

高速拓宽软土路基差异沉降数值计算及监测分析*

谭儒蛟^① 李明生^① 张建根^① 徐文杰^②

(^①天津市市政工程设计研究院 天津 300051)

(^②清华大学 水利土木工程学院 北京 100084)

摘要 路基差异沉降控制是软土地区高速拓宽工程中的关键性技术问题之一,本文以北方某高速拓宽工程的试验段为例,运用 ABAQUS 软件进行了拓宽软土路基变形的有限元数值计算,并与路基现场变形监测数据进行对比分析,数值计算与实测结果基本吻合,结论一致地反映了路堤填筑初始阶段新路基的沉降速率较大,旧路基在填筑后期才产生较明显的附加沉降变形;路基变形在拓宽侧呈现明显的“沉降盆”效应,新、旧路基的差异沉降是造成路基路面纵裂的主要因素;桩端地基土呈现出较明显的侧向挤压效应,则表明采用带帽 PTC 桩复合地基中用于减沉时,桩端应置于具有较高承载力的有效持力层上。

关键词 高速拓宽 软土路基 差异沉降 带帽 PTC 桩 数值计算 监测分析

中图分类号: TU47 文献标识码: A

NUMERICAL CALCULATION AND MONITORING ANALYSIS ON DIFFERENTIAL SETTLEMENTS OF SOFT SOIL SUBGRADE IN EXPRESSWAY EXTENSION PROJECT

TAN Rujiao^① LI Mingsheng^① ZHANG Jiagen^① XU Wenjie^②

(^①Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051)

(^②School of Civil Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract How to control of the differential settlement is a key task for the soft soil subgrade in Expressway extension project. This paper examines the experiment section of one expressway extension project in northern China. The finite element calculation is carried out for the deformation of widening soft soil subgrade. The Abaqus software is used. The calculation results are in accordance with the deformation monitoring information at field tests. These results conformably demonstrate the deformation characteristics that widening subgrade presents larger settlement rate in the initial stage of embankment filling. But the old subgrade has obvious additional settlement. The basin-curve of settlement appears in the bottom of widening subgrade. The differential settlement between the new and old subgrade is one of the main reasons that inducing longitudinal subgrade cracks. The foundation soil near the bottom of the composite foundation of prestressed thin-wall concrete (PTC) pile with cap presents obvious extrusion deformation in horizontal directions, which shows that PTC pile tip should be placed at effective bearing stratum with relatively high capacity.

Key words Expressway extension project, Soft soil subgrade, Differential settlement, PTC pile with cap, Numerical calculation, Monitoring analysis

* 收稿日期: 2011-11-02; 收到修改稿日期: 2012-04-12.

第一作者简介: 谭儒蛟, 主要从事岩土工程勘察设计及科研咨询等工作. Email: tanrujiao@163.com

1 引言

我国许多早期建成的高速公路已不能满足日益增长的交通流量要求,越来越多的高速公路面临着拓宽扩建的现实需求。软土地区高速拓宽工程中,由于新填路基对既有路基产生附加荷载,加之新、旧路基的地基土物理力学性质方面具有差异性,新旧路基的沉降速率、累积沉降量会明显不同,新、旧路基间的差异沉降往往导致路基沿纵向拉裂破坏^[1~7]。

为控制软土路基拓宽工程中的差异沉降问题,大量的地基处理方法得以实践和运用,如带帽预应力混凝土薄壁管桩、高压旋喷桩、水泥土搅拌桩、CFG桩、换填垫层等。此外,还在路基拼接中采用不同高宽比的台阶开蹬搭茬、铺设凸点钢塑格栅或土工织物等加筋材料等技术手段。沉降计算方法可分为分层总和法和数值计算方法,前者是目前设计中的主要方法。分层总和法可操作性强,其问题在于未考虑新旧路基的相互影响,不能有效地反映地基差异沉降的横断面形状,无法分析路床顶的实际沉降横断面特征及其对路面结构层受力状态的影响^[8];数值计算方法主要有弹性力学平面应变有限元法、基于 ANSYS 运用 DP 模型的非线性平面应变有限元法、三维弹塑性有限元法、弹塑性有限元法等,数值计算可获得拓宽路基应力与变形的规律性认识,但由于土体的非均质性以及参数的不确定性,计算沉降量在数值上与实际沉降量并不能完全符合。由此基于原位监测数据,运用反分析法来选择合理的计算模型和岩土材料参数,再进行不同设计条件下的拓宽路基的应力应变分析和工后沉降预测,成为一种切实可行的技术路线。

