

文章编号: 1674-599X(2020)01-0026-07

聚苯乙烯泡沫板铺设高度对涵洞的减荷影响

罗吕青¹, 张谢东¹, 李彬², 晓夏², 刘建平², 黄笑犬¹

(1. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 中交第一公路工程局集团有限公司, 北京 100024)

摘 要: 针对聚苯乙烯泡沫板在减小高填方涵洞马斯顿效应中的减荷效果, 运用弹-塑性力学理论, 结合土拱效应与马斯顿效应的产生形式, 分析了聚苯乙烯泡沫板减荷的原理和当前改良中的局限与不足。同时, 基于聚苯乙烯泡沫板减荷原理, 采用有限元软件 ABAQUS, 建立了不同铺设高度的聚苯乙烯泡沫板减荷模型, 并进行了对比分析, 得出聚苯乙烯泡沫板铺设高度的较优布置方式。该结果可为实际工程应用提供指导。

关键词: 聚苯乙烯泡沫; 马斯顿效应; 高填方涵洞; 铺设高度

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.005

Effect of buried depth of expanded polystyrene board on load reduction of high fill culverts

LUO Lv-qing¹, ZHANG Xie-dong¹, LI Bin², XIAO Xia², LIU Jian-ping², HUANG Xiao-quan¹

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430063, China;

2. CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: In order to study the load reduction effect of expanded polystyrene (EPS) foam board of Marston effect in high fill culvert, the principle of load reduction of polystyrene foam board and the limitation of current improvement are analyzed by utilizing the theory of elastoplastic mechanics, soil arching effect and the form of Marston effect. Based on the principle of the load reduction effect of expanded polystyrene foam board, the ABAQUS model was used to establish the load reduction model of expanded polystyrene foam with different laying heights. The optimal expanded polystyrene foam laying height is obtained by the comparison and analysis of the calculated results. The results can provide guidance for practical engineering application.

Key words: expanded polystyrene; Maston effect; high fill culvert; laying heights

马斯顿效应^[1]是一种由填埋土体的不均匀沉降导致对下方填埋结构产生的附加应力现象, 常常出现于设有刚性涵洞的高填方路段, 其形成原理如图1所示。早期马斯顿效应未被纳入涵洞设计考虑, 设计者过小预计了涵洞所受荷载, 导致许多投入使用的高填方涵洞出现了开裂等不同程度的破坏, 极大地影响了涵洞的安全性^[2-3]。

在填埋结构物顶部铺设柔性材料可以有效地减小马斯顿效应^[4], 其中, 采用聚苯乙烯泡沫

(Expanded Polystyrene, 简称为 EPS)板充当柔性填充材料的方案具有可设计性与稳定性的特点, 被认为是较为便捷可靠的减荷方案^[5]。EPS 材料的减荷能力与其材料性质密不可分, 其特殊弹-塑性性质和较为明显的蠕变与松弛性质都是其减荷能力较为优越的原因^[6]。此外, EPS 材料力学性质和化学性质非常稳定^[7], 可为涵洞提供长期减荷环境, 且其易于制造、运输和施工的特点也为其广泛应用提供了便利。

收稿日期: 2019-09-27

基金项目: 中交-公局海外事业部中非公司雅杜高速(R/CM/YD21/GS291/20180918)

作者简介: 罗吕青(1994-), 男, 武汉理工大学硕士生。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

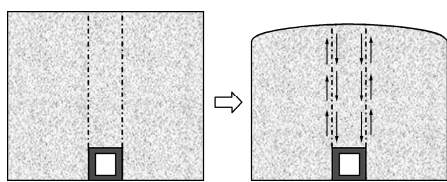


图 1 马斯顿效应的形成示意

Fig. 1 Formation of Marston effect

EPS 材料在 20 世纪 60 年代初次应用于土木工程。Sladen^[8]等人在对马斯顿效应的研究中, 首次使用 EPS 泡沫颗粒作为涵洞顶部的减荷填料, 取得了较好的减荷效果。此后经过顾安全^[5]对减荷措施实验研究, 验证了用 EPS 板作为洞顶柔性填料对高填方下涵洞的减荷效果的优越性。EPS 板减荷如图 2 所示。

