

高填土大跨波纹管涵有限元力学性能分析*

穆程, 谭红平, 彭海涛

(湖南省交通规划勘察设计院, 湖南长沙 410008)

摘要: 结合依托工程, 对高填土大跨波纹管涵采用有限元进行力学性能分析, 并讨论了不对称填土、地基不均匀沉降等不利因素对波纹管涵应力和变形的影响。结果显示, 波纹管涵变形和应力随填土高度的加大不断上升, 但上升趋势逐渐减小, 土一拱效应明显; 管涵的力学行为受不对称填土的影响较大, 结构变形和应力受地基不均匀沉降的影响较小, 波纹管涵结构两侧对称填土要求较高, 但其适应高填方及地基变形的能力较强。

关键词: 涵洞; 波纹管; 高填土; 有限元分析

中图分类号: U449

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0172-06

波纹管涵是一种具有较高承载力和较强变形适应能力的地下柔性结构, 它依靠结构与周围土体之间的相互作用抵抗荷载, 特别适用于高填方路段和不良地基。但该结构和土体一起受力, 其力学行为为较复杂。该文以湖南省某高速公路 K64+292 波纹管涵为依托工程, 借助有限元软件, 对其施工全过程中的受力和变形进行数值分析, 探讨不利因素下的结构性能, 为这类工程设计提供参考。

1 工程概况

该工程波纹管涵跨径 1~5 m, 管顶填土高 17.9 m, 路基宽 24.5 m, 涵洞基底铺砌 40 cm 厚砂垫层。湖南省属于雨水丰富的地区, 需使用透水性材料回填管涵两侧至管顶的部分, 用隧道弃渣填管顶至路面, 其主要成分为微风化和中风化岩石。波纹管涵布置见图 1。

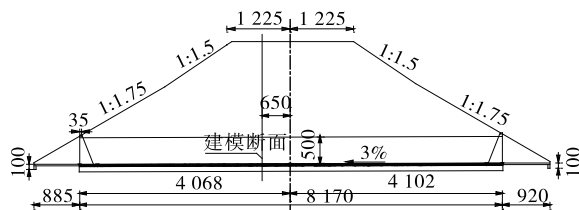


图 1 波纹管涵布置(单位: cm)

钢波纹管为镀锌 Q235 热轧钢, 波距 200 mm, 波高 55 mm, 厚 7 mm。现场预制拼装, 每周分成 5 块, 纵向上预留 5% 预拱度, 接缝处采用 8.8 级 M24 镀锌高强螺栓, 施工完成后采用环氧树脂胶密封。

波纹管涵的施工过程: 先进行基坑开挖和基

础施工, 然后拼装波纹管, 最后回填土体。土体回填采用分层填筑, 共分 12 种工况, 每级填土厚度见表 1, 要求两侧对称回填。管壳外管体两侧不仅要分层压实回填, 而且要做到既同步又对称, 高差不大于 0.3 m, 压实度不低于 96%。

表 1 波纹管涵施工工况

工况编号	填土高度/m	工况编号	填土高度/m	工况编号	填土高度/m
1	1.0	5	5.0	9	14.2
2	2.2	6	6.1	10	17.1
3	3.1	7	7.8	11	19.9
4	4.3	8	11.4	12	22.7

2 有限元模型

运用 ANSYS 对该结构建立模型。用 Shell63 单元、Solid45 实体单元分别模拟波纹管结构和土体, 土体和管涵的连接通过节点耦合来实现。考虑活载的扩散作用及土与土之间的影响, 取管涵的轴向中心偏左侧 6.5 m 处节段(见图 1)进行分析, 模型宽度为 $2 \times 7 \text{ m} + 5 \text{ m} = 19 \text{ m}$, 轴向长度为 4 个波长, 管顶填土高度为 17.9 m。模型边界条件: 土体两侧边假设为只有 X 方向受约束的横向链杆, 土体底面为固结; 将管涵作为一个整体来考虑, 不考虑栓接。此外, 轴向受力、变形远小于横截面的受力、变形, 故忽略轴向受力和变形。结构有限元模型见图 2, 各材料参数见表 2。

* 基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划(201324;201124)

