

文章编号: 1000-7598 (2013) 10-2911-08

钢筋混凝土箱涵竖向土压力理论研究 ——梯形沟谷设涵

陈保国, 焦俊杰, 宋丁豹

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 梯形沟谷设涵在山区公路和铁路建设中的应用非常广泛。然而, 目前规范中尚无梯形沟谷设涵的设计方法。现有的研究主要针对上埋式和沟埋式涵洞, 对天然梯形沟谷埋设涵洞时的涵洞受力性状的研究甚少。通过数值模拟得出梯形沟谷设涵时, 钢筋混凝土箱型涵洞顶部填土内的应力状态和土拱的分布规律。在此基础上建立理论模型, 推导涵洞土压力理论计算式, 并验证理论方法的正确性。此外, 对涵顶土压力的影响因素进行了参数研究。结果表明, 梯形沟谷设涵时涵洞的受力状态不同于上埋式和沟埋式两种情况。当涵顶填土高度到达临界高度时, 填土中会形成上、下两层土拱。下层土拱效应使涵顶产生土压力集中, 上层土拱效应会减小涵顶的土压力集中。涵顶土压力的大小取决于涵顶的填土高度、沟谷坡角、沟谷宽度、涵洞的几何尺寸及填土的性质。

关 键 词: 涵洞; 梯形沟谷; 土压力; 土拱; 理论分析

中图分类号: U 449

文献标识码: A

Study of vertical earth pressure on reinforced concrete box culvert ——Trapezoidal trench installing culvert

CHEN Bao-guo, JIAO Jun-jie, SONG Ding-bao

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

Abstract: Trapezoidal trench installing (TTI) culverts are widely used in highway and railway in mountainous area. However, there are currently no published standards for the design of the TTI culvert. The performances of embankment installation (EI) and trench installation (TI) culverts have been investigated by a number of researchers; but the study of performance of TTI culverts is less common. To understand the complex soil-structure interaction issues related to the design of TTI culverts, a numerical simulation is conducted to investigate the stress states and the soil arches in the backfill over the reinforced concrete box culvert installed in trapezoidal trenches. A theoretical model is established based on the numerical results; and the formula for calculating the vertical earth pressure acting on the culvert is deduced. The theoretical results are in reasonable agreement with the field test data and numerical results. Moreover, a parametric study is carried out to investigate the important influencing factors on the vertical earth pressure acting on the culvert. Research results show that the stress states on the TTI culvert is different from those of EI and TI culverts. Two layers of soil arches at different levels form in the backfill over the TTI culvert when the fill on the culvert reaches a certain height. The lower soil arches incur the vertical earth pressure concentrating on the top of the culvert. However, the upper soil arches covering the lower ones alleviate the concentration effect. The vertical earth pressure on the culvert is determined by the soil arching effect, which is affected by the height of backfill over the culvert, the slope angle and bottom width of the trench, the dimensions of the culvert and the properties of backfill.

Key words: culvert; trapezoidal trench; earth pressure; soil arch; theoretical analysis

1 引 言

钢筋混凝土箱型涵洞在高等级公路和铁路工程

中的应用非常广泛。从涵洞的埋设方式上看, 主要有上埋式、沟埋式和梯形沟谷设涵 (如图 1 所示)。上埋式涵洞的涵顶在天然地面以上, 由于钢筋混凝

收稿日期: 2012-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51108434); 湖北省自然科学基金资助项目 (No. 2010CDB04201); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. CUG130408)。

第一作者简介: 陈保国, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事地基处理、土与结构物相互作用机制研究。E-mail: baoguo_chen@126.com

土涵洞的刚度大于两侧填土的刚度,使得涵洞土柱体的沉降小于其两侧土柱体的沉降,从而导致涵顶产生应力集中^[1-2]。沟埋式涵洞的涵顶在天然地面以下,由于两侧土体的压缩量小于涵顶正上方填土压缩量,涵洞上方土体的部分荷载由于内外土柱体的摩擦作用而传递到外侧土体上,涵顶受到的荷载小于上覆土体的自重压力^[3-4]。在山区地形中,梯形沟谷设涵非常普遍。涵洞埋设于天然梯形沟谷中,其受力性状有别于上埋式和沟埋式涵洞,涵-土作用机制变得更为复杂。

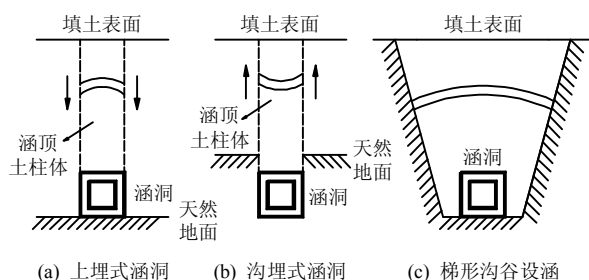


图1 涵洞埋设示意图

Fig.1 Sketches of installing culvert

在涵洞土压力计算理论方面,Marston等^[5]开创了涵管土压力计算理论的先河,其研究成果表明,涵管受到的土压力不仅与填土高度有关还与涵管的埋设方式有关。Spangler^[6-7]在Marston土压力理论的基础上发展了涵管的土压力计算理论,并提出了等沉面的概念。