本文以北方某高速公路扩建项目的试验段工程为案例,基于 ABQUES 运用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型和扩展的 D-P 准则,就软土路基拓宽施工过程中的变形性状开展平面应变非线性有限元分析,并将数值计算结果与现场变形监测数据进行对比,分析了带帽 PTC 桩复合路基施工期的沉降及水平变形特征,总结了拓宽工程路基沉降及差异沉降规律,并探讨了软土路基纵裂的致灾作用机理,结论对类似工程设计具有一定的指导作用。

2 工程案例概况

该高速公路位于滨海软土地区,是一条中心城

区与滨海新区核心区之间的主要快速通道,由双向四车道扩建为双向六车道,采用双侧路基拼接拓宽的设计方案。原高速公路于 2000 年底建成通车,经沉降监测发现,在多年的原路堤荷重和交通荷载作用下,既有道路地基土的固结沉降基本完成,老路基稳定性状良好。

2.1 地基土层分布及工程性质

试验段的地基土层^[9]由表往深依次分布如下:地表为①-1 素填土,稍湿,层厚 2.5m,层底标高 0.5m;②-1 黏土,可塑-硬塑,高压缩性,层底标高 -0.5m;③-1 淤泥质土,流塑,高压缩,层底标高 -6.0m;③-2 粉质黏土,层状,软塑,中等偏高压缩性,层底标高 -12.0m;④-1 粉质黏土,可塑,中压缩性,层底标高 -15.0m;④-2 粉土,饱和、中密,中压缩性,层底标高 -17.0m;④-3 黏土、粉质黏土,可塑-硬塑,中压缩性,层底标高 -24.0m;⑤-1 黏土,可塑-硬塑,中压缩性,层底标高 -27.0m;⑥-1 粉细砂,饱和,密实,中偏低压缩,层底标高 -33.0m;⑥-2 粉质黏土,可塑-硬塑,中压缩性,层底标高 -37.0m。地下水为孔隙潜水类型,水位埋深 1.0m。

2.2 拓宽路基处理方案

拓宽段路基采用带桩帽的预应力薄壁管桩(简称带帽 PTC 桩)进行深层处理,现状硬路肩(宽 2.5m)全部破除,新、旧路基路面间开蹬搭茬拼接。预应力管桩采用正方形布置,桩底标高为 -15.5m(底排桩顶标高 0.5m),桩径 0.4m,桩距 2.5~2.0m,桩帽尺寸大小 1.0×1.0×0.3m。底排桩成桩后,清理整平桩帽间土体,铺筑素土至桩帽顶面高度,施作加筋碎石垫层,层厚 0.6m,层中铺设 2 层凸结点钢塑格栅。旧路路基蹬台宽度为 1m,高度为 0.6m,拓宽路基填 5% 钱灰土分层压实。图 1 为拓宽路基处理方案示意图。

试验段施工结束后 1 个月左右,路面原第一行车道中间至往中分带 1~2m 的平面范围内出现了纵向裂缝。探槽揭露裂缝产状近于直立,穿透路面结构层并延伸至旧路基填土层,在旧路基填土层顶面仍可见 6~10mm 宽的拉裂缝。

