

# 沟埋涵洞土拱效应及涵顶垂直土压力研究\*

周兴涛<sup>1</sup>, 陈保国<sup>2</sup>, 简文星<sup>2</sup>, 韩金良<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074; 3. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 采用细观颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup> 对沟埋涵洞上方填土内土拱效应及涵顶垂直土压力进行研究。结果表明: 涵洞上方填土越高, 土拱效应越明显; 沟槽越宽, 土拱效应越弱。土拱形态为上凸形, 拱脚位于两侧沟壁上, 可以根据填土内竖向位移等值线是否出现椭圆形来判断填土内是否产生明显土拱效应。沟槽宽度大于 7 倍涵洞宽度时, 涵顶垂直土压力可按上埋式涵洞土压力的方法进行计算。涵顶土压力系数随着填土高度的增加呈先增后减的变化趋势。当填土高度达到初始等沉面高度时, 土压力系数达到最大值。等沉面高度随着填土高度的增加而下降, 随着沟槽宽度的增加而上升。并在此基础上得出了考虑土拱效应的涵顶垂直土压力计算判别准则及计算方法。

**关键词:** 沟埋涵洞; 颗粒流; 垂直土压力; 土拱效应

中图分类号: U449.82 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2015)04-0957-08

## Soil Arching Effect and Vertical Earth Pressure on Trench Installation Culverts

Zhou Xingtiao<sup>1</sup>, Chen Baoguo<sup>1</sup>, Jian Wenxing<sup>2</sup>, Han Jinliang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China; 2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, P. R. China)

**Abstract:** A numerical analysis is carried out using the software Meso-scale Particle Flow Code (PFC<sup>2D</sup>) to investigate the soil arching effect in the backfill and the vertical earth pressure on trench installation culverts. Research findings indicate that the soil arching effect is more obvious for higher backfill over the culvert, but it is not obvious at a wider trench width. The form of the soil arching is convex and the arching springers are located on both sides of the trench wall. The soil arching will be obvious if there is an ellipse in the vertical displacement contour lines of the backfill. The vertical earth pressure on the top of trench installation culverts can be calculated by using a theoretical method for calculating that of positive installation culverts when the trench width is larger than 7 times the culvert width. The vertical earth pressure coefficient first increases nonlinearly with the backfill height and then has a decrease. It reaches the maximum value when the backfill height reaches to the initial equal settlement plane. The elevations of equal settlement plane decreases with the backfill height and increases with the trench width. Moreover, a calculating criterion and method for the vertical earth pressure on the top of trench installation culverts has been deduced with considering the soil arching effect.

**Keywords:** trench installation culverts; particle flow; vertical earth pressure; soil arching effect

\* 收稿日期: 2014-04-28(修改稿)

作者简介: 周兴涛(1987-), 男, 湖北襄阳人, 博士生, 主要从事岩土工程及地质灾害防治方面研究工作。

E-mail: 525017432@qq.com

通讯作者: 陈保国(1981-), 男, 湖北广水人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、路基工程方面教学与科研工作。

E-mail: baoguo\_chen@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108434); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUG130408)

## 1 引言

沟埋涵洞在公路和铁路工程中应用非常广泛。合理确定涵洞顶部的垂直土压力对涵洞的设计非常重要,但目前沟埋涵洞的土压力计算没有成熟的理论可依。现行公路桥涵设计通用规范中采用的线性土压力理论未能准确反映沟埋涵洞涵顶垂直土压力变化规律,与实际相差较大<sup>[1]</sup>。美国衣阿华州立大学的 Marston A. & Anderson A. O. 提出了著名的 Marston 土压力计算公式,使人们摒弃了涵管土压力以隧洞卸荷拱理论为基础的洞室土压力计算方法。但其忽略了涵洞两侧胸腔土体的下沉对涵顶土压力的影响,得出的土压力系数变化规律也与实际存在一定的差异<sup>[2,3]</sup>。Spangler M. G. 在 Marston 土压力计算理论的基础上进一步指出影响涵顶土压力的主要因素是涵顶正上方的土柱体与其相邻两侧土柱体之间的沉降差,同时还提出了等沉面模型<sup>[4]</sup>。折学森<sup>[5]</sup>对路基涵洞的垂直土压力计算方法进行了探讨,研究了土压力的影响因素及变化规律,得出了基于刚性地基假设的垂直土压力计算公式。郑俊杰等<sup>[6]</sup>结合现场试验和有限元研究了沟埋涵洞涵顶垂直土压力变化规律,提出沟埋涵洞的设计与施工应综合考虑各种因素对涵洞受力状态的影响。李永刚等<sup>[7]</sup>对矩形沟埋涵洞顶部的垂直土压力进行了理论研究和有限元计算,考虑了两侧胸腔填土对涵顶垂直土压力的影响。杨锡武等<sup>[8]</sup>采用模型试验对沟埋涵洞土压力随填土高度变化的规律以及高填方涵洞的成拱效应进行了研究,得出涵洞上方填土达到一定高度后填土内部产生土拱效应,且具有不稳定性。由于刚性涵管与土体之间的刚度差异在涵顶填土内部引起的土拱效应和涵管基底产生的土压力集中现象,使得填土的受力状态变得极为复杂<sup>[9,10]</sup>。

