

文章编号:1671-8879(2018)03-0001-09

高填方大直径钢波纹管涵减荷试验

魏 瑞^{1,2}, 曹周阳³, 顾安全¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都 610041;
3. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 河南 郑州 450015)

摘 要:为了研究在钢波纹管涵顶铺设聚苯乙烯泡沫(EPS)板减小涵顶土压力及其调整土压力分布效果,依托四川广巴(广元—巴中)高速公路连接线项目路基工程,对其高填方大直径钢波纹管涵开展现场试验。在设计填方最高处的路堤下沿管涵纵向选取 4 个特征断面,其中 1 个为不减荷断面,另 3 个为涵顶平铺不同厚度 EPS 板的减荷断面,并对每个断面的特征点位进行应力应变测试,研究钢波纹管涵在减荷与否 2 种情况下的受力与变形随填土高度的变化规律和 EPS 板的减荷效果。研究表明:在未减荷断面,填土高度在约 10 m 之前的垂直土压力大于土柱压力、约 10 m 后小于土柱压力,最终的垂直土压力系数为 0.9 左右;在减荷断面,填土高度在约 5 m 之前垂直土压力大于土柱压力、约 5 m 之后小于土柱压力,最终的垂直土压力系数为 0.46~0.47;钢波纹管涵两侧填土时,管涵变形表现为横向收敛、竖向拱起,随着填土高度的增加,其变形逐步调整,最终表现为横向挤胀、竖向收敛,且未减荷断面的竖向收敛略大于减荷断面,最终的收敛变形率均在 1.0%~2.0%之间;在减荷与否 2 种情况下,钢波纹管涵顶垂直土压力随着填土高度的增加而增大,但增幅均逐渐减小;未减荷的钢波纹管随着填土高度的增加逐渐表现出柔性管的受力特性,而具有调节土压力的能力;在钢波纹管涵顶平铺柔性材料 EPS 板具有显著的减荷效果和调节土压力分布的作用;钢波纹管涵顶垂直土压力是影响其最终收敛变形的一个关键因素。

关键词:道路工程;高填方;钢波纹管;涵洞;垂直土压力;EPS 板;减荷

中图分类号:U449.31 **文献标志码:**A

Load reduction experimental of high fill soil large diameter corrugated steel pipe culvert

WEI Rui^{1,2}, CAO Zhou-yang³, GU An-quan¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Sichuan Expressway Construction & Development Group Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Civil and Architecture Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, Henan, China)

Abstract: This study investigated whether the expanded polystyrene (EPS) plate laid on the top of corrugated steel culverts could reduce the earth pressure at the top of the culvert, and the law of adjustment of soil pressure distribution. Based on Sichuan Guang-Ba (Guangyuan to Bazhong) Highway subgrade project, a field test on large diameter steel corrugated pipe culvert under high

收稿日期:2018-01-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802203)

作者简介:魏 瑞(1979-),男,四川成都人,四川高速公路建设开发集团有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:56486462@qq.com.

fill was carried out. Four characteristic sections were selected on the longitudinal culverts at the highest embankment of design fill. One of them was an unloaded section, the other three were load reduction sections for laying different thickness flexible materials (EPS plates) on top of the culverts. Simultaneously, stress and strain tests were carried out on the characteristic points of each section. The variation of stress and deformation with the height of the fill and the reducing effect of the EPS plate were studied in the two cases, where the steel corrugated pipe culvert had reducing load and did not have reducing load. The results show that at the unloaded section, the vertical earth pressure is greater than the soil column pressure when the height of the fill is less than 10 m. Conversely, it is less than the soil column pressure when the height of the fill is greater than 10 m. The ultimate vertical soil pressure coefficient is about 0.9. At the load reduction section, the vertical earth pressure is greater than the soil column pressure when the height of the fill is less than 5 m. Conversely, it is less than the soil column pressure when the height of the fill is greater than 5 m. The ultimate vertical soil pressure coefficient is about 0.46 to 0.47. When the steel corrugated pipe culvert is filled on both sides of the culvert, the deformation of the pipe culvert is characterized by lateral convergence and vertical arch. The deformation gradually changes with the increase of the fill height. The deformation of the culvert finally manifested as lateral bulging and vertical convergence. The vertical convergence of the unloaded section is slightly larger than that of the load reduction section. The final convergence rate is between 1% and 2%. In the two cases of load reduction or no load reduction, the vertical earth pressure at the top of the corrugated pipe culvert increased with the increase of fill height, but their amplitude of increase is decreasing. With the increase of fill height, the unloaded steel bellows gradually, exhibiting the mechanical characteristics of the flexible pipe and the ability to regulate the earth pressure. The EPS plate with flexible material is laid on the top of corrugated steel pipe culvert, which had a significant effect of reducing the load and regulating the distribution of soil pressure. The vertical earth pressure at the top of corrugated steel pipe culvert is a key factor affecting the final convergent deformation of culverts. 18 figs, 27 refs.

