文章编号:1005-0523(2024)04-0080-10

大断面管幕箱涵隧道开挖面极限支护压力研究

刘 宇[1],袁齐虎[2],杨新安[1],李路恒[1],张兴其[3]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2. 中铁四局集团第四工程有限公司,安徽 合肥 230012;
3. 合肥市市政设计研究总院有限公司,安徽 合肥 230031)

摘要:【目的】箱涵隧道具有断面大、推进缓慢等特点,开挖面易失稳。**【方法】**依托合肥市庐州大道浅埋隧道下穿机场跑道实例工程,利用极限平衡理论、摩尔-库伦强度准则、全覆土重理论进行理论推导,并结合大型三维精细化数值模型,对开挖面极限支护压力进行研究。**【结果】**结果表明:提出了一种简便的管幕作用下大断面箱涵隧道开挖面极限支护压力计算方法。基于此,通过毕肖普条分法计算值与文章提出的极限支护压力计算值相比较,误差极小,证明了该方法的准确性。通过建立管幕箱涵施工三维数值模型,发现地表沉降量和开挖面纵轴线方向位移量随着支护压力的增大而减小,并趋于稳定状态。当支护压力超过静止土压力时,上部土体受强挤压作用,开挖面状态易呈倒S形。**【结论】**以上结果可为相类似工程提供参考。

关键词:公路隧道;管幕箱涵工法;理论推导;数值模拟;极限支护压力

中图分类号:U455.47 **文献标志码:**A

本文引用格式:刘宇,袁齐虎,杨新安,等. 大断面管幕箱涵隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 华东交通大学学报,2024,41(4):80-89.

Study on Limit Support Pressure of Excavation Face of Large Section Pipe-Roof Box Culvert Tunnel

Liu Yu[1], Yuan Qihu[2], Yang Xin'an[1], Li Luheng[1], Zhang Xingqi[3]

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. The Fourth Engineering Co., Ltd. of CTCE Group, Hefei 230012, China; 3. Hefei Planning Design Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract:【Objective】 There are many characteristics of the box culvert tunnel, such as large section, slow construction progress and instability excavation face. **【Method】** Based on the project of shallow buried tunnel section of Luzhou Avenue in Binhu Science City of Hefei City, this study used limit equilibrium theory, Mohr-Coulomb strength criterion and full overburden weight theory to carry out theoretical derivation, and combined with large-scale three-dimensional fine numerical model to study the limit support pressure of excavation face. **【Result】** The results show that : it proposed a simple calculation method for the limit support pressure of the excavation face of large-section box culvert tunnel under the action of pipe curtain. Based on this, according to the calculated value of Bishop slice method, the error was very small. Compared with the calculated value of the limit support pressure proposed in this paper, which proves the accuracy of the method. Through the establishment of three-dimensional numerical model of pipe curtain box culvert construction, it is found that the surface settle-

收稿日期:2023-12-30
基金项目:安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2021-YF45)

ment and the displacement of the longitudinal axis of the excavation face gradually decrease with the increase of the support pressure and tend to be stable. When the support pressure exceeds the static earth pressure, the upper soil is subjected to strong extrusion, and the excavation face state is easy to be inverted S shape.【**Conclusion**】The above results can be used as a reference for related projects.

Key words: road tunnels; pipe roof box culvert construction method; theoretical derivation; numerical simulation; ultimate support pressure

Citation format: LIU Y, YUAN Q H, YANG X A, et al. Study on limit support pressure of excavation face of large section pipe-roof box culvert tunnel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 80−89.

【研究意义】随着我国城市的飞速发展，地面交通日趋复杂，城市内的浅埋大断面下穿隧道日益增多，各类暗挖施工技术由此应运而生[1]。其中管幕箱涵法[2]可用于任意断面形状隧道的穿越工程，尤其在城市内部的浅覆土、大断面下穿工程中具有明显的优势，在国内外均得到了广泛应用[3-4]。箱涵隧道断面大，且开挖缓慢，故如何维持开挖面的稳定是这类工程的难点。

【研究进展】国内外学者对此作了很多研究。谢雄耀等[5]通过模型试验探究管幕对维持大断面矩形开挖面稳定的作用。Lee等[6]研究了渗流对维持开挖面稳定的作用规律。刘奕晖等[7]提出了渗流作用下管幕箱涵开挖面稳定性极限平衡法，并通过工程实例和有限元模拟进行验证。李向阳[8]分别对钢管幕力学作用、大断面管幕箱涵隧道顶进过程中开挖面的稳定性进行分析。张晓峰[9]基于首都机场飞机滑行道下穿隧道工程，分析了管幕支护条件下箱涵隧道顶进过程中开挖面土体稳定性特征。Xie等[10]基于村山模型，将管幕结构近似为弹性地基梁，以此进行理论推导，总结出管幕对维持开挖面稳定的作用机制。

【创新特色】学者们对管幕箱涵施工下的开挖面稳定性从整体上进行了诸多研究，但是对于影响开挖面稳定的极限支护压力研究较少。且庐州大道管幕箱涵隧道下穿机场跑道实例工程由于未及时采取支护措施维持开挖面稳定，产生了较为明显的坍塌，急需开展相关研究。**【关键问题】**本文依托此工程，采取理论推导的方法，得出管幕作用下大断面箱涵隧道开挖面极限支护压力计算公式。同时利用毕肖普条分法对其进行验证。并通过建立三维精细化数值模型揭示了管幕作用下大断面箱涵隧道支护压力对维持开挖面稳定的作用机制，对类似工程具有指导意义。

1　开挖面极限支护压力计算

1.1　计算过程

大量理论研究和模型试验结果表明，在箱涵隧道顶推过程中，开挖面前方的三维松动区常表现为梯形楔形体[11]。管幕箱涵隧道与其他隧道有所不同，箱涵隧道的开挖面塌落体仅为钢管幕群支护范围之内的土体，箱涵隧道开挖面破坏模式可以近似等效为横向三棱柱，横向三棱柱的受力情况如图1所示。

