

界面摩擦及地基刚度对箱形通道受力影响研究

马增琦¹, 丁楠², 姜健¹, 杨大海²

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510623; 2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司)

摘要:为探究通道与土体间的界面摩擦系数以及地基刚度对装配式箱形通道受力的影响,考虑土与结构的相互作用,建立二维有限元模型,并针对不同填土高度进行分析。研究表明:随着界面摩擦系数的提高,通道顶部土压力逐渐减小,当顶部土压力的减小程度小于摩擦力的增大程度时,基底应力表现出增大现象;反之,基底应力表现出减小现象;界面摩擦系数对结构最大弯矩影响较小,对结构最大轴力影响较大;摩擦系数为0.4~0.9时,前者变化幅度最大为3.2%,后者变化幅度最大为26.8%;随着地基刚度的增加,基底应力集中现象越来越明显;地基刚度对结构最大弯矩影响较大,对结构最大轴力影响较小;地基刚度为45~109 MPa/m时,前者变化幅度最大为43.7%,后者变化幅度最大为17.7%。实际工程中,地基刚度需综合考虑地基承载力和结构内力的要求,无需过分追求增加地基刚度。

关键词: 装配式箱形通道; 二维有限元; 界面摩擦系数; 地基刚度; 基底应力; 内力

装配式通道在国外工程中已大量采用,在中国应用较少。随着中国公路建设技术水平的提高,工业化建造技术已成为公路行业转型升级的重要途径。为实现通道结构装配化,安徽省经过不断探索,创新性地提出了四构件装配式通道,该通道具有工程质量好、施工速度快和成本造价低等诸多优点,应用效果较好。云茂高速公路推广应用了37座。

装配式通道包含箱形通道与管形通道两种形式。中国学者也做过一些研究。严丹青等、李雪玲等对装配式管形通道进行二维与三维有限元数值分析,研究土与结构的相互作用以及通道结构的受力特性,并对地震作用下的管形通道结构动力反应特性进行研究;何淳健,王建国等,边学成等对管形通道周围土压力分布进行了理论和试验分析;胡可等对管形通道提出土与通道联合作用的“有限元m法”计算方法,并对装配式箱形通道结构性能进行了理论与试验分析。但针对通道与土体间的界面摩擦系数以及地基刚度对装配式箱形通道受力的影响,尚未有文献进行研究。不同于常规的箱形通道,装配式箱形通道在顶板与侧墙接头位置设置铰接,且壁厚较薄,约为常规箱形通道的30%,结构刚度较常规箱形通道小。而且,在一定受力条件下,通道与周围土体可能会发生滑移现象,这对结构受力有一定影响。

该文分别针对2、5与8 m³种填土工况,通过数值模拟,探究通道与土体间的界面摩擦系数及地基刚度对基底应力和通道结构内力的影响,以进一步探索装配式通道受力机理,补充完善理论研究成果,可为工程实际应用提供参考。

1 装配式箱形通道介绍

以广东云(浮)茂(名)高速公路工程中的装配式箱形通道为研究对象。该通道净空为4 m×3.5 m,壁厚为0.3 m;箱形通道由四构件组成,其中顶板、侧墙为预制方式,底板为现浇方式,顶板与侧墙为铰接连接,详细尺寸如图1所示。

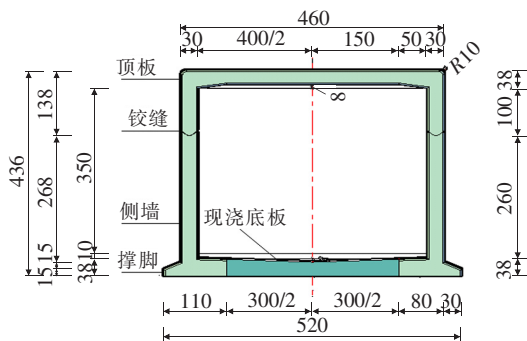


图1 装配式箱形通道断面图(单位:cm)

收稿日期:2020-06-12(修改稿)

基金项目:广东省交通运输行业地方标准项目(编号:标准研-2017-014)