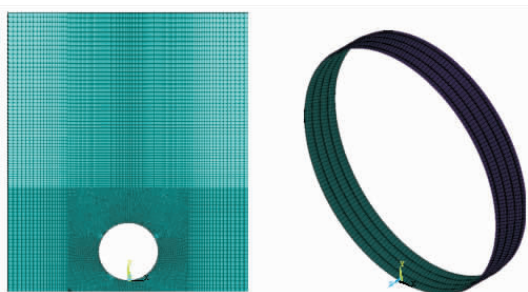


图 2 波纹管涵有限元模型

表 2 波纹管涵有限元模型中的材料参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
钢板	210×10 ³	0.30	7.85×10 ³
基础	200	0.25	2.20×10 ³
垫层	150	0.25	2.00×10 ³
回填土	60	0.30	1.80×10 ³

3 施工阶段模拟分析

3.1 典型工况下的应力和变形分析

选择具有代表性的工况 5 和 12 进行分析,得到不同阶段波纹管涵的变形和应力(见图 3~5)。

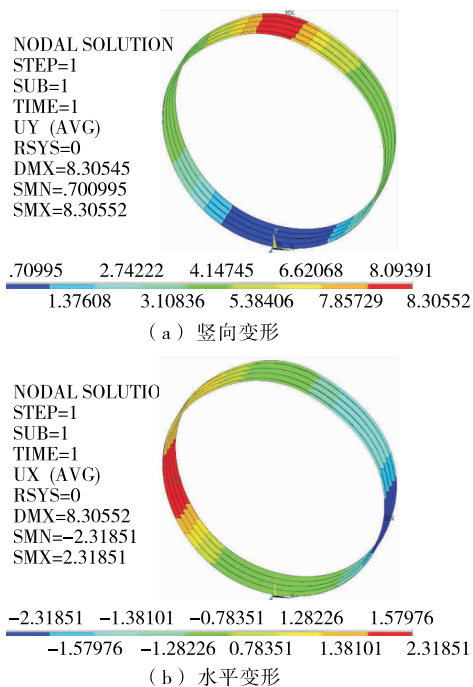


图 3 工况 5 下管涵变形云图(单位:mm)

由图 3~5 可知:填土高度为 5 m 时,管顶(测点 1)向上最大竖向变形为 8.31 mm,管侧(测点 4)最大水平变形为 2.32 mm,最大等效应力为 13.53 MPa

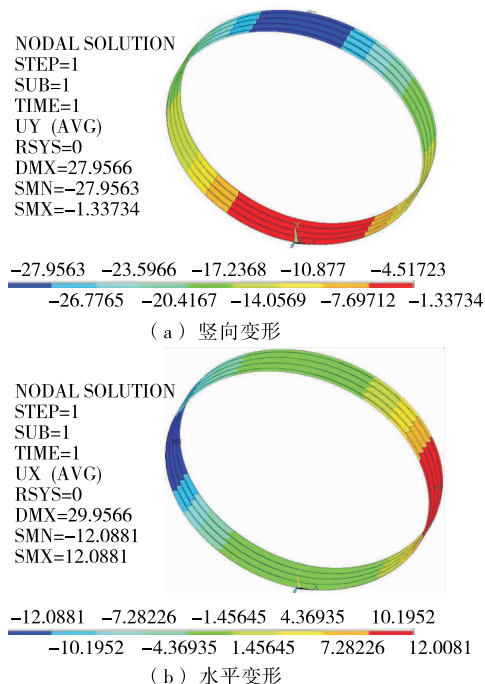


图 4 工况 12 下管涵变形云图(单位:mm)

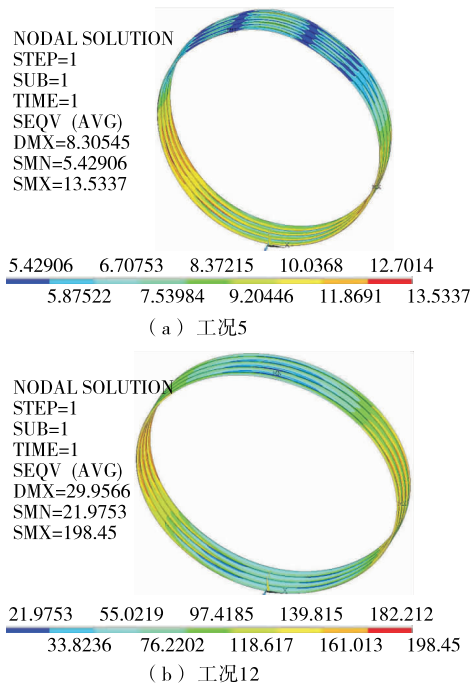


图 5 管涵等效应力云图(单位:MPa)