Key words: road engineering; high fill soil; corrugated steel pipe; culvert; vertical earth pressure; EPS board; load reduction

0 引言

与常规的钢筋混凝土或圬工砌体刚性涵洞相比,钢波纹管涵洞具有适应地基变形能力强、抗震性能好、工厂标准化生产质量易保障、运输便捷、安装速度快、受气候干扰小、对环境的影响小等优势而普遍应用于边远山区和高原地区的公路、铁路等基础设施建设中。冯忠居等对钢波纹管涵洞的力学特性、管周土压力及涵管变形规律进行了研究^[1];李祝龙等运用有限元分析得出管拱形波纹管涵洞土体受力变形规律^[2];褚夫蛟等通过现场测试和数值模拟,研究了高填方钢波纹管的应变、土压力及管体的横向和竖向变形规律^[3];乌延玲等通过现场试验研究了钢波纹管在填土荷载作用下的受力与变形特征^[4];杨明辉等也对钢波纹管涵洞进行了试验研究^[5-9],综

上可知,国内外对钢波纹管涵洞的研究,大多是针对其在填土荷载作用下管周土压力分布及变形规律,分析管体结构的力学特性,从而研究钢波纹管涵洞的设计与施工技术,并制定了一些指导钢波纹管涵洞的设计与施工的技术专著^[10]和地方标准^[11],但截止目前,中国还没有针对钢波纹管涵洞设计与施工的行业规范,在实际工程应用中大多根据经验或国外规范^[12-13]确定设计与施工参数,但也出现过因设计或施工不当而导致钢波纹管变形过大,结构破坏或引起路面沉陷等病害^[14],其原因是涵顶垂直土压力已经超过了钢波纹管材料的强度。

为了减小涵顶垂直土压力,国内外学者对高填方涵洞采用柔性材料减荷进行了大量的现场试验^[18-19],并将减荷效果显著的措施与设计方法应用于实际工程^[20-23],均取得了良好的效果^[24-27]。但这些研究都是

针对钢筋混凝土或圬工砌体刚性结构的涵洞,鲜有针对具有柔性特点的钢波纹管涵洞进行减荷试验研究。因此,本文在高填方刚性涵洞减荷研究成果和技术应用的基础上,依托高速公路高填方大直径钢波纹管涵,在涵顶铺设聚苯乙烯泡沫(EPS)板进行减荷与不减荷对比试验,研究其减荷效果和土压力与涵洞收敛变形随填土高度的变化规律。

1 高填方涵洞减荷机理

钢筋混凝土或圬工砌体等刚性结构涵洞的垂直土压力之所以大于涵顶土柱压力,是因为涵洞(包括基础)的刚性大于两侧同高度填土刚性,在填土的压实变形过程中,涵顶平面内外土柱间产生沉降差 δ ,与此变形相应产生了作用于涵顶的附加垂直土压力(或理解为外土柱对内土柱向下的附加摩擦力)^[16]。因此,要改变涵顶填土的应力集中现象,使垂直土压力减小,乃至小于涵顶土柱压力,就必须采取某些措施,使 δ 减小(即减小外土柱对内土柱的向下附加摩擦力),甚至产生 $-\delta$ (即促使向下附加摩擦力转化为向上的卸荷摩擦力),使两侧的外土柱与涵洞共同承担涵顶土柱压力,从而使涵顶垂直土压力减小。为此,在涵顶铺填具有一定抗压强度的高压缩性材料(如 EPS 板),让其在填土过程的中后期不断提供大于涵顶沉降差增量 $\Delta\delta$ 的压缩变形增量 $-\Delta\delta$,从而改变涵顶内外土柱在下沉过程中的相互摩擦力方向(或产生土拱效应),达到减小垂直土压力的目的。

钢波纹管涵在填土较低的情况下仍属于刚性涵洞范畴,但随着填土高度的增加,涵顶垂直土压力不断增大,涵管自身在填土压力作用下也会逐渐产生竖向收敛变形,当填土压力超出涵管强度极限或容许变形范围将会产生破坏。同样,在钢波纹管涵顶铺设柔性填料以增加管顶填土沉降变形空间,并与其竖向收敛变形协同工作促成 $-\delta$ 产生,亦可达到减荷目的,从而保护涵洞结构安全。

2 试验布设及监测方案

2.1 试验依托工程概况

试验涵洞位于水稻田软黏土地基上,设计承载力不小于 0.2 MPa,故采用碎石挤密桩加固处理,涵底铺设级配良好的砂砾石作为垫层,厚度大于 50 cm,最大粒径小于 12 mm,砂砾石垫层压实度大于 96%。涵顶最大填方高度为 11.7 m,管涵总长度约为 89.87 m,钢波纹板材质为 Q345,管径 5.5 m,壁厚 6.5 mm,波长 200 mm,波高 55 mm。施工时

将钢波纹板片拼装后经螺栓连接,并对管涵做了镀锌和刷沥青强化防腐处理。

2.2 减荷材料

本次试验选用的减荷材料是聚苯乙烯泡沫塑料板,其具有可控的抗压强度(当外部压力超过屈服应力后其内部微结构逐渐开始破坏,塑性变形段呈现出较大的压缩变形)、抗酸碱、不透水、难以腐烂、耐久性强等特点。EPS 材料的应力-应变曲线如图 1 所示,分为线弹性(OA)、塑性(AB)和硬化(BC)3 个阶段,线弹性阶段的应变约小于 5%,此应变被看作材料的屈服点,EPS 板材料的应变为 10%时所对应的应力被定义为抗压强度,此后材料进入塑性变形阶段,当应变达到 60%时,材料开始进入硬化阶段。根据文献[21]中试验,本文所选 EPS 板的密度为 28 kg/m³。