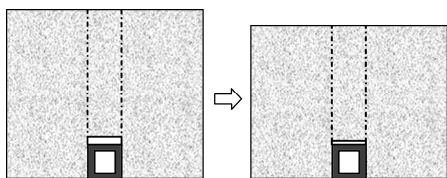


图 2 铺设 EPS 板减荷示意

Fig. 2 Diagram of laying EPS board to reduce load

EPS 板的材料性质与其密度有很强的相关性。密度越大, 其强度越大^[9]。但 EPS 板在被用于减荷时并非密度越大, 厚度越大, 减荷效果越好。王庆石^[10]结合室内模型实验与有限元分析, 得出的结论为: 填土高度较低时, 低密度 EPS 板对于涵洞的卸载效果更好。当填土较高时, 较高密度、较大厚度的 EPS 板卸载效果更好。潘放^[11]等人也通过有限元模拟计算, 发现: EPS 板厚度虽与洞顶土压力呈负相关, 但在厚度达到一定值后, 再增加厚度时, 其减荷效果不变。王俊伟^[9]通过研究管涵周围土压力的分布情况, 提出: 将 EPS 板设计成顶部相对较厚、两侧相对的较薄的结构, 更能发挥材料的减荷效果, 并使涵洞的受力更加合理。同时, 他提出: 将多种密度的 EPS 材料叠加成组合材料的方案更能发挥出各密度材料的潜力, 可以避免 EPS 板的塑性因压缩而过快地被消耗完, 提高了材料的利用率。针对 EPS 本身材料性质的应用研究较多, 但对 EPS 板铺设方式的研究较少。因此, 作者根据 EPS 板对高填方涵洞的减荷原理, 结合前期在 EPS 板减荷方面的研究, 依托喀麦隆雅杜高速某断面, 拟建立 EPS 板在不同铺设高度下的高填方涵洞模型, 分析 EPS

板铺设高度对其减荷效果的影响。

1 EPS 板减荷原理

EPS 板减荷原理与马斯顿效应产生原理相同, 均可归结为土拱效应的产生。土拱效应是由土体间的不均匀位移导致的应力转移现象^[12], 通过剪切强度传递能量而引起的土体间的应力重分配^[13]。土体颗粒之间存在的粘结力与摩擦力会抵抗土体在自重或者荷载的作用下产生不均匀变形而形成土拱效应。

EPS 板的蠕变与松弛效应较为明显^[9]。当施加的荷载足够引发其塑性变形时, 其变形与时间有较明显的联系。实际施工中由于填土较高, 对 EPS 板的压力较大, EPS 板的蠕变与松弛性质较为明显。在加载完成后, EPS 板变形仍会增大, 其对板上填土的支持力会逐渐减小。由于土体颗粒之间存在的粘结力与摩擦力会将土体拉紧, 抵抗土体下落, 因此, 涵洞顶部填土的重力由两侧填土的摩擦力与涵洞顶部的支持力共同平衡, 形成了一个在涵洞顶板上的减载土拱。减荷原理如图 3 所示。

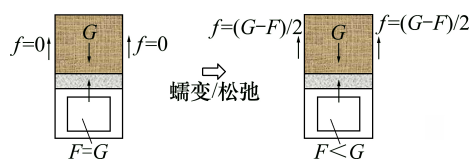


图 3 减荷原理示意

Fig. 3 Diagram of load reduction principle

2 有限元仿真分析

喀麦隆雅杜(雅温得—杜阿拉)高速公路全长约 195 km, 地形和地质条件比较复杂, 存在着多处高填方涵洞。其中, 某涵洞截面如图 4 所示。

该涵洞净跨径为 2 m, 高为 1.5 m, 顶板厚度为 40 cm, 侧墙厚度为 30 cm, 路基中央填土高度为 11.61 m, 涵洞结构尺寸如图 5 所示。实际工程中, 在此截面的涵洞顶部铺设了厚 20 cm、密度 24 kg/m³ 的 EPS 板, 且取得了较好的减荷效果。

采用有限元软件 ABAQUS, 依据雅杜高速某涵洞截面的实际尺寸, 以该断面道路中线截面为研究对象, 建立填土—EPS 板—涵洞数值模型。假设涵洞与填土坐落于已沉降完成的刚性地基上, ABAQUS