以上研究工作推动了沟埋涵洞土压力计算理论的发展,但填土和涵洞之间的刚度差异及填土和沟槽壁之间的摩擦作用会导致填土内部产生不均匀沉降。由于土体为典型的散粒体,当这种不均匀位移达到一定程度时,土体内部就可能产生土拱效应,但很难在物理试验过程中对这种土拱效应进行直接观察。如果填土内部产生了土拱效应,这种拱到底是一种什么样的形态,其变化规律如何,考虑土拱效应后涵顶垂直土压力该如何计算,这些都是目前沟埋涵洞土压力计算理论发展必须要面对的问题。目前,基于离散元理论的颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup> 被广泛用于研究土体等散粒体的细观力学行为,能

有效地揭示土体内部土拱效应的形成机理,可以通过颗粒单元间接触力的分布来对土拱效应进行直接观察<sup>[11-14]</sup>。因此,本文采用 PFC<sup>2D</sup> 软件对矩形沟埋涵洞填土内土拱效应和涵顶垂直土压力变化规律进行研究。获得了填土内土拱的形态和变化规律,及涵顶垂直土压力的变化规律,得出了考虑土拱效应的涵顶垂直土压力的计算判别准则及计算方法。

## 2 数值模型及参数

数值模型中采用矩形箱型涵洞。涵宽  $D = 4 \text{ m}$ , 涵高  $h = 4 \text{ m}$ 。涵土作用问题简化为平面应变问题。沟槽为矩形,沟槽宽度为  $B$  ( $1 \leq B/D \leq 11$ ), 涵顶上部填土高度为  $H$  ( $0 \leq H/D \leq 10$ )。数值模型如图 1 所示。图 1 中用墙边界(wall)来分别模拟沟槽壁和涵洞,用圆盘颗粒单元来模拟填土。为了对涵顶垂直土压力进行有效监测,将涵洞顶板分成 3 段(图 1 中蓝、红、绿),取中间段(wall52)为监测对象,其长度为 2 m。计算结束后获得圆盘颗粒单元作用于中间段上的法向接触力之和,则涵顶垂直土压力计算如下:

$$p = \frac{F_v}{0.5D} \quad (1)$$

式中:  $F_v$  为圆盘颗粒单元对涵顶中间段的法向接触力之和(N/m);  $D$  为涵洞的宽度(m);  $p$  为涵顶垂直土压力(Pa)。

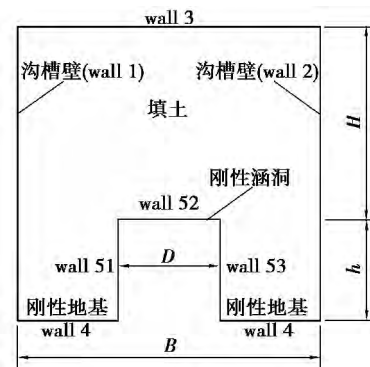


图 1 数值模型示意图

Fig. 1 Sketch of numerical model

模型中位移监测点如图 2 所示。其中每一格点为一个监测点,小方格的尺寸为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 。高程基准点取在涵洞底部。通过软件内置的 fish 语言编程获得每一个监测点在重力作用下产生的竖向位移,然后导入 Surfer 中绘制竖向位移等值线图。

室内试验砂为粒径小于  $2 \text{ mm}$  的干砂,重度  $15 \text{ kN/m}^3$ ,颗粒相对密度  $\rho_s = 2.5$ ,孔隙比  $0.625$ ,弹性模量  $14.7 \text{ MPa}$ ,泊松比  $0.30$ 。数值模拟时将

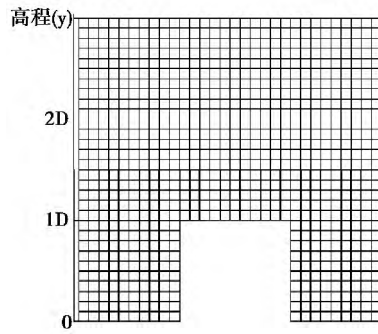


图 2 竖向位移监测点布置示意图

Fig. 2 Layout of measuring points for vertical displacement

粒径放大 24 倍,通过双轴数值试验来对砂土颗粒的细观物理力学参数进行微调,使得颗粒集合的宏观性质与室内砂土试验结果相匹配。颗粒单元之间采用线性接触本构模型。对于沟埋涵洞,两侧沟槽壁以外的原有土体,可以认为固结变形相对较小,而沟内新填土在自重及外荷载作用下产生沉降变形相对较大,沟壁对填土会产生向上的摩阻力,将模拟沟壁的墙的摩擦系数取为颗粒的摩擦系数值,其刚度值取为颗粒的刚度 10 倍。一般涵洞地基经过特殊加固处理,涵洞由混凝土或者砖石构筑而成,变形比填土的变形小得多。将涵洞视为刚性,模拟涵洞的墙的法向刚度和切向刚度都取  $10^{10}$  N/m,摩擦系数取为颗粒摩擦系数值的 0.5 倍。将地基视为刚性,模拟地基的墙的法向刚度和切向刚度均取  $10^{10}$  N/m,其摩擦系数取颗粒的摩擦系数值。数值试样制备时,在填土区域生成指定孔隙率的圆盘颗粒单元后,发现颗粒间存在较大的初始接触力,为了消除初始接触力对重力计算的影响,必须进行初始平衡计算,否则由重力产生的接触力根本看不出来,初始平衡计算进行  $3 \times 10^4$  个 step,将初始接触力减小至 10 N 以下。颗粒及其集合的宏细观物理力学参数见表 1。