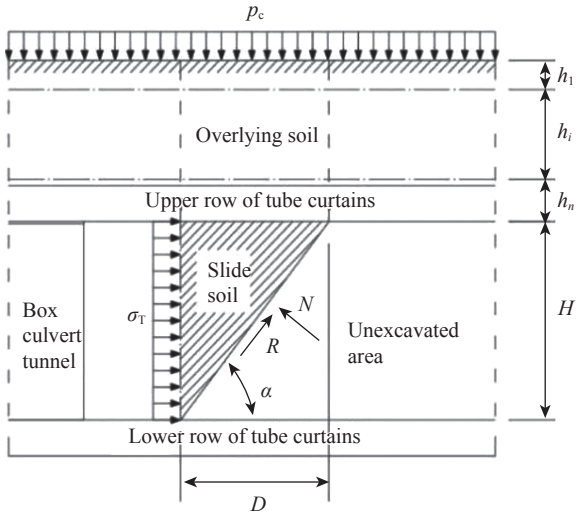


图1　塌落土体的受力状态
Fig. 1　Stress state of collapsed soil

图1中，N为滑动土体在滑动面上所承受的法向支撑力；R为滑动土体与稳定土体接触面的摩阻力；σ_T为开挖面上所施加的均布支护压力，由网格

工具头或箱涵掘进机等设备提供；p_c为机场跑道上方的附加荷载，由车辆荷载和堆砌荷载等构成；α为极限状态下的破裂角。

由于管幕将滑动土体与两侧的稳定土体分隔开，而管幕近似认为是光滑的，所以两者之间的抗剪力不予考虑。基于极限平衡理论与摩尔-库伦强度准则，可以推导出隧道开挖面极限支护压力的计算公式，具体方法如下所示。

将滑动土体简化为三棱柱，其自重G为

$$G=\gamma V=\frac{1}{2}\gamma HDB \tag{1}$$

式中：G为塌落土体的自重，kN；γ为塌落土体的容重，kN/m^3；V为塌落土体的体积，m^3；H为塌落土体的高度，m；D为塌落土体的宽度，m，$D=\frac{H}{\tan\alpha}$；B为箱涵隧道横断面宽度，m；α为滑动面破裂角，°。

由于隧道覆土厚度小于1倍隧道高度，隧道属于浅埋隧道，因此，上覆土体竖向压力应采用全覆土理论。塌落土体受到的竖向压力应取上覆土柱的质量加附加荷载，计算方法如下所示

$$p_v=(\gamma_s h+p_c)DB+n\gamma_i DS \tag{2}$$

式中：p_v为塌落土体受到的竖向压力，kN；p_c为附加车辆荷载，kPa；γ_s为上覆土体的容重，kN/m^3；γ_i为钢管幕的容重，kN/m^3；h为上覆土体的厚度，m；S为管幕的横截面积，m^2；n为上覆钢管的数量。

根据摩尔-库伦强度准则，滑动面摩阻力R为

$$R=N\tan\varphi+cLB \tag{3}$$

式中：N为滑动面法向支撑力，kN；φ为土体的内摩擦角，°；c为滑动土体的黏聚力，kPa；L为滑动面的长度，m，$L=\frac{H}{\sin\alpha}$。

滑动面的切向抗剪力$\tau=\frac{R}{K}=\frac{N\tan\varphi+cLB}{K}$，$K$为安全系数。当滑动体处于极限平衡状态时，安全系数$K$=1.0，此时切向抗剪力$\tau$应与滑动面摩阻力$R$相等。

此外，滑动土体还承受着开挖面的支护压力p_T，$p_T=\sigma_T HB$，σ_T为在开挖面上所施加的均布支护压力。当滑动土体处于极限平衡状态时，根据水平方向受力平衡条件可知

$$p_T+R\cos\alpha=N\sin\alpha \tag{4}$$

将式(3)代入，可以得到

$$p_T+(N\tan\varphi+cLB)\cos\alpha=N\sin\alpha \tag{5}$$

$$N=\frac{p_T+cLB\cos\alpha}{\sin\alpha-\tan\varphi\cos\alpha} \tag{6}$$

同样，根据竖向受力平衡条件可知

$$p_v+G=N\cos\alpha+R\sin\alpha \tag{7}$$

将式(3)代入，可以得到

$$p_v+G=N\cos\alpha+(N\tan\varphi+cLB)\sin\alpha \tag{8}$$

$$N=\frac{p_v+G-cLB\sin\alpha}{\cos\alpha+\tan\varphi\sin\alpha} \tag{9}$$

联立式(6)和式(9)可以得到

$$\frac{p_T+cLB\cos\alpha}{\sin\alpha-\tan\varphi\cos\alpha}=\frac{p_v+G-cLB\sin\alpha}{\cos\alpha+\tan\varphi\sin\alpha} \tag{10}$$

将式(1)和式(2)分别代入式(10)中，并规定

$$p_A=\left[(\gamma_s h+p_c)B+n\gamma_i S\right]H+\frac{1}{2}\gamma H^2 B \tag{11}$$

$$p_B=cHB \tag{12}$$

从而得到

$$(p_T\tan\varphi+p_B)\tan^2\alpha+(p_T-p_A)\tan\alpha+(p_A\tan\varphi+p_B)=0 \tag{13}$$

根据极限平衡理论，开挖面的破裂角α为

$$\alpha=45°+\frac{\varphi}{2} \tag{14}$$

从上式中可以看出，开挖面的破裂角仅与土体的内摩擦角有关，而与滑动体所受到的上覆荷载和支护压力无关。将其代入式(13)中，可以求得开挖面稳定时的极限支护压力p_T为

$$p_T=\frac{p_A\sin\alpha\cos\alpha-p_A\tan\varphi\cos^2\alpha-p_B}{\sin\alpha\cos\alpha+\tan\varphi\sin^2\alpha} \tag{15}$$

