

文章编号:1671-1637(2012)01-0013-06

高速公路拓宽方式对路基沉降的影响

范红英^{1,2}, 折学森¹, 边汉亮¹, 丁 锐³, 赵刘会⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省公路勘察设计院, 陕西 西安 710068;

3. 福建省交通科学技术研究所, 福建 福州 350004; 4. 西北有色地质勘查局, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为了研究高速公路拓宽方式对路基沉降的影响, 结合西潼高速公路改扩建工程, 针对单侧拓宽和双侧对称拓宽方式建立了路基沉降数值模型, 利用有限元方法分析了路基顶面沉降、差异沉降与坡脚水平位移的变化规律, 并选定试验段进行双侧对称拓宽方式下的数值模拟分析和分层总和法计算, 同时进行了路基沉降观测。分析结果表明: 拓宽相同宽度时, 双侧拓宽的旧路基中心沉降减小幅度较单侧拓宽增加 15.2%; 两侧各拓宽 2 车道时, 路基差异沉降是单侧拓宽 4 车道时的 24.3%; 随着拓宽宽度的增加, 旧路基中心沉降增量逐渐减小, 最大沉降位置在距新建路基边缘内侧 3~5 m 处。数值模拟、分层总和法计算及现场观测最大沉降分别为 18.40、18.74、16.06 mm, 表明数值模拟方法可靠, 模拟结果与观测结果基本相符。

关键词: 高速公路; 拓宽方式; 拓宽宽度; 路基沉降; 数值分析

中图分类号: U416.11

文献标志码: A

Influence of widening modes on subgrade settlement of expressway

FAN Hong-ying^{1,2}, SHE Xue-sen¹, BIAN Han-liang¹, DING Kun³, ZHAO Liu-hui⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Provincial Highway Survey and Design Institute, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

3. Fujian Research Institute of Communications Science and Technology, Fuzhou 350004, Fujian, China;

4. North-West Mining Geology Group Co., Ltd. for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to research the influence of widening modes on subgrade settlement for expressway, the numerical models of subgrade settlement on the unilateral and bilateral symmetry widening modes of Xitong Expressway were set up, the change rules of top surface settlement, differential settlement and horizontal displacement of slope toe for subgrade were analyzed by using the finite element method, and the comparison result of numerical simulation values, layer-wise summation method's computation values and observation values for subgrade settlement in bilateral symmetry widening mode was analyzed. Analysis result indicates that when the widening widths are same, the decrease amplitude of settlement for old subgrade center in bilateral widening mode is 15.2% larger than the value in unilateral widening mode. The difference of subgrade settlement in widening 2 lanes on both sides is 24.3% of the value in broadening 4 lanes on one side. With the increase of widening width, the center settlement increment of old subgrade decreases gradually, and the displacement of the maximum settlement to the inside of new subgrade edge is 3-5 m. The maximum settlements from numerical

收稿日期: 2011-10-20

基金项目: 交通运输部行业联合科技攻关项目(2008-353-361-420); 陕西省交通科技项目(07-18K)

作者简介: 范红英(1975-), 女, 陕西西安人, 陕西省公路勘察设计院高级工程师, 长安大学工学博士研究生, 从事路基工程研究。

导师简介: 折学森(1956-), 男, 陕西绥德人, 长安大学教授。

simulation, layer-wise summation method and field observation are 18.40、18.74 and 16.06 mm respectively, which indicates that the numerical simulation method is reliable, and the simulation conclusion and the observation result are consistent. 3 tabs, 17 figs, 12 refs.

Key words: expressway; widening mode; widening width; subgrade settlement; numerical analysis

Author resumes: FAN Hong-ying(1975-), female, senior engineer, doctoral student, +86-29-82334817, fanhyz@163.com; SHE Xue-sen(1956-), male, professor, +86-29-82334817, shexuesen@sina.com.