表 1 颗粒单元和颗粒集合参数

Table 1 Parameter of particle elements and particle assembly

参数	颗粒	颗粒集合
孔隙率 $n$	—	0.165
摩擦系数 $\mu$	0.8	—
刚度比 $k_n/k_s$	4.9	—
颗粒间接触法向刚度 $k_n$ /Pa	$5.0 \times 10^7$	—
最小颗粒半径 $R_{min}$ /m	$3.6 \times 10^{-2}$	—
最大颗粒半径 $R_{max}$ /m	$4.8 \times 10^{-2}$	—
密度 $\rho$ /kg · m <sup>-3</sup>	1796	1500
颗粒集合宏观弹性模量 $E$ /Pa	—	$1.47 \times 10^7$
颗粒集合宏泊松比 $\nu$	—	0.30

### 3 涵顶土压力分析

数值模拟得出不同填土高度和沟槽宽度下的涵顶垂直土压力( $p$ )变化规律如图 3 所示。当  $B/D=1$  时  $p$  先随着  $H$  的增加而增加,在  $H$  大于  $3D$  以后,涵顶土压力趋于稳定值,且该值小于  $\gamma H$ ,说明此时涵顶上方一定高度处填土内部产生了明显土拱效应。填土内部形成的土拱将涵顶上方一定高度上的土体的自重传递到沟壁附近,从而导致  $p$  趋于稳定值。当  $1 < B/D \leq 4$  时  $p$  也是先随着  $H$  的增加而增加,然后逐渐变缓。但是  $B/D$  越大,涵顶垂直土压力曲线的增加段越长、越陡,变缓的趋势越小,且曲线逐渐向  $\gamma H$  计算的曲线之上移动,说明沟槽越宽,涵顶上部土拱效应越弱,沟壁对涵顶正上方土柱的影响越弱。当  $B/D \geq 7, H/D \leq 10$  时,涵顶土压力大于  $\gamma H$ ,且不存在缓慢段,说明沟槽宽度大于 7 倍涵洞宽度后,沟槽壁对涵顶土压力的影响很小。由于涵顶土柱与两侧胸腔土柱存在较大沉降差,导致涵顶产生应力集中,涵顶土压力大于  $\gamma H$ 。由图 3 可以看出,在同一  $H$  下,涵顶垂直土压力随着  $B$  的增加先增加,当  $B$  达到  $7D$  后,涵顶垂直土压力趋于一个稳定值,说明此时沟埋涵洞涵顶垂直土压力可以按上埋式涵洞进行计算。

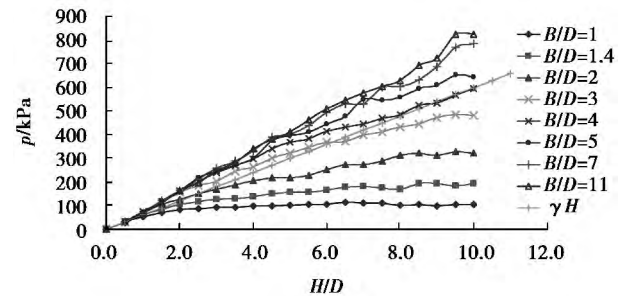


图 3 涵顶垂直土压力  $p$  变化规律

Fig. 3 Variations of the vertical earth pressure on the top of culverts

将涵顶垂直土压力  $p$  与  $\gamma H$  之比称为土压力系数  $k$ 。 $k$  随  $B/D$  和  $H/D$  的变化规律如图 4 所示。由图 4 可知,当  $B/D=1$  时,沟槽壁对涵顶土柱产生向上的摩阻力,使得涵顶垂直土压力小于  $\gamma H$ ,土压力系数小于 1,且填土高度越高,土压力系数越小。说明填土达到一定高度后,填土内部形成的土拱使得涵顶垂直土压力趋于稳定值。当  $1 < B/D \leq 4$  时  $k$  先随着  $H$  的增加而增加,在某一  $H$  时达到峰值,然后随着  $H$  的增加而下降,且达到峰值点的  $H$  随着  $B/D$  的增加而增加(例如:在  $H=1.4D$  时,

该峰值  $H$  为  $D$  的 0.5 倍; 在  $H=3D$  时, 该峰值  $H$  为  $D$  的 2 倍)。在填土高度从 0 增加到与土压力系数峰值相对应的填土高度的过程中, 涵顶上方填土厚度较小, 两侧胸腔内填土厚度相对较大, 则两侧胸腔内填土与涵顶土柱间的存在沉降差, 胸腔土体对涵顶上方土柱产生向下的摩擦力, 使得涵顶垂直土压力增加幅度大于  $\gamma H$  的增加幅度, 则土压力系数  $k$  逐渐增大。且在该过程中, 涵顶土柱与两侧胸腔内土柱的相对沉降差逐随着填土高度的增加而逐渐减小, 在峰值高度时, 涵顶土柱与两侧胸腔内土柱沉降差为 0, 土压力系数达到最大值。因此, 该峰值填土高度就是初始等沉面高度  $H_{c0}$ 。当填土高度  $H$  大于  $H_{c0}$  后, 随着填土高度增加, 胸腔内土柱与涵顶土柱作为一个整体, 共同受到两侧沟壁的向上摩擦作用。当填土达到一定高度后, 填土内会产生明显土拱效应, 导致涵顶垂直土压力的增加幅度小于  $\gamma H$  的增加幅度, 土压力系数随着填土高度增加逐渐下降。当  $B/D \geq 7$  时, 土压力  $k$  先随着填土高度增加, 然后趋于平缓并产生波动, 没有明显下降段, 说明当  $B/D \geq 7$  后, 沟槽壁对涵顶垂直土压力影响较弱, 可以按照上埋式涵洞计算方法进行受力分析。

