

DOI:10.11918/202302024

填土-EPS板蠕变下减载式涵洞土压力长期变化规律

陈保国, 吴森, 高琦, 孙梦尧, 袁山, 吴雪婷

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要: 减载式涵洞改变了涵顶填土荷载的传递路径,使得上部填土荷载向减载块集中,从而降低涵洞顶板受到的土压力,但是在长期填土荷载下,土体与减载孔内的柔性填料会发生蠕变变形导致应力重分布。为了明确长期填土荷载作用下减载式涵洞的土压力变化规律与减载效果,利用模型试验探究了刚性地基条件下减载式涵洞在填筑砂土施工期间的荷载传递规律,根据试验结果验证了数值模型的正确性;再利用验证后的数值模型研究了填土荷载作用下,考虑减载孔内EPS柔性填料蠕变、路基填土蠕变,以及二者共同蠕变条件下,减载式涵洞的土压力长期变化规律。研究表明:刚性地基条件下,考虑EPS板蠕变时,工后30年涵顶土压力相对于填土结束时减小了25.4%,涵顶土压力减载效果随时间增长而增强,建议涵顶竖向土压力系数可取0.45;考虑填土蠕变或二者共同蠕变时,涵顶土压力波动式增大,并最终均趋近于填土自重压力,减载效果随时间增长逐渐减弱,建议涵顶竖向土压力系数可取1.1。对于黏性土路基,设计中如果不考虑长期填土蠕变引起的土压力重分布,很可能高估减载式涵洞的减载效果,从而导致结构病害。

关键词: 减载式涵洞;蠕变变形;应力重分布;长期土压力;土拱效应

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)03-0046-09

Long-term variation law of earth pressure of load-shedding culvert considering the creeps of fill-EPS slab

CHEN Baoguo, WU Sen, GAO Qi, SUN Mengyao, YUAN Shan, WU Xueting

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The load-shedding culvert changes the transmission path of the fill load on the culvert roof, causing the fill load to concentrate on the load shedding blocks, thereby reducing the earth pressure on the culvert roof. However, the soil and compressible material in the load shedding hole will creep with time under long-term fill load, leading to stress redistribution. In order to clarify the variation law of earth pressure and load reduction effect of the load-shedding culvert under the long-term fill load, the model test on rigid foundation was used to explore the load transfer law of the load-shedding culvert during the sand filling construction, and the correctness of the numerical model was verified according to the test results. Then the verified numerical model was conducted to analysis the long-term variation law of earth pressure of the load-shedding culvert by considering three different creeps conditions (i. e., the creep of EPS material in the load shedding hole, the creep of embankment fill, and both creeps). The results show that, on rigid foundation, considering the creep of EPS slab, the earth pressure at the top of the culvert decreases by 25.4% in the 30 years of post-construction compared with that at the end of soil filling, the load reduction effect of the earth pressure at the top of the culvert increases with time, it suggests that the vertical earth pressure coefficient on the culvert top can be taken as 0.45. When considering the fill creep or both creeps, the earth pressure at the top of the culvert fluctuates and finally approaches to the self-weight pressure of the fill soil, the load reduction effect gradually decreases with the increase of time, it suggests that the vertical soil pressure coefficient on the culvert roof can be taken as 1.1. For cohesive soil embankment, if the earth pressure redistribution caused by fill creep is not considered in the engineering design, the load reduction effect of the load-shedding culvert probably be overestimated and resulting in structural damage.

Keywords: load-shedding culvert; creep deformation; stress redistribution; long-term earth pressure; soil arch effect

收稿日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-03-20; 网络首发日期: 2024-12-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241209.1727.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52178370)

作者简介: 陈保国(1981—),男,博士,副教授

通信作者: 陈保国,baoguo_chen@126.com

高等级公路和铁路建设中,高填方刚性涵洞的应用非常普遍。然而,由于刚性涵洞与其两侧填土的刚度差异过大,造成了涵洞顶部严重的应力集中现象,甚至引起一系列的结构病害^[1]。为了降低涵顶土压力,通常采用在涵顶铺设刚度很小的柔性材料或加筋材料,从而减小涵顶内外土柱体之间的差异沉降,降低涵顶土压力^[2-6]。

文献[7]采用模型试验的方法证明了涵顶铺设EPS泡沫块使涵顶上方土体内产生了土拱效应,减小了涵顶的竖向土压力,并得出竖向土压力的大小与EPS板刚度呈反比。文献[8]对铺设EPS板的盖板涵进行了两年多的监测,结果证明涵顶土压力明显减小,减载效果良好。文献[9]针对纽约州某涵洞坍塌后重新修缮开展研究,涵顶铺设EPS板后避免了相同荷载作用下涵洞的二次坍塌。文献[10]结合印度某公路涵洞进行分析,顶部铺设EPS板和未铺设EPS板两种情况下,6个月以后未铺设EPS板的涵洞由于荷载过大导致过度沉降出现纵向裂缝,而铺设EPS板的涵洞完好无损。文献[11]对EPS铺设在涵洞顶部和侧墙的减载效果和EPS板的参数影响进行了试验分析,通过比较得出了涵洞结构周围土压力的分布情况。文献[12]发现涵顶铺设EPS板可以有效地减小涵洞与涵侧土体的差异沉降,从而达到减载的目的。

该减载方法虽然降低了涵顶土压力,但其将涵顶荷载转移到了涵侧,使得涵侧竖向土压力明显增大,从而导致涵洞侧墙受到的水平土压力和弯矩也明显增大^[13-14]。为了解决这个问题,文献[15]设计了一种新型减载式涵洞,通过减载块的作用有效缓解了涵顶应力集中的现象,还减小了涵侧土体的竖向土压力,从而减小了涵洞侧墙所受到的水平土压力。文献[16]和文献[17]分别采用模型试验、数值模拟和理论分析等研究了施工期减载式涵洞上部填土荷载传递规律。文献[18]认为涵顶滑动面上路堤填土的剪切应力-应变模型接近理想线性弹-塑性模型,在此基础上提出了一种计算减载式刚性涵洞顶板竖向土压力的理论计算式。

然而,在长期荷载作用下,土体以及减载材料随着时间会发生蠕变,有限的研究结果发现涵土体系的受力状态也会随着时间发生变化,从而导致涵土体系发生应力重分布^[19]。文献[20]模拟了不同类型黄土的长期荷载作用下沟谷式明洞的受力特性,得出低压实度的土在初始阶段能很好地减小荷载,但是长期荷载作用下荷载会发生回弹,危及明洞的稳定性。