0 引 言

中国高速公路改扩建工程刚刚起步,从设计到施工尚处于探索阶段,新老路基的不均匀沉降成为困扰其发展的技术瓶颈。扩建方式是改扩建工程中的关键技术之一,但拓宽方式对路基差异沉降的影响仍有待深入探索。目前,国内高速公路的改扩建基本采取新老路基直接拼接的方式,且以单侧拓宽和双侧对称拓宽方式为主(图 1)。章定文等对高速公路拓宽中软土路基拼接段的影响因素、沉降规律、变形特性与处理技术进行了相应的分析^[1-6];王东耀等研究了高速公路软基的沉降特性,并构造了高速公路工后沉降预测模型^[7];傅珍等利用离心模型试验研究了新旧路基拼接时加筋材料及土性改良对路基沉降的影响^[8-9];丁锐等对新老路基差异沉降的影响因素与施工技术进行了研究^[10-12]。以上学者对高速公路的沉降规律与影响因素进行了分析,并对沉降进行了有效预测,但未分析拓宽方式对沉降的影响,故本文针对这两种拓宽方式,以西潼高速公路改扩建工程为依托,借鉴以上沉降分析成果,采用有限元软件 MARC 对高速公路不同拓宽方式的拓宽路基进行模拟分析,研究了路基顶面沉降、差异沉降及坡脚水平位移的变化规律,同时采用分层总和法进行沉降计算,并与现场观测沉降进行对比验证。

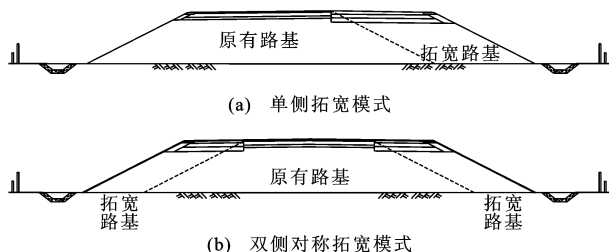


图 1 路基拓宽模式

Fig. 1 Widening modes of subgrade

1 有限元模型的建立

1.1 模型的假定条件

(1)视路基为轴向无限长构筑物,进行力学计算

时近似按照平面应变问题处理。

(2)路堤填土和地基土的本构关系采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型计算。

(3)旧路基和拓宽路基的界面在沉降变形过程中不发生相对滑移与脱离。

(4)对于老路堤下已经采用排水固结法处理过地基的区域,认为在路堤重力荷载作用下已完成固结。

(5)将路面荷载等效为 1.0 m 厚的路基填土荷载,将车辆荷载等效为 10 kPa 静载。

1.2 模型的几何条件

取西潼高速公路 K113+045~545 试验段路堤为研究对象,路堤高度为 4 m,顶面宽度为 26 m,边坡坡比为 1:1.5,地基计算深度为 20 m。

根据结构的对称性,双侧对称拓宽时取半幅路堤作为研究对象,宽度为 13 m;单侧拓宽时路堤顶面宽度为 26 m。单侧拓宽和双侧对称拓宽有限元计算模型分别见图 2、3。

