

网络出版时间:2012-11-19 16:44

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20121119.1644.005.html>

路堤荷载作用下路基侧向位移特性分析

刘金龙¹, 陈陆望², 王吉利³

(1 合肥学院 建筑工程系, 安徽 合肥 230022; 2 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;

3 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

[摘要] 【目的】考察施工间歇期路基侧向位移的发展特性, 为路基侧向位移测量提供依据。【方法】基于非线性有限元方法, 对路堤分阶段填筑过程中路基的变形特性进行了系统考察, 同时分析了路基最大侧向位移的位置及其测量技术。【结果】对比分析表明, 在硬壳层强度较高、软土层厚度较大的情况下, 路基体内的侧向位移有可能在施工间歇期发生回缩, 该现象伴随着竖向沉降的大幅度增长而发生; 工程中常用的测斜管在考察侧向位移的过程中存在许多缺陷, 利用其较难探测到侧向位移的回缩现象; 在路堤分阶段填筑过程中, 路基最大侧向位移的位置是变化的。【结论】需发展更精密的仪器来测量路基体内侧向位移的发展情况, 建议将测斜管埋设于坡趾竖向断面和坡中竖向断面之间。

[关键词] 道路工程; 非线性有限元; 路堤; 侧向位移; 测斜管

[中图分类号] TU433

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)12-0219-06

Lateral displacement analysis of soft soil foundation under embankment

LIU Jin-long¹, CHEN Lu-wang², WANG Ji-li³

(1 Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui 230022, China; 2 School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 3 Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: 【Objective】In order to better measure lateral displacement of road, the characteristics of lateral displacement of soft soil foundation under embankment were studied. 【Method】A typical embankment was studied systemically with nonlinear finite element method, and the location of maximal lateral displacement and its measuring method were also discussed. 【Result】Comparison analysis showed that lateral displacement, which happened synchronously with vertical settlement increased rapidly, would be reduced possibly at consolidation stage with strong dry crust and thick soft soil layer. Inclinator pipe could not measure this phenomenon conveniently due to its shortcomings, although it had been used in engineering widely. It is also shown that the location of the maximal lateral displacement was changeable at different construction stages. 【Conclusion】The technique and instrument should be improved to measure lateral displacement accurately. It is suggested that the inclinometer pipes should be placed between vertical surfaces of the toe and the middle slope of embankment.

Key words: road engineering; nonlinear finite element method; embankment; lateral displacement; inclinometer pipe

[收稿日期] 2012-03-30

[基金项目] 安徽省自然科学基金项目(1208085QE89); 住房和城乡建设部研究开发项目(2010-K3-7)

[作者简介] 刘金龙(1979-), 男, 江西宜春人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: alnile@163.com

路基侧向位移的大小及其变化速率是路堤填筑过程中是否能满足变形与稳定要求的主要控制参量之一^[1-5],也是影响路基最终沉降量大小的重要因素。一般地,为了满足变形与稳定性要求,路堤施工可进行分阶段填筑,即包括填筑阶段和固结阶段(施工间歇期)。在填筑阶段,由于施工进度较快可近似视为不排水过程,路堤填筑产生的荷载主要由孔隙水来承担。土中孔隙水与土颗粒本身的变形一般忽略不计,故填筑阶段路基可看作只发生形变而没有体变,路基沉降量主要是由于土体向路堤中心外的侧向挤出产生的;在固结阶段,由于孔隙水的消散导致有效应力增加,土颗粒间的孔隙被挤密,从而使路基产生了较大的沉降,同时也伴随着侧向位移的发生。从大多数的文献报道来看,固结阶段路基的侧向位移也会向路堤中心外发展^[6-12]。实际上,目前不少公路工程中路基的实测侧向位移并不一直向路堤外发展,在施工间歇期或预压期有向路堤中心内发展的记录,但这种现象一般被当作误差或不合理数据而忽视,因而鲜见相关的文献报道。

为此,本研究基于非线性有限元方法,针对一典型路基断面考察了路堤各施工阶段路基体内侧向位移的发展情况,对侧向位移向路堤中心内发展的可能性及相应变形机理进行了探讨,并在分析测斜管测量路基侧向位移过程中存在缺陷的基础上,对路

基体内最大侧向位移的出现位置进行了对比分析,以为路基侧向位移测试中测斜管最佳埋设位置的确定提供依据。

1 路堤分阶段填筑的有限元模型

现针对某一典型的路基断面进行变形与稳定性分析。该路堤顶宽 16 m,路堤填筑高度 4 m,坡度为 1:2,软弱地基深度为 12 m,路堤和地基的几何构型如图 1 所示。

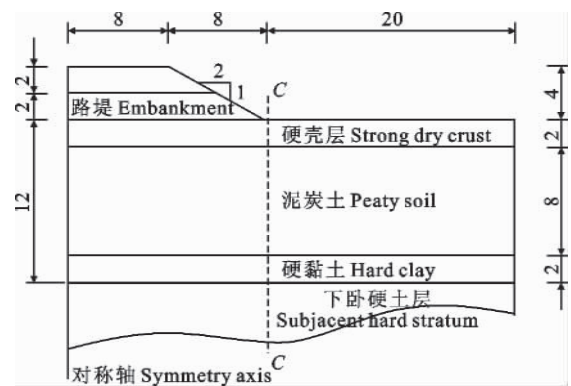


图 1 路堤横断面示意图(单位:m)

Fig. 1 Transect of embankment (unit:m)

根据地勘资料,地基软土按照土性差异可划分为 3 个土层,路堤及地基各土层的物理力学参数见表 1,地下水位于距地面 1 m 深处。

表 1 路堤及路基各土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of embankment and each layer

土层 Soil layer	干重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) Dry gravity	湿重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) Wet gravity	渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) Permeability coefficient	黏聚力/kPa Cohesive strength	内摩擦角/(°) Internal friction angle	泊松比 Poisson's ratio	弹性模量/kPa Young's modulus
路堤土 Embankment	18.0	20.0	1.0	16.0	11.0	0.30	2 500
硬壳层 Crust	16.0	18.0	0.005	17.0	12.0	0.30	3 500
泥炭土 Peaty	14.0	17.0	0.001	11.0	5.0	0.35	1 500
硬黏土 Hard clay	18.0	19.0	0.007	16.0	12.0	0.33	2 700

为了保证结论的一般性及减小参数转换过程中可能产生的二次误差,有限元计算中各土层选用 Mohr-Coulomb 屈服与破坏准则。有限元分析中采用 15 节点的三角形单元进行网格剖分,如图 2 所示,共划分单元 844 个,节点 6 929 个。由于对称性,在对称轴断面上不发生孔压消散,故有限元计算中应关闭对称轴处的固结边界,使超静水压力不通过对称轴向外扩散。

该路堤的施工步骤为:(1)将路堤填筑至 2 m,费时 8 d;(2)施工间歇 100 d,使超孔隙水压尽量消散,记为第一阶段固结;(3)将路堤填筑至 4 m 高

度,费时 10 d;(4)工后固结期 150 d,记为第二阶段固结。

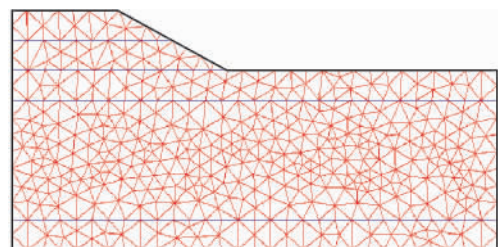


图 2 路堤及路基断面的有限元网格划分

Fig. 2 Mesh of embankment and foundation with FEM

同时,采用强度折减有限元方法计算不同施工阶段路堤的安全系数。其操作步骤为:在弹塑性有限元数值计算中,首先对于某一假定的强度折减系数 F_{trail} ,将土的实际强度参数 $c、\varphi$ 按照下式同时进行折减:

$$c_r = \frac{c}{F_{\text{trail}}}, \varphi_r = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_{\text{trail}}}\right) \quad (1)$$

式中: c 与 φ 分别为土层原始的黏聚力与内摩擦角, c_r 与 φ_r 分别为土层折减后的黏聚力与内摩擦角。

以此对边坡进行弹塑性有限元计算,如果根据一定的失稳判据^[13]确定边坡达到极限平衡状态,则与此相对应的强度折减系数就是总体安全系数,否则对新假定的折减系数重复进行计算,直至土坡达到临界极限平衡状态。

2 各施工阶段路基侧向位移特性分析

通过有限元计算,得到了各施工阶段路堤坡趾处 C—C 竖向断面上侧向位移的发展情况,结果如图 3 所示。由图 3 可见,路堤填筑至 2 m 且固结 100 d 后,路基体内的侧向位移较路堤填筑至 2 m 时的相应值小,第二阶段固结完成后路基的侧向位移也较填筑至 4 m 时的相应值略小,说明各固结阶段路基的侧向位移沿路堤对称轴向里发展,即通过有限元计算发现侧向位移发生了“回缩”。

有限元计算得到的这种侧向位移回缩现象,需要结合路基竖向沉降一起分析。图 4 表示各施工阶段路堤底面(原地面)竖向沉降的发展情况。

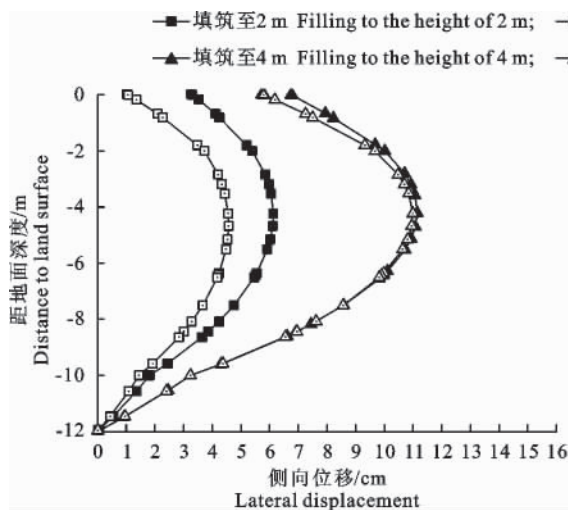


图 3 路堤坡趾处 C—C 竖向断面上各点的侧向位移
Fig. 3 Lateral displacement of C—C vertical surface at toe of embankment

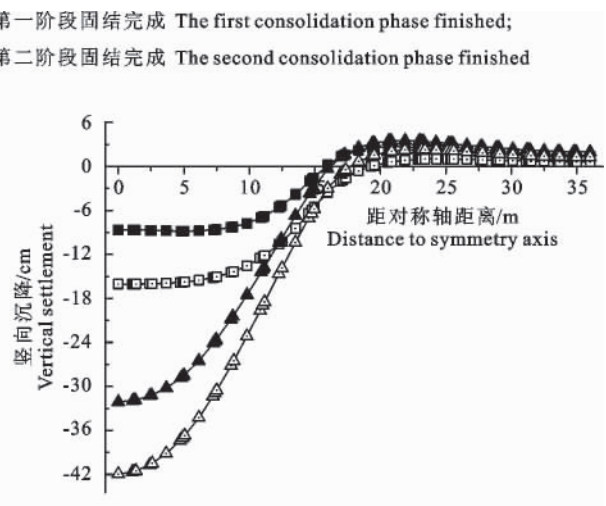


图 4 路堤堤底横断面各点的竖向沉降量
Fig. 4 Vertical settlement at bottom of embankment

由图 4 可见,相对填筑阶段,固结阶段的竖向沉降发展较快,侧向位移回缩现象的发生正好与竖向沉降的快速发展相匹配。因此,可以这样对侧向位移的回缩现象加以解释:固结阶段超静水压力的消散使有效应力增加,土颗粒被挤密压实,部分区域因应力过大而导致土颗粒之间发生坍塌与错动,这种原有结构的破坏使路基竖向沉降快速发展(直达到新的平衡),这必然导致旁边的土体向对称轴方向靠拢来填补因竖向沉降快速发展而产生的“空间”,即侧向位移的回缩伴随着竖向沉降的大幅度增长而发生。

进一步得到填筑至 2 m 的过程中和第一阶段固结过程中路基体内总体位移速率场(增量场)的分布情况见图 5。可见,在填筑阶段,路基的总体位

移沿对称轴向外发展;而在固结阶段,总体位移则向对称轴内侧底部发展。这种位移增量方向的本质不同,必然导致填筑阶段和固结阶段侧向位移的基本特性不同。

一般地,路基中的硬壳层可将路堤荷载扩散到较大的范围,具有较好的板体支撑作用。当路堤填筑至 2 m 时,硬壳层具有较大的强度而未发生破坏,接下来的固结阶段因路基软土的压缩而使硬壳层局部随路基一起发生了较大的竖向沉降,这种局部大变形增强了硬壳层的“拱”效应,其使路堤坡趾以外部位应力增大而有助于路旁土体向路中心处发展。但在路堤从 2 m 填筑至 4 m 的过程中,硬壳层因受到较大的应力而发生冲剪破坏,这时硬壳层的板体支撑作用减弱或不存在,接下来固结阶段发生

的较大沉降而产生的“空间”主要由路堤土刺入来填充,而路旁土体向路中心处发展则较为困难。这就很好地解释了图 3 中第一阶段固结完成后侧向位移回缩值较大,而第二阶段固结期间回缩值很小的原

因。由此可知,侧向位移的回缩现象较容易发生在硬壳层强度较高、软土层厚度较大(本研究算例中泥炭土厚 8 m)的实际工程中。

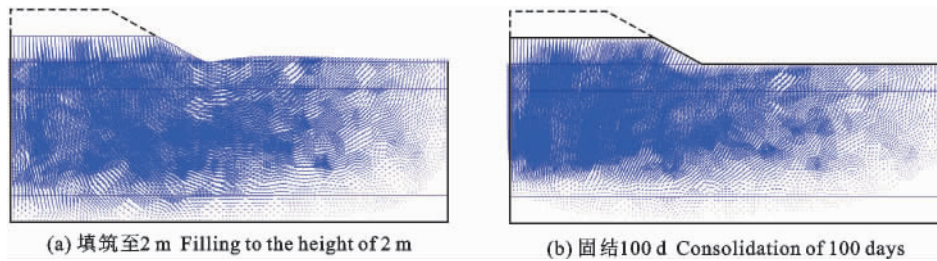


图 5 不同施工阶段路基总体位移速率场的分布

Fig. 5 Incremental displacement vectors of embankment at different construction phases

有限元数值计算还得到了各施工阶段路基体内最大侧向位移(x_m)、最大竖向沉降(y_m)及相应安全系数的具体数值(表 2)。由表 2 可见,固结阶段路

堤的稳定性较相应填筑阶段有所提高,这是由于固结阶段随着超静水压力的消散,土体强度相应有所提高所致。

表 2 不同施工阶段路基体内的最大位移和路堤的安全系数

Table 2 Safety factors and maximal displacements at different construction phases

施工阶段 Construction phases	最大侧向位移(x_m)/cm Maximal lateral displacement	最大竖向沉降(y_m)/cm Maximal vertical settlement	安全系数 Safety factor
填筑至 2 m Filling to the height of 2 m	6.3	8.9	2.44
第一阶段固结 The first consolidation phase	4.7	16.1	2.57
填筑至 4 m Filling to the height of 4 m	13.0	32.3	1.33
第二阶段固结 The second consolidation phase	12.6	42.2	1.41

3 最大侧向位移的量测及测斜管的布设

工程实际中还较少发现这种侧向位移的“回缩”现象,这可能与侧向位移的量测技术与方法有关。工程中一般采用测斜管来量测路基深部侧向位移的发展情况,其基本思想是使测斜管上部和下部受到硬土层的约束,中间部分与土体一起自由变形来探测侧向位移的大小。虽然该技术使用较普遍,但尚存在一定的缺陷^[1,14-15]:

1)测斜管管材普遍使用直径 6~8 cm、壁厚 5~8 mm 的 PVC 管,该管的刚度远远大于饱和软土,刚度的差异造成软土与测斜管不能协调变形,只有在软土挤出的速率较大时测斜管才会发生变形,但其变形量远小于软土本身。

2)测斜管两端被相对固定,其在软土的流动摩擦阻力作用下发生变形的同时,管体本身也产生抵抗变形的反力。变形越大,反力也越大,当反力大到可以抵抗土的流动摩擦阻力时,测斜管不再发生变形。因此观测时间越长,测斜管的位移量与软土的实际位移量偏差越大。

3)测斜管的埋设要求很高,其底端需嵌入无侧向位移的深层硬土中,且应控制测斜管在土中的垂直度,观测工作量较大。

由此可见,基于测斜管得到的侧向位移数值也是近似的,有可能因非确定性因素导致测量结果存在较大的误差。

特别地,在填筑阶段,路基体内的侧向位移沿对称轴向外发展后,测斜管管材也与土体一起发生了向路堤外侧的如“弓”字形的变形。当固结阶段侧向位移沿对称轴向里发展时,测斜管早期发生的“弓”字形变形导致其很难与土体一起发生回缩,较可能的是使固结阶段测斜管的读数增幅减小或不增加。因此,一般情况下在实际工程中利用测斜管较难探测到侧向位移的回缩现象,需发展更精密的仪器来测量路基体内侧向位移的发展情况。

另一方面,测斜管应埋设在路基土体侧向位移最大的平面位置^[14],但至于最大侧向位移的具体位置位于何处,目前并没有统一的看法,实际工程中测斜管埋设于路肩、路堤坡趾或其他位置的做法均存在。针对本研究算例,计算得到了各施工阶段路基体内最大侧向位移的位置,结果见图 6。

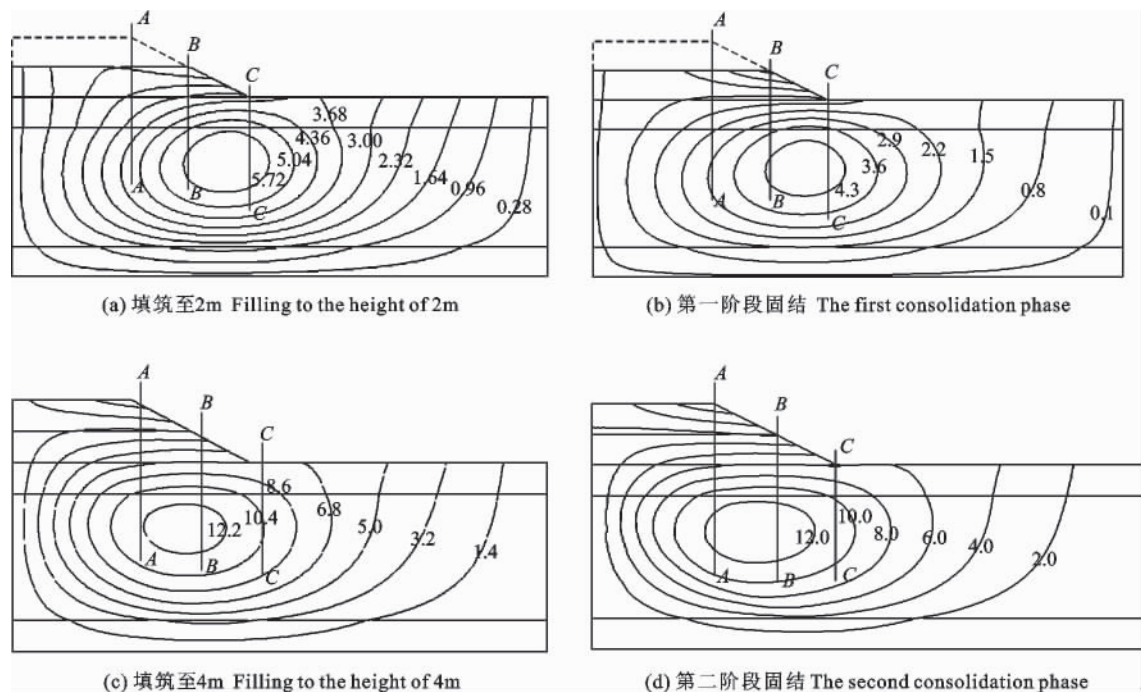


图 6 不同施工阶段路基侧向位移等值线分布(单位:cm)

Fig. 6 Isolines of lateral displacement of embankment at different construction phases (Unit:cm)

由图 6 可见,在填筑至 2 m 和第一阶段固结期间,路基的最大侧向位移发生在坡趾 C—C 断面和坡中 B—B 断面之间,而在后期填筑至 4 m 和第二阶段固结期间,最大侧向位移的位置向路中心内发展至坡中 B—B 断面处。这说明在路堤分阶段填筑过程中,路基最大侧向位移的位置是变化的,其一般在坡趾 C—C 断面和坡中 B—B 断面之间的附近范围内变动,故建议将测斜管埋设于该区域内,若将测斜管置于坡肩或坡趾外的其他位置,则很难合理探测到路基的最大侧向位移。

4 结 论

本研究采用非线性有限元方法,针对路堤分阶段填筑过程中路基体内侧向位移的基本特性进行了考察,对比分析表明:

1)在硬壳层强度较高、软土层厚度较大的实际工程中,路基体内侧向位移有可能在施工间歇期发生回缩,侧向位移的回缩伴随着竖向沉降的大幅度增长而发生。一般地,在填筑阶段路基的总体位移速率场沿对称轴向外发展,而固结阶段总体位移速率场则向对称轴内侧底部发展,这种位移增量方向的本质不同,导致填筑阶段和固结阶段侧向位移基本特性的不同。

2)工程中常用的测斜管在考察侧向位移的操作

中存在许多缺陷,基于测斜管得到的侧向位移数值也是近似的,有可能因非确定性因素导致测量结果存在较大的误差,故利用测斜管较难探测到侧向位移的回缩现象,需发展更精密的仪器来测量路基体内侧向位移的发展情况。

3)在路堤分阶段填筑过程中,路基最大侧向位移的位置是变化的,其一般在坡趾竖向断面和坡中竖向断面之间的区域内变动,故建议将测斜管埋设在该区域内,若将测斜管置于坡肩或坡趾外其他位置,则很难探测到路基的最大侧向位移。

上述分析是基于有限元数值计算和理论探讨开展的,下一步工作将结合具体工程实测数据进一步考察侧向位移的这种回缩特性。

【参考文献】

- [1] 刘增贤,汤连生.路堤荷载下软土侧向挤出沉降分析[J].工程勘察,2003,31(2):1-4.
Liu Z X, Tang L S. Study on lateral squeezing settlement of soft soil under embankment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003, 31(2): 1-4. (in Chinese)
- [2] 秦建平,陈桂发.软基路堤现场观测结果的分析与工程应用[J].西安公路交通大学学报,1997,17(1):5-8.
Qin J P, Chen S F. Analysis and engineering application of on-the-spot testing of soft clay embankment [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(1): 5-8. (in Chinese)
- [3] 周 镜.软土沉降分析中的某些问题[J].中国铁道科学,

- 1999,20(2):17-29.
- Zhou J. Settlement analysis of embankment on soft caly [J]. China Railway Science,1999,20(2):17-29. (in Chinese)
- [4] 王伟,王中华,许芝娟,等. 降雨条件下黏性土坡微结构动态环境能场分析 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(3):229-234.
- Wang W,Wang Z H,Xu Z J, et al. Analysis of microstructure dynamic environmental energy-field of clays-soil slope under rainfall [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed,2010,38(3):229-234. (in Chinese)
- [5] 王家全,周健,丛林,等. 高填方加筋新旧路堤现场试验与数值模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):2943-2950.
- Wang J Q,Zhou J,Cong L, et al. Analysis between numerical and field tests of high fill reinforced widening embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(1):2943-2950. (in Chinese)
- [6] Tavenas F,Blanchet R,Garneau R, et al. The stability of stage-constructed embankments on soft clays [J]. Canadian Geotechnical Journal,1978,15:283-305.
- [7] Tavenas F,Mieussens C,Bourges F. Lateral displacements in clay foundations under embankments [J]. Canadian Geotechnical Journal,1979,16:532-550.
- [8] Tavenas F,Leroueil S. The Behavior of embankments on clay foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal,1980,17:236-259.
- [9] 王晓谋,袁怀宇,贾其军,等. 路堤下河滩相软土地基变形研究 [J]. 中国公路学报,2003,16(2):22-26.
- Wang X M,Yuan H Y,Jia Q J et al. Study of deformation of alluvial flat soft clay foundation under embankment [J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16(2):22-26. (in Chinese)
- [10] 阎钊,朱长歧,王良民. 海沧大道软土路基施工侧向位移数据场分析 [J]. 岩土力学,2003,24(增刊):465-467.
- Yan K,Zhu C Q,Wang L M. Analysis of lateral displacement in soft soil deposits under fill construction of Haicang highway [J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(Suppl):465-467. (in Chinese)
- [11] 刘金龙,张勇,陈陆望,等. 路基拓宽工程的基本特性分析 [J]. 岩土力学,2010,31(7):2159-2163.
- Liu J L,Zhang Y,Chen L W, et al. Basic characters of road widening engineering [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2159-2163. (in Chinese)
- [12] 赵岩. 考虑侧向位移的路堤沉降分析 [J]. 公路交通科技,2011,28(6):47-50.
- Zhao Y. Analysis on embankment settlement considering lateral displacement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(6):47-50. (in Chinese)
- [13] 刘金龙,栾茂田,赵少飞,等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论 [J]. 岩土力学,2005,26(8):1345-1348.
- Liu J L,Luan M T,Zhao S F, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction technique [J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(8):1345-1348. (in Chinese)
- [14] 刘金龙,朱建群,王吉利,等. 测斜仪在路基水平位移监测中的若干问题探讨 [J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2007,22(3):71-75.
- Liu J L,Zhu J Q,Wang J L, et al. Study on some issues of soil inclinometer in monitoring lateral displacement of soft soil foundation under embankment [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology:Natural Science Edition,2007,22(3):71-75. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国国家标准编写组. JTJ 017-96 公路软土路基路堤设计与施工技术规范 [S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- The National Standards Complication Group of People's Republic of China. JTJ 017-96 Technical specifications for design and construction of highway embankment on soft ground [S]. Beijing:China Planning Press,2002. (in Chinese)