减载式涵洞可使涵洞结构受力更加合理,但是

其长期受力特性和应力重分布规律尚不明确。长期填土荷载作用下减载式涵洞的土压力变化规律需要考虑柔性填料与填土的蠕变性质。实际工程中,当填土为碎石土等蠕变不明显的优质填料,只需考虑EPS板的蠕变;当填土为砂性土或黏性土等蠕变明显的填料时,需要考虑EPS板和填土的共同蠕变。为了明确长期荷载作用下减载式涵洞的减载效果与受力特性,利用模型试验探究了减载式涵洞在填筑砂土施工期间的荷载传递规律,根据试验结果验证了数值模拟方法的正确性。鉴于长期模型试验的局限性,采用验证后的数值模拟方法,研究了长期填土荷载作用下,考虑填土蠕变,EPS板蠕变,以及二者共同蠕变时减载式涵洞的土压力变化规律和减载式涵洞的长期减载效果,以为实际工程提供理论参考。

1 填土荷载传递规律及数值模型验证

1.1 模型试验

1.1.1 试验模型与材料

设计模型试验研究减载式涵洞的受力特性,分析减载式涵洞在填土施工过程中的荷载分布规律。模型试验箱长宽高均为1.5 m,模型箱三面采用铝合金板,一面采用钢化玻璃。

减载式涵洞模型采用厚度为3 mm的镀锌钢板焊接而成,截面的宽为20 cm,高为22.5 cm,长为150 cm,如图1所示。在试验设计中考虑了模型试验几何相似原则,模型与一般工程尺度的几何尺寸比例为1:20。在涵洞模型外表面涂抹一层水泥砂浆,使得填土与涵洞的界面接触情况更接近工程实际。减载孔内铺设密度为 12 kg/m^3 ,厚度为2.5 cm的EPS板作为减载材料。涵洞的宽度约为模型箱宽度的14%,在模型箱内壁涂抹凡士林减小模型箱侧壁与填土之间的摩擦作用。模型试验填料采用河砂,土性参数由室内土工试验获得。试验材料参数见表1。

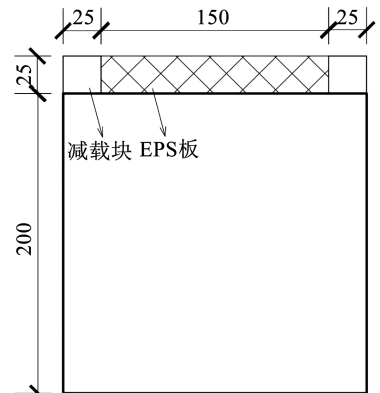


图1 减载式涵洞几何模型(mm)

Fig. 1 Geometric model of load-shedding culvert(mm)

表 1 模型试验材料参数

Tab.1 Model test material parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
填砂	1 750	30	0.30	0	31
EPS 板	12	3	0.11	—	—
涵洞	7 850	200 000	0.29	—	—

1.1.2 试验方案

模型试验中为了分析 EPS 板和填土蠕变影响,不考虑地基土蠕变,在模型箱内的刚性地面上部铺设 1.5 cm 厚的压实砂垫层。填土分层填筑,称重后按照预定的密度 $1\ 750\ \text{kg}/\text{m}^3$ 进行压实(体积-质量法)。在土体填筑和土压力盒埋设前对土压盒进行调零,然后依次分层填筑涵侧土体,并在涵洞周围相应位置按照图 2 埋设土压力盒(PC1~PC7),土压力盒 PC1~PC3 和 PC7 水平铺设在涵顶用于监测涵顶平面土压力,PC4~PC6 紧贴侧墙用于监测侧墙上中下 3 个位置承受的水平土压力。最后依次填埋涵顶的 5 层填土,每层填土厚度 200 mm。每层填土完毕后静置,待土压力数据稳定后记录相应工况下的土压力,填土模型试验如图 3 所示。

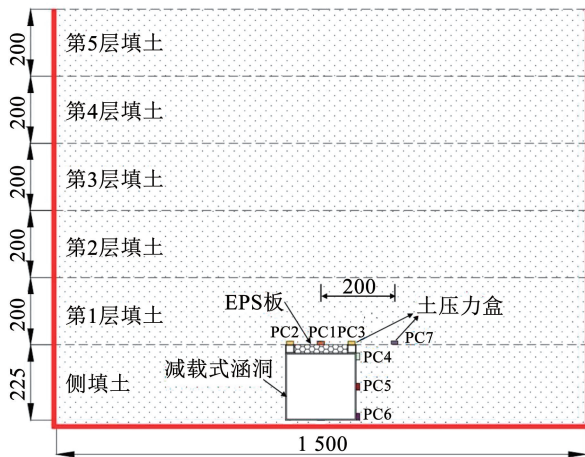


图 2 模型试验测点布置 (mm)

Fig.2 Layout of measuring points for model test (mm)

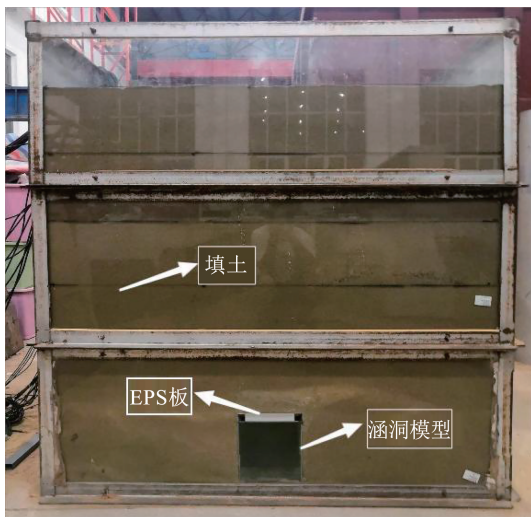


图 3 模型试验

Fig.3 Model test

1.2 模型试验结果分析

1.2.1 减载式涵洞涵顶平面竖向土压力

涵顶平面土压力随填土高度的变化规律如图 4 所示,土压力系数(竖向土压力与填土自重压力的比值)随填土高度的变化规律如图 5 所示。减载式涵洞涵顶中部(测点 PC1)土压力随填土高度非线性增大,且明显小于上部土柱体自重压力 γh ,随着填土高度的增加,两者的差别越来越大。涵顶中部土压力系数 k (由测点 PC1 计算得出)明显小于 1,且随着填土高度的增加逐渐减小。由此可知减载式涵洞在施工期减载效果明显,且减载效果随着填土高度增大而增强。将涵顶中部土压力系数变化规律与现有的代表性文献研究成果进行对比^[2,6,13,21],发现减载式涵洞的减载效果良好,涵顶竖向土压力系数变化规律与现有的代表性文献主要规律一致,试验得出的土压力系数主要集中在 0.41~0.48 之间,与现有代表性文献中的土压力系数的区间范围相当,说明模型试验结果合理。