3 路基变形数值计算

3.1 计算模型及边界条件

为模拟路基在新填路堤荷载作用下的变形情

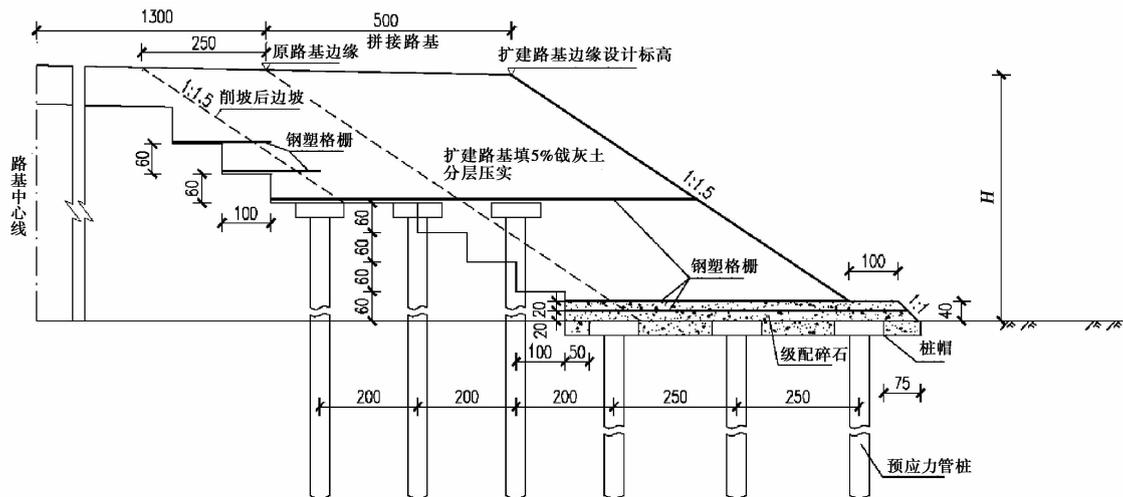


图1 拓宽路基处理设计方案

Fig. 1 scheme of the designed extension subgrade treatment

况,本文运用 ABAQUS 软件进行有限元数值计算分析。

按场地地基土层实际分布特征建立地质模型。根据室内土工试验结果,新、旧路基土仅含水状态稍有变化,压缩性指标差异不明显,为简化计算在模型中同层位的新、旧路基土未区别对待。预应力混凝土薄壁管桩、碎石垫层、路堤填土、路面结构层均分区考虑。计算分析采用平面应变问题来处理,单元划分采用 ABAQUS 中的受控四边形网格(Quad-dominated)自动网格划分功能。4 结点四边形平面应变元(CPE4R)为 16798(图 2)。

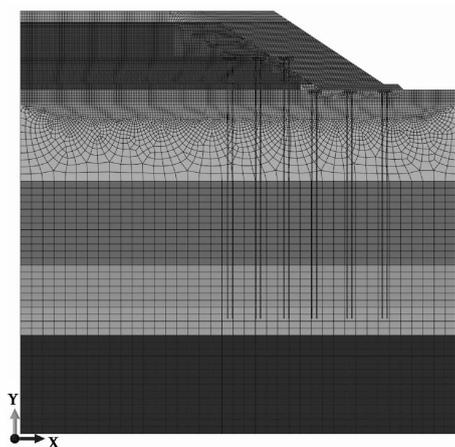


图2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

土体等材料计算参数如表 1。土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,材料的屈服准则采用扩展的 D-P 准则,管桩采用线弹性模型。计算模型边界条

