

列车循环荷载下交叠隧道结构疲劳寿命预测分析

陈长江¹ 李琪睿^{2,3} 田志尧^{2,3}

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 3. 上海轨道交通基础设施耐久性与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 基于南京地铁某双线四孔交叠隧道节点, 建立了四孔交叠隧道-土体系统动力计算模型, 分析列车循环荷载下隧道结构动力响应, 基于 Miner 线性累积损伤理论与 FE-SAFE 疲劳寿命计算软件, 研究交叠隧道结构疲劳寿命, 探讨列车运行速度、交叠隧道净距对交叠隧道疲劳寿命的影响。研究结果表明: 四孔交叠隧道具有动力放大效应, 疲劳寿命薄弱点为四孔交叠隧道中心处; 距离四孔交叠隧道交叠区 2 倍隧道直径以外的区域动力放大效应明显衰退, 对结构疲劳寿命影响已不大, 定义为非交叠区; 定义疲劳寿命折减系数 η 为交叠区最短疲劳寿命与非交叠区疲劳寿命的比值, 列车行驶速度越低或交叠隧道净距越大, 则 η 越大。

关键词 地铁交叠隧道; 列车循环荷载; 疲劳寿命; 动力响应

中图分类号 U451⁺.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.019

Prediction and Analysis of Fatigue Life of Overlapped Tunnel Structure under Cyclic Train Load

CHEN Changjiang, LI Qirui, TIAN Zhiyao

Abstract Based on certain double-line four-hole overlapped tunnel joint of Nanjing Metro, the four-hole overlapped tunnel-soil system dynamic calculation model is established. The dynamic response of the tunnel structure under cyclic train load is analyzed, and the fatigue life of overlapped tunnel structure is studied based on the Miner linear cumulative damage theory and the FE-SAFE fatigue life calculation software. The influence of train operation speed and net distance of overlapped tunnel on the fatigue life is discussed. The results show that: four-hole overlapped tunnel has dynamic amplification effect, and the weak point of fatigue life is the center of the four-hole overlapped tunnel; beyond two times of the tunnel diameter from the overlapped area, the dynamic amplification effect obviously declines and has little effect on the fatigue life of the structure, which is defined as the non-overlapped area; fatigue life reduction coefficient η is defined as the ratio of the shortest fatigue life of overlapping area to the fatigue life of non-over-

lapped area; the slower the train running speed is or the larger the net distance of overlapped tunnel is, the larger the η is.

Key words metro overlapped tunnel; train cyclic load; fatigue life; dynamic response

First-author's address China Railway Liuyuan Survey Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

随着城市轨道交通建设的发展, 上下线路交叠隧道工点与日俱增。在近距离交叠隧道中, 列车运行产生的振动荷载具有叠加放大效应, 会使隧道结构疲劳损伤加剧, 进而影响服役期限^[1]。

既有研究表明, 在列车荷载循环作用下, 与接头螺栓相比, 隧道管片结构的疲劳寿命更低^[2]。因此, 本文更关注隧道混凝土结构的疲劳寿命。目前, 针对列车荷载下交叠隧道结构动力响应的研究多基于双孔交叠隧道, 针对隧道结构疲劳寿命的研究多基于单线隧道。文献[3]研究了近距离立体双孔交叉隧道列车运营期间振动对隧道结构的影响; 文献[4]探讨了高速铁路单线隧道衬砌结构在列车荷载作用下的疲劳寿命和破坏机理。较多文献分析了双孔交叠隧道的动力响应或单线隧道的疲劳寿命, 但尚未有对于四孔交叠隧道疲劳寿命的研究。考虑到四孔交叠隧道结构振动激励放大效应更为复杂, 有必要对其疲劳寿命进行预测分析。

