

高填方大直径钢波纹管涵洞力学特性

褚夫蛟¹, 曾水生², 方文富², 王培森²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中交一公局第二工程有限公司, 江苏苏州 215101)

摘 要: 为研究高填方大直径钢波纹管的力学特性, 选取萍洪高速 AK0+485 处钢波纹管涵洞作为研究对象, 通过现场测试以及数值模拟提取管体上部不同填土高度情况下管体的应变、土压力以及管体的横向和竖向变形。通过对数据进行处理分析得出测试数值与模拟数值变化趋势基本一致, 管中环向应变以及管顶轴向应变分别大于其他部位的应变。管顶土压力较小, 管体下 45° 位置的土压力较大, 主要是由于大直径钢波纹管的柔性以及混凝土支撑的限制作用导致。而对于无混凝土支撑情况下的数值模拟显示, 无混凝土支撑可减小应力集中现象以及大部分测点位置的土压力。

关键词: 大直径钢波纹管; 高填方; 力学特性; 混凝土支撑; 土压力

中图分类号: U 449.83+1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)09-1338-05

Mechanical Properties of Large-Sized Corrugated Steel Pipe Culvert Under High Embankment Filled

CHU Fu-jiao¹, ZENG Shui-sheng², FANG Wen-fu², WANG Pei-sen²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. No. 2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Suzhou 215101, China. Corresponding author: CHU Fu-jiao, E-mail: zzchufj@sina.com)

Abstract: In order to study the mechanical properties of large-sized corrugated steel pipe under high filling, the corrugated steel pipe culvert in AK0+485 of Pinghong highway was selected as research object. The strain, soil pressure, and horizontal and vertical deformation of the pipe were extracted under the condition of different filling heights from field tests and numerical simulation. By data processing and analyzing, test value and numerical simulation have the same change tendency and the circumferential strain in middle part and axial strain in top part are greater than other parts of the pipe. Soil pressure at the top part is lower and at the bottom 45° part is higher, which is caused by the flexibility of large-sized corrugated steel pipe and restriction of concrete supporting. Simulations show that the stress concentration and soil pressure in every part of the pipe can be decreased under the condition of no concrete supporting.

Key words: large-sized corrugated steel pipe culvert; high embankment filled; mechanical properties; concrete supporting; soil pressure

随着我国公路建设的日益增加, 公路路基中涵洞结构物所占的比重越来越大, 涵洞工程采用的形式大多为钢筋混凝土涵洞和圬工砌体涵洞^[1], 其设计和施工工艺已基本成熟, 但在工程应用中所出现的缺点也比较明显, 主要在于设计施工要求高、工期较长、涵体易破坏、出现跳车等现象。钢波纹管替代传统涵洞结构的应用很好地

解决了上述涵洞施工以及后期所呈现的缺陷。它具有施工简单、快捷、结构稳定、有利环保等优点。自 1896 年美国首次将波纹板应用于涵洞施工, 至第二次世界大战波纹板应用的迅速发展, 各国众多学者对其进行了研究。国内对波纹管的研究起步较晚, 20 世纪 90 年代才逐渐出现了钢波纹管的应用及研究^[2-3]。自此国内各学者对钢波纹管

的受力特性、疲劳寿命、力学性能、土压力等方面有了更全面更深入的研究^[4]。

由于钢波纹管中波纹的存在,相比平滑圆管,其拥有更好的强度,但钢波纹管的力学性质就变得更加复杂。Liu等^[5]根据钢波纹管的不同参数,采用 ansys 软件进行模拟比较,提出了柔性和刚性钢波纹管的分类。Kang等^[6-7]分别对沟槽式、路堤式中柔性和刚性钢波纹管的土压力进行了研究。Yeau等^[8]、Sezenl等^[9]对钢波纹管涵洞进行了现场试验,研究了钢波纹管涵洞在静态和动态荷载下的挠度变化情况。李祝龙^[3]、冯忠居等^[10]、乌延玲^[4]从现场测试、室内试验以及数值模拟着手分析了钢波纹管的应力应变特性。王艳丽等^[11]从旋转对称壳基本理论着手,研究了钢波纹管的大应变与小应变问题。