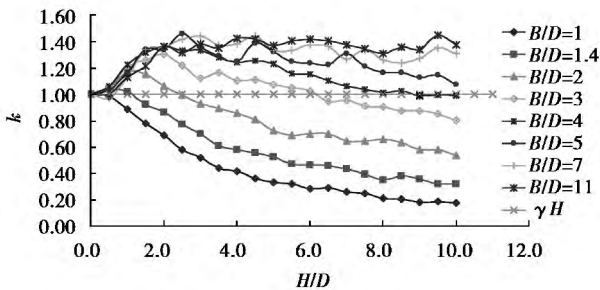


图 4 土压力系数  $k$  的变化规律

Fig. 4 Variations of earth pressure coefficient  $k$

### 4 填土竖向位移分析

由图 5 可知, 当  $B/D=1$  时, 若涵顶填土较低, 涵顶土柱只受到两侧沟槽壁的向上摩擦作用, 越靠近槽壁处的填土所受的向上摩擦作用越强, 则重力作用下产生的竖向位移越小, 整个竖向位移等值线为 U 形, 最大位移点位于填土顶面的中部。随着涵顶填土的增高, 竖向位移等值线图中 U 形开口逐渐封闭, 在填土高度  $H=3D$  时, U 形开口封闭, 竖向位移等值线中出现椭圆形态, 最大位移等值点位于椭圆中部, 椭圆长轴平行于竖直方向, 说明此时涵顶上方土柱内产生明显土拱效应, 使得土拱上

面填土沉降受到限制, 导致竖向位移等值线出现椭圆形闭合现象。因此, 可以根据填土内竖向位移等值线是否出现椭圆形来判断填土内是否产生明显土拱效应。  $B/D=1$  为沟埋涵洞的下限, 将这种状态定义为下限状态, 此时只有涵顶土柱, 无两侧胸腔填土。

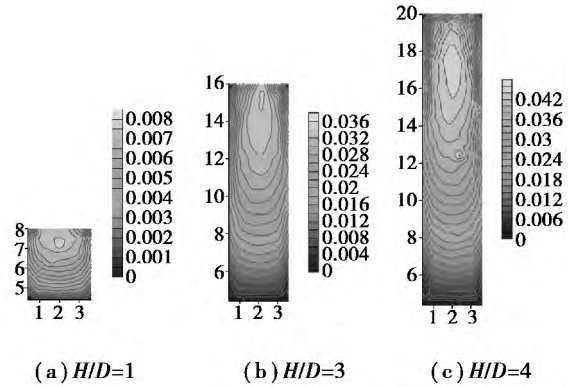


图 5 填土竖向位移等值线 ( $B/D=1$ , 单位: m)

Fig. 5 Contour lines of vertical displacement ( $B/D=1$ , unit: m)

当  $B/D > 1$  时, 以  $B/D=2$  为例分析沟埋涵洞竖向位移随着填土高度的变化规律(图 6)。由图 6 (图中粉红色线代表等沉面) 可知道若涵顶填土高度较低, 位移最大值点位于两侧胸腔中部, 涵顶土柱与胸腔内土柱位移差较大, 填土竖直位移等值线为 U 形, 其实两侧胸腔内土柱受力状态相当于图 5 中  $B/D=1$  时的情况。随着涵顶填土高度的增加, 由于土体内部的摩擦作用, 涵顶土柱与两侧胸腔内土柱间位移差减小, 最大位移点向涵顶上方中部移动。当填土高度  $H=2D$  时, 涵顶上方一定范围内位移等值线为 W 形, W 形之上一定范围出现 U 形, W 形与 U 形之间为过渡区, 等值线比较平缓, 说明胸腔内土柱与涵顶土柱之间位移差消失, W 形竖向位移等值线消失后的第一条竖向位移等值线就为等沉面, 即内外土柱沉降差为 0 的面。竖向位移等值线为 W 形, 说明内外土柱间存在沉降差, 计算涵顶土压力时必须把胸腔内土柱和涵顶土柱分别对待, 要考虑胸腔内土柱对涵顶土柱的向下摩擦作用, 此时 Marston 土压力计算公式失效。竖向位移等值线为 U 形但没有出现椭圆形时, 说明内外土柱间不存在沉降差, 填土内不存在明显土拱效应, 可以把 U 形区域的内外土柱看作一个整体, 共同受到两侧沟槽壁的向上摩擦作用, 此时 Marston 土压力计算公式有效; 当填土高度  $H=5D$  时, U 形等值线开口闭合, 填土内一定高度上位移等值线变

成椭圆形,最大位移点位于椭圆中部,说明填土内产生了明显土拱效应,此时椭圆形区域内 Marston 土压力计算公式失效,应该考虑填土内土拱效应对涵顶土压力的影响。由图 6 也可以看出在沟槽宽度一定时,随着填土高度的增加,等沉面高度  $H_c$  随着填土高度的增加而下降。

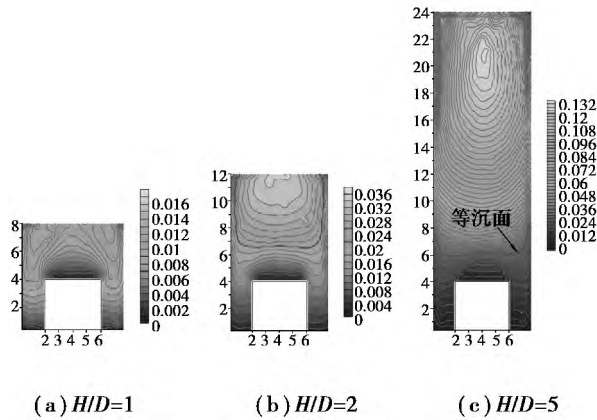


图 6 填土竖向位移等值线图 ( $B/D=2$ , 单位: m)

Fig. 6 Contour lines of vertical displacement ( $B/D=2$ , unit: m)

由图 7 可知,在填土高度一定时,随着沟槽宽度增加,等沉面高度  $H_c$  上升,而竖向位移等值线中椭圆形逐渐消失,说明相同填土高度下,沟槽越宽,沟槽壁对涵顶土柱的影响越弱,内外土柱间沉降差越大,洞顶上方土拱效应越弱,涵顶土压力越集中,土压力系数越大。

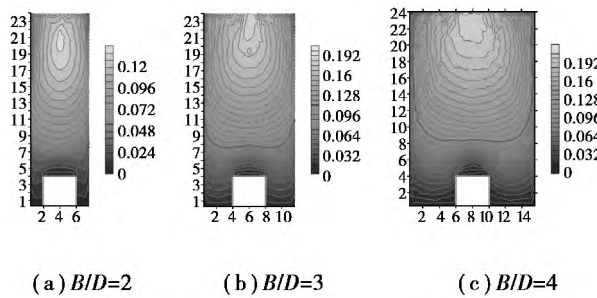


图 7 填土竖向位移等值线图 ( $H/D=5$ , 单位: m)

Fig. 7 Contour lines of vertical displacement ( $H/D=5$ , unit: m)

### 5 接触力分析

为了便于分析,在填土高度较高时,只选取了模型中土拱效应明显的高程段进行显示(高程基准点见图 2)。图 8 ~ 10 中黑色线条表示接触力,线条粗细表示接触力的大小。由图 8 可知当  $B/D=1, H/D=1$  时,填土内部不存在明显的土拱效应,接触力分布没有明显偏转,土颗粒间没有相互楔紧。同时,由图 5 (a) 可以看出填土内竖向位

移等值线为 U 形;若填土高度增加到  $3D$ ,则在  $2.2D$  与  $3.8D$  高程(总高程  $4D$ ) 内可见靠近槽壁附近接触力很粗,力链向上偏转,然后力链逐渐变平缓,产生明显的拱形,说明填土内产生了明显土拱效应,拱形态为上凸形,拱角位于两侧沟壁上。填土越高,土拱效应越明显,说明随着填土高度增加,由于沟壁摩擦阻作用,土体产生不均匀沉降,土颗粒间相互楔紧。越靠近沟壁处,土体受沟壁向上的摩擦作用越强,这种楔紧作用也越强。同时,从图 5 中 (b) 和 (c) 中可以发现竖向位移等值线产生椭圆形,说明可以由竖向位移等值线是否出现椭圆形来判断土体内部是否产生了明显土拱效应。由图 2 的  $B/D=1$  的涵顶土压力曲线,同样可以看出  $H/D > 3$  后填土内部产生了明显的土拱效应,导致涵顶垂直土压力趋于稳定值。

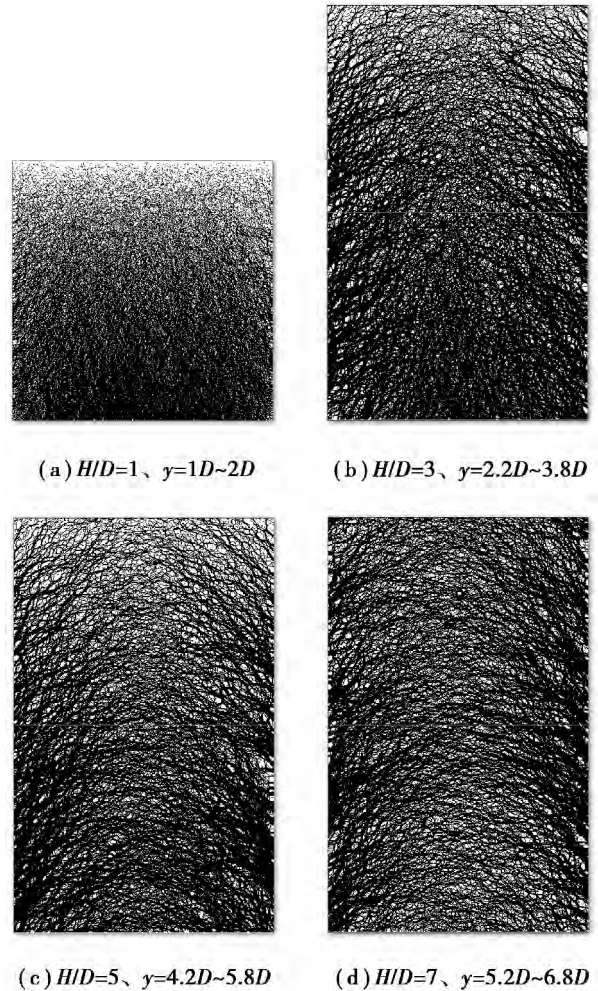


图 8 不同填土高度的接触力图 ( $B/D=1$ )

Fig. 8 Contact force with different fill height ( $B/D=1$ )