(测点 5);填土高度为 22.7 m 时,管顶(测点 1)向下最大竖向变形为 27.96 mm,管侧(测点 4)的最大水平变形达 12.09 mm,该位置处的最大等效应力为 198.45 MPa。

3.2 施工全过程分析

用有限单元模型模拟施工,选择 7 个点(见图 6)分析结构在施工过程中的变化。

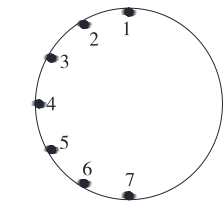
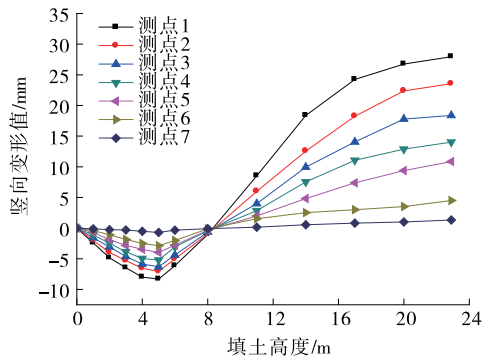


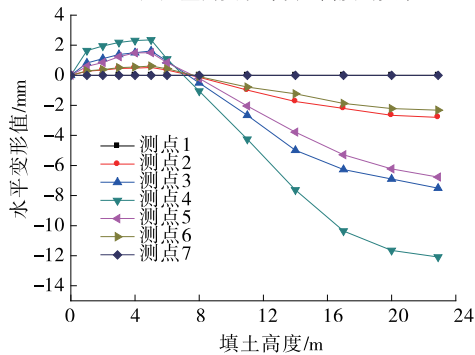
图6 测点布置示意图

3.2.1 管涵变形

管涵各测点在各施工阶段(填土高度)的竖向和水平变形见图7。



(a) 竖向变形与填土高度的关系



(b) 水平位移与填土高度的关系

图7 管涵变形与各测点填土高度的关系

由图7(a)可知:填土高度未至管顶时,土体施加的挤压力使各测点产生不同位移,其中管涵上翘,管顶(测点1)上移最大。填土达到管顶(工况5)时位移最突出,达到8.31 mm,而管底(测点7)变形几乎为零。填土高过管顶后,整个结构都下挠,而且下挠量与填土高度成正相关,测点1的下挠程度最大,达到27.96 mm。

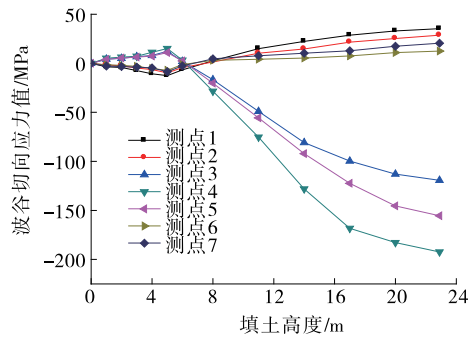
由图7(b)可知:对称回填时,管顶和管底测点都没有发生水平变形。其他测点,填土高度小于管径时,随填土高度的增大发生内凹,填土高度等于管顶时内凹最大;填土高度大于管顶高度时,管顶土体的竖向作用使波纹管涵发生外凸,管顶填土高度越大外凸越剧烈;填土完成时水平方向最大变形出现

在测点4,为12.09 mm。

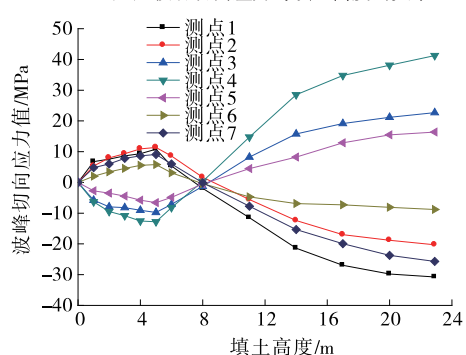
可见,填土到不同位置,管涵变形表现出不同规律:1)填土至管涵两侧时,规律不清楚;2)填土至管顶时,变形与填土高度成正相关;3)填土超过14 m时,变形增长趋势明显下降,原因在于土拱效应的作用。土拱效应在填土达到一定程度时才开始表现得明显。

