

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.002

# 单侧道路加宽工程中软基处理范围 数值模拟及实测研究

赵志峰, 邵光辉, 高吉

(南京林业大学 土木学院, 南京 210037)

**摘要:**使用水泥搅拌桩进行地基处理已成为道路加宽工程中常用的软基加固方式,但是对于加固范围的确定鲜有研究。以某单侧填土加宽工程为背景,选取了软土地层厚度大、性质较差的典型断面进行分析。将填土简化为梯形荷载作用,根据均质土中的附加应力分布可以确定水泥搅拌桩的加固深度应不小于荷载的作用宽度。通过对不同加固方案的数值模拟分析发现,加固范围对道路边坡的整体稳定性、道路沉降和水平变形等都有明显的影响。对比研究后得出,对加宽后道路的坡脚至路肩范围下方的软土使用搅拌桩进行处理的效果比较明显。现场的实测研究表明提出的加固方案切实可行,可为同类加宽工程的设计和施工起到参考作用。

**关键词:**单侧加宽;软基;水泥搅拌桩;处理范围;实测

**中图分类号:**TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0006-05

## Numerical Simulation and Field Monitoring Research of Reinforcement Range of Soft Ground on One Side Road Widening Project

Zhao Zhifeng, Shao Guanghui, Gao Ji

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China)

**Abstract:** As one of common reinforcement measure, cement mix pile is widely used in soft ground treatment of road widen project, while relevant studies on reinforcement range is insufficient. According to the one side road widening project, the cross-section of deep soft ground is analyzed. When fill is simplified as trapezoid load, the conclusion that reinforcement depth of cement mix pile should greater than load breadth can be gained by addition stress distribution. Based on the numerical simulation of different reinforcement measures, the slope stability, road settlement and horizontal deformation are influenced greatly by reinforcement range. Comparison research indicates that when the soft ground from slope toe to road shoulder is strengthened, the improvement effect is obvious. The numerical simulation and field monitoring resules show that reinforcement measure is suitable. Meanwhile, this study can provide reference to similar project.

**Key words:** one side widen; soft ground; cement mix pile; reinforcement range; field monitoring

随着交通量的迅速增长,中国许多已建成道路已满足不了需求。因此,对道路进行扩建加宽是中国公路建设中亟待解决的重要问题<sup>[1]</sup>。

在软土地基上进行道路加宽需要解决的核心问

题是如何使新老路基变形协调<sup>[2]</sup>。尤其是对于在软土地基上的高填土路堤加宽工程而言,将面临整体稳定性、新老路堤的差异沉降、新老路堤的衔接等一系列问题<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期:2013-12-21

基金项目:住建部研发项目(2011-K3-33)

作者简介:赵志峰(1978-),男,博士,副教授,主要从事岩土力学与地基基础研究,(E-mail)zzf0911@163.com。

随着中国多条高速公路加宽的完成,在路面处理和路堤结合部处理方面积累了比较丰富的经验<sup>[5-6]</sup>。但对软土地基处理方面的分析相对较少,尤其是很少有研究涉及地基处理方案的比较和效果评价<sup>[7-8]</sup>,而且已有的研究主要多集中于高速公路加宽工程。实际上,现在市政道路和一般道路的加宽工程越来越多,这些加宽工程的投资规模和建设等级等与高速公路加宽存在明显差异,反而面临着更大的施工风险,因此有必要对其进行深入研究。

本文将江苏省某道路改建工程为实例,针对该工程存在的软土地基、高填土等不利情况,选取软弱地基最厚的不利断面,对不同的地基处理方案进行了数值分析,并通过现场监测证明了方案的合理性。

## 1 基本模型的建立

### 1.1 工程背景

为了使研究更有实际意义,选取了某临水的实际道路加宽工程为工程背景进行研究。该工程为对老路堤的二次翻修扩建,拓宽采用单侧加宽,填土高度超过了12 m,加宽后的路面达到20 m宽。而且路基存在软土层,部分重点断面的软土层厚度在15 m以上。所以建模时选取了软土层最厚的重点断面,以此为基础采用数值模拟对不同的地基处理范围进行分析。