式中：p_A为上覆土体与塌落土体的折减压力；p_B为折减黏聚力。当实际施工中采取的支护力大于极限支护压力p_T时，开挖面处于稳定，此时滑动体不产生破裂角；当采取的支护力小于极限支护压力p_T时，滑动土体所受到的滑动力将大于抗剪力，此时开挖面将发生滑动。求解式(13)中的一元二次方程，得到开挖面在支护压力p作用下的理论破裂角α为

$$\alpha=\arctan\frac{(p_A-p)-\sqrt{(p_A-p)^2-4(p\tan\varphi+p_B)(p_A\tan\varphi+p_B)}}{2(p\tan\varphi+p_B)} \tag{16}$$

式(16)中理论破裂角可能会出现无解的情况，根据最不利情况(式(17))，可计算出产生破裂角的

开挖面的极限支护压力 p_T' 为

$$(p_A-p)^2-4(p\tan\varphi+p_B)(p_A\tan\varphi+p_B)=0 \quad (17)$$

$$p_T'=\left(\frac{\sin\varphi-1}{\cos\varphi}\right)^2 p_A+2\frac{\sin\varphi-1}{\cos\varphi}p_B \quad (18)$$

令 $m_\varphi=\dfrac{\sin\varphi-1}{\cos\varphi}$，上式可简化为

$$p_T'=m_\varphi^2 p_A+2m_\varphi p_B \quad (19)$$

由于土体的内摩擦角φ小于90°，故 m_φ 值恒小于0。根据式(19)可以看出，此时 p_A 的系数大于0，p_B 的系数小于0。因此，当压力 p_A 减小，也就是土体的上覆土压力和附加荷载降低时，极限支护压力将会减小。当压力 p_B 增大，也就是土体的黏聚力c增大时，黏聚力的抗剪作用进一步发挥，极限支护压力也会因此减小。

1.2　实例验证

滨湖科学城庐州大道浅埋隧道段位于合肥市包河区庐州大道与骆岗机场主跑道交界处，采用管幕箱涵法施工，隧道在里程K17+95~K19+33处下穿机场主跑道，平面交角约45.3°。管幕段长度为138 m，隧道顶最小覆土深度为5.1 m，最大为6.3 m，结构纵坡为−0.5%，其施工标准横断面如图2所示。

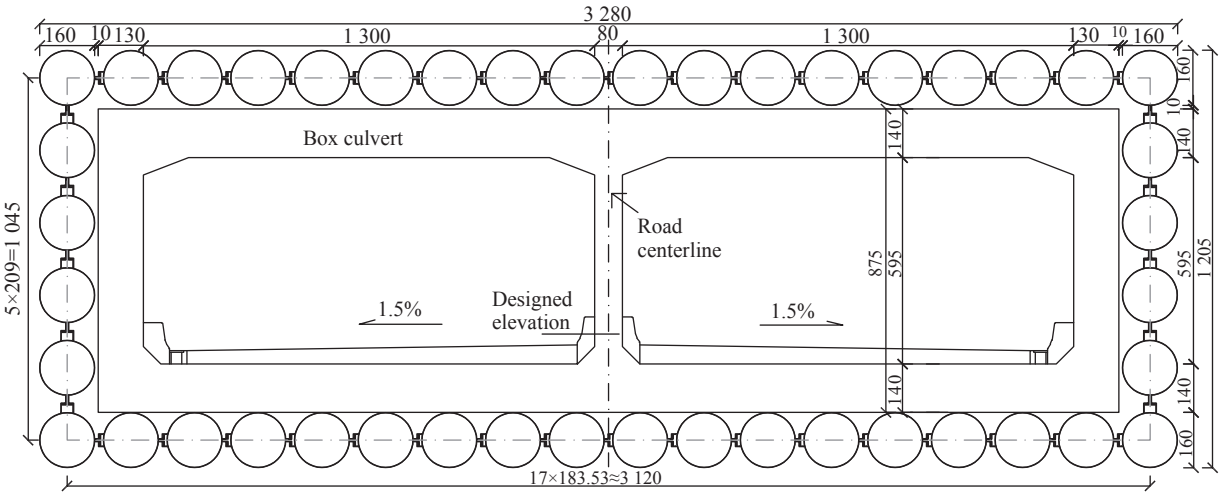


图2　管幕暗挖隧道标准横断面图(单位:cm)

Fig. 2　Standard cross-section diagram of pipe curtain tunnel(Unit: cm)

选用箱涵隧道始发井的剖面进行计算。其中，箱涵隧道宽度为29.4 m、高度为8.75 m。由于上排和两侧管幕与箱涵隧道间存在10 cm的空隙，因此，宽度B应为29.6 m，高度H应为8.85 m。该处隧道埋深为7.28 m，上覆土层包括①杂填土层，⑤$_1$黏土层和⑤$_2$黏土层，厚度分别为1.30，4.00 m和1.98 m，该剖面各土层的物理力学性质指标见表1。箱涵隧道上覆钢管16根，钢管幕直径为1.6 m，厚度为16 mm，容重为78.5 kN/m^3，上排钢管间距为0.235 m。另外，由于机场跑道有渣土车通过，机场跑道上的均布车辆荷载设置为20 kPa。

通过式(19)计算得到庐州大道箱涵隧道在顶推过程中的极限支护压力为85.35 kPa。除此之外，采用毕肖普条分法对上述箱涵隧道进行计算分析，如图3所示。可知，采用毕肖普条分法计算得到的极限支护压力为86.75 kPa(由于其计算过程较为复杂，不予详细叙述)。与上述推导出的极限支护压力所计算出的结果相比，误差仅为1.64%。因此，为了在实际施工过程中更加方便快捷地计算出箱涵隧道开挖面的支护压力，可以根据等效滑动体模型，采用推导出的极限支护压力公式进行计算。

表1　箱涵隧道上覆土层的物理力学性质指标

Tab.1　Physical and mechanical indexes of overlying soil layer of box culvert tunnel

