

地裂缝作用下管廊结构底部脱空范围计算方法

邓博团¹, 田江涛¹, 苏三庆², 李鑫¹, 李攀¹, 王劲³

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 弹性地基梁法是计算地下结构的常用方法, 但是在地裂缝活动下管廊结构底部产生脱空, 弹性地基梁法的使用条件不再适用。基于 Euler-Bernoulli-Boussinesq 模型和链杆法, 将管廊与地基的接触看作是无穷多次超静定结构, 通过将无穷多次超静定结构转化为有限次超静定结构, 建立管廊结构在地裂缝作用下底部脱空的计算模型, 由管廊结构与地基接触部分相对位移为零的条件, 给出了管廊结构底部脱空范围的计算方法, 并与既有地裂缝作用下管廊模型试验结果进行对比验证, 由对比分析结果可知, 管廊底部脱空范围计算方法所得结果与模型试验结果基本一致, 最大误差不超过 -18.75%, 表明管廊底部脱空范围计算方法具有一定的适用性和有效性, 可为地裂缝区域的管廊结构设计提供一些参考借鉴。

关键词: 地裂缝; 管廊结构; Euler-Bernoulli-Boussinesq 模型; 链杆法; 脱空范围; 计算方法

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)02-0173-05

Calculation method of void area at the bottom of utility tunnel structure crossing ground fissures

DENG Botuan¹, TIAN Jiangtao¹, SU Sanqing², LI Xin¹, LI Pan¹, WANG Jing³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
3. Xi'an Changqing Technology Engineering Co., Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract: The elastic foundation beam theory is a frequently used method of calculating the underground structure. However, when the void is occurred at the bottom of the utility tunnel crossing ground fissures, the using conditions of the elastic foundation beam theory are not applicable. Based on the Euler Bernoulli-boussinesq model and the chain-bar method, the contact between the utility tunnel and the foundation is regarded as an infinitely multiple statically indeterminate structure. By transforming the infinitely multiple statically indeterminate structure into a finite order statically indeterminate structure, the calculation model of void at the bottom of the utility tunnel structure crossing ground fissures is established. According to the condition that the relative displacement between the utility tunnel structure and the foundation is zero, the calculation method of the void area at the bottom of the utility tunnel structure is given. At the same time, By comparing with the existing model test results of the utility tunnel, the results show that the calculation method of the void area at the bottom of the utility tunnel is basically consistent with the model test results, and the maximum error is not more than -18.75%. It shows that the calculation method of the void area at the bottom of the utility tunnel has certain applicability and effectiveness, and can be provided some reference for the structure design of utility tunnel in the ground fissure area.

Key words: ground fissures; utility tunnel structure; model of Euler-Bernoulli-Boussinesq; chain-bar method; void length; calculation method

地裂缝活动引起地下结构底部脱空是一种普遍现象。西安地裂缝分布广、规模大^[1], 地下管廊穿越地裂缝不可避免。而管廊穿越地裂缝时, 管廊结构底部脱空对管廊结构受力变形模式起着决定作用, 且对管廊建成后的运营造成极大的安全

隐患, 故对管廊结构底部脱空范围进行计算研究十分必要。

随着城市地下空间的开发和利用, 许多学者对地下结构穿越地裂缝开展了大量研究。范文等^[2-6]进行了有关地铁隧道的模型试验, 从不同地

收稿日期: 2020-12-01

修改稿日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702346); 陕西省科技计划项目(2019SF-264); 陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1513)

第一作者: 邓博团(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 现从事地下岩土工程方面的研究。E-mail: deng13720412121@139.com

通信作者: 田江涛(1989—), 男, 硕士生, 从事地下岩土工程方面的研究。E-mail: 2445964224@qq.com

裂缝角度、不同隧道截面形式、不同施工方法等方面对隧道的受力变形模式、破坏模式进行了研究,结果表明:采用不同几何相似比、不同隧道模型材料情况下,当地裂缝活动量达到一定量值时,隧道结构底部均有脱空现象出现。胡志平等^[7]通过管廊斜穿地裂缝模型试验,认为管廊结构产生扭转的原因是由于脱空区范围的剪力流合力不通过结构截面的剪切中心造成的。门玉明等^[8]在分析大量隧道过地裂缝模型试验结果的基础上,认为地裂缝的活动强度、隧道埋深、长度、土与隧道的刚度比等是影响隧道底部脱空区长度的主要因素,并总结了四种地铁隧道底部脱空的计算模型。刘东燕等^[9]通过将脱空区三角形范围内的上覆土压力等效成一个过形心的集中力,求解箱型隧道过地裂缝的扭转解析解。梅源^[10]通过数值研究发现,地裂缝沉降量达到一定值时管廊结构底部才出现脱空。王启耀^[11]利用数值模拟研究了双舱综合管廊结构在地裂缝活动下的受力变形特征,发现管廊结构底部脱空区从上盘地裂缝处向上盘远端发展。以上无论是地铁隧道还是管廊方面的研究,虽然涉及到了结构底部产生脱空,但大多是定性描述和分析,缺乏对管廊结构底部脱空区范围的定量计算研究。