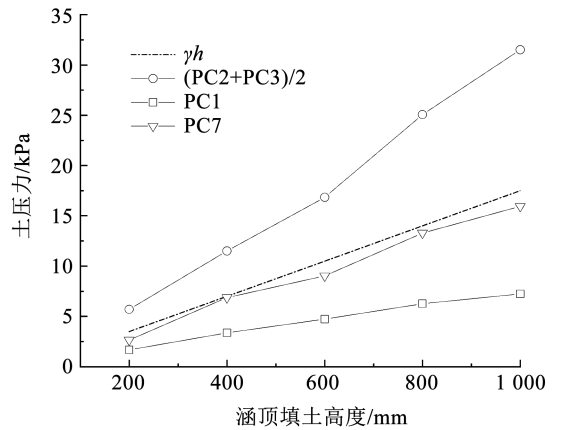


图 4 涵顶平面土压力

Fig.4 Plane earth pressure at the top of culvert

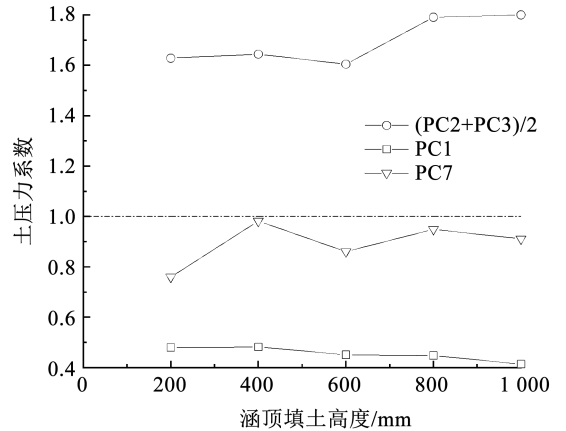


图 5 涵顶平面土压力系数

Fig.5 Plane earth pressure coefficient at the top of culvert

减载块上方土压力(PC2 和 PC3 测点的平均土压力)随着填土高度的增大非线性增加,减载块上方土压力明显大于涵顶中部(PC1)土压力和涵侧竖

向土压力(测点 PC7)。研究发现减载式涵洞顶板正上方土柱体和涵侧土体的部分荷载转移到减载块上方。

1.2.2 减载式涵洞侧墙水平土压力

涵洞侧墙所承受的水平土压力如图6所示。总体上,涵洞侧墙上3个测点(PC4、PC5、PC6)的水平土压力均随填土高度不断增大;在填土高度为0~400 mm时,侧墙所受水平土压力大小从大到小依次是PC6、PC5、PC4。随着填土高度增加(600~1 000 mm时),侧墙所受水平土压力从大到小依次是PC5、PC6、PC4。主要是由于减载块上方和涵洞底板两端均产生了应力集中,使得涵侧上部和涵侧下部的部分土压力传递到减载块和底板,因此涵洞侧墙中间的水平土压力大于涵侧上部和下部水平土压力。

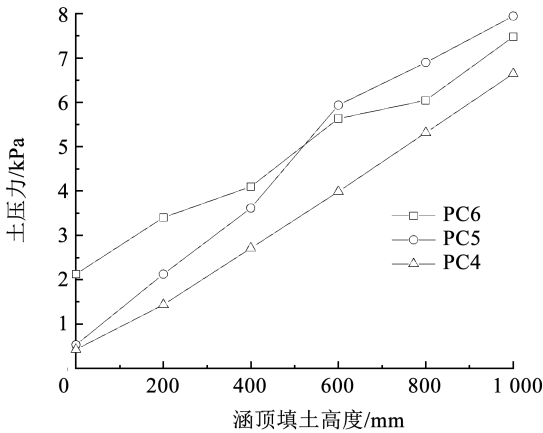


图6 侧墙水平土压力

Fig. 6 Horizontal earth pressure on side wall

涵洞侧墙所受的水平土压力系数随填土高度的变化规律如图7所示。PC4、PC5、PC6测点的水平土压力系数均随着填土高度的增大而减小。根据静止土压力系数公式 $K_0 = 1 - \sin \varphi$ 可知静止土压力系数约为0.49。减载式涵洞侧墙上所承受的水平土压力明显小于静止土压力。由此可以发现,涵侧上方土体部分竖向土压力传递到减载块上方,从而导致涵侧水平土压力明显减小。

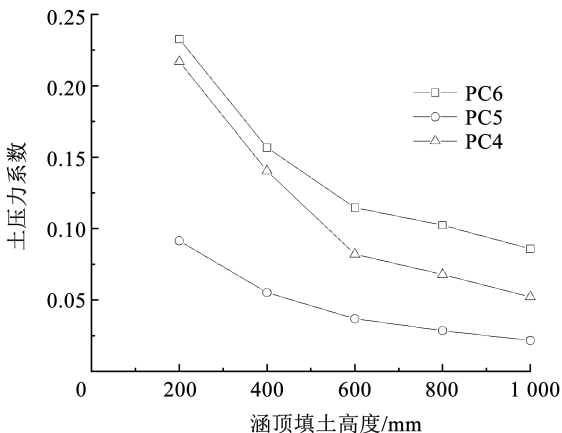


图7 侧墙水平土压力系数

Fig. 7 Horizontal earth pressure coefficients on side wall

1.3 数值模型及验证

土压力盒长期埋于土中易锈蚀或失效,因此长期荷载作用下减载式涵洞受力特性的试验研究存在较大困难。后文将利用验证后的数值模型模拟长期荷载作用下(考虑填土蠕变, EPS板蠕变,以及二者共同蠕变3种情况)涵-土体系的应力变化规律。

利用FLAC3D有限差分软件建立涵土体系三维数值模型。数值模型采用与模型试验相同的几何尺寸,填筑过程的模拟与模型试验方案一致,模型四周约束水平位移,底部约束水平位移和竖向位移。涵洞与填土的接触面采用摩尔-库伦剪切界面模拟,界面的剪切刚度和法向刚度取模型试验涵洞材料刚度的10倍,界面摩擦角采用15°,不考虑黏聚力和膨胀角^[22]。涵洞材料采用线弹性体;根据相关的实验研究结果发现,填砂和EPS板长期蠕变本构关系均符合Burgers-Mohr本构模型^[8,23],Burgers-Mohr模型是在摩尔-库伦模型的基础上嵌入Burgers模型,如图8所示。