Soil layer	Stratigraphic name	Soil cover thickness /m	Gravity density γ/(kN/m^3)	Cohesion c/kPa	Internal friction angle φ/(°)
①	Miscellaneous fill soil	1.30	19.0	10.0	8.0
⑤$_1$	Clay	4.00	19.9	74.5	14.4
⑤$_2$	Clay	1.98	20.0	68.7	15.0

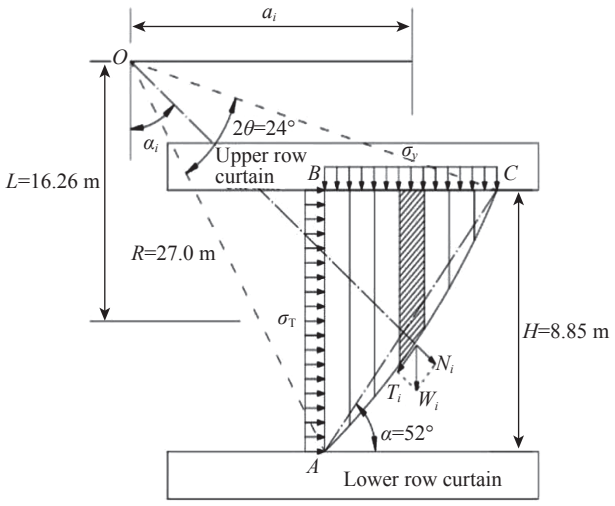


图3 管幕箱涵隧道毕肖普条分法计算示意图

Fig. 3 Calculation diagram of Bishop Slice Method for pipe-roof box culvert tunnel

2 管幕箱涵施工模拟

为探究支护压力对维持开挖面稳定作用的机制，依托庐州大道管幕箱涵隧道下穿机场跑道工程，采用有限元分析软件Midas GTS NX，建立一个包括机场跑道、钢管幕群和箱涵隧道的三维数值模型。

2.1 模型建立

模型以箱涵隧道顶进方向为y轴，其垂直方向为x轴，竖直方向为z轴。为减小边界约束对模拟结果的影响，模型纵断面尺寸设置为长度100 m，高度40 m，纵轴线方向总长138 m，与管幕箱涵隧道实际施工长度相同。模型轴测视图如图4所示，管幕箱涵隧道施工计算模型纵断面如图5所示。

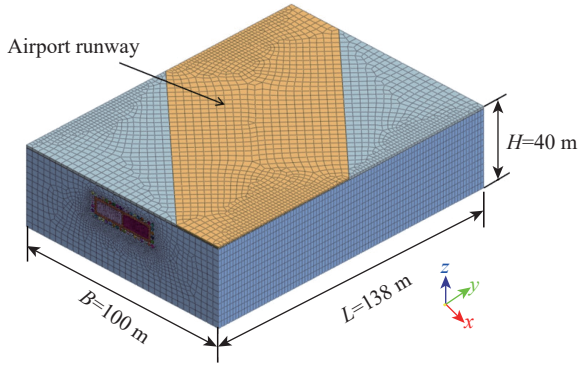


图4 管幕箱涵隧道三维模型轴测视图

Fig. 4 Axial view of three-dimensional model of pipe-roof box culvert tunnel

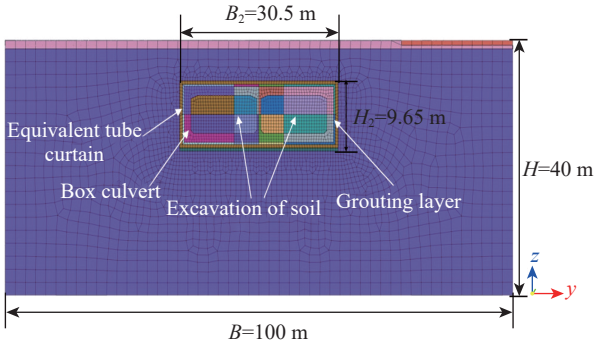


图5 管幕箱涵隧道等效三维模型横断面

Fig. 5 Cross section of equivalent three-dimensional model of pipe-roof box culvert tunnel

模型划分为两大部分：管幕段与箱涵隧道段。管幕之间通过锁口连接时，钢管幕群可以等效为整体刚性结构，材料为各向同性，采用实体单元模拟，本构模型为弹性本构，结构模型如图6所示。上排管幕埋深为5.58 m。通过等效刚度方法计算单元厚度为550 mm，相应材料密度为625.4 kg/m^3。此外，施工中需要填充浆液，故采用实体单元模拟涵周同步注浆层，注浆层厚度为350 mm，同步注浆压力设置为100 kPa。

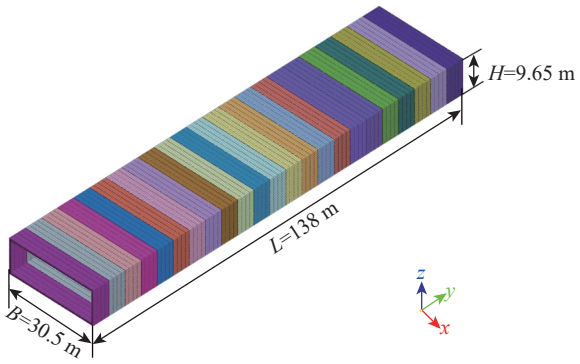


图6 钢管幕等效结构模型

Fig. 6 Equivalent structure model of steel pipe curtain

箱涵隧道横断面宽度为29.6 m，高度为8.75 m，长度为138 m。箱涵隧道顶板和底板厚度为1.4 m，左右两侧侧墙厚度为1.3 m，中隔墙厚度为0.8 m。箱涵隧道上覆土层厚度为7.28 m，主要穿越⑤$_2$黏土层。箱涵隧道采用实体单元模拟，本构模型为弹性本构，结构模型如图7所示。模型中箱涵隧道以6 m为一节，每次施工顶推一节。

