

引文格式:冯忠居,姚婉婷,王伟,等.梯形沟谷地形下高填方箱涵涵周土压力离心试验研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(3):158-171.

FENG Zhongju, YAO Wanting, WANG Wei, et al. Centrifuge test study on soil pressure around high fill box culverts in trapezoidal valley terrain[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(3): 158-171.

DOI:10.19815/j.jace.2024.01015

梯形沟谷地形下高填方箱涵涵周土压力离心试验研究

冯忠居¹,姚婉婷¹,王伟²,王思琦¹,王溪清¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

摘要:梯形沟谷地形下高填方涵洞的涵周土压力较为复杂,且与上埋式及沟埋式涵洞差异较大。为探明山区梯形沟谷地形下高填方箱涵的涵周土压力特性,通过离心模型试验,研究了不同沟谷宽跨比 B/D 、沟谷坡度 α 对箱涵涵周土压力的影响。结果表明:梯形沟谷地形的沟谷宽度及坡度均对高填方箱涵结构受力存在不同程度的影响,且沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、沟谷宽跨比 $B/D<3$ 时影响程度最大;沟谷地形下高填方箱涵的涵顶垂直土压力、涵侧水平土压力及涵底反力均与沟谷宽度呈正相关关系,与沟谷坡度呈负相关关系;沟谷宽跨比 $B/D<3$ 时,涵顶垂直土压力集中系数 $K_s<1$,沟谷坡度 $\alpha>30^{\circ}$ 后,涵顶垂直土压力开始由应力集中转化为应力扩散;建议进行高填方箱涵设计时,在确保边坡稳定的前提下,尽量保留原有的梯形沟谷地形,选择沟谷宽跨比 $B/D<3$ 且沟谷坡度较大的区域跨越,以保证地形对箱涵的减荷作用。

关键词:涵洞工程;涵周土压力;离心模型试验;高填方箱涵;沟谷地形;沟谷宽度;沟谷坡度

中图分类号:U449.82

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)03-0158-14

Centrifuge test study on soil pressure around high fill box culverts in trapezoidal valley terrain

FENG Zhongju¹, YAO Wanting¹, WANG Wei², WANG Siqi¹, WANG Xiqing¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: The stress of high fill culverts in trapezoidal valley terrain is relatively complex, and it is quite different from that of buried culvert and trench buried culvert. In order to explore the mechanical characteristics of high fill box culverts under trapezoidal valley terrain in mountainous areas, centrifugal model tests were conducted to study the impact of different valley width to span ratios B/D and valley slope α on soil pressure around box culverts. The results show that the valley width and slope of the trapezoidal valley terrain have varying degrees of influence on the stress of the high fill box culvert structure, and the influence degree is the greatest when valley slope is in the range of $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ and the valley width to span ratio $B/D<3$. The vertical soil pressure at the top of the culvert, the horizontal soil pressure at the side of the culvert, and the reaction force at the bottom of the culvert are all positively correlated with the width of the valley

and negatively correlated with the slope of the valley under the terrain of the valley. When the width to span ratio B/D of the valley is less than 3, the vertical soil pressure concentration coefficient K_s at the culvert top is less than 1. When the valley slope $\alpha > 30^\circ$, the vertical soil pressure at the top of the culvert begins to transform from stress concentration to pressure diffusion. It is recommended to retain the original trapezoidal valley terrain while ensuring the stability of the slope when designing high fill box culverts. Areas with a width to span ratio $B/D < 3$ and a larger slope of the valley can be selected to cross to ensure the load reduction effect of the terrain on the box culvert.

Key words: culvert engineering; soil pressure around culvert; centrifugal model test; high fill box culvert; gully terrain; valley width; valley slope

Author resume: FENG Zhongju(1965-), male, PhD, professor, E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn.

0 引言

高等级公路中多采用涵洞结构跨越冲沟区,因箱涵具有良好的场地适应能力和整体受力性能,且能满足排水兼通行的功能,被广泛应用于山区高速公路中^[1-5]。冲沟区高填方箱涵因受梯形沟谷地形条件影响,其受力变形特性与上埋式及沟埋式涵洞有显著区别^[6],而现有理论对涵洞-填土-地基-地形的协调变形相互作用机理认识不足,导致涵洞土压力的设计计算值与实际值存在较大差异,加重了箱涵病害,影响涵洞的正常使用^[7-10]。因此,开展梯形沟谷地形条件下高填方箱涵受力特性研究,探明梯形沟谷地形条件下高填方箱涵受力机理具有重要意义。

目前,国内外学者针对梯形沟谷地形下高填方涵洞的受力及变形特性开展了一系列研究。陈保国等^[11]采用数值模拟及现场试验相结合的方法,研究了上埋式盖板涵的土压力和变形特性,探明了盖板涵的填土高度及性质、地基土的性质、涵洞几何尺寸等对涵洞结构受力特性的影响,并指出涵洞的实际受力状态与规范方法计算的结果存在较大差异。Fan等^[12]基于有限元数值分析,研究了不同涵洞结构样式在充填荷载作用下的竖向土压力特征,并讨论了涵洞填埋高度、边界条件等对高填方涵洞土压力特性的影响。邓国华等^[13]利用有限元软件探明了高填方涵洞涵顶垂直土压力与填土高度呈正相关关系,且相关性随着填土高度增大趋于稳定值。马强等^[14]通过现场监测,研究了装配式盖板涵台背及涵顶垂直土压力的分布规律和土压力随填土荷载变化的增长规律,研究发现随填土高度增加,涵洞土压力并非呈线性增长。赵建斌等^[15]对高填方路堤拱涵垂直土压力及拱圈应力进行了现场观测,并通过

有限元分析进行对比验证,得出涵顶垂直土压力集中系数 K_s 随填土高度的增大先增大后逐渐趋于平缓的规律,且拱涵的最大拉压力出现在涵顶,最大压应力则出现在拱腰及拱脚。曹继伟等^[16-17]基于离心机试验,研究了不同填土高度下涵洞土压力变化和变形规律。陈锋等^[18]通过现场试验,分析土压力在填土高度增大下的变化规律,发现 K_s 随填土高度增大呈先增后减最终趋于稳定的变化趋势。冯忠居等^[19-21]基于离心试验,研究了高填方涵洞的涵周土压力及涵周土体变形,得出软弱地基上高填方涵洞的受力情况和变形规律。李国维等^[22]依据现场试验及数值模拟,研究了高填方盖板涵及其周围填土的应力分布规律,得出了涵顶中点压力与涵顶以上填土自重的线性关系系数与涵洞尺寸有关,且随涵洞的宽高比增加呈单峰变化。郑俊杰等^[23]借助现场试验、理论分析及数值仿真等手段,发现涵顶垂直土压力集中系数 K_s 随填土高度增加呈先增后减的变化趋势,并根据试验结果修正了顾安全提出的垂直土压力理论计算公式。程振威等^[24]采用现场试验研究得出沟谷地形涵洞上方填土的土拱效应与涵洞两侧边坡坡角、沟底宽度、填料的物理力学性质、涵洞尺寸、填土高度等多种因素有关,并提出涵洞两侧边坡坡角、填土高度两种因素决定涵洞上方填土中能否产生土拱效应。冯忠居等^[25]采用离心模型试验与数值模拟方法,建立地形-涵洞-填土相互作用模型,分析了不同沟谷宽度 B 、沟谷坡度 α 下的拱涵涵周土压力及涵顶垂直土压力集中系数 K_s 的分布规律,并与最新涵洞设计规范^[26]进行了对比,探明了沟谷地形下高填方拱涵土压力形成机制。李永刚等^[27]对沟谷地形下刚性地基和刚性箱涵及圆管涵的土压力进行研究,得出箱涵土压力的凹凸分布与圆管涵涵顶完全相反,且填土高度相同条件下箱

涵的土压力集中系数约为圆管涵的 1.07 倍。

综上所述,当前学者们已对涵洞受力情况进行了大量研究,但大多研究集中于平地地形下的管涵、拱涵及盖板涵,且沟谷地形下的箱涵力学特性研究多通过数值模拟、现场观测方法开展,较少采用离心模型试验研究沟谷地形下箱型涵洞结构的力学特性。同时由于梯形沟谷条件下高填方箱涵既受土压力集中现象的影响,又受到沟谷地形减荷效应的影响,受力特性与平地上埋式涵洞存在显著差异。为此,本文借助长安大学 TLJ-3 型土工离心机,开展不同沟谷宽度 B 、沟谷坡度 α 下的高填方箱涵离心模型试验,研究沟谷地形对高填方箱涵周土压力特性的影响,探明沟谷地形下高填方箱涵的受力机理,以为实际工程提供指导。

