

文章编号: 1000-7598-(2008)11-2990-07

列车交通荷载作用下软土路基的长期沉降

边学成, 曾二贤, 陈云敏

(浙江大学 岩土工程研究所/软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 通过 2.5 维有限元结合薄层单元方法, 建立了列车运行荷载作用下轨道和地基动力相互作用的 3 维分析模型, 求解不同运行速度列车荷载作用下路堤下卧层地基中动偏应力的分布, 结合软黏土在循环荷载作用下的累积塑性应变理论, 建立了路堤下卧层地基在列车运行荷载作用下长期动力附加沉降的计算方法。在此基础上采用瑞典 X2000 高速列车的实际轨道和地基情况进行了计算, 分析了长期沉降随时间的发展过程及其在地基中的分布规律, 特别是考虑了列车运行速度对路基沉降的影响。

关键词: 高速铁路; 路基下卧层; 动力附加沉降; 交通循环荷载; 动偏应力

中图分类号: U 416

文献标识码: A

Long-term settlements of soft soil ground induced by train traffic loadings

BIAN Xue-cheng, ZENG Er-xian, CHEN Yun-min

(Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Education Ministry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A dynamic coupling model of track structure and underlying ground under moving load action is developed by employing the 2.5 dimensional finite element method together with thin layer element method. First, the distribution of dynamic stress in ground due to train traffic loadings at different speeds is computed; then, incorporating Li and Selig's Method (1996), a computation procedure to evaluate long-term settlement of subgrade ground is proposed. The Swedish high-speed railway X-2 000 running on soft ground in the West Coast is introduced as an illustrative case study to demonstrate the development of long-term settlements with time and its distribution inside ground. Also a parametric study is conducted to consider to influence of train's running speed on long-term settlement in soft soil ground.

Key words: high-speed railway; ground subgrade; dynamic residual settlement; traffic loading; dynamic deviator stress

1 引言

对于软土地基上修筑高速公路和铁路线路, 以往的研究往往注重于自重荷载作用下的沉降和稳定问题, 但现场监测发现, 交通荷载作用产生的长期沉降相当可观^[1-2], 到目前为止, 在这方面的研究还鲜见于国内外文献, 但近年来受到越来越多的关注^[1-6]。本文以高速铁路为例, 阐述列车运行荷载引起的地基软弱下卧层的长期沉降, 许多方面的问题和解决方法对于高速公路是共通的。

软土地基沉降计算方法自 1923 年 Terzaghi 固结理论问世以来, 通过不断改进和完善, 从简单的理论方法到经验公式和图表法到应用计算机的数值分

析法不一而足, 但对于交通荷载产生的沉降计算理论和方法还处于初步阶段。现有的方法主要包括:

(1) Hyodo 等^[7]提出结合土体动三轴试验结果, 采用 2 维数值动力学分析来预测交通荷载下的地基变形, 但由于地基土体实际的动力响应是 3 维问题, 故该方法直接模拟实际工程有些困难。(2) Kutara^[8]和 Fujikawa^[9]等先后提出的采用等效静荷载处理交通荷载, Kutara^[8]采用一维固结理论简化沉降分析过程, 但未考虑交通荷载的实际传递机制和荷载循环产生的沉降, Fujikawa^[9]在实测的基础上假定交通荷载作用产生的应力增量呈倒三角分布, 这种估算土体的固结沉降不够精确。(3) 经验公式, 其中以 Monismith^[10]提出的动力方程应用最广泛,

收稿日期: 2006-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No.10702063); 教育部博士点基金 (No.20070335086)。

作者简介: 边学成, 男, 1976 年生, 副教授, 日本冈山大学环境理工学部获博士, 主要从事轨道路基耦合动力学和交通路基工程等方面的研究。E-mail: bianxc@zju.edu.cn