隧道上覆机场跑道厚度为0.74 m，是沥青混凝土结构，采用实体单元模拟，本构模型为弹性本

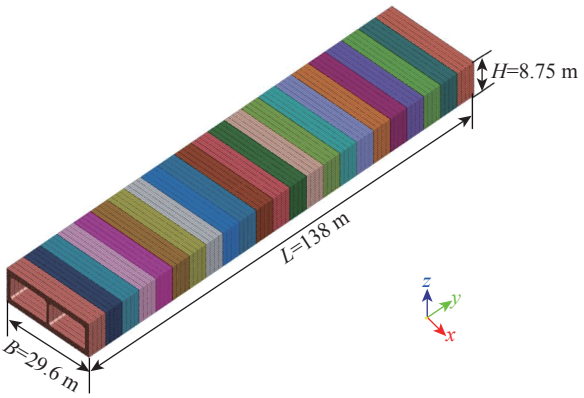


图7　箱涵隧道模型建立与网格划分

Fig. 7　Box culvert tunnel model establishment and grid division

构。由于机场跑道已经废弃，但在施工过程中有大量运渣车通过，故跑道上方的车辆荷载设置为20 kPa的均布荷载。

模拟施工工序为：先顶进管幕，再开挖土层，紧接着在开挖面施作支护压力，然后顶进一节箱涵和激活注浆层，循环进尺为6 m，其中开挖面和箱涵之间间隔一个循环进尺。

2.2　参数及边界条件设置

模型共设置有两个土层，采用实体单元模拟，本构模型采用修正摩尔-库伦本构模型。各地层的物理力学参数如表2所示。模型中各结构和材料的物理力学性质参数如表3所示。边界条件设置为：模型顶面不设置约束；模型4个侧面法向设置约束，其余方向自由；模型底面各个方向需设置约束。

3　计算结果分析

3.1　数值模型有效性验证

3.1.1　机场跑道沉降监测方案

结合工程地质条件和管幕施工情况，骆岗机场主跑道上沉降监测点布设如图8所示。在距管幕箱涵隧道施工起点的距离依次为22.26，68.33，114.4 m，且垂直隧道轴向上的位置布置3个监测断面。监测断面1和监测断面3均布设有19个测点，其中隧道范围内测点间距为3.0 m，隧道轮廓线外测点间距为5.0 m；监测断面2共布设25个测点，测点间距均为3.0 m，测点均布置在机场跑道上。

3.1.2　现场实测结果对比分析

为了验证三维数值模型结果的准确性，选择监测断面1和监测断面2的地表位移实测数据与数值模拟结果对比分析，如图9所示。

从图9(a)和图9(b)中可以看出，当箱涵顶推距离为5 m时，三维数值模型计算结果与现场实测曲线相关性较高，相关性系数分别为0.835和0.864，这表明数值计算模型可以较好地反映箱涵隧道实际顶进施工情况。而两个监测断面初期沉降过大主要是因为实际施工中箱涵隧道开挖面没有及时采取支护措施，在数值模拟中已考虑到这一点，故两者相关性较高。总体来说，数值模拟结果能够较好地反映箱涵顶推初期地表变形规律，具有较强的准确性。

3.2　开挖面稳定影响分析

箱涵开挖面采用全断面开挖的方式，单次施工进尺为6 m。开挖面的支护压力分别设置为0，20，

表2　模型土层物理力学性质参数

Tab.2　Parameters of physical and mechanical properties of model soil layer

Stratigraphic name	Thickness/m	Gravity density γ/(kN/m^3)	Poisson ratio v	Cohesion c/kPa	Angle of internal friction φ/(°)	Modulus of compression E_s/MPa
Miscellaneous fill soil	1.3	19.0	0.26	10.00	8	9.89
Clay	38.7	20.0	0.35	41.22	12	13.55

表3　模型结构材料的物理力学性质参数

Tab.3　Physical and mechanical parameters of model structural materials

Name of the material	Thickness/m	Elastic modulus E/MPa	Poisson ratio v	Gravity density γ/(kN/m^3)
Steel pipe pile wall	0.016	206.0	0.30	78.5
Runway subgrade structure	0.740	32.5	0.20	25.0
Box culvert tunnel	/	34.5	0.20	25.0
Grouting reinforcement area	/	30.0	0.25	21.0