作者简介:马增琦,男,硕士,高级工程师, E-mail:794299200@qq.com

根据地质勘察报告,确定分析中采用的主要材料参数见表 1。通道两侧范围内采用级配碎石回填并夯实,基底以下采用 40 cm 级配碎石及 10 cmC25 混凝土进行处理,处理宽度每侧超出通道结构 50 cm。

表 1 材料参数

材料类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
箱形通道 (C40)	32 500	0.20	—	—	25
回填土	20	0.35	50	30	18
地基土	10	0.42	10	25	17
级配碎石	350	0.20	0	42	21

2 土体—通道有限元分析

2.1 土体—通道有限元模型

采用 Ansys 建立土体—通道相互作用的二维有限元模型(图 2)。其中,土体选用平面应变单元 Plane82,箱形通道结构选用梁单元 Beam189,顶板与侧墙采用释放单元自由度的方式实现铰接。对于通道结构与土体的相互作用,利用 Ansys 软件中的接触单元(接触对 Target169 和 Contal72)模拟。

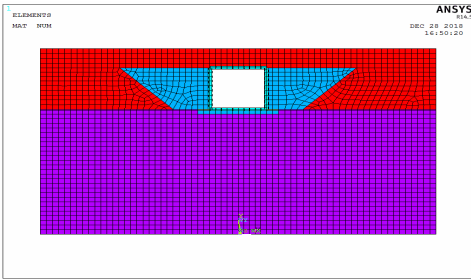


图 2 土体—通道相互作用有限元模型

通道结构材料采用线弹性模型模拟,土体材料采用理想弹塑性 Drucker—Prager 模型模拟。Drucker—Prager 模型广泛应用于颗粒状材料,如土壤、岩石等。与金属塑性不同,对于 DP 模型,屈服面是与压力有关的 Von Mises 面,在主应力空间画出的屈服面为一圆锥形:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{s\}^T [M] \{s\} \right] = \sigma_y \tag{1}$$

式中: σ_m 为平均应力; β 为材料常数; $\{s\}$ 为偏应力; $[M]$ 为常数矩阵。

材料常数:

$$\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}; \sigma_y = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \tag{2}$$

式中: φ 为材料的内摩擦角; c 为材料黏聚力。

通道与填土之间的接触关系以库仑摩擦定律描述:

$$\tau_{crit} = up \tag{3}$$

式中: τ_{crit} 为极限剪应力,若滑动力小于 τ_{crit} ,认为接触面处于黏合状态,否则将发生相对滑移; u 为摩擦系数; p 为法向接触应力。

考虑到边界条件对通道周围应力状态的扰动影响以及计算精度要求,建模时通道两侧及地基土体取 3 倍通道结构尺寸。

边界条件:地基土底部采用固定约束,土体两侧边界位置约束水平位移。

2.2 界面摩擦系数对基底应力和结构内力的影响

2.2.1 通道基底应力影响因素

土体对通道的竖向作用模型如图 3 所示。

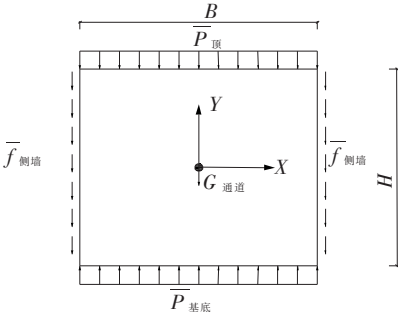


图 3 土体对通道竖向作用模型

根据力的平衡条件列出方程如下:

$$\bar{p}_{基底} \times B = \bar{p}_{顶} \times B + \bar{f} \times H + G_{通道} \tag{4}$$

式中: $\bar{p}_{基底}$ 为基底平均应力; $\bar{p}_{顶}$ 为通道顶部平均土压力; \bar{f} 为土体对侧墙的平均摩擦应力; $G_{通道}$ 为通道自重; B 为通道结构宽度; H 为通道结构高度。