针对上埋式涵洞,Spangler^[8]对2个刚性涵管进行了现场监测,涵顶填料分别为轻质填土和碎石土,涵顶填土高度与涵管的宽度比 H_m/b_c 分别为6.0和4.6,得到的涵顶土压力系数分别为1.9和1.5(涵顶土压力系数定义为涵顶实际土压力与涵顶填土自重引起的压力的比值)^[6]。此后,他又对7个钢筋混凝土箱型涵洞进行监测, H_m/b_c 在1.8到5.5之间,土压力系数从1.2变化到1.5^[8]。Trollope等^[9]对一个马蹄形刚性涵洞的8个部位进行监测,得到的土压力系数从1.5到3.2。Dasgupta等^[10],Bennett等^[11],Kim等^[12]也对上埋式涵洞的土压力进行了测试,得出的土压力系数均大于1.0。顾安全等^[1,13]将影响涵顶垂直土压力的各种因素归结到涵顶平面内外土柱体的沉降差这一变量上,基于刚性地基和弹性半空间无限体假设,推得计算上埋式涵洞垂直土压力的计算式。郑俊杰等^[14]在顾安全公式的基础上,考虑了涵顶土拱效应对涵洞台背土体应力的影响,对顾安全公式进行了修正。笔者也曾对上埋式刚性涵洞

(拱涵及盖板涵)的受力状态等进行了相应的研究,并得出了类似的结论^[15-18]。

对于沟埋式涵洞,也有诸多学者对此开展了研究工作。Vaslestad等^[19]对沟埋式涵洞进行现场测试,得出涵顶中心处的土压力系数为0.63。杨锡武等^[20]基于刚性地基假设,通过模型试验研究了沟埋式涵洞的受力状态随填土高度的变化规律。试验中 H_m/b_c 从1.8增大到13.5,土压力系数从0.91减小到0.39。Kim等^[12]的研究结果表明,沟埋式涵洞顶部的土压力系数小于1.0,并且随着 H_m/b_c 的增大而减小。李永刚等^[4]基于刚性地基假设推导了沟埋式涵洞垂直土压力理论计算式,当 H_m/b_c 从1.0增大到10.0,土压力系数从0.96减小到0.33。McAffee等^[21],McGuigan等^[22]采用离心模拟试验和数值模拟对沟埋式箱型涵洞进行研究,得出涵顶中心处的土压力系数为0.28。根据上述研究成果可知,上埋式涵洞涵顶的土压力系数大于1.0,而沟埋式涵洞涵顶的土压力系数小于1.0。

现行的规范方法中,我国的《公路桥涵设计通用规范》^[23]采用线性土压力计算理论来计算涵顶的土压力,即认为涵顶土压力等于填土自重引起的压力,而且没有区分涵洞的埋设方式。我国目前最新的《公路涵洞设计细则》^[24]采用与《铁路桥涵设计基本规范》^[25]相同的经验系数法计算涵顶的土压力。该方法虽然使用方便,但也没有考虑涵洞的埋设方式,而且土压力系数均大于1.0。加拿大的公路桥涵设计规范^[26]中也只给出了上埋式箱型^[27]涵洞的土压力计算方法。美国的公路桥涵设计规范中给出了上埋式和沟埋式涵洞的土压力计算方法,涵顶土压力为土压力系数乘以涵顶填土自重压力。对上埋式涵洞,土压力系数大于1.0,而沟埋式小于1.0。

然而,梯形沟谷设涵时,涵顶的土压力不同于上埋式和沟埋式涵洞。目前并没有相关的理论可以用来指导该类涵洞的设计。为了明确梯形沟谷设涵时涵-土体系的作用机制和箱涵顶部土压力计算方法,本文通过数值模拟和理论分析对此开展研究,以为实际工程的设计和施工提供理论依据。

2 数值模拟

箱涵顶部填土内的应力分布状态很难通过试验完全反应出来。本文利用有限元数值模拟软件PLAXIS对某梯形沟谷设涵的实际工程进行数值模拟,分析钢筋混凝土箱型涵洞顶部填土的应力状态,进而得出涵顶填土内部土拱的分布规律。并在此基础上建立理论模型,推导涵顶土压力的计算式。将