1 工程概况

本文依托工程为广东省包茂高速公路(粤境段)实体工程,全长 122 km,共设置涵洞 444 道。经调研,涵顶填土高度 $H<8\text{ m}$ 、 $H=8\sim14\text{ m}$ 、 $H=14\sim20\text{ m}$ 、 $H\geq20\text{ m}$ 的涵洞分别占总数量的 67.8%、22.3%、6.98%、2.93%。包茂高速公路沿线高填方涵洞所处梯形沟谷地形的沟谷宽度及坡度存在差异,高填方涵洞梯形沟谷地形现场如图 1 所示。顾安全等^[28-29]通过对涵洞病害调查研究发现开裂的主要原因是实际土压力过大。当涵顶填土高度大于 14 m 时,其受力较复杂,设计时需要重点考虑上部填土荷载。



图 1 高填方涵洞沟谷地形现场图

Fig. 1 Site map of high fill culvert valley terrain

2 离心试验设计

2.1 土工离心机

本试验仪器采用长安大学 TLJ-3 土工离心机(图 2),其性能参数见表 1。

2.2 离心模型试验相似律

箱涵的受力特性与其结构尺寸、材料性质、地基



图 2 TLJ-3 土工离心机

Fig. 2 TLJ-3 geotechnical centrifuge

表 1 土工离心机性能参数

Table 1 Performance parameters of geotechnical centrifuge

| 参数 | 取值 |
|------------|------------------------------|
| 负载能力/(g·t) | 60 |
| 离心加速度范围/g | 10~200 |
| 有效半径/m | 2.0 |
| 稳定度 | ±0.1%F.S |
| 模型箱尺寸 | 70 mm(长)×360 mm(宽)×500 mm(高) |

注: g 为重力加速度。

及填土性质等密切相关,综合考虑离心机尺寸、试验制备条件及实体工程情况等,选取几何相似比 $n=1/50$ 。基于量纲分析得到各参数的相似关系,如表 2 所示。

表 2 原型-模型物理量相似关系

Table 2 Prototype-model physical quantity similarity relationship

| 物理量 | 长度 l | 位移 u | 应变 ϵ | 密度 ρ | 容重 γ | 力 F | 加速度 a |
|-----|--------|--------|---------------|-----------|-------------|-------------------|---------|
| 相似比 | 1/50 | 1/50 | 1 | 1 | 50 | 1/50 ² | 50 |

2.3 模型设计

为研究梯形沟谷地形对箱型涵洞受力特性的影响,依托现场调研情况,按照 1:50 的相似比制作箱涵,并在离心机内合理布置地基、地形、涵洞及填土,研究沟谷地形下箱涵涵周的土压力分布规律,模型箱内布设情况如图 3 所示,其中 D 为箱涵跨径。

2.4 试验方案

2.4.1 填土设计

考虑到原状土在采集、运输过程中会发生天然结构及含水量变化,同时离心试验中原状土需重新装填至模型箱,会破坏其原始结构^[30],故在不影响试验结果的前提下采用细砂作为填土。一方面细砂密度为 $1.8\sim2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,与原状土密度 $1.6\sim2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 相差不大,另一方面细砂黏结力较小,方便充填及重复利用,模型试验填土如图 4 所示。

试验中按照 1:50 的相似比填筑细砂,按照比

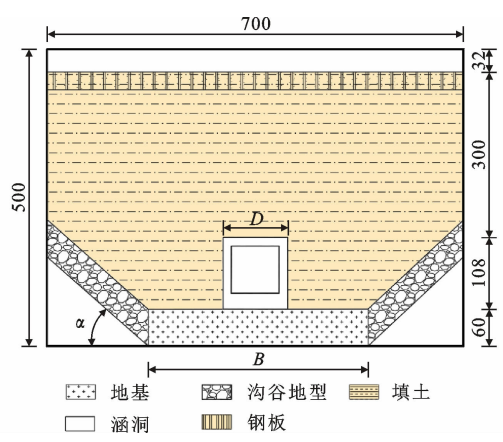


图 3 模型箱布置(单位:mm)

Fig. 3 Layout of model box (unit: mm)



图 4 模型土填筑

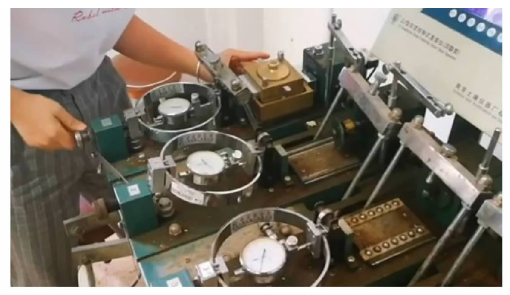
Fig. 4 Model soil filling

例换算得到模型箱细砂填筑高度为 400 mm。模型箱整体高度为 500 mm,加上地基及箱涵结构后填土高度已经无法满足,因此,用钢板作为配重,钢板的密度为砂土的 4 倍,经过等质量钢板换算填土质量,在填土高度达到 300 mm 后,在填土顶部铺设钢板模拟 20 m 高填土荷载。

2.4.2 地基及沟谷地形设计

离心试验中地基土及沟谷地形均采用土体模拟,由于采用原状土运输至实验室时土体的含水率会发生变化,土体结构亦会遭到破坏,故地基土及沟谷地形均采用人工制备土样模拟。试验采用一次性取足够土的方法,确保试验土样的一致性,通过直剪仪测得土体的抗剪强度指标,通过击实试验测得最优含水率,并通过室内侧限压缩试验得到土体的压缩模量,试验操作过程如图 5 所示,地基土压缩模量-密度关系如图 6 所示,试验土的物理力学参数见表 3。

受模型尺寸及试验可操作性的限制,在模型箱内填筑地基土再夯击难以还原地基土的强度,且在模型箱内夯实强度不均匀可能影响箱涵模型的受



(a) 直剪试验



(b) 室内侧限压缩试验

图 5 试验过程

Fig. 5 Testing process

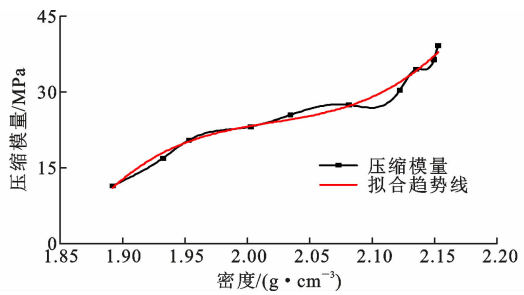


图 6 地基土压缩模量-密度关系

Fig. 6 Compression modulus-density relationship of foundation soil

表 3 试验土物理力学参数

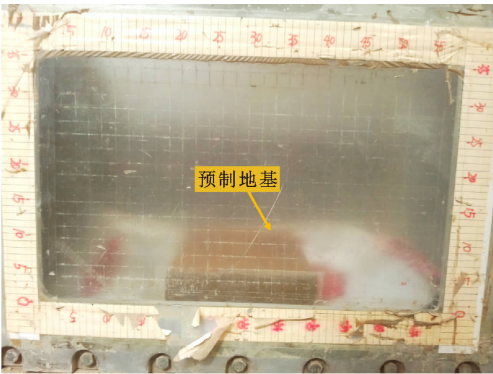
Table 3 Physical and mechanical parameters of test soil

| 压缩模量/ MPa | 含水率/% | 干密度/ (g·cm ⁻³) | 黏聚力/ kPa | 内摩擦 角/(°) |
|--------------|-------|-------------------------------|-------------|--------------|
| 25 | 15 | 2.1 | 30 | 20 |