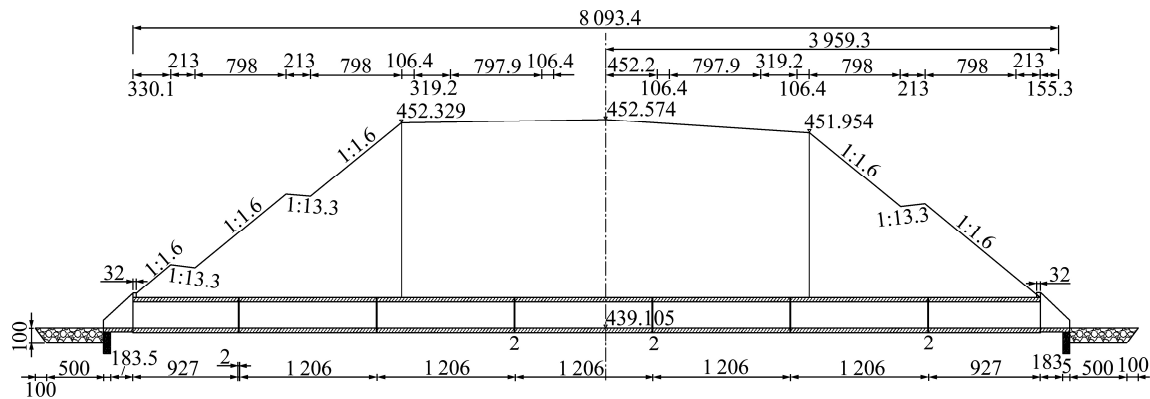


图 4 雅杜高速某涵洞截面(单位: cm)
Fig. 4 One section of Ya-Du Expressway (unit: cm)

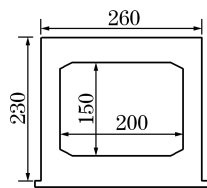


图 5 涵洞尺寸示意(单位: cm)
Fig. 5 Diagram of culvert (unit: cm)

模型中的地基用限制其底面竖向位移的边界条件模拟; 填土材料符合摩尔库伦屈服准则, 采用 Mohr-Coulomb 模型进行模拟; 涵洞仅考虑线弹性变化, 采用线弹性模型进行模拟; EPS 板考虑弹、塑性变形, 采用 Crashable-Foam 模型进行模拟。

为简便计算, 忽略涵洞洞脚延伸段, 从地基算起, 填土总高度取 14 m, 其数值模型如图 6 所示。在图 6 中, 空心矩形区域为涵洞, 计算时赋予其混凝土材料参数。涵洞顶部按与涵洞等宽每隔 10 cm 高度划分一片区域, 共分为 5 片区域(1[#], 2[#], 3[#], 4[#] 和 5[#]), 按照所需工况赋予其填土或 EPS 板材料参数, 以达到方便、快速计算多种工况下该模型的各项结果。模型其余区域均赋予填土材料参数按照分层区不同的材料赋予情况, 分为 5 种工况(见表 1)。

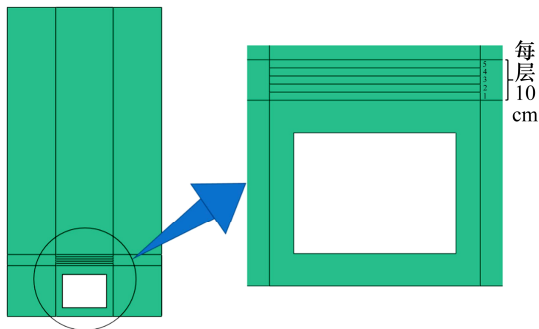


图 6 数值模型
Fig. 6 Details of numerical model

表 1 不同参数赋予方案

Table 1 Different parameters of the assignment scheme	
工况	编号 1~5 区域材料赋予细则
T-0	1~5 均赋予填土参数
T-1	1~2 赋予 EPS 材料参数, 其余填土参数
T-2	2~3 赋予 EPS 材料参数, 其余填土参数
T-3	3~4 赋予 EPS 材料参数, 其余填土参数
T-4	4~5 赋予 EPS 材料参数, 其余填土参数

注: 工况 T-0 模拟未铺设 EPS 板的工况; 工况 T-1~T-4 分别为模拟厚度为 20 cm 的 EPS 板铺设于涵洞顶板上方 0,10,20 和 30 cm 的工况。

ABAQUS 软件中, Crashable-Foam 模型的材料需要提供真实应力和塑性应变的关系。其与名义应力 σ 、名义应变 ε 的换算公式为:

1) 真实应力

$$\sigma_{\text{ture}} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

2) 塑性应变

$$\varepsilon_{\text{ture}}^p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