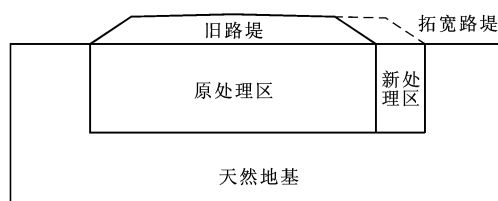


图 2 单侧拓宽有限元模型

Fig. 2 Finite element model of unilateral widening mode

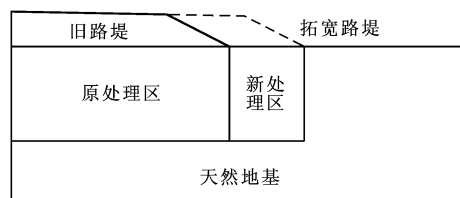


图 3 双侧拓宽有限元模型

Fig. 3 Finite element model of bilateral widening mode

1.3 网格划分和边界条件

为了研究路基顶面的变形特性及拓宽后路堤荷载对旧路基的影响,采用八节点四边形单元对几何模型进行有限元网格划分,采用了比较密集的网格

对路基及以下地基部分进行处理,分别见图 4、5。

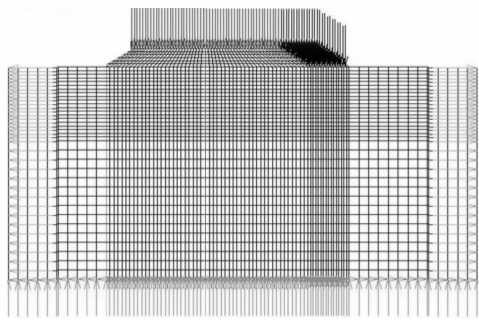


图 4 单侧拓宽网格划分
Fig. 4 Mesh generation of unilateral widening mode

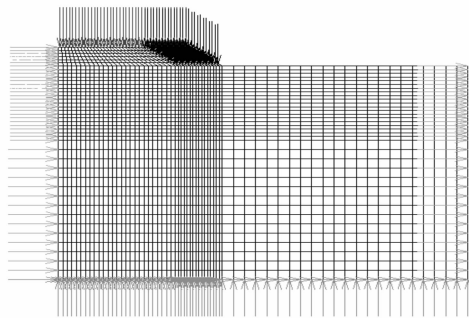


图 5 双侧拓宽网格划分
Fig. 5 Mesh generation of bilateral widening mode

在分析时,力的边界条件为:旧路基在自重应力条件下,其土体固结已基本完成,计算时只需考虑新加的附加应力引起的变形,而拓宽路基的变形则由自重应力和附加应力共同引起;位移边界条件为:沿路基轴向边界的水平方向位移与底部边界的水平和竖向位移均被约束。

1.4 土体材料的物理力学参数

路线位于关中平原东部的渭河亚区,布设于渭河南岸,沿线地貌以河流阶地为主,路基地下水主要类型为潜水,埋深一般为 10~30 m。路基地质情况良好,以亚黏土为主,土质较均匀,个别地段地层有弱湿陷性。根据现场勘测数据及室内外试验,计算区域内各土层的物理力学参数见表 1。

2 拓宽方式对路基沉降的影响

为了分析高速公路不同拓宽方式对路基沉降的影响,充分考虑工程实际情况,针对单侧拓宽和双侧对称拓宽建立数值分析模型,分别对单侧拓宽 2 个车道与 4 个车道和双侧对称各拓宽 1 个车道与 2 个车道进行研究。设定拓宽路堤分为 2 次填筑到顶面高度,每次填筑 2 m。通过对各工况的分析对比,提出合理的路基拓宽方式,用于指导工程施工。

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil

类别	重度/(kN·m ⁻³)	饱和重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
旧路堤	19.0	19.9	36.2	0.35	30.1	28.2
新路堤	18.5	19.3	20.1	0.35	19.9	22.3
旧地基	18.5	19.5	15.0	0.35	19.9	30.5
新地基	18.5	20.1	6.0	0.35	19.9	30.4