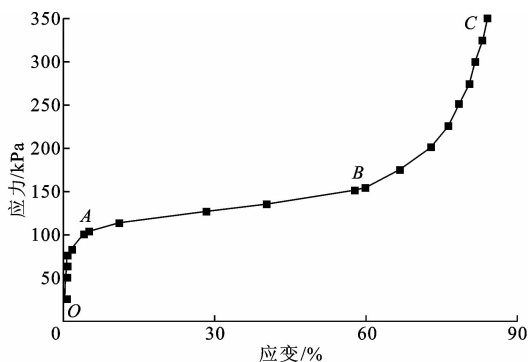


图 1 EPS 材料应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain relation curve of EPS material

2.3 测试断面的布设及 EPS 板的铺设

试验段高填方路基位于分离式隧道出口,路面宽度为 30.36 m,沿涵洞纵向在对应的路基填方最高段设置 4 个测试断面,每个断面长 6 m,A-A 断面为不减荷断面,B-B、C-C、D-D 断面为减荷断面。在减荷的 B-B、C-C、D-D 断面管顶平铺 EPS 板,厚度分别为 80、65、30 cm,其中 B-B、C-C 断面为变厚度阶梯形铺设,即横断面上中间厚两边薄,如图 2、图 3 所示。

2.4 土压力测点的布设及监测

土压力监测选用钢弦式 JXY-1 型单膜土压力传感器,其埋置在土体中时,具有质量稳定、频率可靠、适合野外观测,且零点飘移小的特点;数据采集选用 QLA-2 型钢弦式智能测频仪,如图 4 所示。

4 个测试断面各布设了 16 个土压力盒,编号①~⑯,共计 64 个压力盒。为了保证测试效果,在管周试验设计方案位置及波峰处焊接 30 cm×30 cm 的钢板,土压力盒被点焊于管周预设的钢板上,土压力盒的布置及埋设如图 2、图 5 所示。

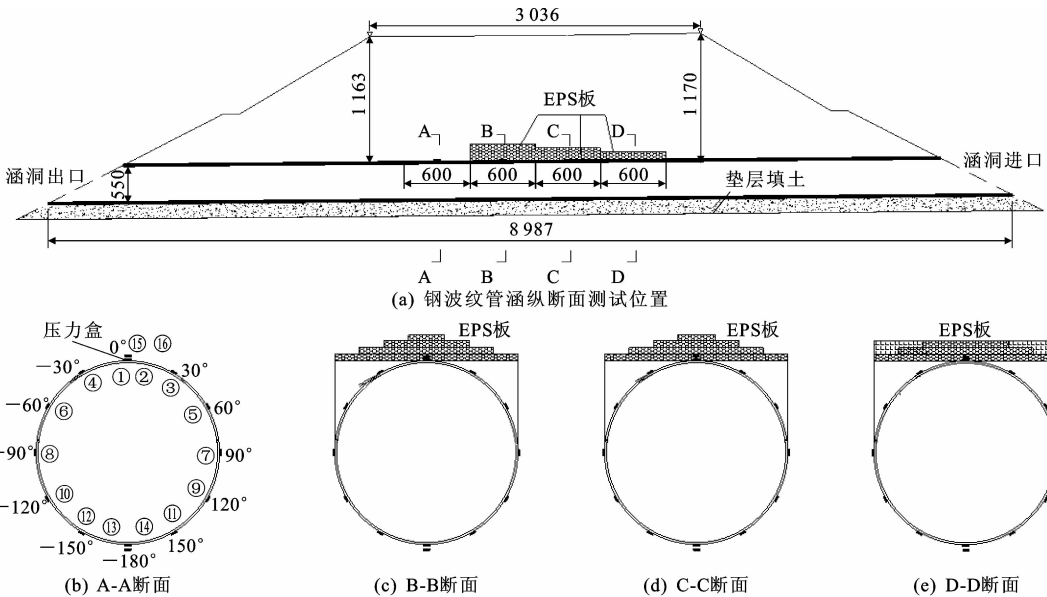


图 2 高填方钢波纹管涵测试断面及土压力盒和 EPS 板的布设方案

Fig. 2 High-filled steel corrugated pipe longitudinal, cross-section and pressure boxes and EPS board layout location



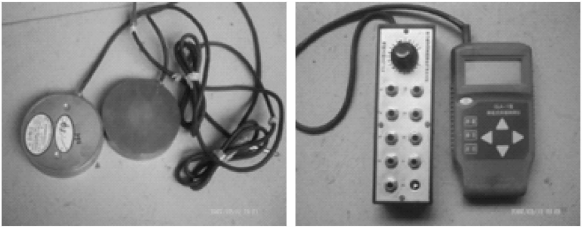
图 3 EPS 板铺设现场

Fig. 3 EPS board laying site



图 5 土压力盒的现场埋设

Fig. 5 Site of earth pressure boxes burial



(a) 传感器

(b) 测频仪

图 4 土压力传感器和测频仪

Fig. 4 Earth pressure sensor and frequency measuring instrument

2.5 EPS 板的压缩和钢波纹管变形监测

涵顶 EPS 板压缩变形与涵侧土体沉降监测采用如图 6 所示的自制压缩标,数据采集是在管涵内对其压缩标和沉降板使用电子游标卡尺进行观测。

钢波纹管变形监测采用 SWJ-IV 隧道收敛计,配合拉环与拉钩,在各试验断面的 0°、30°、60°、90°、120°、150°方向过圆心沿对角线焊接布设对拉环,如图 7 所示。

