

具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析

马 强,朱 健,邢文文,胡 兴

(湖北工业大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430068)

摘 要:依据涵洞两侧填土荷载的特点,基于极限平衡理论,在迈耶霍夫-汉纳极限承载力公式基础上,推导了用于计算具有硬壳层的涵洞地基极限承载力的计算公式.将汉森加权平均法、应力扩散角法、本文提出的改进公式法和有限元法的计算结果进行对比分析,研究了路堤填土高度、硬壳层厚度、硬壳层与下卧软土层的黏聚力比和内摩擦角比对极限承载力的影响,并将工程实例结果与 4 种理论计算方法的计算结果进行对比.结果表明:随着路堤填土高度和硬壳层厚度的增加,改进公式法和有限元法计算的地基承载力结果最为接近;黏聚力比和内摩擦角比的变化对改进公式法和有限元法的计算结果影响较为一致;改进公式法的计算结果比汉森加权法和扩散应力角法更加接近工程实例.

关键词:硬壳层;涵洞;地基;极限承载力;数值模拟

中图分类号:TU411.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.201504039

0 引言

在软土地区,地基上部通常会覆盖一层强度比下卧软土层大得多的硬壳层.高速公路涵洞建设中,若能充分利用硬壳层,可以简化设计并降低工程成本.现有关于涵洞地基承载力的研究主要针对均质或人工地基展开^[1-2],这些研究未能考虑硬壳层的作用.而关于硬壳层承载力的研究又未能考虑涵洞两侧填土的旁压荷载作用^[3-4].现行 TJG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》^[5]也未给出具有硬壳层的涵洞地基承载力的计算方法.

因此,在考虑涵侧填土旁压荷载对涵洞地基承载力提高作用的基础上,对迈耶霍夫-汉纳公式进行改进,得到具有硬壳层的涵洞地基极限承载力计算公式.并将笔者提出的改进公式法与现有理论方法、有限元法及工程实例进行对比,验证所提出改进公式的适用性和准确性.

1 理论分析

1.1 迈耶霍夫-汉纳承载力公式^[6]

当软弱土层上覆一定厚度硬壳层时,根据迈

耶霍夫(Meyehof)和汉纳(Hanna 1978 年)的研究,此时在上部硬壳层中将发生冲剪破坏^[7],而下部软弱土层中则出现整体剪切破坏.中间柱状土体受到两侧的被动土压力 p_p ,基础上部压力 q_u 及下部软土层的反力 q_b 的作用,由极限平衡方程可推导出双层地基的最终极限承载力计算公式.双层地基迈耶霍夫-汉纳计算示意图如图 1 所示.其双层地基迈耶霍夫-汉纳极限承载力计算公式为

$$q_u = q_b + \frac{2(c_u H + p_p \sin \delta)}{B} - \gamma_1 H. \tag{1}$$

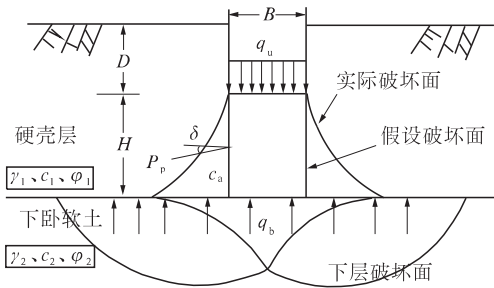


图 1 双层地基迈耶霍夫-汉纳计算示意图

Fig. 1 Diagram of two-layered foundation calculation of Meyehof and Hanna

收稿日期:2015-04-03;修订日期:2015-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208187);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y12-11)

作者简介:马强(1983—),男,湖北丹江口人,湖北工业大学副教授,博士,主要从事土与结构相互作用及环境岩土方面的研究工作,E-mail: maqiang927@163.com.

引用本文:马强,朱健,邢文文,等.具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(1):70-74.