现有研究表明,对地下结构进行理论分析计算时,通常将其简化为置于弹性地基上的梁^[12-15],但在地裂缝作用下,地下管廊结构底部出现脱空,这使得普通弹性地基梁理论的使用条件不再适用。弹性地基梁的使用条件是梁与地基连续接触,可看作是无穷多次超静定结构,在管廊底部脱空情况下,可将管廊与地基的接触看作有限次超静定结构。因此,计算管廊底部脱空范围,就是求解有限次超静定结构问题。

为此,基于 Euler-Bernoulli-Boussinesq 模型和链杆法,通过建立管廊结构穿越地裂缝的底部脱空计算模型,给出管廊结构底部脱空区范围的计算方法。通过与既有管廊过地裂缝模型试验结果进行对比分析,验证管廊结构底部脱空区范围的计算方法的合理性和适用性。研究成果可为地裂缝区域管廊结构设计提供一定参考。

1 地下管廊结构的受力特性

已有的管廊穿越地裂缝的模型试验结果表明^[7],在上盘沉降初期,管廊上覆荷载均匀分布,随着上盘沉降量增加,管廊顶部接触压力发生改变,表现为上盘增大,下盘减小,说明作用于地

裂缝两侧管廊上的外荷载并不会随着地裂缝的活动而变化,变化的是作用于管廊上的土压力。管廊底部接触压力总体表现为上盘减小,下盘增大,管廊与下盘土层始终接触;管廊变形主要表现为下盘底部受压,上盘底部受拉,且靠近地裂缝处下盘管廊变形较大,远离地裂缝处趋近于零。而上盘管廊由于土体沉降产生的拖拽作用,与土体发生整体沉降,在管廊底部形成局部脱空。管廊结构变形受力示意图如图 1 所示。

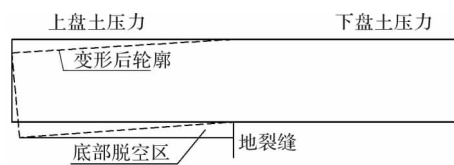


图 1 管廊结构纵向受力图

Fig. 1 Diagram of longitudinal force on utility tunnel structure

2 底部脱空计算模型

由管廊的受力特性可知,在管廊穿越地裂缝模型试验中,随着地裂缝上盘相对下降,下盘始终与地基接触,下盘管廊在地裂缝处变形最大,远离地裂缝变形趋近于零,因此可以将下盘土层对远离地裂缝的管廊端部约束简化为固定端。当上盘沉降量达到一定值时,上盘管廊随土体一起发生沉降变形,由于管廊与周围土体变形的不协调,在上盘管廊底部形成脱空区,因此可将土层对上盘管廊端部的约束简化为定向支座,为简化计算,不考虑管廊顶部接触压力的变化,按上覆荷载 q_0 计算,如图 2 所示。

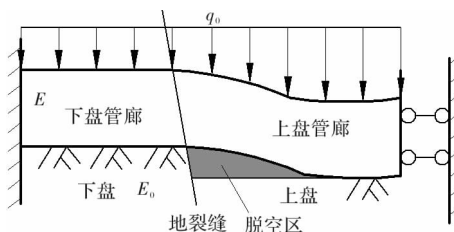


图 2 管廊结构底部脱空计算模型

Fig. 2 Calculating model of bottom void of utility tunnel

计算上盘管廊底部脱空范围,由于下盘始终与地基接触,故只考虑上盘管廊的情况。将位于地裂缝上盘的管廊简化为 Boussinesq 地基中的 Euler-Bernoulli 梁,简称为 Euler-Bernoulli-Boussinesq 模型(EB-B 模型),用链杆法的原理,将上盘管廊与地基接触的部分用 n 个链杆连接,计算模型可简化为如图 3 所示, x_i 为管廊上盘结构底部脱空区范围, c 为相邻链杆的间距, a_k 为第 1 个链杆

由式(6)、(8)可得

$$\delta_{ki} = -\frac{4(k-i-1)}{n\pi E_0'}(l_2 - x_i) + \frac{1}{2E_1 I}(x_i + a_i)^2 \left(\frac{2}{3}x_i + a_k - \frac{1}{3}a_i\right) \quad (9)$$

