

# 高填方大直径钢波纹管涵变形机制 与控制技术研究

郜新军<sup>1</sup>,包建新<sup>1</sup>,张浩<sup>1</sup>,周同和<sup>1,2</sup>,殷继虎<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利与土木工程学院,河南 郑州 450001;2. 黄淮学院土木工程学院,河南 驻马店 463000)

**摘要** 目的 研究高填方大直径钢波纹管涵变形机制与控制技术,解决其结构变形过大的问题。方法 基于管道压缩变形公式,提出在管涵两侧一定范围内填筑水泥土材料的新技术;通过室内试验确定水泥土材料中最优水泥质量分数,再基于数值模拟和现场试验分析采用新技术施工的管涵结构的受力及变形特征及其上部竖向土压力分布规律,确定最优管侧填筑范围。结果 新填筑技术能充分利用水泥土的刚度限制管涵的变形,当管涵两侧2/3管径范围内采用水泥质量分数为8%水泥土回填时,管涵的最大竖向及水平变形分别减少了35.1%和55.0%,结构最大应力也由管顶处转移至管涵上部45°附近,受力更为合理。结论 新填筑技术使管涵更好地与周围土体逐步变形协调,产生荷载重分布形成土拱效应,将管顶土压力由管中心向管边缘处转移,有效减小了钢波纹管涵结构变形和应力集中。

**关键词** 高填方路基;大直径钢波纹管涵;填筑施工;设计参数优化;变形控制

中图分类号 TU99;U449.83

文献标志码 A

**引用格式:** 郜新军,包建新,张浩,等. 高填方大直径钢波纹管涵变形机制与控制技术研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):10-19. (GAO Xinjun, BAO Jianxin, ZHANG Hao, et al. Research on deformation mechanism and control technology of large diameter steel corrugated pipe culvert on high fill subgrade[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024,40(1):10-19.)

## Research on Deformation Mechanism and Control Technology of Large Diameter Steel Corrugated Pipe Culvert on High Fill Subgrade

GAO Xinjun<sup>1</sup>, BAO Jianxin<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, ZHOU Tonghe<sup>1,2</sup>, YIN Jihu<sup>1</sup>

(1. School of Water and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. School of Civil Engineering, Huanghuai University, Zhumadian, China, 463000)

**Abstract:** In order to solve the problem of excessive deformation of traditional high fill large diameter steel corrugated pipe culvert construction. Firstly, based on the formula of the pipe compression deformation, proposed a new technology of filling the cement soil material within a certain range on both sides of the pipe culvert. Secondly, the optimum cement mass fraction in the cement soil material

收稿日期:2023-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52078469)

作者简介:郜新军(1981—),男,副教授,博士,主要从事地基基础、地下结构抗震等方面研究。

was determined by laboratory tests; Finally, based on numerical simulation and field tests, analyzed the force and deformation characteristics of the pipe culvert structure constructed with the new technology and its upper vertical soil pressure distribution law, and determined the optimal pipe side filling range. The results show that the new filling technology can make full use of the stiffness of cement soil to limit the deformation of the pipe culvert. The maximum vertical and horizontal deformations of the pipe culvert are reduced by 35.1% and 55.0%, respectively, when cement soil with a mass fraction of 8% cement is used for backfilling within 2/3 of the pipe diameter on both sides of the culvert. Also, the maximum stress is transferred from the top of the pipe to the upper 45° of the pipe culvert, and the stress of the pipe culvert is more reasonable. The new filling technology makes the pipe culvert better coordinate with the surrounding soil, generating load redistribution to form the soil arch effect. The soil pressure on the top of the pipe is transferred from the center of the pipe to the edge, which effectively reduces the structural deformation and stress concentration of the steel corrugated pipe culvert.

**Key words:** high fill subgrade; large diameter steel corrugated pipe culvert; filling construction; design parameters optimization; deformation control

公路的大量修建,不免要穿越沟壑交错、丘陵起伏的地区,高填方路基工程不可避免。高填方工程建设规模的增大,使得横穿高填方下的埋设管涵数量日益增多,管涵结构形式也不断涌现。其中,钢波纹管涵作为一种装配式结构,具有造价低、工期短、工厂集约化生产等优点,在高填方段公路工程中得到了广泛应用<sup>[1-6]</sup>。高填方工程中,由于填土路堤蠕变产生附加沉降,导致高填土范围出现开裂和沉陷,进而引起填方内部及周围结构受力改变,影响结构使用寿命和安全性<sup>[7-9]</sup>。在上覆土压力作用下,土体中埋设的管涵产生压缩变形,导致管顶土体与管侧土体沉降不同,从而产生土拱效应。

目前,国内外学者对钢波纹管填筑施工及力学性能进行了一系列研究。朱旭阳等<sup>[10]</sup>基于实际管涵工程建立有限元模型,对比分析了模型中管涵顶部土压力模拟结果和几种常规的管道土压力公式计算结果。魏瑞等<sup>[11]</sup>考虑了钢波纹管涵的波纹对其惯性矩的影响,将其引入到 Spangler 模型中,得到了管涵的竖向变形公式。J. M. Duncan 等<sup>[12-16]</sup>提出同时考虑弯曲和轴力的土-结构相互作用的 SCI 法,利用有限元模拟涵洞两侧土体填筑过程和活载作用下的管涵力