理论结果和数值模拟结果与现场实测数据进行对比，来验证理论方法的正确性。

2.1 数值建模

某钢筋混凝土箱型涵洞埋设于梯形沟谷之中。涵洞宽度 $b_c = 10.0$ m，涵洞高度 $h_c = 8.0$ m。梯形沟谷边坡坡角 α 大约为 45° ，数值模拟中取沟谷两侧的坡角均为 45° ，沟谷底部宽度 $B_t = 2b_c = 20.0$ m。涵顶填土为碎石土，涵洞基底设置 1.0 m 厚的水泥、碎石、砂垫层作为找平层。清除地表土层，涵洞建于风化岩层上。强风化层厚度取 5.0 m，下部微风化岩层厚度取 15.0 m。

数值模拟中采用 15 节点三角形高精度单元，界面设置接触单元来模拟涵洞-填土-岩体之间的相对滑移。界面 5 对节点坐标两两相同，界面单元的刚度矩阵由 Newton-Cotes 积分点得到。通过界面强度折减系数 R_{inter} 来反映由于结构物与填土界面的塑性滑移导致接触面强度的降低。根据文献[28]，数值模拟中 R_{inter} 取 0.8，接触面实际厚度为 0，虚拟厚度因子取 0.1。填土、垫层及岩体均为摩尔-库仑弹塑性材料，涵洞为线弹性材料。模型两侧仅约束水平位移，模型底部同时约束水平和竖向位移。实际工程中，没有地下水的影响，因而计算模型中不考虑排水固结的影响。数值模型如图 2 所示，数值模拟参数通过现场原位测试和室内试验得到，主要参数见表 1。

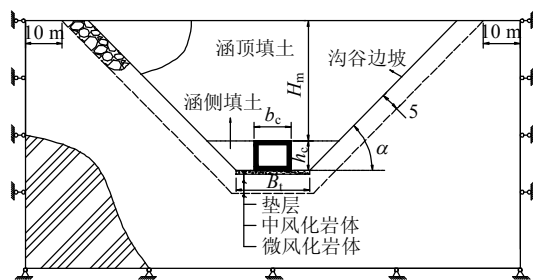


图 2 数值模型
Fig.2 Numerical model

表 1 数值模拟参数
Table 1 Parameters in numerical model

参数	弹性模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / (kN/m³)
涵洞	30 000	0.20			25.0
填土	60	0.30	0	30	21.4
垫层	300	0.25	50	32	22.5
中风化岩体	15 000	0.23	600	29	26.5
微风化岩体	26 000	0.20			27.2

2.2 土拱效应分析

箱涵顶部填土内的最大主应力分布规律如图 3 所示 ($H_m/b_c = 3.2$)。图 3 表明，涵顶填土内部最大主应力的分布规律不同于自重应力的分布规律。最大主应力在涵洞顶板的两端和边坡上产生应力集中现象，涵顶上方填土内部主应力分布类似于拱形。由于涵洞与它两侧填土之间的刚度差异使得涵顶土体的沉降小于两侧填土的沉降，涵洞正上方的土体阻碍其两侧土体的沉降，因而涵顶产生应力集中。此外，由于两侧边坡对涵洞与边坡之间的填土也有支撑和摩擦作用，阻碍其相对向下运动，因而，在涵顶与任意一侧的沟谷边坡之间均形成土拱（土拱 1）。另外，由于涵顶填土荷载的作用，使得涵洞顶板产生挠曲变形，顶板中心产生挠曲卸载效应。涵顶正上方的较小范围内会形成另外一个土拱，拱脚正好落在涵洞顶板的两端（土拱 2）。随着挠曲变形的增大，顶板中心处的土压力不断向两端转移，导致涵洞顶板两端产生严重的应力集中现象。因此，3 个连续的土拱在涵顶平面产生，从而导致箱涵顶部的应力集中。

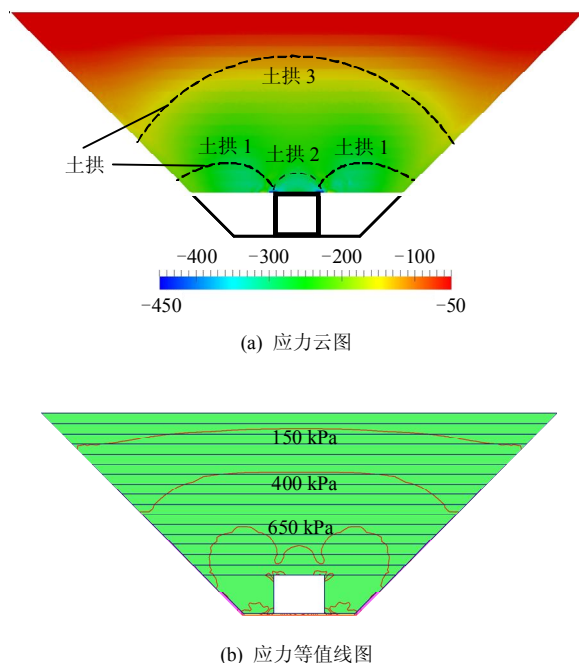


图 3 涵顶填土内部最大主应力分布规律
Fig.3 Distributions of the major principal stress in the backfill