2.1 单侧拓宽

根据现阶段主要采用的路基拓宽方式,分别模拟路基单侧拓宽 2 个车道(8 m)和 4 个车道(16 m)时其对路基沉降的影响,数值模拟结果见图 6~10。

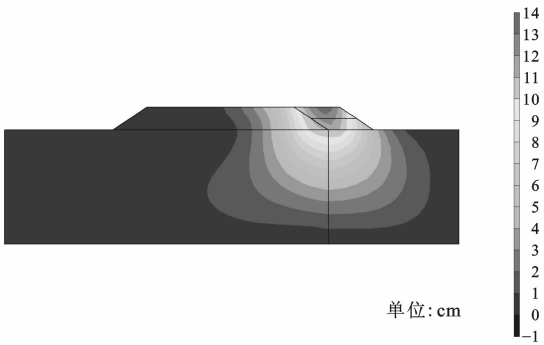


图 6 单侧拓宽 2 个车道的路基沉降
Fig. 6 Subgrade settlement in unilateral widening two lanes

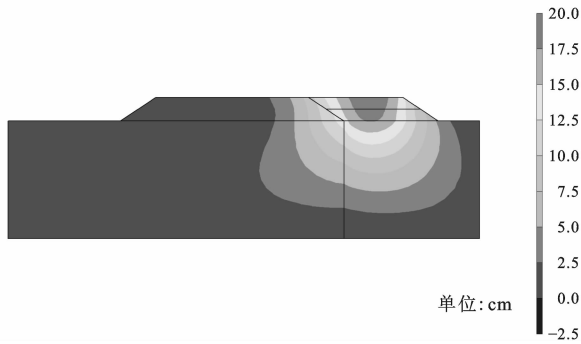


图 7 单侧拓宽 4 个车道的路基沉降
Fig. 7 Subgrade settlement in unilateral widening four lanes

由图 6~8 可见:对于单侧拓宽路基,随着路基拓宽宽度的增加,路基最大沉降位置逐渐外移,由旧路基路肩移动至新路基路肩处,且远离旧路基中心;随拓宽宽度的增加,旧路基中心沉降增量逐渐减小,

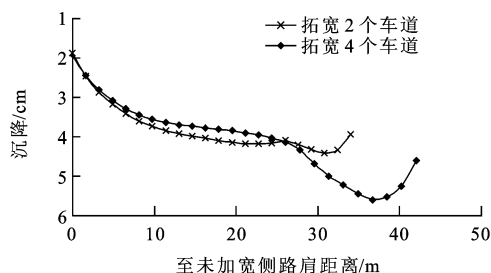


图 8 单侧拓宽时路基顶面沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves of subgrade tops in unilateral widening mode

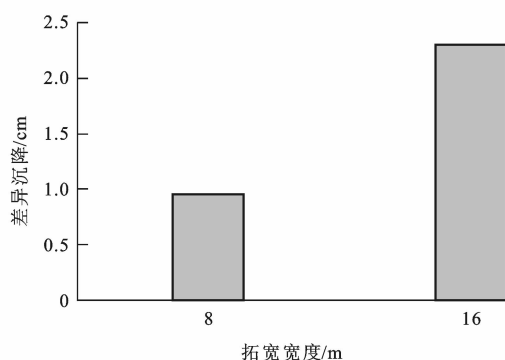


图 9 单侧拓宽时的差异沉降

Fig. 9 Differential settlements in unilateral widening mode

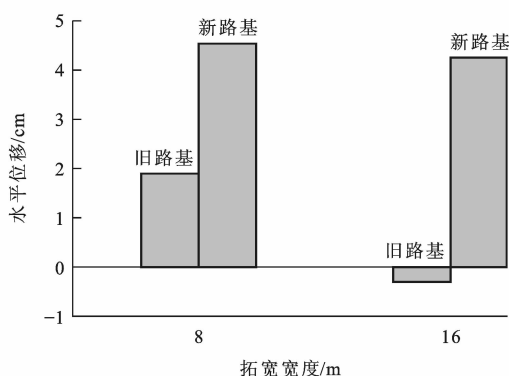


图 10 单侧拓宽时的新旧路基坡脚水平位移

Fig. 10 Horizontal displacements of slope toes for new and old subgrades in unilateral widening mode

拓宽 2 个车道与 4 个车道时旧路基中心的沉降分别为 3.42、3.29 cm;新路基的沉降明显大于旧路基的沉降,最大沉降发生在新路基边缘内侧 3~5 m 处。

结合图 9 可以得出:随着路基拓宽宽度的增加,差异沉降呈现出先减小后增大的趋势;当拓宽 2 个车道(8 m)时,差异沉降为 0.95 cm,当拓宽 4 个车道(16 m)时,差异沉降为 2.30 cm。可见,单侧拓宽 2 个车道(8 m)时路基差异沉降较小。