学性能,确定了最小覆土高度,并且利用有限元模拟计算得出的图表与公式来指导管涵设计。K. Y. Yeau 等<sup>[17]</sup>对多个还在运营中的钢波纹管涵分别进行现场试验及有限元模拟,探究多种因素对钢波纹管涵受力变形影响。M. G. Katona<sup>[18]</sup>利用有限元软件建立了线弹性土体模型、M-C 土体模型和 DS 模型下钢筋混凝土管涵、钢波纹管涵和 HDPE 波纹管涵有限元模型,并且与现场试验数据进行对比,得到了不同土体本构模型对管涵受力变形结果的影响。施绪<sup>[19]</sup>基于某一实际管涵工程开展现场试验和有限元分析,研究了管涵在回填施工过程中的受力变形规律,结果表明,管涵楔形部位填充橡胶混凝土相较于普通混凝土能够改善管涵受力变形。

上述研究多针对高填方路基管涵受力特性,但没有明确实际工程中使用哪种规范来指导施工。现有的公路填方路基施工中通常采用在钢波纹管涵侧面填筑砂土、级配碎石或素填土的填筑施工方法,此类方法由于两侧填土不易密实,无法抵抗管涵过大的侧向力,不能有效地限制钢波纹管涵的变形,易导致管涵在施工及使用过程中变形过大及局部应力集中,进而引起管涵结构的破坏及其上路基的不均匀沉降,具有较大的缺点及安全

隐患。基于此,笔者依托某工程,首先提出在管涵两侧一定范围内填筑水泥土材料的新技术,然后采用室内试验确定水泥土材料中水泥最优质量分数,并建立数值模型,分析不同施工方法下管涵受力及变形特征;研究表明:笔者提出的新填筑技术能充分利用水泥土材料刚度,有效减小钢波纹管涵结构变形和应力集中。

## 1 基于变形控制的钢波纹管涵施工技术

### 1.1 管涵变形理论分析

管涵在周围土体作用下受力如图1所

示。在覆土荷载作用下产生竖向压缩变形并且开始逐渐挤压两侧土体,此时侧向土体由于管侧变形而反作用于管涵两侧产生侧向抗力以限制其继续向管涵两侧变形。随着管涵覆土深度的增加,管土变形协调发展,进而影响管周土压力分布,当柔性管管顶竖向压缩变形大于管两侧土体的压缩变形时,通过土拱效应将管顶上方土体重量逐渐向管两侧土体转移,最终导致管顶竖向土压力小于管顶上方土体自重。由上述分析可知,柔性管管道与土体的相互变形会对管顶竖向土压力起到一定的削弱效果,但是管道压缩变形也不能超过其最大容许值。

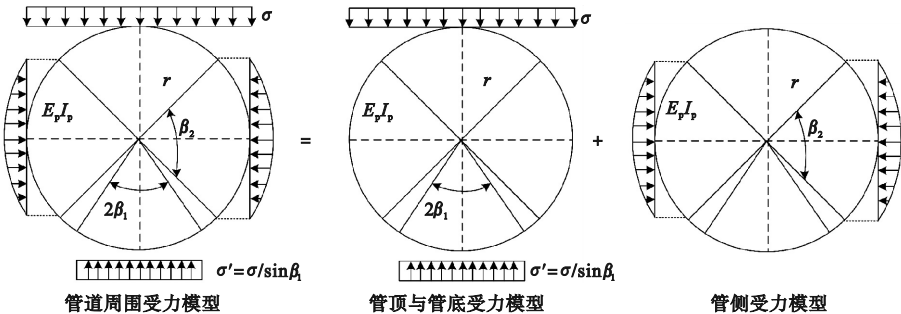


图1 管涵在土体作用下的计算模型

Fig. 1 Calculation model of culvert under the action of soil

在管涵覆土的荷载作用下,影响受弯构件的变形因素主要是弯曲变形,对管侧、管顶及底部压力作用下的弯曲变形使用结构力学方法进行计算并叠加,可以得到管涵的压缩变形:

$$\Delta p_h = -\frac{K_c e r_0^4}{E_p I_p} \Delta p. \tag{1}$$

$$\Delta p_v = \frac{2 K_d \sigma r_0^4}{E_p I_p}. \tag{2}$$

$$\Delta p = \Delta p_h + \Delta p_v = \frac{2 K_d \sigma r_0^4}{E_p I_p + K_c e r_0^4}. \tag{3}$$

式中: $\Delta p_h$  为管侧水平压力作用下管环水平变形; $\Delta p_v$  为管顶及管底垂直压力作用下管环水平变形; $\Delta p$  为水平压力和垂直压力作用下,管环水平压缩变形; $K_d, K_c$  分别为基床系数和侧压力系数; $r_0$  为管道结构的平均半径; $E_p, I_p$  分别为管涵弹性模量和惯性矩; $e$  为管