件设定为:模型上部为自由边界,左右两侧为水平约束,底面边界采用固定约束。

表 1 土体材料力学计算参数
Table 1 calculation parameters of soil

| 土层名称 | 质量密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 弹性模量 e/MPa | 泊松比 μ | 黏聚力/ kPa | 内摩擦角/ ($^{\circ}$) |
|----------|--|------------------------|--------------|-------------|-------------------------|
| ②-1 黏土 | 1.91 | 5.4 | 0.4 | 16 | 15 |
| ③-1 淤泥质土 | 1.81 | 4.0 | 0.4 | 12 | 10 |
| ③-2 粉质黏土 | 1.93 | 6.0 | 0.4 | 16 | 19 |
| ④-1 粉质黏土 | 1.95 | 7.2 | 0.4 | 16 | 22 |
| ④-2 粉土 | 2.04 | 11.2 | 0.4 | 12 | 25 |
| ④-3 粉质黏土 | 1.93 | 7.6 | 0.4 | 18 | 21 |
| 路堤填土 | 1.91 | 20 | 0.3 | 25 | 30 |
| 管桩桩体 | 2.5 | 2000 | 0.2 | — | — |
| 碎石垫层 | 2.0 | 12 | 0.3 | 30 | 38 |
| 路面结构层 | 2.1 | 200 | 0.3 | 60 | 36 |

3.2 计算分析步骤

由于实际施工过程中对旧路堤的开挖与原设计(图 1)有所差别,图 3a 显示了实际的施工开挖方案,并根据施工过程进行分级(①~⑩)。待施工开挖完毕后再进行分层填筑,并进行管桩施工,整个填筑过程模拟共分 12 个施工级(图 3b)。

数值计算中仅考虑重力影响,首先对旧路堤情况下进行地应力平衡,获得路堤的初始应力状态,然后根据图 3 所示的开挖及填筑过程进行分级施工模拟。

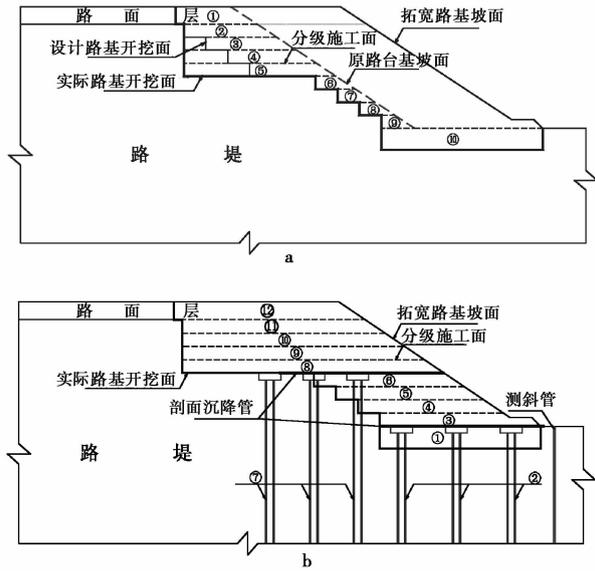


图3 计算分析过程图示

Fig. 3 Processes of the calculation

a. 分级开挖过程; b. 分级填筑过程

3.3 计算结果及分析

路基拓宽施工完毕后,底排桩顶高程横断面的沉降随着施工过程发生变化(图4),图4中施工级号分别对应图3b的填筑过程分级,横坐标0点对应路中央分隔带位置。从图4中可以看出,由于拓宽侧新填路基荷载的施加,新、旧路基均出现了沉降变形,拓宽侧新路基的沉降量随填土高度增加而递增,初始阶段的沉降速率明显大于旧路基,旧路基在填筑后期才产生较明显的沉降变形。总体来看,路基最大累计沉降量约为4cm,基本位于新填路基截面形心下方位置;中央分隔带附加沉降量为2cm,新、旧路基间的沉降差约2cm。此外,底排桩处理平面

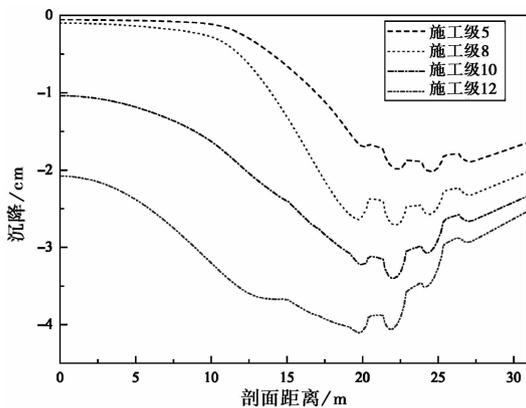


图4 底排桩顶高程横断面沉降变化曲线

Fig. 4 Settlement curves of the cross section at elevation of the below pile top surface