结合图 10 可以得出:随路基拓宽宽度的增加,新路基水平位移呈现出向外先增大后减小的趋势,旧路基部分水平位移向内;路基拓宽宽度由 8 m 增

加到 16 m 时,旧路基坡脚水平位移从 1.90 cm 减小为 -0.02 cm,即发生向内移动;而新路基坡脚的水平位移由拓宽 8 m 时的 4.55 cm 逐渐减小到拓宽 16 m 时的 4.26 cm,向外移动趋势明显。

2.2 双侧对称拓宽

双侧对称拓宽计算参数与单侧拓宽相同,根据结构的对称性,双侧对称拓宽时取半幅路堤计算沉降。路基拓宽方式为双侧对称各拓宽 1 个车道(4 m)与 2 个车道(8 m),数值模拟结果见图 11~15。

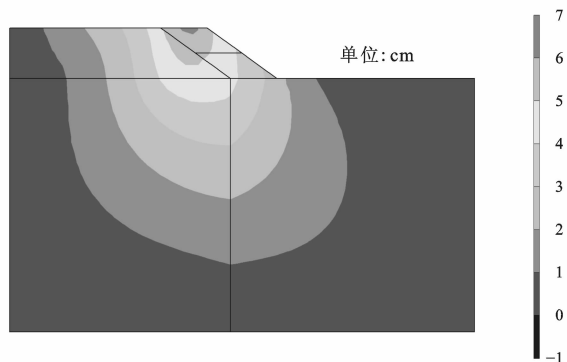


图 11 双侧拓宽 1 个车道的路基沉降

Fig. 11 Subgrade settlement in bilateral widening one lane

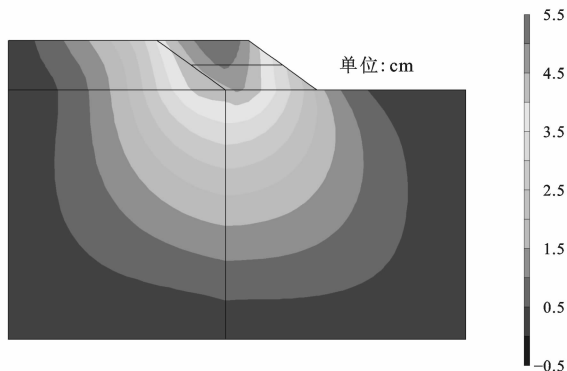


图 12 双侧拓宽 2 个车道的路基沉降

Fig. 12 Subgrade settlement in bilateral widening two lanes

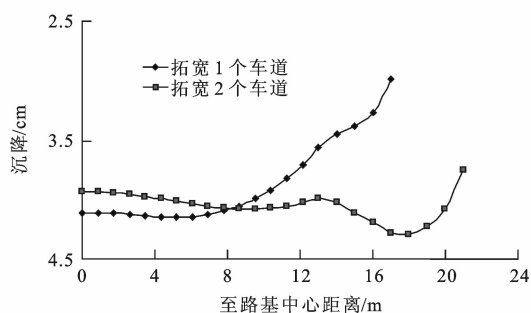


图 13 双侧拓宽时的路基顶面沉降曲线

Fig. 13 Settlement curves of subgrade tops in bilateral widening mode

由图 11~13 可得出:随着拓宽宽度的增加,旧路基中心沉降增量逐渐减小,拓宽相同宽度时,

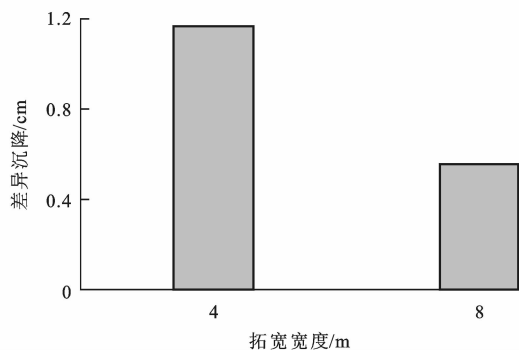


图 14 双侧拓宽时的差异沉降

Fig. 14 Differential settlements in bilateral widening mode