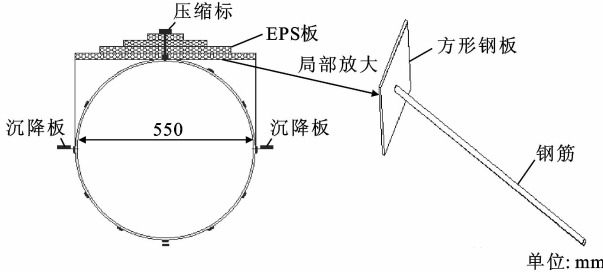


图 6 EPS 板压缩变形监测示意

Fig. 6 Schematic of EPS plate compression deformation monitoring

3 试验结果与分析

试验布设的 64 个土压力传感器中,有 4 个位于基底的土压力盒因施工而损坏,其余 60 个均完好,完好率达到 93.75%。

3.1 涵顶垂直土压力

钢波纹管涵顶垂直土压力以如图 2 所示的 0°位

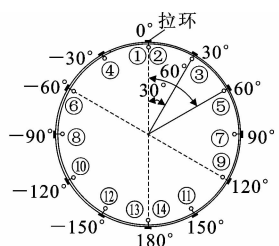


图 7 变形监测点位置

Fig. 7 Layout of deformation monitoring points

置的数据表示。图 8、图 9 为涵顶垂直土压力的平均值 σ_v 和垂直土压力系数 K_v 随填土高度的变化曲线。

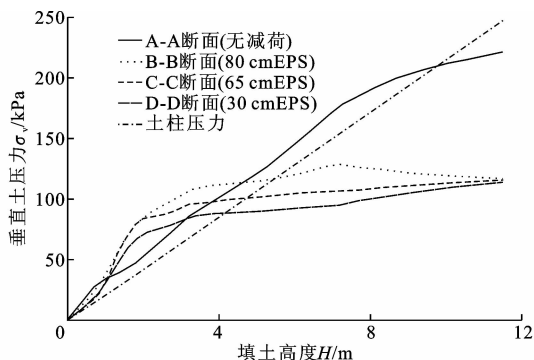


图 8 垂直土压力随填土高度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of vertical earth pressures with filling height

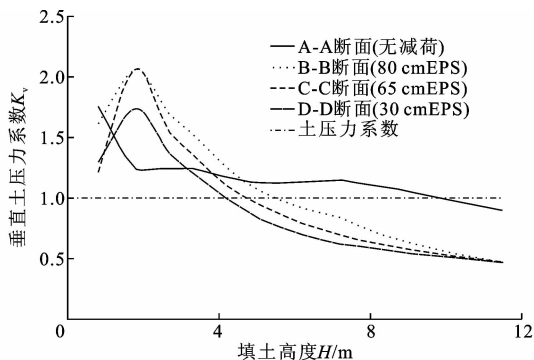


图 9 垂直土压力系数随填土高度的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of vertical earth pressure coefficients with filling height

由图 8 可知:钢波纹管各断面涵顶垂直土压力皆随填土高度的增加而增大;未采取减荷措施的 A-A 断面,当填土高度小于 10.0 m 时,垂直土压力一直大于并逐渐接近土柱压力,当填土高度超过 10.0 m 后,垂直土压力开始小于土柱压力;减荷的 B-B、C-C、D-D 断面,当填土高度小于 5.0 m 时,垂直土压力大于土柱压力,当涵顶填土高度大于 5.0 m 时,垂直土压力开始逐渐低于土柱压力,随着填土高度的继续增加,垂直土压力明显小于土柱压力,最终约

为 1/2 土柱压力。

由图 9 可知:钢波纹管涵垂直土压力系数随着填土高度的增加而减小;对于未采取减荷措施的 A-A 断面,当填高小于 10.0 m 时, $K_v > 1.0$, 当填高大于 10.0 m 后, $K_v < 1.0$, 最终的垂直土压力系数约为 0.9;对于采取减荷措施的 B-B、C-C、D-D 断面,当填土高度小于 5.0 m 时, $K_v > 1.0$, 当填高大于 5.0 m 后,垂直土压力增幅放缓,减荷效果开始显现,且逐渐开始小于土柱压力,其系数 K_v 为 0.46 ~ 0.47。

未减荷的钢波纹管在管顶填土较低阶段显示其刚性管(近似于混凝土管)特性,随着填土高度的增加,钢波纹管又显示其柔性管特性而具有调节土压力的能力。在钢波纹管涵顶铺设柔性材料 EPS 板的减荷效果显著。

3.2 侧向土压力

钢波纹管涵的侧向土压力以如图 2 所示的 90° 位置表示涵洞左侧、-90° 位置表示涵洞右侧土压力。图 10、图 11 为各断面涵洞侧向土压力值 σ_h 和侧向土压力系数 K_h 随填土高度变化。