目前对钢波纹管涵洞的研究大部分集中在小管径低填方的情况下,且填土均匀,不能完全反应钢波纹管在现实应用中的具体特性。本文结合具体工程,通过现场测试以及数值模拟进行对比,对高填方大直径钢波纹管涵洞进行力学分析,为钢波纹管涵洞的应用提供借鉴。

1 工程概况

江西省萍洪高速公路,位于江西省萍乡市境内,由于工期十分紧迫,为了加快施工进度,节约工期,加快路基填筑施工工作面,萍洪高速公路项目部经过变更,将 AK0+480 处箱涵通道、AK0+510 处拱涵、AK0+760 处赤土坡小桥(2 m×9 m 钢架桥)及 K14+880 处盖板涵变更为钢波纹管涵洞。参考《湖南龙山至永顺高速公路钢波纹管设计》图纸,以及《萍乡至洪口界高速公路钢波纹管设计》图纸,设计采用 Q345 热轧钢板制作的波纹板材,以及工厂预制—预拼装—现场安装的施工方法。分片拼装管的紧固件采用国标中的标准紧固件,其握度和规格应满足力学要求,且不低于管材强度要求。

2 试验设计

2.1 测试管涵选取

试验钢波纹管涵洞位于长平互通 AK0+485 处,管体直径 6 m,长度为 73 m,上覆填土高度 18 m,路面宽度 10.54 m,选取 A-A 断面(路基中心线)、B-B 断面(路基边线)以及 C-C 断面(第一级 8 m 护坡道中心位置)作为测试断面,如

图 1 所示。

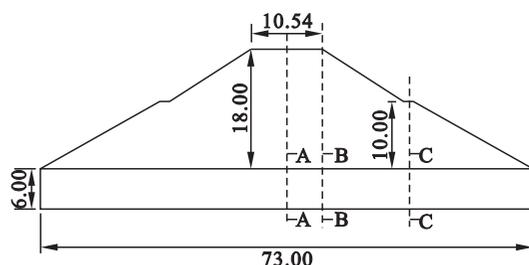


图 1 试验涵洞纵截面图(m)

Fig. 1 Longitudinal section of the test culvert (m)

2.2 元器件布设

现场将对钢波纹管的特征断面进行环向和轴向的应变测试,管周的土压力测试,以及钢波纹管的变形观测,测点布置如图 2 所示。其中,采用的金码高科生产的 JMZX-212A 型应变计环向布设在测试点 1~5 处,轴向布设在测试点 1,3,5 处。采用的 JMZX-5010A 型土压力盒布设在测试点 1~5 处,为避免波峰与波谷间填土的差异,将土压力盒埋设在距离波纹管壁 5~10 cm 处,土压力盒和波纹管间采用细土填实。采用数显收敛计记录管体横向和竖向的变形数值,收敛计挂钩焊接在测点 1,3,5 以及与测点 3 对应位置处。实测时,管体周围每填埋一个土压力盒以及管体上方填土每填 2 m 则进行一次数据采集。

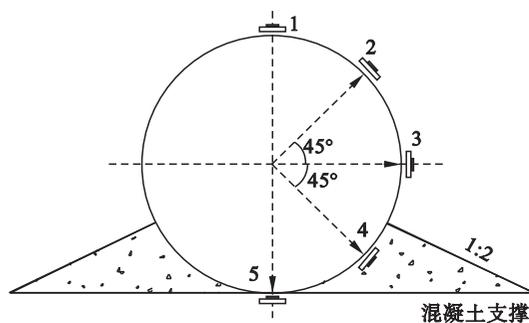


图 2 元器件布设位置示意图

Fig. 2 Diagram of the components location

3 模拟模型建立

为验证试验所得数据是否符合理论规律,根据现场实际情况及施工图纸,采用有限元分析软件 midas GTS^[12]建立如图 3 所示数值模型,模型宽 24 m,长 74 m,高 39 m。其中钢波纹管模型如图 4 所示,为计算简便,仅在测试段建立波纹管模型(路基中间部位为 A 断面,路肩部位为 B 断面,护坡道部位为 C 断面),其他位置等效成圆管,波纹波长 15 cm,波高 5 cm,每个测试段取 5 个波纹。