式中: q_b 为下卧软土层的极限承载力; γ_1 为硬壳层的容重; c_a 为假设破坏面上的附着力; p_p 为假设破坏面上沿基础轴线单位长度的被动土压力; δ 为被动土压力作用线与水平面的倾角。

下卧软土层的极限承载力为

$$q_b = c_2 N_{c_2} + \gamma_1 (D + H) N_{q_2} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2}. \quad (2)$$

式中: N_{c_2} 、 N_{q_2} 、 N_{γ_2} 分别为下卧软土层的迈耶霍夫公式承载力系数; c_2 和 γ_2 分别为下卧软土层的黏聚力和容重。

被动土压力 p_p 按照下式确定,即

$$p_p = \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D}{H}\right) \frac{k_{pH}}{\cos \delta}. \quad (3)$$

若令 $k_{pH} \tan \delta = k_s \tan \varphi_1$, 则将式(3)代入式(1)中整理得

$$q_u = q_b + \frac{2c_a H}{B} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D}{H}\right) \frac{k_s \tan \varphi_1}{B} - \gamma_1 H. \quad (4)$$

式中: k_s 为冲剪系数,它是 q_2/q_1 和 φ_1 的函数,其中 q_1 和 q_2 分别为当假设基础位于上下土层表面时的极限承载力,由式(5)计算得到。

$$\begin{cases} q_1 = c_1 N_{c_1} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma_1}; \\ q_2 = c_2 N_{c_2} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_{c_1} 、 N_{c_2} 和 N_{γ_1} 、 N_{γ_2} 分别为上、下土层的迈耶霍夫承载力系数,均可根据文献[6]查得。

1.2 改进的迈耶霍夫-汉纳公式

由迈耶霍夫-汉纳计算公式可知,基础埋置在上层坚实土中,其上方无任何荷载作用。而涵洞两侧填土的旁压作用对涵洞地基承载力有较大的提高作用,故迈耶霍夫-汉纳计算公式不能准确计算涵洞地基极限承载力。笔者在迈耶霍夫-汉纳公式的基础上,推导了具有硬壳层的涵洞地基极限承载力的计算公式。

软土硬壳层上填方涵洞的受力如图2所示。涵洞两侧路堤填土参数为 γ_0 、 c_0 和 φ_0 , 硬壳层土体参数为 γ_1 、 c_1 和 φ_1 , 下卧软土层的土体参数为 γ_2 、 c_2 和 φ_2 , 涵侧填土荷载为 $\gamma_0 H_0$, 涵洞基础所受上部极限荷载为 q_u 。基底硬壳层土体依然采用迈耶霍夫-汉纳公式的破坏模式,基底冲切土柱两侧的被动土压力为 p_p , 下卧软土极限承载力为 q_b 。

由极限平衡方程得出硬壳层涵洞地基的极限承载力计算公式为

$$q_u = q_b + \frac{2(c_a H_1 + p_p \sin \delta)}{B} - \gamma_1 H_1. \quad (6)$$

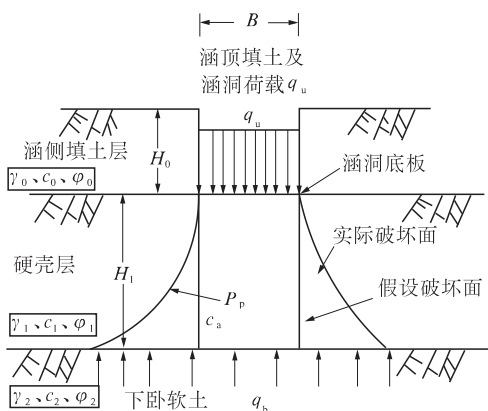


图2 硬壳层涵洞地基极限承载力计算示意图

Fig.2 Diagram of ultimate bearing capacity calculation of the culvert foundation with crust layer

其中,下卧软土层的极限承载力为

$$q_b = c_2 N_{c_2} + \gamma_0 H_0 N_{q_2} + \gamma_1 H_1 N_{q_2} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2}. \quad (7)$$