②求 M_C 对上盘未脱空区管廊结构 k 点产生的位移 Δ_{kMC} , 可用结构力学挠度积分公式计算得

$$\Delta_{kMC} = \frac{(x_i + a_k)^2}{2E_1 I} M_C \quad (10)$$

③ Δ_{kq} 为上盘上覆荷载对未脱空区管廊结构 k 点产生的位移, 可由结构力学挠度积分公式得

$$\Delta_{kq} = -\frac{q_0}{2E_1 I} \left[\frac{l_2^2}{2} (x_i + a_k)^2 - \frac{l_2}{3} (x_i + a_k)^3 - \frac{1}{12} (x_i + a_k)^4 \right] \quad (11)$$

式中: $M_C = R\theta_c$, θ_c 为构件端部相互之间的角位移; R 为节点的连接刚度, $R = E_1 I$.

④上盘管廊结构端部 C 点的垂直位移相对上盘管廊结构长度是一个微量, 故上盘管廊结构端部 C 点的垂直位移引起未脱空区任意一点 k 的向下的垂直位移 Δ_{k1} 可直接使用几何方法求解. 得

$$\Delta_{k1} = \frac{\Delta_1}{l_2} (x_i + a_k) \quad (12)$$

综上, 将式(3)、(10)、(11)、(12)代入式(2), 得到含 x_i 的非线性方程组.

此外, 由上盘管廊结构满足静力平衡条件, 对 B 点取矩, 则有

$$x_i p_1 + (x_i + a_2) p_2 + \cdots + (x_i + a_k) p_k + \cdots + (x_i + a_n) p_n - M_q + M_C = M_B = \theta_B E_1 I \quad (13)$$

式中: M_q 为上盘管廊结构上覆荷载对管廊结构端部 B 点的弯矩 $M_q = (q_0/2) l_2^2$; θ_B 为 B 点的角位移.

同时, 上盘管廊结构端部还满足端部约束条件:

$$\frac{q_0 l_2^3}{6EI} + \theta_B = \theta_C \leq \frac{2S}{D} \quad (14)$$

$$\frac{q_0 l_2^4}{EI} + \theta_B l_2 = \Delta_1 \leq \Delta_1^* \quad (15)$$

式中: Δ_1^* 为最大端部垂直位移, S 为上盘管廊结构端部变形缝允许缝宽, 由《陕西省城镇综合管廊设计标准》规定变形缝宽 $S \geq 30$ mm, D 为管廊结构截面宽度.

计算管廊底部脱空范围 x_i , 取不同地裂缝沉降量 Δ_2 , 代入式(1), 得到 Δ_1 , 将之代入式(15), 得到 θ_B , 将 θ_B 代入式(14), 得到 θ_C . 然后通过式(2)、(13)构建方程组, 式(2)中各项最高次幂为四次, 式中存在非线性项, 因此很难直接得到解

析解, 可利用 MATLAB 中的相关函数将非线性方程转化为线性方程, 即可求解得到管廊底部脱空范围 x_i 的值.

4 模型验证

为了验证管廊结构底部脱空范围计算方法的合理性, 采用文献[7]中地裂缝作用下 1:15 管廊模型试验与本文计算模型进行对比分析. 模型试验基本参数如下: 模型管廊长 5 m, 管廊截面为 0.56 m×0.313 m, 上盘管廊长度 2.175 m, 模型材料的弹性模量为 8.41×10^3 MPa, 模型围岩地基由杂填土、黄土、粉质黏土分层填筑而成, 重度取为 $18.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量取为 31.08 MPa, 泊松比为 0.25, 地裂缝最大沉降量 0.08 m, 上覆土 1 m, 允许缝宽 $S=30$ mm, 管廊结构截面宽度 D 取 0.56 mm. 计算时链杆数 n 取 30, 满足计算精度要求. 由 MATLAB 计算得到管廊底部脱空范围的理论计算值, 如表 1 所示, 与模型试验所得管廊底部脱空值进行对比, 见表 2.

表 1 管廊结构底部脱空范围的理论计算值

Tab. 1 Theoretical value of void area at the bottom of utility tunnel structure

Δ_2 /m	Δ_1 /m	θ_B	θ_C	计算值
0.009	0.008 9	-0.337 3	-0.280 4	0.531 6
0.019	0.018 6	-0.332 8	-0.275 9	0.180 6
0.03	0.028 6	-0.328 2	-0.271 3	0.198 0
0.04	0.036 9	-0.324 4	-0.267 5	0.284 7
0.05	0.044 3	-0.321 0	-0.264 1	0.332 3
0.06	0.050 8	-0.318 1	-0.261 1	0.999 5
0.07	0.056 3	-0.315 5	-0.258 6	2.060 8
0.08	0.060 9	-0.3134	-0.256 5	0.647 6

表 2 计算值与试验值对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of calculated value and test value

对比项目	底部脱空范围/m
计算值	0.65
试验值	0.8
$\frac{\text{计算值} - \text{试验值}}{\text{试验值}} \times 100\%$	-18.75%

由对比分析结果可知, 管廊底部脱空范围计算方法所得结果与模型试验结果基本一致, 最大误差不超过 -18.75%.