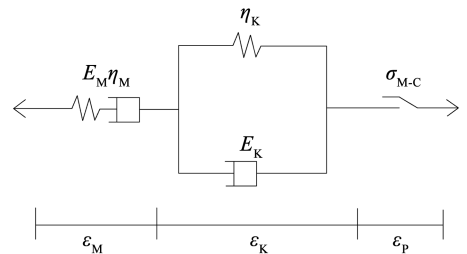


图8 Burgers-Mohr模型

Fig. 8 Burgers-Mohr model

EPS板长期蠕变的本构方程为

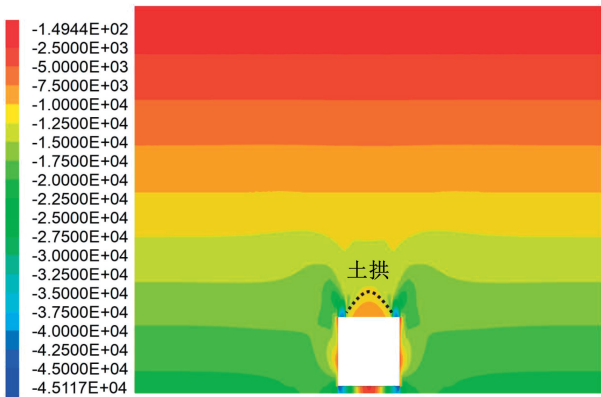
$$\varepsilon(t) = \sigma \left(\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} \right) + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K t}{\beta}} \right) \quad (1)$$

文中利用MATLAB拟合出本构方程的相应参数,见表2。

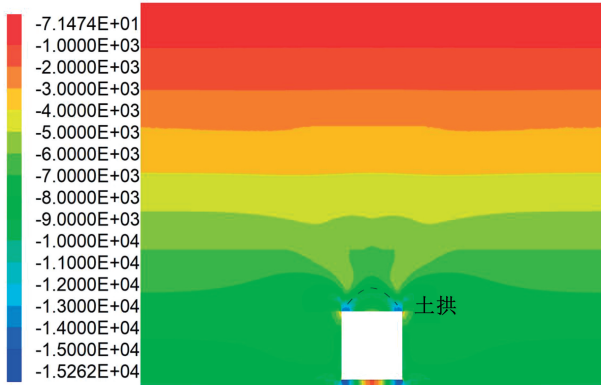
表2 Burgers-Mohr模型的参数

材料	$c/$ kPa	$\Phi/$ (°)	μ	$E_M/$ MPa	$E_K/$ MPa	$\eta_M/$ (MPa·d)	$\eta_K/$ (MPa·d)
填砂	0	31	0.30	0.259	1.076	13.281	0.042
EPS板			0.11	0.500	3.140	1.006×10^{-3}	5.789×10^{-6}

模拟短期荷载作用下涵土体系受力特性时,关闭材料蠕变分析步,模拟长期荷载作用效应时开启蠕变分析步。短期荷载作用下数值模拟得到第一和第三主应力云图如图9所示,可以看出,第一主应力云图与第三主应力云图中涵洞顶部均存在土拱效应,涵洞上方土压力明显小于填土自重压力,减载块上部存在较强的应力集中现象。



(a) 第一主应力分布规律



(b) 第三主应力分布规律

图 9 短期荷载下填土结束时应力分布规律 (Pa)

Fig.9 Stress distribution after filling of short-term load (Pa)

数值模拟得出的土压力变化规律与实测结果一致,如图 10 所示。填土过程中,顶板中部竖向土压力模拟结果与实测值最大差异为 5.7%;减载块上部土压力数值模拟结果与实测值的最大差异为 7.6%;侧墙水平土压力数值模拟结果与实测值的最大差异为 6.4%。由此说明数值模型是合理的,模拟结果可信。

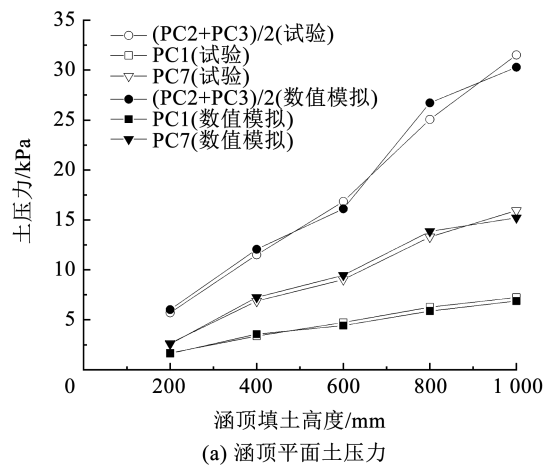
2 土压力长期变化规律

不同性质的填料蠕变特性存在差异,工程中例如黏土、粉质黏土、淤泥质黏土等在长期荷载作用下会发生明显的蠕变,需要考虑工后填土蠕变及 EPS 板蠕变引起的应力重分布规律。工程中碾压密实的碎石土或隧道出渣等优质填料,其蠕变特性不明显,长期荷载作用下,主要考虑 EPS 板蠕变引起的长期土压力变化规律。在研究刚性地基条件下减载式涵洞土压力长期变化规律时,主要考虑填土蠕变、EPS 板蠕变和二者共同蠕变 3 种情况。

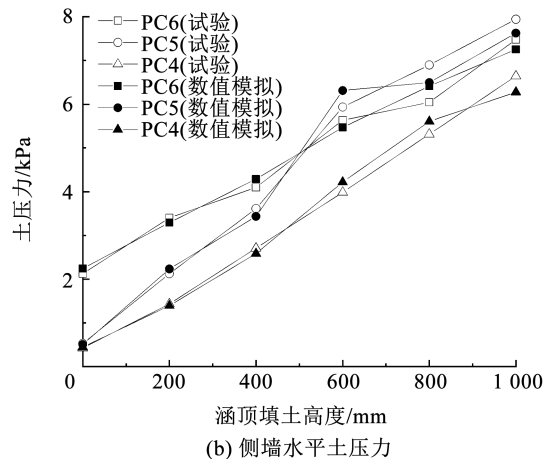
2.1 工后涵-土体系竖向应力分布规律

1) 填土蠕变。仅考虑填土蠕变时,工后涵-土体系竖向应力分布规律如图 11、12 所示。与施工结

束时(图 9)相比,工后第 5 年(图 11)的涵顶土压力明显增大,顶板中部土压力增加了 46.4%;减载块上方土压力减小了 64.8%。涵顶上方土拱效应减弱,涵洞减载效果明显减弱,涵顶平面竖向土压力逐渐趋于均匀,涵洞两端角点应力集中现象减弱。工后 30 年(图 12),涵顶上方土压力继续增大,顶板中部土压力增加了 109.8%;减载块上方土压力继续减小,减小了 57.3%,涵顶平面竖向土压力趋于填土自重压力,上方土拱效应减弱。涵侧周围应力集中现象明显缓解。