然而，随着填土高度的增大，沟谷胸腔内的填土受到两侧边坡的支撑和摩擦作用会越来越强烈。当填土达到一定高度后（填土的临界高度 H_0 ），一个新的土拱（土拱 3）在此前的 3 个连续土拱（土

拱 1 和土拱 2) 的上部形成, 其拱脚直接落在两侧的沟谷边坡上。因而, 当填土高度继续增大时, 大部分荷载将会通过上层土拱直接传递到沟谷边坡上, 从而减小涵顶的应力集中。

3 理论分析

3.1 理论模型建立

根据数值模拟得出的填土内部的土拱分布规律建立二维土拱理论模型 (如图 4 所示)。该模型满足如下假设: (1) 涵顶正上方的中间土拱区域为被动土压力核心区域, 假设其为一个弹性的等腰三角形土体 ($\triangle ABCB'$), 其两侧土拱的拱脚刚好落在该等腰三角形的两腰上; (2) 满足被动土压力极限平衡状态, 即拱脚处于塑性状态, 三角形底角为 $45^\circ + \varphi/2$; (3) 箱涵顶部填土内的土拱形态为圆弧形; (4) 切向应力为最大主应力, 径向应力为最小主应力。

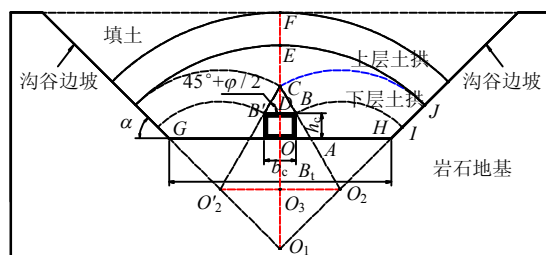


图 4 理论模型示意图

Fig.4 Sketch of theoretical model

取任意的土拱单元体为对象进行受力分析, 如图 5 所示。

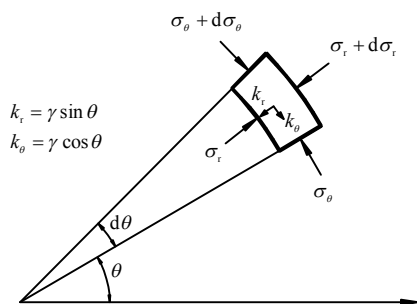


图 5 土拱单元受力图

Fig.5 Stress in the soil arch unit

由径向受力平衡可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \gamma \sin \theta = 0 \quad (1)$$

切向应力 σ_θ 与径向应力 σ_r 之间满足:

$$\sigma_\theta = k_p \sigma_r \quad (2)$$

式 (2) 中 $k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, $\theta \in [\alpha, 180^\circ - \alpha]$ 。

求解方程 (1) 可得

$$\sigma_r = c_0 r^{(k_p - 1)} + \frac{r \gamma \sin \theta}{k_p - 2} \quad (3)$$

式中: c_0 为积分常数; 对土拱 3, $\theta \in [\alpha, 180^\circ - \alpha]$, 对于土拱 1, $\theta \in [\alpha, 180^\circ - 45^\circ - \varphi/2]$, α 为沟谷边坡坡角, 实际工程中天然沟谷边坡坡角一般为 $5^\circ \sim 75^\circ$ 。

3.2 涵顶土压力计算

由前述分析可知, 当填土高度低于 E 点时, 不能形成上层拱圈, 此时涵顶土压力按照上埋式涵洞的土压力计算理论进行计算。当填土高度高于 E 点时 (即大于填土的临界高度 H_0 时), 按照本文的梯形沟谷设涵的土压力计算理论进行分析。

由几何条件可得:

$$\overline{OO_3} = x = \frac{(B_t - b_c)/2 \tan(45^\circ + \varphi/2) \tan \alpha - h_c \tan \alpha}{\tan(45^\circ + \varphi/2) + \tan \alpha} \quad (4)$$

$$\overline{O_2O_3} = y = \frac{B_t/2 \tan \alpha - x}{\tan \alpha} \quad (5)$$

$$r_B = \overline{O_2B} = \frac{x + h_c}{\sin(45^\circ + \varphi/2)} \quad (6)$$

$$r_C = \overline{O_2C} = \frac{y}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} \quad (7)$$

$$r_E = \overline{O_1E} = \overline{O_1J} = \overline{O_1O_2} + \overline{O_2C} = \frac{y}{\cos \alpha} + \frac{y}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} \quad (8)$$

$$\overline{EC} = \left[\frac{y}{\cos \alpha} + \frac{y}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} \right] - \left[\frac{B_t}{2} \tan \alpha + h_c + \frac{b_c}{2} \tan(45^\circ + \varphi/2) \right] \quad (9)$$