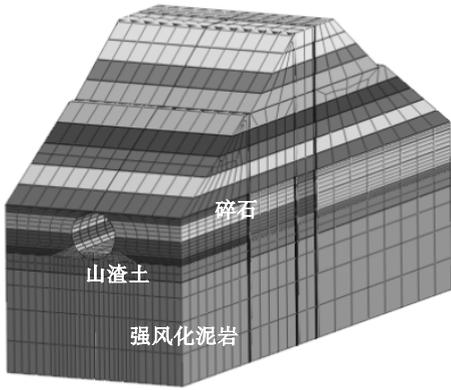


图3 钢波纹管路基整体模型

Fig. 3 Whole model of corrugated steel pipe subgrade

及混凝土采用弹性模型. 参考相关报告以及实验室所得的试验数据,各土层及钢波纹管力学参数的选取如表 1 所示. 根据实测时数据采集的工况,钢波纹管台背回填分 4 阶段进行,每阶段按波纹管 45° 圆弧高度填土,当台背回填结束后,管顶以 2 m 高度为一阶段进行填土,共填 24 m.

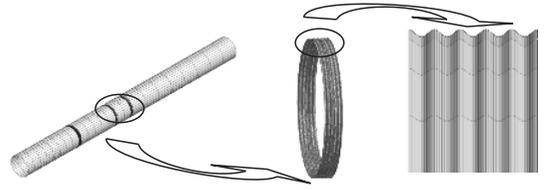


图4 钢波纹管模型

Fig. 4 Model of corrugated steel pipe

岩土体采用通用的莫尔-库仑模型,钢波纹管以

表 1 模型参数
Table 1 Model parameters

基材	弹性模量/MPa	泊松比	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	摩擦角/($^\circ$)
钢板	2.11E+05	0.31	78.00	—	—
混凝土	2.40E+04	0.22	27.02	—	—
碎石土	13.00	0.29	19.05	9.00	30.88
强风化泥岩	9.60E+03	0.25	20.52	15.20	36.05
山渣土	23.00	0.30	21.15	10.10	31.14
路面	5.00	0.32	15.00	8.45	31.03

4 涵洞力学特性分析

通过现场测试以及对模型的模拟计算,提取管体变形、管壁应变以及土压力值. 现场测试每填土不超过 2 m 提取一次,数值模拟每填土 2 m 进行一次加载. 分别提取管体上部填土后管体相应数据,采用数学计算软件 Mathematica^[13]对数据进行差值,如表 2 所示. 圆环左半边为现场测试数据,右半边为数值模拟数据. 对于应变,虚线环外受拉为正值,环内数据受压为负值.

从表 2 中可以看出管体环向应变以管中应变最为突出,而轴向应变则是在管顶较大. 现场测试比数值模拟数值大. 对于现场测试数据,管顶应变呈先受压后受拉的趋势,这与管侧填土对管体的侧向挤压有关. 管顶轴向应变随着填土高度的增加呈持续拉应变状态. 数值模拟数据基本保持同一受力状态,其趋势和实测值一致. 对于管体上方 45° 位置,整体呈受压状态,仅 A 断面的实测结果和 B 断面的数值模拟结果呈先拉后压的状态,其轴向应变整体呈拉应变状态,管中位置的环向整体呈压应变状态,与管体发生变形的趋势一致,其轴向整体呈拉应变状态,说明管体在轴向给环向