(a) 涵顶平面土压力



(b) 侧墙水平土压力

图 10 数值模拟与试验结果对比

Fig. 10 Comparison of numerical simulation and test results

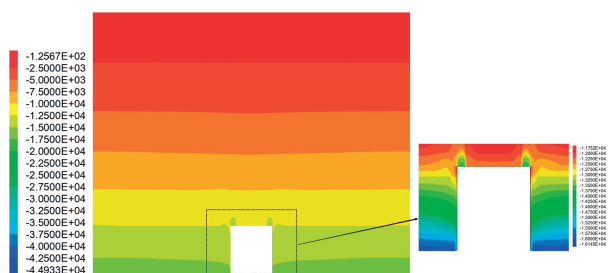


图 11 填土蠕变 5 年后的竖向应力云图

Fig. 11 Vertical stress cloud map after fill creep for 5 years

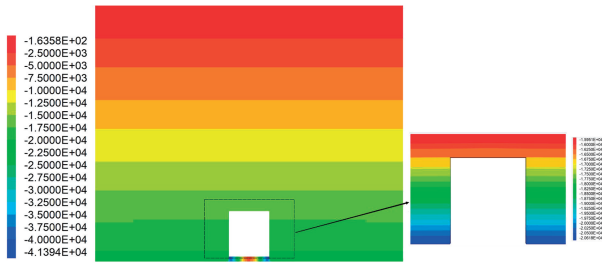


图 12 填土蠕变 30 年后的竖向应力云图

Fig. 12 Vertical stress cloud map after fill creep for 30 years

2) EPS 板蠕变。仅考虑 EPS 板蠕变时,工后涵-土体系竖向应力分布规律如图 13、14 所示。与施工结束时相比,工后第 5 年(图 13)顶板中部土压力减小了 33.2%;减载块上部土压力增大了 1.3%,涵顶填土内部土拱效应增强,减载效果也随着时间逐渐增强,这与前文中仅仅考虑填土蠕变时的结果正好相反;侧墙两端的应力集中现象变化微弱。工后 30 年(图 14),涵顶中部土压力相对于第 5 年时变化微弱,减载块上部土压力略微增大,涵顶填土内部的土拱效应趋于稳定,侧墙两端的应力集中现象几乎不变。

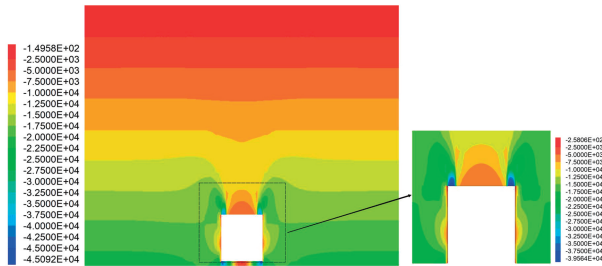


图 13 EPS 板蠕变 5 年之后的竖向应力云图

Fig. 13 Vertical stress cloud map after eps plate creep for 5 years

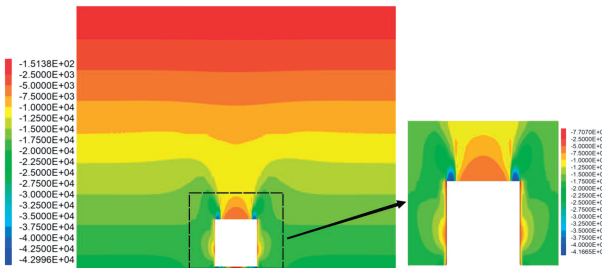


图 14 EPS 板蠕变 30 年之后的竖向应力云图

Fig. 14 Vertical stress cloud map after eps plate creep for 30 years

3) 填土和 EPS 板共同蠕变。考虑填土和 EPS 板共同蠕变时,工后涵-土体系竖向应力云图如图 15、16 所示。与施工结束时相比,工后第 5 年时,涵顶土压力增大了 47.7%,减载块上方土压力减小了 65.0%,涵顶上方土拱效应明显减弱,涵顶平面竖向土压力趋于均匀,侧墙两端的应力集中现象也逐渐减弱。工后 30 年时,涵顶上方土压力继续增大,与施工结束时相比增大了 109.8%,减载块上方土压

力继续减小了 56.6%,涵顶填土内部的土拱效应逐渐减弱,涵顶上方同一水平处各位置土压力趋于填土自重压力。由上述分析可知,考虑共同蠕变时,减载式涵洞的减载效果也随着时间增长逐渐减弱。

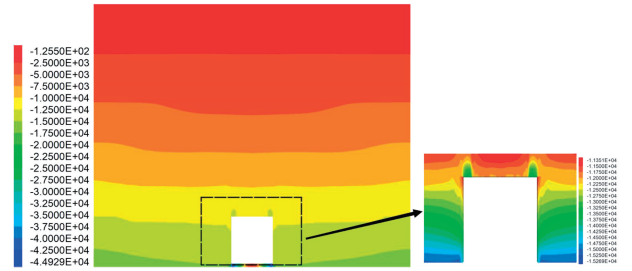


图 15 二者共同蠕变 5 年之后的竖向应力云图

Fig. 15 Vertical stress cloud map after both creep for 5 years

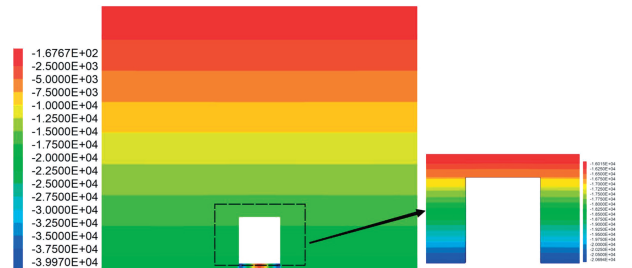


图 16 二者共同蠕变 30 年之后的竖向应力云图

Fig. 16 Vertical stress cloud map after both creep for 30 years

2.2 涵顶中部土压力长期变化规律

工后 30 年内 3 种情况下涵顶中部土压力随时间的变化规律如图 17 所示,涵顶土压力系数变化规律如图 18 所示。

1) 考虑填土蠕变,涵顶中部土压力在 0~180 个月内持续非线性增大。第 60 个月时涵顶中部土压力达到了 12.5 kPa,比填土结束时增大了 46.4%,第 180 个月时达到最大值 19.3 kPa,约为填土自重压力的 1.1 倍,明显大于施工结束时的土压力系数 0.41,减载效果明显减弱。涵顶中部土压力在 180~360 个月内略微减小后趋于稳定,最终接近于上覆填土的自重压力。研究发现填土的蠕变明显改变了涵顶土压力分布特征。工程设计中应根据涵洞的设计使用寿命来确定减载效果,若不考虑柔性填料蠕变时,建议涵顶土压力可取 1.1 倍填土自重。

