

DOI: 10.11779/CJGE2019S2044

列车荷载作用下机械法联络通道—隧道结构响应

何邦亮¹, 丁修恒¹, 郎志超¹, 郑明飞², 熊勇林², 朱瑶宏²

(1. 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 200436; 2. 宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 机械法联络通道作为一种新型施工工艺, 接头处的连接形式采用钢板焊接而成, 焊接工艺在动力荷载作用下容易产生疲劳损伤破坏。针对接头处的问题, 通过有限元模拟研究了列车荷载对于不同连接形式下主隧道与联络通道上的加速度响应及位移响应情况。研究表明: 对于位移响应半刚性连接形式下接头能吸收一部分位移传递, 有利于隧道整体结构的安全, 刚性接头则整体性较强, 位移不会出现突然骤减的情况; 半刚性接头能削弱加速度的传递, 而刚性接头整体性强, 对加速传递效率高。

关键词: 列车荷载; 连接形式; 联络通道; 有限元模拟; 接头

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0173-04

作者简介: 何邦亮(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事地下工程方面的科研和施工工作。E-mail: 1036963607@qq.com。

Dynamic response of different connection forms of mechanical connection tunnels under train loads

HE Bang-liang¹, DING Xiu-heng¹, LANG Zhi-chao¹, ZHENG Ming-fei², XIONG Yong-lin², ZHU Yao-hong²

(1. Shanghai Civil Engineering Co., Ltd. of CREC, Shanghai 200436, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: As a new type of construction process, the mechanical connection channel is welded by steel plate, and the welding process is prone to fatigue damage under dynamic loads. According to the problem of the joint, the acceleration response, displacement response and communication channel under different connection modes are studied by using the finite element simulation. For the displacement response semi-rigid connection, the joint can absorb part of the displacement transmission, which is beneficial to the safety of the overall structure of the tunnel. The rigid joint is more integral and the displacement does not suddenly drop. The semi-rigid joint can weaken the transmission of acceleration, while the rigidity of the rigid joint is strong, and the acceleration transmission efficiency is high.

Key words: train load; connection form; contact channel; finite element simulation; joint

0 引言

根据中国地铁设计要求, 长距离区间隧道须按一定间距设置横向联络通道, 以满足隧道的通风、救援以及疏散等应急要求^[1]。但是联络通道施工存在一定难度, 其结构刚度与主隧道有所差异, 在复杂的准静态以及列车动态荷载作用下, 易形成应力集中, 造成结构屈服或疲劳破坏^[2]。目前, 关于列车荷载作用下隧道主体结构动态响应的研究较多, 但关于列车荷载下联络通道的动力响应研究较少, 且鲜有联络通道在不同连接方式下的动力特性对比。

对于列车振动数值模型而言, 研究者大多采用二维模型或简单的三维模型。Auersch^[3]通过车轨相互作用模型得到列车激励荷载, 研究了列车运营情况下地面的振动响应规律; Vrouwenverlder^[4]通过建立河底隧道的二维数值模型, 分析了道床、隧道结构以及地面

在列车振动荷载下的振动响应特性。机械法联络通道施工工艺要求主隧道与联络通道之间的连接处运用钢板焊接, 连接处成为一个完全刚性的连接形式。根据结构力学知识可知刚性连接处更容易产生附加弯矩与剪力。在列车荷载的作用下, 连接处的受力必然不同于传统连接^[5]。所以有必要通过有限元分析连接处在列车荷载作用下的变形情况, 并且对应探讨不同连接形式下连接处的变形状况。

本文运用 PLAXIS 3D 建立隧道与联络通道三维有限元模型, 考虑在单线列车荷载作用下, 隧道与联络通道在刚性与半刚性连接方式下的动力响应分析。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778303)

收稿日期: 2019-04-29

表 1 HSS 模型参数

Table 1 Parameters of HSS model

土层名称	c' /kPa	φ' /($^{\circ}$)	ψ /($^{\circ}$)	E_{50}^{ref} /MPa	E_{oed}^{ref} /MPa	E_{ur}^{ref} /MPa	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$ / 10^{-4}	ν_{ur}	K_0
黏土	29.9	12.7	0	2.2	2.6	10.8	30	1.0	0.2	0.78
淤泥	14.8	12.1	0	3.4	3.9	15.0	59	1.0	0.2	0.79
粉质黏土	21.3	17.4	0	4.4	4.8	15.0	60	1.0	0.2	0.70
淤泥质粉质黏土	20.7	16.8	0	6.5	7.0	25.0	71	1.0	0.2	0.71
黏土	23.7	15.9	0	5.0	5.5	15.0	60	1.0	0.2	0.73
粉砂	9.0	30.0	0	5.1	5.0	15.2	75.1	1.0	0.2	0.83
粉质黏土	29.6	17.4	0	7.5	7.6	27.8	80.1	1.0	0.2	0.70

料，运用如下表 1 所示的土体参数。

1 工程概况

本工程依托于宁波市机械法联络通道施工，选取了一个试验段的项目。该工程是通过机械法来完成两条主隧道之间的联络通道施工。本工程中两条主隧道中心相隔 17 m，主隧道长度为 80 m，顶面距离地表约为 12.3 m。主隧道外径 6.2 m，管片厚度为 0.35 m。联络通道外径为 3.15 m，管片厚度为 0.25 m，联络通道通过盾构法进行施工，由盾构机切削主隧道的管片，并开挖土体。

2 有限元模型与材料参数

2.1 有限元模型

模型尺寸为宽度 60 m，长度 80 m，深度 29.5 m，初始地下水位设在地下 1 m 处。模型底面完全固定约束，模型上表面为自由面。主隧道的位置及尺寸大小按照实际工程设置。小隧道设于主隧道中间 40 m 处的位置。土层的深度根据勘察报告中确定，总共取 7 层土体，土层深 29.5 m，每层土深分别为 3.4，2.8，3.9，4.3，6.0，3.6，5.5 m。

2.2 网格划分

PLAXIS 软件中程序自动划分网格，网格的粗细程度可根据研究结果所需的精确度做适当调整。其中隧道结构和土体结构的网格划分图如图 1 所示。

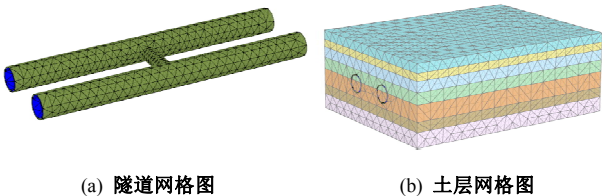


图 1 网格划分图

Fig. 1 Meshing

2.3 模型材料参数

(1) 土层参数

土体本构选择 HSS 本构模型，根据梁发云等[6]研究的 HSS 本构模型相关参数，并结合具体工程勘察资

(2) 隧道结构参数

采用等效刚度法模拟既有隧道，假定混凝土管片在基坑开挖过程中一直处于弹性变形阶段，根据相应的研究成果，定义盾构隧道横向刚度有效率为 75%^[7]，用以反映管片间接头存在对既有隧道变形产生的影响。弹性模量取为 C50 混凝土模量值 ($E_{C50}=34.5$ GPa) 的 75%，即 $E=0.75E_{C50}=25.9$ GPa，泊松比取为 0.25。由于之后需要研究不同的连接形式，所以把隧道管片用板单元来模拟。

(3) 主隧道与联络通道之间的连接形式

主隧道与联络通道之间设置特殊连接，一种是刚性连接，两个板之间不可以转动，且交界处不能分离产生位移，是一个整体性的变形。一种是半刚性连接，两个板之间可以有一定的转动，且交界处能分离产生一定的位移，但是其连接形式也是整体性连接。

(4) 列车荷载

列车荷载选取了时速 80 km/h 下的列车运行中的振动荷载，由于本次计算采用的是简单模型，并未按照实际将轨枕考虑进去，故为反映两条轨道下的荷载，计算中将两条轨道荷载大小线性叠加，将施加于隧道最底部顶点处。施加荷载时为了考虑列车行进过程，在隧道底部点纵向等时间差依次施加节点荷载，每个节点的振动存在时间差，具体荷载曲线见下图 2 所示。

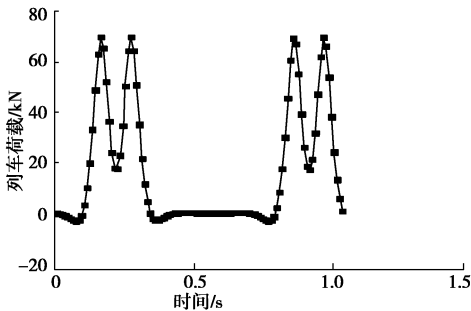


图 2 单节列车移动时双条铁轨合并荷载

Fig. 2 Double-rail-combined loads under motion of single train

2.4 数值计算工况

本模拟的目的是为了研究不同接头形式下主隧道

及联络通道受到列车荷载的响应情况。因此, 研究的具体内容分为 2 个工况: 工况一为单线列车荷载作用下接头形式为刚性连接; 工况二为单线列车荷载作用下接头形式为半刚性连接。

3 模拟结果分析

在列车荷载作用下, 分别分析隧道的加速度响应、隧道的位移。在模型中选择图 3 所示的节点, 用于分析列车荷载作用下, 不同接头形式对于加速度传递响应及位移传递响应规律。

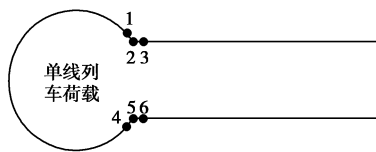


图 3 节点的位置示意图

Fig. 3 Position of joints

3.1 隧道加速度响应对比分析

图 4 为列车荷载处在联络通道附近 $T=2.0$ s 处的隧道加速度响应。当列车荷载运行到联络通道附近, 此时联络通道上的加速度响应增大, 刚性连接形式稍大于半刚性连接形式, 且加速度响应值都接近主隧道上加速度响应的一半。从云图上还能看出, 刚性连接对于加速度的传递较为连续, 而半刚性连接工况下接头处出现明显的不连续状况。

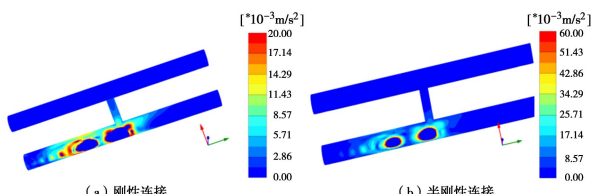


图 4 $T=2.0$ s 时隧道结构加速度响应云图

Fig. 4 Acceleration response cloud of tunnel structure at $T=2.0$ s

从图 5 (a), (b) 可知, 图 5 (b) 最大值达到 0.0115 m/s^2 , (a) 图最小为 0.0107 m/s^2 , 这说明离列车荷载越近的节点, 其加速度响应就越大。从图 (a) 可知半刚性连接形式的主隧道加速度响应要大于刚性连接形式。但是通过连接处传递之后, 图 5 (b) 反映了半刚性连接形式的联络通道加速度明显减小, 而刚性连接形式的联络通道加速度有小幅减小, 这使得刚性连接形式下联络通道上的加速度大于半刚性连接形式。

从图 5 (c), (d) 可以明显看出, 半刚性连接方式使得主隧道的加速度响应要明显大于刚性连接方式, 造成这种现象的原因是因为半刚性连接形式的主隧道和联络通道的连接性不强, 主隧道受到约束小, 列车荷载引起了主隧道的加速度响应反而较大。当加速度通过不同连接方式传递到联络通道之后, 发现半刚性连接使得加速度传递骤减, 从 0.06535 m/s^2 减到

0.01299 m/s^2 。而刚性连接递减的较小, 这使得刚性连接形式的联络通道上节点加速度反而比半刚性连接的大。

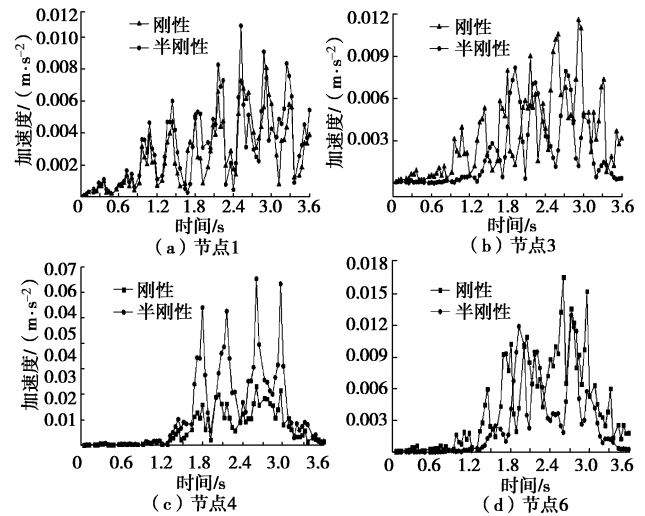


图 5 隧道特征点的加速度响应时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of acceleration response of tunnel feature points

3.2 隧道位移响应对比分析

图 6 (a) 是主隧道上的节点, 图 6 (b) 图为联络通道上的节点。从图 6 (a) 可以看出, 刚性连接形式下主隧道上节点的位移响应在列车荷载靠近联络通道时, 峰值增长的较快, 并且达到 0.0358 mm 。半刚性连接形式下, 主隧道上节点的位移响应在列车荷载靠近联络通道时, 其增速也较快, 但是相比刚性连接形式下的小一些, 最大峰值达到将近 0.026 mm 。从图中可以明显看出刚性接头形式下受列车荷载的位移响应明显大于半刚性形式, 这是由于不同接头形式对于位移响应的传递效率也不相同。

图 6 (c), (d) 点是离列车荷载最近的位置, 图上反映出的总位移也最大。由图可知, 半刚性连接形式下主隧道上的位移大于刚性连接形式下主隧道的位移。这是因为刚性连接形式下联络通道将左右两条主隧道连成一个刚性的整体, 使其抵抗变形的能力更加强, 而半刚性连接的整体性弱, 导致列车荷载对主隧道的影响更大。从图 6 (d) 可以明显看出, 刚性连接形式下节点位移没有出现大幅度减弱, 而半刚性连接形式下节点的位移出现了骤减, 位移减幅达到将近三分之二。并且使得位移响应值出现与主隧道节点上相反的情况, 在联络通道上节点的位移转变为刚性连接形式下大于半刚性连接形式。

图 7 为列车荷载处在中间联络通道附近 $T=2.0$ s 处隧道的总位移响应。当 $T=2.0$ s 时, 列车荷载运动到联络通道附近, 此时联络通道上的位移响应值接近最大值, 但从数值来看也比较小, 且两种连接形式下

位移响应的最大值差距不大。这说明当荷载在近处时,刚性连接形式与半刚性连接形式下隧道的位移响应相接近,刚性连接形式稍大一些。

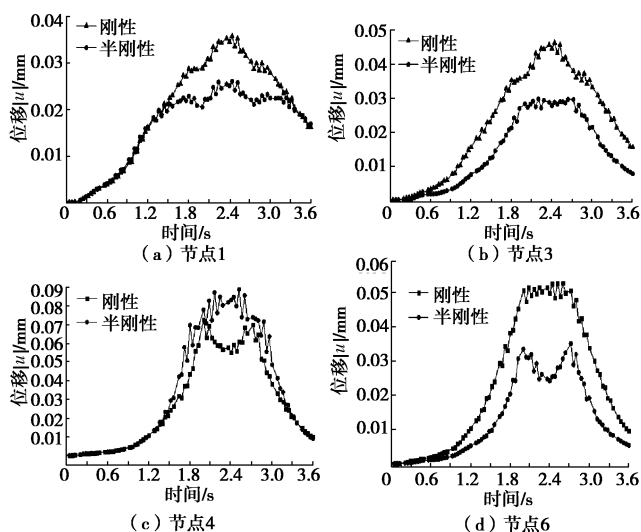


图6 隧道特征点的位移 $|u|$ 响应时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of response displacement of tunnel feature points $|u|$

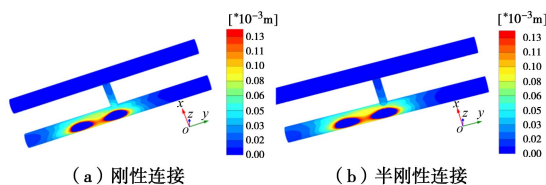


图7 $T=2.0$ s时隧道结构总位移响应云图

Fig. 7 Response cloud total displacement of tunnel structure at $T=2.0$ s

4 结 论

本文通过建立隧道与联络通道的三维有限元模型研究了在单线列车荷载作用下,隧道与联络通道在刚性与半刚性连接方式下的动力响应分析。得到以下2点结论。

(1) 从加速度响应与位移响应上看,刚性接头能较好的传递列车荷载的响应而半刚性接头处对于列车荷载的传递有明显的减弱现象。说明刚性接头能较好地适应两者共同的变形作用,但是也会带来更多附加应力的产生。建议提高结构的赘余度,来确保连接处的安全性。

(2) 上述模拟采用的是单节列车荷载,总体上看其对于隧道结构的影响较小,若是整个列车荷载长期作用下可能会产生叠加影响,影响范围及效果会更大,并且对焊接工艺的接头容易发生疲劳破坏。今后可以更进一步研究接头在长期列车荷载作用下的受力及变形情况。

参考文献:

- [1] 卢渝, 金辰虎. 我国城市轨道交通的建设与展望[J]. 铁道运输与经济, 2004, 26(5): 21-23. (LU Yu, JIN Chen-hu. The construction and prospect of China urban mass transit[J]. Chinese Journal of Railway Transport and Economy, 2004, 26(5): 21-23. (in Chinese))
- [2] SHEN H J. Finite element analysis of structure-born vibration from high-speed train[J]. Chinese Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 259-273.
- [3] AUERSCH L. The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines[J]. Chinese Journal of Sound and Vibration, 2005, 28(4): 103-132.
- [4] VROUWENVELDER T. Stochastic modelling of extreme action events in structural engineering[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15(1): 109-117.
- [5] 曾丰姿, 李兆平, 刘军. 区间盾构隧道联络道施工对隧道结构和周围地层安全性影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(3): 93-97, 147. (ZENG Feng-zi, LI Zhao-ping, LIU Jun. Study on safety of tunnels structure and stratum stability in construction of traverse channel between two shield tunnels[J]. Chinese Journal of China Safety Science Journal, 2006, 16(3): 93-97, 147. (in Chinese))
- [6] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269-278. (in Chinese))
- [7] LEE K M, GE X M. The equivalence of a jointed shield driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38: 461-483.

(责编: 孙振远)