建模采用直角坐标系, $y$ 轴为竖直方向、向上为正; $x$ 轴为水平方向,向右为正。为了减小边界效应的影响,模型选取了尽可能大的范围:100 m×40 m。左、右边界施加水平向约束、不排水,下边界为竖直和水平方向均固定、排水,上边界为自由边界、排水。土体的本构模型选用摩尔库伦模型<sup>[8]</sup>。整个模型如图1所示。

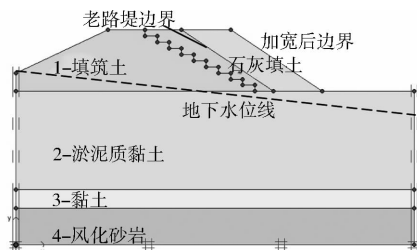


图1 典型计算断面模型

### 1.2 工程地质条件

在勘察深度内,场地主要岩土层有4种:

1)填筑土:为可塑状硬塑状粘土、亚粘土,中-高压缩性,结构较松散。

2)淤泥质亚粘土:饱和,流塑,高压缩性。

3)粘土-亚粘土:饱和,硬塑,中偏低压缩性。

4)强风化泥质粉砂岩:岩石风化强烈,岩芯呈硬塑土状,局部夹风化残块,干钻较难钻进。

根据勘察和室内土工试验结果,各土层的基本力学参数见表1。根据地勘报告中的土层分布,各断面在4个深度上钻孔取原状土样。采用了先进的GDS三轴试验系统来获得土层的黏聚力和内摩擦角。考虑到老路堤形成的时间较长,固结已经完成;而填土工程施工较快,且软土的渗透性低,因此抗剪强度的测定采用固结不排水剪试验。各土层的物理力学参数见表1。

表1 岩土物理力学计算参数

层号	土层名称	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压缩模量/ MPa	泊松比	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
1	填筑土	18.9	5.19	0.35	30.8	9.9
2	淤泥粘土	18.2	3.69	0.35	13.2	8.1
3	黏土	20.0	10.93	0.35	70.5	14.8
4	风化砂岩	20.2	50.0	0.30	78.5	35.0

### 1.3 地基处理方案

由于该断面存在厚达16 m的软土层,为了保证加宽道路的整体稳定性、减小新老路堤的不均匀沉降,必须对软基进行处理。主要采用了3种处理方式:1)采用对老路堤进行台阶状开挖的措施来增强新老路堤搭接的整体性;2)在新老路基的搭接处铺设土工格栅;3)对道路下方软土进行了加固。目前软基处理中较有效的方法是采用水泥土搅拌桩形成复合地基<sup>[9-10]</sup>,搅拌桩桩径0.5 m,桩距1.2 m。

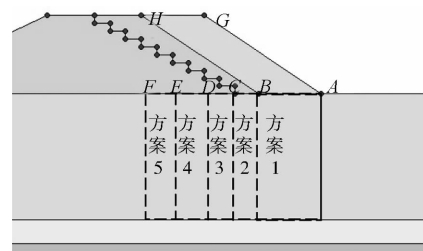


图2 不同地基处理方案示意图

由于缺乏对道路加宽工程软基处理范围的研究,所以在确定水泥土搅拌桩的加固范围时缺少明确依据。针对本工程情况,选取了5种方案进行对比研

究。1)自加宽后道路的坡脚至老路堤的坡脚(A-B);2)自A点至原坡脚和新路肩的中点(A-C);3)自A点至新路肩(A-D);4)自A点至加宽部分的中点(A-E);5)自A点至原路面路肩(A-F)。各加固方案的起点相同(A点),处理的深度相同(穿过整个淤泥质黏土层),差别在于平面上的宽度不同。

## 2 不同加固范围的影响

### 2.1 填土荷载造成的附加应力

为了对加固范围的确定提供理论依据,先考虑填土荷载在地基中产生的附加应力。对于单侧填土工程,新填土形成的荷载为梯形荷载(不考虑台阶开挖)。就本工程而言,填土形成了等腰梯形荷载,其中 $a=8\text{ m}$ , $b=7\text{ m}$ 。

