

地铁荷载下隧道注浆对地面振动的影响

王 妍¹,付相球²,潘旦光²

(1. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018; 2. 北京科技大学 土木工程系, 北京 100083)

摘要:为研究地铁隧道注浆加固后土体力学性能的改变对列车运行引起地面振动的影响,采用有限元分析方法,建立了土体-隧道二维计算模型,分析了在不同隧道埋深及激振频率下,注浆体强度与注浆范围对地面振动加速度反应的影响。计算结果表明:不同隧道埋深下注浆体强度与注浆范围对地面反应的影响规律大致相同;激振频率对计算结果影响很大,10~30 Hz 激振频率下,注浆体强度与注浆范围对地面加速度反应的影响较小;50 Hz 激振频率下,地面最大加速度反应与注浆效果近似成正比,整体随着注浆范围的增大而增大;70 Hz 与 90 Hz 激振频率下,注浆体强度与注浆范围对地面反应的影响存在很强的非线性。因此,在地铁动力反应分析中,隧道注浆的影响不可忽略,计算时应详细考虑注浆体强度与注浆范围的影响。

关键词:地铁隧道;列车荷载;注浆;地面振动

中图分类号: TU 435; U 25 文献标志码: B 文章编号: 1009-7767(2020)01-0098-06

Tunnel Grouting Impact on Ground Vibration under Subway Load

Wang Yan, Fu Xiangqiu, Pan Danguang

地铁交通以其运量大、速度快、安全可靠、运行准时等特点,已成为解决城市交通拥堵问题的重要手段,但地铁列车在运行中引起的振动对车上人体的健康、周边重要建筑物的安全以及精密仪器的使用等均会产生不利影响,地铁的振动污染已成为城市环境影响的主要问题之一^[1]。

目前,关于地铁振动的研究主要从理论分析、数值模拟及现场实测 3 个方面着手,其中理论分析和数值模拟需建立相应的计算模型,计算模型与实际工况越接近,得出的分析结论也就越可靠。现有的地铁振动相关研究主要考虑了车辆、钢轨、轨枕、道床、衬砌、土体等对地铁振动动力反应的影响。罗文俊等^[2]通过建立轨道结构连续弹性双层梁模型,研究分析了列车速度、轨道不平顺、钢轨垫板刚度和轨枕垫板刚度对轨道振动的影响。唐益群等^[3]采用二维有限元数值模拟的方法,将土层分为 2 层,计算饱和软黏土地区地铁振动荷载作用下隧道周围土体的变形。马险峰等^[4]采用数值计算方法研究了类矩形隧道地铁振动的传播衰减规律,并将隧道埋深和土层弹性模量作为参数研究其对规律的影响。蒲黍娟等^[5]采用二维模型,考虑土体分层及隧道衬砌和道床的影响,对地铁循环荷载作用下隧道周边软黏土的动力响应特性进行了研究。而现有的

地铁动力反应计算中,对于隧道注浆影响地铁动力反应的研究较少,隧道周边土体注浆对地铁荷载传播的影响常被简化忽略。

实际上注浆可以有效提高土体的弹性模量等力学参数,左龙等^[6]通过砂土的高聚物注浆实验研究了注浆前后的力学性质差异,结果表明注浆加固土的弹性模量比纯砂土增加了 1 倍左右,泊松比差异不大;Dano 等^[7]对砂土进行细水泥和矿物基注浆实验,结果显示注浆前后摩擦角基本不变,割线模量增加 1 倍甚至更多;李夏^[8]、肖尊群等^[9]研究了酸性水玻璃注浆材料的注浆效果,结果表明注浆能有效地增加试件的抗压强度。并且,由于注浆区域紧邻振源,注浆区力学性质的改变势必对荷载的传播造成重要影响。

因此,有必要研究隧道注浆对地铁动力反应的影响,以提高数值模拟和理论分析的准确性。笔者采用有限元分析方法,建立了土体-隧道二维计算模型,分析了在不同隧道埋深及荷载频率下,注浆结石体强度、注浆范围对地面振动加速度反应的影响。