3.2.2 管涵应力

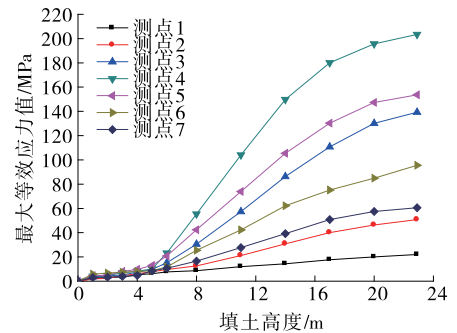
波纹管涵各测点的波峰、波谷切向应力和最大等效应力见图8。



(a) 波谷切向应力与填土高度的关系



(b) 波峰切向应力与填土高度的关系



(c) 最大等效应力与填土高度的关系

图8 管涵应力与各测点填土高度的关系

由图8(a)、(b)可知:在管侧填土,管涵切向应力变化很小,变化趋势与填土高度成正相关。波谷管侧(测点3~5)受拉,管顶与管底部位(测点1、2、6、7)受压;波峰则相反。填土超过管顶时,对于波谷,受拉部位切向由受拉变成受压,且与填土高度成正相关。填

土施工完毕,最大切向压应力出现在管侧(4号点),为-192.34 MPa,波谷受压部位受力发生改变,由受压转化成受拉;最大切向压应力出现在管顶(测点1),为35.26 MPa。波峰受压部位也由受压转化成受拉,并与填土高度成正相关;此时,与之对应的最大切向拉应力位于测点4,达41.27 MPa,波峰受拉部位的切向应力由拉应力转化为压应力,管顶(测点1)的切向压应力达到最大,为-32.76 MPa。

由图8(c)可知:施工过程中各测点的等效应力与回填高度成正相关。填土阶段应力最大位置发生变动,逐渐由测点6、7(管底附近)转移到测点4(管侧附近),最大等效应力达198.45 MPa。

可见,填土位置与管涵应力间的关系如下:1)于管侧,两者之间没有表现出明显的规律,应力没有发生大的变化。2)于管顶至14 m,两者之间接近线性分布。3)超过14 m后,应力增长速度呈下降趋势,这是由于土体荷载沿两侧扩散,随着高度的增加土体对管涵的作用减小。4)相邻波峰和波谷之间均出现拉、压应力转换,使钢材的性能得到很好发挥,也使管涵能保持良好受力状态。同时管涵中压应力大于拉应力,在实际工程中应更多考虑土体的压应力。

3.2.3 管涵径向土压力

波纹管涵各测点的径向土压力变化见图9,径向土压力和管涵变形、受力之间的关系见图10和图11。

由图9可知:填土处于一定范围内时,填土与径向土压力呈正相关。填土位于管侧时,不会引起侧面所受的土压力产生大的变化;填土至管顶后,管侧径向土压力增长迅猛,但增长速率减小;填土越高,上部土体在管涵上产生的作用越小,在管涵内引起的应力也减小,进而管涵得到保护。管涵径向土压力增幅从大到小依次为管底(测点7)、管顶(测点1)、

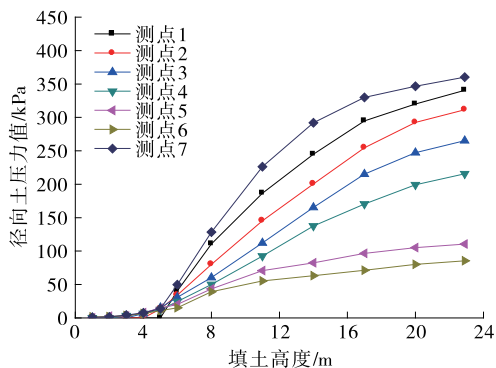


图9 径向土压力与各测点填土高度的关系

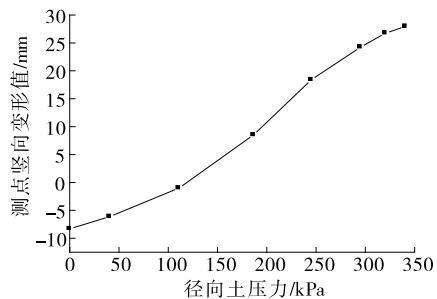


图10 测点1 土压力与竖向变形的关系

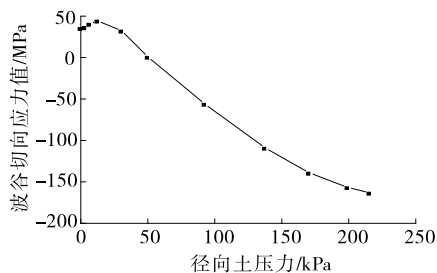


图11 测点4 土压力与切向应力的关系

管涵斜上方(测点2~4)、管涵斜下方(测点5~6)。填土结束后,管涵最小土压力出现在测点6,约为85.38 kPa;最大径向土压力出现在底部测点7,约为360.18 kPa,是最小值的4.2倍。可见,在填土过程中管涵周围的土压力并不对称。

从图10可知:管涵顶部(测点1)的竖向变形与土压力成正相关,但上升趋势不断减慢。

从图11可知:在填土高度小于管顶时,波谷的切向表现为受拉,与管侧径向土压力成正相关;当填土至管顶处时,应力由受拉转变为受压,并与径向土压力成正相关,但增长速率不断减小。表明径向土压力能起到限制管涵变形的作用。

4 不利工况影响分析

4.1 不对称回填施工的影响

设置不对称回填工况,分别以1和3 m作为基准高度,在其左侧分别增加0.3、0.5和1.0 m。基准回填分别为1和3 m、两侧填土差为1.0 m时的模型及变形见图12、图13,回填高度不同和两侧高差不对称时管涵发生的最大位移及等效应力见表3。

由图12、图13和表3可知:左侧土体压力使管涵发生的变形为左侧内凹、右侧外凸。选择的基准为1 m,不对称高差从1 m增至2 m时,竖向产生的最大位移达到3.96 mm(方向为向下),水平变位约为2.38 mm(方向为向右);最大等效应力提高4.41 MPa,超过2倍。基准选定3 m,不对称回填高差由

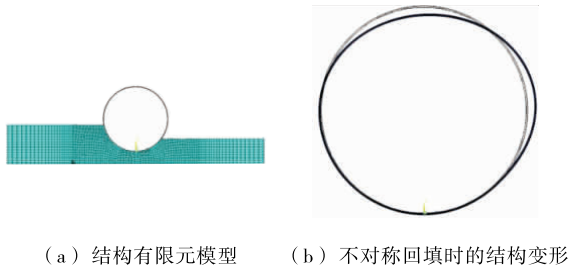


图 12 基准填土 1 m、填土差 1 m 的有限元模型及变形

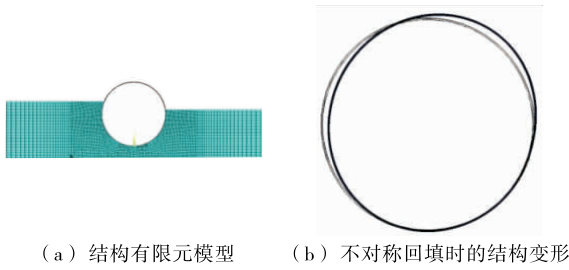


图 13 基准填土 3 m、填土差 1 m 的有限元模型及变形

表 3 不对称回填对结构变形和应力的影响

基准回填高度/m	不对称回填高差/m	最大位移值/mm		最大等效应力值/MPa
		竖向	水平	
1	1.0	-2.41	1.65	2.06
	1.3	-1.32	2.17	3.12
	1.5	-0.53	2.99	4.58
	2.0	1.55	4.03	6.47
3	3.0	-4.63	2.19	7.99
	3.3	-5.03	2.27	8.52
	3.5	-5.45	2.42	9.04
	4.0	-6.08	2.97	11.36

1 m 增加到 2 m 时,竖向位移的最大变化量为 1.45 mm(方向为向上),水平变位为 0.78 mm(方向为向右);最大等效应力提高 3.37 MPa,最大应力变化不到一半。可见,在初期,影响管涵结构的最主要因素是不对称回填,尤其是填土两侧高差为 1 m 时,管涵各处受力有明显差异,结构位移和等效应力的变化都很大,易对管涵造成一定破坏,这在实际工程中是绝对不允许的。因此,波纹钢管涵填土初期,应严格对称回填、压实,密切监控管涵受力和变形变化显著的位置,尽可能减少不对称回填给管涵带来的不利影响,避免结构遭到损坏。

4.2 地基不均匀沉降的影响

截取 10 m 长波纹钢管涵,其中 5 m 基础不发生沉降,另外 5 m 基础从管涵中心到另一侧管口按

线性均匀沉降,管口沉降量最大,为 0~6 cm 垂直位移。有限元模型见图 14,变形和应力见图 15、图 16。由图 15、图 16 可知:管涵位移变化最大位置和沉降最大位置相同;在管涵两侧,开始发生沉降的截面(即管涵中心截面)是管涵的最大等效应力截面。

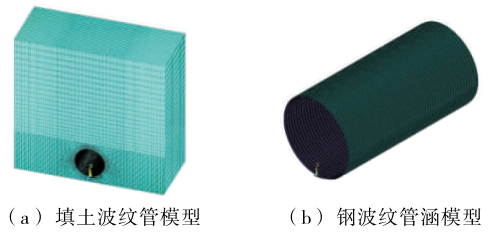


图 14 填土波纹钢管涵模型

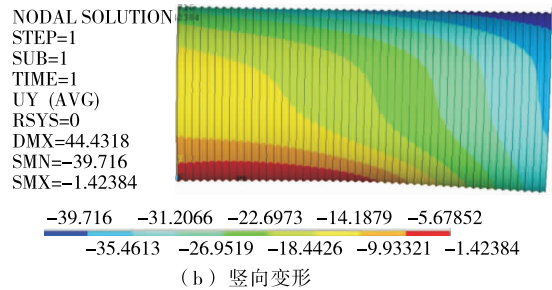
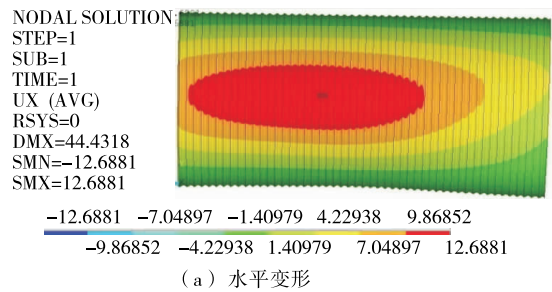


图 15 基础沉降 6 cm 时的变形云图(单位:mm)

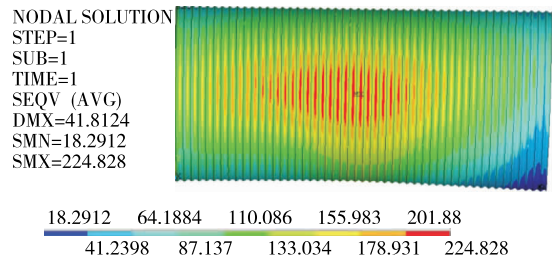


图 16 基础沉降 6 cm 时的等效应力云图(单位:MPa)

(1) 最大水平位移。波纹钢管涵侧向水平变位与地基沉降量的关系见图 17。由图 17 可知:基础沉降 0~6 cm 时,管侧的最大水平变位约 10 mm。处于地基沉降部分的结构,管侧水平位移随地基沉降的增加而不断减小,且沉降在刚开始阶段变化幅度较大、随后趋于线性变化。原因是地基沉降过程中管涵两侧土体对其产生的压力增加,管侧受到挤

压,导致管涵两侧内凹。

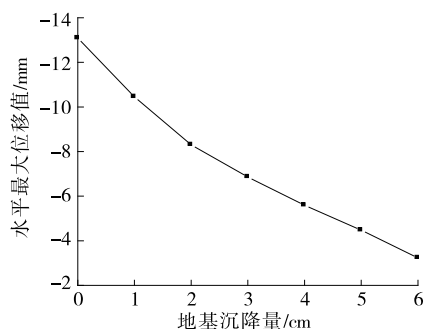


图 17 管侧水平变位与地基沉降量的关系

(2) 最大竖向位移。管涵竖向变形与地基沉降量的关系见图 18。由图 18 可知:随着地基沉降量的增加,管涵向下发生位移,该位移近似成线性变化。地基沉降为 0~6 cm 时,管涵产生的最大位移为 11.76 mm,管底为 28.07 mm,管底与管顶的最大相对位移为 16.32 mm,管底表现出向下凸的现象。因为在地基沉降时,管底所受土压力不断减小,管侧和管顶处则增大,从而挤压管涵,导致管底下凸。

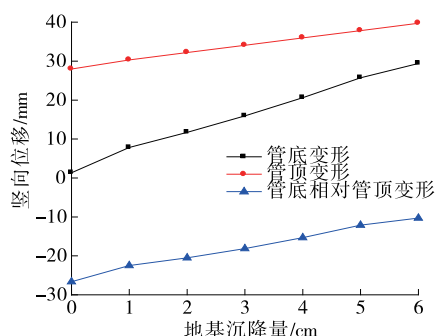


图 18 管涵竖向位移与地基沉降量的关系

(3) 最大等效应力。不同地基沉降下管涵最大等效应力见图 19。由图 19 可知:管涵最大等效应力与地基沉降之间成正相关。不均匀沉降大于 2 cm 时,管涵应力呈线性变化,最大等效应力达到 223.45 MPa,比不沉降时增加不超过 13%,说明不

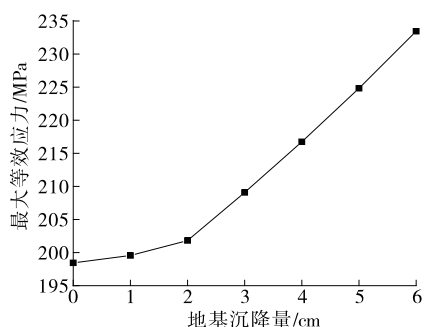


图 19 管涵最大等效应力与地基沉降量的关系

均匀沉降对管涵只在一定范围内有影响,地基不均匀沉降为 0~6 cm 时波纹钢管的变形和应力均不是很大。原因在于波纹钢管涵具有较好的柔性,与周围未沉降土体能协调一致、相互作用,提高了管涵整体受力和变形性能,使其能更好地适应地基变形。

5 结论

(1) 在波纹钢管涵侧填土中,管顶上翘,管壁应力和变形变化不大;若在管顶填土,管涵的变形和应力与填土高度成正相关。

(2) 当管顶填土高度达 14 m 时,管顶开始出现明显的土拱效应,径向土压力、管壁应力和变形增速逐渐变小。

(3) 轴向相邻波谷、波峰及环向测点切向应力均表现出拉、压交替转换,谷、峰协调合作,承担着施加在管涵上的土体荷载。

(4) 在管侧填土施工中,管涵周围的径向土压力变化幅度较小;填土到管顶后,径向土压力随着填土高度的增大近似呈线性增大。

(5) 不对称回填对管涵的影响是负面的,在回填初期最为显著,回填初期需严格对称回填。

(6) 波纹钢管涵的柔性较好、且能与周围土体相互协调,使基础不均匀沉降对管涵的受力性能和变形的影响不是特别明显,同时使管涵结构的受力及变形性能得到提高。

参考文献:

- [1] 李晓勇,梁养辉,李祝龙,等.低路堤荷载作用下波纹钢管涵切向应变现场测试[J].公路工程,2013,38(3).
- [2] 李祝龙.公路波纹钢管涵洞设计与施工技术[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [3] 穆程.大跨径波纹钢管涵洞设计中不同计算方法比较研究[J].公路工程,2014,39(6).
- [4] 刘鹏.高填方大跨径波纹钢管涵洞通道力学性能研究[J].公路工程,2015,40(4).
- [5] 廖鑫.高填土大跨径波纹钢管涵的力学性能与设计方法研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [6] 季文玉.金属波纹管涵洞受力行为理论分析与试验研究[D].北京:北京交通大学,2004.
- [7] 魏亚辉,季文玉,李立增.波纹钢管涵洞的力学性能试验研究[A].中国铁道学会 2004 年度学术活动优秀论文评奖论文集[C].2005.