侧填土的弹性抗力系数。

从式(3)可知,对于传统管涵施工而言,由于管侧填土刚度不大及压实度难以满足《公路路基施工技术规范》(JTGF10—2019)要求,导致管侧填土的弹性抗力系数  $e$  及管侧填土侧压力系数  $K_c$  过小,最终致使管涵压缩变形过大。因此,提高管侧填土的弹性抗力系数  $e$  及管侧填土侧压力系数  $K_c$ ,可在一定程度上减小管涵变形。

### 1.2 管涵高填方路基填筑施工技术的改进

实际工程中,为便于施工,管涵两侧填土一般采用砂土或级配碎石,此类土的刚度及强度有限;而且在填方路基施工中由于管侧空间狭小,管侧及管底两侧楔形区填土一般由于所处位置位于压实施工的死角,往往无法满足压实度要求,原本应该密实增强的填

土区域往往成为薄弱区,进而对管涵变形及受力产生不利影响。通过上述对钢波纹管涵变形理论分析可知,进一步优化管侧及管底两侧楔形区填土工艺,提高管侧填土的强度与抗力性能,不失为一种降低管涵变形的有效措施。基于此,笔者提出了在管涵两侧一定高度范围内填充水泥土代替普通填土或砂土,并对底部楔形部位采用注浆密实处理的路基填筑新技术。结构构造示意图如图 2 所示,具体施工流程见图 3。

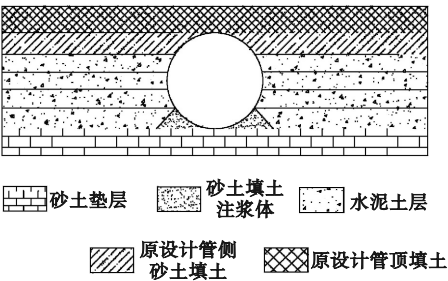


图 2 结构构造示意图

Fig. 2 Structural construction diagram

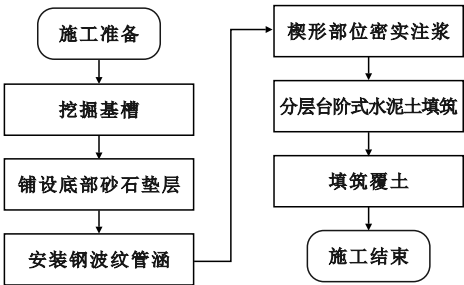


图 3 施工工艺流程

Fig. 3 Construction process flow chart

表 1 水泥质量分数与抗剪强度指标及弹性模量的关系

Table 1 The relationships between cement mass fraction and shear strength index and elastic modulus

水泥质量分数/%	养护龄期/d	弹性模量/MPa	抗剪强度指标	
			有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)
5	28	196	348.59	28.76
8	28	310	411.92	33.58
11	28	353	432.02	34.16

由表 1 可知,在养护龄期相同时,随着水泥质量分数的增大,试样的有效黏聚力和有效内摩擦角有显著的增加,表明其抗剪强度

在构造施工中,关键是分层台阶式水泥土层的填筑及底部楔形部位密实注浆处理,即在基槽底部垫层材料上对称回填一对分层台阶式、密实的水泥土层,每层台阶高度均为 20 cm,每层台阶压实度均不小于 96%。由于使用的水泥土本身容易密实且强度高,所以其比传统回填材料更加容易达到压实度要求;同时楔形部位采用注浆处理更容易密实,在进行注浆压实处理中,浆液采用水灰比为 0.5 的水泥砂浆,注浆压力为 0.2~0.3 MPa,使管涵处于周围土体完全均匀密实状态。

2 填筑用水泥土配比试验

通过室内试验确定水泥土材料中最佳水泥质量分数,由于填方区存在大量黄土可作为填料,因此选用水泥-黄土拌合水泥土作为填筑材料。为了选取水泥的最优质量分数,对不同质量分数的水泥土进行材料强度试验。试验所选用的土样为工程项目所在地的黄土,水泥为型号 P. O42.5 的低碱普通硅酸盐水泥,试验时水泥土的压实度不小于 96%。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)制备试样并进行三轴试验。制作试样时,试验用土已经经过除杂、风干、碾散和过筛,对于扰动土采用击样法制备直径 39.1 mm、高度 80 mm 的试样,针对水泥质量分数为 5%、8%、11% 的水泥土试样,分别测试其 28d 强度及弹性模量。水泥质量分数与抗剪强度及弹性模量指标见表 1。

增大。三种试样的有效黏聚力分别为 348.59 kPa、411.92 kPa 和 432.02 kPa,水泥质量分数为 8% 和 11% 的试样相对于 5% 的



试样,增长幅度分别为 18.2% 和 4.9%;三种试样的有效内摩擦角分别为 28.76°、33.58°、34.16°,水泥质量分数为 8% 和 11% 的试样相对于 5% 的试样,增长幅度分别为 16.8% 和 11.0%;三种试样的弹性模量分别为 196 MPa、310 MPa、353 MPa,水泥质量分数为 8% 和 11% 的试样相对于 5% 的试样,增长幅度分别为 58.1%、13.9%。可知在水泥质量分数为 8% 时,试样的有效黏聚力、有效内摩擦角及弹性模量增长幅度均为最大。因此,综合试验结果及工程成本,选取水泥质量分数 8% 作为设计值。