填土的临界高度 H_0 可由下式确定:

$$H_0 = \overline{O_1E} - \overline{O_1O} - h_c = \frac{y}{\cos \alpha} + \frac{y}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} - \frac{B_t}{2} \tan \alpha - h_c \quad (10)$$

针对上层拱圈的受力状态, 在拱圈最高点处的土压力为 0, 即:

$$\sigma_r(H_m) = 0 \quad (11)$$

最高点处 $r_f = B_t/2 \tan \alpha + h_c + H_m$, $\theta = 90^\circ$, 带入式 (11) 得到积分常数:

$$c = c_1 = \gamma/(2 - k_p)(B_t/2 \tan \alpha + h_c + H_m)^{(2-k_p)} \quad (12)$$

由式 (3) 和 (12) 得到上层拱圈中任意一点的径向应力的解为

$$\sigma_{r\text{-outer}} = \frac{\gamma}{2 - k_p} [(B_t/2 \tan \alpha + h_c + H_m)^{(2-k_p)} \cdot r^{(k_p-1)} - r \sin \theta] \quad (13)$$

式中: γ 为填土重度; c_1 为积分常数; B_t 为沟谷底宽; h_c 为涵洞高度; H_m 为最大填土高度。

联立式 (4)、(5)、(8)、(12) 和 (13) 可得 E 点的径向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{rE} = & \frac{\gamma}{2 - k_p} \left(\frac{B_t}{2} \tan \alpha + h_c + H_m \right)^{(2-k_p)} \cdot \\ & \left[\frac{1}{2} \left(B_t - \frac{(B_t - b_c) \tan(45^\circ + \varphi/2) - 2h_c}{\tan(45^\circ + \varphi/2) + \tan \alpha} \right) \cdot \right. \\ & \left. \left(\frac{1}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} + \frac{1}{\cos \alpha} \right) \right]^{(k_p-1)} + \frac{\gamma}{k_p - 2} \cdot \\ & \left[\frac{1}{2} \left(B_t - \frac{(B_t - b_c) \tan(45^\circ + \varphi/2) - 2h_c}{\tan(45^\circ + \varphi/2) + \tan \alpha} \right) \cdot \right. \\ & \left. \left(\frac{1}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} + \frac{1}{\cos \alpha} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

由 E 点计算 C 点的径向应力为

$$\sigma_{rC} = (\sigma_{rE} + \gamma \overline{EC}) \cos(45^\circ - \varphi/2) \quad (15)$$

同时 C 点又在下层拱圈 O_2 上, 由下层拱圈径向平衡方程可得 C 点的径向应力为

$$\sigma_{rC} = c_2 r_C^{(k_p-1)} + \frac{r_C \gamma \sin(180^\circ - 45^\circ - \varphi/2)}{k_p - 2} \quad (16)$$

联立式 (15)、(16) 和 (4)、(5)、(7)、(9) 可得积分常数为

$$\begin{aligned} c_2 = & (\sigma_{rE} + \gamma \overline{EC}) \sin(45^\circ + \varphi/2) r_C^{(1-k_p)} - \\ & \frac{\gamma \sin(45^\circ + \varphi/2)}{k_p - 2} r_C^{(2-k_p)} \end{aligned} \quad (17)$$

由式 (3) 和 (17) 可得到下层拱圈中任意一点的径向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{r\text{-inner}} = & \left[(\sigma_{rE} + \gamma \overline{EC}) \sin(45^\circ + \varphi/2) r_C^{(1-k_p)} - \right. \\ & \left. \frac{\gamma \sin(45^\circ + \varphi/2)}{k_p - 2} r_C^{(2-k_p)} \right] r^{(k_p-1)} + \frac{\gamma \sin \theta}{k_p - 2} r \end{aligned} \quad (18)$$

根据下层拱圈径向应力平衡, 由式 (18) 和 (4)、(6) 可得 B 点径向应力 σ_{rB} 为

$$\begin{aligned} \sigma_{rB} = \sigma_{rB'} = & \left[(\sigma_{rE} + \gamma \overline{EC}) \sin(45^\circ + \varphi/2) r_C^{(1-k_p)} - \right. \\ & \left. \frac{\gamma \sin(45^\circ + \varphi/2)}{k_p - 2} r_C^{(2-k_p)} \right] r_B^{(k_p-1)} + \\ & \frac{r_B \gamma \sin(180^\circ - 45^\circ - \varphi/2)}{k_p - 2} \end{aligned} \quad (19)$$