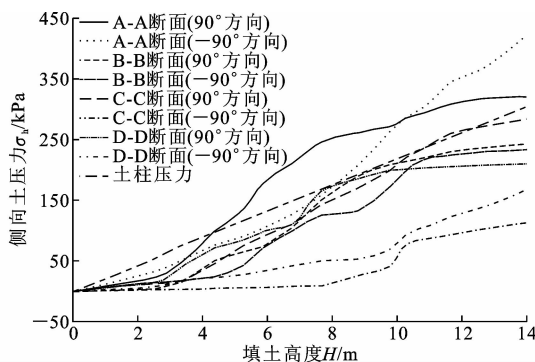


图 10 侧向土压力随填土高度变化曲线

Fig. 10 Variation curves of lateral earth pressures with filling height

由图 10、图 11 可知:钢波纹管涵 4 个测试断面的两侧侧向土压力均随着填土高度的增加而增大,未减荷的 A-A 断面的侧向土压力增幅及终值均大于减荷断面;未减荷的 A-A 断面左侧侧向土压力在填土高度大于 4 m 后始终大于土柱压力,4~8 m 时侧向土压力增长较快,曲线斜率较大,8 m 以后增长放缓,曲线斜率减小,最终的土压力值接近土柱压力;相应的侧向土压力系数从 0 增加到 1.4 再减小至接近于 1.0,右侧侧向土压力在填土高度大于 8 m 后始终大于土柱压力,其侧向土压力增长较快,曲线斜率较大,且在填土高度大于 10.0 m 以后侧向土压力大于左侧值,其中侧向土压力系数也呈增大的

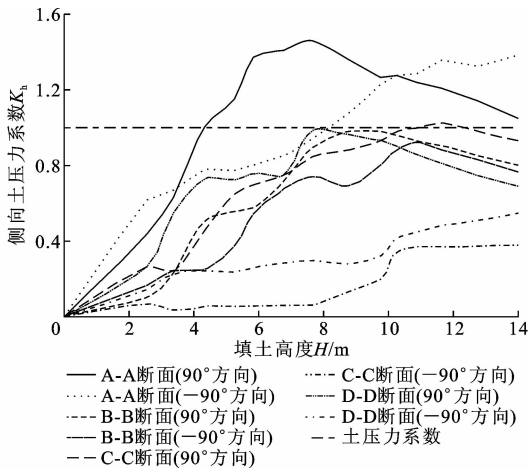


图 11 侧向土压力系数随填土高度变化曲线

Fig. 11 Variation curves of lateral earth pressure coefficient with filling height

趋势。这是因为:钢波纹管在涵周填土压力作用下不断的协调变形,由于 A-A 断面未采取减荷措施,随着填土高度的增加,作用于涵顶的垂直土压力较大,钢波纹管较快的进入了纵向收敛横向挤胀变形,使得涵侧原来的静止土压力转为被动抗力,从而导致侧向土压力比侧向静止土压力大,最终大于土柱压力;另外,左右两侧侧向土压力发展趋势也不相同,影响因素可能有多种,但最主要是因同一层填土的碾压先后顺序,尤其是初期填土碾压顺序所致;减荷断面侧向土压力基本上均小于或部分接近土柱压力,侧向土压力系数呈先增大后减小的规律。对于 B-B 断面,左右两侧侧向土压力随填土高度增加而增长规律一致,且小于 A-A 断面的侧向土压力,这是由于涵顶上铺设了 80 cm 厚度的 EPS 板(相当于轻质填料),涵顶土压力较 A-A 断面增幅较小,在 EPS 板压缩变形和钢波纹管涵竖向变形共同作用下产生减荷效应,使得波纹管涵横向变形量较小,故侧向静止土压力向被动抗力发展的增幅较 A-A 断面小;C-C、D-D 断面左侧侧向土压力曲线与 B-B 断面类似,但由于施工过程中的非对称填筑引起的偏载、偏压而导致其变化曲线表现出左侧侧向土压力始终大于右侧侧向土压力。