### 3 管涵路基填筑区参数优化及管涵结构力学特征分析

#### 3.1 工程概况

笔者以 310 国道洛三界至三门峡西段南移工程为研究对象,该公路工程总体呈东西走向,路线全长 89.9 km。其中桩号 ZK66 + 490.0 为高填方下钢波纹管涵工程,管径 3 m,管材采用 Q345 钢板,波距 230 mm,波高 64 mm,壁厚 6 mm。管涵顶部以上填土路基高度 17.74 m,钢波纹管涵断面形状及尺寸如图 4 所示。工况一(原设计方案):管涵两侧范围内采用天然级配砂土回填,管顶至路面设计标高范围内采用碎石加场地周围黄土混合回填。工况二:管涵两侧 2/3 管径范围内采用水泥质量分数为 8% 的水泥土回填,管顶回填方式同工况一。工况三:管涵两侧全部范围内采用水泥质量分数为 8% 的水泥土回填,管顶回填方式同工况一。

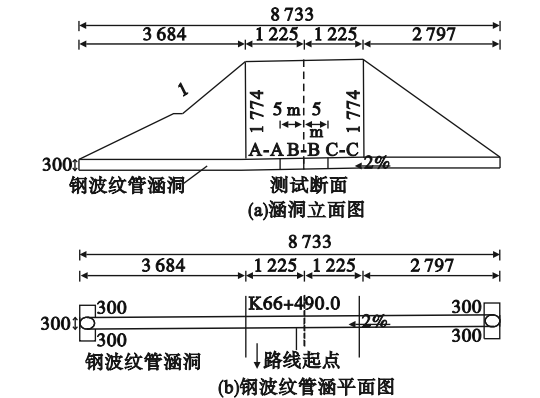


图 4 钢波纹管涵结构图

Fig. 4 Steel corrugated pipe culvert structure diagram

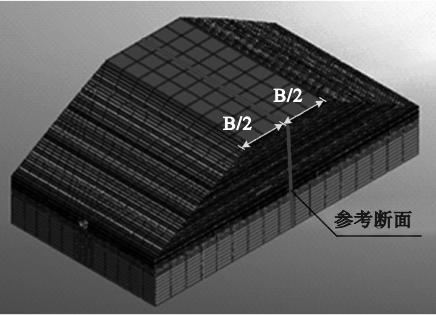
#### 3.2 数值模型的建立

采用有限元分析软件 ABAQUS 对钢波纹管涵进行数值建模。考虑到钢波纹管涵真实变形情况,沿管涵轴线方向选取 5 倍波距即 1.15 m 作为计算长度;考虑到实际工况与管径大小,管涵两侧方向选取 20 m 作为计算长度;考虑现场地质条件与填土高度,管涵竖直方向选取地基土高度为 10 m(其中有 0.6 m 厚的管涵范围内的砂石垫层),填土高度从管涵底部至路面设计标高为 20.4 m,竖直方向长度取 31 m。实际钢波纹管涵工程使用的是 Q345 型钢板,管涵周围土体刚度远小于钢板刚度,一般认为在填土过程中很难出现塑性破坏的情况,因此 Q345 型钢板的管涵本构模型使用的是线弹性模型。对地基土体与回填土体均采用理想弹塑性的 M-C 屈服准则进行模拟,能够较好地反映出土体非线性的力学特点。钢波纹管涵、地基土体、基础垫层、管涵范围回填土体和管涵顶部回填土体的物理参数见表 2,数值模型如图 5 所示。

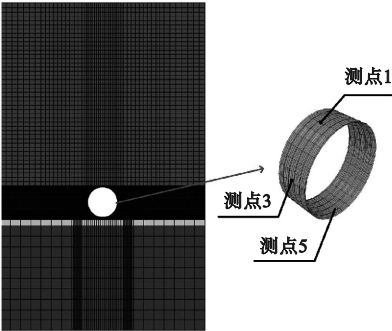
表 2 钢波纹管涵及土体物理参数

Table 2 Physical parameters of steel corrugated pipe culvert and soil

材料	弹性模量/MPa	泊松比	重力密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
钢波纹管涵	210 000	0.30	78.5	—	—
地基土	30	0.35	18.0	27	18
砂土	50	0.30	17.0	0	30
水泥土(8%)	310	0.30	20.0	412	34
回填土体	35	0.35	21.5	15	25



(a)三维数值模型



(b)断面详图

图 5 钢波纹管涵洞有限元数值模型单元划分

Fig. 5 Element division of finite element numerical models of steel pipe culvert

在图 5(b)中,选取管顶处为测点 1,管腰处为测点 3,管底处为测点 5,对三种工况下钢波纹管涵受力和变形进行分析,测点 1、测点 3 及测点 5 的位置与现场试验中布设的测试节点位置相同。各测点水平相对变形值为测试节点水平变形值与测点 5 水平变形值之差;各测点竖向相对变形值为测试节点竖向变形值与测点 5 竖向变形值之差。