有学者在 Boussinesq 解的基础上给出了梯形荷载下地基土中不同深度处竖向附加应力的表达式。Osterberg 给出了更简单实用的计算方法<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_z = K_z p \quad (1)$$

式中, $K_z$ 为 $a/z$ 和 $b/z$ 的函数,可根据 Osterberg 总结出的图表查表确定。

根据上述方法计算梯形荷载作用下不同深度的竖向附加应力,几个特征点 M、N 和中点 O 下方的竖向附加应力系数如图 3 所示。

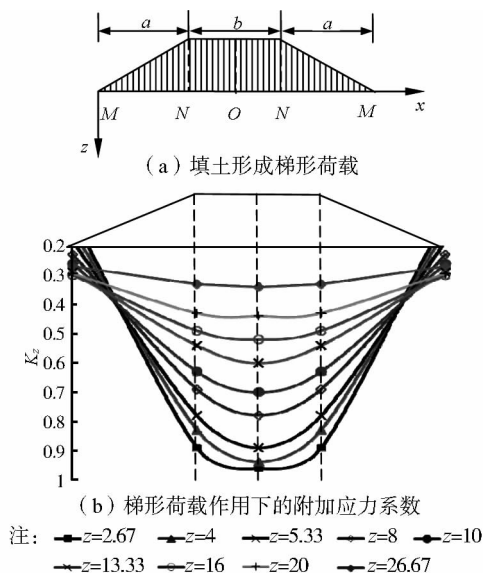


图3 填土荷载作用下的附加应力系数

从图3可以看出梯形荷载作用下的竖向附加应力系数 $K_z$ 的变化规律。在地表处,梯形荷载两端的附加应力系数很小,而中间矩形部分的应力系数接近1,差别很大。随着深度的增加,两端(M点)的附加应力系数开始增加,而中间部分(N点、O点)的

应力系数开始衰减,二者的差别逐渐减小。在 $z=16\text{ m}$ 处,M点下方的 $K_z$ 达到最大值0.30左右,N点下方的 $K_z$ 为0.49,中点O下方的 $K_z$ 为0.52。当 $z=20\text{ m}$ 时,矩形面积下的应力系数几乎相等;当 $z=23\text{ m}$ 时,整个梯形面积下方的应力系数趋于一致。这说明达到一定深度(梯形荷载的作用宽度)时,梯形荷载在地基中产生的附加应力比较均匀。

从附加应力分布来看,填土形成的梯形荷载对地基变形会造成显著的影响,影响的地基土深度基本等于荷载作用的宽度。加固的平面范围应包括整个附加应力作用区域( $2a+b$ ),即加固方案5。但在实际工程中,部分填土作用在老路堤之上,新老路堤的相互作用会对附加应力的分布有所改善,因此并不需要如此大的加固范围。而且搅拌桩的现场施工需要将老路堤开挖后才能进行,所以加固方案5在现实中很难操作。从附加应力系数的分布来看,中间矩形部分的附加应力较大,所以加固范围从理论上应至少包含该部分( $a+b$ ),即加固方案3。下面通过数值计算来比较几种加固方案的差别。

### 2.2 数值计算结果

数值模拟时考虑了基本的施工步骤:原有路堤填筑固结、老路堤开挖和新路堤填筑。由于考虑的是不利情况,所以认为新路堤的填筑是在不排水的情况下进行。

2.2.1 整体稳定性 进行了不同加固范围下的整体稳定性计算,计算采用的是强度折减法<sup>[12]</sup>。当不采用任何措施时,安全系数小于1,整体稳定无法得到保证。