范围内,沉降曲线呈波浪状微起伏,这是桩体与桩间土的不均匀沉降的反应。

图5分别列示了路基拼接完工后,路基的沉降变形、水平变形及总变形云图。不难看出,带帽PTC桩复合地基处理措施,明显增加了软土路基的总体刚度,从而使得地基变形向深部传递,整个路基变形在拓宽侧新路基下方呈现明显的“沉降盆”效应;在桩的底部由于土体受到压缩,使得桩端土体具有明显的侧向挤压趋势,由此也可以看出采用刚性桩复合地基方案达到减沉目的时,桩端应置于具有较高

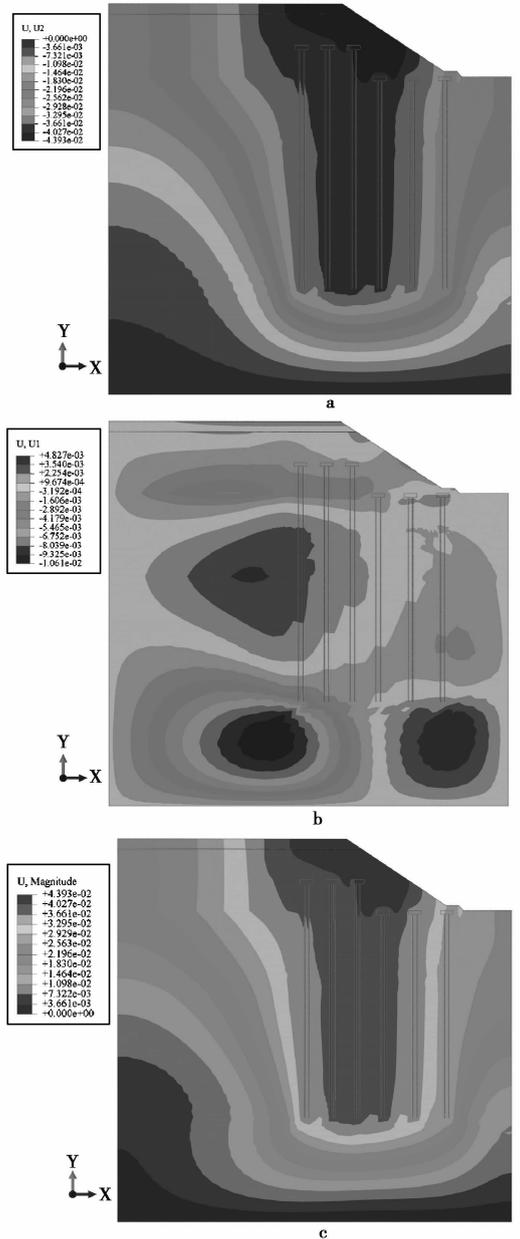


图5 施工完毕后路基变形特征

Fig. 5 Subgrade deformation characteristics after completion
a. 路基沉降变形; b. 路基水平变形; c. 路基总变形

承载力的有效持力层上。

新、旧路基间的不均匀沉降,使新填路堤荷载形成了对旧路基的弯矩作用,旧路基压致拉裂,致使路面结构层呈现不同程度的脱空现象,最终半刚性的结构层被拉裂。路基路面拉裂缝的位置与路堤填土高度密切相关,并不正位于搭接位置而是一般位于路基搭接位置以里 2~3m 处。

4 实测路基变形分析

在试验段工程中,分别在 2 排桩桩顶高程位置埋设了剖面沉降管,在路基坡脚位置安装了测斜孔(图 3b),并采用进口 Sinco 水平测斜仪和垂直测斜仪对路基的沉降和水平变形情况进行了现场测试。图 6 为底排桩顶剖面沉降管埋设安装现场实景。