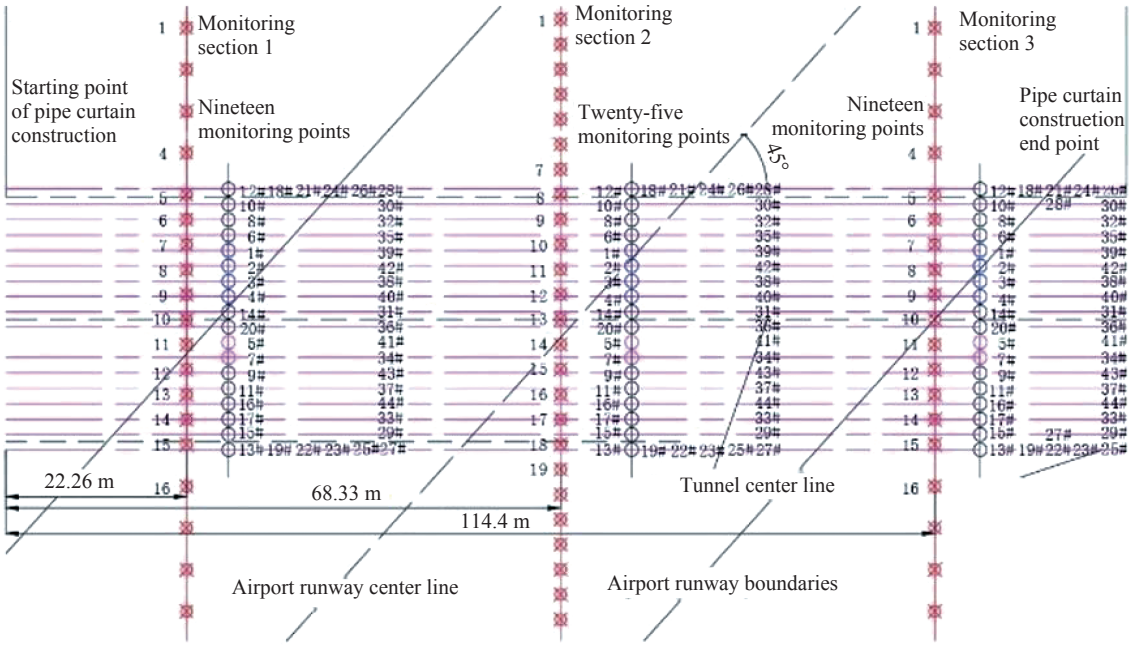
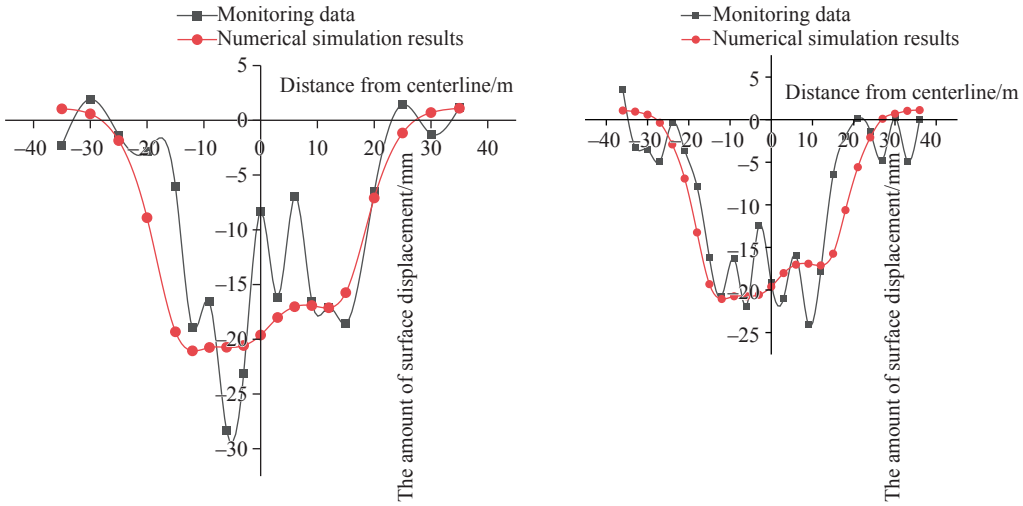


图8 机场跑道变形监测布置示意图

Fig. 8 Airport runway deformation monitoring layout diagram



(a) Monitoring section 1 (b) Monitoring section 2

图9 箱涵顶推距离为5 m时沉降监测数据与数值模型结果对比

Fig. 9 Comparison of settlement monitoring data and numerical model results when the jacking distance of box culvert is 5 m

40,60,80,90,100 kPa和120 kPa,开挖面在不同支护压力下箱涵顶推距离为36 m时的纵轴线方向位移云图如图10所示。由于篇幅有限,故只展示部分云图。图中,蓝色区域代表开挖面土体向外侧位移,即开挖面塌落区域,红色区域代表开挖面土体向内侧位移,即开挖面挤压变形区域。

图10中随着支护压力的增大,开挖面后方土体的影响范围明显减小。支护压力为90 kPa时,开挖面影响范围深度大致为6 m,在开挖面顶部开始出现挤压变形区域,此时开挖面已达到极限平衡状态。当支护压力为120 kPa时,开挖面的影响范围深度不足4.5 m,开挖面后方土体向外侧塌落的趋势已明显弱化。