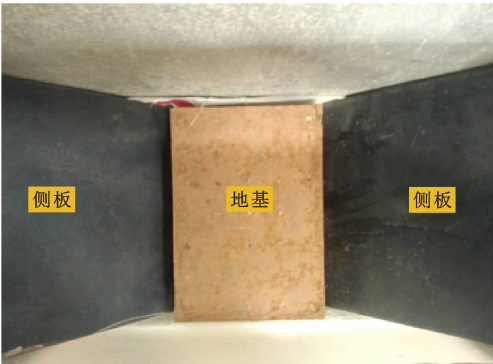
力,故地基土及沟谷地形均在预制模板内预制。地基借助自主发明的地基土预制装置^[31]制备。模拟沟谷宽度时,采用自主发明的土工离心试验模型装置^[32-33],在地基两侧先放置支撑架,根据所需沟谷坡度调整支撑架角度,在支撑架上放置侧板,在侧板上放置预制的沟谷地形,实现模型试验的地形条件模拟,预制地基及沟谷地形模拟如图 7 所示。

2.4.3 箱涵模拟及测试元件布设

经调查,有机玻璃材料特性与混凝土材料受力变形特性相似,可较好地还原箱涵与土体接触特性,



(a) 预制地基



(b) 沟谷地形模拟

图 7 地基及沟谷地形模拟

Fig. 7 Simulation of foundation and valley terrain

而且满足试验的可重复利用需求,高效便捷^[34-36]。因此,试验用有机玻璃代替混凝土材料,按照 1:50 相似比制作箱涵。预制箱涵长度与模型箱宽度相同,模型箱涵尺寸如图 8 所示。

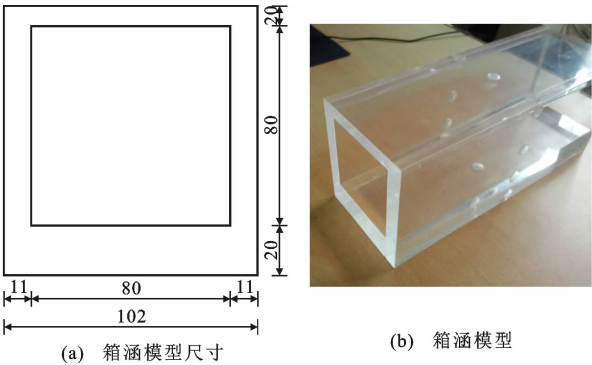


图 8 箱涵模型设计图(单位:mm)

Fig. 8 Design drawing of box culvert model(unit: mm)

试验过程中土压力采用 BW11-1.2 弦压式微型土压力盒进行测量。为准确监测箱涵的涵顶垂直土压力、涵底反力及涵侧水平土压力分布规律,选取箱涵中部 150 mm 位置,分别在模型箱涵的涵顶、涵底的中部、两端位置以及左右涵侧的顶端、中部、底端布设土压力盒,共计布设测点 14 个,具体测点位置如图 9 所示。

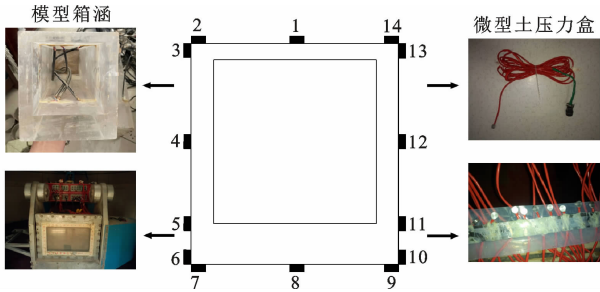


图 9 微型土压力盒布置位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of micro earth pressure box layout position

2.5 试验工况

结合以往学者的研究^[37-39],考虑实际山区地形的沟谷宽度及坡度存在差别,沟谷宽度增大,涵洞与坡脚距离增加,箱涵上部土体沉降发生变化,导致涵顶土与涵侧土的沉降差异;沟谷坡度变化会引起箱涵涵周土体变形及结构受力分布的改变,这是因为沟谷坡度变化使沟谷中填土的沉降程度与平地填土产生差异,当沟谷坡度改变时,沉降差异程度也随之改变。离心试验考虑了沟谷宽度、沟谷坡度对箱涵土压力的影响,并以沟谷宽跨比衡量沟谷宽度相对大小,具体试验工况见表 4。

表 4 试验工况

Table 4 Test conditions

| 工况 | 填土高度 H/m | 沟谷宽跨比 B/D | 沟谷坡度 $\alpha/(^{\circ})$ |
|----|-------------------|-------------|--------------------------|
| 1 | 20 | 1.5、2、3、4、5 | 45 |
| 2 | 20 | 3 | 0、30、45、60、90 |

3 离心试验结果分析

3.1 沟谷宽度对箱涵土压力的影响

填土高度 20 m、沟谷坡度 45°时,对宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 的箱涵涵周土压力进行监测,绘制箱涵土压力包络图,得到不同沟谷宽度下箱涵涵周土压力分布,如图 10 所示。

由图 10 可知,宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,箱涵涵顶垂直土压力的分布均呈“马鞍形”,即同一沟谷宽度下,箱涵涵顶两侧垂直土压力均大于涵顶中部垂直土压力。一方面是由箱涵结构特性导致的,涵顶两端和侧墙连接,刚度增大,而涵顶中部刚度较小,在填土荷载作用下发生挠曲变形释放部分土压力;另一方面是因为箱涵结构的弹性模量大于填土,相同荷载作用下涵侧填土沉降变形大于涵顶填土,使得涵洞外侧土柱的沉降量大于内侧土柱,外侧土柱对内侧土柱产生方向向下的摩擦力,且这种摩擦力由涵顶两端向中部逐渐递减,使得箱涵涵

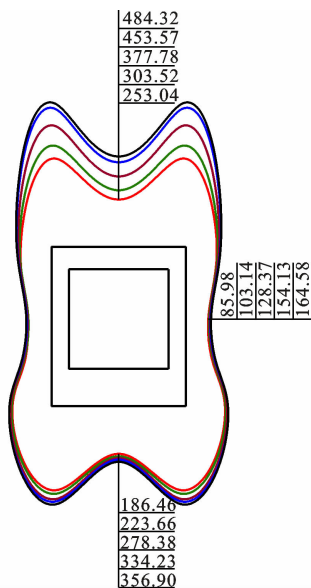


图 10 沟谷宽跨比影响下涵周土压力分布(单位:MPa)

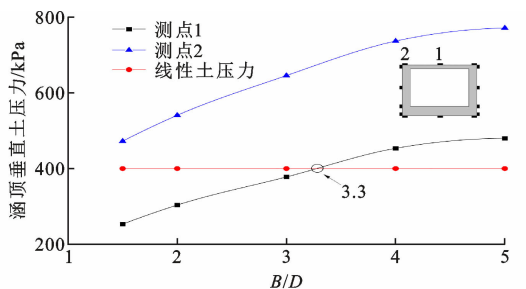
Fig. 10 Distribution of soil pressure around culverts under influence of valley width to span ratio (unit: MPa)

顶两端垂直土压力大于中部。当 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,箱涵涵侧水平土压力的分布呈两端大、中间小的“3”字形,这是因为箱涵侧墙上、下两端受到顶板和底板的加强作用,使得涵侧顶部和底部的刚度较大,出现应力集中,而涵侧中部刚度较小,在涵侧水平土压力作用下发生适当的挠曲变形,释放部分土压力。涵侧水平土压力最小值位于涵侧中部略微靠近涵顶,这是因为梯形沟谷地形下箱涵底板与沟谷水平距离较近,底板处坡度大于顶板,导致底板刚度大于顶板刚度,力按刚度的分配原则,底板处承受较大的涵侧水平土压力,因此,涵侧水平土压力最小值靠近涵顶。此外,当宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,箱涵涵底反力的分布均呈两端大、中间小的“W”形,这是箱涵自身结构特性导致的,涵底左右两端分别与侧墙连接,由于刚度较大产生应力集中,而涵底中部由于结构刚度较小产生向内的挠曲变形后释放了部分土压力。

