必要对波纹钢板综合管廊施工过程的力学性能进行系统分析研究。

该文依托实际波纹钢板管廊工程,通过现场试验

的方法测试截面应变,利用等效梁理论计算波纹钢板截面内力,对波纹钢板综合管廊的力学性能进行研究。

2 测试管廊概况

测试波纹钢板综合管廊位于中国西北某城市道路的绿化带内,起始桩号 K0+000,终点桩号 K1+200,总长 1 200 m。设计收纳的管线包含:DN300 给水管线、DN700 输水管线、110 kV 高压电线、10 kV 电力及通讯电缆等。管廊主体采用波高为 55 mm、波距为 200 mm 标准波形的预制圆形波纹钢管,钢板采用 Q235A 热浸镀锌钢板,设计厚度 5 mm。该综合管廊直径 4 m,管顶填土高度 3 m,管沟深度 7 m,管底初始回填 1 m,然后在此基础上分层回填、分层压实,压实度 85%~90%,回填土为砂砾。全程共设 5 座工作井,集各种管线的接入接出、投料、检修、逃生、通风于一体。管沟槽底的处理根据土质及水文情况,换填砂砾 50~80 cm。管廊断面设计图见图 1。管廊内支架主要由竖向支撑方钢支架,管顶、管底的水平支撑横梁方钢支架,电力横向角钢支架组成,沿管长方向的支架间距分别为 0.8、1.6、3.2、0.8 m。内支架沿管廊横断面的设计尺寸如图 1 所示,钢支架与波纹钢内壁的连接方式为焊接。

收稿日期:2018-03-19

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:201539);广东省交通运输厅科技项目(编号:科技-2012-02-017)

作者简介:李勇,男,硕士研究生,E-mail:279617825@qq.com

*通信作者:李百建,男,博士研究生,讲师,E-mail:BJian_LI@163.com

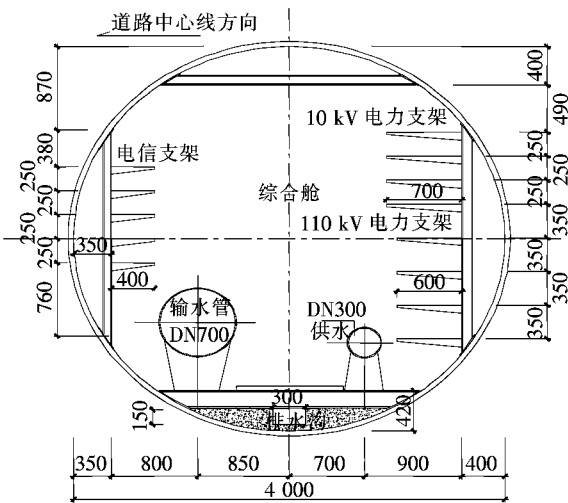


图 1 管廊断面设计图(尺寸单位:mm)

3 试验方案与原理

采用静态应变数据采集系统,通过布设应变片测定施工期波纹钢板综合管廊的截面应变,结合现场施工情况,选取 K0+520(管内未安装支架施工填土)、K0+780(管内安装支架施工填土)作为测区断面位置,如图 2、3 所示。其中 K0+780 应变测试断面位于竖向支撑方钢支架之间的中间两个波长位置。每个测区断面内共设置 8 个应变片测试截面,如图 4 所示,每个截面选择中间两个波形,在波峰、波中和波谷位置共

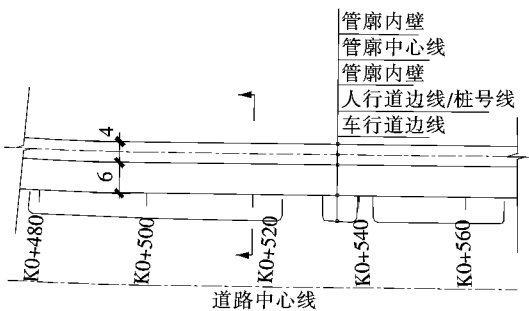


图 2 测区断面位置 K0+520(单位:m)