对不同顶推距离下开挖面的纵轴线方向位移

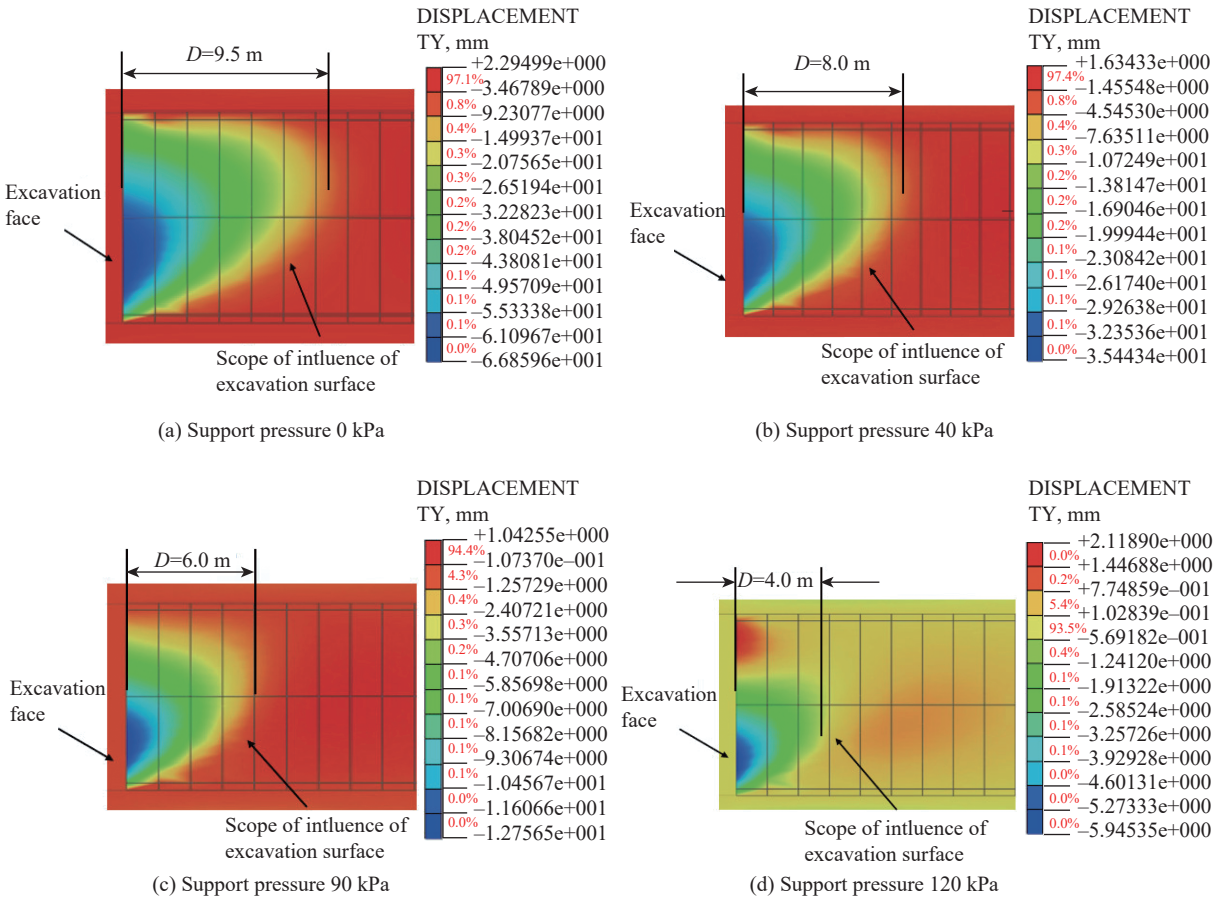


图10　不同支护压力下开挖面纵轴线方向位移云图（*YZ*平面）

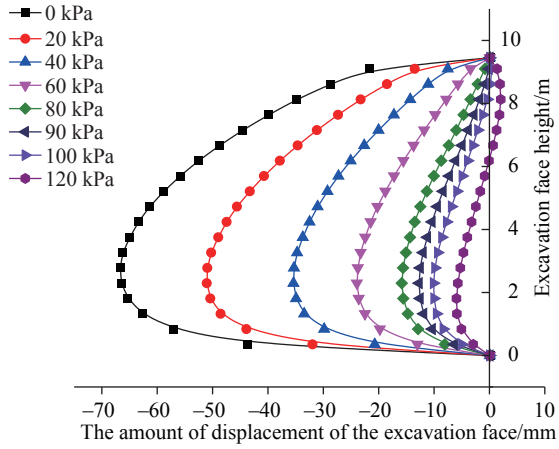
Fig. 10　Displacement nephogram of longitudinal axis direction of excavation face under different support pressures (*YZ* plane)

数据进行统计，如图11所示。可知：当支护压力小于80 kPa时，支护压力对开挖面稳定性的影响较为敏感。以箱涵顶推距离为1.5 m时为例，支护压力每增大20 kPa，开挖面前方土体最大外移量分别减少15.7，15.6，11.5，8.1 mm，开挖面逐渐趋于稳定状态。当支护压力大于90 kPa时，开挖面产生向内侧挤压变形的趋势：以支护压力为120 kPa为例，开挖面土体向外侧位移区域为距离底部0~6 m的范围内，在6~8.85 m范围内开挖面支护压力大于静止土压力，上部土体受到支护压力的挤压作用，此时的开挖面状态呈倒S形。由此可知该数值模型中开挖面临界支护压力值为90 kPa左右。根据前面计算实例可知，其理论计算值为85.35 kPa。数值模型的结果与极限支护压力计算值之间的误差为5.4%。

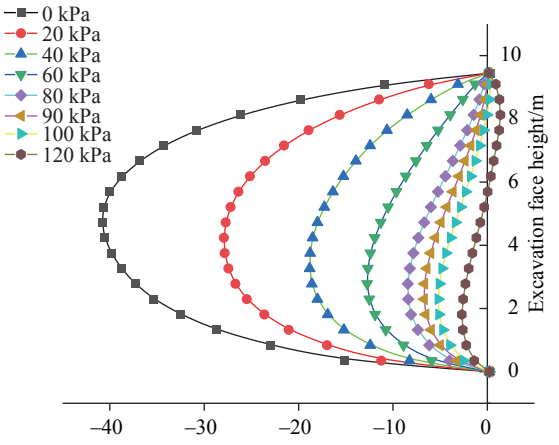
开挖面前方土体纵轴线方向位移与箱涵隧道顶推距离也存在着一定联系。随着箱涵隧道顶推距离的增大，直至箱涵隧道顶推距离为22.5 m时，开挖面纵轴线方向位移量从66.7 mm减小至36.77 mm，开挖面最大纵轴线方向位移点距离开挖面底部的高度从2.78 m升高至3.75 m，开挖面变形状态逐渐趋于稳定。因此相比于箱涵顶推后期，在顶进前期时支护压力对于开挖面稳定的影响更为显著，应该注意支护压力的选取和做好实时监测工作。

3.3　地表变形影响分析

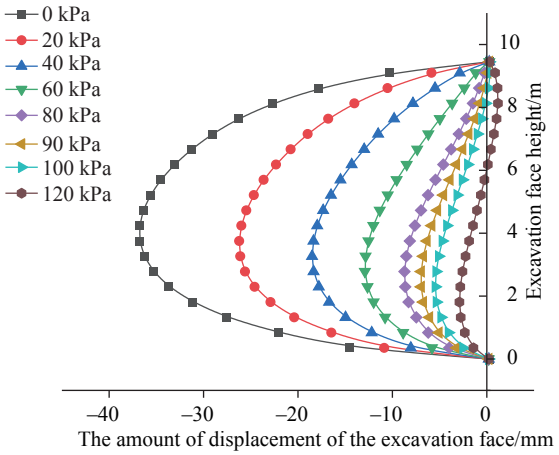
取箱涵顶推完毕时邻近接收井上方的地表变形数据绘制地表竖向变形曲线，如图12所示。不同支护压力下地表最大沉降值分别为45.55，34.30，24.34，16.55，10.86，8.75，7.07，5.08 mm。随着开挖面支护压力的增大，地表沉降值和沉降槽宽度明显减小，沉降值变化速率逐渐减缓。当支护压力小于40 kPa时，地表最大沉降值已大于30 mm，基本超过机场跑道的沉降控制要求。根据前面的分析结果