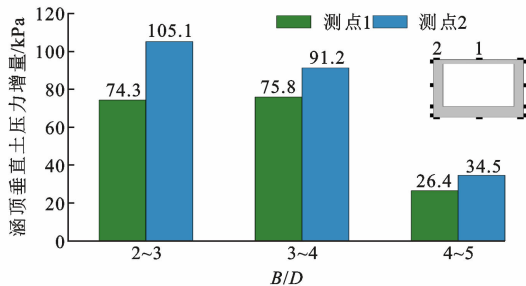
3.1.1 涵顶垂直土压力

由于沟谷地形对称布置,且箱涵结构为对称结构,故涵周土压力也为对称分布,选取一侧具有代表性的测点 1、2 分析涵顶垂直土压力。填土高度 20 m、沟谷坡度 45° 时,宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 的涵顶垂直土压力变化规律如图 11 所示。

由图 11(a)可知,填土高度 20 m 且宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,涵顶中部及两端的垂直土压力均随沟谷宽度的增大呈非线性增大的趋势。这



(a) 涵顶垂直土压力



(b) 涵顶垂直土压力增量

图 11 沟谷宽跨比影响下涵顶垂直土压力变化规律

Fig. 11 Variation law of soil pressure at culvert top under influence of valley width to span ratio

是由于随着沟谷宽度的增大,涵洞结构与沟谷地形距离增加,沟谷地形对于涵侧填土的承托作用由强逐渐减弱,涵侧填土在受到上部相同荷载时沉降量增大,使得涵顶内外土柱的沉降差增加,外土柱对内土柱向下的摩擦力不断增大,最终导致涵顶垂直土压力变大。

为准确分析沟谷宽度对涵顶垂直土压力的影响,将沟谷宽度下涵顶中部垂直土压力与线性土压力等值时的沟谷宽度定义为临界沟谷宽度 B_{cr} 。由图 11(a)可知,填土高度 20 m、沟谷坡度为 45° 时,临界沟谷宽度 $B_{cr} = 3.3D$ 。当沟谷宽跨比 $B/D < 3.3$ 时,沟谷地形对涵侧外土柱的承托作用较强,涵侧填土沉降量较小且小于涵顶内土柱的沉降变形,因此外土柱对内土柱产生一个方向向上的摩擦力,对箱涵起到卸荷作用,从而使涵顶垂直土压力小于线性土压力。当沟谷宽跨比 $B/D > 3.3$ 时,随着沟谷宽度增大,涵洞结构受到沟谷地形的卸荷作用逐渐减弱,外土柱沉降量逐渐增大,当外土柱沉降量大于内土柱时,外土柱对内土柱产生一个方向向下的摩擦力,从而使涵顶垂直土压力大于线性土压力。

由图 11(b)可知,填土高度 20 m 且宽跨比 B/D 由 2~4 变化时,涵顶中部及两端的垂直土压力增加,但增量呈小幅度减小。可见宽跨比 $B/D < 4$ 时,沟谷宽跨比对涵顶垂直土压力的影响显著,宽跨比较小时,沟谷地形对涵侧填土的承托作用较强,因此

对涵顶垂直土压力卸荷作用明显;宽跨比 B/D 由 4~5 变化时,涵顶中部及端部的垂直土压力增量突然降低,说明当宽跨比 $B/D>4$ 时,沟谷宽跨比的影响程度较小。出现这种现象的原因是沟谷宽度增大后,沟谷地形对涵侧填土的承托作用逐渐减小,沟谷地形条件对涵顶垂直土压力的影响逐渐减弱,导致宽跨比增加时,涵顶垂直土压力增量降低,变化较小。

3.1.2 涵顶垂直土压力集中系数

涵顶垂直土压力集中系数 $K_s=\sigma/(\gamma h)$,即涵顶垂直土压力 σ 与线性土压力比值(γ 为土体重度, h 为土体计算深度), K_s 可反映涵顶垂直土压力的集中程度。当 $K_s<1$ 时,涵顶垂直土压力小于线性土压力,涵顶垂直土压力出现应力扩散现象,对涵顶受力有益;当 $K_s>1$ 时,涵顶垂直土压力大于线性土压力值,涵顶垂直土压力出现应力集中现象,对涵顶受力无益。填土高度 20 m、沟谷坡度 45° 下,沟谷宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,涵顶垂直土压力集中系数变化规律如图 12 所示。

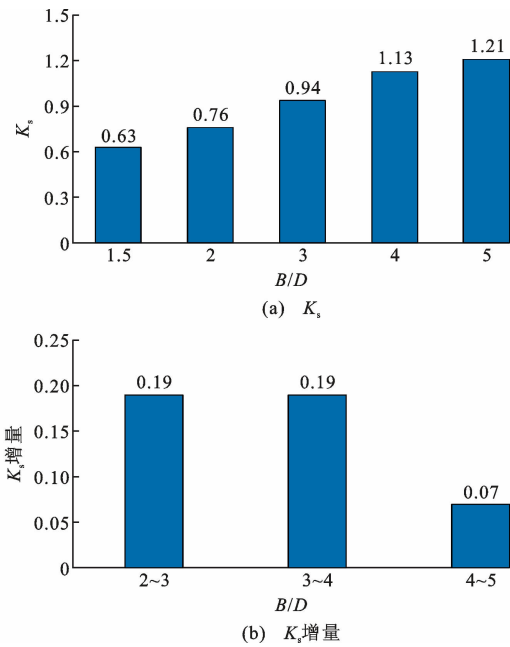


图 12 沟谷宽度影响下涵顶垂直土压力集中系数变化规律
Fig. 12 Variation law of soil pressure concentration coefficient at culvert top under influence of valley width

由图 12(a)可知:随着沟谷宽度的增大,涵顶垂直土压力集中系数呈非线性增大,当宽跨比 $B/D<3$ 时,涵顶垂直土压力集中系数 $K_s<1$,涵顶垂直土压力发生应力扩散; $B/D>3$ 时, $K_s>1$,涵顶垂直土压力出现应力集中现象。这是由于相同填土荷载下,填土强度小于沟谷地基强度,随着沟谷宽度的增

大,沟谷地形对于涵侧填土的承托作用逐渐减小,使得涵侧填土的沉降量逐渐增大,外土柱对涵顶内土柱的摩擦力逐渐由方向向上变为方向向下,涵顶垂直土压力集中系数逐渐增大。

由图 12(b)可知:填土高度 20 m 时,在宽跨比 B/D 由 2~4 的变化过程中,土压力集中系数呈线性增加,且增量稳定在 0.19;宽跨比 B/D 由 4~5 变化时,涵顶垂直土压力集中系数增量突降,可见沟谷宽度 $B/D<4$ 时,地形对箱涵结构的受力影响程度较大,沟谷宽跨比 $B/D>4$ 后,沟谷坡度较缓,对涵侧填土的承托作用较弱,箱涵结构受沟谷地形影响效应逐渐减小,具体表现为沟谷宽度由小变大时,土压力集中系数增加至一定值后不再发生明显变化。

3.1.3 涵侧水平土压力

选取测点 3、4、5、6 研究涵侧水平土压力的变化规律。填土高度 20 m、沟谷坡度 45° 下,宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,涵侧水平土压力变化规律如图 13 所示。

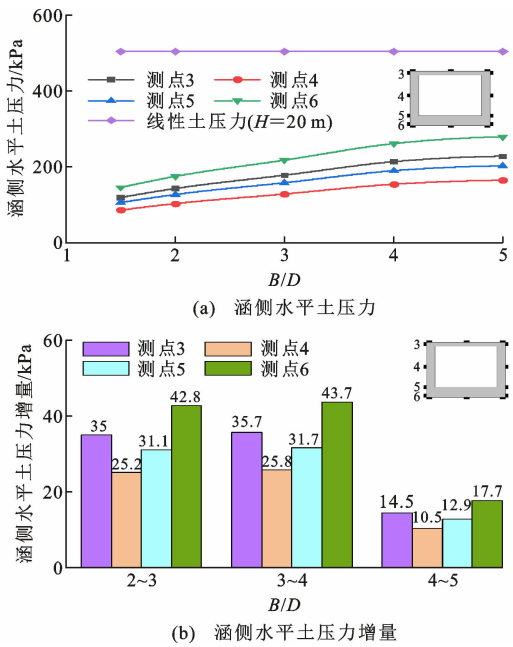


图 13 沟谷宽度影响下涵侧水平土压力变化规律
Fig. 13 Variation law of soil pressure on culvert side under influence of valley width