24 kg/m³ 的 EPS 板应力-塑性应变关系见表 2。模型中其余材料尺寸及力学参数见表 3。

表 2 24 kg/m³ 的 EPS 塑性应变

Table 2 Real plastic volume strain of EPS at 24 kg/m ³					
σ_{ture}	$\varepsilon_{\text{ture}}^p$	σ_{ture}	$\varepsilon_{\text{ture}}^p$	σ_{ture}	$\varepsilon_{\text{ture}}^p$
76.8	0.000	104.8	0.271	173.8	0.721
87.6	0.028	115.6	0.432	201.1	0.743
92.6	0.045	130.0	0.569	224.1	0.756
98.4	0.075	140.0	0.633	249.9	0.764

限制模型底部竖向位移与两侧水平位移, 模型顶部不作边界限制, 仅考虑重力作用下模型受力及响应, 不考虑排水渗流。因马斯顿效应在涵洞周边最为明显, 对涵洞及其顶部与侧向区域进行密集化

表 3 材料计算参数

Table 3 Material calculation parameters						
材料	密度/ (kg·m ⁻³)	尺寸/m	弹性模 量/MPa	摩擦 角/(°)	黏聚 力/(°)	泊松比
填土	1 800	7×14	5.2	28.2	31.1	0.35
EPS	24	2.6×0.1	2.27	—	—	0.03
涵洞	2 650	2.6×2.3(外尺寸); 2×1.5(内尺寸)	3×10 ⁴	—	—	0.17

网格划分, 对其余部分进行粗略化网格划分, 划分完成后模型网格如图 7 所示。

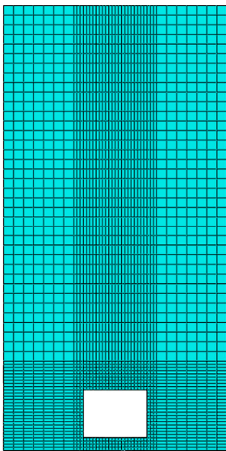


图 7 数值模型网格划分

Fig. 7 Grid generation of the numerical model

3 计算结果与分析

3.1 EPS 板铺设高度对填土垂直压应力的影响

不同工况下填土垂直压应力如图 8 所示。

在图 8(a)中, 未铺设 EPS 板时, 涵洞周边土体垂直压应力的最大值为 0.366 9 MPa, 出现在涵洞顶板上方两角处。涵洞顶板中心处(图中左侧箭头所指处)的垂直压应力为 0.245 1 MPa, 约为涵洞顶部垂直土柱压力($\sigma=\gamma h=0.21$ MPa)的 1.16 倍, 距涵洞侧壁 1 m 的地基处(图中右侧箭头所指处)垂直压应力为 0.188 7 MPa, 远小于其所处位置的上部土柱压力(0.25 MPa)。该现象是由于刚性涵洞的存在, 使得涵洞顶部与其两侧土体沉降量不同, 土体之间通过剪切应力引起土体内的应力转移, 产生了土拱效应, 导致涵洞承受更大范围的土柱压力。相应地, 地基处的土体垂直压应力也由于应力转移有较大幅度的减小。

在图 8(b)中, 铺设 EPS 板后土体地垂直压应力分布有较大的变化, 表现为原分布在涵洞顶部的大应力区域转移到了 EPS 板左、右两侧土体中, 压应力的最大值为 0.429 3 MPa。虽然垂直压应力的最大