被动土压力 p_p 按照下式确定,即

$$p_p = \left(\frac{1}{2} \gamma_1 H_1^2 + \gamma_0 H_0 H_1\right) \frac{k_{pH}}{\cos \delta}. \quad (8)$$

将被动土压力公式(8)代入式(6)整理得,若令 $k_{pH} \tan \delta = k_s \tan \varphi_1$, 则软土硬壳层涵洞地基承载力为

$$q_u = q_b + 2c_a \frac{H_1}{B} + (\gamma_1 H_1^2 + 2\gamma_0 H_0 H_1) \frac{k_s \tan \varphi_1}{B} - \gamma_1 H_1. \quad (9)$$

式中: γ_0 为路堤填土容重; H_0 、 H_1 分别为路堤填土高度和硬壳层厚度。

由于涵洞基础形状为矩形,其宽为 B ,长为 L ,故应该考虑涵洞基础宽长比对极限承载力的影响,其计算公式形式为

$$q_u = q_b + \left(1 + \frac{B}{L}\right) 2c_a \frac{H_1}{B} + \left(1 + \frac{B}{L}\right) (\gamma_1 H_1^2 + 2\gamma_0 H_0 H_1) \cdot \frac{k_s \tan \varphi_1}{B} - \gamma_1 H_1. \quad (10)$$

2 数值分析

2.1 数值模型

为了验证改进后的地基极限承载力计算公式的适用性,笔者利用数值模拟手段对具有硬壳层的涵洞地基进行模拟,并选取两种典型的层状地基极限承载力计算公式(扩散角法、汉森加权平均法^[7])进行计算,将数值模拟结果,扩散角法、汉森加权平均法与本文公式的计算结果进行对比。

笔者采用有限元软件 PLAXIS (3D Foundation) 建立全断面模型进行模拟. 在数值模拟中, 选取 15 节点的高精度三角形单元, 地基土采用服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型, 涵洞基础采用理想线弹性模型, 模型四周采用法向约束, 模型底面采用固定约束. 将硬壳层上的路堤填土和涵洞荷载等效为均布荷载施加在硬壳层上, 不考虑土体固结影响. 在分析路堤填筑加载过程中, 利用平板载荷试验方法得到涵洞基础荷载与沉降量的关系曲线 (P - S 曲线), 进而确定极限承载力. 涵洞路堤纵向断面如图 3 所示.

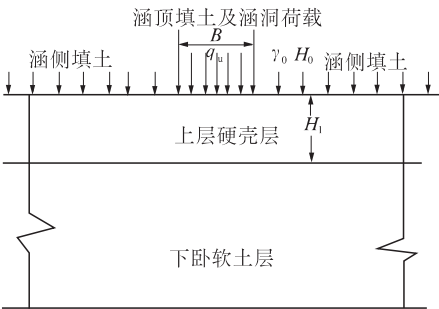


图 3 涵洞纵向断面
Fig. 3 Culvert longitudinal section

在数值模拟中, 地基土总厚度 $h = 15\text{ m}$, 路堤宽 $b = 20\text{ m}$, 路堤长 $l = 20\text{ m}$, 模型如图 4 所示, 模拟中所采用的土体物理力学参数见表 1, 参数分析中, 其变化情况将在后述数值模拟中进行说明.

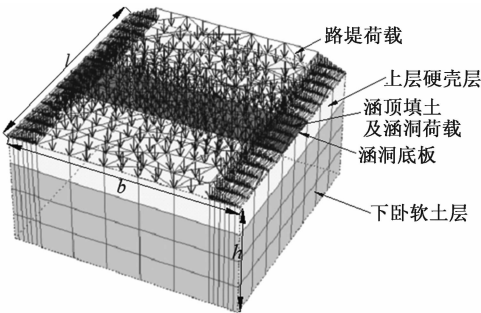


图 4 3-D 有限元计算模型
Fig. 4 3-D model for finite element calculation

表 1 模型计算参数

Tab.1 Model parameters of the calculations					
材料名称	模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
硬壳层	30	0.2	16	20	18
下卧软土层	15	0.35	10	10	15
填土	30	0.27	2.5	25	20
涵洞基础	30 000	0.15	—	—	25

