

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1181

可发性聚苯乙烯板减载条件下高填方箱涵长期受力特征与减载效果

高 琦, 陈保国, 吴 森, 袁 山, 孙梦尧

(中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 在高填方箱涵顶部铺设可发性聚苯乙烯(expandable polystyrene, 简称 EPS)板降低其荷载已经在工程中得以应用, 而 EPS 板的蠕变会使箱涵受到的土压力随时间发生变化。现有的箱涵设计理论未能明确的反应 EPS 板的长期减载效果以及箱涵长期受力特性。开展了 EPS 板减载条件下箱涵短期受力特性模型试验, 并利用模型试验结果验证数值模型。之后利用验证后的数值模拟方法分析涵-土体系应力重分布规律以及高填方箱涵长期受力特征; 在此基础上提出涵-土体系力学模型, 推得涵顶长期土压力计算方法, 并与数值模拟结果进行对比验证。研究表明: 涵顶土压力先随时间逐渐减小, 然后会出现小幅增大, 最终趋于稳定, 对比填土完成时土压力减小了 52.12%; 涵侧竖向土压力和水平土压力总体上均随着时间逐渐增大并趋于稳定, 涵侧上部范围内最终水平土压力比填土完毕时增长了 28.32%; 基底土压力也是先增大后趋于稳定。实际工程中侧墙的设计应考虑 EPS 板蠕变引起水平土压力的增加, 避免箱涵侧墙在长期使用中产生受弯破坏。

关 键 词: 可发性聚苯乙烯板; 减载; 箱涵; 长期受力特征; 蠕变; 减载效果

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)07-2151-11

Long-term stress characteristics and load reduction effect of high-fill box culverts with EPS slabs

GAO Qi, CHEN Bao-guo, WU Sen, YUAN Shan, SUN Meng-yao

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

Abstract: Laying expandable polystyrene (EPS) slabs on the top of high-fill box culverts to reduce earth pressure has been used in engineering practice, but the creep of EPS slabs will cause the earth pressure on the box culvert to change over time. The present design theory of box culverts cannot clearly reflect the long-term load reduction effect of EPS slabs and the long-term stress characteristics of box culverts. In this analysis, model tests were carried out to investigate the short-term stress characteristics of the box culvert with EPS slabs, and a numerical model was validated by the model test results. Then the verified numerical simulation method was used to analyze the stress redistribution of the culvert-soil system and the long-term stress characteristics of the high-fill box culvert. On this basis, the mechanical model of the culvert-soil system was proposed, and the calculation method of long-term earth pressure on the top of the culvert was deduced and compared with the numerical simulation results for verification. The research results showed that the earth pressure on the top of the culvert decreased gradually with time, then increased slightly and finally became stable. Compared with the earth pressure at the completion of filling, the long-term earth pressure decreased by 52.12%. The vertical and horizontal earth pressure on the culvert side increased gradually with time and tended to be stable, and the long-term horizontal earth pressure in the upper range of the culvert side increased by 28.32% compared with that when the filling was completed. The foundation contact pressure also increased slightly at first and then tended to be stable. The increase of horizontal earth pressure caused by the creep of EPS slabs should be considered in the design of sidewalls in practical engineering so as to avoid bending failure of box culver sidewalls in the long-term use.

Keywords: expandable polystyrene slab; load reduction; box culvert; long-term stress characteristics; creep; load reduction effect

收稿日期: 2022-07-30

录用日期: 2022-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.52178370)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52178370).

第一作者简介: 高琦, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事填埋式结构物受力特性研究。E-mail: gaoqi_96@163.com

通讯作者: 陈保国, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土体与结构物相互作用方面的科研工作。E-mail: baoguo_chen@126.com

1 引言

高填方箱涵上部填土荷载大,同时由于箱涵与土体之间刚度的差异引起箱涵顶部应力集中进一步增大了涵顶土压力,很可能导致结构产生病害;因此采用可发性聚苯乙烯(expandable polystyrene,简称EPS)板减载降低涵顶土压力具有重要意义。顾安全等^[1-2]通过现场试验研究了采用EPS板作为减载材料的高填方涵洞减载效果,仅在箱涵顶部铺设EPS板可以明显降低箱涵顶部的土压力,同时也会提高涵侧土压力。然而,在涵顶和涵侧同时铺设EPS板会使得涵侧水平土压力出现卸荷现象,在涵洞周围形成土拱效应,使得土压力降低,监测结果显示该措施对涵顶和涵侧的土压力降低效果显著。张卫兵^[3]通过大型高填方涵洞原位EPS板减荷试验,对土压力和位移进行了监测,并采用Marc有限元分析软件对其进行了数值仿真,得出了在达到既定减载效果的前提下EPS板厚度、密度以及填土高度之间的关系曲线。Sun等^[4]基于现场监测的应力、应变以及EPS板的沉降量的数据,发现EPS板减载可以降低90%的涵顶填土荷载,并推测很可能长期保持减载效果。Vaslestad等^[5-6]对使用EPS板减载的3个不同工程进行了连续5a的土压力和变形观测;监测发现采用EPS板减载的效果明显,在25a后的最后一次测量结果表明,采用EPS板减载的效果可以长期保持,但未进行长期受力特性分析。

涵洞通常作为一种永久性的结构,在高填方涵洞施工后期由于EPS板和填土的蠕变会使减载性能受到影响。Chen等^[7]考虑箱涵侧壁与填土之间的摩擦作用并提出了涵-土相互作用模型,并提出了理论公式计算涵顶和基底土压力;Lee等^[8]通过离心机模型试验研究了箱涵侧向摩擦力的分布规律,并对现有计算箱涵侧壁水平土压力的计算方法进行了修正。陈保国等^[9]通过分析高填方涵洞减载措施的减载机制,建立高填方涵洞减载的时间效应理论模型,并通过涵顶的土压力计算对比将数值模拟与理论结果进行了对比,验证了理论模型的正确性。文献[10]中现场的监测数据显示,在箱涵侧墙中部水平土压力比侧墙顶底部的水平土压力小,原因是在箱涵侧壁发生向内的挠曲变形使得中部的水平土压力产生卸荷的现象,进而涵侧中部的水平土压力出现极小值点。张豫川^[11]、葛苗苗^[12]等对黄土的工后长期沉降进行了研究,之后葛苗苗等^[13]对黄土的蠕变变形进行了微观研究。在文献[11-12]对黄土蠕变研究的基础上,贾聂宇驰等^[14]、李智鹏^[15]利用有限

差分软件对沟埋式黄土高填方明洞工后两种回填方式进行长期数值模拟,即回填材料只用黄土和在涵洞上部铺设一定厚度的黄土回填材料采用不考虑蠕变效应的砂砾石,结果表明回填材料的蠕变性质会对涵洞周围土压力产生较大影响。

现有的文献对EPS板的长期蠕变做了大量的研究。Horvath^[16]研究了EPS板应用在岩土层与地下结构之间作为中间过度层,其较大的压缩变形可以显著降低结构所受到的荷载,并且对EPS板压缩变形特性进行了试验验证。Kang等^[17]通过对3种不同密度EPS板进行蠕变试验,并根据Kelvin模型和Hookean弹簧元件串联的模型进行试验数据的拟合;Gnip等^[18-20]通过对EPS板进行长期蠕变试验提出了预测EPS板长期蠕变的预测理论模型,通过选用黏弹性相关的数学模型拟合验证了EPS板具有蠕变的特点且在长期条件下不可忽略。上述工作为研究采取减载措施涵洞的长期工作性能奠定了基础。

为了进一步明确EPS板减载条件下高填方箱型涵洞的长期受力特性,结合EPS板的蠕变模型,利用验证后的数值模拟方法分析涵-土体系应力重分布规律以及高填方箱涵长期受力特征,在此基础上提出涵-土体系力学模型,推得箱涵长期土压力计算方法,并利用数值模拟结果进行对比验证,以期理论设计提供参考。

2 EPS板减载条件下箱涵短期受力特征模型试验

2.1 试验模型

2.1.1 模型试验相似比

设原型试验填土内任意一点的竖向土压力为 F_2 ,模型试验中对应位置处的竖向土压力为 F_1 ;原型、模型的填土高度及其密度分别为 H_2 、 H_1 和 ρ_2 、 ρ_1 ;原型与模型的重力加速度分别为 a_2 、 a_1 。根据相似理论可得几何相似比 C_l 为

$$\frac{H_2}{H_1} = C_l \quad (1)$$

应用“土柱法”可得原型与模型之间对应点位处的竖向土压力分别为

$$F_2 = \rho_2 \cdot a_2 \cdot H_2 \quad (2)$$

$$F_1 = \rho_1 \cdot a_1 \cdot H_1 \quad (3)$$

为了使模型试验与原型试验的竖向土压力相似,需要满足相似第一定律与牛顿第二定律,可得相似系数满足下列等式:

$$\frac{C_F}{C_m C_a} = 1 \quad (4)$$

$$\text{式中: } C_F = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\rho_2 \cdot a_2 \cdot H_2}{\rho_1 \cdot a_1 \cdot H_1}; \quad C_m = \frac{m_2}{m_1} = \frac{\rho_2 \cdot H_2}{\rho_1 \cdot H_1};$$

$$C_a = \frac{a_2}{a_1}。$$

原型与试验模型采用相同的填土材料和 1g 重力环境, 满足相似定律中相似系数等于 1 的关系, 原型与试验模型中的竖向土压力相似系数为 C_l 。由于实际工程中钢筋混凝土刚性箱涵和模型试验中钢结构箱涵的刚度均远大于土体刚度, 分析中忽略刚性涵洞刚度影响, 因此未对箱涵模型的材料做相似模拟分析。同时为了试验模型与数值分析前后阶段的一致性, 故采用与试验模型相同几何尺寸的数值模型进行数值模拟。

2.1.2 模型试验方案

涵洞模型尺寸为 0.2 m×0.2 m×1.5 m (宽×高×长), 采用 3 mm 厚的 304 钢板焊接而成; 在箱涵侧壁外侧涂抹 2 mm 厚度的水泥砂浆, 使得填土与涵侧之间的界面接触符合实际情况。模型箱采用三面钢板一面钢化玻璃, 尺寸为 1.5 m×1.5 m×1.5 m (长×宽×高)。涵洞侧壁距离模型箱壁为 65 cm, 大于 3 倍涵洞宽度, 且在模型箱侧壁涂抹凡士林以降低侧壁摩擦作用。

箱涵顶部铺设厚为 3 cm 的 EPS 板, 顶部填土高度为 1.0 m。试验模拟的地基为刚性地基, 但为了在基底埋设土压力盒需在刚性地基之上铺设 3 cm 厚的压实砂垫层。土压力盒测点布置如图 1 所示。

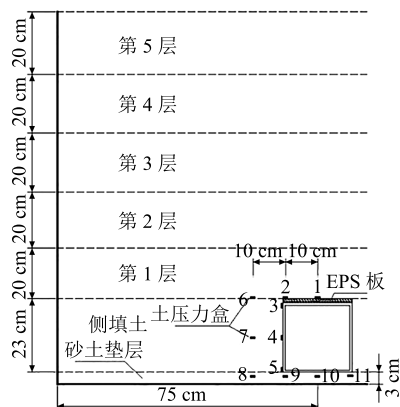


图 1 模型试验测点布置图

Fig.1 Layout of measuring points for model test

在铺设土压盒前对土压盒进行调 0 操作。在涵

底垫层完成后埋设土压力盒 8、9、10 和 11, 之后放置涵洞和 EPS 板, 在涵洞两侧同时填砂并埋设相应位置的土压力盒 3、4、5 和 7; 填土至涵顶时放置土压力盒 1、2 和 6。当所有土压盒铺设完成后静置 1 h, 开始涵顶填土的铺设。涵顶填土分 5 次填筑; 每层高度为 20 cm。每层填土完成后静置 1 h 后记录对应的土压力。按照预定的密度和体积称量相应的砂土质量, 然后按照计算得出的各层厚度进行压实, 从而满足试验既定密度要求。填土结束后的试验模型照片如图 2 所示。

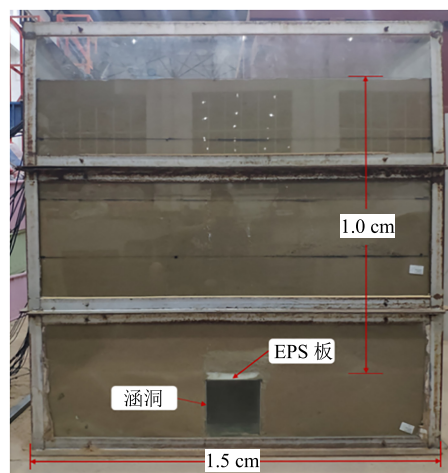


图 2 试验模型现场照片

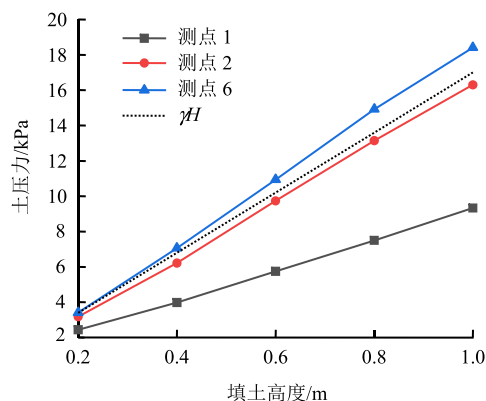
Fig.2 Test model

2.2 箱涵短期受力特征试验结果

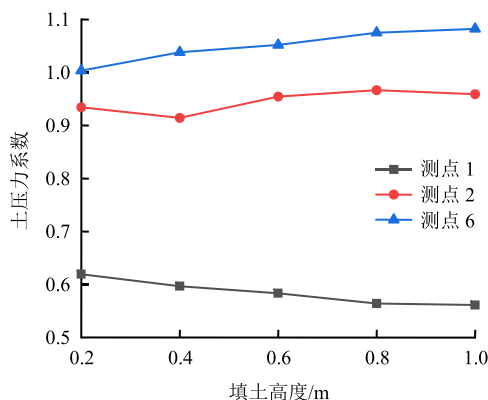
填土过程中, 涵顶平面测点竖向土压力均随着填土高度的增加而增大 (如图 3 所示, 图中, γ 为减载材料之上土体的重度, H 为箱涵顶板到自然地面的高度)。涵顶正上方 (测点 1 和 2) 竖向土压力小于填土自重压力, 涵顶外侧测点 6 竖向土压力大于填土自重压力。涵顶平面测点 1 的竖向土压力系数逐渐减小; 由于测点 2 位于侧墙顶部, 存在应力集中, 其竖向土压力系数的变化幅度较小, 但其值小于 1.0; 测点 6 的竖向土压力系数大于 1.0, 且随填土高度逐渐增大, 涵顶内土柱部分的自重逐渐转移到涵顶平面的外土柱之上。在填土完工后涵顶土压力减小至填土体自重的 44%。涵顶两侧竖向土压力随着填土的高度的增加逐渐增大, 填土完成后达到填土自重压力的 108.30%。

测点 6、7 和 8 的竖向土压力随填土高度的增加呈现正相关增长, 如图 4(a)所示, 测点 6、7 和 8 的竖向土压力系数在每层填土完成后均大于 1.0; 且各点的实测竖向土压力值与填土自重土压力值的差值随着填土高度的增加逐渐增大。测点 6 的竖向土

压力在填土完成时为 18.41 kPa; 比填土自重增加了 8.29%。



(a) 涵顶平面竖向土压力随填土高度变化规律



(b) 涵顶平面竖向土压力系数随填土高度变化规律

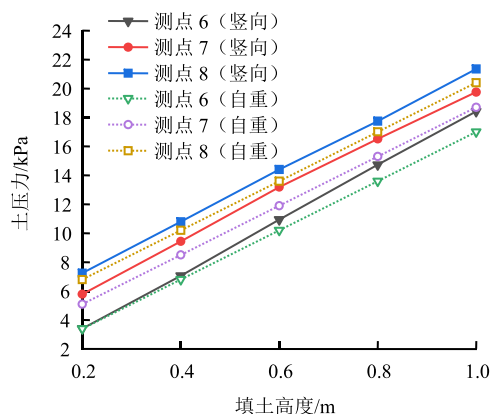
图 3 涵顶平面竖向土压力以及土压力系数随填土高度变化规律

Fig.3 Variations of vertical earth pressure and earth pressure coefficient in the culvert top plane with fill height

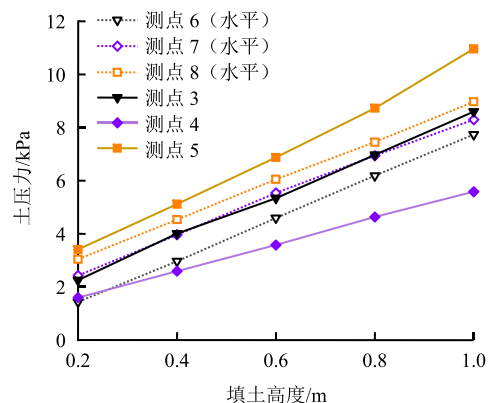
由测点 6、7 和 8 的实测竖向土压力和砂性土静止土压力系数 k_0 ($k_0 = 0.95 - \sin\varphi$ [21-22]) 可得 k_0 为 0.42, φ 为内摩擦角) 可计算出测点相应的水平土压力, 对比测点 3、4 和 5 的水平土压力如图 4(b) 所示, 可以看出随着填土高度的增加, 测点 4 与 7 和测点 5 与 8 之间的水平土压力差值逐渐增大; 测点 3 与 6 之间的水平土压力差值随着填土高度的增加呈现出先增大后减小的变化规律, 但变化幅度较小。在紧靠箱涵侧壁范围内的水平土压力随深度的增加先减小后增大, 而距涵壁为 $0.5D$ (D 为箱涵宽度) 处的水平土压力沿深度的增加逐渐增大, 测点 6、7 和 8 的竖向土压力系数平均为 1.06, 由此推断, 工程中 EPS 板对涵侧的影响范围可取距离箱涵侧壁 $0 \sim D$ 之间。

测点 10 的竖向土压力随着填土高度的增加增

长较小, 填土完成时为 0.76 kPa, 由于测点 9 和测点 11 位置对称且测量值相差较小因此对两个测点的竖向土压力求平均值作为测点 9 的竖向土压力; 测点 9 的竖向土压力随着填土高度的增加逐渐增大, 在填土完成时为 41.42 kPa, 达到了土体自重的 203.04%。测点 8 的竖向土压力在填土完成时超过土体自重 4.66% (如图 5 所示)。



(a) 涵侧竖向土压力随填土高度的变化规律



(b) 涵侧水平土压力随填土高度变化规律

图 4 涵侧土压力随填土高度的变化规律

Fig.4 Variations of earth pressure on the sidewall with fill height

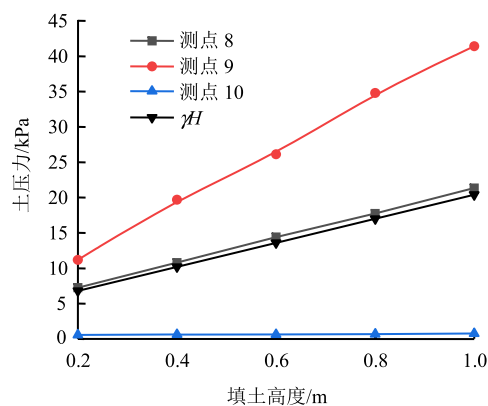


图 5 基底土压力随填土高度变化规律

Fig.5 Variations of foundation contact pressure with fill height

2.3 短期受力特性数值模拟与验证

2.3.1 数值模拟

由于长期模型试验的局限性,故采用数值模拟的方法分析 EPS 板蠕变条件下的涵-土体系长期受力特性。数值模型中,材料的本构关系与参数在短期与长期的模拟中保持一致,不同点在于短期模拟的过程中不开启蠕变计算模块,并利用模型试验结果验证数值模型的正确性;填土完毕后开启蠕变分析模块,分析 EPS 板蠕变条件下涵-土体系的长期受力特性。

数值模型与上述模型试验相同;模型四周边界约束其水平位移,底部约束竖向位移。涵洞侧壁与填土之间建立接触面考虑涵-土之间的摩擦作用;在 Flac^{3D} 中接触面采用摩尔-库仑破坏准则,数值模型简图如图 6 所示。

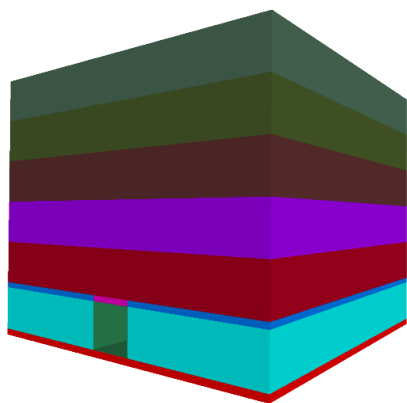


图 6 数值模型示意图
Fig.6 Numerical model

2.3.2 材料参数与本构关系

填土采用摩尔-库仑模型,涵洞模型采用弹性模型,材料参数见表 1。根据文献[17、10、23]可知 EPS 板采用 Burgers 模型能够反映其蠕变规律;EPS 板参数来源于文献[9, 17],详见表 2。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量 /MPa	密度 /(kg · m ⁻³)	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
填砂	30.0	1 700	0.310	32	0
涵洞模型	195 000.0	7 950	0.300	—	—
EPS 板	1.5	12	0.035	—	—

表 2 EPS 板 Burgers 模型参数

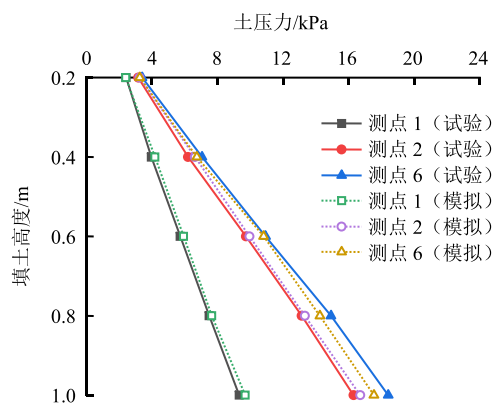
Table 2 Burgers model parameters of the EPS slab

材料	E_m /MPa	E_k /MPa	η_m /(MPa · h)	η_k /(MPa · h)
EPS 板	7.91	6.63	4.01×10^5	0.38

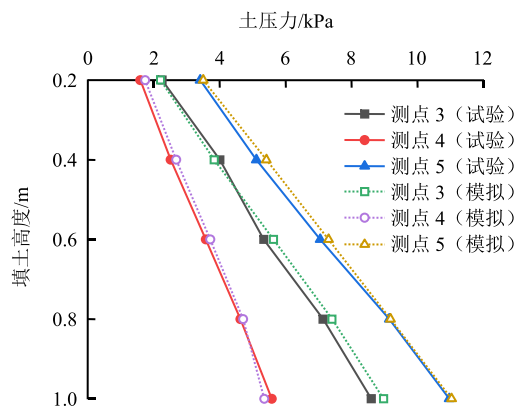
注: E_m 为马克斯韦尔体弹性模量; η_m 为马克斯韦尔体黏滞系数; E_k 为开尔文体弹性模量; η_k 为开尔文体黏滞系数。

2.3.3 数值模型验证

选取数值模型中与试验位置相同的涵侧和涵顶的 6 个测量点位的土压力进行对比验证,如图 7 所示。试验结果和数值模拟结果都显示出涵顶平面的竖向土压力随着填土高度的增加而增大,数值模拟结果与试验结果误差在 5%以内。数值模型中涵侧范围内测点的水平土压力在涵侧中部出现最小值,这与试验结果的规律一致,不同填土高度下数值模拟结果与试验值的误差最大在 10%以内。由此说明数值模拟结果与试验结果相符,数值模型正确可行。



(a) 涵顶平面测点竖向土压力



(b) 涵侧测点水平土压力

图 7 试验结果与数值模拟结果对比图

Fig.7 Comparison of experimental and numerical results

3 EPS 板减载条件下箱涵长期受力特性数值模拟

3.1 涵顶土压力随时间变化规律

填土完毕后开启蠕变分析,测点 1、2、6 的竖向土压力在 600 个月内随时间的变化规律如图 8 所示。测点 1 的竖向土压力从填土完成时的 9.69 kPa 经过 100 个月减小到 2.88 kPa,减小了 70.28%,之

后出现缓慢增长;在第 300 个月稳定在 4.64 kPa,比填土完毕时减小了 52.12%。测点 2 处的竖向土压力在前 100 个月内其土压力迅速下降;在 300 个月后逐渐稳定在 13.17 kPa 左右。测点 6 的竖向土压力在前 100 个月内随时间的增加而增大,之后稳定在 18.43 kPa,比填土完毕时增加了 5.19%。随着时间的增加 EPS 板的蠕变对于涵顶竖向土压力的影响逐渐稳定;EPS 板顶部范围内 50 a 后的竖向土压力远小于填土完成时的竖向土压力,采用 EPS 板减载的方法可以长期的保持较好的减载性能。

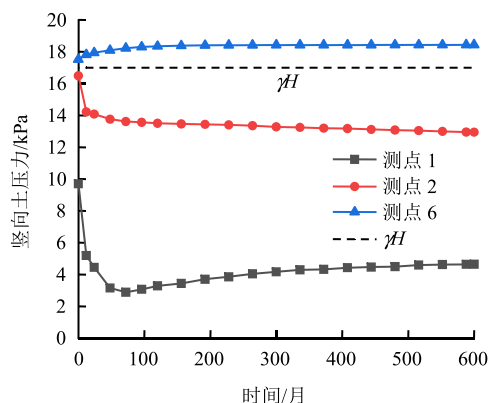


图 8 涵顶平面测点竖向土压力随时间变化规律

Fig.8 Variations of vertical earth pressure with time at the culvert top plane measuring points

3.2 涵侧竖向和水平土压力随时间变化规律

测点 6、7 和 8 的竖向土压力在前 100 个月时随时间快速增长之后缓慢增加,在 300 个月后趋于稳定,最终分别为 18.43、20.79、21.52 kPa;对比填土完毕时增长幅度分别为 5.19%、6.89%和 5.75%。涵侧测点 3、4、5 的竖向土压力在填土完成后 100 个月内随时间逐渐增大分别达到 23.60、15.50、26.70 kPa,比填土完毕时增长了 15.97%、16.63%、3.89%,之后测点 3 和 5 的竖向土压力随时间趋于平稳;但测点 4 的竖向土压力随时间逐渐减小最终趋于稳定,比填土完毕 100 个月时的竖向土压力降低了 9.03% (如图 9 所示)。

在填土完毕后的 100 个月内测点 3、4、5 的水平土压力随着时间快速增长(如图 10 所示),在 300 个月后水平土压力逐渐趋于稳定,最终水平土压力比填土完毕时分别增长了 28.54%、19.11%、9.07%。测点 6、7、8 的水平土压力随时间逐渐增大,在填土完毕后 100 个月时逐渐趋于稳定;600 个月后比填土完毕时分别增长 11.57%、26.29%、19.94%。涵侧同一水平面上测点 3 与测点 6,以及测点 5 与测点 8 处的水平土压力随着距箱涵侧壁距离的增加逐

渐减小;填土完毕后 600 个月时分别降低了 22.79%和 15.12%,测点 4 与测点 7 处的水平土压力差值随着时间增加逐渐增大,600 个月后比填土完毕时增加了 60.69%。结合图 9 与图 10 可以看出,EPS 板蠕变会使得箱涵侧壁范围内的土体中竖向与水平土压力增加,对于箱涵侧壁测点的水平土压的影响程度比竖向土压力影响程度大。

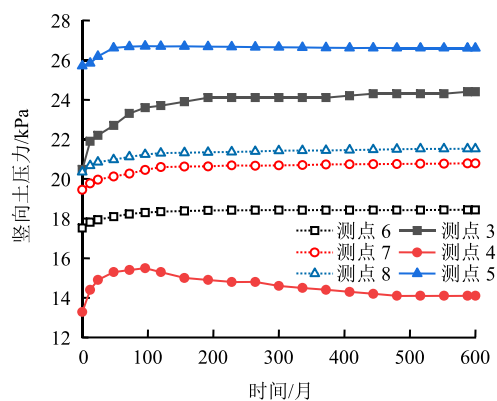


图 9 涵侧测点竖向土压力随时间变化规律

Fig.9 Variations of vertical earth pressure with time at the culvert side measuring points

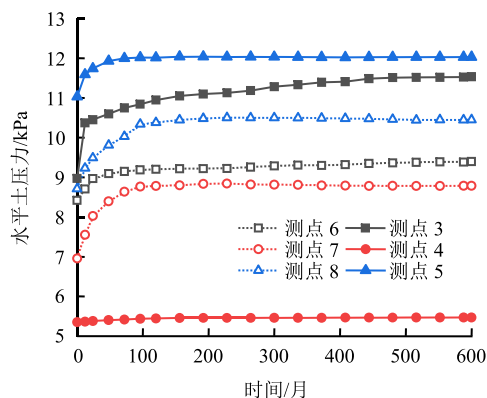


图 10 涵侧测点水平土压力随时间变化规律

Fig.10 Variations of horizontal earth pressure with time at the culvert side measuring points

3.3 基底平面土压力随时间变化规律

基底平面土压力随时间的变化规律如 11 所示。测点 10 处的竖向土压力值偏小且随着时间的增加增幅也较小,在 300 个月后稳定在 0.8 kPa 左右。由于测点 9 处在涵洞侧墙正下方,在此范围内出现应力集中,其竖向土压力增长幅度绝对值较大,在工后 100 个月内其土压力随时间快速增长,之后稳定在 48.23 kPa,比填土完毕时增大 16.95%,为填土自重压力的 2.32 倍。测点 8 处的竖向土压力随时间缓慢增大,最终稳定在 21.52 kPa,竖向土压力系数为 1.03。

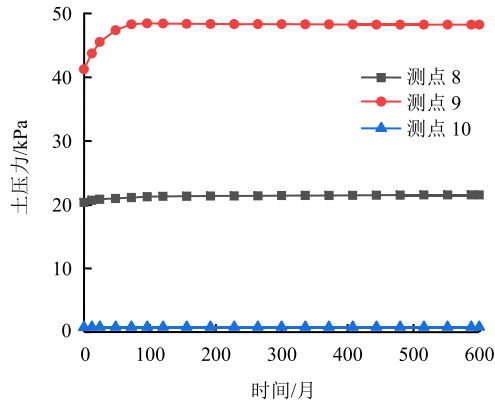


图 11 基底平面测点土压力随时间变化规律

Fig.11 Variations of earth pressure with time at the foundation contact plane measuring points

3.4 减载效果评价

考虑 EPS 板蠕变情况下, 600 个月后涵顶竖向土压力为土体自重的 27.29%, 比施工后减载效果提高了 52.12%。在填土完成后的 100 个月内, 涵顶竖向土压力迅速降低, 涵-土之间发生应力重分布, 使得涵顶内土柱体荷载转移到涵侧, 涵侧外部的竖向土压力随着涵顶土压力的降低而增大, EPS 板减载对涵侧竖向土压力的影响范围约为涵洞宽度。填土完成 600 个月后测点 6 的竖向土压力比填土完毕时增长了 5.19%, 但其水平土压力增长幅度为 11.57%; 测点 3 的竖向土压力增长幅度为 15.97%, 水平土压增长了 28.54%, 同时随着深度的增加, 涵侧水平土压力随着时间的增长幅度大于竖向土压力增长幅度。箱涵基底平面测点 9 的竖向土压力增长幅度较大, 在填土完成 600 个月后竖向土压力值为填土自重的 2.32 倍, 而测点 10 处的竖向土压力受 EPS 板蠕变的影响较小。

EPS 板蠕变对涵侧中下部的水平土压力和距离侧墙一倍涵洞宽度的竖向土压力影响较小。随着时间的增加, 涵侧范围内测点的水平土压力增长幅度大于竖向土压力增长幅度。涵顶竖向土压力在全寿命周期内呈现出先明显减小后缓慢增大, 最终趋于稳定; 长期条件下稳定时的竖向土压力远小于填土完毕时的竖向土压力; EPS 板在全寿命周期内具有良好的减载效果。

4 EPS 板减载条件下箱涵长期受力特性理论分析

4.1 涵-土体系长期受力特性力学模型

根据前文的受力分析, 建立高填方箱涵-土体长期受力特性的质点-元件模型, 如图 12 所示。图

中 M_{32} 、 M_{31} 、 M_{33} 以及 $C_{\beta 2}$ 、 $C_{\beta 1}$ 、 $C_{\beta 3}$ 分别表示箱涵地基及其两侧地基的质量及刚度元件; M_{21} 、 M_{23} 和 $C_{\beta 21}$ 、 $C_{\beta 23}$ 分别表示为涵侧填土质量及其刚度元件; M_{22} 和 K_{22} 分别表示涵洞的质量和刚度; M_{12} 、 M_{11} 、 M_{13} 以及 $C_{\beta 12}$ 、 $C_{\beta 11}$ 、 $C_{\beta 13}$ 分别表示涵顶上部内土柱体和涵顶两侧的外土柱体的质量和刚度元件; τ_1 为涵顶平面以上内外土体之间的摩擦力; τ_2 表示涵洞侧墙与涵侧土体之间的摩擦力; τ_3 为涵洞基底内外土体之间的摩擦力; C_e 为反映 EPS 板本构模型的元件。

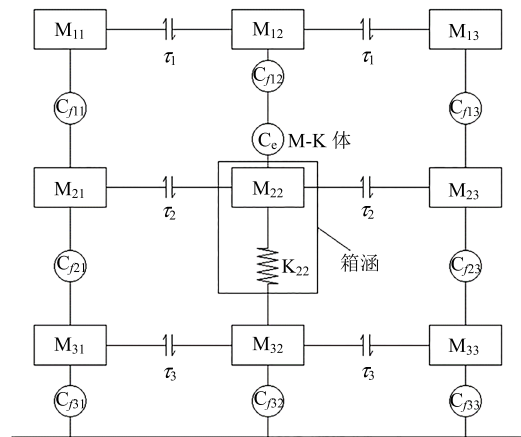


图 12 涵-土体系质点-元件模型

Fig.12 Particle-element model of culvert - soil system

减载材料的刚度远小于填土刚度, 使得涵顶内土柱和 EPS 板的等效刚度小于外土柱的刚度。内土柱 M_{12} 的沉降量大于外土柱 M_{11} 和 M_{13} 的沉降量, 内外土柱之间的沉降差使得内土柱的部分自重通过摩擦力转移到涵侧土柱, 进而涵顶的土压力小于涵洞上部的土体自重, 从而达到减载的目的^[7]。

4.2 涵顶长期土压力计算方法

假定涵顶 EPS 板上的受力为均匀分布, EPS 板自重忽略不计; 假定涵顶内、外土柱中的竖向土压力均匀分布, 且内外土柱的水平土压力为主动土压力; 箱涵以及地基均为刚性。根据上述时间效应模型, 得出减载材料顶部竖向土压力平衡方程为

$$\gamma(H - h_p)D = D \cdot P_t + 2\tau_1 \quad (5)$$

式中: P_t 为减载材料顶部竖向土压力; h_p 为减载材料的厚度。

根据涵顶外土柱内微分单元的受力平衡可得 τ_1 为

$$\tau_1 = \int_{H-H_c}^{H-h_p} [(\gamma z k - 2c\sqrt{k})f + c] dz = \frac{1}{2}(H_c - h_p)[\gamma k f (2H - H_c - h_p) - 4c\sqrt{k}f + 2c] \quad (6)$$

式中: H_e 为等沉面高度; $k = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$; c 为填土的黏聚力; $f = \tan \varphi$ 。

涵顶平面外土柱的土压力 P_s 为

$$P_s = H\gamma + \frac{(H_e - h_p)}{2} [\gamma k f (2H - H_e - h_p) - 4c\sqrt{k}f + 2c] \quad (7)$$

考虑减载材料的蠕变特性, 根据室内试验数据和预测的 EPS 板长期蠕变过程, 采用黏弹性 (M-K 体) 蠕变模型描述 EPS 的长期蠕变性能^[23-25]。EPS 板蠕变应变 $\varepsilon(t)$ 为

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_m} + \frac{t}{\eta_m} + \frac{1}{E_k} \left[1 - e^{\left(-\frac{E_k t}{\eta_k} \right)} \right] \quad (8)$$

卸载过程应变^[26]为

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_m} + \frac{1}{E_k} \left[1 - e^{\left(-\frac{E_k t}{\eta_k} \right)} \right] \quad (9)$$

则式 EPS 板的蠕变变形量可以写为

$$\delta(t) = h_p \cdot P_t \cdot \varepsilon(t) \quad (10)$$

式中: δ 为 EPS 板的整体厚度的压缩变形量。

当填土高度达到等沉面以上时, 内外土柱的沉降相等。根据 Chen 等^[7]对于等沉面的计算, 即

$$\Delta_1 + \Delta_4 = \Delta_2 + \Delta_3 \quad (11)$$

其中: Δ_1 为等沉面以下内土柱的压缩量, 为

$$\Delta_1 = \frac{(H_e - h_p)[(\gamma - 2\gamma k f)(2H - H_e - h_p) + 8c\sqrt{k}f - 4c]}{2E} \quad (12)$$

式中: E 为涵顶平面上填土的变形模量。

Δ_2 为等沉面以下外土柱的压缩量, 为

$$\Delta_2 = \frac{[(2H - H_e)\gamma + (2H - H_e)\gamma k f - 4c\sqrt{k}f + 2c] \times H_e}{2E} \quad (13)$$

Δ_3 为涵侧高度范围内填土的压缩量, 为

$$\Delta_3 = \frac{(1 - k_0 f_0)(2P_s + \gamma_k h)h}{2E_k} \quad (14)$$

式中: $k_0 = \mu/(1-\mu)$, μ 为填土的泊松比; h 为箱涵的侧墙高度; γ_k 为涵侧填土的重度; E_k 为涵侧范围内填土的平均变形模量; $f_0 = \tan \delta'$, δ' 为侧墙与填土之间的摩擦角。

Δ_4 为减载材料的压缩变形, 为

$$\Delta_4 = h_p \cdot P_t \cdot \varepsilon(t) + \Delta_0 \quad (15)$$

式中: Δ_0 为 EPS 板填土完成时的压缩量 (EPS 板的

弹性压缩量)。

P_t 由式 (5)、(6) 联立求得

$$P_t = H\gamma - \frac{(H_e - h_p)[\gamma k f (2H - H_e - h_p) - 4c\sqrt{k}f + 2c]}{D} \quad (16)$$

联立 (7)、(11)、(16), 可以得出在不同时间内 EPS 板压缩变形量与等沉面高度 H_e 的函数关系, 以填土完毕时的涵顶土压力为初始量代入式 (15) 中迭代求出不同时间点的 EPS 板的压缩变形量, 因此可以计算出填土完毕后全寿命周期内不同时间点的 H_e 的值。求得的 H_e 值代入式 (7)、(16) 中, 可以求得填土完毕后不同时间点的 P_t 和 P_s 值并绘制成曲线, 如图 13 和 14 所示。

600 个月内的涵顶竖向土压力与涵顶平面外土柱的竖向土压理论计算值与数值模拟结果如图 13 和图 14 所示。理论计算与数值模拟结果显示涵顶土压力在前 100 个月内随逐渐减小之后随时间出现缓慢增长, 最终均趋于稳定。涵侧外土柱的竖向土压力在填土完成后 100 个月内随着时间逐渐增大, 之后出现小幅度下降最终也趋于稳定。二者变化规律相同, 由此说明理论计算方法合理可行。

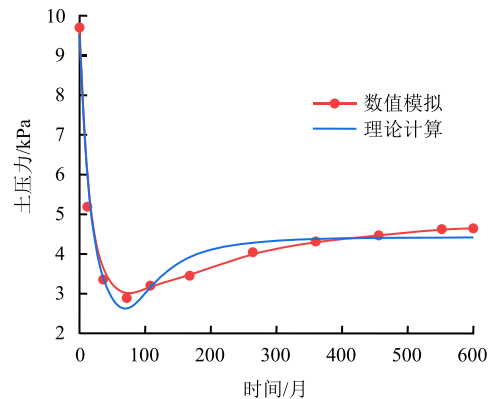


图 13 理论计算与数值模拟的涵顶土压对比结果

Fig.13 Comparison of earth pressure on the culvert top between the theoretical calculation and numerical simulation results

4.3 理论计算结果与现有文献成果对比

文献[5-6]对涵顶铺设 EPS 板减载的涵洞工程进行了长期的涵顶竖向土压力监测, 工程中 EPS 板厚度为 0.5 m, 重度为 0.2 kN/m³, 距离箱涵顶部 0.5 m, 填土高度为 10.8 m, 填土重度为 20 kN/m³。监测结果显示在 1990 年初填土完毕后涵顶竖向土压力为 132 kPa, 竖向土压力系数为 0.63; 随着时间的增加竖向土压力逐渐减小, 1991 年底降低至 88 kPa; 1993

年初涵顶竖向土压力小幅增加至 100 kPa,并趋于稳定。之后在 2015 年的一次监测数据显示涵顶竖向土压力为 94 kPa,此时的竖向土压力系数为 0.48(见图 15)。

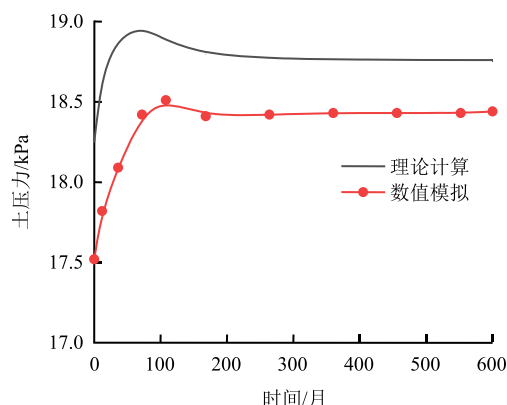


图 14 涵顶外土柱土压力的理论计算与数值模拟结果对比
Fig.14 Comparison between theoretical calculation and numerical simulation results of soil column earth pressure outside the culvert top

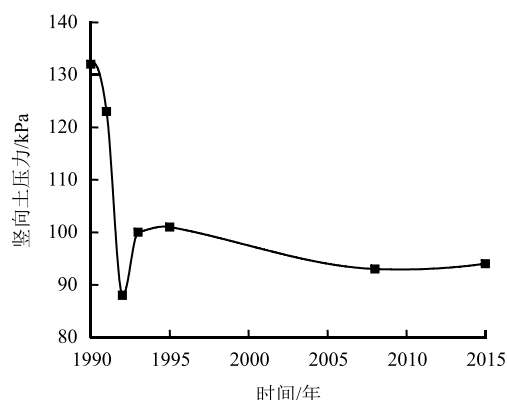


图 15 实测涵顶竖向土压力随时间的变化规律
Fig.15 Variation of measured vertical earth pressure with time on the culvert top

本文中理论计算结果与文献[5-6]中的工程监测结果变化规律一致,涵顶的竖向土压随着时间的增加呈现出先减小后小幅增大,最终趋于稳定;稳定后的涵顶竖向土压力小于填土完毕时的涵顶竖向土压力。文中理论式求得填土完毕时涵顶的竖向土压力系数为 0.57,稳定时的竖向土压力系数 0.25。由于文献[5-6]中采用的几何尺寸和填土类型等与本文中的参数不完全一致,二者结果在数值上存在一定的差异。

文献[1-2]中对于明洞顶部铺设 EPS 板的实际工程进行了监测。采用 EPS 板减载的情况下,填土完毕时涵顶竖向土压力比填土自重压力减小了 1/2~

2/3,与本文中填土完毕时理论计算的涵顶竖向土压力比填土自重压力降低了约 1/2 的规律一致。考虑 EPS 板蠕变,600 个月后,本文分析得出的稳定后的涵顶竖向土压力比填土自重压力减小了 3/4。涵顶减小的填土自重会通过内外土柱之间的沉降差产生的摩擦作用传递到外土柱中,涵侧未铺设 EPS 板时,文献[1-2]理论计算得出填土完毕时箱涵顶部平面外土柱的竖向土压力增加了约 17%,该处的水平土压力也增加了相同的幅度,比文中的理论计算的涵顶平面外土柱竖向土压力大 11%,原因在于本文中的理论计算考虑了涵侧与填土的摩擦作用降低了涵顶平面外土柱竖向土压力的增量。而在涵侧铺设 EPS 板时,文献[1-2]中侧壁的水平土压力比未在涵侧铺设 EPS 板的涵侧降低了约 50%。

文献[7]中根据沉面理论在计算箱涵侧壁水平土压力的理论中考虑了箱涵侧壁的摩擦作用,本文在此基础上考虑 EPS 板的蠕变作用对箱涵侧壁水平土压力的影响。结果显示,在考虑 EPS 板的蠕变条件下箱涵侧壁的所受到的水平土压力最终比填土完毕时平均增大了约 20%,比《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)[27]中计算的箱涵侧壁的水平土压力增加了约 40%。因此,在箱涵的设计中应考虑 EPS 板蠕变对其受力特性的影响。

5 结论与建议

利用 EPS 板减载条件下高填方箱涵的短期试验验证相应数值模型的正确性;之后利用验证后的数值模拟方法分析高填方箱涵长期的受力特征,在此基础上建立长期的涵-土体系受力的质点-元件模型,推导得出箱涵涵顶平面土压力理论计算式,并进行了验证。得到如下主要结论:

(1) EPS 板的蠕变条件下,填土完毕后的 100 个月内,涵顶竖向土压力随着时间不断减小,减载效果逐渐增强,之后涵顶竖向土压力缓慢增大并最终趋于稳定,最终涵顶竖向土压力比填土完成时减小了约 50%。

(2) 涵顶平面外土柱的竖向土压力随着时间逐渐增大,并在 100 个月后逐渐趋于稳定, EPS 板蠕变引起箱涵侧壁水平土压力增大了约 40%,故在设计中应考虑长期荷载作用下由于涵顶土压力的降低引起的箱涵侧壁水平土压力的增大。基底压力也随着时间的增加逐渐增大并趋于稳定。

(3) 建立了 EPS 板减载条件下高填方箱涵长期受力特性的力学模型,推导得出了箱涵涵顶长期土

压力理论计算式并验证了其正确性。

参考文献

- [1] 顾安全, 郭婷婷, 王兴平. 高填方涵洞(管)采用 EPS 板减荷的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 500-504.
GU An-quan, GUO Ting-ting, WANG Xing-ping. Experimental study on reducing-load measurement using EPS of culvert under high-stacked soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 500-504.
- [2] 顾安全, 吕镇峰, 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, LÜ 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.
- [3] 张卫兵. 高填方涵洞 EPS 减荷特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
ZHANG Wei-bing. Experimental study on EPS load reduction characteristics of high-fill culvert[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [4] SUN L C, HOPKINS T C, BECKHAM T L. Long-term monitoring of culvert load reduction using an imperfect ditch backfilled with geofoam[J]. **Transportation Research Record**, 2011, 2212(1): 56-64.
- [5] VASLESTAD J. Long-term behavior of flexible large-span culverts[J]. **Transportation Research Record**, 1990, 1231(2): 14-24.
- [6] VASLESTAD J, SAYD M S. Load reduction on buried rigid culverts, instrumented case histories and numerical modeling[C]//5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications. [S. l.]: Springer, 2019: 115-128.
- [7] CHEN B G, MENG Q D, YAN T F, et al. New simplified method for analysis of earth pressure on the imperfect trench installation box culvert[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2020, 20(10): 04020193.
- [8] LEE K, KIM J, WOO S I. Analysis of horizontal earth pressure acting on box culverts through centrifuge model test[J]. **Applied Sciences**, 2022, 12(4): 1993-1993.
- [9] 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): 117-123.
CHEN Bao-guo, SONG Ding-bao, WANG Cheng, et al. Study on time effect of load reduction in high-fill culvert[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2015, 46(Suppl.1): 117-123.
- [10] 陈保国, 骆瑞萍, 孙金山. 上埋式盖板涵受力特性及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 199-206.
CHEN Bao-guo, LUO Rui-ping, SUN Jin-shan. Study of stress characteristics and its influencing factors of embankment installation slab-culverts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 199-206.
- [11] 张豫川, 高飞, 吕国顺, 等. 基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(30): 220-227.
ZHANG Yu-chuan, GAO Fei, LÜ Guo-shun, et al. Numerical simulation of high fill foundation settlement based on creep test of loess[J]. **Science Technology and Engineering**, 2018, 18(30): 220-227.
- [12] 葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律数值研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 295-300, 305.
GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. Numerical analysis of the post-construction settlement regularity of loess-high filled embankment based on creep test[J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 2015, 31(3): 295-300, 305.
- [13] 葛苗苗, 李宁, 盛岱超, 等. 水力耦合作用下非饱和压实黄土细观变形机制试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2437-2448.
GE Miao-miao, LI Ning, SHENG Dai-chao, et al. Experimental investigation of microscopic deformation mechanism of unsaturated compacted loess under hydraulic coupling conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(9): 2437-2448.
- [14] 贾聂宇驰, 李盛, 李智鹏, 等. 基于有限差分法的高填黄土明洞土体蠕变分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2046-2054.
JIANIE Yu-chi, LI Sheng, LI Zhi-peng, et al. Analysis on soil creeping for high-filled cut-and-cover tunnel based on finite difference method[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2020, 17(8): 2046-2054.
- [15] 李智鹏. 考虑时间效应的高填方减载明洞土压力变化规律研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
LI Zhi-peng. Time-dependent variation of earth pressure for unloading structure of high-filled cut-and-cover tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [16] HORVATH J S. The compressible inclusion function of EPS geofoam[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1997, 15(1): 77-120.