2) 考虑 EPS 板蠕变,涵顶中部土压力在 0~10 个月内持续减小,并在第 10 个月时达到了最小值,此时涵顶土压力为 5.1 kPa,土压力系数减小到 0.30。由此可知,工后 0~10 个月内涵顶土体内部的土拱效应逐渐增强,减载效果也随之增强。涵顶中部土压力在 10~30 个月内略微增大,并在第 30 个月后趋于稳定。主要原因可能是在 0~10 个月内,涵顶土压力逐渐减小,造成 EPS 板发生微小的回弹,涵顶铺设 EPS 板所产生的土拱效应也略微减弱,因此

涵顶土压力在第 10 个月后略有增大。而随着涵顶土压力增大, EPS 板的压缩量也会略微增大以遏制涵顶土压力的增大, 最终在第 30 个月时达到平衡状态, 土压力也趋于稳定。在第 30 年时, 涵顶土压力达到了 6.2 kPa, 相对于施工结束时减小了 25.4%。研究得出: 随着 EPS 板蠕变, 涵顶中部土压力一直小于填土结束时的涵顶土压力, 因此涵顶土压力可以按照施工完毕时涵顶垂直土压力计算值来确定。

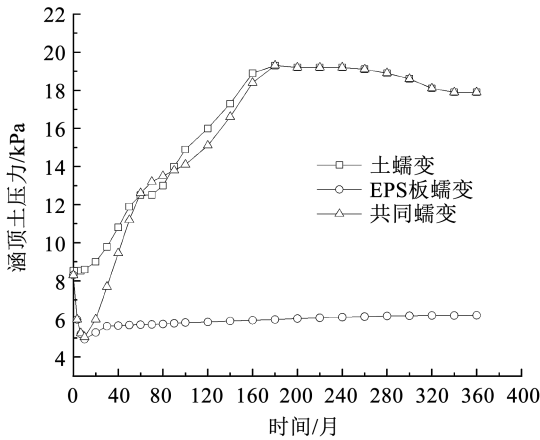


图 17 工后 30 年时间内涵顶土压力的变化规律

Fig. 17 Variation law of top earth pressure within 30 years after construction

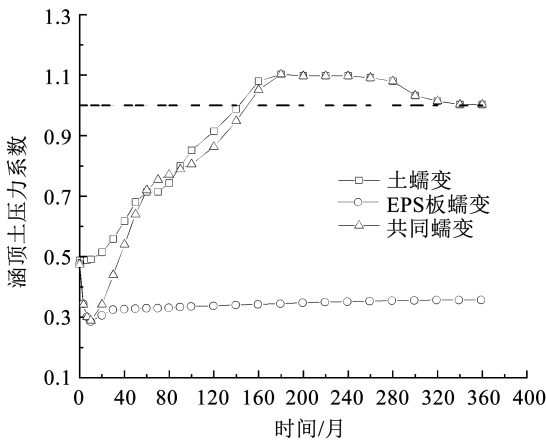


图 18 工后 30 年时间内涵顶土压力系数变化规律

Fig. 18 Variation law of earth pressure coefficient on culvert top in 30 years after construction

3) 考虑填土和 EPS 板共同蠕变, 在 0 ~ 10 个月内, 涵顶土压力不断减小, 涵顶土压力随时间变化规律与 EPS 板蠕变时的变化规律相似。由此可知工后前 10 个月内填土蠕变对涵顶土压力的影响远小于 EPS 板蠕变的影响。在 10 ~ 180 个月内, 涵顶土压力不断增大。其中, 在 10 ~ 60 个月内涵顶土压力的大小介于同时期内“填土蠕变”和“EPS 板蠕变”时涵顶土压力的大小之间。工后 60 个月以后, 涵顶土压力随时间的变化规律与填土蠕变时涵顶土压力随时间的变化规律相似, 最终也逐渐趋于填土的自

重压力。由研究结果可知, 随着填土和减载孔内的柔性填料的蠕变, 减载式涵洞的减载效果在前 10 个月有所增强, 然后会逐渐减弱。根据分析结果, 考虑共同蠕变时涵顶土压力可取 1.1 倍填土自重压力。

2.3 减载块上部土压力长期变化规律

工后 30 年内 3 种情况下减载块上部土压力随时间的变化规律如图 19 所示。

1) 考虑填土蠕变, 减载块上部土压力在填土结束时最大。在 0 ~ 60 个月内减载块上部土压力不断减小, 在第 60 个月时达到最小值, 为 13.7 kPa, 减小了 64.8%。在 60 ~ 180 个月内略微增大, 在第 180 个月时达到了 18.7 kPa, 比填土结束时减小了 52.1%。在 180 ~ 360 个月内略微减小并趋于稳定, 最终减小了 57.3%。

2) 考虑 EPS 板蠕变, 减载块上部土压力随着时间略微增大并趋于稳定, 在第 60 个月时增大了 1.3%, 在第 360 个月时增大了 6.3%, 增量较小。EPS 板蠕变对减载块上部土压力的影响较小。

3) 考虑填土和 EPS 板共同蠕变, 减载块上部土压力的变化规律与考虑填土蠕变时的变化规律基本相同, 主要是因为 EPS 板蠕变对减载块上部土压力的影响很小, 而填土蠕变对减载块上方土压力影响占主导作用。