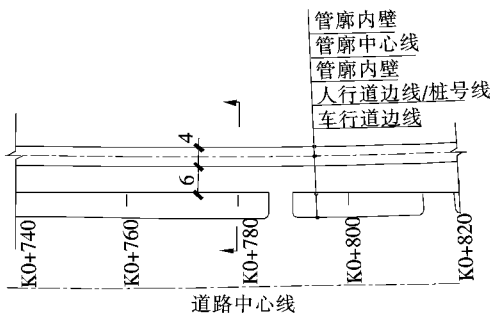


图 3 测区断面位置 K0+780(单位:m)

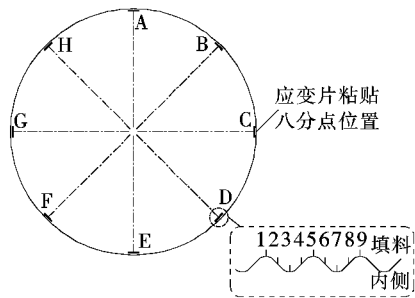


图 4 测试断面应变片布置

9 个测点黏贴应变片,图 4 中 1、5、9 测点为波峰,靠近土体一侧;3、7 测点为波谷,靠近管内一侧。

为保证应变片试验数据的准确性,试验对每种状态下的管廊截面应变采取重复测量的方式,剔除明显异常的数据之后,取其他稳定数据的平均值,作为各测点最终的应变数据。每个测试截面有 9 个测点,其中测点 1、5、9 应变的平均值作为该测试截面波纹钢板波峰的应变值,测点 2、4、6、8 应变的平均值作为该测试截面波纹钢板波中的应变值,测点 3、7 应变的平均值作为该测试截面波纹钢板波谷的应变值。波纹钢板弹性模量 E 取 2.06×10^5 MPa,单位钢板长的截面面积为 $5.826 \text{ mm}^2/\text{mm}$ 。

未安装支架时 A、B、C、D 截面波峰与波谷应力值对比如图 5 所示。

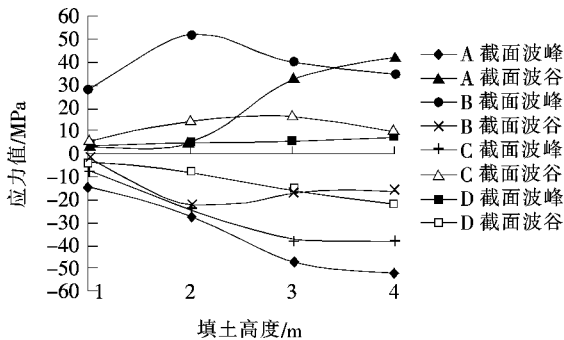


图 5 未安装支架时 A、B、C、D 截面波峰与波谷应力值对比

从图 5 可以看出:波纹钢板 A、B、C、D 截面的波峰与波谷处应力值均反号,应力分别为两个极值,波峰与波谷处的应力值大小随填土高度变化趋势一致,这一点符合梁体受轴力和弯矩共同作用时的受力情况,诸多现场测试和数值分析结果也证明了波纹钢板波峰和波谷间的应力关系与梁体上、下表面间的应力关系较为接近。因此,可以将波纹钢板考虑为等效矩形梁,计算截面所受轴力与弯矩。