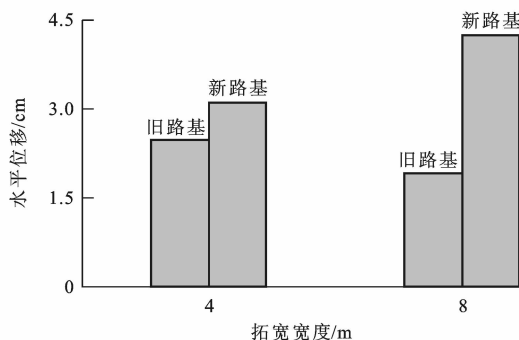


图 15 双侧拓宽时的新旧路基坡脚水平位移

Fig. 15 Horizontal displacements of slope toes for new and old subgrades in bilateral widening mode

双侧拓宽旧路基中心沉降减小幅度更大;双侧与单侧拓宽路基顶面沉降曲线基本相同,在各拓宽 1 个车道与 2 个车道时原路基中心沉降分别为 4.11、3.93 cm;拓宽后路基最大沉降位置与单侧拓宽规律基本相同,但最大沉降较小,且随拓宽宽度的增加减小速率加快。

结合图 14 可知:双侧拓宽路基时新旧路基的差异沉降也呈现先减小后增大的趋势,差异沉降较单侧拓宽数值小;在各拓宽 2 个车道时,差异沉降最小为 0.56 cm,为单侧拓宽 4 个车道差异沉降的 24.3%;各拓宽 1 个车道时的差异沉降为 1.17 cm;同单侧拓宽一样,双侧拓宽 2 个车道(8 m)时差异沉降较小。

结合图 15 可知:随路基拓宽宽度的增加,新旧路基水平位移变化规律与单侧拓宽时基本相同;路基拓宽宽度由 4 m 增加到 8 m 时,旧路基坡脚水平位移由 2.47 cm 减小至 1.92 cm,即逐渐向内移动;而新路基坡脚的水平位移由拓宽 4 m 时的 3.11 cm 逐渐增大到拓宽 8 m 时的 4.24 cm,向外移动趋势明显。

对比单侧拓宽与双侧对称拓宽,在相同的拓宽宽度时,双侧对称拓宽更有利于旧路基的平衡受力,使

拓宽路堤的荷载分配到旧路基两侧,减小新旧路基的沉降差异,同时对后期路面结构受力也极为有利。

3 沉降对比分析

本文选取西潼高速公路 K113+045~545 试验段路堤,采用双侧对称拓宽的方式,运用 MARC 有限元软件计算地基表面中心点处的沉降,将计算沉降与按分层总和法求取的沉降进行对比,并对路段施工完成后的稳定性进行观测。