当  $B/D > 1$  时,以  $B/D=2$  为例分析接触力随填土高度的变化规律。同样,在填土高度较高时对每

一填土高度下的计算模型,只选取了模型中土拱效应明显的高程段进行显示。由图 9 可知,若填土高度为  $2D$ ,力链没有明显偏转,涵顶填土内部不存在土拱效应,涵顶上部存在明显应力集中现象,两侧胸腔填土内出现卸荷现象,且应力集中区与卸荷区分界线大致与水平线成  $45^\circ + \arctan(\mu) / 2 = 64^\circ$  ( $\mu$  为颗粒间摩擦系数)。此时填土的竖向位移图为图 6 中 (b);当填土高度为  $5D$  时,涵顶上方  $4D$  与  $6D$  倍高程间接触力力链向中间偏转,开始产生土拱效应,图 6 中 (c) 竖向位移等值线图出现椭圆形。当填土高度继续增加时,土拱效应越明显,导致图 3 中  $B/D=2$  的涵顶垂直土压力曲线逐渐变得平缓。在填土高度等于  $10D$  时,涵顶上部  $7D$  高程至  $10D$  高程间,接触力力链明显偏转呈拱形,土颗粒间相互严重楔紧,产生明显土拱效应,拱形态为上凸形,拱脚位于沟槽壁上,此时涵顶垂直土压力为  $\gamma H$  的  $54\%$ 。因此,当填土达到一定高度时,沟埋涵洞上方会产生明显土拱效应,导致土压力系数小于 1。

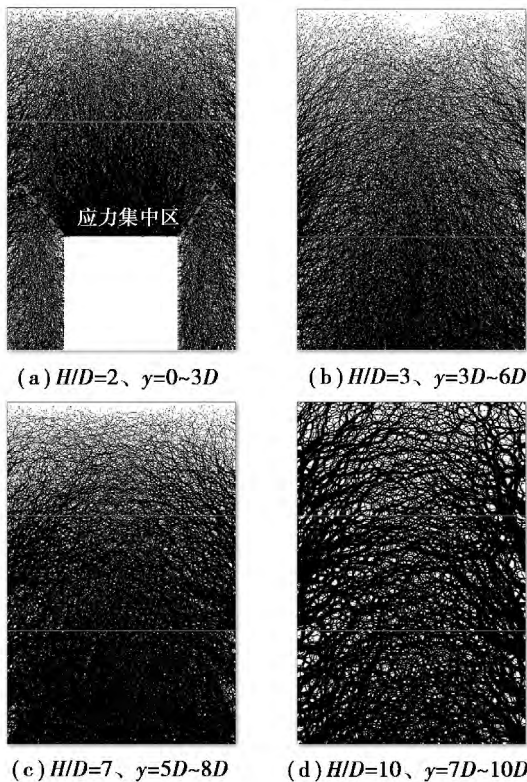


图 9 不同填土高度的接触力 ( $B/D=2$ )

Fig. 9 Contact force with different fill height ( $B/D=2$ )

由图 10 可知,在  $B/D=1, H/D=5$  时,  $3.3D$  高程至  $5.7D$  高程间接触力力链明显偏转,力链呈拱形,土拱效应很明显;在  $B/D=3, H/D=5$  时,接触力力链均匀,力链没有成拱形,土拱效应消失,说明

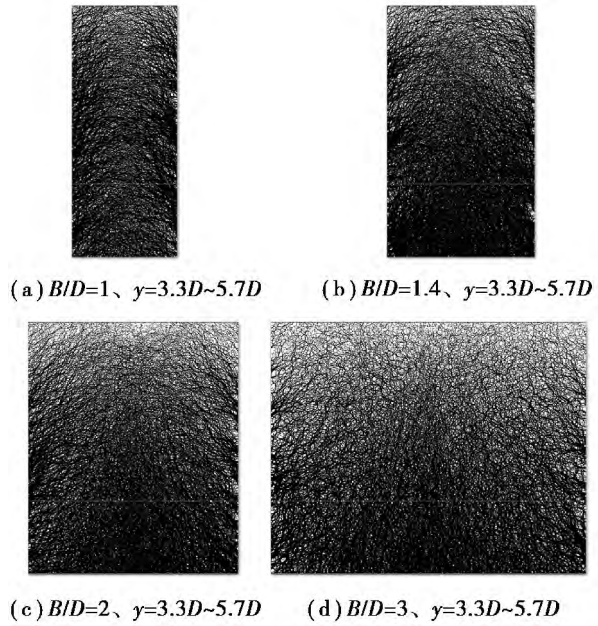


图 10 不同沟槽宽度的接触力 ( $H/D=5$ )

Fig. 10 Contact force with different trench width ( $H/D=5$ )

沟槽越宽,越不利于土拱的形成。由于填土中土拱的拱脚位于两侧沟槽壁上,沟槽越宽,两侧沟壁间距越大,土拱的跨度也会越大,土拱承载能力越弱,土拱越不稳定,成拱效应越弱。由图 11 可知  $B/D=1$  时产生土拱效应的最小填土高度  $H_{gr}$  为  $3D$ ;  $B/D=4$  时产生土拱效应的最小填土高度  $H_{gr}$  为  $10D$ ,则可以看出沟槽越宽,则产生土拱效应的最小填土高度越大。

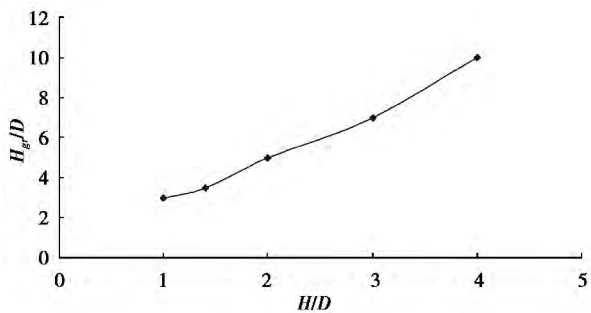


图 11  $H_{gr}/D$  与  $B/D$  的变化关系

Fig. 11 Variation of  $H_{gr}/D$  with  $B/D$

### 6 涵顶垂直土压力计算判别准则及计算方法

通过以上分析可知:当填土高度  $H$  小于初始等沉面  $H_{c0}$  时,涵顶填土竖向位移等值线为 W 形,涵顶填土不存在土拱效应;当填土高度  $H$  大于于初始等沉面  $H_{c0}$  时,胸腔土柱和涵顶土柱不存在沉降差,作为一个整体共同受到两侧沟壁的向上摩阻力,此时可以把等沉面看做一个虚拟“涵洞顶面”,