利用现场测定的应变片数据计算波纹钢板截面的轴力和弯矩,将波纹钢板考虑为等效矩形梁,如图 6 所

示, b 、 h 分别为等效梁的宽度和高度, 应力通过波峰、波中、波谷的应变换算获得。



图 6 等效梁示意图

用测定应变换算的应力图大部分不呈直线, 显示出图 7(a) 中的形状。移动应力图表使得波形中间的应力值为“零”, 将图 7(a) 分解成图 7(b) 和图 7(c) 之和。图 7(b) 可利用下列公式计算作用在波峰的轴力 T_1 和作用在波谷的轴力 T_3 。

$$T_1 = \frac{1}{4} \sigma_1 b h = \frac{1}{4} \sigma_1 A \quad (1)$$

$$T_3 = \frac{1}{4} \sigma_3 b h = \frac{1}{4} \sigma_3 A \quad (2)$$

式中: b 为等效梁宽度; h 为等效梁高度; A 为波纹钢板截面面积。

波纹钢板的弯矩 M :

$$M = T_1 \frac{h}{3} + T_3 \frac{h}{3} \quad (\text{逆时针方向为正}) \quad (3)$$

另外, 图 7(c) 可按式(4)计算 T_2 :

$$T_2 = \sigma_2 b h = \sigma_2 A \quad (4)$$

波纹钢板的轴力 T :

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (5)$$

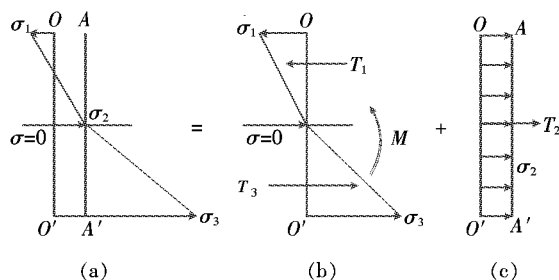


图 7 作用在钢板上的轴力与弯矩计算示意图

4 力学性能分析

试验分别监测了综合管廊在未安装管内支架和安装管内支架两种情况下进行回填时, 回填初始状态(管底回填 1 m), 依次回填 1、2、3(至管顶)、4 m, 5 种状态下的各测点应变。通过与初始状态下管廊的应变值比较, 分析管廊在施工过程中的受力状态。将应变测试结果按式(1)~(5)计算波纹钢板综合管廊在未安装内支架和安装内支架时的截面轴力 T 和弯矩 M , 该主

要对截面轴力 T 和弯矩 M 进行分析, 轴力负值表示受压, 正值表示受拉; 弯矩正值(逆时针)表示管廊内侧受拉, 负值(顺时针)表示管廊外侧受拉。

4.1 不同填土高度下载面的轴力与弯矩

综合管廊在未安装支架情况下回填时, 在不同填土高度下, 测试断面不同截面的轴力、弯矩图如图 8、9 所示。

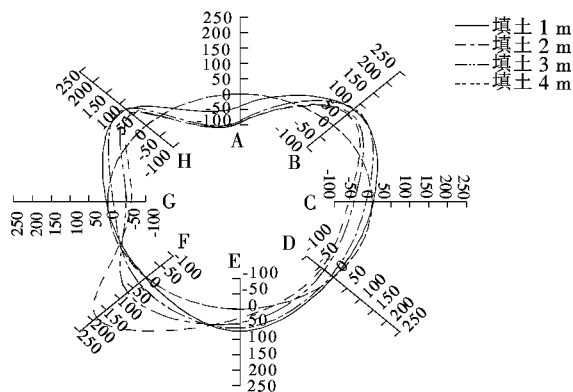


图 8 未安装支架时不同填土高度下的截面轴力图(单位: kN/m)

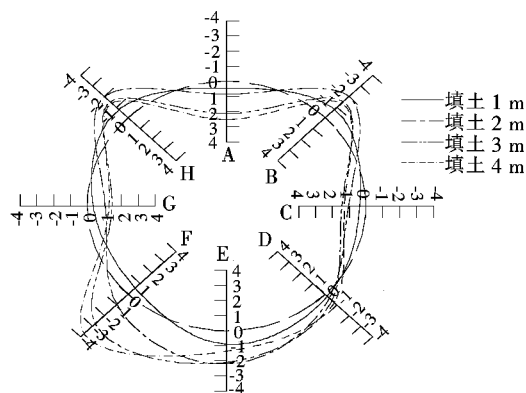


图 9 未安装支架时不同填土高度下的截面弯矩图(单位: kN·m/m)