图 6 剖面沉降管埋设现场

Fig. 6 Burying field of cross section settlement tube

图 8 显示了随填土施工进度剖面沉降管实测全断面沉降变化曲线,其中图 7a、b 分别为底排桩、上排桩桩顶剖面沉降管的测试结果,图 7a、b 中的横坐标 0 点为剖面沉降管的管口位置,横坐标正向指向路堤边坡内侧。图 7a 显示底排桩顶高程的横断面上,由坡脚往内,沉降量呈递增趋势,实测最大沉降量为 41.5mm;图 7b 显示上排桩桩顶高程的横断面上,由坡外往内,沉降量递增趋势不如底排桩顶明显,坡内侧略大,在上排桩顶以上填土荷载作用下的路基累计沉降量为 20mm 左右。2 排桩顶高程的全断面实测沉降变化曲线均为微波浪状,这一特征反映了桩体与桩间土的不同强度而体现出一定的不均匀变形。

图 7 中的监测日期与图 3 中的分级填筑施工步

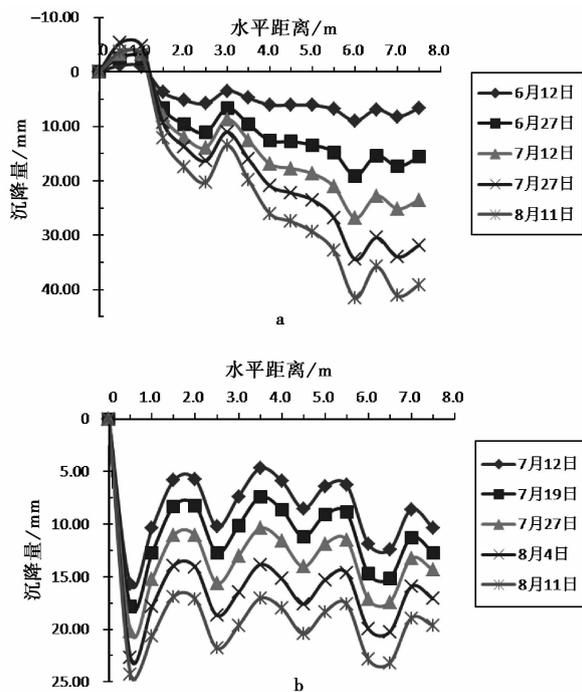


图 7 剖面沉降管实测沉降变化曲线

Fig. 7 Monitoring curves of cross section settlement tube

- a. 底排桩顶沉降管实测沉降变化曲线;
b. 上排桩顶沉降管实测沉降变化曲线

的依次对应关系为: 6 月 12 日对应于施工级 4, 6 月 27 日对应于施工级 5, 7 月 12 日对应于施工级 9, 7 月 19 日对应于施工级 10, 7 月 27 日对应于施工级 11, 8 月 4 日对应于施工级 12。

图 8 为坡脚处测斜管实测的路基竖向不同深度位置的水平变形情况,测斜深度为 20m。由图 8 可以看出,桩端以下地基土层和浅部桩侧地基土层产生了较明显的侧向变形趋势,而中下部桩体埋深范围内的土体未发生明显侧向挤出变形,这与数值计算结果较为吻合。

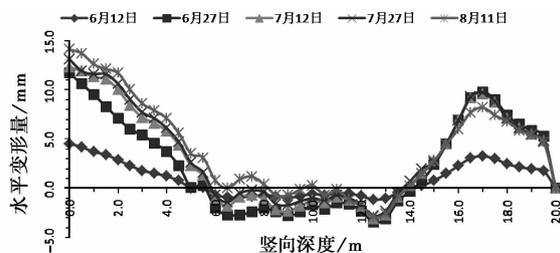


图 8 坡脚测斜管实测水平变形曲线

Fig. 8 Monitoring horizontal deformation curves of inclinometer tube at the foot of subgrade slope

5 结论及探讨

(1) 本文以北方某高速公路拓宽工程试验段为

工程案例,采用 ABAQUS 数值软件进行了拓宽工程软土路基变形的有限元计算,并辅以现场变形监测数据分析,数值计算结果和现场实测变形情况基本吻合,结论一致显示新、旧路基间的差异沉降是导致既有路基产生纵向裂缝的主要因素。

(2)在新填路堤荷载作用下,新、旧路基的沉降量随填土高度增加而递增;初始阶段新路基的沉降速率明显大于旧路基,旧路基在填筑后期才产生较明显的沉降变形;路基最大累计沉降量约为 4cm,中央分隔带附加沉降量约为 2cm,新、旧路基间的沉降差约 2cm。

(3)带帽 PTC 桩复合地基增加了软土路基的总体刚度,从而使得地基变形向深部传递,整个路基变形在拓宽侧新路基呈现明显的“沉降盆”效应,最大沉降量位置基本位于新填路基截面形心下方。

(4)新、旧路基间差异沉降,使新填路堤荷载形成了对旧路基的弯矩作用,旧路基压致拉裂,致使路面结构层下呈现不同程度的脱空现象,最终半刚性的结构层被拉裂。

(5)数值计算和变形监测均反映桩端和浅部桩侧地基土呈现出较明显的侧向挤压效应,这一变形特征也启示了采用刚性桩复合地基用于减沉时,桩端应置于具有较高承载力的有效持力层上。

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 Xiang, Liu Songyu, Shi Minglei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004,21(4):29~33.
- [2] 陈磊,刘汉龙,陈永辉.高速公路拓宽工程地基处理效果的数值分析[J].岩土力学,2006,27(11):2066~2070.
Chen Lei, Liu Hanlong, Chen Yonghui. Numerical analysis of foundation improvement effect for expressway widening engineering. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(11):2066~2070.
- [3] 孙伟,龚晓南,孙东.高速公路拓宽工程变形性状分析[J].中南公路工程,2004,29(4):53~55.
Sun Wei, Gong Xiaonan, Sun Dong. Analysis of deformation in widening project of freeway. Central South Highway Engineering, 2004,29(4):53~55.
- [4] 贾宁,陈仁朋,陈云敏,等.杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J].岩土工程学报,2004,26(6):755~760.
Jia Ning, Chen Rempeng, Chen Yunmin, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hangyong expressway. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(6):755~760.
- [5] 唐朝生,刘义怀,施斌,等.新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J].中国公路学报,2007,20(2):13~17.
Tang Chaosheng, Liu Yihuai, Shi Bin, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(2):13~17.
- [6] 邓永锋,刘松玉,洪振舜.高速公路工程中水泥搅拌桩桩身合理设计强度研究[J].工程地质学报,2006,14(4):537~541.
Deng Yongfeng, Liu Songyu, Hong Zhenshun. Finite element analysis for optimal design of deep mixed column foundation in highway embankments. Journal of Engineering Geology, 2006,14(4):537~541.
- [7] 梁清雨,阎长虹,夏文俊,等.某公路路基填土工程地质性质研究[J].工程地质学报,2008,16(2):228~232.
Liang Qingyu, Yan Changhong, Xia Wenjun, et al. Engineering properties of a special soft soil encountered during highway construction in Xuyi city, Jiangsu province. Journal of Engineering Geology, 2008,16(2):228~232.
- [8] 刘观仕.高速公路软土路基拓宽变形性状与时间效应分析[D].北京:中国科学院研究生院,2009.
Liu Guanshi. Deformation Behavior and Its Time Effect of Embankment Widening of Expressway on Soft Foundation. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [9] 天津市市政工程设计研究院.津滨高速公路改扩建工程岩土工程勘察报告[R].天津:2009.
Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute. Geotechnical Report of Jinbin Expressway Extension Project. Tianjin: 2009.
- [10] 徐文杰,胡瑞林,岳中琦,等.虎跳峡龙蟠右岸边坡稳定性的数值模拟[J].岩土工程学报,2006,28(11):1996~2004.
Xu Wenjie, Hu Ruilin, Yue Zhongqi, et al. Numerical simulation on stability of right bank slope of Longpan in Tiger-Leaping gorge area. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(11):1996~2004.