3.1 有限元计算结果

有限元计算模型见图 3,地基沉降模拟结果见图 16,地基表面沉降曲线见图 17,可得中心点处的沉降为 18.40 mm。

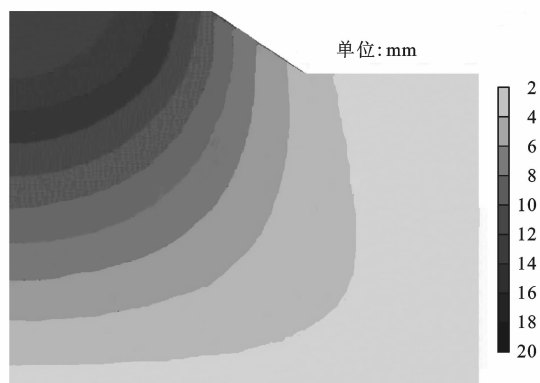


图 16 地基沉降模拟结果

Fig. 16 Simulation result of foundation settlement

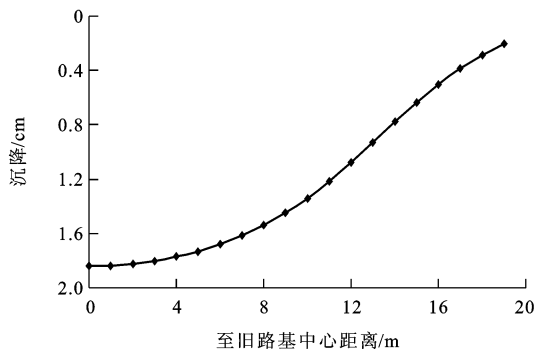


图 17 地基表面的沉降曲线

Fig. 17 Settlement curve of foundation surface

3.2 分层总和法计算结果

本文根据《公路路基设计手册》取附加应力与自重应力之比为 0.1~0.2,取有效压缩层厚度为 20 m,采用分层总和法计算路基地底部中点沉降见表 2,其中分层点 0~5 相邻两点之间的层号分别为①~⑤。由表 2 可知,采用分层总和法计算地基中心点的沉降为 18.74 mm,与有限元计算结果(18.40 mm)接近。

表 2 分层总和法沉降计算结果

Tab. 2 Computation result of settlement with layer-wise summation method

分层点	深度/m	自重应力/kPa	附加应力/kPa	层号	层厚/m	自重应力 平均值/kPa	附加应力 平均值/kPa	总应力 平均值/kPa	孔隙比		分层沉降/ mm
									受压前	受压后	
0	0.0	0.0	104.5								
1	3.0	55.0	97.7	①	3.0	27.5	101.1	128.6	0.730	0.727	5.20
2	11.0	121.0	78.7	②	8.0	88.1	88.2	176.2	0.711	0.709	4.68
3	15.0	189.1	69.7	③	4.0	155.1	74.2	229.3	0.740	0.738	2.30
4	18.0	240.0	55.6	④	3.0	214.6	62.6	277.2	0.668	0.655	5.40
5	20.0	271.3	44.9	⑤	2.0	255.6	50.2	305.8	0.745	0.743	1.16

3.3 现场试验段观测结果

该试验段于 2010 年 5 月路基拓宽施工完成,并开始进行地基沉降观测,间隔 100 m 设 1 个观测点,共观测 4 次,观测结果见表 3。

由表 3 可以看出:从路基拓宽施工完成至 2011 年 4 月开始路面施工前,观测到的地基顶

面最大沉降为 16.06 mm,采用数值模拟分析与分层总和法计算得最大沉降分别为 18.40 mm 和 18.74 mm,表明该模拟方法可靠,模拟结果与实际观测结果基本相符。该路段于 2011 年全线通车,目前路基路面稳定,未发现明显沉降。

表 3 路基拓宽后沉降观测数据

Tab. 3 Observation settlements after subgrade widening

mm

观测时间	观测标段				
	K113+045~145	K113+145~245	K113+245~345	K113+345~445	K113+445~545
2010-07-20	6.12	8.26	9.42	7.43	7.24
2010-10-24	9.02	11.13	11.26	10.36	10.13
2011-01-19	12.05	14.24	15.37	14.16	13.24
2011-03-26	13.01	15.03	16.06	15.18	14.82

4 结 语

(1)无论是单侧拓宽还是双侧对称拓宽,随着路基拓宽宽度的增加,旧路基中心沉降增量逐渐减小,最大沉降发生在距新路基边缘内侧 3~5 m 处。

(2)随着路基拓宽宽度的增加,差异沉降呈现先减小后增大的趋势,两侧对称拓宽对新旧路基差异沉降的影响较单侧拓宽小。

(3)旧路基坡脚水平位移随拓宽宽度增加逐渐向内移动,新路基坡脚水平位移呈现向外先增大后减小的趋势,但双侧拓宽时水平位移较单侧拓宽小。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 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 Ding-wen, LIU Song-yu. 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. (in Chinese)
- [2] 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 Song-yu, SHI Ming-lei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(2): 29-33. (in Chinese)

- [3] 钱 劲松. 新老路基不协调变形及控制技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.