由式(4)可知:基底应力的影响因素有:① 通道顶部土压力;② 土体对侧墙的摩擦应力;③ 通道自重。

2.2.2 通道顶部与基底土压力分布

图 4 为通道周围土压力典型分布规律。

由图 4 可以看出:通道顶部与底部应力均呈凹槽状非线性分布。前者是由于通道结构刚度远大于两侧的填土刚度,通道顶部上覆土柱与外侧土柱间存在着沉降差,进而产生相互作用的摩擦力(外侧土柱对通道顶部上覆土柱有向下的拖拽力),导致通道顶部产生明显的应力集中现象;后者是由于侧墙竖向轴力直接传至下方地基土,并逐渐在地基土中扩散,导致基底土压力应力集中。

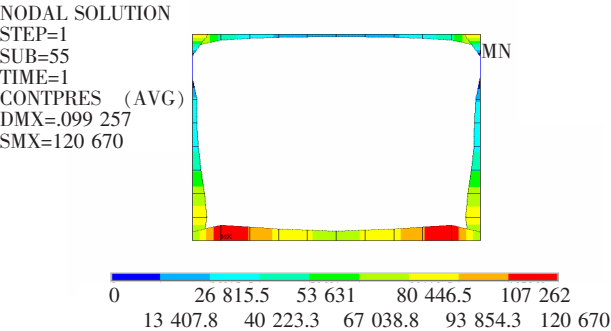


图4 通道周围土压力分布(单位:Pa)

2.2.3 界面摩擦系数对基底应力的影响

通道与土体的界面摩擦系数与土体性质、界面粗糙度等有关。工程实践中,通道回填土一般要求为砂类土、砾类土等透水性材料或石灰土等,其与混凝土界面的摩擦系数一般为0.4~0.9。图5~7为2 m填土高度下不同界面摩擦系数的通道受力变化情况,5、8 m填土高度下的计算结果限于篇幅不再单独列出(下同)。

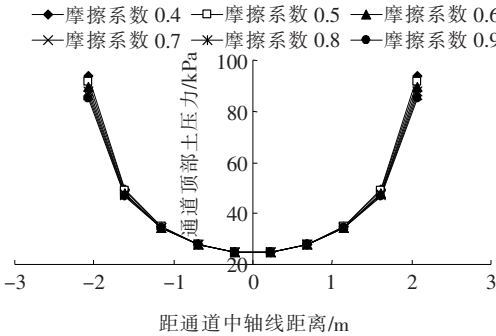


图5 不同界面摩擦系数下,通道顶部土压力分布情况(填土2 m)

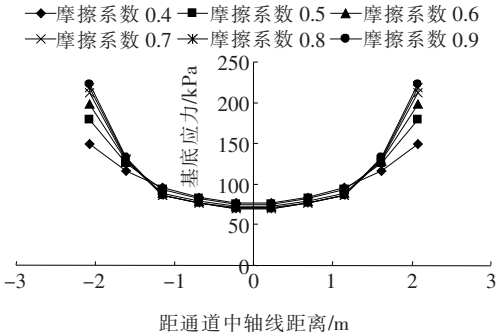


图6 不同界面摩擦系数下,通道基底应力分布情况(填土2 m)

经计算,随着摩擦系数的提高:① 顶部土压力逐渐减小,但降幅不大,且降幅与填土高度基本无关,当摩擦系数由0.4变至0.9时,3种填土高度下顶部土压力峰值下降7.34%~9.41%;② 2 m填土高度下,

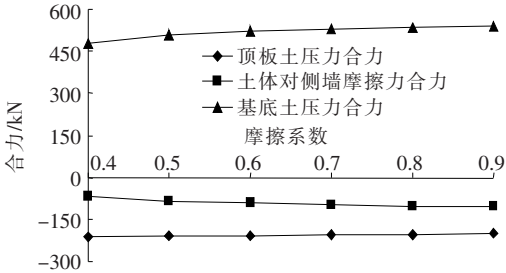


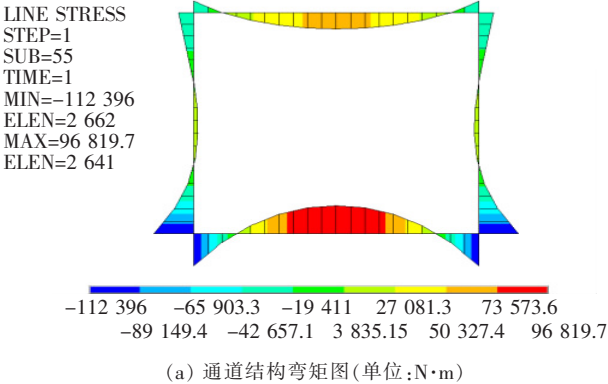
图7 不同界面摩擦系数下,土对通道结构的竖向作用情况(填土2 m)