采用简单指数模型拟合软黏土的塑性应变与荷载循环次数的关系。该模型计算简单, 但所包含的参数物理意义不够明确, 取值范围较大, 不易合理确定。Li 和 Selig^[3]等引入土体的强度参数, 提出对上述参数确定的改进方法, 间接考虑了土体类型及物理状态等, 并利用该理论分析了交通荷载产生软土沉降的多个工程实例。Chai 和 Miura^[2]在此基础上, 考虑初始偏应力影响, 进一步提出了新的指数模型, 克服了 Li 和 Selig^[3]参数取值不适用于堆积土的问题, 但新引入参数值的确定仍有一定困难。

另外, 在试验基础上周健^[4]提出了动载作用下软黏土残余变形的计算模式, 可以确定长期或短期动荷载作用下的附加沉降过程。蒋军^[5]通过循环加载试验分析了不同加载波形作用下黏土的一维沉降特征。黄茂松^[11]通过不同静偏应力和动应力组合情况下的饱和软黏土不排水循环三轴试验, 引入相对偏应力水平参数, 分析了累积变形特征。李进军^[6]分析了静态交通荷载引起的软土地基沉降累积过程。本文通过 2.5 维有限元结合薄层单元方法, 建立了列车运行荷载下轨道和地基动力相互作用的 3 维分析模型, 求解了不同运行速度列车荷载作用下路堤下卧层地基中动偏应力的分布, 结合 Li 和 Selig^[3]提出的循环荷载作用下软土的累积塑性应变理论, 建立了路基下卧层地基在列车运行荷载作用下的沉降分析计算过程。

2 交通荷载作用下累积沉降的计算

2.1 循环荷载作用下累积塑性应变的确定

根据 Monismith^[10]等提出了在循环荷载作用下计算软黏土路基累积塑性变形的经验公式:

$$\varepsilon_p = AN^b \quad (1)$$

式中: ε_p 为地基土体的累积塑性应变; N 为循环荷载次数; A 和 b 关于移动荷载特性和地基地层特性的参数。对于复杂多层土体时, 参数取值离散性大, 计算误差较大。Li 和 Selig^[3]改进了对参数 A 的确定:

$$A = a(q_d/q_f)^m \quad (2)$$

式中: q_d 为交通循环荷载下的动偏应力; q_f 为地基土体的静破坏应力; a 和 m 为常参数。对于给定的工程, a 、 b 和 m 这 3 个参数与土体的类型和塑性指数有关, Li 和 Selig 提出了对常见几种土类型的建议值, 见表 1, q_f 仅与地基土体的原始状态有关, 可通过地质勘测得到。

表 1 Li 和 Selig 建议参数^[3]
Table 1 Constants suggested by Li and Selig (1996 年)

土类	参数取值		
	a	b	m
CH (高塑性黏土)	1.2	0.18	2.4
CL (低塑性黏土)	1.1	0.16	2
MH (弹性粉土)	0.84	0.13	2
ML (粉土)	0.64	0.1	1.7

结合式 (1) 和式 (2), 可以得出地基中土体在循环荷载下的累积塑性应变的计算公式:

$$\varepsilon_p = a(q_d/q_f)^m N^b \quad (3)$$

式中各参数的物理意义同前。由式 (3) 可知, 欲计算出地基中长期累积沉降, 关键是正确地确定列车运行荷载产生的地基中的动偏应力, 具体过程在下节中阐述。将式 (3) 结合到数值分析程序中, 即可计算出地基内部任意位置在列车运行荷载作用下的沉降。另外, 由式 (3) 亦知, 参数 a 、 q_f 只对累积塑性应变或累积沉降的幅值有影响, 而对长期沉降分布规律没有影响。

2.2 列车交通荷载作用下地基动应力的确定

列车运行荷载作用下轨道振动的产生以及在周围地基中传播已经有大量分析模型和研究成果^[12-18], 但对于列车运行荷载产生的地基中的动应力分布及其特性却鲜见于文献。简化的模型如均匀半空间上的 Timoshenko 梁可以用来分析列车荷载引起的地基中动应力^[19], 而实际工程中铁路轨道下方往往存在路堤, 或者为了提高路堤刚度, 在路堤局部范围内会采取加固措施, 因此轨道附近地基一般不易简单地采用分层半无限媒介来模拟, 此时可采用有限元方法对有限尺寸的结构和地基进行数值模拟。