2.2 承载力影响因素分析
2.2.1 填土高度的影响

考虑路堤填土高度 H_0 对地基极限承载力的影

响, 选取的模拟参数如下: 硬壳层厚度 $H_1 = 3\text{ m}$, 重力荷载从 0 增加到 200 kPa, 即填土高度从 0 m 增加到 10 m, 涵洞基础宽长比 $B/L = 0.2$, 将 4 种计算方法得到的结果对比, 其极限承载力随填土高度的变化规律如图 5 所示.

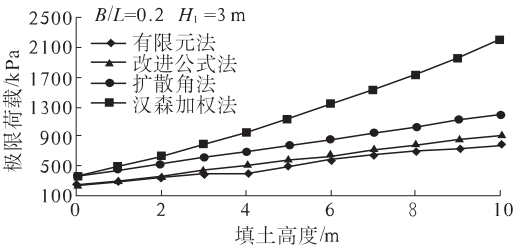


图 5 填土高度对极限承载力影响
Fig. 5 Embankment height impact on ultimate bearing capacity

由图 5 可知, 不同方法计算的极限承载力均随着填土高度的增加而增大, 且当填土高度 $H_0 \leq 1\text{ m}$ 时, 同一填土高度的极限荷载相差都不是很大; 当 $H_0 > 1\text{ m}$ 时, 改进公式法和数值模拟的计算结果较其他两种方法更为接近. 随着路堤填土的增高, 这种差距也越来越大. 而汉森加权法与其他 3 种方法计算结果相差很大的原因是软土硬壳层地基上下两层土的强度差别很大, 故按照加权平均法计算承载力必然会引起较大误差.

2.2.2 硬壳层厚度的影响

考虑硬壳层厚度 H_1 对极限承载力的影响, 选取填土高度 $H_0 = 10\text{ m}$, 涵洞底板宽长比 $B/L = 0.2$ 时, 由有限元模拟和不同极限承载力公式得出的具有硬壳层的涵洞地基极限承载力变化规律, 如图 6 所示.

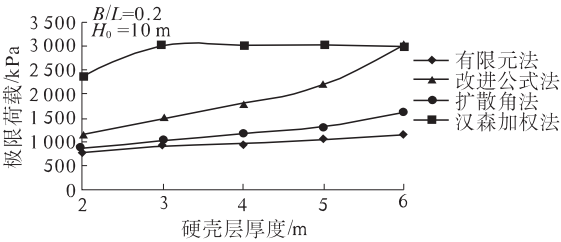


图 6 硬壳层厚度对限承载力影响
Fig. 6 Impact of crust layer's thickness on the ultimate bearing capacity

由图 6 可知, 不同方法计算的极限承载力均随着硬壳层厚度的增加呈非线性增大趋势. 当 $H_1 \geq 3\text{ m}$ 时, 汉森加权法计算结果逐渐趋于稳定不再增长, 这是因为在两层土体强度一定的条件下, 由汉森建议的近似确定持力层的最大深度

Z_{\max} 已达到最大值,其持力层范围内土的容重和强度指标计算的加权平均值均不变,从而按照均质地基计算的承载力也不会发生变化.从图 6 中还可以看出,由扩散应力角法计算的结果增长率大于改进公式法和有限元法.由上述结果可知,在具有硬壳层的涵洞地基极限承载力计算过程中,有限元法和改进公式法的计算结果相近.

2.2.3 基础宽长比的影响

考虑涵洞基础 B/L (宽长比) 对极限承载力的影响,笔者在 $B/L=0.1、0.2、0.3、0.4$,填土高度 $H_0=10\text{ m}$,硬壳层厚度 $H_1=3\text{ m}$ 的条件下,对 4 种方法计算的涵洞地基极限承载力结果进行对比分析,变化规律如图 7 所示.