通道基底应力峰值逐渐增大,当摩擦系数由0.4变至0.9时,增大50%;③ 5 m填土高度以上时,基底应力峰值先增大后减小;④ 填土高度越高,基底应力峰值最大增幅越小。

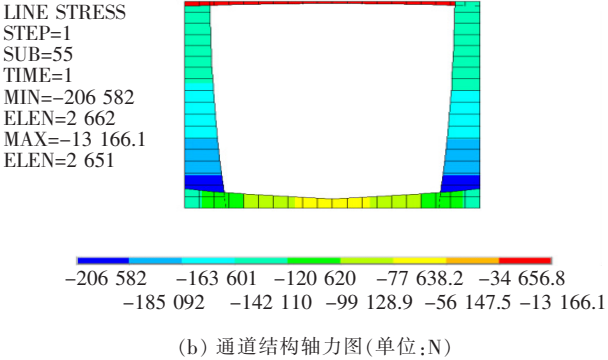
原因分析:随着通道与土体界面摩擦系数的增大,周围土体对侧墙的摩擦力越大,侧墙对土体的约束作用越强,通道顶部上覆土柱与外侧土柱间的变形差越小,通道顶部的土压力越小。当顶部土压力的减小程度小于土体对侧墙摩擦力的增大程度时,基底应力表现出增大现象;反之,基底应力表现出减小现象。

2.2.4 界面摩擦系数对结构内力的影响

填土作用下,通道结构的弯矩和轴力分布情况如图8所示。



(a) 通道结构弯矩图(单位:N·m)



(b) 通道结构轴力图(单位:N)

图8 填土作用下,通道结构内力图

由图 8 可以看出:通道结构受力最不利位置为顶、底板跨中及角点位置,即图 9 所示的 A、B、C、D 点,故分析时取 A~D 点作为最大内力观察点进行内力分析。

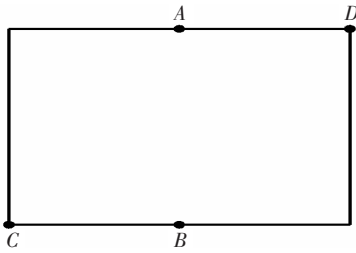


图 9 通道结构受力最不利典型位置

图 10、11 为 2 m 填土高度下通道顶板、底板、侧墙最大弯矩、最大轴力随界面摩擦系数的变化规律。

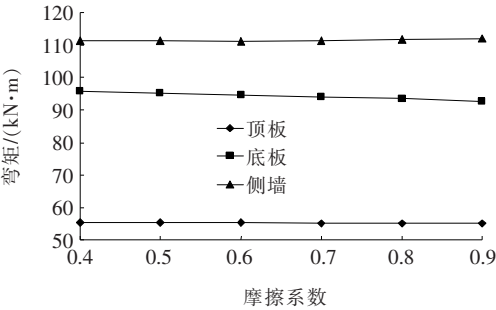


图 10 不同界面摩擦系数下,通道顶板、底板、侧墙最大弯矩变化情况(填土 2 m)

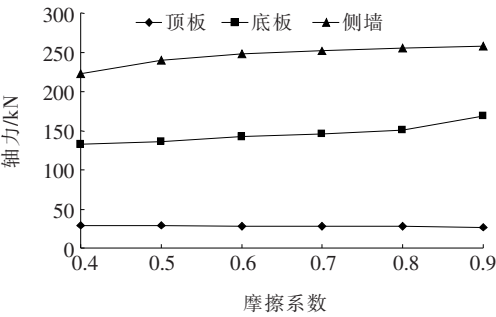


图 11 不同界面摩擦系数下,通道顶板、底板、侧墙最大轴力变化情况(填土 2 m)