QIAN Jin-song. Study on the uncoordinated deformation and control technology of old and new subgrade[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)

- [4] 贾 宁. 软土地基高速公路拓宽的沉降性状及处理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

JIA Ning. Research on settlement behavior of highway widening on soft soils and improvement methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)

- [5] 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 Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hangyong Expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 755-760. (in Chinese)

- [6] 孙 伟,龚晓南,孙 东. 高速公路拓宽工程变形性状分析[J].

(下转第 37 页)

- 1611-1626.
- [6] RUGE P, WIDARDA D R, SCHMALZLIN G, et al. Longitudinal track-bridge interaction due to sudden change of coupling interface [J]. Computers and Structures, 2009, 87(1/2): 47-58.
- [7] BATTINI J M, MAHIR U K. A simple finite element to consider the non-linear influence of the ballast on vibrations of railway bridges[J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2597-2602.
- [8] 阴存欣. 铁路桥梁纵向附加力的静动力非线性分析与仿真研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2000.
- YIN Cun-xin. Study on nonlinear static and dynamic analysis and emulation of additional longitudinal forces in railway bridges[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2000. (in Chinese)
- [9] FREIRE A M S, NEGRAO J H O, LOPES A V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges[J]. Computers and Structures, 2006, 84(31/32): 2128-2140.
- [10] DANIELL W E, MACDONALD J H G. Improved finite element modelling of a cable-stayed bridge through systematic manual tuning[J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 358-371.
- [11] Germany DS899/59, special procedures on railway Shinkansen bridge[S].
- [12] LIM N H, PARK N H, KANG Y J. Stability of continuous welded rail track [J]. Computers and Structures, 2003, 81(22/23): 2219-2236.
- [13] 闫斌,戴公连. 高速铁路斜拉桥梁轨相互作用[R]. 长沙: 中南大学, 2011.
- YAN Bin, DAI Gong-lian. Beam-track interaction on high-speed railway cable-stayed bridge [R]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [14] RUGE P, BIRK C. Longitudinal forces in continuously welded rails on bridgedecks due to nonlinear track-bridge interaction[J]. Computers and Structures, 2007, 85(7/8): 458-475.
- [15] TB 10002. 1—2005, 铁路桥涵设计基本规范[S].
- TB 10002. 1—2005, fundamental code for design on railway bridge and culvert[S].
- ~~~~~
- (上接第18页)
- 中南公路工程, 2004, 29(4): 53-55.
- SUN Wei, GONG Xiao-nan, SUN Dong. Analysis of deformation in widening project of freeway[J]. Central South Highway Engineering, 2004, 29(4): 53-55. (in Chinese)
- [7] 王东耀, 折学森, 叶万军, 等. 高速公路软基最终沉降预测的范例推理方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 20-23, 42.
- WANG Dong-yao, SHE Xue-sen, YE Wan-jun, et al. Case-based reasoning approach to settlement of expressway on soft foundation [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 20-23, 42. (in Chinese)
- [8] 傅珍, 王选仓, 李宏志, 等. 高速公路拓宽路基差异沉降[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 25-31.
- FU Zhen, WANG Xuan-cang, LI Hong-zhi, et al. Differential settlement of widening subgrade for expressway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 25-31. (in Chinese)
- [9] 孟庆山, 孔令伟, 郭爱国, 等. 高速公路高填方路堤拼接离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 580-586.
- MENG Qing-shan, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Centrifugal modeling test study on high-embankment widening of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 580-586. (in Chinese)
- [10] 丁铨. 潼宝高速公路改扩建新老路基差异沉降数值模拟分析[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- DING Kun. Numerical simulation and analysis of differential settlement in Tongbao Expressway widening project [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [11] 赵刘会. 高速公路改扩建新老路基差异变形影响因素及拓宽路基施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- ZHAO Liu-hui. Research on the contrast deformation between new and existing embankment and construst technique in subgrade of the highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [12] MIKI H, NOZU M. Design and numerical analysis of road embankment with low improvement ratio deep mixing method[C]// ASCE. Proceedings of GeoTrans 2004: Geotechnical Engineering for Transportation Projects (GSP 126). Reston: ASCE, 2004: 1395-1402.