3.3 涵底土压力

钢波纹管涵底土压力以如图 2 所示的 180°位置表示。图 12、图 13 为涵洞底部土压力值 σ_b 和土压力系数 K_b 随填土高度变化曲线。

由图 12 可知:涵底土压力随着涵顶填土高度的增加而增大,且涵底土压力普遍大于从涵底算起的土柱压力,但未减荷断面涵底土压力明显大于减荷

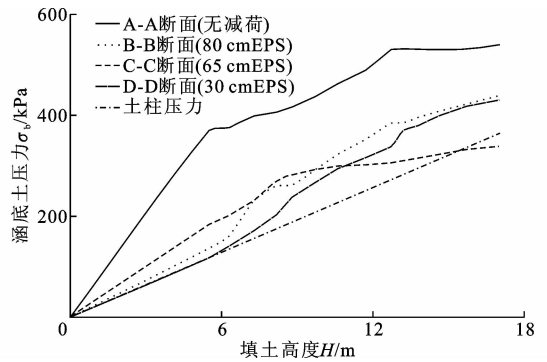


图 12 涵底土压力随填土高度变化

Fig. 12 Relationships between earth pressures with filling height

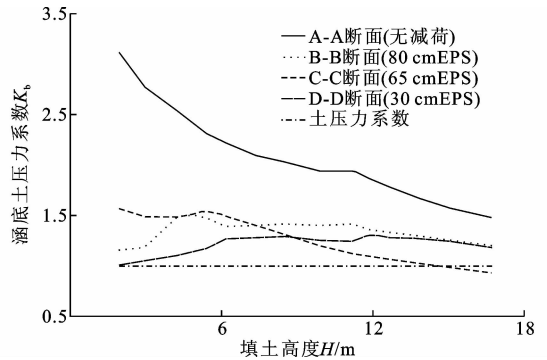


图 13 涵底土压力系数随填土高度变化

Fig. 13 Relationships between earth pressure coefficients with filling height

断面;涵底土压力随着填土高度的增加而增加,且均大于土柱压力,这是由于涵底直接作用于砂卵石垫层上,而管涵的变形模量大于土体的变形模量,圆弧形钢波纹管底与垫层的接触面为一小圆弧段,从最底部中线至左右两侧 90°弧段内土体很难压实,甚至有脱空间隙,压力分布从涵底向两侧逐渐减弱,故涵底与地基接触不均而存在应力集中现象。

由图 13 可知:随着填土高度的增加,涵底土压力系数逐渐减小,减荷断面的涵底土压力系数明显小于未减荷断面的土压力系数。

涵顶铺设 EPS 板,在减小涵顶垂直土压力的同时,也有助于减小涵底土压力,其具有调节土压力分布的作用。

3.4 涵洞收敛变形

图 14~图 18 为钢波纹管收敛变形曲线。由于涵侧填土也会引起涵洞的收敛变形,故此处的填方高度从涵底标高算起,共计 17.2 m;管内测点的位置与管外土压力盒位置对应,其中 0°、30°、60°、90°、-30°和 -60°位置的收敛变形均为过钢波纹管圆心的直径线上的收敛变形量。

由图 14 可知:未减荷断面在涵侧填土阶段,钢

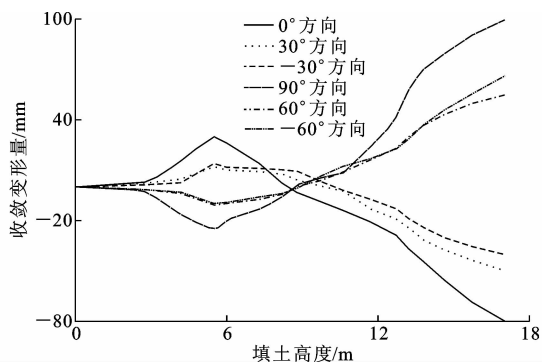


图 14 A-A 断面管涵收敛变形量随填土高度变化

Fig. 14 Relationships between convergence deformation of pipe culvert with height of filling in section A-A

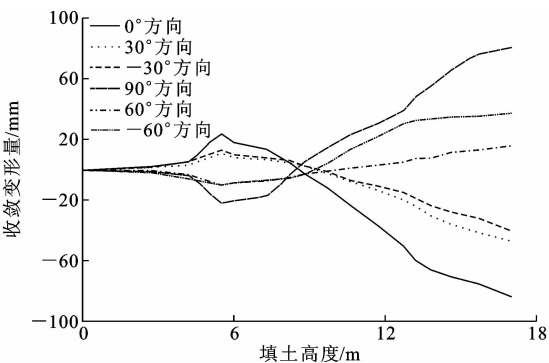


图 15 B-B 断面管涵收敛变形量随填土高度变化

Fig. 15 Relationships between convergence deformation of pipe culvert with height of filling in section B-B

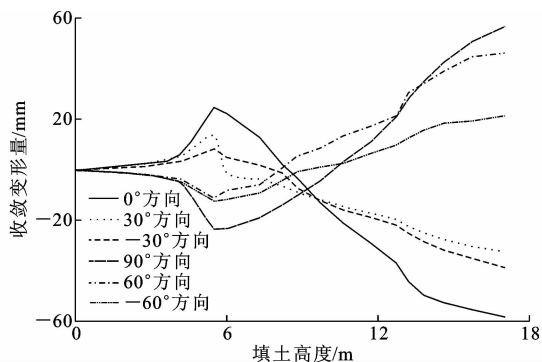


图 16 C-C 断面管涵收敛变形量随填土高度变化

Fig. 16 Relationships between convergence deformation of pipe culvert with filling height in section C-C

波纹管在 0° 、 $\pm 30^\circ$ 方向(视为竖向范围)的变形表现为逐渐拱起,在 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 方向(视为横向范围)的变形表现为逐渐收敛,横向收敛变形最大约达 20 mm;随着涵顶的填土高度逐步增加,其变形逐步调整,竖向变形和横向变形逐渐恢复,当填土高度达到 9.0 m 左右,其变形逐渐往相反方向发展,表现为横向挤胀而竖向收敛,到填土结束后, 0° 方向收敛变形值最大,约为 80 mm。

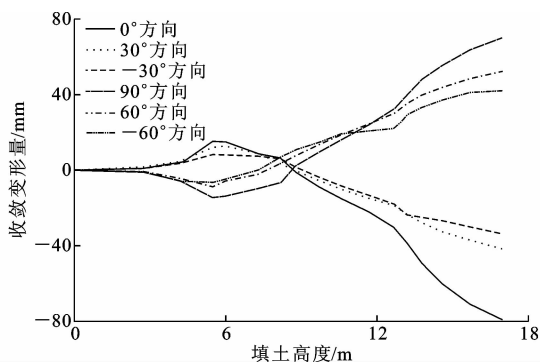


图 17 D-D 断面管涵收敛变形量随填土高度变化

Fig. 17 Relationships between convergence deformation of pipe culvert with filling height in section D-D

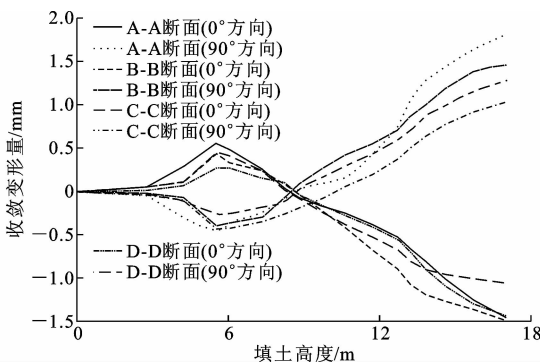


图 18 各测试断面收敛变形量随填土高度变化

Fig. 18 Relationships between convergence deformation of pipe culvert with filling height in each section

图 15~图 17 显示:减荷断面管涵的收敛变形规律与未减荷断面相似,只是在涵顶填土之后,随着填土高度的增加,在 0° 方向的收敛变形最大值均低于未减荷断面,且因 B-B、C-C、D-D 三个断面 EPS 板的厚度不同而不同, EPS 板较厚的 B-B 断面最终的竖向收敛变形值最低(低于 60 mm)。

图 18 显示:当填土结束后,未减荷断面竖向与横向收敛变形率均大于减荷断面,其收敛变形率在 1.0%~2.0%;相关研究资料规定^[27]:对于 200 mm (波长) \times 55 mm (波高) 的钢波纹管,其最终的允许变形量不能超过设计形状的 3%,对于深埋波纹管,在路面施工结束后的最终允许变形量不能超过设计值的 2%。

4 结 语

(1) 钢波纹管在填土较低的情况下属于刚性管范畴,随着填土高度的增加又逐步表现出柔性管的特性,在填土结束后管顶垂直土压力小于土柱压力,涵管的结构变形最终表现为竖向收敛横向挤胀,最终的垂直土压力系数为 0.9 左右,表明钢波纹管在

管周外力作用下发生的结构变形起到调节土压力的作用。

(2)在钢波纹管涵顶铺设 EPS 板进行减荷时,在管顶填土较低的阶段其垂直土压力系数大于 1,随着填土高度增加垂直土压力系数逐渐减小,最终减小至 0.46~0.47,远低于未减荷情况下的终值 0.9,表明在钢波纹管涵顶铺设 EPS 板减荷效果十分显著。

(3)涵底土压力普遍大于从涵底算起的土柱压力,表明无基座的涵底中轴线方向接触压力集中;未减荷段的涵底土压力明显大于采取减荷措施的各段面涵底土压力,表明在涵顶铺设 EPS 板减荷亦能减小管底土压力并起到调节土压力分布的作用。

(4)在涵侧填土阶段,钢波纹管的变形表现为竖向拱起横向收敛,横向($\pm 90^\circ$ 方向)的收敛变形值最大约为 20 mm;当涵顶开始填土时,涵管的竖向和横向变形均逐渐开始朝相反方向发展,随着填土高度的增加,涵管变形表现为横向挤胀而竖向收敛,到填土结束后,最终在竖向(0° 方向)最大收敛变形达到了约 80 mm,远大于横向的收敛值,表明垂直土压力是最终影响涵管收敛变形的一个关键因素;钢波纹管的最终收敛变形率在 1.0%~2.0%,钢波纹管施工质量符合相关规范要求。

(5)钢波纹管的直径、波距、波高、壁厚、材质等结构参数,以及涵顶填方高度、土体压实度与施工工艺、填料强度及性质、EPS 板的厚度和密度及叠加组合方式等均会影响减荷试验效果,下一步将开展更高的填方钢波管涵实体工程减荷试验,进一步精确减荷的综合效果与土压力量化值,总结设计与施工工法,为减荷技术的应用提供更多的支撑。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] 李祝龙,曹彪,梁养辉,等.管拱型钢波纹管涵洞有限元计算分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2016,35(4):29-34.
LI Zhu-long, CAO Biao, LIANG Yang-hui, et al. Finite element analysis of arch-shaped steel corrugated

tubular culvert[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2016, 35(4): 29-34.

- [3] 褚夫蛟,曾水生,方文富,等.高填方大直径钢波纹管涵洞力学特性[J].东北大学学报:自然科学版,2016,37(9):1338-1342.
CHU Fu-jiao, ZENG Shui-sheng, FANG Wen-fu, et al. Mechanical properties of large-sized corrugated steel pipe culvert under high embankment filled[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2016, 37(9): 1338-1342.
- [4] 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 and Technology: Natural Science Edition, 2011, 43(4): 513-516.
- [5] 杨明辉,方天云,赵明华,等.高填方段波纹管涵垂直土压力试验及计算[J].公路交通科技,2014,31(4):33-38.
YANG Ming-hui, FANG Tian-yun, ZHAO Ming-hua, et al. Test and calculation of vertical earth pressure on corrugated pipe culvert under high embankment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(4): 33-38.
- [6] 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 XU-yang, HE Huan, GAO Wen-xue, et al. Analysis of top soil pressure of large diameter steel corrugated pipe[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(4): 39-43.
- [7] 李祝龙,刘百来,李自武.钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究[J].公路交通科技,2006,23(3):79-82.
LI Zhu-long, LIU Bai-lai, LI Zi-wu. Field mechanical performance test of corrugated steel culvert[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 79-82.
- [8] 张允海,曾水生,郝铁宝.大直径高填方钢波纹管涵洞现场试验分析[J].公路,2015(6):19-25.
ZHANG Yun-hai, ZENG Shui-sheng, HAO Tie-bao. Experimental analysis of large diameter steel corrugated pipe culvert under high filling[J]. Highway, 2015(6): 19-25.
- [9] 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,2016,36(6):103-108.
PENG Li, ZHANG Yang, MU Cheng, et al. Mechanic

- cal performance analysis and test of high fill steel corrugated pipe culvert[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2016, 36(6): 103-108.
- [10] 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 technology of corrugated pipe culvert in highway[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [11] DB 15/T 654—2013, 公路波纹钢管(板)桥涵设计与施工规范[S].
- DB 15/T 654—2013, Specification for design and construction of corrugated steel pipe and plate for highway bridges and culverts[S].
- [12] CORRUGATED STEEL PIPE INSTITUTE, AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. Handbook of steel drainage & highway construction products[M]. 2nd Canadian Edition. Cambridge: Corrugated Steel Pipe Institute, 2002.
- [13] CAN/CSA-S6-00, Canadian highway bridge design code [S].
- [14] 王艳波. 钢波纹管涵洞变形处治方案[J]. 山西交通科技, 2015(6): 89-91.
- WANG Yan-bo. The treatment scheme of steel corrugated pipe culvert deformation[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2015(6): 89-91.
- [15] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 3-15.
- GU An-quan. Research on the vertical earth pressure on projecting conduit and underground chamber under high embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 3-15.
- [16] 王晓谋, 顾安全. 关于上埋式管道垂直土压力的减荷措施研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 1989, 9(3): 25-34.
- WANG Xiao-mou, GU An-quan. Study on measure for reducing loads of the vertical earth pressure on projecting conduit[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 1989, 9(3): 25-34.
- [17] 顾安全, 折学森, 徐志飞. 高尾矿坝排洪管道垂直土压力的试验研究[C]//中国土木工程学会. 第七届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 446-450.
- GU An-quan, SHE Xue-sen, XU Zhi-fei. Research on vertical earth pressure for culvert under high tailings dams[C]//China Society of Civil Engineering. Proceedings of the 7th Conferences on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: China Construction Industry Press, 1994: 446-450.
- [18] 王晓谋, 顾安全. 上埋式管道垂直土压力的减荷措施[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 83-89.
- WANG Xiao-mou, GU An-quan. Measures for reducing load on vertical earth pressure of buried pipeline [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 83-89.
- [19] 顾安全, 吕镇锋, 姜峰林, 等. 高填土盖板涵 EPS 板减荷试验及设计方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1481-1486.
- GU An-quan, LU Zhen-feng, JIANG Feng-lin, et al. Load reduction tests and design methods for culverts with high fill soil using EPS slabs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1481-1486.
- [20] 赵金明. EPS 板减荷措施在高填土拱涵中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- ZHAO Jin-ming. Application of EPS block reducing-load measures in the high-fill arch culvert[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [21] 顾安全, 王晓谋, 姜峰林, 等. 高填方涵洞设计新理念的工程应用[R]. 西安: 长安大学, 2009.
- GU An-quan, WANG Xiao-mou, JIANG Feng-lin, et al. Engineering applications of new concept of culvert design under the high filling-soil [R]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [22] 曹周阳. 高填方路堤下涵洞减荷试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- CAO Zhou-yang. Experimental study on reducing-load measure of culvert under high-filling embankment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [23] 刘 静. 高填路堤涵洞土压力理论及减荷技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- LIU Jing. Study on the earth pressure acting on the culvert under the embankment of high-staked soil and the load reducing technique[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [24] SLADEN J A, OSWELL J M. The induced trench method—A critical review and case history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 541-549.
- [25] RUDE L C. Load reductions on buried rigid pipe[J]. Journal of Transportation Engineering, 1983, 109(1): 107-123.
- [26] VASLESTAD J, JOHANSEN T H, HOLM W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills: Long-term behavior[J]. Transportation Research Record, 1993(1415): 58-58.
- [27] SUN L, HOPKINS T C, BECKHAM T L. Reduction of stresses on buried rigid highway structures using the imperfect ditch method and expanded polystyrene (geofoam) [R]. Lexington: University of Kentucky Transportation Center, 2005.