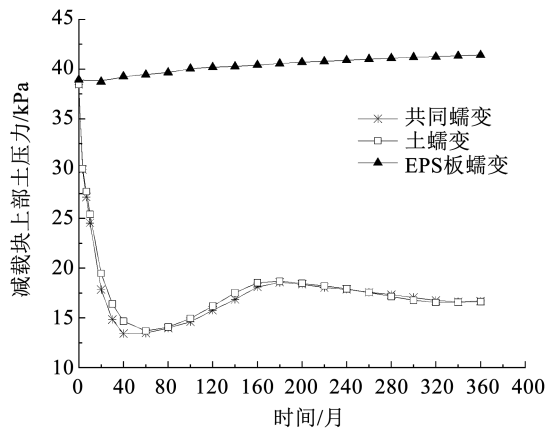


图 19 工后 30 年时间内减载块上方土压力的变化规律

Fig. 19 Variation law of earth pressure on load shedding block in 30 years after construction

2.4 侧墙水平土压力长期变化规律

工后 30 年内 3 种情况下侧墙水平土压力随时间的变化规律如图 20 ~ 22 所示。

1) 考虑填土蠕变, 在 0 ~ 18 个月内侧墙 3 个部位(PC4、PC5、PC6)的水平土压力不断增大, 而 PC6 点的水平土压力的增大速度明显大于 PC5 点水平土压力的增长速度, 在第 18 个月左右 PC6 点的水平土压力超过了 PC5 点的水平土压力, 此时 PC4、PC5 和 PC6 点的水平土压力分别增大了 40.0%、

25.8%和42.9%。主要是因为填土蠕变时,涵顶土拱效应减弱,涵侧竖向土压力增大,且涵洞基底两端的应力集中现象得到了部分缓解,因此侧墙下部水平土压力增速大于上部增速。侧墙3个部位的水平土压力不断增大,并在180个月以后缓慢减小并趋于稳定。

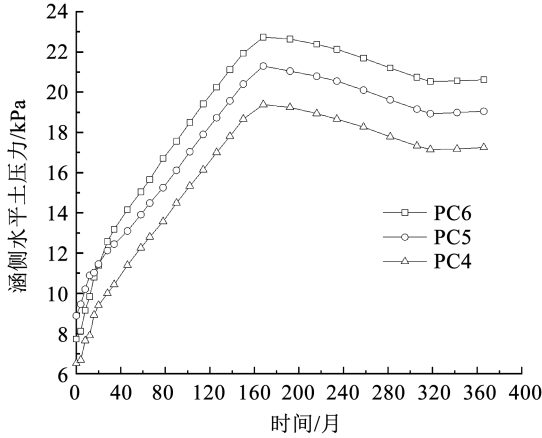


图 20 填土蠕变时侧墙水平土压力长期变化规律

Fig. 20 Long term variation law of horizontal earth pressure of side wall during fill soil creep

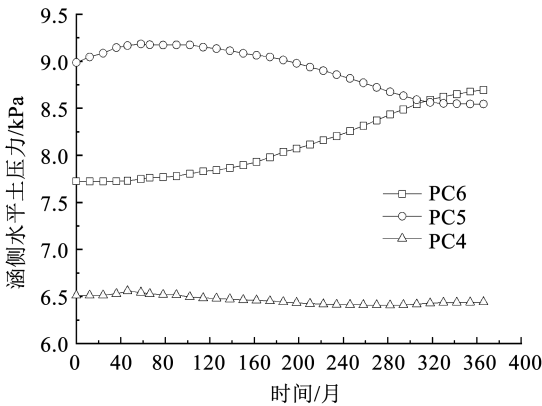


图 21 EPS板蠕变时侧墙水平土压力长期变化规律

Fig. 21 Long term variation law of horizontal earth pressure of side wall during EPS plate creep

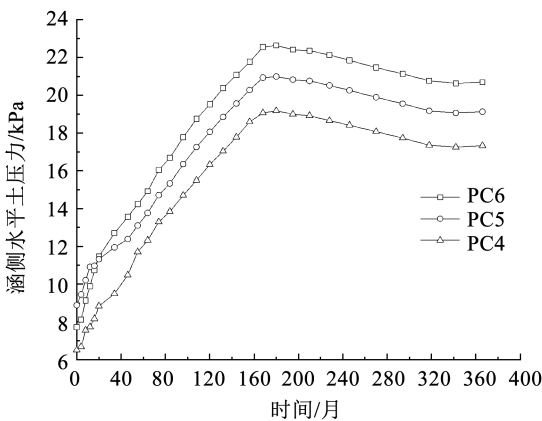


图 22 共同蠕变时侧墙水平土压力长期变化规律

Fig. 22 Long term variation law of horizontal earth pressure of side wall during both Creep

2)考虑 EPS 板蠕变,在 360 个月内 PC4 点的水平土压力变化微弱,减小了 1.1%,而 PC5 点水平土压力减小了 4.9%,PC6 点的水平土压力增长了 12.7%。主要是因为仅考虑 EPS 板蠕变时,涵顶填土内部的土拱效应增强,涵洞顶板上方和涵洞两侧填土荷载进一步向减载块上方转移,涵洞两侧土体承受的竖向土压力减小,因此侧墙中部(PC5 点)的水平土压力减小。PC4 点的水平土压力减小也说明了减载块上方应力集中现象加强。总体上,EPS 板蠕变对涵洞侧墙水平土压力影响较小。

3)考虑填土和 EPS 板共同蠕变,侧墙水平土压力随时间的变化规律与考虑填土体蠕变时的变化规律相似。涵侧水平土压力随时间的增长先增大,然后略有减小并趋于稳定。在第 180 月左右,水平土压力达到最大值,PC4、PC5 和 PC6 点的水平土压力分别增大了 194.5%、136.1% 和 193.3%。由前文涵顶土压力和涵侧水平土压力分析可知,EPS 板后期蠕变对涵顶土拱效应和涵侧水平土压力的影响较小,填土蠕变对涵侧水平土压力的影响起主导作用。

3 结 论

利用模型试验探究了刚性地基条件下减载式涵洞在填土施工期间的荷载传递规律,根据试验结果验证了数值模拟方法的合理性。鉴于长期模型试验的局限性,采用验证后的数值模拟方法,研究了长期荷载作用下考虑填土蠕变,EPS 板蠕变,以及二者共同蠕变 3 种情况下减载式涵洞土压力长期变化规律。得出以下结论:

1)减载式涵洞在施工期减载效果随着填土高度增大而增强,顶板竖向土压力系数和涵侧水平土压力系数均随填土高度非线性减小。

2)长期荷载作用下减载式涵洞周围土压力会产生明显的应力重分布现象。考虑 EPS 板蠕变条件下,涵顶填土内部土拱效应增强,工后 30 年涵洞顶板竖向土压力相对于施工结束时减小了 25.4%,侧墙所受的水平土压力变化微弱,减载效果也进一步增强;考虑填土蠕变或二者共同蠕变时,工后 30 年涵洞顶板竖向土压力和减载块上部的土压力最终均趋于填土自重压力,涵侧水平土压力不断增大最后趋于稳定,减载效果逐渐减弱。