本文采用 2.5 维有限元结合薄层单元方法来确定列车运行荷载作用下地基中动应力的分布, 地基模型如图 1 所示, 并且在模型中假定沿荷载方向的每个截面上材料特性都是连续一致的。为了对列车运行荷载作用下的无限长轨道结构和无限半空间地基土体媒介进行建模, 首先在轨道方向进行波数离散, 同时对垂直轨道方向平面的轨道结构和地基进行有限元离散, 从而将 3 维问题降为 2.5 维问题求解^[20], 这样极大地减少计算量, 同时考虑了波在土体无限半空间中的传播问题。本模型中, 轨道采用无限延伸的欧拉梁单元模拟, 垂直列车运行方向平面上的土体单元采用四边形等参单元模拟, 水平方向上的两侧无限边界在计算范围以外处采用薄层单元作为吸收边界。设列车荷载以定常速 C 沿着 X 轴

正方向移动，X轴通过轨道结构的中心，即荷载中心点的位置为 $y=0\text{ m}$ ，Z轴以向下为正，在地表面处 $z=0\text{ m}$ 。利用本计算模型，可以准确高效地模拟出3维地基土体在列车运行荷载作用下产生的空间应力场，确定任何位置处的应力大小和分布形式，进而结合式(3)计算出不同速度的列车交通荷载作用下地基的长期沉降。

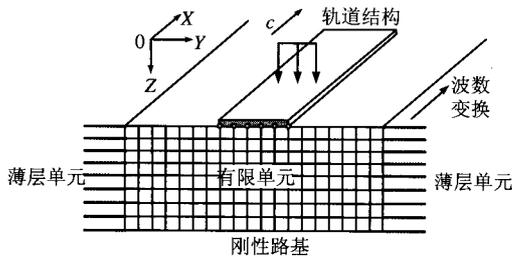


图1 有限元-薄层单元相结合的轨道结构-地基模型
Fig.1 Finite element-thin layer element hybrid analysis model

瑞典国家铁路管理局于1998年在Ledsgard软土地基上运行X2000高速列车时测试了轨道和地基振动^[21]，同时在线路所在位置进行了全面的地质勘查。本文在进行数值分析时采用该场地条件和列车荷载分布进行分析，以解释软土地基在列车交通荷载作用下的沉降产生过程和分布规律。

3 模型和相关参数

因本文主要考察路基下卧层的长期沉降，因此将铁轨、轨枕及其下的道床简化为整体轨道，参数见表2。

表2 X2000轨道参数
Table 2 Track properties of X2000

轨道宽度 $2B/\text{m}$	单位长度质量 $M/(\text{t}\cdot\text{m}^{-1})$	弯曲刚度 $EI/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-2})$	动阻尼比
3.0	10.8	200	0.10

轨道下方为多层软土地基，土层分布参数如图2所示，其中 V_s 、 ρ 、 β 分别为土体的剪切波速、密度和阻尼系数。实际运行的X2000高速列车由5节车厢组成，车头车尾各为1节动力机车，图3为了轮轴荷载分布，其中轮轴载重对应于1个轮对的总重力荷载，轨道地基模型选取的计算范围为沿Y正负方向各取10m，沿Z向取土层深度为15m，同时假定土层底层为基岩。高速铁路每次列车经过可看作1次加载过程，假定每天有40列X2000列车经过，对轨道循环加载。为计算方便，设每列车速度相同。