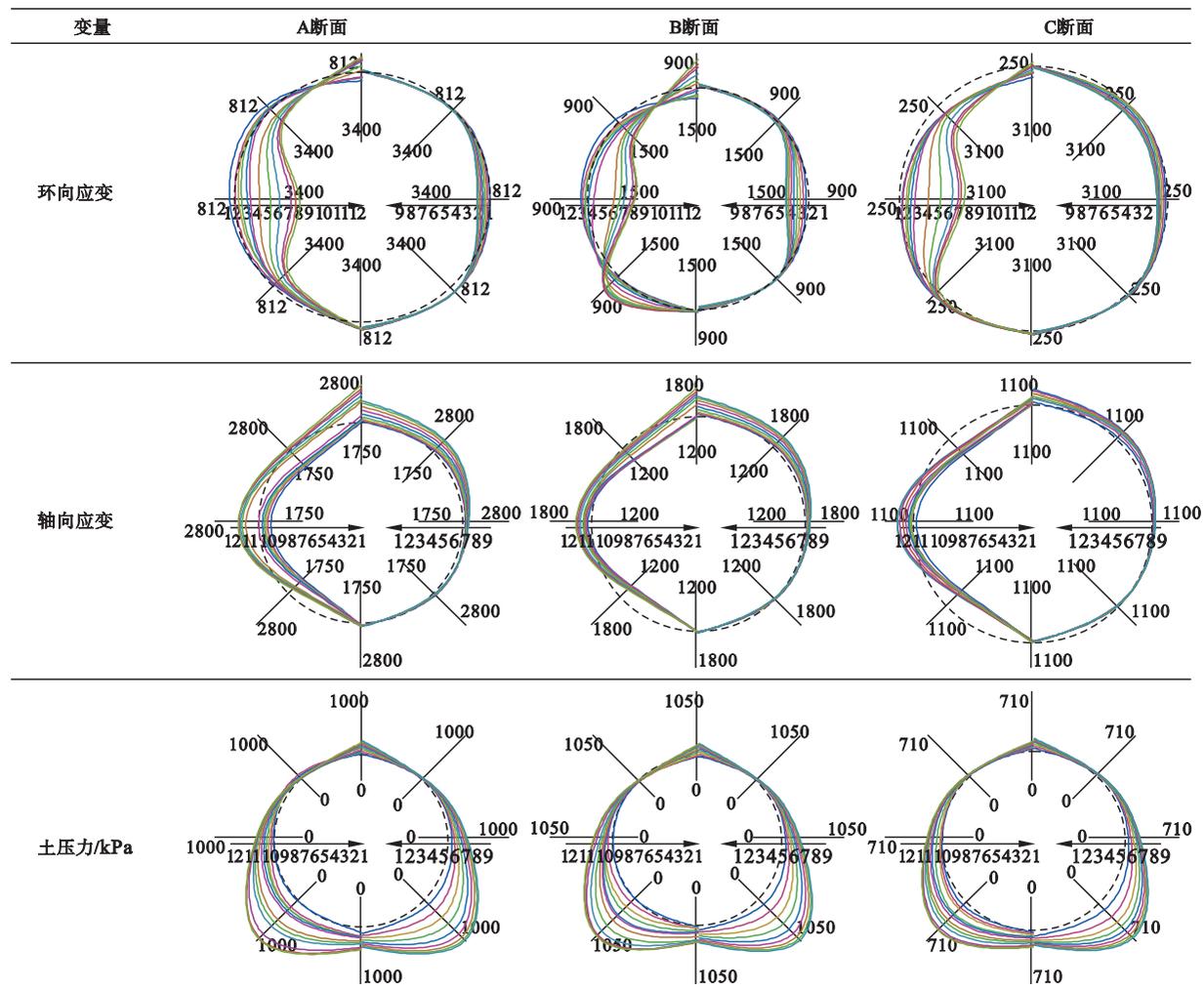
应变提供补偿空间,管体下方 45° 位置的环向仅 B 断面实测值呈拉应变状态且随填土高度增加而持续增加,其他则呈压应变状态,管底位置数值模拟的环向呈压应变状态,轴向呈拉应变状态,此状态与管体变形趋势一致,且环向与轴向在变形上相互提供补偿空间,而现场测试则无明显规律,这主要是由于混凝土的限制作用引起的.