对箱涵顶部被动土压力区的三角形进行受力分析, 三角形的两腰 $\overline{BC}$ 和 $\overline{B'C}$ 上分别受到下层土拱拱脚的环向垂直压应力和径向摩擦力。其中环向应力如图 6 所示。

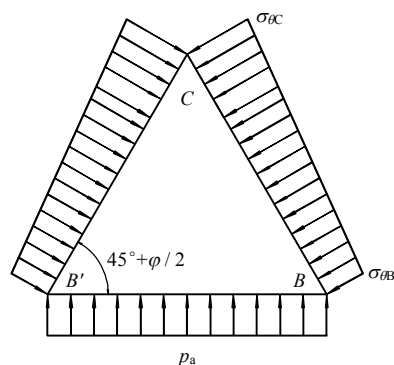


图 6 涵顶被动土压力区受力图
Fig.6 Stress of soil mass in the passive earth pressure area

$$\sigma_{\theta C} = k_p \sigma_{rC} \quad (20)$$

$$\sigma_{\theta B} = k_p \sigma_{rB} \quad (21)$$

C 点的摩擦力为

$$\sigma_{fC} = R_{\text{inter}} \sigma_{\theta C} \tan \varphi - \sigma_{rC} \quad (22)$$

B 点的摩擦力为

$$\sigma_{fB} = R_{\text{inter}} \sigma_{\theta B} \tan \varphi - \sigma_{rB} \quad (23)$$

极限平衡状态下, 界面强度折减系数 R_{inter} 可根据填土性质取 $0.5 \sim 1.0$ [28]。由三角形区域土体受力平衡可得箱涵顶部的平均土压力 p_a 为

$$p_a = [(\sigma_{\theta C} + \sigma_{\theta B}) \cos(45^\circ + \varphi/2) + (\sigma_{\theta C} + \sigma_{\theta B}) \cdot \sin(45^\circ + \varphi/2)] / [2 \cos(45^\circ + \varphi/2)] \quad (24)$$

箱涵顶部的垂直土压力系数 k 为

$$k = p_a / (\gamma H) \quad (25)$$

3.3 理论结果的验证

将理论方法计算得到的涵顶土压力系数与现场实测得到的土压力系数和数值模拟的结果进行对比以验证理论方法的正确性。实际工程中, 涵洞尺寸及梯形沟谷几何参数与前述的数值模拟中的参数相同。由于实际工程的需要, 现场最大填土高度为 20 m。数值模拟、实测及理论方法得到的土压力系数见表 2。数值模拟结果比实测结果偏小 3%, 理论结果比实测结果偏大 7%。为进一步验证在较大的填土高度下该理论方法的正确性, 将理论计算得到的土压力系数与数值模拟的结果进行对比分析 (如图 7 所示)。理论方法得到的土压力系数与数值模拟的结果一致, 均随 H_m/b_c 的增大呈非线性减小, 且二者之间的差异也逐渐减小, 最大偏差小于 10%。由此说明, 该理论方法可用于指导该类涵洞的设计。

表 2 涵顶土压力对比

Table 2 Comparison of vertical earth pressure on culvert

数值模拟		现场实测		理论计算	
p/kPa	k	p/kPa	k	p/kPa	k
556	1.30	573	1.34	616	1.44

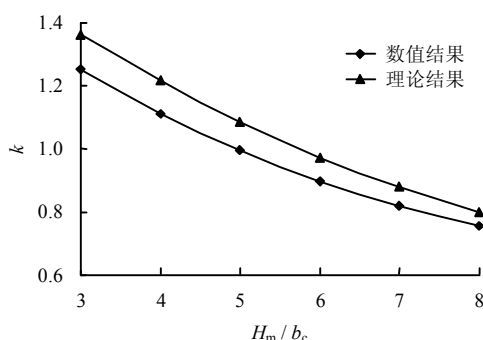


图 7 土压力系数理论值与数值模拟结果对比

Fig.7 Comparison between theoretical earth pressure coefficient and numerical results

4 几何参数对土压力的影响

在上述理论研究的基础上, 探讨梯形沟谷设涵时一些重要参数对涵顶土压力系数的影响规律。理论计算中参数的基本值为 $\alpha = 45^\circ$, $B_t/b_c = 2.0$, $h_c/b_c = 0.8$, $\varphi = 30^\circ$ 。在分析其中的某个影响因素时, 其他的几个参数取值均为基本值。