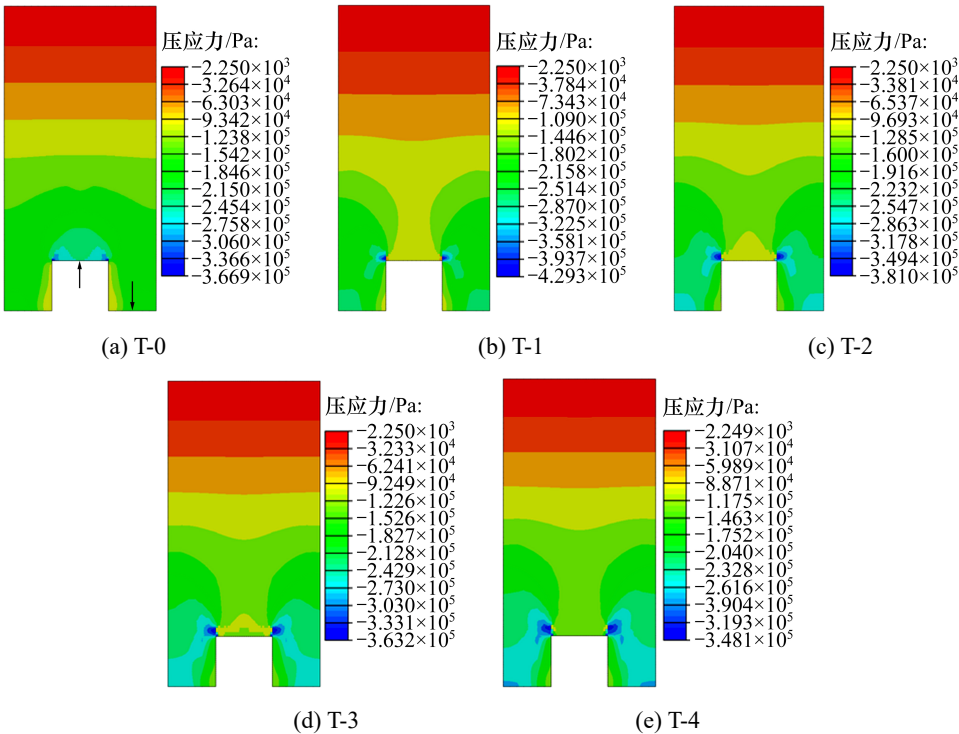


图 8 不同工况下填土垂直压应力云图

Fig. 8 Cloud chart of vertical compressive stress

值较未铺设 EPS 板时的有一定增大,但其所处的位置不再位于涵洞正上方,而转移至涵洞两侧土体中,涵洞本身所受垂直压应力大幅减小,原应力最大点处的应力减小为 0.102 MPa。

涵洞顶部的垂直压应力有较明显的削减,其顶板中心处垂直压应力为 0.122 7 MPa,约为未进行减荷时的 50%。距涵洞侧壁 1 m 地基处所受的土体垂直压应力为 0.254 8 MPa,接近其上部土柱压力。引起该应力转移现象的原因是:加铺的 EPS 板在土压力的作用下产生了较大的压缩,消除了涵洞顶部与两侧土体原本存在的沉降差,截断了马斯顿效应的产生条件。

在图 8(b)~(e)中,随着 EPS 板铺设高度的增加,土体中垂直压应力的最大值逐步减小,涵洞顶部小应力范围也逐步缩小。当高度上升到一定值后,涵洞顶板两角重新出现了大应力区域。涵洞顶板垂直土压力的变化如图 9 所示。在 4 种不同的铺设高度模拟下,除贴合洞顶铺设的工况外,涵洞两角处的垂直压应力仍存在较大的数值,但其在顶板净跨范

围内的垂直压应力始终保持着较小的数值,虽其数值随着铺设高度的增加而增大,但变化幅度较小,且相较未减荷时的数值变化不大,仍有较好的减荷效果。

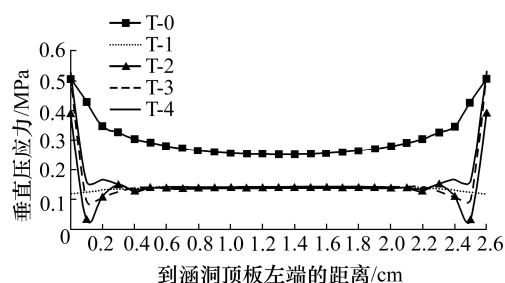


图 9 涵洞顶板垂直土压力的变化

Fig. 9 Vertical earth pressure change of culvert top plate

3.2 EPS 板铺设高度对涵洞 MISES 应力的影响

不同工况下涵洞半结构 MISES 应力如图 10 所示。

在图 10(a)中,未铺设 EPS 板时,涵洞 MISES(第四强度相当应力)应力的最大值为 3.415 MPa,出现在涵洞内壁两上角,区域较小,属明显的应力集中,