由图 13(a)可知,填土高度 20 m 且宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,各测点的水平土压力均随沟谷宽的增大呈非线性增大趋势,这与公路高填方涵洞设计规范中关于涵侧水平土压力的计算结果存在差异。规范中涵侧水平土压力仅与填土高度和填土的内摩擦角有关,随填土高度变化,涵侧水平土压力应该为线性变化,且涵侧水平土压力值均小

于线性土压力。以测点 3 为例,填土高度为 20 m 时, B 为 1.5 D 、3 D 、5 D 对应的涵侧土压力分别为 119.14、177.87、228.03 kPa,分别为线性土压力的 24%、35%、45%。由此可知,沟谷地形下不同沟谷宽度对涵侧水平土压力有较大影响。

由图 13(b)可知,填土高度 20 m 时,在当宽跨比 B/D 由 2~4 的变化过程中,随着沟谷宽度的增大,涵侧各测点的水平土压力增量基本稳定,当宽跨比 B/D 由 4 增加至 5 时,随沟谷宽度增大,涵侧水平土压力增量减小,且减小幅度较大。可见当宽跨比 $B/D < 4$ 时,沟谷宽度对涵侧水平土压力存在较大影响,而 $B/D > 4$ 时,沟谷宽度对涵侧水平土压力的影响逐渐减弱。由此可知,沟谷坡度为 45°且沟谷宽度较小时,涵侧水平土压力较低,沟谷地形能发挥对涵侧土压力的减荷作用。

3.1.4 涵底反力

选取代表测点 7、8 分析涵底反力的变化规律。填土高度 20 m 且沟谷坡度 45°时,宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 的涵底反力的变化规律如图 14 所示。

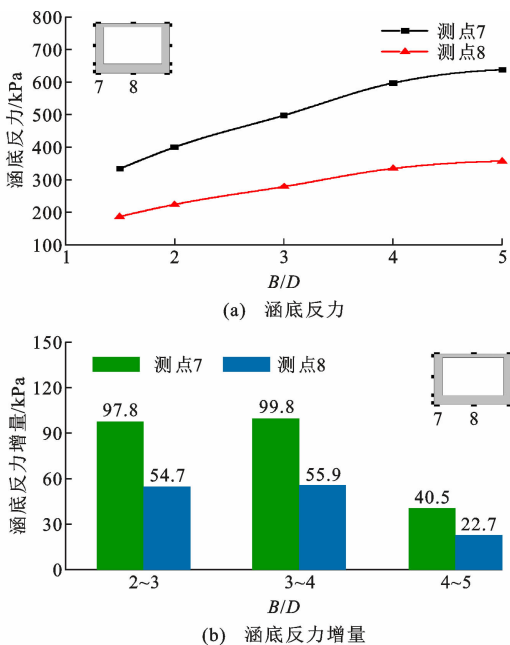


图 14 沟谷宽跨比影响下涵底反力变化规律

Fig. 14 Variation law of culvert bottom reaction force under influence of valley width to span ratio

由图 14(a)可知,填土高度 20 m 且宽跨比 B/D 分别为 1.5、2、3、4、5 时,涵底中部反力分别为 186.5、223.7、278.4、334.2、356.9 kPa,涵底两端的反力分别为 333.2、399.7、497.5、597.3、637.8 kPa,可见沟谷地形下涵底反力与沟谷的宽跨比呈

正相关关系。这是因为随着沟谷宽跨比增大,沟谷地形的承托作用逐渐减弱,涵侧填土的沉降变形逐渐大于涵顶填土,外土柱对内土柱的摩擦力由方向向上逐渐变为方向向下,同时涵侧外土柱沉降量的增大使得外土柱对涵洞侧壁的摩擦力增大,最终导致涵底反力变大。

由图 14(b)可知,填土高度 20 m 时,涵底反力的增量随宽跨比的增加呈先增加后减小的变化趋势。宽跨比 B/D 由 2~3、3~4、4~5 变化时,涵底端部反力增量分别为 97.8、99.8、40.5 kPa,涵底中部反力增量分别为 54.9、55.9、29.7 kPa。可见沟谷宽跨比 $B/D < 4$ 时,随着沟谷宽度的增大,箱涵涵底反力基本表现为线性增加,且沟谷宽跨比 $B/D > 4$ 后,随着沟谷宽度的增大,涵底反力增量减小。这是由于沟谷宽跨比 $B/D > 4$ 后,沟谷地形对涵侧填土的承托作用逐渐减小,地形条件对涵底反力的影响逐渐减弱。沟谷宽度对涵底端部反力的影响大于涵底中部,这与涵洞结构自身刚度有关,涵底端部与涵洞侧墙相连,涵洞侧墙的支承作用使得涵底端部刚度增大,导致涵底端部应力集中。

3.2 沟谷坡度影响下的箱涵土压力

填土高度 20 m 且沟谷宽跨比 $B/D = 3$ 时,对沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、90°的箱涵涵周土压力进行统计,并绘制箱涵土压力包络图,得到不同沟谷坡度下箱涵涵周土压力分布,如图 15 所示。

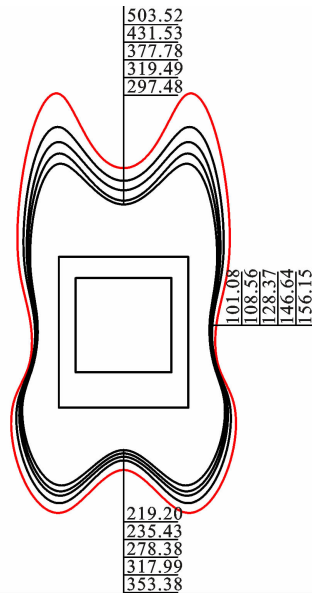


图 15 沟谷坡度影响下涵周土压力分布(单位:MPa)

Fig. 15 Distribution of soil pressure around culverts under influence of valley slope (unit: MPa)

由图 15 可知,沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、

90°时,箱涵涵顶垂直土压力分布均呈两端大、中间小的“马鞍形”。涵顶两侧的垂直土压力均大于涵顶中部的垂直土压力。一方面是因为涵顶两侧和侧墙连接,结构刚度增大,而中部刚度较小,在填土荷载作用下产生向内的挠曲变形,释放部分土压力;另一方面是由于箱涵的涵顶外土柱沉降较大,而箱涵顶部填土由于受到涵洞结构的加强作用,沉降较小,外土柱对内土柱产生一个方向向下的摩擦力,且这种摩擦力由涵顶两端向中部逐渐递减,使得箱涵涵顶两端垂直土压力大于中部。当沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、90°时,箱涵涵侧水平土压力分布均呈两端大、中间小的“3”字形,这也是由箱涵特性导致的。箱涵的侧墙上下两端由于顶板和底板的加强作用使刚度增大,发生应力集中,而侧墙中部刚度较小,在涵侧水平土压力作用下发生适当的挠曲变形,释放部分土压力。此外,沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、90°时,箱涵涵底反力分布均呈两端大、中间小的“W”形,这是因为箱涵侧墙的存在增大了涵底左右两端的刚度,产生应力集中,而涵底中部刚度较小,在土压力作用下产生向内的挠曲变形,从而释放了部分土压力。

3.2.1 涵顶垂直土压力

选取测点 1、2 分析涵顶垂直土压力,填土高度 20 m 且沟谷宽跨比 $B/D=3$ 时,沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、90°的涵顶垂直土压力变化规律如图 16 所示。

由图 16 可知,填土高度 20 m 下,沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、90°时,涵顶中部垂直土压力分别为 530.0、431.5、377.7、319.3、297.1 kPa,涵顶两端的垂直土压力分别为 907.4、727.3、654.8、582.5、526.4 kPa,即涵顶垂直土压力与沟谷坡度表现为负相关关系。沟谷坡度 $\alpha=0^\circ$ 时,涵顶垂直土压力最大,大于线性土压力,表现为应力集中;沟谷坡度 $\alpha=90^\circ$ 时,涵顶垂直土压力最小,小于线性土压力,表现为应力扩散,表明沟谷地形对箱涵起到一定的卸载作用,具体表现为沟谷地形对于涵侧填土的承托作用阻碍了涵侧填土的沉降,从而使得涵侧外土柱沉降量小于内土柱,外土柱对涵顶内土柱产生一个方向向上的摩擦力,最终导致涵顶垂直土压力减小。