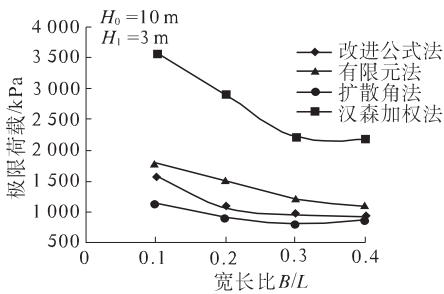


图 7 基础宽长比 B/L 对极限承载力的影响

Fig.7 Impact of foundation's length-width ratio B/L on the ultimate bearing capacity

由图 7 可知,4 种方法计算的结果均随宽长比 B/L 的增大呈非线性减小的趋势,汉森加权法计算的结果减小的速率最大,有限元法最小,并且 B/L 越大,改进公式法、扩散角法和有限元法得到的结果越接近.同一宽长比条件下,极限荷载大小顺序为:汉森加权法 > 扩散应力角法 > 改进公式法 > 有限元法.

2.2.4 地基土黏聚力比和内摩擦角比的影响

考虑地基土黏聚力比和内摩擦角比对极限承载力的影响,在填土高度 $H_0=10\text{ m}$,硬壳层厚度 $H_1=3\text{ m}$,涵洞底板宽长比 $B/L=0.2$ 的条件下,对 4 种方法计算的涵洞地基极限承载力结果进行对比分析,结果如图 8 和图 9 所示.

由图 8 可知,随着黏聚力比的增大,汉森加权法计算结果呈线性增长,扩散角法结果保持不变,改进公式法结果略有降低,而有限元法计算结果呈非线性增长,增加速率非常缓慢.

由图 9 可知,随着内摩擦角比的增大,汉森加权法和有限元法结果均呈非线性增长趋势,但有限元法增长非常缓慢;扩散角法结果保持不变,改进公式法结果先增大后略有减小.同时还可以看

出,与填土高度、硬壳层厚度和基础宽长比 B/L 相比,上下两层土体的黏聚力比和内摩擦角比对地基的极限承载力的影响较小.

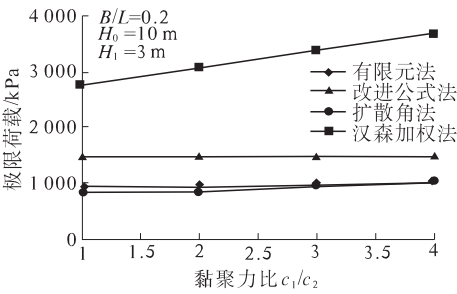


图 8 黏聚力比对极限承载力的影响

Fig.8 Ratio of cohesion on the ultimate bearing capacity

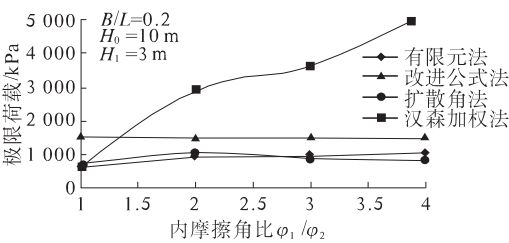


图 9 内摩擦角比对极限承载力的影响

Fig.9 Ratio of internal friction's angle on the ultimate bearing capacity

3 算例比较

文献[8]和文献[4]对同一个实例进行了验证:杭州市某住宅小区,根据钻探资料,该建筑场地表层有 0.5 m 厚的耕田土,容重 $\gamma_0=20\text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi_0=8^\circ$,黏聚力 $c_0=5\text{ kPa}$,约 2.5 ~ 3.0 m 厚的亚黏土层和轻亚黏土层组成的硬壳层,其 $\gamma_1=19\text{ kN/m}^3$, $\varphi_1=15^\circ$, $c_1=18\text{ kPa}$,下卧软土层平均容重 $\bar{\gamma}_2=17.8\text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi_2=0^\circ$,黏聚力 $c_2=18\text{ kPa}$,基础宽度 $B=12\text{ m}$, $L=67.4\text{ m}$,埋置深度 1 m.两篇文献计算得到其极限承载力分别为 131.15、162.98 kPa.将其结果与 4 种计算方法所得结果进行对比,见表 2.