经计算,随着界面摩擦系数的增大:① 通道顶、底板最大弯矩减小、侧墙最大弯矩增大;其中,底板最大弯矩变化幅度最大,最大为 3.2%;且填土高度越高,各构件最大弯矩变化幅度越大;② 顶板最大轴力减小、底板与侧墙最大轴力增大;其中,侧墙最大轴力变化幅度最大,最大为 26.8%;且填土高度越高,最大轴力变化幅度越小。

综上所述,界面摩擦系数对结构最大弯矩影响较小,对结构最大轴力影响较大;摩擦系数为 0.4~0.9

时,前者变化幅度最大为 3.2%,后者变化幅度最大为 26.8%。

2.3 地基刚度对基底应力和结构内力的影响

2.3.1 地基刚度对基底应力的影响

通道的荷载形式是柔性荷载,填土—通道—地基三者是一个协调变形体系,地基刚度的大小直接影响结构受力。工程中地基刚度常采用地基系数 K_{30} 方法描述。以下对不同地基刚度的通道基底应力与通道结构内力进行分析。模型中通过对地基土进行不同深度的换填(换填材料为级配碎石)来模拟通道地基刚度的变化,换填深度从 0.1 m 增加到 4 m。不同换填深度与地基刚度的对应关系如表 2 所示。

表 2 换填深度与地基刚度的对应关系

换填深度/m	地基刚度/(MPa·m ⁻¹)	换填深度/m	地基刚度/(MPa·m ⁻¹)
0.1	45	2.5	92
0.5	53	3.0	98
1.0	65	3.5	104
1.5	76	4.0	109
2.0	84		

图 12 为 2 m 填土高度下,不同地基刚度的通道基底应力分布情况。

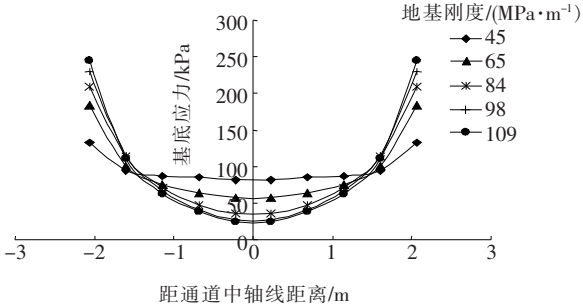


图 12 基底应力随地基刚度的变化情况(填土 2 m)

经计算,随着地基刚度的增加:① 侧墙下方的基底应力逐渐增大,通道中轴线位置的基底应力逐渐减小,基底土压力应力集中现象越明显;② 随着填土高度的增加,侧墙下方与通道中轴线位置的基底应力变化幅度均先减小后增大,侧墙下方的基底应力最大变化幅度为 84.1%,通道中轴线位置的基底应力最大变化幅度为 69.7%。

分析其原因,随着地基刚度的不断增加,侧墙竖向轴力向地基土传力的分散作用越差,应力集中效应越明显。

2.3.2 地基处理深度对结构内力的影响

图13、14为2 m填土高度下,通道顶板、底板、侧墙最大弯矩与最大轴力随地基刚度的变化情况。

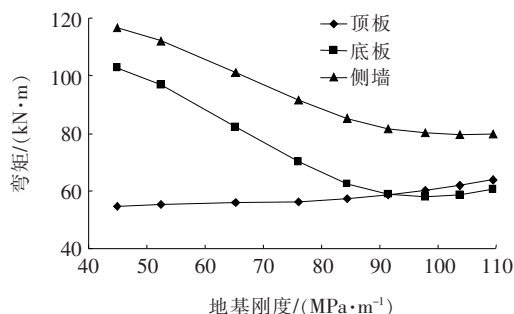


图13 通道顶板、底板、侧墙最大弯矩随地基刚度的变化情况(填土2 m)