从图 8、9 可以看出: 未安装内支架时, 在不同的填土高度下, 波纹钢板管廊截面既承受压力也承受拉力, 随着填土高度增加, A、C、D、G 截面均受压, B、E、F、H 截面均受拉, A、C、G 截面弯矩为正值, 内侧受拉; B、D、E、F、H 截面弯矩为负值, 外侧受拉。

综合管廊在安装支架情况下回填时, 在不同填土高度下, 测试断面不同截面的轴力与弯矩图如图 10、11 所示。

从图 10、11 可以看出: 安装内支架时, 在不同的施工填土高度下, 波纹钢板管廊截面轴力接近全截面受压, 随填土高度增加, A、B、H 截面弯矩为正值, 内侧受

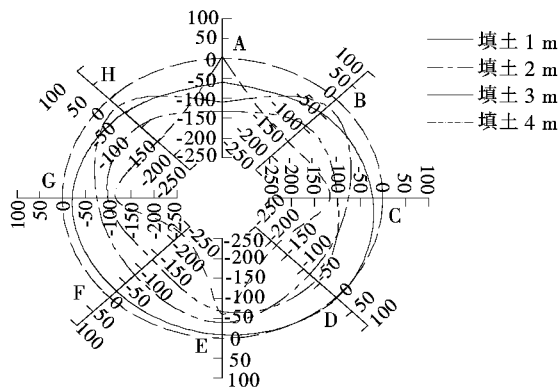


图 10 安装支架时不同填土高度下的截面轴力图(单位:kN/m)

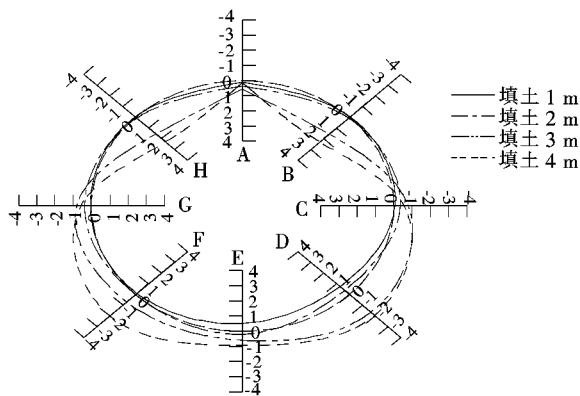


图 11 安装支架时不同填土高度下的截面弯矩图(单位:kN·m/m)

拉;C、D、E、F、G 截面弯矩为负值,外侧受拉,波纹钢板管廊截面轴力和弯矩分布基本对称。

管廊内支架的支撑作用减小了管廊的变形,承担了部分土压力,减小了管廊所受的拉力值,使全截面接近受压状态,这对波纹钢板管廊受力是有利的。安装内支架与未安装内支架的管廊现场测试结果表明:管底 45°截面内力增长较快,该位置处管楔部分的填土一般难以填充和压实,截面受力不均,因此,现场回填时,管底楔形部分的填土压实应引起重视,可采用人工夯实的措施使管楔部分填土充分压实。

4.2 波纹钢板综合管廊截面内力分析

综合管廊在未安装管内支架情况下回填时,在不同填土高度下,不同截面轴力、弯矩的变化规律如图 12、13 所示。

从图 12 可以看出:未安装内支架时,随着填土高度的不断增加,A、D 和 C 截面处于受压状态,其所受压力总体上越来越大,但增速减缓,最大压力值为 -94.812 kN/m,出现在拱顶 A 截面,而 B、E 截面处于受拉状态,且所受拉力越来越小。F 截面所受拉力增加迅速,最大拉力值为 186.324 kN/m。根据轴力变

化趋势,除 F 截面外,随着管顶填土高度的增加,截面所受拉力值逐渐减小,截面所受压力值逐渐趋于稳定。

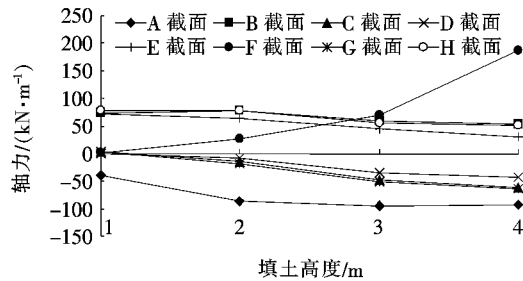


图 12 未安装支架时不同填土高度下的截面轴力变化图

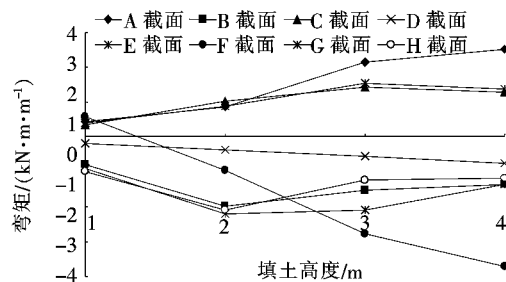


图 13 未安装支架时不同填土高度下的截面弯矩变化图

从图 13 可以看出:未安装内支架时,随着填土高度的增加,F 截面从管内侧受拉过渡到管外侧受拉,其弯矩值增长迅速,截面最大负弯矩值为 -3.702 kN·m/m。A 与 C 截面处于管内侧受拉,且其所受正弯矩值随填土增加而增加,但增速减缓,最大正弯矩值为 2.525 kN·m/m,出现在拱顶 A 截面,B、D 和 E 截面处于管外侧受拉,B 和 E 截面的负弯矩值随填土高度的增加,有减小的趋势,D 截面的负弯矩值几乎随填土高度线性增加,但增长速度缓慢。除 F 截面外,管廊截面所受弯矩值随管顶填土高度的增加趋于稳定。因此,波纹钢板综合管廊在覆土高度增加的情况下,截面轴力与弯矩总体上趋于稳定。

综合管廊在安装管内支架情况下回填时,在不同填土高度下,不同截面轴力与弯矩的变化规律如图 14、15 所示。

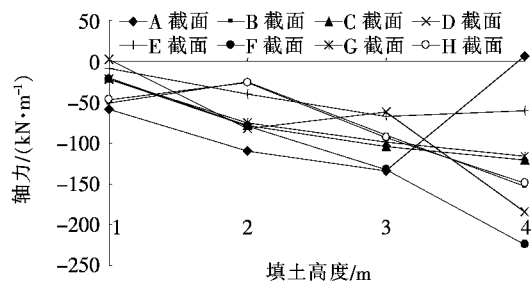


图 14 安装支架时不同填土高度下的截面轴力变化图

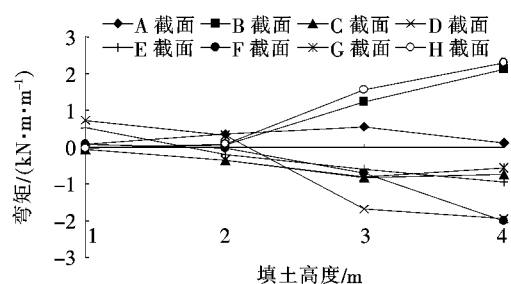


图 15 安装支架时不同填土高度下的截面弯矩变化图

从图 14 可以看出:安装内支架时,除 A 截面外,其余截面所受压力值总体上随覆土高度增加而增大,且比未安装内支架情况的压力值大,截面最大压力值为 -223.829 kN/m ,出现在 F 截面。

从图 15 可以看出:安装内支架时,随着填土高度的增加,A、G、E 截面弯矩值变化较小,D、F、H 截面弯矩值变化较大,截面最大正弯矩值为 $2.294 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$,出现在 H 截面,最大负弯矩值为 $-1.991 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$,出现在 F 截面,截面弯矩值增速较慢。

安装内支架的最大内力值与未安装内支架的最大内力值相比,最大压力值增加 136%,最大正弯矩值减小 9%,最大负弯矩值减小 46%,随着填土高度的增加,安装内支架的截面所受压力值增长速度总体上要大于未安装内支架的截面所受压力值增长速度,因此,波纹钢板综合管廊的结构设计应将内支架作为一个主要设计因素考虑,并应考虑内支架对土—钢相互作用的影响。

4.3 强度校核

未安装管内支架与安装管内支架回填时,管廊 F 截面的轴力与弯矩组合作用最大,将弯矩与轴力的内力组合值与整个施工过程中管壁截面的塑性弯矩承载力相比较,以验算施工过程中该截面的强度,验算公式见式(6)~(8)。

$$\left(\frac{P}{P_{Pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{Pf}}\right| \leq 1.0 \quad (6)$$

$$P_{Pf} = \phi_{hc} A F_y \quad (7)$$

$$M_{Pf} = \phi_{hc} M_P = \phi_{hc} W F_y \quad (8)$$

式中: P 、 M 分别为施工过程中波纹钢板截面轴力和弯矩值; P_{Pf} 为设计抗压强度(kN/m); M_{Pf} 为乘以折减系数的塑性较弯矩承载力; ϕ_{hc} 为塑性较形成的抗力系数,取 0.9; A 为单位钢板长的截面面积(mm^2/mm); F_y 为波纹钢板的屈服强度(MPa); W 为波纹钢板的塑性截面模量(mm^3/mm)。

将施工过程中 F 截面的最大内力值, $\phi_{hc} = 0.9$, A

$= 5.826 \text{ mm}^2/\text{mm}$, $F_y = 235 \text{ MPa}$, $W = 99.675 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 代入式(6)~(8),得到 F 截面在安装内支架前后的强度校核分别为:

$$\left(\frac{186.324}{1\,232.2}\right)^2 + \left|\frac{-3.702}{21.08}\right| = 0.198 \leq 1.0$$

$$\left(\frac{-223.829}{1\,232.2}\right)^2 + \left|\frac{-1.991}{21.08}\right| = 0.127 \leq 1.0$$

安装内支架后,管廊截面强度校核结果更安全,这与前面内支架有利于波纹钢板管廊受力的分析结论一致。因此,随着填土高度的增加,设置有内支架的波纹钢板管廊更加安全,但应把管顶填土高度作为重要设计参数进行结构设计,并考虑内支架对土—钢相互作用的影响。

5 结论

通过现场测试的方法,研究内支架对波纹钢板综合管廊力学性能的影响,通过对比分析,可得出以下结论:

(1) 未安装内支架时,波纹钢板管廊截面既承受压力也承受拉力,截面内力随填土高度增加总体趋于稳定,截面最大压力值为 -94.812 kN/m ,截面最大正弯矩值为 $2.525 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$,截面最大负弯矩值为 $-3.702 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$ 。

(2) 安装内支架时,波纹钢板管廊截面几乎全部承受压力,截面压力值随填土高度增加较快,截面最大压力值为 -223.829 kN/m ,截面弯矩值增加较慢,截面最大正弯矩为 $2.294 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$,截面最大负弯矩为 $-1.991 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$,截面轴力和弯矩分布基本对称。

(3) 管廊内支架的支撑作用减小了管廊的变形,承担了部分土压力,相比于未安装内支架时,截面最大压力值增加 136%,最大正弯矩值减小 9%,最大负弯矩值减小 46%,这对管廊受力是有利的。

(4) 安装内支架与未安装内支架时,管底 45° 截面内力增长较快,这与管底楔形部分的填土压实不足有关,因此,应注意波纹钢板综合管廊管底楔形部分的填土压实,确保管廊承受均匀的土压力。

(5) 采用 CHBDC 加拿大桥梁设计规范验算波纹钢结构施工过程中的截面强度满足要求。随着填土高度的增加,设置有内支架的波纹钢板管廊更加安全,但应把管顶填土高度作为重要设计参数进行结构设计,并考虑内支架对土—钢相互作用的影响。

背斜核部层状软硬岩区隧道变形时空效应分析

孙智慧¹, 邢逸航², 唐勇¹, 刘涛¹

(1.内江职业技术学院 土木工程系, 四川 内江 641000; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:背斜核部可能集岩体破碎、软硬相间、层状分布、高地应力、地下水等岩土工程问题于一体,加上软岩流变特性致使其围岩变形机制复杂。为了解复杂工区围岩变形规律,根据雅康高速公路周公山隧道背斜核部软硬岩区监控量测资料,对围岩变形时空效应进行了分析。结果表明:①最大接触压力位于断面K8+559拱顶部位,达760.7 kPa;最大变形位于断面K8+559拱顶部位,达760.7 mm;②时间上:围岩变形呈周期性,周期为14 d,初始4 d变形明显,4~8 d缓慢变形,8~14 d趋于稳定状态;且鉴于支护效力逐渐发挥,后期的变形量值及速率均小于前期的变形量值及速率;③空间上:沿开挖方向,越靠近背斜核部变形越大;同一断面上,边墙水平位移最大;④对软硬岩区隧道工程应充分考虑软岩的时效变形,合理选择支护时机和支护措施。

关键词:隧道工程;背斜;变形;时空效应;支护

随着“泛亚铁路网”、“川藏铁路”、“川藏高速公路”等西部大开发战略中重大工程的相继启动和实施,带动了中国西部交通运输工程蓬勃发展,隧道建设进入了新高潮。然而,中国西部地形地质条件复杂,地质环境非常极端和异常,隧道建设面临诸多严峻挑战。如隧道穿越背斜核部区域可能集围岩破碎、软硬相间、层状分布、地应力高、地下水等诸多不利因素于一体。且软岩流变性能更使隧道围岩变形复杂多变极易引起

掌子面掉块、塌方,初支开裂、脱落、拱架变形等现象,严重影响施工进度和施工安全。研究背斜核部区域隧道围岩变形时空效应,进一步掌握复杂工区围岩变形特征规律,积累相关资料,对西部隧道建设意义明显。

隧道时空效应研究主要基于现有时空效应理论,通过现场监测、室内试验以及数值模拟等方法进行。如,孙元春等认为隧道围岩变形存在3个阶段,且急剧变形阶段空间效应突出,稳定变形阶段是时空效应的

参考文献:

- [1] Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. Hand Book of Steel Drainage & Highway Construction Products[M]. Second Canadian Edition. Cambridge: Corrugated Steel Pipe Institute, 2007.
- [2] National Corrugated Steel Pipe Association. Corrugated Steel Pipe Design Manual[M]. Dallas: National Corrugated Steel Pipe Association, 2008.
- [3] American Iron and Steel Institute. Modern Sewer Design [M]. Fourth Edition. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1999.
- [4] 平山 SI 株式会社. 波形钢板资料[M]. 首尔: 平山 SI 有限公司, 2006.

- [5] 李祝龙, 梁养辉, 黄志福, 等. 低路堤荷载作用下钢波纹板拱桥应变的测试研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013(5).
- [6] 冯忠居, 乌延玲, 贾彦武, 等. 钢波纹管涵洞受力与变形特性模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(1).
- [7] 乌延玲. 公路钢波纹管涵洞受力与变形特性及应用研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2012.
- [8] 彭立, 张阳, 穆程, 等. 高填土大跨钢波纹管涵力学性能分析与测试[J]. 中外公路, 2016(6).
- [9] 杨成栋. 开截面波纹钢板小桥模型试验研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2011.
- [10] 徐伟博. 管拱形覆土波纹钢板管涵受力性能试验研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2015.

收稿日期: 2018-05-27

作者简介: 孙智慧, 男, 硕士, 讲师. E-mail: 376789987@qq.com

* 通信作者: 邢逸航, 男, 硕士. E-mail: 1256347936@qq.com