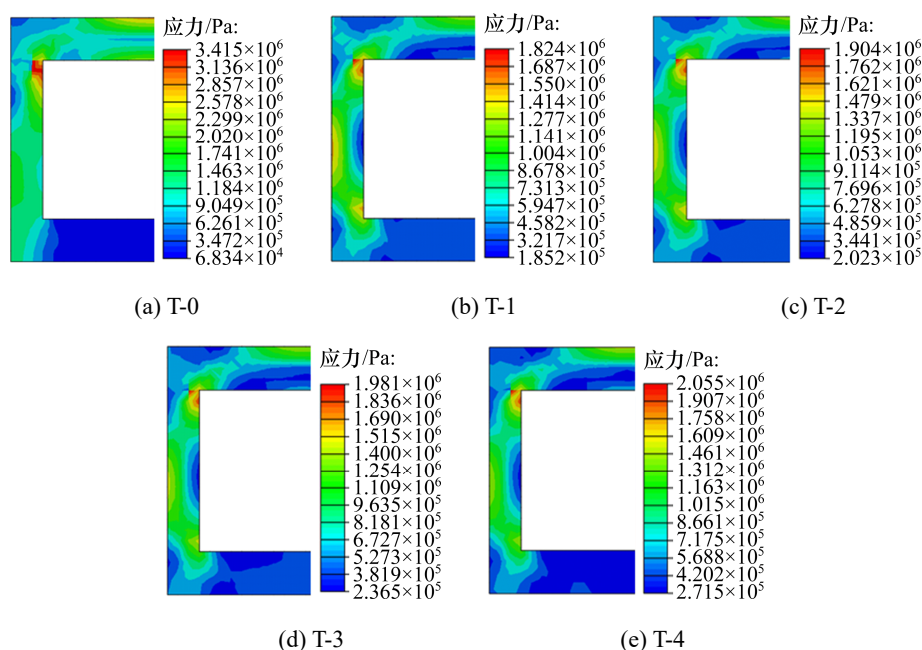


图 10 不同工况下涵洞半结构 MISES 应力

Fig. 10 Cloud chart of half culvert MISES stress

对涵洞结构安全较为不利。涵洞顶板 MISES 应力呈半圆环状分布,其中:顶板上沿最大,顶板下沿次之,顶板中心最小。

在图 10(b)中,铺设 EPS 板对涵洞进行减荷后,涵洞 MISES 应力的最大值变为 1.824 MPa,约为未

减荷时的 53.4%。大应力区域也发生了较明显的转移,原本集中在涵洞内径上角的大应力区域重分布到了涵洞内径四角与侧壁,且数值有较大的降低。铺设 EPS 板后涵洞顶板 MISES 应力的最大值仍产生在顶板上沿,但 MISES 应力的最小值出现在了

顶板下沿中心, 且涵洞四壁内部边缘的 MISES 应力都处于较小的值。

在图 10(b)~(e)中, 随着 EPS 板铺设高度的增加, 涵洞 MISES 应力的最大值逐渐增加, 且可见明显的演化趋势。即: 随着铺设高度的增加, 原本分布