3.3 计算结果分析

3.3.1 管涵变形对比

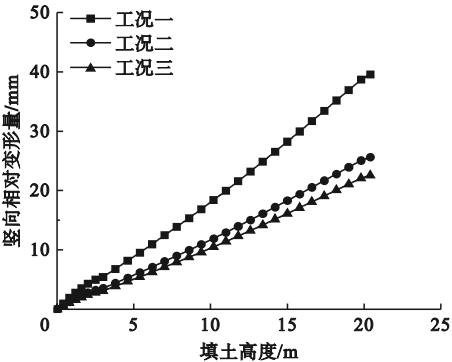
填土完成时三种工况下的测点 1 竖向相对变形和测点 3 水平相对变形结果见表 3。不同工况下各测点竖向和水平相对变形与填土高度关系曲线如图 6 所示。由表 3 和图 6 可知,三种不同工况下,管涵竖向变形与水平变形规律相似,且随着管涵覆土高度的增加而呈近似线性增加趋势。当填土高度达到路面设计标高时,三种工况的竖向相对变形量分别为 39.56 mm、25.65 mm 和 22.59 mm,

相对工况一,工况二和工况三下竖向相对变形分别减少了 35.1% 和 42.9%;三种工况的水平相对变形值分别为 14.63 mm、6.58 mm 和 5.65 mm,相对工况一,工况二和工况三下水平相对变形分别减少了 55.0% 和 61.4%。说明水泥土填筑能够有效减小管涵变形,同时其减小管涵变形的能力随着加固区高度的增加逐步减弱。

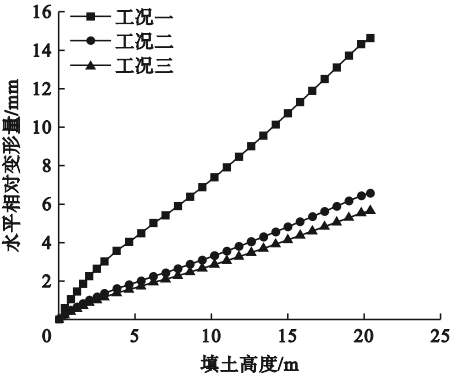
表 3 三种工况下各测点最大变形量

Table 3 The maximum deformation of each measuring point of three working conditions

工况	测点 1 竖向 相对变形/mm	测点 3 水平 相对变形/mm
一	39.56	14.63
二	25.65	6.58
三	22.59	5.65



(a)测点1竖向相对变形与填土高度关系



(b)测点3水平相对变形与填土高度关系

图 6 各测点竖向和水平相对变形与填土高度关系

Fig. 6 The relationships between vertical and horizontal relative deformation of each measuring point and filling height

3.3.2 管涵最大等效应力对比

图7为三种工况下,填筑完成时的钢波纹管涵等效应力云图。

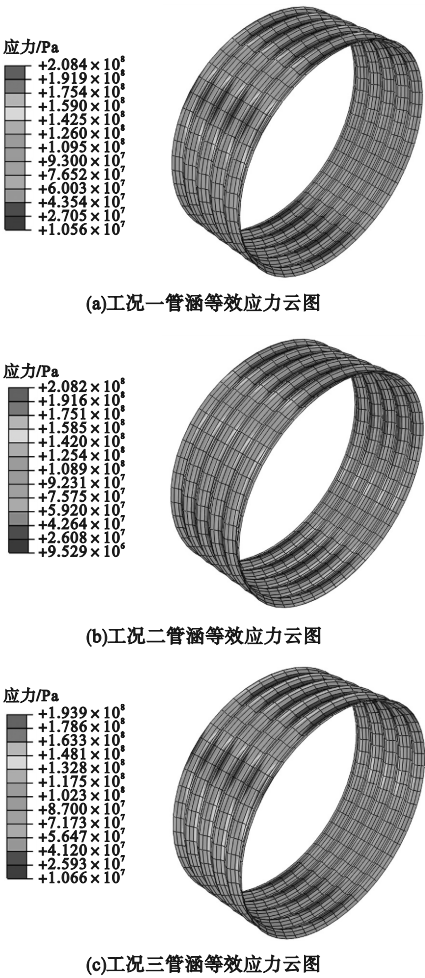


图7 三种工况填筑完成时钢波纹管涵等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress plots diagram of steel corrugated pipe culvert when filling is completed

从图7可以看出,工况一下最大等效应力位于管涵顶部,而工况二和工况三下最大等效应力均位于管涵上部45°附近,三种不同工况下最大等效应力分别为208.4 MPa、208.2 MPa和193.9 MPa,等效应力值变化不大。水泥土没有覆盖管涵时,管涵最大等效应力出现在管顶处;水泥土覆盖管涵时,管涵最大等效应力由管顶处转移至管涵上部45°附近。总体得出,管侧填土刚度对管涵最大等效应力影响不大。