(a) Box culvert jacking 1.5 m



(b) Box culvert jacking 10.5 m



(c) Box culvert jacking 22.5 m

图11 箱涵隧道不同顶推距离下开挖面的纵轴线方向位移曲线

Fig. 11 Displacement curve of longitudinal axis direction of excavation face under different jacking distances of box culvert tunnel

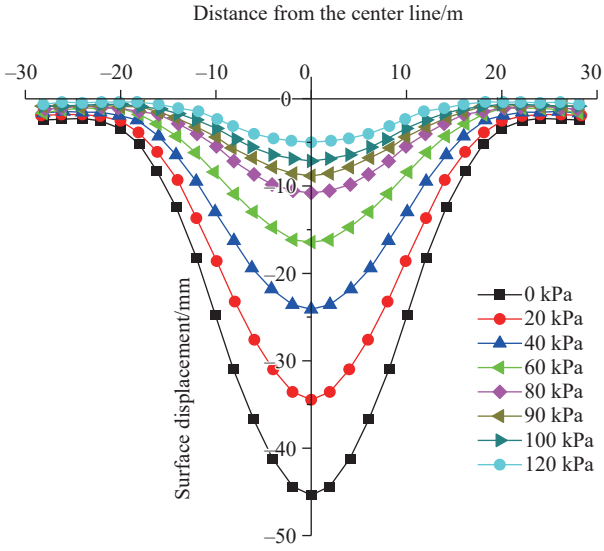


图12 不同支护压力下地表竖向位移曲线

Fig. 12 Vertical displacement curve of ground surface under different support pressure

可知，此时开挖面处于失稳状态，不利于箱涵隧道顶推，因此，还需要进一步增大支护压力。当支护压力超过90 kPa时，支护压力对于地表变形量的影响显著减小，地表变形量得到有效控制，此时开挖面已达到稳定状态。

4 结论

基于土力学中的极限平衡理论、摩尔-库伦强度准则和全覆土重理论，利用整体稳定分析法，推算出管幕作用下大断面箱涵隧道开挖面极限支护压力计算公式，并验证了其准确性。然后通过建立大型三维精细化数值模型，探究管幕作用下大断面箱涵隧道支护压力对开挖面土体稳定的作用规律。得到以下结论。

1）所提出的极限支护压力计算方法具有计算速度快、精度高的特点，能够在实际施工过程中快速计算出在某一埋深条件下箱涵隧道开挖面应施加的极限支护压力大小。

2）通过毕肖普条分法和提出的极限支护压力计算方法分别对庐州大道管幕箱涵隧道进行计算，所得结果分别为86.75 kPa和85.35 kPa，相差1.6%，证明了该方法的准确性。

3）对于管幕作用下大断面箱涵施工，随着支护压力的增大，最大纵轴线方向位移点高度随之

降低,开挖面后方土体的影响范围明显减小,且地表沉降值和沉降槽宽度明显减小,沉降值变化速率逐渐减缓;当支护压力超过静止土压力时,上部土体受到强挤压作用,此时的开挖面状态呈倒S形。

参考文献:

[1] 杨剑. 长赣高铁临近侧穿黄花机场跑道段隧道施工工法比选[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 118-126.
YANG J. Comparison and selection of construction methods for Changsha-Ganzhou High-Speed Railway tunnel section adjacent to the runway of Huanghua Airport[J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58(2): 118-126.

[2] MATSUMOTO Y, KUROSE N, INOUE T, et al. New pre-support method using pipe roof by semi-shield and chemical grouting for shirasu fill[M]//Modern Tunneling Science and Technology. Munich: CRC Press, 2001: 751-756.

[3] 林立祥. 管幕-箱涵法对城市快速路变形影响研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(6): 70-75.
LIN L X. The Influence of pipe roof-box culvert construction method on urban expressway deformation[J]. Construction Technology, 2022, 51(6): 70-75.

[4] CHENG C H, LIAO S M, CHEN L S, et al. Jacking precision control of pipe roof and large box culvert below urban expressway-A case study of a large underpass in Shanghai[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 703(1): 012050.

[5] 谢雄耀, 赵铭睿, 周彪, 等. 管幕作用下矩形大断面开挖面稳定模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2299-2310.
XIE X Y, ZHAO M R, ZHOU B, et al. Model experiment study on stability mechanisms of large rectangular excavation faces under the effect of pipe roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2299-2310.

[6] LEE I M, LEE J S, NAM S W. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(6): 551-565.

[7] 刘奕晖, 黄茂松, 王浩然, 等. 考虑渗流影响的软土管幕箱涵开挖面稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 15-18.
LIU Y H, HUANG M S, WANG H R, et al. Stability of excavation face in soft soils by roof-box jacking method considering seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 15-18.

[8] 李向阳. 大断面管幕—箱涵推进工法中管幕力学作用与开挖面稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
LI X Y. Study on pipe roof effect and face stability of large section pipe roof-box jacking method[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

[9] 张晓峰. 大管棚支护条件下顶进箱涵开挖掌子面土体稳定性分析[J]. 建筑科学, 2007, 23(7): 51-53.
ZHANG X F. Stability analysis of soil body on excavating face using box culvert jacking with pipe roof support [J]. Building Science, 2007, 23(7): 51-53.

[10] XIE X Y, ZHAO M R, SHAHROUR I. Face stability model for rectangular large excavations reinforced by pipe roofing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103132.

[11] 肖红菊, 孙玉永. 上软下硬复合地层中盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(5): 70-77.
XIAO H J, SUN Y Y. Stability analysis of excavation surface of shield tunnel in upper-soft and lower-hard composite strata[J]. China Railway Science, 2022, 43(5): 70-77.



第一作者:刘宇(2000—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与城市地下工程。E-mail: 3201154405@qq.com。



通信作者:杨新安(1964—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为隧道与城市地下工程。E-mail: xyang@tongji.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕)