文章编号:1000-8608(2021)05-0506-08

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

程振威*1.2, 李又云3, 李 松1, 张丙文1, 曹世江1

(1.中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州贵阳 550081;

2. 贵州省建筑信息模型(BIM)工程技术研究中心,贵州贵阳 550081;

3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:受地形、填料物理力学参数、结构尺寸等多种因素的影响,沟谷地形高填方涵洞受力 计算较为复杂,相关理论研究尚不成熟.以某一高填方涵洞项目为依托,通过数值模拟得出: 在一定条件下,涵洞两侧边坡阻碍了沟内填土的沉降,土中主应力方向发生调整,从而产生土 拱效应.在数值模拟的基础上,运用小主应力拱概念,推导出了沟内黏性填土产生土拱效应时 的侧压力系数与沟谷地形高填方涵洞竖向土压力理论公式.各种结果对比可见:所提公式计 算结果与现场实测结果以及数值模拟结果相吻合;沟谷地形涵洞上方填土中产生土拱效应 时,涵洞竖向土压力随着填土高度的增加非线性增大,增速逐渐减小.

关键词:沟谷地形;高填方;涵洞土压力;土拱效应;数值模拟;理论公式
 中图分类号:U449
 文献标识码:A
 doi:10.7511/dllgxb202105009

0 引 言

受地形、填料性质、涵洞结构尺寸等多种因素 的影响,沟谷地形高填方涵洞所受竖向土压力已 不再等于上方土重,其受力分析较为复杂.

Marston^[1]提出采用散体极限平衡理论来计 算填埋式涵管土压力,该理论适用于无黏性土,当 填土存在黏聚力时,黏聚力的大小也会对涵管土 压力的大小产生影响[2]. 顾安全[3] 通过多组模型 试验,研究了不同情况下涵洞土压力与覆土高度 之间的关系,并通过弹性理论得出涵管土压力的 计算方法. Vaslestad 等^[4] 通过现场测试得出:沟 谷地形能够使得涵洞所受土荷载降低.杨锡武 等[5-6] 通过统计分析大量试验数据,得出涵洞受力 的计算公式. 文献[7-9]给出了适用于矩形沟槽内 设涵时的土压力计算方法. McGuigan 等^[10]通过 模型试验与有限元模拟得出:沟谷地形高填方涵 洞土压力集中系数为 0.28. 文献 [11-12] 推导出 了梯形沟埋涵洞土压力计算公式.马强等[13]通过 数值模拟得出:沟谷地形中对涵洞土压力影响最 明显的两种因素为沟底宽度与涵洞两侧边坡坡

角. 冯忠居等^[14] 通过室内模型试验得出: 沟底宽 度越大, 涵洞垂直土压力集中系数越大; 涵洞两侧 边坡坡角越大, 涵洞垂直土压力集中系数越小. 郝 宇萌等^[15] 通过数值模拟研究了各种因素对涵洞 土压力的影响.

上述文献对涵洞土压力进行了较为广泛的研究,也取得了丰硕的成果;在理论研究方面,虽然 对沟谷地形涵洞上方能够产生土拱效应有所提 及,但得出的理论公式并未真正体现土拱效应的 形成机理.因此,本文对此展开相关研究.

1 数值模拟

1.1 数值模拟工况与模型建立

本文以某一高速公路高填方涵洞项目为依 托.该高速公路某桩号处存在一条冲沟,冲沟两侧 边坡较陡,冲沟位置处存在一 64 m×5.2 m× 4.5 m盖板涵,如图 1 所示,涵洞上方填方高度为 25~33 m,填料为黏土,根据室内试验结果,涵洞 上方填土的物理力学参数如表 1 所示.

为探明边坡-填土-涵之间的相互作用机理,

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-07-28.

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科技合平台人才[2019]5301号).

作者简介:程振威*(1991-),男,硕士,工程师,E-mail:2418130951@qq.com.