3.3.3 管涵竖向土压力对比

图8为三种工况下,填土完成时的土压力分布图。

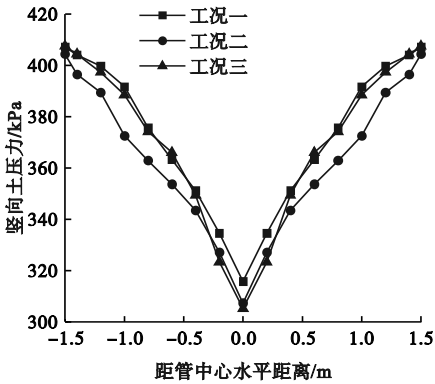


图8 三种工况填土完成时管顶水平面内的土压力分布图

Fig.8 Earth pressure distributions in horizontal plane of pipe top when filling is completed

从图8可以看出,三种工况的管顶竖向土压力均呈现管顶中心处土压力小、管边缘处土压力大的“V”型分布。这是由于土-钢刚度存在差异,土拱作用将管顶上方土体重量逐渐向两侧土体转移造成的。工况一下沿管涵水平方向上各点竖向土压力均要大于工况二与工况三,说明采用水泥土对管涵两侧填筑较原设计更能发挥土拱效应。

综上所述,采用两种新的基于变形控制的施工方法能有效减小钢波纹管涵竖向相对变形和水平相对变形,但对最大等效应力影响不大。考虑到工况二相比工况三既能满足工程对设计变形的要求,而且可以节省工期及节约工程造价,因此实际工程中选取工况二进行管涵施工。

4 工程施工变形监测

4.1 测点及测试元件布设

工程施工采用工况二,在施工中进行了现场试验,选取关键测试截面A、B、C(见图4(a)),布设变形测点和土压力测点(见图9)。其中选取典型断面B对不同填土高度下管涵受力变形及管顶土压力规律进行监测

分析,断面 A 和断面 C 处管涵受力变形及管顶土压力规律和断面 B 类似。

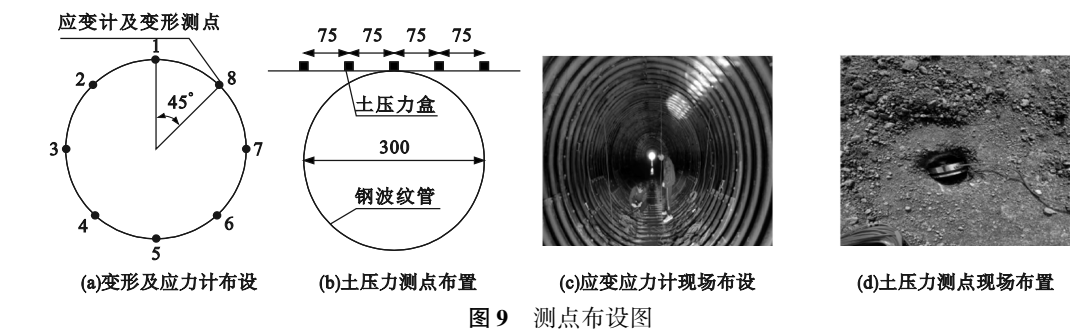


Fig. 9 Measuring point layout diagram

4.2 管涵竖向变形

不同测点竖向相对变形曲线如图 10 所示。从图中可以看出,在不同高度填土作用下,管涵各测点竖向相对变形基本呈线性增加趋势。各测点竖向相对变形量从小到大依次为测点 4、测点 3、测点 2、测点 1,其中测点 4 变形量为 7.85 mm,测点 1 变形量为 28.90 mm。

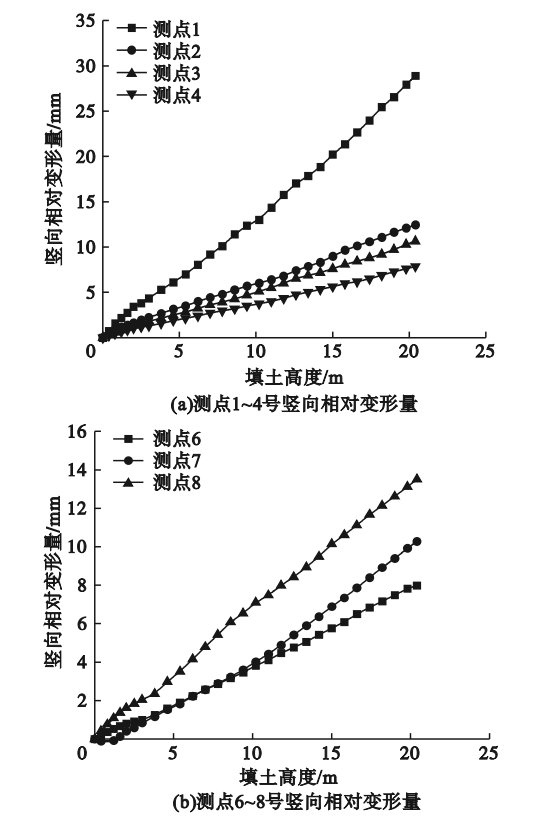


图 10 管涵各测点竖向相对变形与填土高度关系  
Fig. 10 The relationships between vertical relative deformation of each measuring point of pipe culvert and filling height