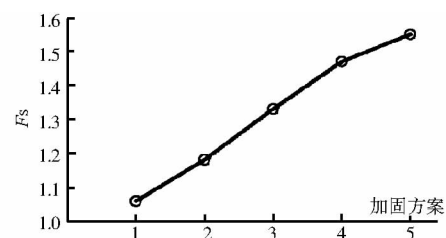


图4 采取不同方案的安全系数

当采取加固方案1时,路堤的整体安全系数为1.06,安全储备略显不足;当采取加固方案2时,安全系数增加至1.18,基本满足稳定要求;当采取加固方案3时,安全系数已达到1.33。加固范围越大,安全系数相对越高(图4)。从边坡稳定的角度出发,加固范围达到方案3即可。

#### 2.2.2 位移计算结果

##### 1) 竖向沉降

对于单侧加宽工程而言,新填土作用在一侧的

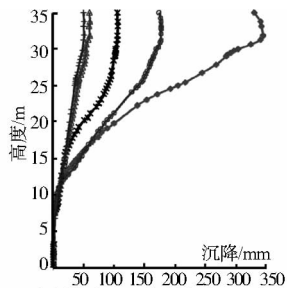
原有路堤边坡上,势必会造成路基的沉降不均匀。采取搅拌桩处理后,可以形成复合地基,原有的软基性质得到了改善,对沉降可以起到改善作用<sup>[13]</sup>。

不同方案的沉降计算结果表明在加宽荷载作用下,地表沉降呈现老路堤中心处小,新路堤形心处大的马鞍形分布,这与前人研究成果和现场监测数据一致<sup>[14-15]</sup>。从不同加固方案时的变形可以看出,随着加固范围的增加,最大沉降位置从新路路肩逐渐向内转移。所以在老路至新路肩这一区域应重点加固。综合各计算结果表明,加固范围越大,安全系数越高,变形越小。但随着加固范围增大到一定程度后,对变形和稳定的改善效果并不明显。

表2 不同加固方案的变形量

方案	最大沉降/mm	坡脚水平位移/mm	最大沉降位置
1	394	195	新路右侧路肩
2	215	65	新路右侧路肩
3	150	30	加宽路面中部
4	105	15	老路路肩处
5	85	6	加宽后道路中部

为了比较各加固方案对于改善沉降的效果,选取道路加宽部分的中点为特征点,考查该位置不同深度处的沉降情况(见图5)。当采取加固方案1时沉降较大,填土表面处的沉降超过300 mm。当加固范围扩大时,沉降得到明显控制。土体沉降随着深度的增加而迅速减小,各方案下土体的深层沉降相差不大。值得注意的是,当搅拌桩加固范围达到一定面积时,继续扩大加固范围的效果会不明显。例如方案5和方案4相比,各深度处的沉降值减小的非常有限。



注: →加固方案1 →加固方案2 →加固方案3 →加固方案4 →加固方案5

图5 采取不同方案的沉降曲线

## 2) 水平位移

在填土工程中一般比较关心坡脚水平位移。通过数值计算的结果可以看出,随着加固范围的增加,路基的位移逐渐减小,但减小的幅度在下降。

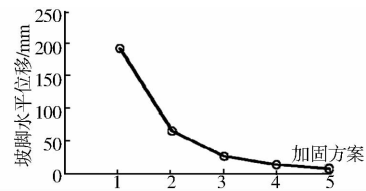


图6 采取不同方案的坡脚水平位移

根据简化模型的理论分析和数值计算结果,并考虑到实际施工的可操作性,单侧道路加宽工程的软基处理平面范围可以采用加固方案3或方案4,即对加宽后道路的坡脚至路肩这个宽度下方的软土进行处理,这样可以达到较好的处理效果和经济性。在实际工程的加固中采用的加固范围介于方案3和4之间,下面通过对现场监测数据的分析说明该方案的合理性。

## 3 现场实测结果分析

为了解道路加宽施工过程中的变形情况,在典型断面上布置了变形监测点,主要监测了路面沉降、深层水平位移、坡脚水平位移等内容,此外还进行了竣工后的工后沉降监测。由于是市级道路,各种条件非常有限,所以监测工作开展的比较困难。