1 有限元计算模型

1.1 计算域与边界条件

由于土体实际为半无限空间,在进行数值分析时,需要截取有限的范围进行数值计算,截取的土体范围

过大会导致结构计算模型太大,计算效率太低,截取地基的范围太小又会使散射波在人工边界上产生反射而导致计算结果存在较大误差。只考虑几何阻尼的情况下,瑞利波振幅成比例减小^[10],而实际土体还受到材料阻尼的影响,已有的实测结果表明距离列车轨道50 m以外时列车荷载基本衰减完^[11]。因此,笔者提出的解决方法是计算模型取到50 m的范围,且采用黏弹性人工边界的方法减少边界反射的影响。二维黏弹性人工边界等效物理系统的边界弹簧-阻尼元件参数分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_s \\ K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_p \end{array} \right. . \quad (1)$$

式中: K_{BT} 、 K_{BN} 分别为弹簧法向与切向刚度; R 为波源至人工边界点的距离; C_s 、 C_p 分别为 S 波和 P 波波速; G 为介质剪切模量; ρ 为介质密度; α_T 、 α_N 分别为切向与法向黏弹性人工边界参数。

参考刘晶波等^[11]推荐的二维问题中 α_N 的取值范围[0.35, 0.65]、 α_T 的取值范围[0.8, 1.2],笔者取 $\alpha_T=0.5$ 、 $\alpha_N=1.0$ 。

1.2 地铁动荷载模拟与网格划分

在进行动力有限元计算时,首先必须将地铁列车运行时的振动以一个较合理的动荷载形式输入,在线弹性范围内,列车荷载可采用 Fourier 变换分解为一系列简谐函数的和^[12],因此,笔者将列车荷载简化为简谐函数,即:

$$\{P(t)\}=\{S\}A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中: A 为列车峰值荷载; f 为激振频率。

土体采用二维平面单元离散,单元的长度控制要求为^[13]: $l \leq \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{8}\right) \lambda_{min}$,其中 λ_{min} 为结构振动反应分析中最小振动波长, $\lambda_{min} = \frac{v_s}{f}$, v_s 为振动波在土体中的传播速度。土体密度取 2000 kg/m³,弹性模量取 2×10⁸ Pa,泊松比取 0.35,则土体的剪切波速 $v_s \approx 200$ m/s。实测结果表明列车荷载频率主要在 90 Hz 以内^[14-15],因此 $\lambda_{min} \geq 2.2$ m,则 $l \leq 0.55$ m 均可满足计算要求,计算模型的单元长度均不大于 0.5 m。

1.3 隧道与注浆模拟

隧道模型采用圆形隧道模拟,隧道直径 6 m,列车床 3 m,取半分析,整体的有限元模型如图 1 所示,靠近隧道区域网格划分进行加密处理。

隧道注浆对地铁荷载下地面反应的影响因素主

要有 2 个,一是因注浆效果不同导致注浆区域的土体力学参数的改变,二是注浆范围大小的差异。而实际地铁荷载在土体中的传播受到多种因素影响,如荷载频率、土体性质、观测点与波源的相对位置等。因此,为了研究隧道注浆对地铁荷载下地面反应的影响,分别在不同隧道埋深和不同荷载频率下,分析注浆体强度及注浆范围对地面反应的影响。

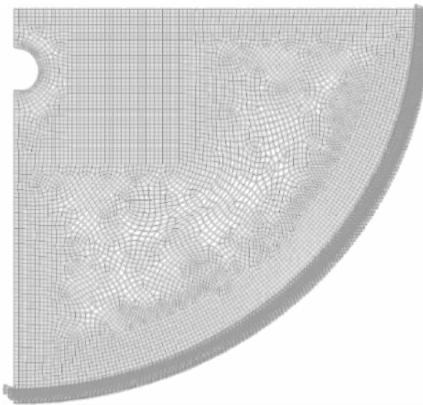


图 1 土体-隧道有限元模型

地铁隧道注浆主要有超前小导管注浆和支护背后注浆 2 种,笔者主要研究地铁运行时的注浆影响,因此只考虑隧道支护背后注浆的情况。工程上地铁隧道支护背后注浆的范围因工程需求、场地条件的不同而存在差异,笔者分析注浆范围影响时取隧道周边半径 R 为 0.5、1、1.5、2、2.5、3 m 共 6 种区域下的工况,研究注浆范围对地面反应的影响。注浆可以有效提高土体的强度、抗液化能力等,注浆材料、注浆量、注浆工法不同,则土体的加固效果也会有很大差异。为了模拟地铁隧道周边土体的注浆效果,改变隧道周边土体的弹性模量与密度,不考虑注浆前后泊松比的差异。定义注浆效果指标 e 为:

$$e = \frac{E_f}{E_b} \quad (3)$$

式中: E_f 为注浆前土体的弹性模量; E_b 为注浆后土体的弹性模量。

注浆后土体密度和弹性模量的变化与注浆材料类别、材料配比、土体性质等均有关联,为了简化分析,用注浆效果指标 e 定义土体注浆后密度:

$$\rho_b = \rho_f + \frac{(e-1)}{10} \rho_f \quad (4)$$

式中: ρ_f 为注浆前土体的密度; ρ_b 为注浆后土体的密度; e 为注浆效果指标。

为了定量分析隧道注浆对地面加速度反应的影响,定义注浆影响指标为:

$$\eta = \frac{a_{b-\max} - a_{f-\max}}{a_{f-\max}}。 \quad (5)$$

式中: $a_{f-\max}$ 为注浆前地面加速度反应最大值; $a_{b-\max}$ 为注浆后地面加速度反应最大值。

2 注浆体强度对地面反应的影响

2.1 不同隧道埋深的影响

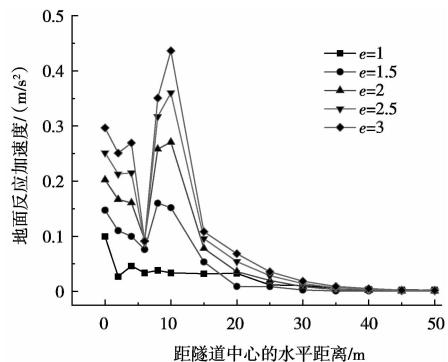
为研究不同隧道埋深情况下,注浆体强度对地铁运行下地面反应的影响,地铁荷载的输入频率 f 取 50 Hz,注浆范围 R 取 1 m,隧道埋深 H 分别取 5、10、15 m,计算注浆效果指标 e 分别为 1、1.5、2、2.5、3 时的地面加速度反应。定义地面测点距隧道中心的水平距离为 d ,得到隧道埋深分别为 5、10、15 m 时的地表反应与测点距隧道中心的水平距离 d 的关系如图 2 所示,注浆影响指标 η 与注浆效果指标 e 的关系如图 3 所示。

由图 2 可以看出,在 50 Hz 激振频率下,不同埋深条件下地面反应的衰减规律不同,但均存在振动放大区,3 种隧道埋深下,地铁隧道周边注浆对地面反应均有明显的放大作用。由图 3 可以看出,注浆影响指标 η 与注浆效果指标 e 近似成相同的正比关系;当注浆效果指标大于 2 时,即注浆后土体弹性模量增加 1 倍以上时,地面加速度反应的最大值也增长了 1 倍以上,说明隧道注浆对地面反应的影响很大。

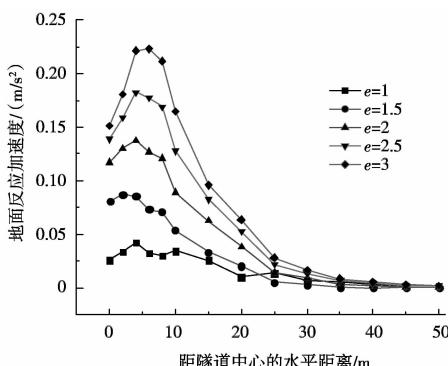
2.2 不同激振频率的影响

实际地铁荷载并非由单一频率组成,综合许多学者的实测结果^[14-15]表明,地铁荷载的频率主要在 20~90 Hz 范围内,而不同激振频率下波的传播规律存在很大差异,为此研究地铁荷载激振频率分别为 10、30、50、70、90 Hz 时,隧道注浆体强度变化对地面反应的影响。得到隧道埋深 10 m、不同激振频率下的地表反应与测点距隧道中心的水平距离 d 的关系如图 4 所示,其中 50 Hz 荷载频率计算结果见图 2b),不同荷载频率下注浆影响指标 η 与注浆效果指标 e 的关系如图 5 所示。

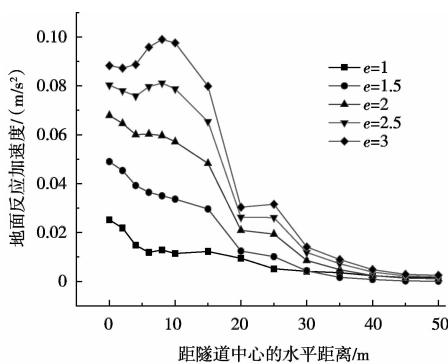
综合图 4 和图 2b)可以看出,注浆体强度的变化对地面反应的影响与荷载频率有很大关系,当激振频率不大于 50 Hz 时,注浆体强度越高,地面反应越大;当激振频率为 70 Hz 与 90 Hz 时,随着注浆体强度的升高,地面整体的加速度反应先减小后增大,呈现非线性变化。由图 5 可以看出,当激振频率不大于 50 Hz 时,注浆影响指标 η 与注浆效果指标 e 近似成正比关系;当激振频率为 10 Hz 时,注浆体强度对地面反应的影响很小。



a) 隧道埋深 $H=5$ m



b) 隧道埋深 $H=10$ m



c) 隧道埋深 $H=15$ m

图 2 不同隧道埋深下注浆效果的影响

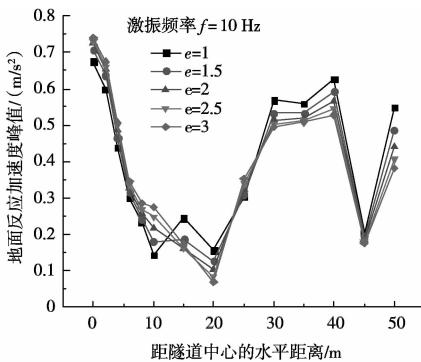


图 3 不同隧道埋深下注浆体强度对地面反应的影响程度

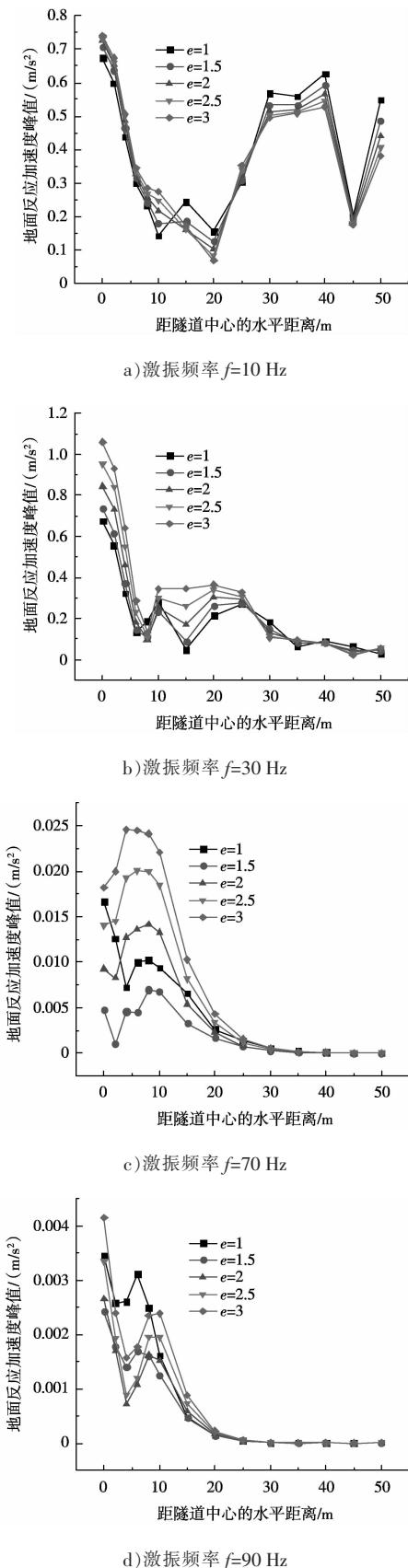


图 4 不同激振频率下注浆效果的影响

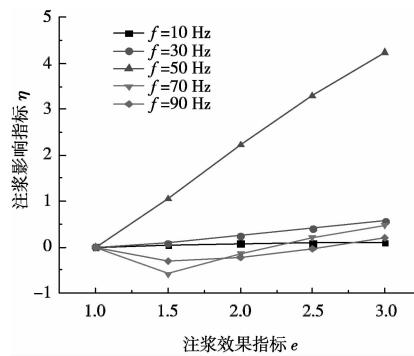


图 5 不同激振频率下注浆体强度对地面反应的影响程度

3 注浆范围对地面反应的影响

3.1 不同隧道埋深的影响

为研究不同隧道埋深情况下,注浆范围对地铁运行下地面反应的影响,地铁荷载的输入频率 f 取50 Hz,注浆效果指标 e 取2,隧道埋深 H 分别取5、10、15 m,计算注浆范围 R 分别为0.5、1、1.5、2、2.5、3 m时的地面加速度反应。得到隧道埋深分别为5、10、15 m时的地表反应与测点距隧道中心的水平距离 d 的关系如图6所示,不同埋深下注浆影响指标 η 与注浆范围 R 的关系如图7所示。

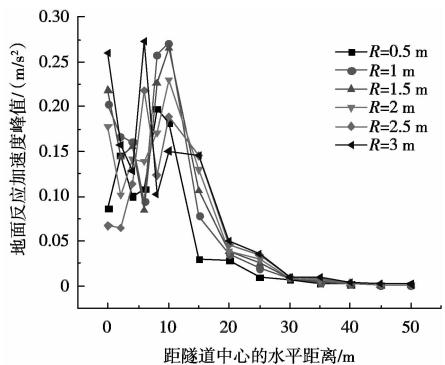
由图6可以看出,在50 Hz激振频率下,随着注浆范围的增加,地面加速度反应呈现强非线性变化。由图7可以看出,随着注浆范围的增加,地面最大加速度反应整体呈现增大的趋势,不同注浆范围条件下注浆影响指标 η 都大于1,但注浆范围对注浆影响指标 η 的影响存在很强的非线性关系。

3.2 不同激振频率的影响

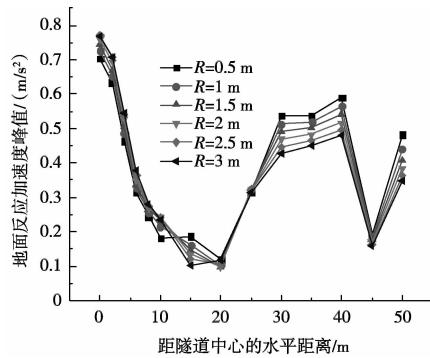
地铁荷载激振频率分别为10、30、50、70、90 Hz时,不同激振频率下的地表反应与测点距隧道中心的水平距离 d 的关系如图8所示,不同荷载频率下注浆影响指标 η 与注浆范围 R 的关系如图9所示,其中隧道埋深均为10 m,50 Hz荷载频率计算结果见图6b)。

综合图8和图6b)及图9可以看出,10~30 Hz激振频率下,注浆范围对地面反应的影响很小,50~90 Hz激振频率下,注浆范围对地面反应的影响很大;不同激振频率下,注浆范围对地面反应的影响存在很强的非线性。

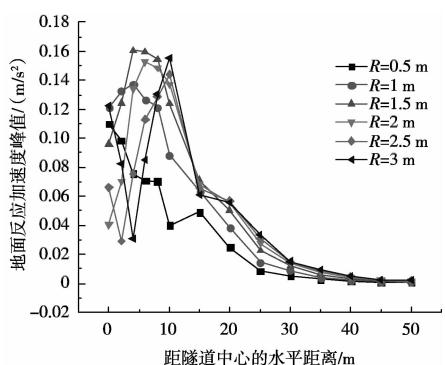
综合不同埋深与不同激振频率下注浆体强度及注浆范围对地面反应的影响,可以看出隧道埋深影响较小,激振频率影响很大;10~30 Hz激振频率下,注浆体强度及注浆范围对地面反应的影响较小;50 Hz激振频率下,地面最大加速度反应与注浆效果指标近似成



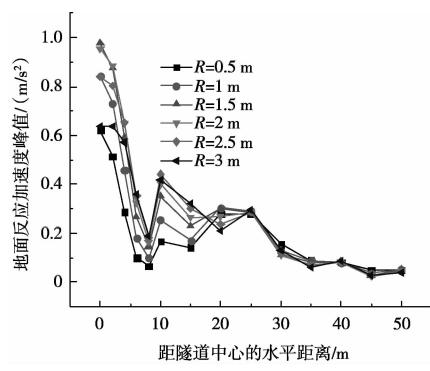
a) 隧道埋深 $H=5 \text{ m}$



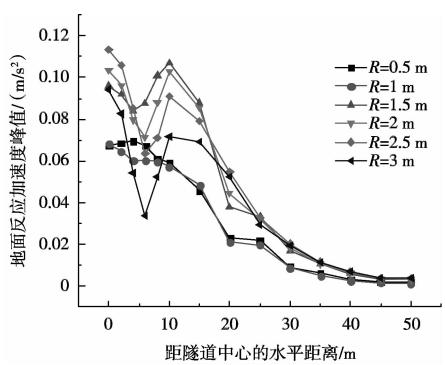
a) 激振频率 $f=10 \text{ Hz}$



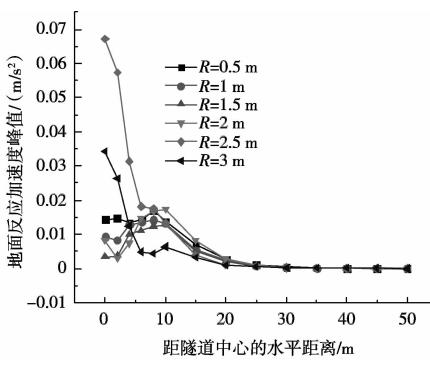
b) 隧道埋深 $H=10 \text{ m}$



b) 激振频率 $f=30 \text{ Hz}$



c) 隧道埋深 $H=15 \text{ m}$



c) 激振频率 $f=70 \text{ Hz}$

图 6 不同隧道埋深下注浆范围的影响

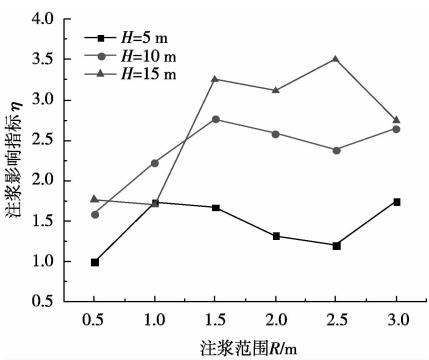
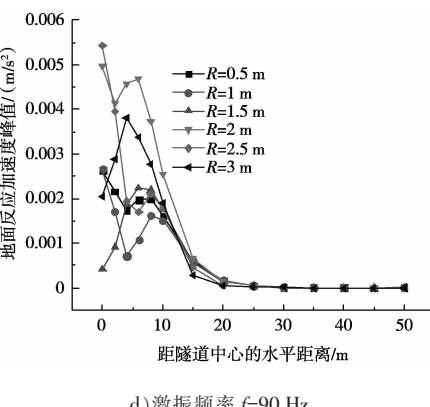


图 7 不同隧道埋深下注浆范围对地面反应的影响程度



d) 激振频率 $f=90 \text{ Hz}$

图 8 不同激振频率下注浆范围的影响

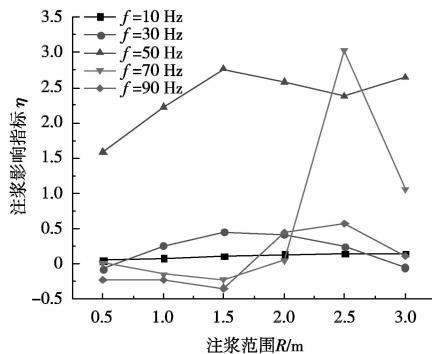


图 9 不同激振频率下注浆范围对地面反应的影响程度

正比,且整体趋势随着注浆范围的增大而增大;70 Hz 与 90 Hz 激振频率下,注浆体强度与注浆范围对地面反应的影响存在很强的非线性。

4 结论

笔者采用有限元分析方法,建立了土体-隧道二维计算模型,分析了在不同隧道埋深及激振频率下,注浆体强度与注浆范围对地面振动加速度反应的影响。计算及分析研究结果如下:

1)隧道埋深影响较小,激振频率影响很大。

2)10~30 Hz 激振频率下,注浆体强度与注浆范围对地面加速度反应的影响很小。

3)50 Hz 激振频率下,注浆影响指标 η 均大于 1,地面最大加速度反应与注浆效果指标近似成正比,且整体趋势随着注浆范围的增大而增大。

4)70 Hz 与 90 Hz 时,注浆体强度与注浆范围对地面反应的影响存在很强的非线性。

5)在地铁动力反应分析中,隧道注浆的影响不能忽略,计算时应详细考虑注浆体强度与注浆范围的影响。**MET**

参考文献:

- [1] 闫维明,聂晗,任珉,等.地铁交通引起地面振动的实测与分析[J].铁道科学与工程学报,2006,3(2):1~5.

(上接第 59 页)

3)在隧道围岩地质条件较好情况下,对上跨铁路隧道段进行差异化设计,采用合理的爆破方式,可达到控制新建隧道合理进尺与确保铁路隧道运营安全的双重目的。**MET**

参考文献:

- [1] 李恩智,李根强,等.深圳市坂银通道工程鸡公山隧道详细勘察阶段岩土工程勘察报告[R].深圳:深圳市勘察研究院有限公司,2014.

- [2] 罗文俊,雷晓燕,伍明辉.地铁列车经过轨道结构的振动研究[J].铁道工程学报,2009,26(5):84~89.
- [3] 唐益群,栾长青,张曦,等.地铁振动荷载作用下隧道土体变形数值模拟[J].地下空间与工程学报,2008,4(1):105~110.
- [4] 马险峰,张宝民,方旭,等.类矩形隧道地铁振动在软土地层中传播衰减数值模拟研究[J].路基工程,2018,200(5):140~145.
- [5] 蒲黍娟,叶斌,王海诚,等.地铁循环荷载作用下隧道周边软黏土动力响应特性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(2):19~26.
- [6] 左龙,王阳阳.砂土注浆加固强度特性研究[J].山西建筑,2017(33):84~86.
- [7] DANO C,HICHER P Y,TAILLIEZ S. Engineering properties of grouted sands[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2004,130(3):328~338.
- [8] 李夏,徐军哲,刘人太,等.新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J].隧道建设,2017(10):101~107.
- [9] 肖尊群,刘宝琛,乔世范,等.新型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2829~2834.
- [10] RICHARD F E,WOODS R E,HALL J R. 土与基础的振动[M].徐攸在,徐国彬,曾国熙,等译.北京:中国建筑工业出版社,1976.
- [11] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006,28(9):1070~1075.
- [12] 王田友,丁洁民,楼梦麟.地铁运行引起场地振动的荷载与分析方法[J].工程力学,2010,27(1):195~201.
- [13] KUHLEMAYER R L,LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. ASCE soil mechanics and foundation division journal,1973,99(5):421~427.
- [14] 楼梦麟,贾旭鹏,俞洁勤.地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J].防灾减灾工程学报,2009(3):282~288.
- [15] 单涛涛,楼梦麟,蒋通,等.地铁诱发地面振动传播衰减特性分析[J].防灾减灾工程学报,2013(4):461~467.

收稿日期:2019-05-10

基金项目:土木工程防灾国家重点实验室开放基金(SLDRCE15-01)

作者简介:王妍,女,硕士,高级工程师,主要从事隧道与地下工程管理工作。

公司,2014.

- [2] 中铁西南科学研究院有限公司.深圳市坂银通道工程鸡公山隧道上跨厦深铁路梅林隧道检测报告[R].成都:中铁西南科学研究院有限公司,2016.
- [3] 刘明高,吴金刚,毕强.城市山岭隧道穿越别墅区开挖方式的选择与实践[J].市政技术,2018,36(3):135~140.

收稿日期:2019-05-06

作者简介:刘明高,男,高级工程师,硕士,主要从事隧道工程设计与研究工作。