该顶面不存在“左右胸腔”,其上填土处于下限状态,若填土达到一定高度时会产生土拱效应,  $H_{gr}$  大于  $H_{c0}$ 。根据填土高度建立如下沟埋涵洞土压力计算判别准则(见图 12):

(1) 当  $0 < H < H_{c0}$  时,只存在 I 区。涵顶填土竖向位移等值线为 W 形, I-1、I-3 和 I-2 间存在较大沉降差,两侧胸腔土柱给涵顶土柱向下的摩阻力,导致涵顶垂直土压力大于  $\gamma H$ ,土压力系数  $k$  大于 1,  $k$  随着  $H$  增加而增加,在  $H = H_{c0}$  时达到最大值。由于 Marston 土压力计算公式没有考虑两侧胸腔土体对涵顶土压力的影响,在此区域 Marston 计算公式失效,要考虑 I-1、I-3 给 I-2 产生的附加土压力  $p_f$ ,  $H_{c0}$  和  $p_f$  可以按照文献 [3] 中的方法计算。则涵顶垂直土压力计算公式:

$$p = \gamma H + p_f \quad (H \leq H_{c0}) \quad (2)$$

其中,

$$p_f = \gamma H + \frac{(B - D) \gamma_1}{2D} \left[ H - \frac{B - D}{4\lambda \tan \alpha} \left( 1 - e^{-\frac{4\lambda H \tan \alpha}{B - D}} \right) \right] \quad (3)$$

$$\gamma_1 = \gamma - \frac{4c}{B - D} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (5)$$

式中:  $\gamma$  为填土容重,  $N/m^3$ ;  $H$  为填土高度,  $m$ ;  $B$  为沟槽宽度,  $m$ ;  $D$  为涵洞宽度,  $m$ ;  $\alpha$  为填土内摩擦角;  $c$  为填土粘聚力,  $Pa$ ;  $\mu$  为填土泊松比。

(2)  $H_{c0} < H < H_{gr}$  时,存在 I 区和 II 区。I 区内竖向位移等值线为 W 形, II 区竖向位移等值线为 U 形, II 区内胸腔土柱和涵顶土柱间不存在沉降差,作为一个整体共同受到两侧沟壁的向上摩阻力。但由于填土高度小于  $H_{gr}$ , II 区填土没有产生明显土拱效应。因此, Marston 土压力计算公式对该区域有效,采用该公式计算 II 区填土作用在  $H_c$  面上的压力  $p_{II}$ , 则涵顶垂直土压力计算公式:

$$p = \gamma H_c + p_{fc} + p_{II} \quad (H_{c0} < H < H_{gr}) \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} p_{fc} = \gamma H_c + \frac{(B - D) \gamma_1}{2D} \left[ H_c - \frac{B - D}{4\lambda \tan \alpha} \left( 1 - e^{-\frac{4\lambda H_c \tan \alpha}{B - D}} \right) \right] \\ p_{II} = \frac{\gamma B - 2c}{2K \tan \alpha} \left( 1 - e^{-2K \frac{H - H_c}{B} \tan \alpha} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\gamma_1$  和  $\lambda$  同式 (4)、式 (5);  $\gamma$  为填土容重 ( $N/m^3$ );  $H$  为填土高度,  $m$ ;  $H_c$  为等沉面高度,  $m$ , 计算方法见文献 [3];  $B$  为沟槽宽度,  $m$ ;  $D$  为涵洞宽度,  $m$ ;  $\alpha$  为填土内摩擦角;  $c$  为填土粘聚力,  $Pa$ ;  $\mu$  为填土泊松比;  $K$  为土压力系数。

(3) 当  $H > H_{gr}$  时, I、II、III 区并存。II、III 区内竖向位移等值线出现椭圆形,此时仍然可以将等沉面看做一个虚拟“涵洞顶面”,该顶面不存在“左右胸腔”,该顶面上填土处于下限状态。III 区产生明显土拱效应,由于 Marston 土压力计算公式无法考虑填土内土拱效应,在此区域内该公式失效。计算 III 区作用在  $H_{gr}$  面上土压力  $p_{III}$  时引入减系数  $\zeta$ , 将  $\gamma(H - H_{gr})$  进行折减以考虑土拱效应对涵顶土压力的影响。

$$p = \gamma H_c + p_{fc} + p_{II} + p_{III} \quad (H > H_{gr}) \quad (8)$$

其中:

$$p_{III} = \zeta \gamma (H - H_{gr}) \quad (9)$$

式中:  $\gamma_1$  和  $\lambda$  分别见式 (4)、式 (5);  $p_{fc}$  和  $p_{II}$  的见式 (7);  $\gamma$  为填土容重,  $N/m^3$ ;  $H$  为填土高度,  $m$ ;  $H_c$  为等沉面高度,  $m$ , 计算方法见文献 [3];  $B$  为沟槽宽度,  $m$ ;  $D$  为涵洞宽度,  $m$ ;  $\alpha$  为填土内摩擦角;  $c$  为填土粘聚力,  $Pa$ ;  $\mu$  为填土泊松比。