图 1 沟谷地形高填方涵洞现场 Fig. 1 On site of high filling culvert in trench terrain

表1 填料物理力学参数

Tab. 1	Physical	and	mechanical	parameters	of	filling
--------	----------	-----	------------	------------	----	---------

材料	重度 γ/ (kN・m ⁻³)	黏聚力 c/ kPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比 μ	弹性模量 E/MPa
黏土	16.8	22	26	0.3	25

本文依托上述项目,首先进行了数值模拟分析.由 于冲沟两侧边坡与沟底以及涵洞结构弹性模量远 大于填料弹性模量,在数值模拟时不考虑两侧边 坡、沟底、涵洞结构的变形,将它们按照刚体进行 考虑.本文共模拟了6种工况(如表2所示),涵洞 上方填料采用摩尔-库仑模型,两侧岩体、基底、涵 洞结构均采用弹性模型,填料与岩体、涵洞结构这 触面设置接触单元来模拟岩体-填料-结构之间的 相对滑移,岩体与填料之间以及结构与填料之间 接触单元的摩擦因数近似取 tan $\varphi(\varphi$ 为填料的内 摩擦角).边界约束方面,对模型两侧进行水平约 束,模型底部进行竖向约束与水平约束.为更加真 实地模拟现场施工,在数值模拟时,涵洞上方填料 按照每层1m的厚度进行填筑,涵洞两侧填料按 照每层1m的厚度进行对称填筑.其中某一工况

模型建立与网格划分效果如图 2 所示.

衣乙 敛沮侯拟上见匀细?	表 2	釵 追	. 榠 扒	丄伔	与 编	亏
--------------	-----	-----	-------	----	-----	---

Tab. 2 Numerical simulation conditions and numbers

编号	坡角/(°)	沟底宽度
M60-1	60	1 倍洞宽
M60-2	60	2倍洞宽
M60-3	60	3 倍洞宽
M40-2	40	2倍洞宽
M80-2	80	2 倍洞宽
M90-2	90	2倍洞宽



图 2 模型建立与网格划分效果 Fig. 2 Modeling and meshing effect

1.2 数值模拟结果与分析

M60-1、M60-2、M60-3 工况下,涵洞上方填土 的竖向沉降云图如图 3 所示.由图可见,沟底宽度 较小时,涵洞上方同一高度处的填土竖向沉降沿 横向的变化规律为先增后减;随着沟底宽度的不 断增加,由于涵洞两侧的"胸腔"不断增大,在涵洞 顶部至涵洞上方某一高度范围内,填土竖向沉降 在水平方向的变化规律为先增后减再增再减.



图 3 涵洞上方填土竖向沉降云图 Fig. 3 Cloud chart of vertical settlement of filling above culvert

3 种工况下,随着填土高度的不断增加,涵洞 平均竖向土压力的变化规律如图 4 所示,从图中 可以看出,3 种工况下,涵洞平均竖向土压力 σ_{av}均 随着填土高度 h 的不断增加而逐渐增大,且沟底 宽度越小,σ_{av}增速越小.当填土高度小于某一高 度时,σ_{av}约等于涵洞上方填土自重 γh;当填土高 度大于此高度时,σ_{av} < γh,且随着填土高度的增加,σ_{av}与 γh 的差值越来越大.涵洞两侧边坡坡角 等于 60°时,当沟底宽度大于 2 倍洞宽,涵洞所受 竖向土压力基本接近填土自重 γh.



图 4 涵洞平均竖向土压力随填土高度的变化 Fig. 4 Variation of average vertical earth pressure of culvert with filling height

M40-2、M60-2、M80-2、M90-2 工况下, σ_{av} 与 h 的关系曲线如图 5 所示.由图可见,随着 h 的不 断增加,4 种工况下的 σ_{av} 均不断增大;当 h 较小 时,4 种工况下 $\sigma_{av} \approx \gamma h$;当边坡坡角在 60°~90°, h 大于某一高度时,会出现 $\sigma_{av} < \gamma h$ 的情况,且随着 边坡坡角的增加,开始出现 $\sigma_{av} < \gamma h$ 情况时的填 土高度越来越小;随着 h 不断增加, σ_{av} 趋于某一 值.40°边坡坡角下,填土高度在 0~30 m 范围内 未出现 $\sigma_{av} < \gamma h$ 的情况,也未出现 $\sigma_{av} < \gamma h$ 的趋 势.