本研究以南京地铁某双线四孔交叠隧道线路项目(以下称为“目标线路”)为研究对象, 基于 Miner 疲劳损伤线性累积准则(以下简为“Miner 准则”), 采用 FE-SAFE 疲劳寿命计算软件, 建立交叠隧道-土体系统动力计算模型, 探讨软土地区四孔交叠隧道在列车循环动荷载作用下的振动放大效应, 预测交叠隧道结构疲劳寿命, 对相关地区近距交叠隧道结构长期性能保障技术具有重要借鉴意义。

1 隧道-土体结构疲劳寿命计算原理

1.1 损伤理论

文献[5]指出,在随机疲劳荷载作用及四周疲劳区范围内,结构疲劳寿命分析采用 Miner 准则可准确地满足工程需求^[5]。假设 n_i 为结构经历的应力循环次数 N 为结构发生破坏时的应力循环次数,则 Miner 准则认为,在不同应力水平 S 的循环荷载作用下,结构产生的累积损伤为 n_i/N ,当线性累加得到的损伤总和达到 1 时,就认为结构已经疲劳失效。可见,结构不发生疲劳破坏应满足:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N} \leq 1 \quad (1)$$

1.2 疲劳寿命计算方法

FE-SAFE 软件是进行结构疲劳耐久性分析的专用软件。在隧道结构疲劳寿命预测时,先开展 ABAQUS 动力有限元分析计算结构动力响应,与 Miner 准则相结合,再将其嵌入 FE-SAFE 软件分析,预测盾构隧道不同部位的结构疲劳寿命。具体计算过程见图 1。

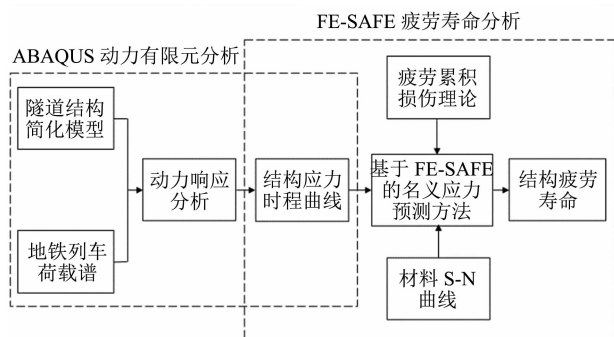


图 1 疲劳寿命计算流程图

Fig. 1 Flow chart of fatigue life calculation

目标项目的交叠隧道工点处于富水软土地区。考虑最大应力水平参数与最小应力水平参数,在潮湿环境下通过混凝土典型疲劳试验可得疲劳寿命曲线。本文以该曲线来拟合目标项目的混凝土材料疲劳 $S-N$ 曲线^[6]:

$$\lg N = 16.67 - 16.76 S_{\max} + 5.17 S_{\min} \quad (2)$$

式中:

S_{\max} ——最大应力水平参数, $S_{\max} = \sigma_{\max}/f_c$;

S_{\min} ——最小应力水平参数, $S_{\min} = \sigma_{\min}/f_c$ 。

其中, σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为最大主应力及最小主应力,可由后续有限元计算得到; f_c 为混凝土材料抗拉强度。

南京地铁运营时间大致为 06:00—23:00,共 17 h,按发车间隔 6 min 计算,每天发车 170 列,一年发车 62 050 列。由于南京地铁列车为 6 节编组,故 1 年振次 $N_a = 372\ 300$ 次。据此计算疲劳寿命对数值,进而计算疲劳寿命年限:

$$T = 10^N \times \frac{1}{372\ 300} \quad (3)$$

列车荷载作用下的隧道结构疲劳寿命振次计算可采用按列车对数计算^[7]、按列车编组数计算^[8]及按轮轴计算^[5]三种方法,目前学术界并无统一。本文采用按列车编组计算的方法,并引入疲劳寿命折减系数 η 作为定量分析交叠区振动放大效应对疲劳寿命折减影响的评价指标。