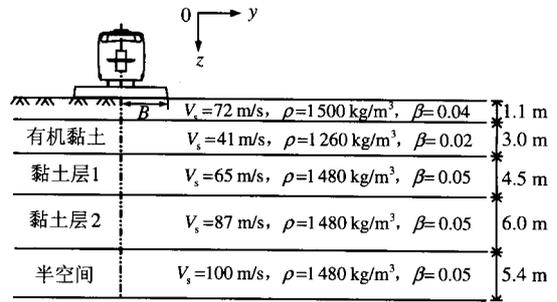


图2 地基地层分布
Fig.2 Ground condition of X2000 railway

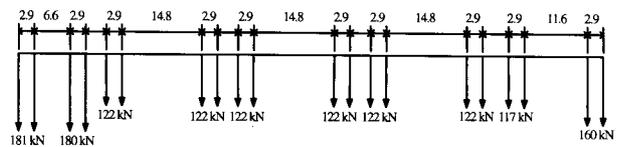


图3 X2000列车轮轴荷载分布 (单位: m)
Fig.3 Geometry of wheel axle load distribution of X2000 train (unit: m)

4 动偏应力计算分析

根据文献[3, 10]可知，交通荷载引起软土地基长期沉降的主要荷载因素是动偏应力(q_d)，本文仅讨论动偏应力的分布特征，并且在下文据此对列车交通荷载产生的长期沉降进行预测和分析。根据文献[3]，动偏应力采用下式计算：

$$q_d = \sqrt{3J_2} \quad (4)$$

式中： J_2 为第二应力不变量，可通过2.5维有限元模型求解出的6个应力分量来计算确定。

4.1 动偏应力随距离的变化

土体的动偏应力是影响变形非常关键的因素，在研究地基沉降规律之前有必要对动偏应力的分布特征进行一些分析探讨。图4为不同列车速度时离路基中心不同距离处动偏应力幅值的变化情况。在地面较浅部位，动偏应力变化急剧，约2~4m深处范围内出现动偏应力峰值，这是实际地基3m深处存在软弱土层的缘故。在相同深度的土层，路基中心越远处，动偏应力值越小。

4.2 速度对动偏应力的影响

图5为路基中心线处及距离为5m处列车速度对土体动偏应力的影响情况。列车速度越大，同一位置处的动偏应力会随之逐渐增大，当速度为250km/h时地基土体与轨道结构发生共振，导致动偏应力增加幅度较大。

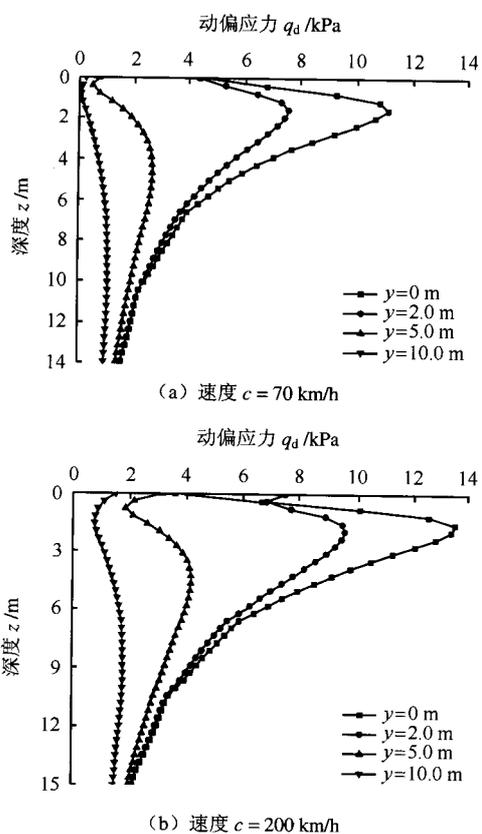


图 4 不同速度下动偏应力随距离的变化
Fig.4 Dynamic deviator stress variation with distance at different speeds

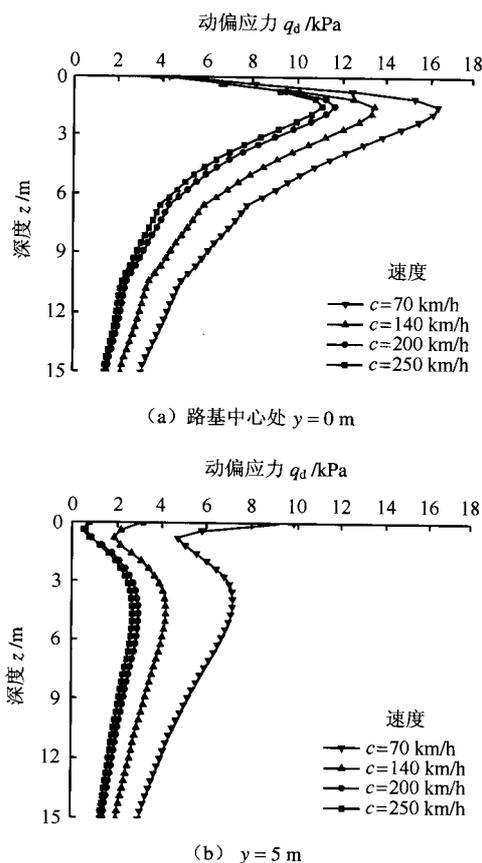


图 5 速度对不同距离处动偏应力的影响
Fig.5 Effect of the speed on q_d under different distances

4.3 路基沉降计算分析

4.3.1 不同路基测点的沉降-时间曲线

图 6 为不同速度、不同路基测点的沉降随时间的变化曲线，共有 5 个测点：1 个为路基表面的轨道中心处，其他 4 个分别位于轨道中心下深度为 1, 2, 5, 10 m 处。随着时间的增长，不同测点处沉降均不断增加，最终逐渐趋于稳定。沿路基中心线上，测点越深，沉降越小。路基测点的沉降随时间的变化近乎幂函数曲线。速度越大，对应沉降也越大，但不论速度大小，路基通车后开始的一段时间，沉降较迅速，随着时间的增长，其增长速率不断衰减，逐渐趋于稳定。

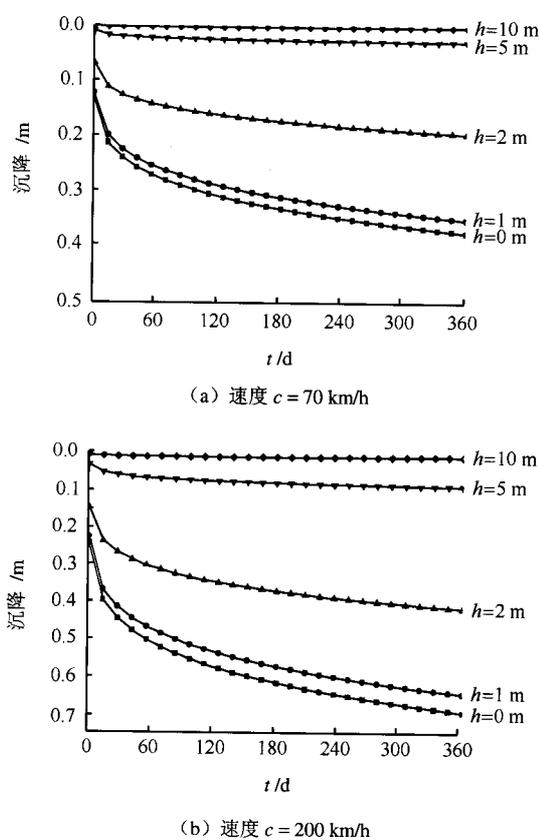


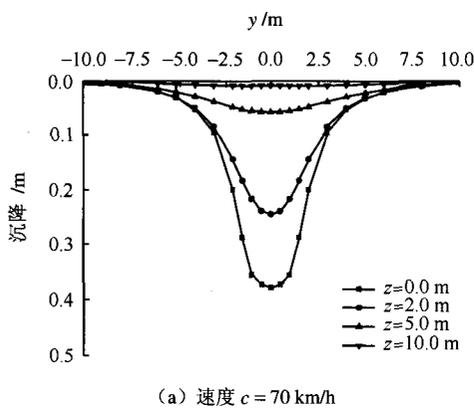
图 6 不同速度下路基测点沉降-时间曲线
Fig.6 Development of settlement at different speeds

4.3.2 不同深度处的路基沉降

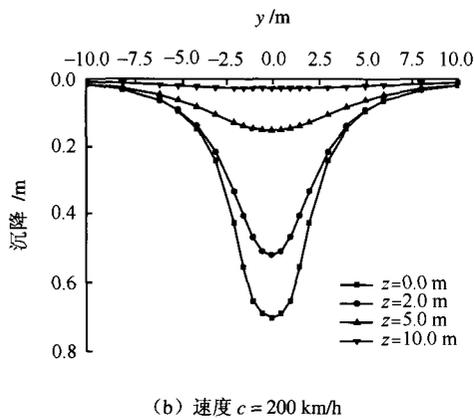
图 7 为不同速度时不同深度处路基土体沉降沿水平距离的变化情况。从图可知，地基的长期沉降在铁轨下方最大，越向两侧越小，说明路基沉降主要集中在铁轨下方，逐步向两侧扩散减小。路基表面沉降最大，随着深度的增加，沉降将减小。当距轨道中心一定远处时（本计算工况约 10 m）沉降值很小，可忽略。

4.3.3 速度对路基沉降的影响

图 8 为不同深度路基列车速度对沉降分布的影响。由图可见，列车速度越大，长期沉降越大，且

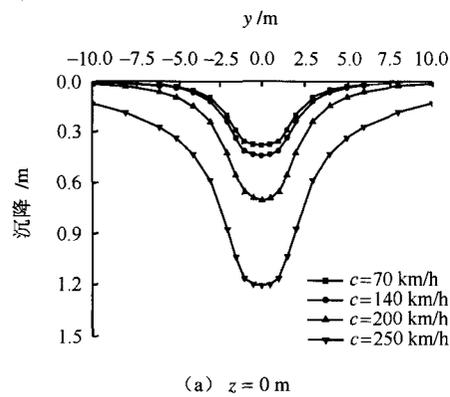


(a) 速度 $c = 70$ km/h

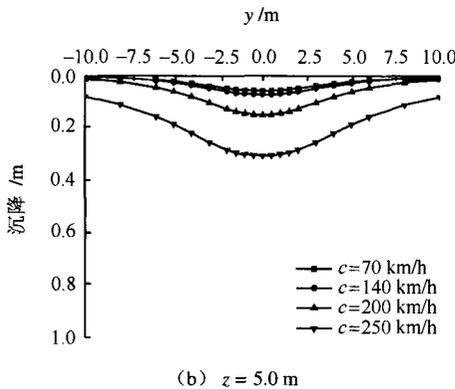


(b) 速度 $c = 200$ km/h

图7 不同深度处的路基沉降
Fig.7 Subgrade settlements variation with depth



(a) $z = 0$ m



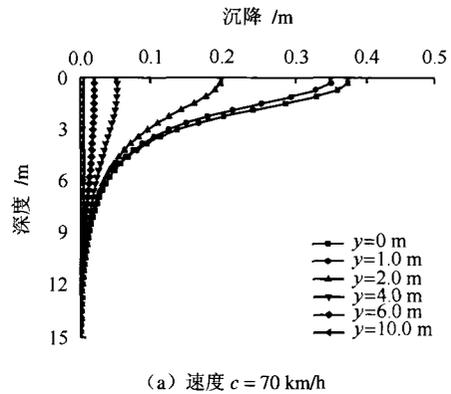
(b) $z = 5.0$ m

图8 速度对不同深度处路基沉降的影响
Fig.8 Effect of the speed on settlements at different depths

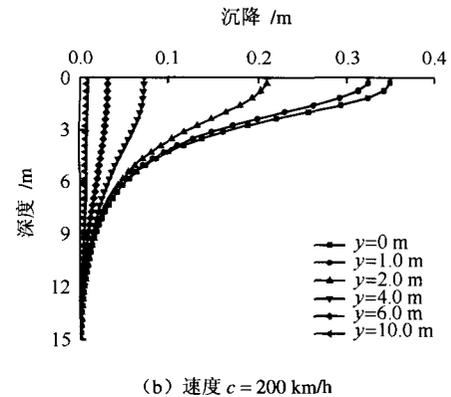
沉降影响范围向周围地基扩散的趋势愈明显；特别是当速度达到一定程度时动偏应力急剧增大，从而导致沉降相应急剧增加。

4.3.4 路基沉降-深度曲线随距离的变化

图9为不同速度、不同位置处路基的长期沉降随距离的变化情况。由图9可知，地基在列车动荷载作用下的沉降主要集中在离地表一定深度范围内（本计算工况约7 m），在某个临界深度以下沉降量下降很快。距轨道中心越远，沉降也越小。



(a) 速度 $c = 70$ km/h



(b) 速度 $c = 200$ km/h

图9 路基沉降随距离的变化
Fig.9 Variation of subgrade settlement with distance

4.3.5 速度对路基沉降-深度曲线的影响

图10为距路基中心不同位置列车速度对路基沉降沿深度变化的影响，可见随着列车速度的提高，路基长期动力附加沉降也越大；特别是当高速列车运行的速度接近或超过地基剪切波速时，路基的沉降发生很快，而且沉降量也有很大的增长。

5 讨论和结论

本文通过2.5维有限元方法，结合文献[3]提出的计算交通循环荷载作用下软土累积塑性应变公式，计算了不同速度的列车荷载作用下地基长期动力附加沉降的发展过程和分布规律，得出以下结论：

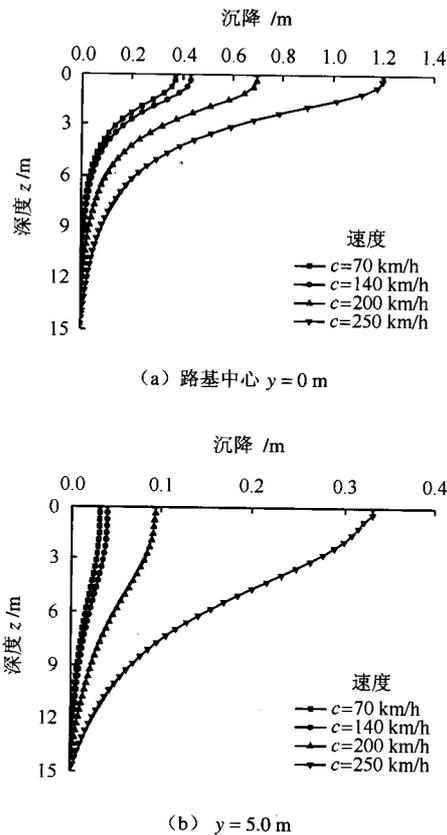


图 10 速度对路基沉降-深度曲线的影响
Fig.10 Effect of the speed on settlement distribution with depth

(1) 交通荷载作用下, 路基下卧层的软土地基的长期沉降随着时间的增加而不断增大, 但其增长速率会逐渐减小, 直至沉降趋于稳定。

(2) 路基沉降与交通荷载的运行速度有关。在达到地基的临界速度以前, 软土地基的沉降随着交通荷载速度的提高而增大。

(3) 路基沉降主要发生在轨道下方, 亦即轨道正下方路基的沉降最大; 路基沉降会向着轨道两侧扩散, 但随着距轨道中心水平距离的增加, 沉降迅速减小。

(4) 软土地基的沉降主要分布在一定的深度范围以内, 在某个深度以下, 沉降迅速变小。

总体来说, 对于交通循环荷载作用下软黏土的长期沉降的确定取决于 2 个方面的深入研究: 一个是软黏土在循环动荷载作用下的动力特性, 另一个是交通荷载引起的 3 维地基动力响应和地基中动应力分布。本文通过 2.5 维有限元方法较好地解决了后者, 而对于具体地基的土体在长期交通循环荷载作用下的变形机制和性状, 还需要针对交通荷载的特征进行进一步的室内外试验加以深入认识。

参考文献

- [1] 陈云敏, 陈仁朋, 芦森. 软土地基地铁施工及运营过程中的几个土力学问题[C]//城市地铁建设与环境岩土工程高级技术论坛. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 165—177.
- [2] Jin-Chun CHAI, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, (10): 907—916.
- [3] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(12): 1 006—1 013.
- [4] 周健, 屠洪权, 安原一哉. 动力荷载作用下软黏土的残余变形计算模式[J]. *岩土力学*, 1996, 17(1): 54—60. ZHOU Jian, TU Hong-quan, YASWHARA K. A model for predicting the cyclic behavior of soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(1): 54—60.
- [5] 蒋军, 陈龙珠. 长期循环荷载作用下黏土的一维沉降[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(3): 366—369. JIANG Jun, CHEN Long-zhu. One dimensional settlement due to long-term cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 366—369.
- [6] 李进军, 黄茂松, 王育德. 交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(1): 1—5. LI Jin-jun, HUANG Mao-song, WANG Yu-de. Analysis of cumulative plastic deformation of soft clay foundation under traffic loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(1): 1—5.
- [7] HYODO M, YASUHARA K, MURATA H. Deformation analysis of the soft clay foundation of low embankment road under traffic loading[C]//Proceeding of the 31st Symposium of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1996: 27—32.
- [8] KUTARA K, MIKI H, MASHITA Y, et al. Settlement and countermeasures of the road with low embankment on soft ground[J]. *Technical Report of Civil Engineering, JSCE*, 1980, 22(8): 13—16.
- [9] FUJIKAWA K, MIURA N, BEPPU I. Field investigation on the settlement of low embankment road due to traffic load and its prediction[J]. *Soils and Foundations*, 1996, 36(4): 147—153.
- [10] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subsoil due to repeated loading[J]. *Transportation Research Record*, 1975, 537: 1—17.

- [11] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特征[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891—895.
HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 891—895.
- [12] 周华飞, 蒋建群, 张士乔. 移动荷载下 Kelvin 地基上无限长梁的稳态响应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(10): 1328—1333.
ZHOU Hua-fei, JIANG Jian-qun, ZHANG Tu-qiao. Steady-state response of infinite beam on Kelvin foundation under moving loads[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2004, 38(10): 1328—1333.
- [13] 边学成, 陈云敏. 列车荷载作用下轨道和地基的动响应分析[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 477—485.
BIAN Xue-cheng, CHEN Yun-min. Dynamic analyses of track and ground coupled system with train loads[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2005, 37(4): 477—485.
- [14] 刘维宁, 张昀青. 轨道结构在移动荷载作用下的周期解析解[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 100—102.
LIU Wei-ning, ZHANG Yun-qing. A periodic analytical solution of railway track structure under moving loads[J]. **Engineering Mechanics**, 2004, 21(5): 100—102.
- [15] DIETERMAN H A, METRIKINE A V. Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load[J]. **European Journal of Mechanics A/ Solids**, 1997, 6(2): 295—306.
- [16] HIROKAZU Takemiya, Xue-cheng BIAN. Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, 2005, 131(7): 699—711.
- [17] METRIKINE A, POPP K. Steady-state vibrations of an elastic beam on a visco-elastic layer under a moving load[J]. **Archive of Applied Mechanics**, 2000, 70: 399—408.
- [18] 边学成, 陈云敏. 列车移动荷载作用下分层地基响应特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 182—189.
BIAN Xue-cheng, CHEN Yun-min. Characteristics of layered ground responses under train moving loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 182—189.
- [19] 王常晶, 陈云敏. 列车荷载在地基中引起的应力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1178—1186.
WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Analysis of stresses in train-induced ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1178—1186.
- [20] 边学成, 陈云敏. 基于 2.5 维有限元方法分析列车荷载产生的地基波动[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2335—2342.
BIAN Xue-cheng, CHEN Yun-min. Ground vibration generated by train moving loadings using 2.5 D finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2335—2342.
- [21] Banverket. High speed lines on soft ground-evaluation and analysis of measurements from the west coast line[R]. [S. l.]: Banverket & SGI, 1999.