管体土压力的实测值与数值计算结果基本一致. 整体都随着覆土厚度增加呈增长趋势. 而土压力最大值位于管体下方 45° 位置,其次为管底、管体中部、管顶、管体上方 45° 位置. 这与前人研究结果所述的管顶压力最大^[10]不符,主要是由于前人所述钢波纹管主要为小管径,管体基本呈刚性且无下部支撑,而本文所述大管径波纹管的柔性管性能较好地与地基础进行协同作用,而下部的混凝土楔形支撑更使得最大土压力向管体下部移动,导致了混凝土部位的应力集中.

通过对管体横向和竖向的变形监测,在填土完成后 A、B、C 三个断面的实测横向变形值分别为 139.46, 137.58, 115.46 mm, 竖向变形值分别为 103.58, 97.38, 79.63 mm; 而模拟计算的横向变形值分别为 125.42, 120.98, 86.24 mm, 竖向变形值分别为 87.13, 83.78, 60.46 mm. 实测值与

模拟计算数值相近,趋势一致.最大值位于 A 的不同上部结构形式导致.断面,其次为 B 断面和 C 断面,主要是由各断面

表 2 钢波纹管应变及土压力变化曲线
Table 2 The strain and soil pressure change curves of corrugated steel pipe



由于本项目钢波纹管底部采用混凝土支撑结构,容易出现应力集中现象.为验证由混凝土支撑导致的应力集中现象,另外再模拟管底无混凝土支撑结构作为对比.对模拟结果,选择性地提取填土完成后管体竖向位移收敛结果以及管围土压力进行对比,结果如图 5,图 6 所示.

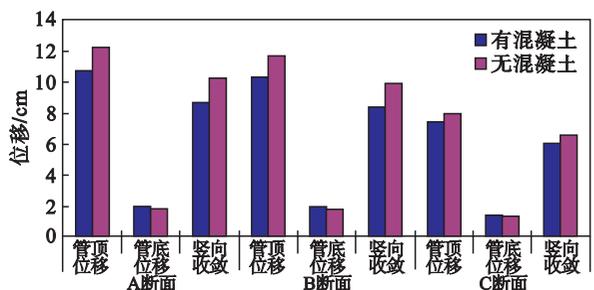


图 5 竖向位移收敛对比

Fig. 5 Comparison among vertical convergences

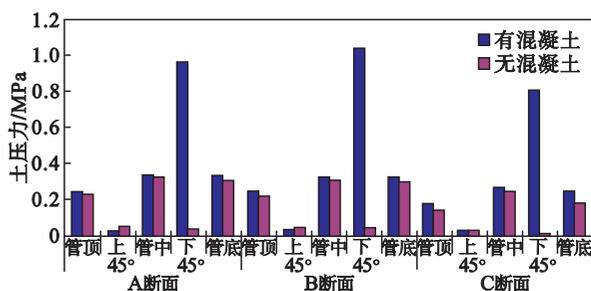


图 6 土压力对比

Fig. 6 Comparison among soil pressures

从图 5 可以看出,由于无混凝土支撑的限制作用,管顶位移以及管体竖向收敛值明显增大.混凝土密度比土体大,在无混凝土支撑的情况下,管体下方地基所受的竖向压力减小,从而导致管体整体下沉量小,因此在无混凝土支撑的情况下,管底位移相对较小.

从图 6 可以看出,在有混凝土支撑的情况下,管体下方 45° 位置应力集中现象明显.在无混凝土支撑的情况下,管体下方 45° 位置无应力集中现象.管体围压呈整体减小趋势,仅在管体上方 45° 位置的环向压力有略微增大现象.这是由于柔性钢管可在无混凝土支撑的情况下能更好地与地基产生协同作用,其变形能够减小管体周围的局部应力集中.由此可见,混凝土支撑容易导致钢波纹管的应力集中现象.

5 结 论

1) 根据现场实际情况,建立了钢波纹管涵洞段整体数值模型.对比现场实测数据与数值模拟结果可以看出,实测值与模拟值变化趋势基本一致.

2) 管中位置的环向应变以及管顶的轴向应变分别大于其他部位的相应应变.而在管体下方 45° 以及管底位置,由于受到混凝土支撑的限制作用,其变形则无明显规律.

3) 位于管体下方 45° 位置的管体土压力最大,说明了混凝土支撑的限制作用容易导致应力集中.管顶大小和前人研究的管顶土压力最大的结论不符,主要是由于大管径钢波纹管涵洞的柔性作用以及混凝土支撑的作用导致.

4) 填土完成后,管体横向变形以及竖向变形的测试值与模拟值基本一致,最大值位于 A 断面,其次为 B 断面和 C 断面,主要是由各断面的不同上部结构形式导致.

5) 混凝土支撑容易导致应力集中,在无混凝土支撑条件下,钢波纹管少了相应方向的约束,其竖向变形以及横向变形均增大.各部位土压力有不同程度的变化,以管体下方 45° 位置最为突出,大部分位置土压力呈减小趋势,仅在上 45° 位置有略微增加.

参考文献:

- [1] 乌延玲,冯忠居,王彦志,等.钢波纹管涵洞受力与变形特性现场试验分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版) 2011,43(4):513-516.
(Wu Yan-ling, Feng Zhong-ju, Wang Yan-zhi, et al. Field force and deformation characteristic test of corrugated steel pipe culvert[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 43(4): 513-516.)
- [2] 李祝龙,章金钊.高原多年冻土地区波纹管涵应用技术研究[J].公路 2000(2):28-31.
(Li Zhu-long, Zhang Jin-zhao. Application of corrugated pipe culvert in permafrost regions[J]. *Highway*, 2000(2): 28-31.)
- [3] 李祝龙.公路钢波纹管涵洞设计与施工技术[M].北京:人民交通出版社 2007.
(Li Zhu-long. Design and construction of corrugated steel pipe culverts[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.)
- [4] 乌延玲.公路钢波纹管涵洞受力与变形特性及应用研究[D].西安:长安大学,2012.
(Wu Yan-ling. Force deformation characteristic and its application of corrugated steel pipe culvert of highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)
- [5] Liu B D, Liu Z M, Zhang M X, et al. Study on impact parameters of rigidity and flexibility for buried corrugated steel culvert[J]. *Open Civil Engineering Journal*, 2014, 8(1):14-22.
- [6] Kang J, Parker F, Yoo C H. Soil-structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes—part I: embankment installation[J]. *Engineering Structures*, 2007, 30(2): 384-392.
- [7] Kang J, Parker F, Yoo C H. Soil-structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes—part II: imperfect trench installation[J]. *Engineering Structures*, 2007, 30(3): 589-594.
- [8] Yeau K Y, Sezen H, Fox P J. Load performance of in situ corrugated steel highway culverts [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2009, 23(1): 32-39.
- [9] Sezen H, Yeau K Y, Fox P J. In-situ load testing of corrugated steel pipe-arch culverts [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2008, 22(4): 245-252.
- [10] 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,2013,35(1): 187-192.
(Feng Zhong-ju, Wu Yan-ling, Jia Yan-wu et al. Model tests on force and deformation characteristics of corrugated steel pipe culvert [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2013, 35(1): 187-192.)
- [11] 王艳丽,李祝龙,吴大中.钢波纹管涵洞的薄壳效应[J].公路交通科技 2008,25(5):86-90.
(Wang Yan-li, Li Zhu-long, Wu Da-zhong. Thin shell effect of corrugated steel culvert performance [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(5): 86-90.)
- [12] Jeong J W, Lee S J, Park N W, et al. A numerical study on the prevention of clogging in granular compaction pile[J]. *Journal of Korean Geoenvironmental Society*, 2013, 14(1): 43-51.
- [13] Ersoy M, Akbulut Y. Cognitive and affective implications of persuasive technology use on mathematics instruction[J]. *Computers & Education* 2014, 75: 253-261.