2 隧道-土体动力耦合计算模型

2.1 工程概况

A 线(下方隧道)交叠 B 线(上方隧道)节点如图 2 所示。两线最小净距约为 3.5 m,交叉区段长宽均约为 20 m,场地潜水位埋深约为 0.5 m。

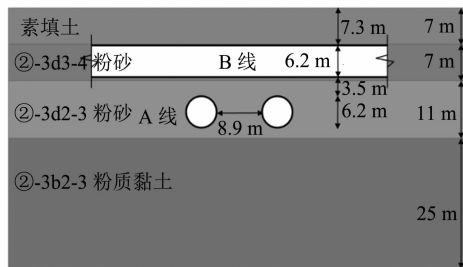


图 2 交叠节点工程概况

Fig. 2 Engineering overview of the overlap joint

A 线与 B 线均采用南京地铁标准制式混凝土管片,外径为 6 200 mm,内径为 5 500 mm。管片厚度均为 350 mm,环宽为 1.2 m,纵缝设置凹凸榫,纵向采用全旋转错缝拼装。两线均采用整体式浇筑道床。A 线与 B 线均采用 6 节编组的 A 型地铁列车,最高运行速度为 80 km/h。

2.2 隧道-地层三维动力数值计算模型

采用有限元软件 ABAQUS 建立轨道-隧道-土层的三维动力计算模型,如图 3 所示。为消除边界效应,提高计算精度,模型长度取隧道直径的 8~10 倍,则模型尺寸为 100 m×100 m×50 m。为消除低通效应,模型中,重点研究区域的网格尺寸为 0.25 m×0.25 m,远场网格尺寸为 2.0 m×2.0 m,二者之间网格尺寸逐渐过渡。

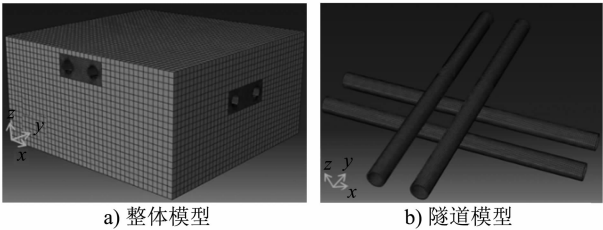


图 3 交叠隧道有限元模型

Fig. 3 Finite element model of overlapped tunnel

2.3 列车荷载模拟

本文通过在扣件对应位置施加随时间变化的集中力的方式来模拟列车运行。扣件集中力作用位置设置为距模型边界 10 m,以避免边界效应。扣件集中力时程曲线由车辆-轨道垂直耦合动力学模型获得,如图 4 所示。一系悬挂系统、二系悬挂系统及轨道的扣件系统用并联的线性弹簧和粘性阻尼模拟。钢轨采用离散支承的无限长欧拉梁模拟。车轮与钢轨间垂向接触采用赫兹非线性接触。

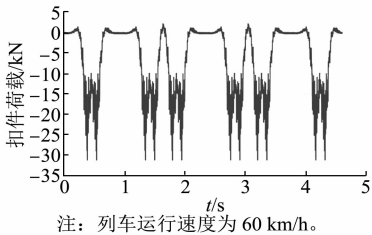


图 4 地铁列车运行扣件力

Fig. 4 Fastening force of metro train operation

为模拟双线四孔交叠隧道运行的最不利情况,模型中 4 列车同时由模型边界对向驶向交叠区域。

2.4 计算参数

隧道、整体式道床及地层均以实体单元建模,以等效刚度法对隧道结构管片间接头作用下的刚度折减,并合并参数相近的土层。交叠节点的地层-结构模型材料参数如表 1 所示。

表 1 交叠隧道模型材料参数表

Tab. 1 Parameters of overlapped tunnel model material

材料	动弹性模量/MPa	泊松比
素填土	72.1	0.35
②-3d3-4 粉砂	79.2	0.33
②-3d2-3 粉砂	84.6	0.31
②-3b2-3 粉质黏土	50.4	0.31
隧道	27 600	0.20
整体式道床	31 500	0.20