4.1 沟谷坡角

箱涵顶部土压力系数随沟谷边坡坡角的变化规律如图 8 所示。由图可知, 当坡角小于 60° 时, 涵顶土压力系数随沟谷坡角的增大而减小; 当坡角大于 60° 时, 土压力系数稍有增加。主要是因为沟谷设涵时, 涵洞顶部的填土受到沟谷边坡的摩阻力和支撑作用会随着沟谷坡角的变化而变化。当坡角小于 60° 时, 边坡以支撑作用为主, 坡角增大时土拱效应增强, 对于缓解涵顶的土压力集中现象的效果非常明显; 而当坡角大于 60° 时, 边坡的支撑作用明显减弱, 随着坡角的增大, 土拱效应也逐渐减弱。此外, 当沟谷边坡坡角一定时, 土压力系数随着 H_m/b_c 的增大而逐渐减小, 其变化速率也是越来越小。主要是由于涵顶填土高度越大, 涵顶填土中的外层土拱的作用效果越明显, 大量的填土荷载由上层土拱传递到沟谷边坡。

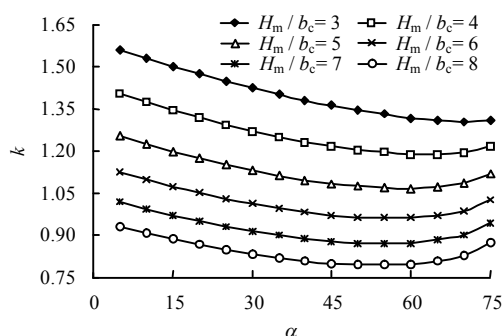


图 8 涵顶土压力系数随沟谷坡角的变化规律

Fig.8 Variations in earth pressure coefficient versus trench slope angle

4.2 沟谷底部宽度

涵顶土压力系数随 B_t/b_c 的变化规律如图 9 所示。图 9 表明, 涵顶土压力系数随 B_t/b_c 的增大呈非线性增大, 并逐渐趋于稳定。此外, 当沟谷底部宽度一定时, 由于涵顶填土内部土拱的作用, 使得涵顶土压力系数随着 H_m/b_c 的增大而减小。

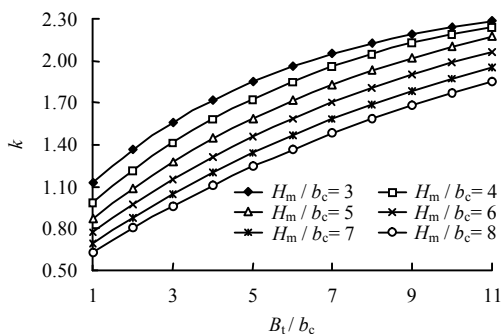


图 9 涵顶土压力系数随 B_t/b_c 的变化规律

Fig.9 Variations in earth pressure coefficient versus B_t/b_c

4.3 涵洞结构尺寸

涵顶土压力系数随 h_c/b_c 的变化规律如图 10 所示。由图可知, 涵顶土压力系数随着 h_c/b_c 的增大呈近似线性增大。此外, 土压力系数随着 H_m/b_c 的增大而减小, 其变化的速率也逐渐减小。

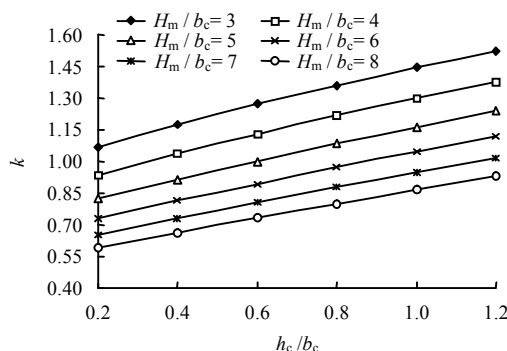


图 10 涵顶土压力系数随 h_c/b_c 的变化规律

Fig.10 Variations in earth pressure coefficient versus h_c/b_c

4.4 填土内摩擦角

涵顶土压力系数随填土内摩擦角的变化规律如图 11 所示。图 11 表明, 涵顶土压力系数随填土内摩擦角的增加呈非线性增大, 且变化的速率也逐渐增大。此外, 涵顶土压力系数随 H_m/b_c 的增大而逐渐减小, 当内摩擦角较大时, 该趋势更为明显。

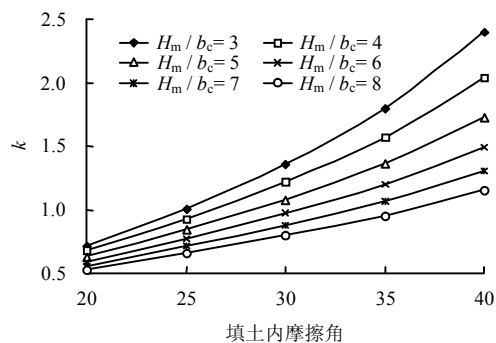


图 11 涵顶土压力系数随填土内摩擦角的变化规律

Fig.11 Variations in earth pressure coefficient versus frictional angle of backfill

5 结 论

梯形沟谷埋设箱涵时, 箱涵顶部的土压力不同于上埋式和沟埋式涵洞。当涵顶填土高度到达临界高度时, 填土内部会形成上、下两层土拱。下层土拱效应使箱涵顶部产生土压力集中现象, 上层土拱效应会减小箱涵顶部的土压力集中。涵顶土压力的大小取决于涵顶的填土高度、沟谷坡角、沟谷宽度、涵洞的几何尺寸及填土的性质。

当涵顶填土高度大于临界高度时, 涵顶土压力

系数随着填土高度的增大呈非线性减小趋势; 随着沟谷坡角的增大先减小, 然后略有增大; 随着沟谷底部宽度的增大而增大, 并逐渐趋于稳定; 随着涵洞高宽比的增大呈近似线性增加; 随着填土内摩擦角的增大呈非线性增大, 且变化的速率也逐渐增大。

参 考 文 献

- [1] 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 An-quan. 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.
- [2] 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.
ZHENG Jun-jie, CHEN Bao-guo, ZHANG Shi-biao. Experimental investigation and numerical simulation of nonlinear earth pressure for trench-buried culverts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1771—1777.
- [3] KANG J, PARKER F, YOO C H. Soil-structure interaction for deeply recess corrugated steel pipes, part II: Imperfect trench installation[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(3): 588—594.
- [4] 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 Yong-gang, ZHANG Shan-yuan. Experimental and theoretical study on earth pressure on top of rectangular trench-buried culverts[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1081—1086.
- [5] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipes[R]. Iowa: Iowa Engineering Experiment Station, 1913.
- [6] SPANGLER M G. Underground conduits—An appraisal of modern research[C]//Proceedings of American Society of Civil Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1947: 855—884.
- [7] SPANGLER M G. A theory on loads on negative projecting conduits[C]//Proceedings of Highway Research Board. Washington D C: [s. n.], 1950: 153—161.
- [8] SPANGLER M G. Field measurements of the settlement ratios of various highway culverts[R]. Iowa: Iowa

- Engineering Experiment Station, 1950.
- [9] TROLLOPE D H, SPEEDIE M G, LEE I K. Pressure measurements on Tullaroop dam culvert[C]//Proceedings of 4th Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1963, 81—92.
- [10] DASGUPTA A, SENGUPTA B. Large-scale model test on square box culvert backfilled with sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(1): 156—161.
- [11] BENNTT R M, WOOD S M, DRUMM E C, et al. Vertical loads on concrete box culverts under high embankments[J]. **Journal of Bridge Engineering**, 2005, 10(6): 643—649.
- [12] KIM K, YOO C H. Design loading on deeply buried box culverts[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(1): 20—27.
- [13] 顾安全, 郭婷婷, 王兴平. 高填土涵洞(管)采用 EPS 板减荷的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 500—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.
- [14] 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 Jun-jie, ZHAO Jian-bin, CHEN Bao-guo. Vertical earth pressure on culverts under high embankments[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1009—1013.
- [15] 陈保国, 孙金山, 张磊. 上埋式钢筋混凝土拱涵受力特性及地基处理研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1500—1506.
- CHEN Bao-guo, SUN Jin-shan, ZHANG Lei. Study of stressing state and ground treatment of reinforced concrete arch culvert[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1500—1506.
- [16] CHEN Bao-guo, ZHENG Jun-jie, LU Yan-er. Soil-structure interaction of unsymmetrical trench installation culvert[J]. **Journal of Southeast University (English Edition)**, 2009, 25(1): 94—98.
- [17] CHEN Bao-guo, ZHENG Jun-jie, HAN Jie. Experimental study and numerical simulation on trench installation culvert[J]. **Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)**, 2010, 24(3): 223—234.
- [18] 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.
- [19] VASLESTAD J, JOHANSEN T H, HOLM W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills: Long-term behavior[J]. **Transport Research Record**, 1993, 1415: 58—68.
- [20] 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 Xi-wu, ZHANG Yong-xing. A study on the earth pressure theory for high fill culverts[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(9): 119—124.
- [21] MCAFFEE R P, VALSANGKAR A J. Field performance, centrifuge testing, and numerical modelling of an induced trench installation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(1): 85—101.
- [22] 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.
- [23] 中华人民共和国行业标准. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [24] 中华人民共和国行业标准. JTG/TD65-04—2007 公路涵洞设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [25] 中华人民共和国行业标准. TB10002.1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [26] CSA. Canadian highway bridge design code (Standard CAN/CSA-S6-06)[S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2006.
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc. (AASHTO). AASHTO standard specifications for highway bridges[S]. Washington D C: [s. n.], 2002.
- [28] BRINKGREVE R B J, VERMEER P A. Finite element code for soil and rock analysis[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1998.