从表 2 中可以看出,对同一地质条件下,利用不同方法计算的双层地基极限承载力结果,汉森加权法较之其他方法差异最大,其中扩散应力角法结果比文献[8]、[4]和有限元法分别大 41.3%、13.8% 和 54.5%;采用笔者改进的计算公式法结果比文献[8]大 3.1%,比有限元法大 9.3%,而比文献[4]小 19.5%,故更为接近实例中计算的极限承载力数值,证实了本研究方法的适用性和准确性.

表 2 不同计算方法得出的双层地基极限承载力

Tab.2 Different computing methods of ultimate bearing capacity of two-layered foundation						kPa
计算方法	有限元法	改进公式法	文献[8]中方法	文献[4]中方法	扩散应力角法	汉森加权法
极限承载力	120.0	135.23	131.15	162.98	185.41	287.96

4 结论

1)同一填土高度下,所确定的极限承载力大小顺序为:汉森加权法 > 扩散角法 > 改进公式法 > 有限元法,且随着路堤填土的增高,4 种方法计算的极限承载力差值也越来越大.

2)随着硬壳层厚度的增加,除了汉森加权法计算结果趋于稳定以外,其他 3 种方法计算值均有所增长;基础宽长比增大,4 种方法计算值均减小.

3)硬壳层与下卧软土层的黏聚力比和内摩擦角比对地基承载力有复合影响,黏聚力比和内摩擦角比的变化对汉森加权法计算值影响最大,应力扩散角法不变,而对有限元法和改进公式法影响比较一致,均较缓.改进公式法计算结果与有限元法以及工程实例的计算结果较为接近,证实了改进公式法的适用性.

参考文献:

[1] 刘保健,谢永利,程海峰,等.上埋式公路涵洞地基

及基础的设计[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(3):17-20.

[2] 郑俊杰,马强,陈保国.高填方涵洞地基承载力分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(4):115-118.

[3] 杨果林.硬壳层软土地基极限承载力研究[J].湘潭矿业学院学报,1995,10(2):51-56.

[4] 金问鲁,谢德贵.双层地基承载力的计算及其在天然软土地基中的应用[J].岩土工程学报,1987,9(1):61-71.

[5] 中华人民共和国交通部.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.

[6] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:水利水电出版社,1996.

[7] 问延煦.双层地基承载力与变形特性研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007.

[8] 徐洋,谢康和,刘干斌,等.复合双层地基的极限承载力计算[J].土木工程学报,2004,37(4):82-86.

Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Culvert Foundation with Crust Layer

MA Qiang, ZHU Jian, XING Wenwen, HU Xing

(School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: According to the characteristics of the load of the lateral embankment filling on the culvert, based on the limit equilibrium theory and the ultimate bearing capacity formula of Meyehof and Hanna, the formula for calculating ultimate bearing capacity of the culvert foundation with crust layer was deduced. A series of comparisons were carried out among the calculation results obtained from Hansen’s weighted average method, the stress diffusion angle method, the improved formula proposed in this paper and the finite element method. And the influences of the height of embankment filling, the thickness of crust layer, the ratio of cohesive and the internal friction angle of the crust layer to the subjacent soil layer on the ultimate bearing capacity were investigated, in addition, a comparison of the results was made from engineering practical examples and the calculation results from the four theoretical calculation methods. The results show that with the increase of height of embankment filling and the thickness of crust layer, the results of the foundation bearing capacity calculated by the proposed improved formula method and finite element method are the closest. The influence of the variations of cohesive ratio and internal friction angle ratio on the calculated results of the proposed formula method is more consistent with that of the finite element method. The results of the proposed formula method are more approximate to the engineering practical examples than Hansen’s weighted method and the stress diffusion angle method.

Key words: crust layer; culvert; foundation; ultimate bearing ability; numerical simulation