### 1) 路面沉降

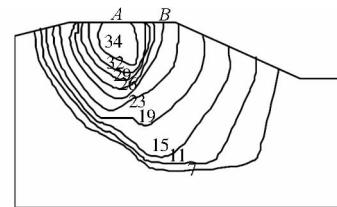


图7 填土完成时的沉降变形图/cm

在新填土形成的路面中部和右侧路肩处布置了沉降标(如图7中的A、B所示)来观测填土后的沉降变形。当填土完成时,左侧沉降标(A点)测得的沉降值为30 cm左右;右侧沉降标(B点)测得的沉降值为20 cm左右。实测数据说明新老路堤存在着不均匀沉降,但在控制允许范围内。同数值模拟情况进行比较,A点数值模拟的沉降值在34 cm左右,B点为24 cm,略大于实测结果。

### 2) 坡脚水平位移

在坡脚处设置了位移观测墩,但由于施工等各方面原因,观测墩在填土达到一半高度时被损坏从而无法继续监测。最后观测得到的坡脚累计水平位移为25 mm,而数值计算的结果约为30 mm,累计水平位移属于安全的范围内。

## 3) 深层土体水平位移

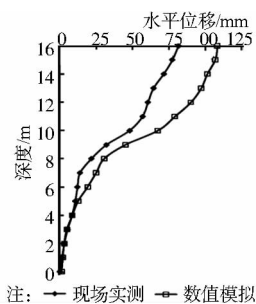


图 8 深层土体水平位移

在坡脚下方设置了测斜管以观测深层土体水平位移。实测各测点的累计水平位移和数值模拟的结果如图 8 所示。从图中可以看出,水平位移随着土深度的增加而逐渐减小,采用方案 3 时最大的水平位移为 77 mm。在浅层部位,数值计算的结果大于实测结果;在距管口 10 m 深度以下部分,数值计算和实测结果比较接近。由于勘察、土层参数、施工过程、观测等各方面的原因,数值计算的结果与实测存在一定的误差。

## 4) 工后沉降

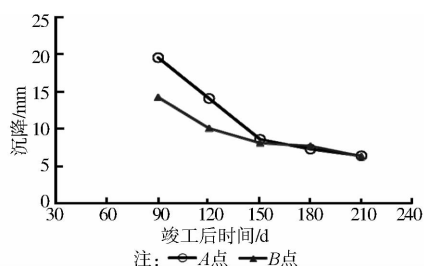


图 9 特征点的工后沉降变形

在加宽工程竣工后,还进行了工后沉降观测,沉降观测点位置同施工期路面沉降的观测点。监测频率为每月 1 次,共进行了 5 次观测。从图 9 可以看出,A、B 2 个位置的工后沉降都明显呈现出逐渐减小的趋势。A 点的工后沉降早期比较大,在竣工 150 d 后,2 个点的沉降基本相同。说明软基处理后,道路的工后沉降得到了较好的控制。

## 4 结 论

1) 在软土地基上进行道路加宽时,对软基采用水泥搅拌桩进行处理可以有效的增强整体稳定性,减小道路变形。

2) 通过对单侧道路加宽工程的理论分析和不同加固方案的数值比较可以发现,对加宽后道路的坡脚至路肩这个宽度下方的软土使用搅拌桩进行处理的效果比较明显而且便于施工。当加固区域进一

步增大时,效果的改进并不明显。

3) 从施工期和工后沉降的监测结果来看,采用合理的地基加固方案后,该工程的变形处于控制范围之内,道路竣工后稳定性较好。

## 参考文献:

- [1] 高翔, 刘松玉, 石名磊. 软土地基上高速公路路基扩建加宽中的关键问题[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 29-33.  
Gao X, Liu S Y, Shi M L. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(2):29-33.
- [2] 张军辉. 不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1216-1221.  
Zhang J H. Analysis of deformation behavior of expressway widening engineering under different foundation treatment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4):1216-1221.
- [3] Gnanendran C T, Manivannan G, Lo S C R. Influence of using a creep rate or an elastoplastic model for predicting the behavior of embankments on soft soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(2):134-154.
- [4] 章定文, 刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 7-12.  
Zhang D W, Liu S Y. Numerical analysis of interaction between old and new embankment in widening of freeway on soft ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6):7-12.
- [5] Zhang J H, Huang X M. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced embankments of the road widening [C]//2nd International Geo-Changsha Conference. Singapore: CI-Premier Conference Organisation, 2007: 441-446.
- [6] 刘观仕, 孔令伟, 李雄威, 等. 高速公路软土路基拓宽粉喷桩处治方案分析与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2):309-315.  
Liu G S, Kong L W, Li X W, et al. Analysis of treatment scheme for soft foundation in expressway widening project and its verification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):309-315.
- [7] Akou Y, Magnan J P, Dubreucq T, et al. Centrifugal analysis of embankment widening on soft clay [J]. Geotechnique, 2000, 50(3):221-233.
- [8] 李茂英, 曾庆军, 莫海鸿, 等. 高速公路拓宽工程沉降控制复合地基优化设计[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 535-540.

- [6] Hu R L, Yeung M R, Lee C F, et al. Mechanical behavior and microstructural variation of loess under dynamic compaction [J]. *Engineering Geology*, 2001 (59): 203-217.
- [7] 冯世进, 胡斌, 张旭, 等. 强夯参数对夯击效果影响的室内模型试验[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 40 (8): 1147-1153.  
Feng S J, Hu B, Zhang X, et al. Model test study on impact parameters' influence on tamping effect [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40 (8): 1147-1153.
- [8] Medero G M, Schnaid F, Gehling W Y. Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible Soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2009, 135(6): 840-843.
- [9] 周飞飞. 原状湿陷性黄土的结构性本构模型[J]. *铁道工程学报*, 2012(4): 13-17.  
Zhou F F. Non-linear constitutive model for intact collapsible loess [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2012(4): 13-17.
- [10] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究[J]. *世界地震工程*, 2010, 12(Sup1): 241-246.  
Xiong J H, Hu B, Feng S J, et al. Model test study on silt foundation improvement by dynamic compaction [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2010, 12(Sup1): 241-246.
- [11] Jafarzadeh F. Dynamic compaction method in physical model tests [J]. *Scientia Iranica*, 2006, 13(2): 187-192.
- [12] 赵康, 罗嗣海, 石亮. 强夯模型试验及其研究进展[J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 131-134.  
Zhao K, Luo S H, Dan L. Model tests of dynamic consolidation and its progress [J]. *Yellow River*, 2012, 34(2): 131-134.
- [13] Miao T D, Liu Z Y, Niu Y H. Unified catastrophic model for collapsible loess [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2002(5): 595-598.
- [14] Liu S H, Sun D A. Simulating the collapse of unsaturated soil by DEM, Int [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002(26): 633-646.
- [15] 邓津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(4): 542-548.  
Deng J, Wang L M, Zhang Z Z. Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29 (4): 542-548.

(编辑 王秀玲)

(上接 10 页)

- Li M Y, Zeng Q J, Mo H H, et al. Optimum design of composite foundation according to settlement control for extension project of expressway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 535-540.
- [9] Hiroshi M, Mitsuo N. Design and numerical analysis of road embankment with low improvement ratio deep mixing method [C]// *Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans*, 2004: ASCE, 2004: 1395-1402.
- [10] Reinaldo V M, Yong S. Geogrid-reinforced and pile-supported roadway embankment [C]// *Proceedings of Sessions of the Geo-frontiers 2005 Congress*, Texas: The Geo-institute of the American Society of Civil Engineers, 2005: 11-20.
- [11] Braja M D. *Principles of geotechnical engineering* [M]. Cengage Learning, USA, 2010.
- [12] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1996, 122(7): 577-596.
- [13] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 1-13  
Gong X N. Generalized composite foundation theory and engineering application [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 1-13.
- [14] 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.
- [15] Hjortnes P A, BROERS H. The behavior of soft subsoil during construction of an embankment and its widening [C]// *Proc. Centrifuge 94*. Rotterdam: Balkema, 1994: 567-574.

(编辑 胡玲)