各测点竖向位移没有出现明显的减缓和急剧增加趋势,说明管涵仍处于弹性状态,即未进入屈服状态;且测点 1 的最大沉降量和数值计算中相应位置的沉降量 25.65 mm 较吻合。对比图 10(a)和图 10(b)可以发现,对称位置处的两个测点的竖向相对变形规律基本一致,填土完成时,位移值相差最大的是测点 2 和测点 8,最大位移差为 1.05 mm。分析原因是由于现场试验很难实现严格的两侧对称回填和测量误差所导致,但对整体的竖向变形结果影响不大。

4.3 管涵水平变形

各测点水平相对变形曲线如图 11 所示。从图中可以看出,在填土荷载作用下,管涵水平变形表现为外凸的形式,各测点(除测点 1 外)随着填土高度增加,逐渐向管涵左侧产生水平位移,其曲线近似呈线性增长趋势。在填土完成时,测点 2、测点 3 和测点 4 最大水平相对变形分别为 5.79 mm、7.20 mm、3.54 mm;且测点 3 的最大水平相对变形量和数值计算中相应位置的水平相对变形量 6.58 mm 较吻合。而管顶测点 1 曲线没有明显的变化规律,在填土过程中曲线时而左移,时而右移,最终水平变形值为 1.57 mm,这主要是由于现场很难实现严格的对称回填所致。对比图 11(a)和图 11(b)可以发现,对称位置处的两个测点的水平相对变形规律基本一致,填土完成时,位移值相差最大的是测点 3 和测点 7,最大位移差为 0.62 mm。



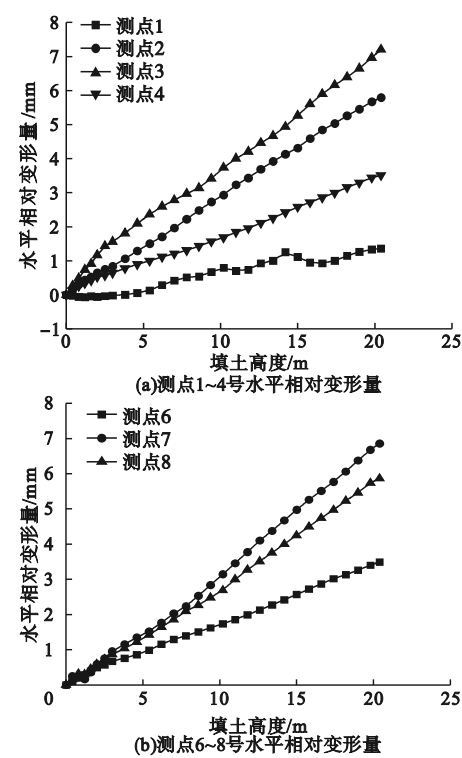


图 11 管涵各测点水平相对变形与填土高度关系

Fig. 11 Relationships between horizontal relative deformation of measuring points and filling height

4.4 管涵顶部竖向土压力

选取 5 处管顶填土高度(4 m、8 m、12 m、16 m 和 17.4 m)进行土压力分析,土压力计算式为

$$P = K(F_i - F_0).$$
 (4)

式中: $K$  为标定系数; $F_i$  为各工况下读数; $F_0$  为各工况下初始读数。

图 12 为不同填土高度沿管径水平方向的土压力分布图。从图中可以看出,随着填土高度的增加,管径水平方向上各测点竖向土压力也随之增大。在填土高度相同时,管径水平范围内各测点竖向土压力并不是均匀分布,管涵边缘处土压力明显大于管涵中心处土压力,且随着填土高度的增加,这种现象也越发明显。试验测试与数值模拟结果相同,均呈现管中心处土压力小,管边缘处土压力大的“V”型分布,但现场试验土压力均略大于数值模拟下的土压力,且现场试验与数

值模拟之间土压力差值随着填土高度的增加而逐渐减小,在填土完成时基本一致。

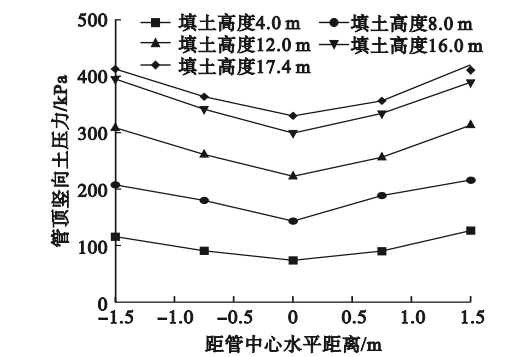


图 12 不同填土高度沿管径水平方向土压力分布

Fig. 12 The soil pressure distributions of filling height along the horizontal direction of the pipe diameter

当填土至管顶高度 17.4 m 时,管顶中心处土压力为 329.9 kPa,管左右侧压力分别为 412.9 kPa 和 420.3 kPa,说明在竖向荷载作用下,管涵能够与周围土体逐步变形协调,产生荷载重分布形成土拱效应,将管顶土压力由管中心向管边缘处转移,利于结构受力。

5 结 论

(1)提出了一种在管涵两侧一定范围内填筑水泥土材料的新技术,选用水泥固化黄土作为填筑材料;水泥固化黄土的抗剪强度、有效内摩擦角及压缩模量均随水泥含量的增加而增大,且以上参数在水泥质量分数为 8% 时增长幅度最大。因此针对黄土填料,在设计中采用水泥质量分数为 8% 的水泥土是经济合理的。