为准确分析沟谷宽度对涵周土压力的影响,将沟谷坡度下涵顶中部垂直土压力与线性土压力等值时的沟谷坡度定义为临界沟谷坡度 α_{cr} 。由 16(a)可知,填土高度 20 m、宽跨比 $B/D=3$ 时,临界沟谷坡

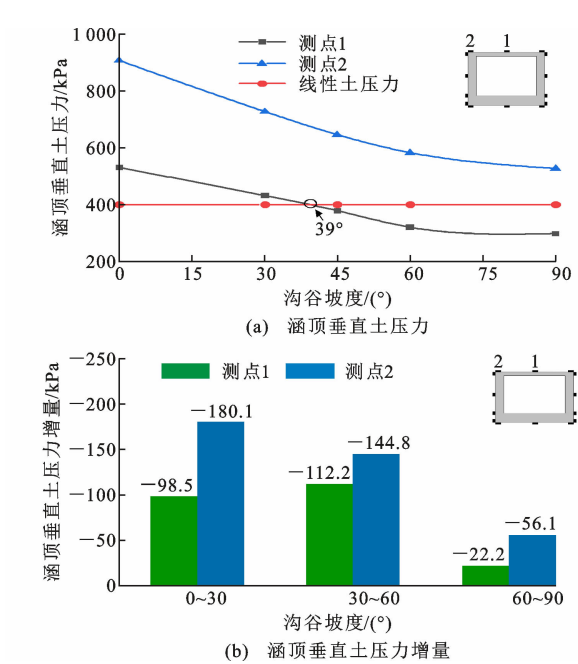


图 16 沟谷坡度影响下涵顶垂直土压力变化规律
Fig. 16 Variation law of soil pressure at culvert top under influence of valley slope

度 $\alpha_{cr}=39^\circ$ 。当沟谷坡度 $\alpha<39^\circ$ 时,沟谷地形对涵侧外土柱的承托作用较弱,涵侧土体沉降虽受到沟谷地形的阻碍作用,但对于涵侧土体沉降阻碍作用较小,涵顶内土柱沉降量仍大于外土柱沉降,外土柱对内土柱产生方向向下的摩擦力,箱涵涵顶垂直土压力发生应力集中,涵顶垂直土压力大于线性土压力。当沟谷坡度 $\alpha>39^\circ$ 后,随着沟谷坡度增大,沟谷地形对涵侧填土的承托作用逐渐显著,外土柱沉降量逐渐减小,小于内土柱沉降量,改变了内外土柱摩擦力的方向,使得外土柱对内土柱产生方向向上的力,从而释放涵顶部分土压力,最终导致涵顶垂直土压力减小,小于线性土压力。

由图 16(b)可知,填土高度 20 m 时,沟谷坡度 α 每增加 30°,涵顶中部垂直土压力分别减小 98.5、112.2、22.2 kPa,涵顶端部垂直土压力分别减小 180.1、144.8、56.1 kPa,说明沟谷坡度对涵顶两端垂直土压力的影响较中部更显著,且沟谷坡度大于 60°后沟谷地形对涵顶垂直土压力的卸载作用逐渐减弱。因此,沟谷坡度越大,越能发挥沟谷地形对涵侧填土的承托作用,从而对箱涵结构减载,当沟谷坡度增大至一定值时,减载作用不再有明显变化。

3.2.2 涵顶垂直土压力集中系数

填土高度 20 m 且沟谷宽跨比 $B/D=3$ 时,沟谷坡度分别为 0°、30°、45°、60°、90°的涵顶垂直土压力集中系数变化规律如图 17 所示。

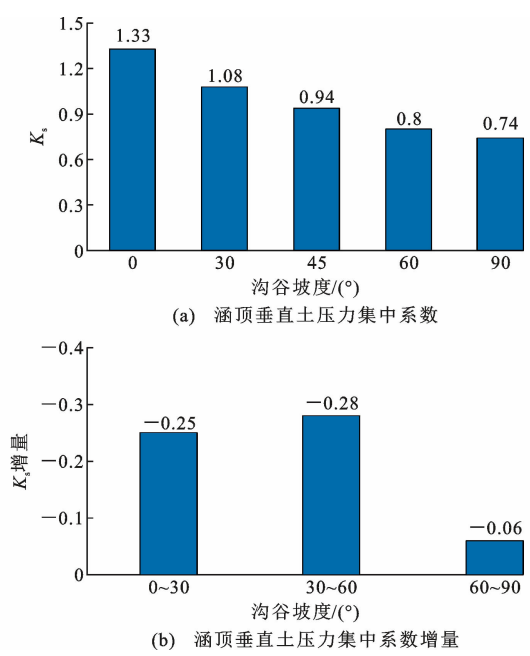


图 17 沟谷坡度影响下涵顶垂直土压力集中系数变化规律

Fig. 17 Variation law of soil pressure concentration coefficient at culvert top under influence of valley slope

由图 17(a)可知,涵顶垂直土压力集中系数与沟谷坡度表现为负相关关系,且沟谷坡度 $\alpha>30^\circ$ 时,涵顶垂直土压力集中系数 $K_s<1$,涵顶垂直土压力表现为应力扩散,当沟谷宽度 $\alpha\leq 30^\circ$ 时,涵顶垂直土压力集中系数 $K_s>1$,涵顶垂直土压力表现为应力集中。这是由于相同填土荷载下,随着沟谷坡度的增大,沟谷地形对于涵侧填土沉降的阻碍作用逐渐增大,使得涵侧填土的沉降量逐渐减小,外土柱对涵顶内土柱的摩擦力逐渐由方向向下变为方向向上,涵顶垂直土压力集中系数由大于 1 逐渐减小到小于 1。具体而言,当 $\alpha<30^\circ$ 时,沟谷地形对涵侧填土的承托作用较小,外土柱沉降量仍大于内土柱,外土柱对内土柱产生方向向下的摩擦力,导致涵顶垂直土压力大于线性土压力($K_s>1$),对涵顶起到卸荷作用;当 $\alpha>30^\circ$ 后,沟谷地形的承托作用逐渐增大,外土柱的填土沉降量逐渐减小,从而导致外土柱沉降量逐渐小于内土柱,涵侧外土柱对内土柱的摩擦力表现为方向向上,涵顶垂直土压力小于线性土压力值($K_s<1$),沟谷地形对涵顶垂直土压力起到卸载作用。

由图 17(b)可知:沟谷坡度 α 每增加 30° ,涵顶中部垂直土压力集中系数分别减小 0.25、0.28、0.06;沟谷坡度在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 变化时,涵顶垂直土压力集中系数减小幅度最大,在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 变化时减小幅度最小,表明涵顶垂直土压力集中系数在沟谷坡度

为 $30^\circ\sim 60^\circ$ 时最为敏感, $60^\circ\sim 90^\circ$ 时最不敏感,这一方面可能由于涵顶垂直土压力为竖向力,而沟谷坡度在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 变化时,沟谷地形上部涵侧填土对沟谷影响由水平向逐渐转化为竖向;另一方面由于沟谷坡度过大,沟谷地形为箱涵提供的卸载作用逐渐减弱。

3.2.3 涵侧水平土压力

填土高度 20 m 且 $B/D=3$ 时,沟谷坡度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 的涵侧水平土压力变化规律如图 18 所示。

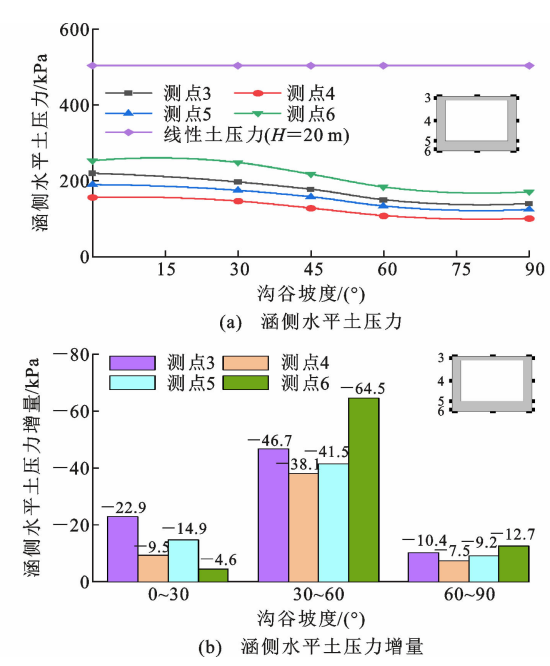


图 18 沟谷坡度影响下涵侧水平土压力变化规律

Fig. 18 Variation law of soil pressure on culvert side under influence of valley slope