3)长期荷载作用下,填土和 EPS 板的蠕变特性会影响减载式涵洞的减载效果。当 EPS 板蠕变时,减载效果增强,涵洞顶板竖向土压力在填土结束时最大。当填土蠕变或二者共同蠕变时,涵顶填土内部的土拱效应逐渐减弱,减载效果也逐渐减弱,工程设计中如果不考虑长期填土蠕变引起的应力重分

布,很可能高估减载式涵洞的减载效果,从而导致结构病害。

4) 长期荷载作用下,考虑填土蠕变和共同蠕变时,建议涵顶竖向土压力系数取 1.1;当仅考虑 EPS 板蠕变时,涵顶竖向土压力可以按照施工完毕时涵顶的土压力来确定,建议涵顶竖向土压力系数取 0.45。

参考文献

- [1] CHEN B, SUN L. The impact of soil properties on the structural integrity of high-fill reinforced concrete culverts[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 52: 46
- [2] 顾安全, 郭婷婷, 王兴平. 高填土涵洞(管)采用 EPS 板减荷的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(5): 500
GU Anquan, GUO Tingting, WANG Xingping. Experimental study on reducing-load measurement using EPS of culvert under high-stacked soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 500
- [3] 马强, 郑俊杰, 张军, 等. 高填方涵洞减载机制与数值分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增刊1): 424
MA Qiang, ZHENG Junjie, ZHANG Jun, et al. Mechanism analysis and numerical simulation on load reduction for culvert beneath high filling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Sup. 1): 424
- [4] MAHGOUB A, NAGGAR H E. Using TDA as an engineered stress-reduction fill over preexisting buried pipes[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2019, 10(1): 04018034. 1
- [5] 郑俊杰, 马强, 张军. 加筋减载涵洞的涵顶土压力计算[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(7): 1135
ZHENG Junjie, MA Qiang, ZHANG Jun. Calculation of vertical earth pressure on load reduction culverts under embankments by reinforcement [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(7): 1135
- [6] 马强, 郑俊杰, 张军. 高填方涵洞加筋减载的现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2337
MA Qiang, ZHENG Junjie, ZHANG Jun. Experimental study of high embankment culvert treated by imperfect ditch covered with a geogrid layer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2337
- [7] AL-NADDAF M, HAN J, XU C, et al. Effect of geofoam on vertical stress distribution on buried structures subjected to static and cyclic footing loads [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice*, 2019, 10(1): 04018027. 1
- [8] 姜峰林. 高填方涵洞 EPS 板减荷技术应用及数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2010
JIANG Fenglin. EPS load reduction technology application and numerical simulation for high fill culvert [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010
- [9] NEGUSSEY D, ANDREWS L, SINGH S, et al. Forensic investigation of a wide culvert reconstruction failure [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2019, 10(3): 05019001
- [10] SRIVASTAVA D K, SRIVASTAVA A, MISRA A K, et al. Sustainability assessment of EPS-geofoam in road construction: a case study [J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2019, 12(5): 341
- [11] MEGUID M A, HUSSEIN M G, AHMED M R, et al. Investigation of soil-geosynthetic-structure interaction associated with induced trench installation[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2017, 45: 320
- [12] MA Q, ZHENG J J, XIAO H L. Analysis of pressure on the roof of a culvert underneath a ditch with compressible material covered by a

- geosynthetic layer[J]. *European Journal of Environmental & Civil Engineering*, 2019, 25(4): 1
- [13] 陈保国, 宋丁豹, 焦俊杰, 等. 减载条件下高填方涵洞垂直土压力研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(10): 112
CHEN Baoguo, SONG Dingbao, JIAO Junjie, et al. Vertical earth pressure on high fill culverts under load reduction condition [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2015, 43(10): 112
- [14] 张业勤, 陈保国, 孟庆达, 等. 减载条件下高填方涵洞受力机制及基底压力[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4813
ZHANG Yeqin, CHEN Baoguo, MENG Qingda, et al. Stress mechanism and foundation contact pressure of high fill culvert under load reduction condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4813
- [15] 陈保国, 宋丁豹, 焦俊杰. 一种减载式刚性涵洞结构: ZL201410214006.9 [P]. 2016-04-13
CHEN Baoguo, SONG Dingbao, JIAO Junjie. A load shedding rigid culvert structure: ZL201410214006.9 [P]. 2016-04-13
- [16] 陈保国, 宋丁豹, 王云辉, 等. 减载式刚性涵洞减载机理与受力特性研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 79
CHEN Baoguo, SONG Dingbao, WANG Yunhui, et al. Research on load shedding mechanism and force characteristics of load-reduction rigid culvert [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016, 44(4): 79
- [17] 宋丁豹, 蒲河夫, 陈保国, 等. 高填方减载式刚性涵洞受力特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 823
SONG Dingbao, PU Hefu, CHEN Baoguo, et al. Model test on mechanical behavior of rigid load shedding culvert under high fill [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 823
- [18] 付华飞. 减载式刚性涵洞土拱演化规律及土压力理论研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021
FU Huafei. Study on the soil-arching evolution pattern and earth pressure theory of rigid load-shedding culvert [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021
- [19] 陈保国, 宋丁豹, 汪成, 等. 高填方涵洞减载的时间效应研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(增刊1): 117
CHEN Baoguo, SONG Dingbao, WANG Cheng, et al. Long-term behavior of load reduction culvert under high fills [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(Sup. 1): 117
- [20] LI S, JIANIE Y, HO I H, et al. Evolution of load reduction for high-filled cut-and-cover tunnels subjected to soil creep [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(9): 04021172
- [21] 杨锡武, 张永兴. 山区公路高填方涵洞加筋桥减载方法及其设计理论研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1561
YANG Xiwu, ZHANG Yongxing. Study on the method and theory of load reduction by reinforcement bridge for the culvert beneath high filling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1561
- [22] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 143
CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and engineering example [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 143
- [23] 年廷凯, 余鹏程, 柳楚楠, 等. 吹填粉砂土固结蠕变试验及模型[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(3): 918
NIAN Tingkai, YU Pengcheng, LIU Chunan, et al. Consolidation creep test and creep model of dredger fill silty sand [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(3): 918