采用瑞利阻尼来反映振动在土层材料中的能

量耗散。选取地铁运行引起地表响应的频率范围上下限分别为 $w_i = 5 \text{ Hz}$ 、 $w_k = 100 \text{ Hz}$,令阻尼比 $\xi = 0.05$,计算得瑞利阻尼系数 $\alpha = 2.991\ 993$, $\beta = 1.515\ 761 \times 10^{-4}$ 。

2.5 工况设计

在影响四孔交叠隧道疲劳寿命的因素中,列车运行速度及交叠隧道净距尤为显著。保持双线四孔交叠隧道模型其他参数不变,在交叠隧道净距为 3.5 m 时将列车运行速度依次取 20 km/h、40 km/h 及 80 km/h,并在速度为 60 km/h 时将交叠隧道净距依次取 2.0 m、6.0 m 及 12.0 m,建立有限元模型,以研究列车运行速度及交叠隧道净距对四孔交叠隧道结构疲劳寿命的影响。具体计算工况见表 2。

表 2 计算工况

Tab. 2 Calculation conditions

工况	列车运行速度/(km/h)	交叠隧道净距/m
原始工况	60	3.5
工况 1	20	3.5
工况 2	40	3.5
工况 3	80	3.5
工况 4	60	2.0
工况 5	60	6.0
工况 6	60	12.0

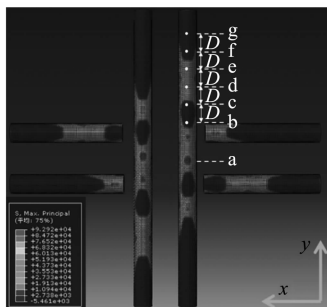
3 计算结果及分析

3.1 最小疲劳寿命断面

通过 ABAQUS 有限元软件计算测点的动应力,研究双线四孔交叠隧道结构交叠区动力放大效应和疲劳寿命。疲劳寿命最小处即为主应力最大处。按照表 2 中原始工况相关参数建立双线四孔交叠隧道有限元模型,计算列车运行时程内 4 条隧道的动应力变化值。计算结果如图 5 所示。由图 5 可见,在列车运行时程内,隧道结构最大主应力出现在 4 列列车交汇时的上方隧道拱底 a 点位置。图 6 中的 a 点最大主应力时程曲线变化情况也验证了这一点。此外,在上方隧道拱底设置 b、c、d、e、f、g 等测点以进一步研究动力放大效应影响范围。

将 a 点的隧道结构最大主应力作为 σ_{\max} 代入式(2),并嵌入 FE-SAFE 软件进行耦合计算,得到 a 点盾构隧道疲劳寿命对数云图,如图 7 所示。

由疲劳寿命对数计算值及式(3)计算疲劳寿命年限。经计算,双线四孔交叠隧道在原始工况下,疲劳寿命薄弱位置为四孔交叠隧道中心处上方隧道拱底 a 点处,且疲劳寿命为 251 年。



注: D 为盾构隧道直径。

图 5 观测测点平面图(最大主应力出现处)

Fig. 5 Plan of observation points (where the maximum principal stress occurs)

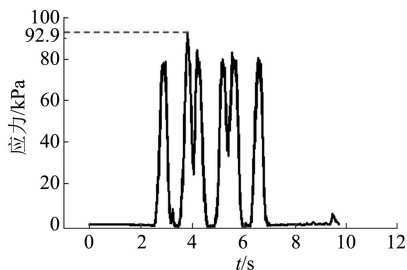


图 6 a 点最大主应力时程曲线

Fig. 6 Time history curve of the maximum principal stress at point a

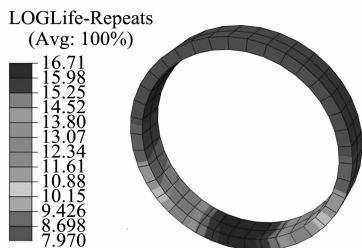


图 7 a 点隧道结构疲劳寿命对数云图

Fig. 7 Nephogram of logarithmic tunnel structure fatigue life at point a

3.2 动力放大效应影响范围

为分析交叠隧道动力放大效应影响范围,计算 b、c、d、e、f、g 测点的最小疲劳寿命,并绘制图 8。其中, b 点与 a 点间范围为双线四孔交叠隧道的交叠区。

根据计算结果,在距离双线四孔交叠隧道交叠区 $2D$ 以上的区域(d、e、f、g 测点)疲劳寿命变化平缓,说明动力放大效应明显衰退,对结构疲劳寿命影响已不大,故将距 a 点 $3D$ 以上区域定义为非交叠区,并将距 a 点 $D \sim 3D$ 之间区域定义为过渡区。