5 结果与讨论

(1) 基于 Euler-Bernoulli-Boussinesq 模型和链

杆法,通过将脱空情况下的管廊转化为有限次超静定结构,建立了管廊结构穿越地裂缝的底部脱空计算模型,提出了管廊结构底部脱空范围的计算方法。

(2)通过与模型试验进行对比分析,表明计算结果和模型试验结果基本一致,最大误差不超过 -18.75% 。说明本文提出的管廊底部脱空范围计算方法具有一定的合理性和适用性。求解管廊底部脱空范围后,可以通过求解有限超静定结构,得到不同地裂缝沉降量下管廊的弯矩剪力,为地下管廊的结构设计提供一些参考。

(3)在建立计算模型时,本文将管廊简化为Boussinesq地基中的Euler-Bernoulli梁,只考虑了弯矩对管廊变形的影响,而忽略了剪力对其变形的影响,在后续研究中,将同时考虑弯矩和剪力对管廊变形的影响,通过对管廊在Winkler地基模型、Pasternak地基模型中简化为Timoshenko梁的情况与本文研究进行对比分析,优化管廊底部脱空范围的计算方法。

参考文献 References

- [1] 彭建兵,范文,李喜安,等.汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J].工程地质学报,2007(4):433-440.
PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xian, et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the fen-wei basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2007(4):433-440.
- [2] 范文,邓龙胜,彭建兵,等.地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008(9):1917-1923.
FAN Wen, DENG Longsheng, PENG Jianbing, et al. Research on physical model experiment of metro tunnel crossing ground fissure belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(9):1917-1923.
- [3] 李凯玲,门玉明,严静平,等.地铁隧道正交穿越地裂缝的相互作用机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):556-563.
LI Kailing, MEN Yuming, YAN Jingping, et al. Test study of interaction mechanism under metro tunnel orthogonal crossing ground fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3):556-563.
- [4] 庞旭卿,严静平.地铁隧道斜交穿越地裂缝的模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(7):1359-1364.
PANG Xuqing, YAN Jingping. Research on physical model experiment of metro tunnel obliquely crossing ground fissure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7):1359-1364.
- [5] 李建军,邵生俊,熊田芳.隧道斜交穿越地裂缝的模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(S1):115-120,126.
LI Jianjun, SHAO Shengjun, XIONG Tianfang. Research on physical model experimental of tunnel obliquely crossing a ground fissure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1):115-120, 126.
- [6] 熊田芳,邵生俊,王天明,等.西安地铁正交地裂缝隧道的模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(1):179-186.
XIONG Tianfang, SHAO Shengjun, WANG Tianming, et al. Research on physical model experiment of Xi'an metro tunnel orthogonal crossing ground fissure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):179-186.
- [7] 胡志平,张丹,张亚国,等.地下综合管廊结构斜穿活动地裂缝的变形破坏机制室内模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2550-2560.
HU Zhiping, ZHANG Dan, ZHANG Yaguo, et al. Test study on deformation and failure mechanism of utility tunnel structure obliquely crossing ground fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12):2550-2560.
- [8] 门玉明,张结红,刘洪佳,等.西安地铁隧道穿越地裂缝带的计算模型探讨[J].地球科学与环境学报,2011,33(1):95-100.
MEN Yuming, ZHANG Jiehong, LIU Hongjia, et al. Discussion on the computing model for Xi'an metro tunnel passing through the ground fissure zone[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1):95-100.
- [9] 刘东燕,黄伟,罗丽娟,等.箱型地铁隧道斜穿地裂缝时扭转变形的解析解[J].土木建筑与环境工程,2013,35(1):1-6.
LIU Dongyan, HUANG Wei, LUO Lijuan, et al. Torsion deformation's analytic solution of box tunnel crossing ground fissure[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, 35(1):1-6.
- [10] 梅源,张雨童,袁一力,等.地下综合管廊结构穿越地裂缝的力学响应及预警标准研究[J].安全与环境学报,2020,20(4):1295-1304.
MEI Yuan, ZHANG Yutong, YUAN Yili, et al. Mechanical response and early warning standard of the underground cracks in the underground utility tunnels[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4):1295-1304.
- [11] 王启耀,卢刚刚,张亚国,等.综合管廊结构大角度斜穿地裂缝的变形及受力特征研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(6):825-832.