由图 18(a)可知,沟谷坡度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 时,涵侧各测点的水平土压力与沟谷坡度表现为负相关关系。这是由于随着沟谷坡度增大,沟谷对涵侧外土柱的承托作用增强,外土柱沉降量逐渐减小,且涵侧外土柱的体积也逐渐减小,相同荷载下土体体积越小,累积沉降量越少,对箱涵侧壁所受的挤压作用越小,故随着沟谷坡度增大,箱涵涵侧水平土压力逐渐减小。《公路涵洞设计规范》中涵侧水平土压力仅与填土高度和填土的内摩擦角有关,随填土高度变化涵侧水平土压力应该为线性,与试验结果存在一定差异。涵侧各测点的水平土压力均小于线性土压力,以测点 6 为例,填土高度为 20 m、 $B/D=3$ 下,沟谷坡度分别为 0° 、 45° 、 90° 时,涵侧水平土压力分别为 253.11、217.60、171.35 kPa,分别为线性土压力的 50%、43%、34%。由此可知,沟谷

地形下不同沟谷宽度对涵侧水平土压力有较大影响。

由图 18(b)可知,沟谷坡度在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 变化时,涵侧水平土压力增量减小值较小,基本稳定在 15 kPa,而沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 变化时,涵侧水平土压力减小值较大,基本稳定在 45 kPa。可见沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,沟谷坡度对于箱涵结构受力更为敏感,即使改变较小的沟谷坡度对其结构受力也可能产生较大影响。

3.2.4 涵底反力

填土高度 20 m 且沟谷宽度 $B/D=3$ 时,沟谷坡度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 的涵底反力变化规律如图 19 所示。

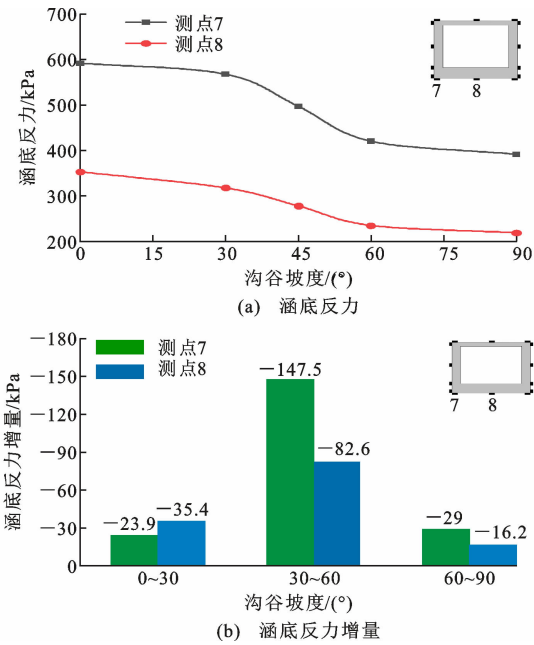


图 19 沟谷坡度影响下涵底反力变化规律

Fig. 19 Variation law of culvert bottom reaction force under influence of valley slope

由图 19(a)可知,沟谷坡度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 时,涵底中部反力分别为 353. 4、317. 9、237. 4、235. 4、219. 2 kPa,涵底两端的反力分别为 592. 2、568. 3、497. 5、420. 8、391. 8 kPa,可见涵底反力受沟谷坡度影响较大,且均随沟谷坡度的增大呈非线性减小趋势。这是因为当沟谷坡度 α 较大时,沟谷地形对上覆填土的承托作用较强,根据等沉面理论,若外土柱沉降大于内土柱,则内土柱自重通过土柱间摩阻力传递至外土柱,箱涵所受土压力减小;当沟谷坡度 α 较小时,沟谷地形的承托作用减弱,箱涵所受土压力就会增大。

由图 19(b)可知,不同沟谷坡度区间下涵底反

力的变化幅度存在差异,沟谷坡度在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 变化时,涵底反力变化较小,而当沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 变化时,涵底反力变化较大,可见沟谷坡度对涵底反力存在一定影响,且沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时对涵底反力的影响程度最大。

4 结 语

(1)沟谷地形下高填方箱涵的涵顶垂直土压力随沟谷宽度的增大呈非线性增大趋势,且沟谷宽跨比小于 3 时, $K_s<1$,土压力表现为应力扩散。这是由于随着沟谷宽度的增大,沟谷地形对于涵侧填土的承托作用逐渐减弱,涵侧填土的沉降量增大,从而增大了涵顶外土柱对内土柱的摩擦力,最终导致涵顶垂直土压力变大。

(2)沟谷地形下高填方箱涵的涵顶垂直土压力随沟谷坡度的增大呈非线性减小趋势,但减小幅度存在差异。沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,沟谷坡度对箱涵的涵周土压力影响程度最大,且沟谷坡度 $\alpha>39^{\circ}$ 后,涵顶垂直土压力集中系数小于 1,沟谷地形的减荷效果显著。

(3)涵侧水平土压力随沟谷宽度的增大呈非线性增大趋势,且沟谷宽跨比 $B/D<4$ 时影响效果最为显著;涵侧水平土压力随沟谷坡度呈负相关关系,沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,沟谷宽度对于箱涵涵侧水平土压力影响较大,建议计算时应慎重考虑沟谷宽度及沟谷坡度对涵侧水平土压力的影响。

(4)梯形沟谷地形条件下高填方箱涵涵底反力随沟谷宽度的增大呈非线性增大趋势,随沟谷坡度的增大呈非线性减小趋势,且沟谷宽跨比 $B/D<4$ 、沟谷坡度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,沟谷地形的变化对涵底反力影响程度较大。

(5)梯形沟谷地形条件下设计高填方箱涵时,建议尽量保留原有的沟谷地形。考虑沟谷宽度的影响,应尽可能选择沟谷宽跨比 $B/D<3$ 的区域修筑;考虑沟谷坡度的影响,应尽可能选择沟谷坡度较大的区域修筑,以保证对箱涵结构的卸载作用。