图 5 不同边坡坡角下涵洞平均竖向土压力 随填土高度的变化

Fig. 5 Variation of average vertical earth pressure of culvert with filling height under different slope angles

从上述模拟结果中可以得出:沟谷地形条件 下,由于涵洞两侧边坡的存在,阻碍了填土沉降, 土中应力发生调整,土中产生土拱效应,使得土中 应力不能完全向下传递.填土高度较小时,无论其 他条件如何变化,涵洞竖向土压力均接近于填土 自重,即此时涵洞上方填土中不能产生土拱效应; 当边坡坡角小于某一角度时,无论其他条件如何 变化,涵洞上方填土中也不能产生土拱效应.当涵 洞上方填土中产生土拱效应时,随着填土高度的 不断增加,涵洞所受竖向土压力逐渐增大,但增长 速率逐渐减小;沟底宽度越小、沟谷两侧边坡坡角 与填土高度越大,产生的土拱效应越明显.

2 沟谷地形涵洞土压力理论计算

2.1 沟谷地形填土侧压力系数

文献[16-23]指出倾斜边坡或平行挡墙的存 在,会使沟槽内或挡墙内填土中的主应力方向发 生偏转,形成圆弧或悬链线形状的小主应力拱,且 在进行相关计算时,大都假定小主应力拱轨迹线 为圆弧形状.Kellogg^[18]假定沟内填土处于主动 极限状态,给出了沟槽内填土中形成土拱效应的 条件为 $\alpha > 45^{\circ} + \varphi/2(\alpha)$ 为沟谷两侧边坡坡角, φ 为填土内摩擦角),并推导出了沟内填土为无黏性 土时的填土侧压力系数.

在本文研究中,假定沟谷内填土产生土拱效 应时,填土中小主应力拱轨迹线为圆弧形状(如图 6所示),且假定填土处于主动极限状态.当沟内 填土为黏性土,边坡坡角满足 $\alpha>45^\circ+\varphi/2$ 时,为 求涵洞所受土压力,本文首先在 Kellogg^[18]研究 成果的基础上,推导出此种状况下沟内填土的侧 压力系数.沟内填土中的小主应力拱轨迹线及其 上任意微单元体处的摩尔圆如图 6 所示.将摩尔 圆纵坐标轴向左平移 m 个单位, $m = c \cot \varphi(c)$ 填土黏聚力),令:

$$\sigma'_{1} = \sigma_{1} + m$$

$$\sigma'_{3} = \sigma_{3} + m$$

$$\sigma'_{h} = \sigma_{h} + m$$

$$\sigma'_{y} = \sigma_{y} + m$$
(1)

由图 6 中的摩尔圆可知:

联

$$\tau' = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin \theta \cos \theta \tag{2}$$

其中 θ 为小主应力拱该微单元体处的大主应力方 向与水平方向的夹角.该点处横向土压力 σ,为

$$\sigma_{\rm h}' = \tau' \cot \theta + \sigma_3' \tag{3}$$

立式(2)、(3)可得:

$$\sigma'_{h} = \sigma'_{1} \cos^{2}\theta + \sigma'_{3} \sin^{2}\theta$$
 (4)



- 图 6 沟内填土中小主应力拱及其上某一点处 的摩尔圆
 - Fig. 6 Small principal stress arch and Mohr circle at a certain point of filling in ditch

将上式两端同时除以 σ'_1 ,并且令 $K_0 = \sigma'_3 / \sigma'_1 = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$,可将式(4)转化为

$$\frac{\sigma'_{\rm h}}{\sigma'_{\rm 1}} = \cos^2\theta + K_0 \sin^2\theta \tag{5}$$

又由于 $\sigma'_{h} - \sigma'_{3} = \sigma'_{1} - \sigma'_{v}(\sigma'_{v})$ 该微单元体处 竖向土压力),即 $\sigma'_{h}/\sigma'_{1} - K_{0} = 1 - \sigma'_{v}/\sigma'_{1}$,将该式 代入式(5)可知:

$$\sigma'_{\rm v}/\sigma'_1 = \sin^2\theta + K_0 \cos^2\theta \tag{6}$$

在边坡处,大主应力方向与水平方向的夹角 $\theta_s = 3\pi/4 + \varphi/2 - \alpha$,其中 $\pi/4 + \varphi/2 < \alpha < \pi/2^{[18]}$, 在沟槽中心处大主应力方向与水平方向的夹角为 $\pi/2$,则得出下式:

$$\frac{\sigma_{av}'}{\sigma_1'} = \frac{1}{\pi/2 - \theta_s} \int_{\theta_s}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sigma_v'}{\sigma_1'} d\theta = \int_{\theta_s}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2 \theta + K_0 \cos^2 \theta}{\pi/2 - \theta_s} d\theta = \frac{1 + K_0}{2} + \frac{\sin 2\theta_s (1 - K_0)}{2\pi - 4\theta_s}$$
(7)

式(7)中 $\sigma'_{av} = \sigma_{av} + m, \sigma_{av}$ 为沟内填土在某一 高度处小主应力拱上的平均竖向土压力.

由式(5)、(7)可知:

$$K_{1} = \frac{\sigma'_{\rm h}/\sigma'_{\rm l}}{\sigma'_{\rm av}/\sigma'_{\rm l}} = \frac{\sigma'_{\rm h}}{\sigma'_{\rm av}} = C_{\rm av} (\cos^{2}\theta_{\rm s} + K_{\rm 0}\sin^{2}\theta_{\rm s}) \quad (8)$$

$$C_{\rm av} = 1 / \left(\frac{1 + K_0}{2} + \frac{\sin 2\theta_{\rm s} (1 - K_0)}{2\pi - 4\theta_{\rm s}} \right) \tag{9}$$

因为 $\sigma'_{av} = \sigma_{av} + m, \sigma'_{h} = \sigma_{h} + m,$ 代人式(8)可知: $\sigma_{h} = K_{1}\sigma_{av} + m(K_{1} - 1) = K_{1}(\sigma_{av} + c\cot\varphi) - c\cot\varphi$ (10)

上式为沟内填土中形成土拱效应时,沟内任 意高度处小主应力拱上的平均竖向土压力 σ_{av}与 此高度边坡处的侧向土压力 σ_b 的关系.

2.2 沟谷地形涵洞土压力计算模型的建立及公 式推导

根据上述分析,沟谷地形条件下,当涵洞两侧 边坡坡角满足 a>45°+q/2时,在高填方涵洞上 方一定高度范围内,涵洞两侧土体沉降大于涵洞 上方土体沉降,超过此高度时,涵洞上方土体沉降 呈现先增大后减小的变化规律,此部分土体中产 生土拱效应.对涵洞竖向土压力计算时,建立如图 7 所示的计算模型,并建立如图 7 所示的坐标系. 假设涵洞两侧地基及涵洞为刚性体,在计算中不 考虑它们的变形.令 I 土体与 II 土体交界面无沉 降差时,涵洞上方的填土高度(等沉面高度)为 h_1 ,此高度也为涵洞上方开始产生土拱效应时的 高度.当 $h \leq h_1$ 时,取 I 土体中某一高度 z 处的水 平微元土体为研究对象,如图 7 所示,该微元土体 在竖直方向受力平衡方程为

 $\sigma_{\text{avl}}\{s + [H + (h - z)] \cot \alpha\} + dW_{\text{g}} = 2\tau dz + (\sigma_{\text{avl}} + d\sigma_{\text{avl}})\{s + [H + (h - z)] \cot \alpha\}$

(11)

式中: dW_g 为此微元土体自重, $dW_g = \gamma \{s + [H + (h-z)] \cot \alpha \} dz; \sigma_{avl}$ 为该微元土体所受竖向土压力的平均值;s 为涵洞两侧沟槽宽度;H 为涵洞高度; τ 为高度 z 处微元土体所受 II 土体对其产生的向上剪应力, $\tau = \sigma_h \tan \varphi + c, \sigma_h$ 为高度为 z 时边坡处的侧向土压力,由式(10)可得高度 z 处 $\tau = \sigma_{avl}$ 的关系式如下:

$$\tau = K_1 \sigma_{\rm avl} \tan \varphi + c \tag{12}$$

将式(12)代入式(11)中,化简可得到:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{avl}}}{\mathrm{d}z} + \frac{2K_{\mathrm{1}}\tan\varphi}{s + (H + h - z)\cot\alpha}\sigma_{\mathrm{avl}} = \gamma - \frac{2c}{s + (H + h - z)\cot\alpha}$$
(13)

式(13)为一阶非线性微分方程,此方程的通 解为

$$\sigma_{\text{avl}} = C[s + (H+h-z)\cot\alpha]^{2K_1 \tan\varphi \tan\alpha} + \frac{\gamma[s\tan\alpha + (H+h-z)]}{2K_1 \tan\varphi \tan\alpha - 1} - \frac{c}{2K_1 \tan\varphi}$$
(14)

式(14)中C为常数,将边界条件 $z=0,\sigma_{av1}=$ 0代人式(14)中可得

$$C_{1} = \left[\frac{\gamma(\operatorname{stan} \alpha + H + h)}{1 - 2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha} + \frac{c}{2K_{1} \tan \varphi}\right] \times \left[s + (H + h) \cot \alpha\right]^{-2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha}$$
(15)

将式(15)代入式(14),就可得到当 h≪h₁时, [土体深度 z 处平均土压力计算公式:

$$\sigma_{\rm avl} = \left[\frac{\gamma(\tan\alpha + H + h)}{1 - 2K_1 \tan\varphi \tan\alpha} + \frac{c}{2K_1 \tan\varphi}\right] \times \left[\frac{s + (H + h - z)\cot\alpha}{s + (H + h)\cot\alpha}\right]^{2K_1 \tan\varphi \tan\alpha} + \frac{\gamma[\sin\alpha + (H + h - z)]}{2K_1 \tan\varphi \tan\alpha - 1} - \frac{c}{2K_1 \tan\varphi}$$
(16)

由式(12)可得到剪应力 τ_1 :

$$\tau_{1} = \left[\frac{\gamma(\operatorname{stan} \alpha + H + h)}{1 - 2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha} + \frac{c}{2K_{1} \tan \varphi}\right] \times \left[\frac{s + (H + h - z) \cot \alpha}{s + (H + h) \cot \alpha}\right]^{2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha} \times K_{1} \tan \varphi + \frac{\gamma[\operatorname{stan} \alpha + (H + h - z)]}{2\tan \alpha - 1} + \frac{c}{2} \quad (17)$$

当
$$h \leq h_1$$
时,涵洞顶部的平均附加应力 F_1 为

$$F_{1} = \int_{0}^{h} 2\tau_{1} dz = \frac{-2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha}{2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha + 1} [s + (H+h) \cot \alpha] \times \left[\frac{\gamma(s \tan \alpha + H+h)}{1 - 2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha} + \frac{c}{2K_{1} \tan \varphi}\right] \times \left\{ \left[\frac{s + H \cot \alpha}{s + (H+h) \cot \alpha}\right]^{2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha + 1} - 1 \right\} + \frac{\gamma z (2s \tan \alpha + 2H+h)}{2 \tan \alpha - 1} + ch$$
(18)

则作用在涵洞顶部的平均竖向应力 oavi 为

C

$$\sigma_{\rm av1} = F_1 / B + \gamma h \tag{19}$$





Fig. 7 Calculation model of soil stress above culvert when $h \leq h_1$

当涵洞上方填土高度 *h*>*h*₁ 时,建立如图 8 所示的计算模型.Ⅲ土体中将形成土拱效应,该部 分土体中任一深度 *z* 处的平均竖向土压力计算方 法与上述计算方法类似,按照上述计算方法得出: 当 *z*=*h*−*h*₁ 时,即等沉面 *h*₁ 处的平均竖向土压 力为

$$\sigma_{\text{av}\parallel(h-h_1)} = \frac{\gamma \operatorname{ctan} \alpha \left[b + 2(H+h_1) \cot \alpha \right]}{K_1^2 \operatorname{tan} \varphi(\operatorname{tan} \varphi \operatorname{tan} \alpha - 1)} \times \left\{ 1 - \left[\frac{b+2(H+h_1) \cot \alpha}{b+2(H+h) \cot \alpha} \right]^{K_1 \operatorname{tan} \varphi \operatorname{tan} \alpha} \right\}$$
(20)

式中:b为沟底宽度,b=2s+B.



图 8 h>h1 时涵洞上方土体受力计算模型

Fig. 8 Calculation model of soil stress above culvert when $h \ge h_1$

取 I 土体中水平微元土体进行受力分析,可 得到式(14),再根据边界条件 $z = h - h_1, \sigma_{avI} = \sigma_{avII(h-h_1)}$ 可得式(14)中常数 C 的表达式:

$$C_{2} = \left\langle \frac{\gamma \operatorname{ctan} \alpha [b+2(H+h_{1}) \operatorname{cot} \alpha]}{K_{1}^{2} \operatorname{tan} \varphi (\operatorname{tan} \varphi \operatorname{tan} \alpha - 1)} \times \left\{ 1 - \left[\frac{b+2(H+h_{1}) \operatorname{cot} \alpha}{b+2(H+h_{1}) \operatorname{cot} \alpha} \right]^{K_{1} \operatorname{tan} \varphi \operatorname{tan} \alpha} \right\} - \frac{\gamma [\operatorname{stan} \alpha + (H+h_{1})]}{2K_{1} \operatorname{tan} \varphi \operatorname{tan} \alpha - 1} + \frac{c}{2K_{1} \operatorname{tan} \varphi} \right\rangle \times [s + (H+h_{1}) \operatorname{cot} \alpha]^{-2K_{1} \operatorname{tan} \varphi \operatorname{tan} \alpha} \qquad (21)$$

将式(21)代人式(14)中,可得到当 $h > h_{1}$ 时,
I 土体中平均竖向土压力计算公式:

$$\sigma_{\text{avI}} = C_2 [s + (H + h - z) \cot \alpha]^{2K_1 \tan \varphi \tan \alpha} + \frac{\gamma [\operatorname{stan} \alpha + (H + h - z)]}{2K_1 \tan \varphi \tan \alpha - 1} - \frac{c}{2K_1 \tan \varphi}$$
(22)

由式(12)与(22)可得出,此时 I 土体与 II 土体之间的剪应力 τ_2 :

$$\tau_{2} = C_{2} K_{1} \tan \varphi \times \\ [s + (H + h - z) \cot \alpha]^{2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha} + \\ \frac{\gamma K_{1} \tan \varphi [s \tan \alpha + (H + h - z)]}{2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha - 1} + \frac{c}{2} \quad (23)$$

当 $h > h_1$ 时,深度 z 范围内 I 土体对 II 土体 产生的平均附加应力为

$$F_{2} = \int_{h-h_{1}}^{z} \tau_{2} dz = \frac{C_{2}K_{1} \tan \varphi \tan \alpha}{2K_{1} \tan \varphi \tan \alpha + 1} \times \left\{ \left[s + (H+h-z) \cot \alpha \right]^{K_{1} \tan \varphi \tan \alpha + 1} - \left[s + (H+h_{1}) \cot \alpha \right]^{K_{1} \tan \varphi \tan \alpha + 1} \right\} + \frac{\gamma K_{1} \tan \varphi (h_{1} + z - h)}{4K_{1} \tan \varphi \tan \alpha - 2} \times \left[2s \tan \alpha + (2H+h+h_{1}-z) \right] + \frac{c(z+h_{1}-h)}{2}$$
(24)

当 *h*≥*h*₁ 时, Ⅱ 土体中深度 *z* 处的平均竖向 土压力为

$$\sigma_{avII} = \sigma_{avIII(h-h_1)} + 2F_2/B + \gamma(z-h_1) \quad (25)$$

当 h>h_1 时,涵洞顶部平均竖向应力 σ_{av2} 为
$$\sigma_{av2} = \sigma_{avIII(h-h_1)} + 2F_2/B + \gamma(h-h_1) \quad (26)$$

从数值模拟结果与分析中可知,当 I 土体与 II 土体压缩量相等时,涵洞上方填土中开始产生 土拱效应,此时填土高度为等沉面高度 h_1 . 令 I 土体的压缩量为 Δ_I , II 土体的压缩量为 Δ_I ,则 根据弹性理论可得到下式:

$$\Delta_{\mathrm{I}} = \frac{1-\mu}{E} \int_{h-h_1}^{h+H} \sigma_{\mathrm{avI}} \mathrm{d}z \qquad (27)$$

$$\Delta_{\mathrm{II}} = \frac{1 - \mu}{E} \int_{h-h_1}^h \sigma_{\mathrm{av\,II}} \,\mathrm{d}z \tag{28}$$

令 $\Delta_{I} = \Delta_{I}$ 就可得到等沉面高度 h_{1} .

2.3 结果对比与分析

在涵洞顶部埋设3组土压力盒,在涵洞填埋 过程中,每填筑1m采集一次数据,最终取3组土 压力盒的平均值作为涵洞平均竖向土压力.本文 所依托项目与 M60-1 工况相近,取 M60-1 工况下 的数值模拟结果作为本项目的数值模拟结果.利 用上述推导公式计算本文工程案例,并将计算结 果与数值模拟结果以及现场实际测试结果对比, 如图 9 所示.

从图中可以看出:3种结果大小接近、变化规 律一致,即填土高度在 0~30 m时,随着填土高 度的增加,3种方法得到的涵洞平均竖向土压力 均不断增长,涵洞填埋初期,3种结果均接近填土 自重 γh ;填土高度为 10 m 左右时,3种结果均开 始出现小于 γh 的情况,且随着填土高度增加,3 种结果的增长速率逐渐减小,说明此种工况下,涵 洞填土高度较大时,涵洞上方填土中产生了土拱 效应,且填土高度越大,土拱效应越明显.



3 结 论

(1)沟谷地形涵洞上方填土中的土拱效应与 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.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;其余因素决定土拱效应 的明显程度.

(2)当涵洞两侧边坡坡角大于 $45^\circ + \varphi/2, 填$ 土高度大于等沉面高度 h_1 时,涵洞两侧边坡坡角 与填土高度越大、沟底宽度越小,涵洞上方填土中 的土拱效应越明显.

(3)基于小主应力拱概念,推导出了沟谷内填 土为黏性土时的侧压力系数 K₁,并推导出了沟谷 地形涵洞上方填土中产生土拱效应时的涵洞竖向 土压力计算公式,公式综合考虑了涵洞结构尺寸、 填土高度、边坡角度、沟底宽度、填料性质等多种 因素.通过对比,验证了本文计算公式的准确性.

(4)沟谷地形中,填土高度小于等沉面高度 h₁时,可采用填土自重 γh 作为涵洞所受竖向土 压力;填土高度大于等沉面高度 h₁,且其他条件 满足填土中形成土拱效应时,随着填土高度的增 加,涵洞所受竖向土压力不断增大,但小于填土自 重 γh,且增速随填土高度的增加而逐渐减小.

(5)沟谷地形条件下,在涵洞两侧边坡较陡、 沟底宽度较小、涵洞填土高度较大时,涵洞上方填 土中产生的土拱效应具有减小涵洞结构受力的作 用,涵洞结构设计时可予以考虑,避免因结构设计 强度过剩,造成成本增加.

参考文献 :

[1] MARSTON A. The theory of external loads on closed

conduits in the light of the latest experiments [J]. Highway Research Board Proceedings, 1930, 9: 138-170.

- [2] 曾国熙. 土坝下涵管竖向土压力的计算 [J]. 浙江 大学学报, 1960(1): 79-98.
 ZENG Guoxi. Calculation of vertical earth pressure on culvert under dam [J]. Journal of Zhejiang University, 1960(1): 79-98. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] VASLESTAD J, JOHANSEN T H, HOLM W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills: long-term behavior [J]. Transportation Research Record, 1993(1415): 58-68.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 杨锡武.山区公路高填方涵洞土压力计算理论研究 综述 [J].重庆交通学院学报,2005,24(4):55-61,66.

YANG Xiwu. Comprehension introduction about the earth pressure calculation theories for high embankment culverts in mountainous place [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(4): 55-61,66. (in Chinese)

- [7] 李永刚,李 珠,张善元.矩形沟埋涵洞顶部垂直 土压力 [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] 李永刚,张善元. 矩形沟埋涵洞顶部垂直土压力试验和理论研究 [J]. 岩土力学,2008,29(4):1081-1086.

LI Yonggang, ZHANG Shanyuan. Experimental and theoretical study on earth pressure on top of rectangular trench-buried culverts [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (4): 1081-1086. (in Chinese) [9] 周兴涛,陈保国,简文星,等.沟埋涵洞土拱效应 及涵顶垂直土压力研究 [J].地下空间与工程学 报,2015,11(4):957-964.
ZHOU Xingtao, CHEN Baoguo, JIAN Wenxing, *et al.* Soil arching effect and vertical earth pressure

on trench installation culverts [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 957-964. (in Chinese)

- [10] MCGUIGAN B L, VALSANGKAR A J. Centrifuge testing and numerical analysis of box culverts installed in induced trenches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(2): 147-163.
- [11] 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. (in Chinese)

[12] 陈保国, 焦俊杰, 宋丁豹. 钢筋混凝土箱涵竖向土 压力理论研究——梯形沟谷设涵[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2911-2918.

CHEN Baoguo, JIAO Junjie, SONG Dingbao. Study of vertical earth pressure on reinforced concrete box culvert — Trapezoidal trench installing culvert [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2911-2918. (in Chinese)

- [13] 马 强,朱 健,肖衡林. 高填方涵洞涵顶土压力 影响因素敏感性分析 [J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(2): 8-12.
 MA Qiang, ZHU Jian, XIAO Henglin. Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the earth pressures on high embankment culvert [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(2): 8-12. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)

- $\lceil 16 \rceil$ HANDY R L. Arch in soil arching $\lceil J \rceil$. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302-318.
- [17] KINGSLEY H W. Arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115 (3): 415-419
- [18] KELLOGG C G. Vertical earth loads on buried engineered works [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(3): 487-506.
- [19] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects [J]. Geotechnique, 2003, **53**(7): 643-653.
- [20] TING C H, SHUKLA S K, SIVAKUGAN N. Arching in soils applied to inclined mine stopes [J]. International Journal of Geomechanics, 2010, **11**(1): 29-35.
- [21] 朱建明,赵 琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压 力与被动土压力统一解 [J]. 岩土力学, 2014,

```
35(9): 2501-2506.
```

ZHU Jianming, ZHAO Qi. Unified solution to active earth pressure and passive earth pressure on retaining wall considering soil arching effects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2501-2506. (in Chinese)

- [22] 林庆涛,朱建明,康 瑶.考虑土拱效应的挡土墙 空间土压力研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(9): 1918-1927. LIN Qingtao, ZHU Jianming, KANG Yao. Active spatial earth pressure behind retaining wall considering arching effects of soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1918-1927. (in Chinese)
- [23] 黄 鑫,曹文贵,刘 涛.基于主应力迹线的有限 土挡墙主动土压力计算方法 [J]. 公路工程, 2019, **44**(4): 41-47. HUANG Xin, CAO Wengui, LIU Tao. An calculation method for active earth pressure against retaining wall of soil with finite width based on principal stress trajectory [J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 41-47. (in Chinese)

Numerical simulation and calculation method study of vertical earth pressure of high filling culverts in trench terrain

CHENG Zhenwei^{*1,2}, LI Youyun³, LI Song¹, ZHANG Bingwen¹, CAO Shijiang¹

(1. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;

2. Guizhou Building Information Modeling (BIM) Engineering and Technology Research Center, Guiyang 550081, China;

3. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Affected by many factors such as topography, physical and mechanical parameters of filling materials and structural size, the calculation of earth pressure for high filling culverts in trench terrain is complex, and the related theoretical research is not mature. Based on a high filling culvert project, the simulation is conducted and the results indicate that the direction of principal stress of soil changes because of slopes on both sides of culvert hampering the settlement of filling under certain conditions, which results in arching effect. Based on the modeling study, the calculation formulas of the lateral pressure coefficient and the vertical earth pressure of high filling culverts in the trench terrain when cohesive filling in ditch produces the arching effect are deduced by using the conception of the minor principal stress arch. The comparison of various results shows that the calculated results are close to the field measurement and numerical simulation results, the vertical earth pressure of culvert increases nonlinearly with the increment of filling depth when upper filling of culvert in the trench terrain produces the arching effect, and the growth rate gradually decreases.

Key words: trench terrain; high filling; earth pressure of culverts; arching effect; numerical simulation; theoretical formula