考虑到影响疲劳寿命的因素众多,计算误差难以避免,基于归一化的思想,本文定义疲劳寿命折

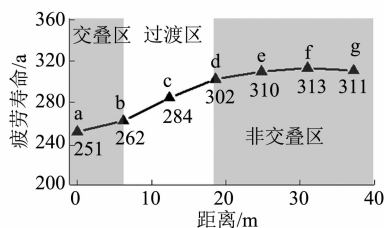


图 8 各测点的疲劳寿命

Fig. 8 Fatigue life at each observation point

减系数 η 为交叠区最短疲劳寿命与非交叠区疲劳寿命的比值。 η 不仅能较直观地反映交叠隧道动力放大效应对隧道结构疲劳寿命的影响程度,还能直观地指导普通线路隧道与交叠隧道区域长期维护成本的投入比例。例如,普通线路隧道服役寿命设计为 100 年,交叠隧道区域可按照服役寿命为 $\eta \times 100$ 的标准展开维护。在此基础上,进一步探讨列车运行速度与交叠隧道净距对 η 的影响。

3.3 列车运行速度对 η 的影响

保持双线四孔交叠隧道轨道-隧道-土层模型其他参数不变,依次取列车运行速度为 20 km/h、40 km/h、80 km/h,计算交叠隧道在不同列车运行速度下的疲劳寿命,进而得出 η 与列车运行速度的关系,如图 9 所示。

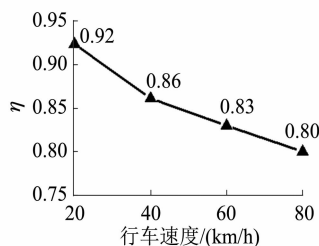


图 9 列车运行速度与 η 的关系

Fig. 9 Relationship between train speed and η

由图 9 可见:列车运行速度对交叠隧道疲劳寿命有较大影响;列车运行速度越小, η 越大,说明交叠动力放大引起的结构疲劳衰减效应越小。当列车运行速度仅为 20 km/h 时, η 仍达 0.92,说明即使列车速度较低(在车站端头处),动力放大效应也对交叠隧道疲劳寿命有一定影响。当地铁列车运行速度达到 80 km/h 时, $\eta = 0.80$,即交叠区疲劳寿命约为非交叠区的 0.8 倍,说明动力放大效应对交叠隧道疲劳寿命有较明显影响。

3.4 交叠隧道净距对 η 的影响

保持交叠隧道模型其他参数不变,依次取交叠隧道净距为 2.0 m、6.0 m 及 12.0 m,计算交叠隧道

在不同净距下的疲劳寿命,得出 η 与交叠隧道净距的关系,如图 10 所示。

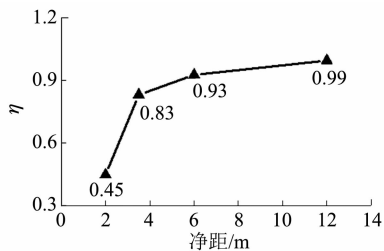


图 10 交叠隧道净距-疲劳寿命折减系数图

Fig. 10 Diagram of overlapped tunnel net distance-fatigue life reduction coefficient

由图 10 可见:交叠隧道净距对交叠隧道疲劳寿命有较大影响;交叠隧道净距越大, η 越大,说明交叠动力放大引起的结构疲劳衰减效应越小;当双线四孔交叠隧道净距达到 6.0 m(约 1D)时, η 发展趋于收敛;当双线四孔交叠隧道净距达到 12.0 m(约 2D)时, η 高达 0.99,说明此时交叠区域隧道结构疲劳寿命基本不受交叠隧道动力放大效应的影响。

4 结论

1) 四孔交叠隧道具有动力放大效应。疲劳寿命薄弱点为四孔交叠隧道中心处。

2) 距离四孔交叠隧道交叠区 2 倍隧道直径以外的区域可视为非交叠区。非交叠区内动力放大效应衰减明显,对结构疲劳寿命影响已不大。

3) 定义交叠区最短疲劳寿命与非交叠区疲劳寿命的比值为疲劳寿命折减系数 η 。 η 能够较为直观地指导普通线路隧道与交叠隧道区域长期维养成本的投入比例。

4) η 与列车运行速度的关系为:列车速度越小, η 越大(即交叠动力放大引起的结构疲劳衰减效应越小);列车运行速度即使较低,动力放大效应也仍对交叠隧道疲劳寿命有一定影响。

5) η 与双线四孔交叠隧道净距的关系为:四孔交叠隧道净距越大, η 越大(即交叠动力放大引起的结构疲劳衰减效应越小);交叠区域隧道结构疲劳寿命基本不受动力放大效应的影响。

参考文献

[1] 黎杰,李欢,霍飞. 列车振动荷载作用下交叠隧道衬砌结构响应特性分析[J]. 公路工程,2012(1):40.

LI Jie,LI Huan,HUO Fei. Dynamic response analysis of lining structure for overlap tunnel under vibration loads of train[J]. Highway Engineering,2012(1):40.

[2] 刘强. 列车荷载下地铁管片及接头动力响应及疲劳寿命研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

LIU Qiang. Dynamic response and fatigue lifetime analysis of the segment and joint under train cyclic load[D]. Changsha: Central South University,2014.

[3] 汪伟松,周晓军. 列车荷载作用下立体交叉隧道的响应分析[J]. 路基工程,2010(4):212.

WANG Weisong,ZHOU Xiaojun. Response analysis of under-crossing tunnel under train load[J]. Subgrade Engineering,2010(4):212.

[4] 黄娟. 基于损伤理论的高速铁路隧道结构振动响应分析及疲劳寿命研究[D]. 长沙:中南大学,2009.

HUANG Juan. Study on the vibration response and fatigue life of high-speed railway tunnels based on damage theory[D]. Changsha:Central South University,2014.

[5] 杨晓华,姚卫星,段成美. 确定性疲劳累积损伤理论进展[J]. 中国工程科学,2003(4):81.

YANG Xiaohua,YAO Weixing,DUAN Chengmei. The review of ascertainable fatigue cumulative damage rule[J]. Engineering Science,2003(4):81.

[6] 吕培印. 混凝土单轴、双轴动态强度和变形试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2001.

LYU Peiyin. Experimental study on dynamic strength and deformation of concrete under uniaxial and biaxial action[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2001.

[7] 刘宁,彭立敏,施成华. 基岩脱空条件下仰拱结构疲劳寿命的计算方法[J]. 铁道科学与工程学报,2016(5):921.

LIU Ning,PENG Limin,SHI Chenghua. Fatigue life calculation method of tunnel base structure under the conditions of bedrock void[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2016(5):921.

[8] 王祥秋,谢文玺,JIANG Ruinian. 高速铁路隧道线路底部结构累积疲劳损伤特性分析[J]. 城市轨道交通研究,2016(12):21.

WANG Xiangqiu,XIE Wenxi,JIANG R. Analysis on cumulative fatigue damage characteristics for the bottom structure of high-speed railway tunnel line[J]. Urban Mass Transit,2016(12):21.

[9] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京:北京交通大学,2008.

SUN Xiaojing. Prediction of environment vibrations induced by metro trains and mitigation measures analysis[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2008.

(收稿日期:2021-02-10)