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 Zhongju, WU Yanling, JIA Yanwu, 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] 陶庆东. 高填方土石混合体路堤涵洞土拱效应与减载特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020.
TAO Qingdong. Study on soil arching effect and load reduction characteristics of high fill soil-rock mixture embankment culvert [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [3] 冯忠居,任文峰,谢富贵,等. 公路路基特长箱涵顶进模拟试验[J]. 交通运输工程学报,2007,7(4):74-78.
FENG Zhongju, REN Wenfeng, XIE Fugui, et al. Simulation experiment about oversize box culvert jacked into highway subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 74-78.
- [4] FENG Z J, HU H B, ZHAO R X, et al. Experiments on reducing negative skin friction of piles[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 4201842.
- [5] 李晓旭,叶海林,金俊喜,等. 高速黄土路基涵洞土压力分布特征研究[J]. 公路交通科技,2021,38(8):37-43.
LI Xiaoxu, YE Hailin, JIN Junxi, et al. Study on earth pressure distribution characteristics of loess subgrade culvert on expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(8): 37-43.
- [6] 郝宇萌,冯忠居,李少杰,等. 山区高填方盖板涵涵顶应力集中影响因素研究[J]. 公路,2019,64(1):31-37.
HAO Yumeng, FENG Zhongju, LI Shaojie, et al. Study of the factors affecting the top stress concentration of slab culvert on high filled section in mountainous area[J]. Highway, 2019, 64(1): 31-37.
- [7] 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): 823-830.
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): 823-830.
- [8] 高琦,陈保国,吴森,等. 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[J]. 岩土力学,2023,44(7):2151-2160,2169.
GAO Qi, CHEN Baoguo, WU Sen, et al. Long-term stress characteristics and load reduction effect of high-fill box culverts with EPS slabs[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(7): 2151-2160, 2169.
- [9] 康佐,谢永利,冯忠居,等. 应用离心模型试验分析涵洞病害机理[J]. 岩土工程学报,2006,28(6):784-788.
KANG Zuo, XIE Yongli, FENG Zhongju, et al. Studies on distress mechanism of culverts by centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 784-788.
- [10] 庞应刚,姚裕春,李楚根,等. 斜坡高路堤路基病害治理及分析[J]. 铁道工程学报,2015,32(6):25-28,68.
PANG Yinggang, YAO Yuchun, LI Chugen, et al. Hazard control of the high embankment constructed on slope foundation and its analysis[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(6): 25-28, 68.
- [11] 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 Baoguo, LUO Ruiping, SUN Jinshan. Study of stress characteristics and its influencing factors of embankment installation slab-culverts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 199-206.
- [12] FAN H, XU J H, HAN Z. Influence of culvert structure style and boundary on vertical earth pressure distribution of high-filled culvert[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 193-194: 565-568.
- [13] 邓国华,邵生俊. 填埋式涵洞上覆土压力的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(增1):4356-4360.
DENG Guohua, SHAO Shengjun. FEM analysis on earth pressure of embedded culvert in subgrade or dike[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4356-4360.
- [14] 马强,郑俊杰,李丽华,等. 装配式盖板涵土压力和变形的现场试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(2):364-374.
MA Qiang, ZHENG Junjie, LI Lihua, et al. Field test on the earth pressure and deformation of an assembled slab culvert[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 364-374.
- [15] 赵建斌,申俊敏,董立山. 高填方涵洞受力特性现场测试及数值模拟研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(3):111-115.
ZHAO Jianbin, SHEN Junmin, DONG Lishan. Field test and numerical simulation of mechanical characteristic of culverts under high embankments[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(3): 111-115.
- [16] 曹继伟,范鹤,刘斌. 高填土涵洞土压力分布及影响因素研究[J]. 公路,2011,56(12):109-114.
CAO Jiwei, FAN He, LIU Bin. Study on earth pressure distribution and influencing factors of high fill

- culvert[J]. Highway, 2011, 56(12): 109-114.
- [17] 翁效林, 谢永利, 刘保健. 高填方路堤涵洞碎散体填土成拱效应离心模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(2): 31-35.
- WENG Xiaolin, XIE Yongli, LIU Baojian. Centrifugal model of arch action of granular soil fills of culverts under high embankment [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(2): 31-35.
- [18] 陈 锋, 蔡德钧, 韩自力, 等. 路涵过渡段涵洞竖向压力现场试验研究[J]. 铁道建筑, 2011, 51(4): 49-51.
- CHEN Feng, CAI Degou, HAN Zili, et al. Field test study on vertical pressure of culvert in transition section of road and culvert[J]. Railway Engineering, 2011, 51(4): 49-51.
- [19] 冯忠居, 李少杰, 郝宇萌, 等. 上埋式涵洞基础埋深效应下的地基承载力研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(11): 83-90.
- FENG Zhongju, LI Shaojie, HAO Yumeng, et al. Bearing capacity of foundation affected by buried depth of culvert[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(11): 83-90.
- [20] 冯忠居, 李少杰, 董芸秀, 等. 高填方盖板涵垂直土压力分布特性及计算理论[J]. 公路交通科技, 2019, 36(12): 69-78.
- FENG Zhongju, LI Shaojie, DONG Yunxiu, et al. Vertical earth pressure distribution characteristics and calculation theory of high fill culvert[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(12): 69-78.
- [21] 冯忠居, 成圆梦, 李少杰, 等. 高填方涵洞地基承载力与稳定性及确定方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4916-4925.
- FENG Zhongju, CHENG Yuanmeng, LI Shaojie, et al. Determination method for bearing capacity and stability of high-filled culvert foundation[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4916-4925.
- [22] 李国维, 米帅奇, 仇红超, 等. 深埋盖板涵路基填土应力场分布特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2311-2319.
- LI Guowei, MI Shuaiqi, QIU Hongchao, et al. Experimental study on stress field distribution characteristics of slab-culvert under high embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2311-2319.
- [23] 郑俊杰, 赵建斌, 陈保国. 高路堤下涵洞垂直土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1009-1013.
- ZHENG Junjie, ZHAO Jianbin, CHEN Baoguo. Vertical earth pressure on culverts under high embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1009-1013.
- [24] 程振威, 李又云, 李 松, 等. 沟谷地形高填方涵洞竖向土压力数值模拟与计算方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(5): 506-513.
- CHENG Zhenwei, LI Youyun, LI Song, et al. Numerical simulation and calculation method study of vertical earth pressure of high filling culverts in trench terrain[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(5): 506-513.
- [25] 冯忠居, 王思琦, 王溪清, 等. 沟谷地形对高填方拱涵涵周土压力影响研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 119-130, 143.
- FENG Zhongju, WANG Siqi, WANG Xiqing, et al. Influence of valley topography on earth pressure of high-fill arch culvert[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 119-130, 143.
- [26] 公路涵洞设计规范: JTG/T 3365-02—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Specifications for design of highway culverts: JTG/T 3365-02—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [27] 李永刚, 刘孝俊, 周泽涛. 梯形沟埋涵洞顶部垂直土压力试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(6): 654-659.
- LI Yonggang, LIU Xiaojun, ZHOU Zetao. Experimental study on earth pressure on the top of trapezoid trench-buried culverts[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(6): 654-659.
- [28] 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 Anquan. Investigation of the vertical earth pressure on projecting conduit and underground chamber under a high embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 3-15.
- [29] 王秉勇. 涵洞顶填土压力的讨论及计算[J]. 铁道工程学报, 2002, 19(2): 50-54.
- WANG Bingyong. Discussion and calculation on loading pressure of soil filled on top of culvert[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, 19(2): 50-54.
- [30] TADROS M, BENAK J, GILLILAND M. Soil pressure on box culverts [J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(4): 439-450.
- [31] 长安大学. 土工离心模型试验用地基模型制作装置: 201420773087. 1[P]. 2015-04-01.
- Chang'an University. Foundation model production

- device for geotechnical centrifugal model test; 201420773087. 1[P]. 2015-04-01.
- [32] 长安大学. 公路涵洞离心模型试验的一体式工况模型装置:201520082821. 4[P]. 2015-09-16. Chang'an University. Integrated working condition model device for centrifugal model test of highway culverts; 201520082821. 4[P]. 2015-09-16.
- [33] 长安大学. 公路涵洞离心模型试验的一体式工况模拟装置及试验方法:201510061181. 3[P]. 2015-05-27. Chang'an University. Integrated working condition simulation device and test method for centrifugal model test of highway culverts; 201510061181. 3[P]. 2015-05-27.
- [34] 石华旺,魏连雨. 玻璃钢夹砂管涵洞力学性能现场试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4):1535-1540. SHI Huawang, WEI Lianyu. Full-scale field test for buried glass fiber reinforced plastic mortar pipes culvert[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(4): 1535-1540.
- [35] 齐永正,刘向东,吕嘉,等. 土工离心机试验涵洞模型设计与分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(3):406-410. QI Yongzheng, LIU Xiangdong, LV Jia, et al. Culvert model design and analysis based on centrifugal model test[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(3): 406-410.
- [36] 陶庆东,何兆益,贾颖. 结构参数与填料特性对盖板涵洞土涵作用影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2):468-478. TAO Qingdong, HE Zhaoyi, JIA Ying. Soil culvert interaction effect of geometric configurations and filling properties on slab culvert[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 468-478.
- [37] 冯忠居,董芸秀,潘放,等. 沟谷地形对高填方盖板涵受力及填土沉降特性的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(3):53-64. FENG Zhongju, DONG Yunxiu, PAN Fang, et al. Influence of gully topography on stress of high fill slab culverts and settlement characteristics of fill[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 53-64.
- [38] 杨锡武. 高填方涵洞土压力变化规律与影响因素的数值模拟研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(5):42-47, 52. YANG Xiwu. Numerical simulation study on the law of earth pressures on the culvert beneath high embankment and the factors of effect on the earth pressures[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(5): 42-47, 52.
- [39] 杨锡武,张永兴. 公路高填方涵洞土压力变化规律及计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9):119-124. YANG Xiwu, ZHANG Yongxing. A study on the earth pressure theory for high fill culverts[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 119-124.