(2)随着水泥土填筑区高度的增加,水泥土对管涵变形的影响逐步减弱,综合考虑工程经济性和施工效果,提出了工况二中加固区高度为 2/3 管涵高度时最合理。此时管涵的最大竖向变形和水平变形相对工况一分别减少 35.1% 和 55.0%。

(3)管顶竖向土压力随着填土高度的增加而增加,呈现管中心处土压力小、管边缘处土压力大的“V”型分布规律,管边缘处与管中心处之间差值随着填土高度的增加而增

大;且工况二和工况三中管顶竖向土压力均小于工况一,说明采用新填筑方法较原设计更能发挥土拱效应。

## 参考文献

- [1] 温庆杰. 钢筋混凝土圆管涵受力性能的试验及理论研究[D]. 长沙:湖南大学,2004.  
(WEN Qingjie. Experimental and theoretical research on mechanical behaviors of recircular pipe [D]. Changsha:Hu'nan University,2004.)
- [2] 刘维正,吴民晖,冯瑜,等. 机场高填方红黏土地基 GC-CFG 组合桩处理试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(1):156-168.  
(LIU Weizheng, WU Minhui, FENG Yu, et al. Experimental study on treatment of high fill lateritic clay foundation airport with GC-CFG composite pile [J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(1): 156 - 168.)
- [3] MOORE R G, BEDELL P R, MOORE I D. Investigation and assessment of long-span corrugated steel plate culvert [J]. Journal of performance of constructed facilities, 1995, 9(2):85 - 102.
- [4] 李祝龙. 公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
(LI Zhulong. Study on design and construction of corrugated steel pipe culverts [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.)
- [5] 柏春红. 大直径钢质波纹管力学性能研究[D]. 西安:西安工业大学,2009.  
(BAI Chunhong. Research on mechanical properties of large diameter steel corrugated pipe [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.)
- [6] 乔建刚,彭端,王春云. 重载交通下钢波纹管涵对沥青路面的变形影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):112 - 120.  
(QIAO Jiangang, PENG Rui, WANG Chunyun. Influence of steel corrugated pipe culvert on deformation of asphalt pavement under heavy traffic [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(1): 112 - 120.)
- [7] 郭院成,魏艳卿,韩仲. 高填方后处理复合路基荷载传递机理[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(5):775 - 781.  
(GUO Yuan Cheng, WEI Yanqing, HAN Zhong. Study on load transfer mechanism in post-processed high fill subgrade embankment [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(5): 775 - 781.)
- [8] 包龙生,王腾,和海芳,等. 应用管涵处治桥路过渡段差异沉降研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):495 - 504.  
(BAO Longsheng, WANG Teng, HE Haifang, et al. Differential settlement of bridge transition section with culvert [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 495 - 504.)
- [9] 赵明华,周华斌,刘晓明. 填石路堤动力特性的试验与数值模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(3):387 - 391.  
(ZHAO Minghua, ZHOU Huabin, LIU Xiaoming. Experiment and numeric simulation study on dynamical characteristic of rock filling embankment [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2007, 23(3): 387 - 391.)
- [10] 朱旭阳,何欢,高文学,等. 大直径钢波纹管管顶土压力分析[J]. 中外公路,2015,35(4):39 - 43.  
(ZHU Xuyang, HE Huan, GAO Wenxue, et al. Analysis of soil pressure on top of large diameter steel bellows pipe [J]. Journal of China and foreign highway, 2015, 35(4): 39 - 43.)
- [11] 魏瑞,曹周阳,顾安全,等. 高填方钢波纹管涵垂直土压力计算[J]. 交通运输工程学报,2018,18(3):74 - 83.  
(WEI Rui, CAO Zhouyang, GU Anquan, et al. Calculation of vertical earth pressure of high-fill steel corrugated pipe culvert [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2018, 18(3): 74 - 83.)
- [12] DUNCAN J M. Soil-culvert interaction method for design of metal culverts [J]. Transportation research record, 1978, 678: 53 - 59.
- [13] DUNCAN J M. Behavior and design of long-span metal culverts [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1979, 105(3): 399 - 418.
- [14] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1970, 96(5): 1629 - 1653.
- [15] DUNCAN J M, JEYAPALAN J K. Deflection of flexible culverts due to back fill compaction [J]. Transportation research record, 1982, 878: 10 - 17.
- [16] DUNCAN J M, SEED R B, DRAWSKY R H. Design of corrugated metal box culverts [J]. Transportation research record, 1985, 1008: 33 - 41.
- [17] YEAU K Y, SEZEN H, FOX P J. Simulation of behavior of in-service metal culverts [J]. Journal of pipeline systems engineering & practice, 2014, 5(2): 04013016.
- [18] KATONA M G. Influence of soil models on performance of buried culverts [C]// Transportation research board 94th annual meeting. Washington: Highways, 2015.
- [19] 施绪. 回填施工对覆土钢波纹管涵受力性能影响分析[D]. 北京:北京交通大学,2019.  
(SHI Xu. Analysis of backfilling construction influence on mechanical behavior buried corrugated steel pipe culverts [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)