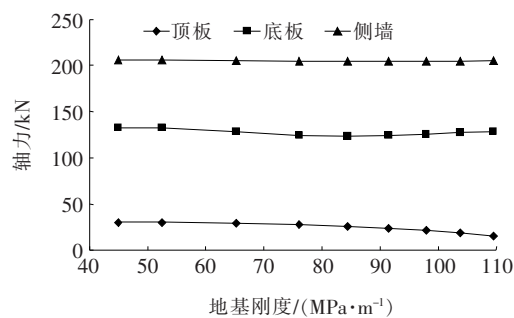


图14 通道顶板、底板、侧墙最大轴力随地基刚度的变化情况(填土2 m)

经计算,随着地基刚度的增大:① 顶板最大弯矩逐渐增大,底板与侧墙最大弯矩先减小后增大,当地基刚度达到98 MPa/m时,底板与侧墙弯矩达到最低水平;其中,底板最大弯矩变化幅度最大,最大为43.7%;随着填土高度的增加,顶板与底板最大弯矩变化幅度基本保持不变,侧墙最大弯矩变化幅度在5 m以下填土高度范围内有所降低,但降低程度有限,在5 m以上填土高度时,基本保持不变;② 顶板轴力逐渐减小、底板轴力先减小后增大,侧墙轴力在2 m填土高度时先减小后增大,在5 m与8 m填土高度时增大;其中,侧墙最大轴力变化幅度最大,最大为17.7%。随着填土高度的增加,顶、底板最大轴力变化幅度减小,侧墙最大轴力变化幅度增大。

3 结论

(1) 随着通道与土体界面摩擦系数的增大,通道顶部土压力逐渐减小。当顶部土压力的减小程度小于摩擦力的增大程度时,基底应力表现出增大现象;反之,基底应力表现出减小现象。

(2) 界面摩擦系数对结构最大弯矩影响较小,对结构最大轴力影响较大;摩擦系数为0.4~0.9时,前者变化幅度最大为3.2%,后者变化幅度最大为26.8%。

(3) 随着地基刚度增加,侧墙下方的基底应力逐渐增大,通道中轴线位置的基底应力逐渐减小,基底土压力应力集中现象越明显。

(4) 地基刚度对结构最大弯矩影响较大,对结构最大轴力影响较小;地基刚度为45~109 MPa/m时,前者变化幅度最大为43.7%,后者变化幅度最大为17.7%。分析表明:当地基刚度达到98 MPa/m时,底板与侧墙弯矩达到最低水平。因此,在通道设计中,地基处理后刚度需综合考虑地基承载力和结构内力的要求,无需过分追求增加地基刚度,处理后地基刚度取100~120 MPa/m是合适的。

参考文献:

- [1] 颜丹青,王建国.装配式钢筋混凝土管型通道数值计算模型研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010(4).
- [2] 颜丹青,王建国,胡可.装配式钢筋混凝土管型通道地震响应分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012(1).
- [3] 李雪玲,胡可,陶双龙,等.装配式钢筋混凝土斜交管型通道有限元分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2011(9).
- [4] 何淳健.装配式管型通道土压力和结构内力分析[D].浙江大学硕士学位论文,2009.
- [5] 王建国,颜丹青.装配式钢筋混凝土管型通道数值模拟与现场试验[J].中国公路学报,2010(1).
- [6] 边学成,申文明,马祖桥,等.不同填土管涵土压力模型试验和数值模拟研究[J].土木工程学报,2012(1).
- [7] 胡可.“装配式钢筋混凝土管形通道”联合作用体系计算[J].地下空间与工程学报,2012(S1).
- [8] 胡可,张其云,马祖桥,等.“装配式钢筋混凝土管形通道”设计体系研究[J].公路交通科技(应用技术版),2010(10).
- [9] 胡可,杨晓光,陈发根,等.公路装配式钢筋混凝土通道[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [10] 邓楚键,何国杰,郑颖人.基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究[J].岩土工程学报,2006(6).
- [11] GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [12] 宫全美,张达石.高速铁路地基刚度的合理取值范围[J].同济大学学报(自然科学版),2004(10).
- [13] 魏连雨,陈兆南,郑彦军,等.公路路基FRPM管涵洞受力变形特性研究[J].中外公路,2018(1).