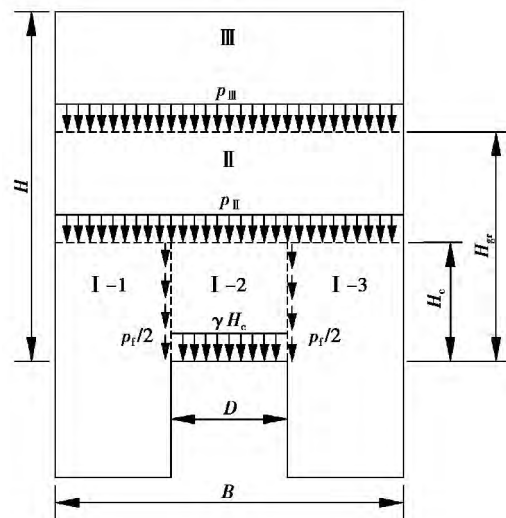


图 12 沟埋涵洞涵顶垂直土压力计算示意图

Fig. 12 Sketch of vertical earth pressure calculation of trench installation culverts

## 7 结 论

针对矩形箱型涵洞,基于刚性地基假设,通过 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟得出以下结论:

(1) 沟槽宽度等于 1 倍涵洞宽度、填土高度为 3 倍涵洞宽度时,涵顶上部填土内产生明显土拱效应。产生土拱效应的最小填土高度随着沟槽宽度增加而增加,在沟槽槽宽等于 4 倍涵洞宽度时,产生土拱效应的最小填土高度为 10 倍涵洞宽度。沟槽越宽,土拱效应越弱,越不利于成拱。

(2) 土拱形态为上凸形,拱脚位于两侧沟壁上,可以根据填土内竖向位移等值线是否出现椭圆

形来判断填土内是否产生明显土拱效应。

(3) 沟槽宽度大于7倍涵洞宽度时,沟埋涵洞涵顶垂直土压力可以按上埋式涵洞计算。涵顶土压力系数随着填土高度的增加呈先增后减的变化趋势。当填土高度达到初始等沉面高度时,土压力系数达到最大值。等沉面高度随着填土高度的增加而下降,随着沟槽宽度的增加而上升。

(4) 得出了考虑土拱效应的涵顶垂直土压力计算判别准则及计算方法。但由于涵洞设计施工中无法预先确切知道填土的竖向位移值,需要对产生土拱效应的最小填土高度 $H_{gr}$ 和折减系数 $\zeta$ 将进行进一步研究,这样才能完善沟埋涵洞土压力计算理论,为工程设计提供可靠依据。

#### 参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国行业标准. 公路桥涵设计通用规范(JTGD60—2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (The industry standard of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts(JTGD60—2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] Marston A., Anderson A. O.. The theory of loads on pipes in ditch and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[R]. Bulletin No. 31, Ames: Iowa Engineering Experiment Station, 1913.
- [3] Marston A.. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[R]. Bulletin No. 96, Ames: Iowa Engineering Experiment Station, 1930.
- [4] Spangler M. G.. A theory of loads on negative projecting conduits[C]. Proceeding of Highway Research Board, Washington D. C., 1950, 30: 153-161.
- [5] 折学森. 路基涵洞的土压力计算[J]. 中国公路学报, 1992, 5(3): 72-79. (Zhe Xuesheng. Earth pressure calculation of embankment culverts [J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5(3): 72-79. (in Chinese))
- [6] 郑俊杰, 陈保国, 张世飙. 沟埋式涵洞非线性土压力试验研究与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1771-1777. (Chen Baoguo, Zheng Junjie, Zhang Shibiao. Field test and numerical simulation of ground treatment for culverts under high embankments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 30(12): 1771-1777. (in Chinese))
- [7] 李永刚, 李珠, 张善元. 矩形沟埋涵洞顶部垂直土压[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 155-160. (Li Yonggang, Li Zhu, Zhang Shanyuan. Earth pressure on the top of rectangular trench-buried culverts [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 155-160. (in Chinese))
- [8] 杨锡武, 张永兴. 山区公路高填方涵洞的成拱效应及土压力计算理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3887-3893. (Yang Xiwu, Zhang Yongxing. Study on arch action and earth pressure theory for culverts under high embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3887-3893. (in Chinese))
- [9] Chen Baoguo, Zheng Junjie, Lu Yan'er. Soil-structure interaction of unsymmetrical trench installation culvert [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2009, 25(1): 94-98.
- [10] Chen Baoguo, Zheng Junjie, Han Jie. Experimental study and numerical simulation on trench installation culvert [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE), 2010, 24(3): 223-234.
- [11] 杨明, 姚令侃, 王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 817-822. (Yang Ming, Yao Lingkan, Wang Guangjun. Study of centrifuge model tests and numerical simulation on soil arching in space of piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 817-822. (in Chinese))
- [12] 向先超, 张华, 蒋国盛, 等. 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 386-391. (Xiang Xianchao, Zhang Hua, Jiang Guosheng, et al. Soil arching effect of anti-slide piles based on particle flow method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 386-391. (in Chinese))
- [13] 彭述权, 李夕兵, 樊玲. 刚性挡墙主动破坏后土拱效应细观研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 1099-1104. (Peng Shuquan, Li Xibing, Fan Ling. Meso-scale of soil arching for rigid retaining wall active failure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(4): 1099-1104. (in Chinese))
- [14] 姜春林, 李晋. 微型抗滑桩土拱效应空间特征的细观力学分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1754-1815. (Jiang Chunlin, Li Jin. Mesomechanical analysis of spatial characteristics of soil arching effect on micro anti-slide pile system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1754-1815. (in Chinese))