较为均匀的 MISES 应力逐步向涵洞内径两上角集中, 涵洞顶板下沿逐渐出现较大的应力区域。

3.3 EPS 板铺设高度对涵洞顶板竖向剪应力的影响

不同工况下涵洞竖向剪应力云图如图 11 所示。

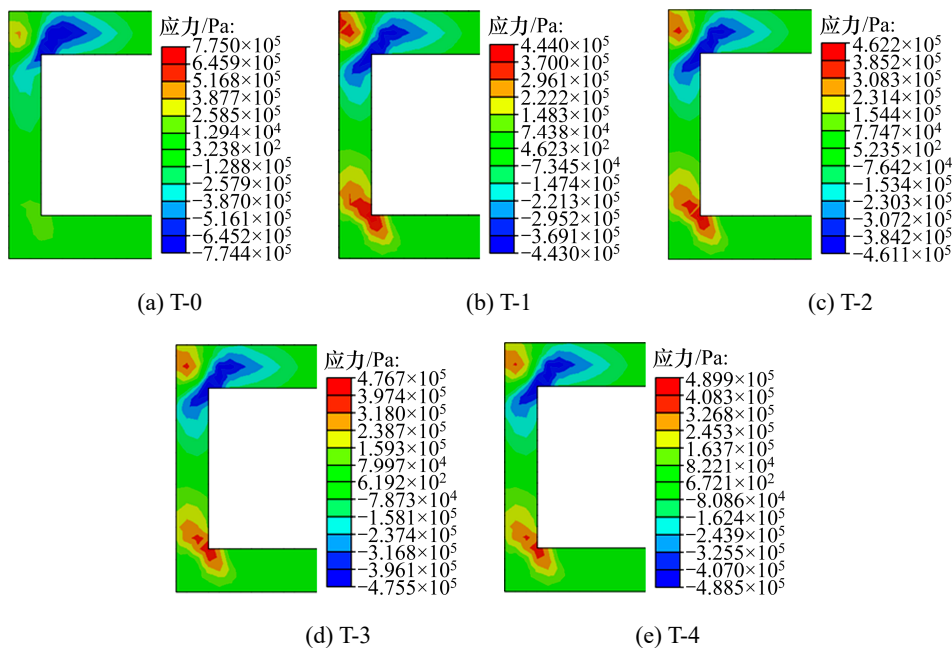


图 11 不同工况下涵洞竖向剪应力云图

Fig. 11 Cloud chart of half culvert vertical shear stress

在图 11(a)中, 未铺设 EPS 板时, 涵洞顶板竖向剪应力的最大值出现在净跨两端, 竖向剪应力的最大值为 0.775 MPa, 大应力区域呈叶片状, 涵洞截面中心两侧呈对称分布。

在图 11(b)中, 铺设 EPS 板后涵洞顶板竖向剪应力有较大的数值与分布变化, 竖向剪应力的最大值为 0.444 MPa, 出现在涵洞外部上角, 相比未铺设时的有较大的减小。

在图 11(b)~(e)中, 随着 EPS 板铺设位置的增高, 涵洞顶板剪应力逐步增大, 但总体变化缓慢, 增长比例微小, 仍远小于未铺设 EPS 版时的竖向剪应力, 与图 9 中所示垂直土压力的变化规律一致。

3.4 EPS 板铺设高度对涵洞顶板挠度的影响

涵洞顶板净跨挠度如图 12 所示。未铺设 EPS 板时, 涵洞顶板跨中挠度可达 0.442 mm, 挠度最小处有 0.155 mm。铺设 EPS 板时, 涵洞顶板挠度有较大幅度的减小, 挠度最小的工况是 T-1, 即 EPS 板紧贴涵洞顶板铺设, 其跨中挠度为 0.195 mm, 顶板端点挠度为 0.085 mm。由线弹性公式分析端部位移可知, 未铺设 EPS 板时, 涵洞侧壁所受竖向土压

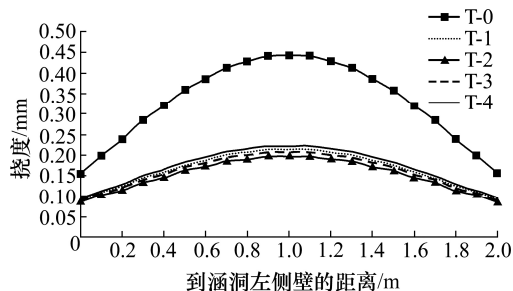


图 12 涵洞顶板净跨挠度

Fig. 12 Clear span deflection of the culvert roof

力接近减荷后的两倍, 与图 9 中所示结果吻合。

将涵洞顶板相对于顶板端点的挠度称为涵洞顶板的相对挠度。根据力的叠加原理, 此数据可更直观地反映涵洞顶板的变形状态。涵洞顶板净跨相对挠度如图 13 所示。未铺设 EPS 板时, 涵洞顶板跨中的相对挠度为 0.287 mm, T-1 工况下该点的相对挠度为 0.109 mm, 约为未铺设 EPS 板时的 38%, 表明铺设 EPS 板对顶板弯曲的改善效果非常明显。

随着 EPS 板铺设高度的增加, 涵洞顶板的相对挠度逐步增加, 涵洞变形增大, 但仍远小于未铺设时的挠度。

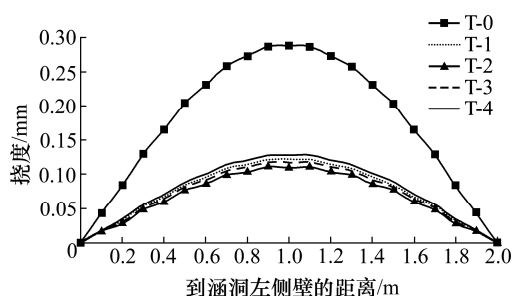


图13 涵洞顶板净跨相对挠度

Fig. 13 Relative clear span deflection of the culvert roof

4 结论

借助有限元软件 ABAQUS, 建立了填土总高度为 14 m 的高填方涵洞模型, 分析了 EPS 板在不同铺设高度下对填土的竖向压应力、涵洞的 MISES 应力、涵洞顶板的竖向剪应力和涵洞顶板的挠度的影响。得到的结论为:

1) EPS 板可通过大变形产生应力重分布, 大幅降低马斯顿效应带来的附加应力, 对涵洞的应力环境有良好的改善。

2) 改变 EPS 板的铺设高度对涵洞顶板竖向剪应力与涵洞净跨顶部垂直土压力的变化影响不大, 但对土体中垂直土压力分布有较大的影响。

3) 改变 EPS 板的铺设高度对涵洞 MISES 应力有一定的影响。铺设高度越高, MISES 应力的最大值越大, 但始终处于较低的范围。

4) 改变 EPS 板的铺设高度对涵洞顶板挠度的影响较为明显。铺设高度越高, 涵洞顶板挠度越大, 但整体数值仍远小于未铺设 EPS 板时的涵洞顶板挠度。

即使 EPS 板贴合涵洞顶部铺设时减荷效果最优, 但其铺设高度对涵洞的应力环境影响不明显, 建议施工铺设时可按施工环境自行选择较为方便的铺设高度。

参考文献(References):

- [1] Marston A, Anderson A O. The theory of loads on pipe in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[M]. Ames: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1913.
- [2] 夏英志, 程玉. 高速公路高填方路堤差异沉降特性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 268-273. (XIA Ying-zhi, CHENG Yu. Study on differential settlement characteristics of high fill embankment of expressway[J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 268-273. (in Chinese))
- [3] 曹周阳, 顾安全, 杨风云. 上埋式涵洞垂直土压力计算及减荷技术应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4):

231-235. (CAO Zhou-yang, GU An-quan, YANG Feng-yun. Vertical earth pressure calculation and reducing-load technology application for positive buried culverts[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(4): 231-235. (in Chinese))

- [4] 廖梓宇. 山区公路高填方涵洞受力特性及减荷措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. (LIAO Zi-yu. Study on stress characteristics and load reduction for high embankment culvert in mountain roads[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [5] 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. Study on vertical earth pressure of buried pipeline and cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 3-15. (in Chinese))
- [6] 高洪梅, 刘汉龙, 刘金元, 等. EPS 颗粒轻质混合土的蠕变模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 198-205. (GAO Hong-mei, LIU Han-long, LIU Jin-yuan, et al. Research on creep model of EPS composite soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 198-205. (in Chinese))
- [7] 雷忠琦, 姚小虎, 龙舒畅, 等. 聚苯乙烯泡沫材料的动态压缩特性[J]. 高压物理学报, 2019(2): 100-109. (LEI Zhong-qi, YAO Xiao-hu, LONG Shu-chang, et al. Dynamic compression properties of polystyrene foam[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019(2): 100-109. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 王俊伟. EPS 材料用于高填方涵洞减荷的工程性质研究[D]. 西安: 长安大学, 2009. (WANG Jun-wei. EPS engineering properties for culvert load reduction under high fill embankment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [10] 王庆石. 高填方明洞 EPS 板卸载室内试验和数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016. (WANG Qing-shi. Model test and numerical simulation of earth pressure with EPS boards load-reducing for the high fill open cut tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [11] 潘放, 冯忠居, 王景奇, 等. 高填方涵洞 EPS 板减荷效果影响因素研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2017, 13(9): 195-198. (PAN Fang, FENG Zhong-ju, WANG Jing-qi, et al. Study on influence factors of load reduction effect of EPS slab for high fill culvert[J]. Highway Transportation Technology: Application Technology, 2017, 13(9): 195-198. (in Chinese))
- [12] 李盛, 卓彬, 王起才, 等. 高填方黄土明洞顶 EPS 板和土工格栅共同减载计算及土拱效应分析[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 16-22. (LI Sheng, ZHUO Bin, WANG Qi-cai, et al. Load reduction calculation and soil arch effect analysis for high fill open cut tunnel in loess area under joint action of EPS and geogrid[J]. China Railway Science, 2018, 39(1): 16-22. (in Chinese))
- [13] 万黎明. 基于室内模型试验的高填方路堤涵洞土压力研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. (WAN Li-ming. Research on soil pressure of culvert area in high embankment based on laboratory model test[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))