

隧道开挖对上覆既有管线影响的简化解析计算方法<sup>\*</sup>董瑞桥<sup>1</sup> 施展斌<sup>2</sup>

(1. 中铁十八局集团有限公司, 300222, 天津; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 310058, 杭州)

**摘要** [目的] 当盾构隧道下穿既有管线时, 会引起既有管线发生沉降变形, 因此有必要通过理论计算对隧道开挖引起的上覆既有管线受力变形进行研究。[方法] 基于两阶段法提出一种可预测隧道开挖对上覆既有管线变形响应影响的简化计算方法, 先采用 Loganathan 公式获得隧道开挖引起的周围土体自由竖向位移, 并把土体自由竖向位移附加在既有管线轴线上, 再将既有管线简化为无限长梁搁置于 Vlazov 地基模型, 考虑管线侧向土体的影响, 利用有限差分法获得管线纵向变形的解析解。[结果及结论] 将所提简化计算方法与既有文献中的实际工程监测数据进行对比, 验证了所提简化计算方法的合理性; 将所提简化计算方法同退化的 Vlazov 地基模型及 Winkler 地基模型计算结果进行对比, 验证了所提简化计算方法更贴近实测数据。地层损失率、隧道开挖半径的增大会引起既有管线沉降及弯矩的增大; 增大新建隧道与既有管线的夹角能够减小管线沉降, 但会造成管线弯矩的增大。

**关键词** 地铁隧道; 既有管线; 解析解

**中图分类号** TU990.3; U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.005

## Simplified Analytical Calculation for the Influence of Tunnel Excavation on Overlying Existing Pipelines

DONG Ruiqiao<sup>1</sup>, SHI Zhanbin<sup>2</sup>

(1. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., 300222, Tianjin, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, 310058, Hangzhou, China)

**Abstract** [Objective] When a shield tunnel passes under existing pipeline, it can cause settlement and deformation of the existing pipelines. Therefore, it is necessary to study the force and deformation of the overlying existing pipelines caused by tunnel excavation through theoretical calculations. [Method] Based on a two-stage method, a simplified calculation method for predicting the deformation response of overlying existing pipelines due to tunnel excavation is proposed. The method first utilizes the Loganathan function to obtain the free

vertical displacements of the surrounding soil mass caused by tunnel excavation. These displacements are then applied to the axis of the existing pipelines. The existing pipelines are simplified as infinitely long beams supported on the Vlazov foundation model. Considering the influence of lateral soil mass on the pipeline, the analytical solution for pipeline longitudinal deformation is obtained using the finite difference method. [Result & Conclusion] The proposed simplified calculation method is compared with actual engineering monitoring data from existing literature, validating the rationality. A comparison with the results from the degraded Vlazov foundation model and Winkler foundation model validates that the proposed simplified calculation method is closer to measured data. An increase in the ground loss ratio and tunnel excavation radius leads to increased settlement and bending moments in existing pipelines. Increasing the angle between the new tunnel and existing pipelines reduces pipeline settlement but increases bending moments.

**Key words** metro tunnel; existing pipeline; analytical solution

由于城市轨道交通的快速发展, 新建隧道开挖对邻近既有隧道或管线会产生较大的不利影响。目前, 大多数研究通过两阶段分析法对其进行计算, 并推导理论解析计算方法。第一阶段可以采用文献[1]提出的 Longanathan 解析法获得周边土体在隧道开挖下的自由位移场, 第二阶段将既有管线简化为搁置在 Winkler 或 Pasternak 地基模型上的梁, 并建立该状态下的管线受力平衡控制方程, 从而获得既有管线相应的地变形响应。文献[2]提出考虑土体剪切变形的 Pasternak 和 Vlazov 双参数地基模型。文献[3-4]将管线简化为 Euler-Bernoulli 梁和 Timoshenko 梁搁置在 Pasternak 地基模型上, 获得了邻近隧道开挖引起的既有管线变形响应。此外, 文献[5-8]的研究表明, 三参数 Kerr 地基模型对于预测土同隧道及桩基间的相互作用较为准确,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41807262)

但由于其参数较多,公式较为复杂,难以在实际工程中应用。

由此可知,考虑管线侧向土体作用对既有管线受力变形的影响研究较少。基于此,本文基于两阶段法提出了一种可预测隧道开挖对上覆既有管线变形响应影响的简化计算方法,将既有管线假定成搁置在 Vlazov 地基模型上的 Euler-Bernoulli 梁,引入侧向土体的影响,进一步获得了盾构开挖引起上覆既有管线变形的解析计算方法。此外,本文系统地分析了地层损失率、隧道开挖半径、新建隧道与既有管线夹角变化对既有管线受力变形的影响。

## 1 理论分析方法

Vlazov 地基模型示意图见图 1。既有管线被假定为搁置在 Vlazov 地基模型上的 Euler-Bernoulli 梁,管线受到的附加荷载为  $q$  (单位为 N)。

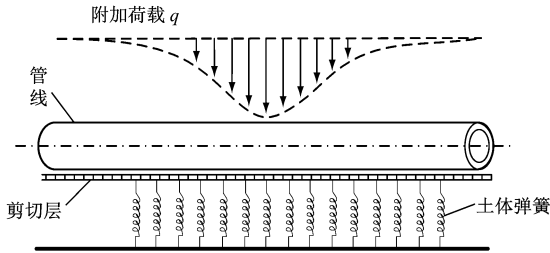


图 1 Vlazov 地基模型示意图

Fig. 1 Diagram of Vlazov foundation model

根据 Vlazov 地基模型及管线侧向土体影响<sup>[9]</sup>,可以进一步推导获得管线沉降变形的控制方程:

$$J \frac{d^4 w}{dx^4} - 2tD \frac{d^2 w}{dx^2} + (KD + \sqrt{2tK})w = qD \quad (1)$$

式中:

$w$ ——管线沉降值;

$J$ ——管线抗弯刚度;

$D$ ——管线直径;

$K$ ——地基弹簧刚度;

$t$ ——地基切应力;

$x$ ——沿着既有管线中线水平方向的坐标值。

式(1)为 4 阶微分方程,可采用差分法进行求解,考虑到实际管线两端边界受到隧道开挖的影响很小,可将两端简化为两个自由端<sup>[5,7-8]</sup>,则式(1)可简化为:

$$w(K_1 + K_2 - G_0) = qD \quad (2)$$

式中:

$K_1$ ——管线单元刚度矩阵;

$K_2$ ——地基刚度矩阵;

$G_0$ ——地基剪切刚度矩阵;

$w$ ——管线沉降矩阵;

$q$ ——管线附加应力列向量。

具体矩阵求解方法可参考文献[5-9]。此时,可得到管线沉降的解析解,由材料力学理论可进一步获得管线的弯矩和剪力。值得注意的是,当不考虑侧向土体力时,可获得退化的双参数 Vlazov 地基解(以下简称“EB-V 法”);当不考虑侧向力及土体剪切效应时,可获得退化的 Winkler 地基解(以下简称“EB-W 法”)。

## 2 算例验证

### 2.1 工程概况

深圳某地铁隧道垂直下穿既有管线模型示意图如图 2 所示。根据文献[10]的研究可知,隧道开挖引起的地层损失率  $\varepsilon = 0.84\%$ ,管线和隧道埋深分别为 8.7 m 和 14.4 m,两者的半径分别为 1.5 m 和 3.0 m,土体弹性模量和泊松比分别为 8.2 MPa 和  $5.87 \times 10^{-10}$ 。

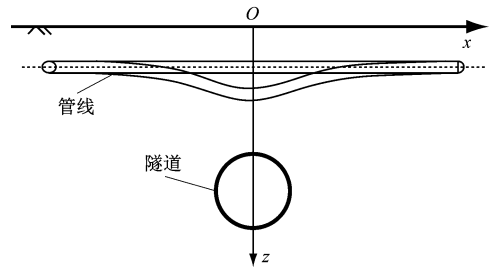


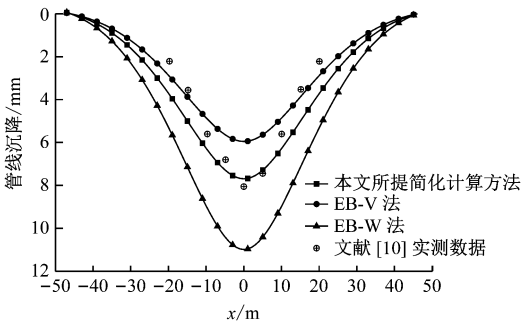
图 2 深圳某地铁隧道垂直下穿既有管线模型示意图

Fig. 2 Model diagram of a metro tunnel vertically under-passing existing pipelines in Shenzhen

### 2.2 计算结果分析

将不同计算方法所得既有管线竖向位移与文献[10]的实测数据进行对比,如图 3 所示。由图 3 可知:既有管线发生大变形范围集中在隧道中轴线两侧 30 m 范围内,所提简化计算方法、EB-V 法和 EB-W 法所得结果均较为符合实测数据的分布;采用所提简化计算方法获得的管线最大沉降为 7.6 mm;EB-V 法的计算结果较小,其最大沉降值为 5.9 mm;EB-W 法的计算结果明显偏大,管线最大沉降值为 10.9 mm。造成这一现象的原因在于 EB-W 模型忽略了既有管线侧向土体对管-土相互作用的影响,导致其预测结果低估了下穿隧道对既有管线的影响。与 EB-V 法和 EB-W 法相比较,文献[10]中实测数据的管线最大沉降为 8.0 mm,与本文所

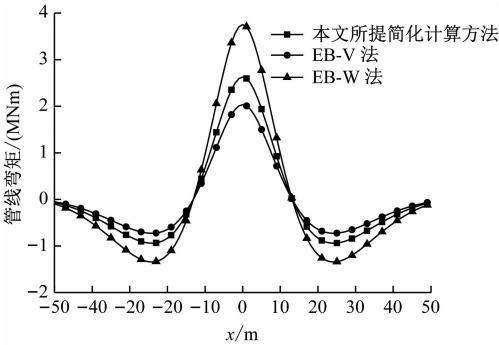
提简化计算方法的计算结果更为相符。



注:  $x$  以管线中线向右为正, 以管线中线向左为负; 余类同。  
图 3 不同计算方法所得既有管线竖向位移及文献[10]实测数据对比

Fig. 3 Comparison between the calculated results of existing pipeline vertical displacement by different methods and the measured results in literature [10]

不同计算方法下, 管线弯矩同管线上的点与管线中线水平距离间的关系如图 4 所示。由图 4 可知: 本文所提简化计算方法与 EB-V 法的计算结果较为相近, 但本文所提简化计算方法的计算结果偏大; EB-W 法的计算结果明显更大。因此, 本文所提简化计算方法及 EB-V 法在预测管-土相互作用时有较大的优势, 进一步验证了本文所提简化计算方法的合理性。



注: 弯矩以管线下侧受拉为正, 以管线上侧受拉为负; 余类同。  
图 4 不同计算方法下管线弯矩同管线上的点与管线中线水平距离间的关系

Fig. 4 Relationship between pipeline bending moment and pipeline point-midline horizontal distance by different calculation methods

3 敏感参数分析

考虑到地层损失率、隧道开挖半径及新建隧道与管线夹角  $\theta$  的变化对上覆既有管线受力变形响应的影响, 假设隧道轴线和管线轴线垂直相交, 管线

和隧道埋深分别为 10 m 和 18 m, 两者半径分别为 1.5 m 和 3.0 m, 土体弹性模量和泊松比分别为 10 MPa 和  $5.87 \times 10^{10}$ 。

3.1 地层损失率

不同地层损失率下, 管线的沉降及弯矩随管线上的点与管线中线水平距离的变化情况, 如图 5 所示。既有管线沉降变形和弯矩变化曲线沿管线中心轴线对称分布, 且管线纵向最大沉降和最大弯矩值均出现在管线中心轴处。同时, 既有管线纵向沉降及弯矩随着地层损失率的增大而线性增大。这是由于管线附加应力随着地层损失率线性增大, 致使既有管线每个位置处的沉降也随着地层损失率线性变化。因此在实际工程中, 应尽可能减小盾构造成的地层损失率, 以减轻对邻近建筑物的损害。

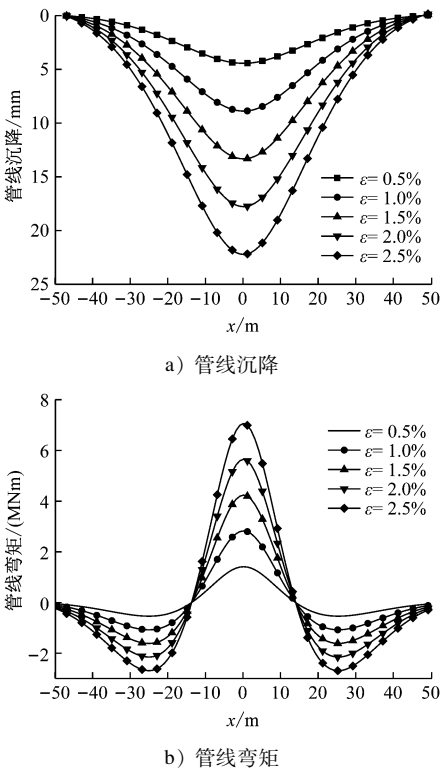


图 5 不同地层损失率下管线的沉降及弯矩随管线上的点与管线中线水平距离的变化情况

Fig. 5 Situation of pipeline settlement and bending moment changing with pipeline point-midline horizontal distance under different formation loss rates

3.2 隧道开挖半径

不同隧道开挖半径下, 管线的最大沉降和最大弯矩如图 6 所示。由图 6 可知: 随着隧道开挖半径从 3.0 m 增加至 5.5 m 过程中, 既有管线最大沉降从 4.4 mm 逐渐增大至 15.5 mm, 增幅高达 2.5 倍,

且增长速率有逐渐增大的趋势;随着隧道开挖半径的增大,管线最大弯矩从 1.4 MNm 逐渐增大至 4.7 MNm,弯矩增幅接近 2.36 倍。这说明增大隧道开挖半径对上覆既有管线影响较大,且管线应力应变峰值增速会越来越快,故在实际工程中,应尽可能减小隧道开挖半径以降低地层应力变化对上覆既有管线的影响。

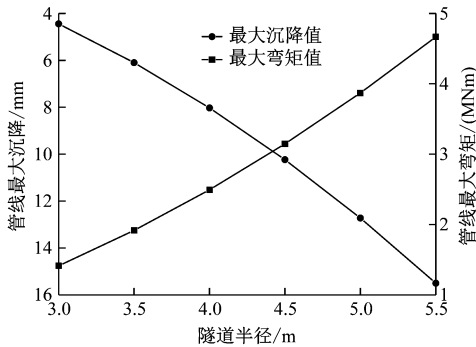


图 6 不同隧道开挖半径下管线的最大沉降和最大弯矩

Fig. 6 Maximum settlement and maximum bending moment of the pipeline with different tunnel excavation radii

### 3.3 新建隧道与既有管线夹角

不同新建隧道与既有管线夹角下,管线的最大沉降和最大弯矩如图 7 所示。由图 7 可知:新建隧道与既有管线夹角从  $15^\circ$  增大至  $90^\circ$  过程中,既有管线最大纵向沉降从 8.1 mm 逐渐减小至 4.4 mm,降幅约为 46%,其减小速率逐渐平缓;随着新建隧道与既有管线夹角的增大,管线最大弯矩从 0.52 MNm 逐渐增大至 1.41 MNm,弯矩增幅接近 1.7 倍,其增长速率也逐渐平缓。这说明新建隧道与既有管线夹角是引起上覆既有管线沉降及其内力变化的敏

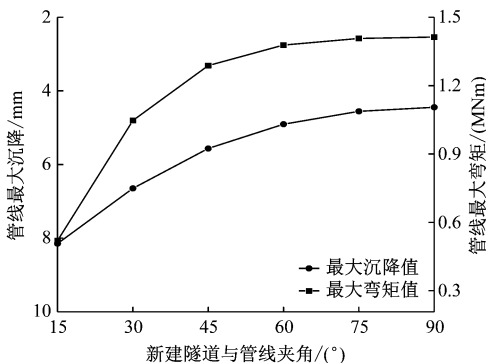


图 7 不同新建隧道与既有管线夹角下管线的最大沉降和最大弯矩

Fig. 7 Maximum settlement and maximum bending moment of pipeline with different included angles between newly-built tunnel and existing pipelines

感参数,在实际工程中应注意新建隧道和既有管线夹角的变化对既有管线变形受力的影响。

## 4 结语

本文基于两阶段法提出了一种可预测隧道开挖对上覆既有管线变形影响响应的简化计算方法,主要获得以下几个结论:

- 1) 将管线假定成搁置在 Vlazov 地基模型上的 Euler-Bernoulli 梁,引入了管线两侧侧向土体的影响,采用有限差分法简化获得管线受力变形响应。
- 2) 与深圳地铁某地铁隧道实测数据进行对比,本文所提简化计算方法结果与实测数据基本吻合,更接近实测数据。
- 3) 增大地层损失率能够有效增大既有管线的沉降及其内力;管线的沉降及弯矩值随着下穿隧道开挖半径的增大而逐渐增大;增大新建隧道与既有管线的夹角会引起管线沉降的减小,但会增大管线的内力。

## 参考文献

- [1] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124 (9): 846.
- [2] VLAZOV V Z, LEONTEV U N. Beams, plates and shells on elastic foundations [R]. Washington, D. C.: Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1966.
- [3] 林存刚,黄茂松. 基于 Pasternak 地基的盾构隧道开挖非连续地下管线的挠曲[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1200. LIN Cungang, HUANG Maosong. Deflections of discontinuous buried pipelines induced by shield tunnelling based on Pasternak foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1200.
- [4] 可文海,管凌霄,刘东海,等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 221. KE Wenhai, GUAN Lingxiao, LIU Donghai, et al. Research on upper pipeline-soil interaction induced by shield tunnelling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 221.
- [5] 冯国辉,徐长节,郑茗旺,等. 侧向土体影响下盾构隧道引起上覆管线变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55 (8): 1453. FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Deflection of overlying pipeline induced by shield tunneling considering effect of lateral soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(8): 1453.

(下转第 37 页)



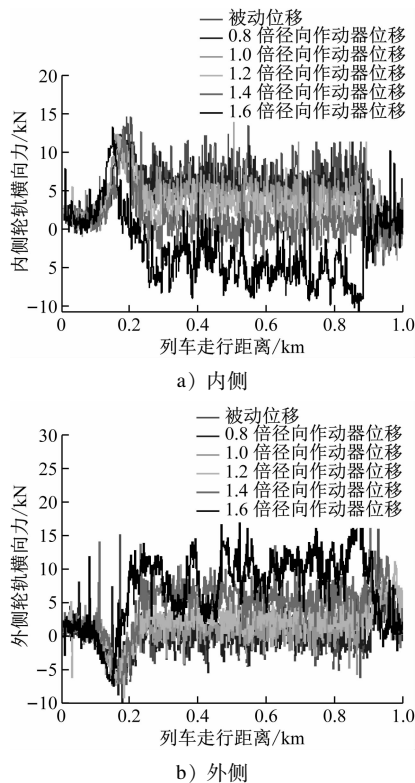


图12 精确型信标检测模式下的非导向轮对内外侧车轮轮轨横向力对比

Fig. 12 Comparison of non-guided wheelset inner and outer wheel-rail lateral forces under precise beacon detection mode

## 参考文献

[1] 罗湘萍. 一种用于径向转向架的一体式轮对定位装置: 201610304174.6[P]. 2016-09-21.

### (上接第30页)

[6] 冯国辉, 窦炳珺, 张高锋, 等. 隧道开挖引起水平向位移被动桩的简化计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 10.  
FENG Guohui, DOU Bingjun, ZHANG Gaofeng, et al. Simplified calculation method for lateral displacement of passive pile caused by tunneling[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 10.

[7] 冯国辉, 徐兴, 侯世磊, 等. 基于Kerr地基模型的基坑开挖引起下卧既有隧道受力变形[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(4): 474.  
FENG Guohui, XU Xing, HOU Shilei, et al. Deflections of adjacent underground tunnel induced by excavation based on Kerr foundation model[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(4): 474.

[8] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 考虑剪切变形下基坑开挖引起下卧既有隧道的纵向变形研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 132.  
FENG Guohui, XU Changjie, ZHENG Mingwang, et al. Study of

LUO Xiangping. Integrated wheelset positioning device used for radial bogie; 201610304174.6[P]. 2016-09-21.

[2] 李芾, 傅茂海, 黄运华. 径向转向架机理及其动力学特性研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(5): 46.  
LI Fu, FU Maohai, HUANG Yunhua. Research of principle and dynamic characteristics of radial bogies[J]. China Railway Science, 2002, 23(5): 46.

[3] 李亨利. 货车径向转向架动力学特性及轮轨磨耗研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
LI Hengli. Research on the dynamics and wear of truck radial bogie[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.

[4] 田师屹, 罗湘萍, 任利惠, 等. 基于地铁车辆二系回转角的主动径向研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 147.  
TIAN Shiqiao, LUO Xiangping, REN Lihui, et al. Research on active radial of rail transit based on the yaw angle of second suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 147.

[5] 王平, 傅茂海, 刘楠, 等. 基于Simulink的主动径向转向架控制方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2013(5): 37.  
WANG Ping, FU Maohai, LIU Nan, et al. Active steering bogie control approaches study based on Simulink[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(5): 37.

[6] 兰海龙, 李萍, 郭建群. 基于dSPACE平台的AMT硬件在环测试系统搭建[J]. 机械工程与自动化, 2020(5): 19.  
LAN Hailong, LI Ping, GUO Jianqun. Building of AMT hardware-in-the-loop testing system based on dSPACE platform[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(5): 19.

· 收稿日期:2022-12-03 修回日期:2023-01-17 出版日期:2024-02-10  
Received:2022-12-03 Revised:2023-01-17 Published:2024-02-10

· 通信作者:胡波,高级工程师,daniels\_hu@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

longitudinal deformation of existing underlying tunnel due to above excavation considering shear deformation of tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 132.

[9] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.  
XU Ling. Study on longitudinal settlement of shield tunnel in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.

[10] 吴为义. 盾构隧道周围地下管线的性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
WU Weiye. Study on mechanical behaviors of buried pipelines induced by shield tunneling construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

· 收稿日期:2022-04-08 修回日期:2022-05-05 出版日期:2024-02-10  
Received:2022-04-08 Revised:2022-05-05 Published:2024-02-10

· 通信作者:董瑞桥,高级工程师,517554248@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license