

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.014

引用格式: 刘立晶. 土工格栅处置老路抬高路基加宽工程的数值分析[J]. 公路与汽运, 2025, 41(1): 67-70+136.

Citation: LIU Lijing. Numerical analysis of raising and widening roadbed project of old road treated with geogrid[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(1): 67-70+136.

土工格栅处置老路抬高路基加宽工程的数值分析

刘立晶

(深圳市新城市规划建筑设计股份有限公司, 广东 深圳 650224)

摘要: 采用有限差分软件对老路抬高路基加宽工程的路基变形、水平应力集中及格栅处置进行数值分析。结果表明,新老路基的差异沉降是老路上部共同作用层出现水平拉应力集中的根本原因,采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置是控制路基顶面变形和水平拉应力集中的有效措施;在地基模量变化时格栅处置对最大沉降点沉降的控制效果优于老路中心,在抬高高度变化时格栅处置对老路中心沉降的控制效果优于最大沉降点;水平拉应力对差异沉降较敏感,在软土地基和老路抬高高度较小时,有必要采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置。

关键词: 公路;路基加宽;路基变形;水平应力;土工格栅;共同作用层

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)01-0067-04

随着中国经济的快速发展,现有运营中的四车道高速公路出现饱和现象,须进行拓宽改造。路基加宽不同于新建公路,老路的变形与应力状态已基本稳定,在老路外侧和上侧进行路基加宽,新老路的应力分布及变化都会受路基协调变形的影响而发生改变,不同的路基加宽工程,其变形和应力分布存在较大差异。章定文等对加宽路基的变形特性和不同处置措施下路基变形及处置效果进行了数值分析^[1];史芳等对土工格栅二灰土加宽路基进行了力学分析^[2];杨涛等对老路基抬高加宽方式下路基变形特性进行了数值模拟分析^[3];沈国印对路基加宽工程中台阶开挖方案进行了分析^[4];唐朝生等利用有限差分软件 FLAC^{3D}对加宽路基的受力和差异沉降进行了数值模拟^[5];李芬等采用 ABAQUS 软件分析了路基加宽工程中土工格栅不同材料参数、不同铺设位置和宽度及嵌入老路堤深度对加宽性状的影响^[6];张军辉等运用 ABAQUS 对高速公路路基拓宽施工中的差异沉降进行了数值分析^[7];文献[8-12]对路堤下加宽路基的变形特性及处置措施进行了研究。相比一般路堤下路基加宽,老路抬高路基加宽工程在老路上部存在共同作用层,其受力机制和土工格栅处置结果不同于一般路堤下路基加宽。因此,对土工格栅处置老路抬高路基加宽工程进行数值分析具有一定应用价值。

广东省广清(广州—清远)高速公路局部采用老

路抬高的路基加宽模式,云南省曲陆(曲靖—陆良)高速公路全段 86 km 全部采用老路抬高的路基加宽模式。在老路抬高的加宽工程中,老路两侧与上侧均有共同作用层作用,在协同变形的条件下,老路和共同作用层的变形和受力更复杂。本文以云南省曲陆高速公路改扩建项目为例,利用 FLAC^{3D} 研究老路抬高加宽工程的应力和变形,并分析土工格栅处置效果,为老路抬高路基加宽工程施工提供参考。

1 计算内容

1.1 计算断面

曲陆高速公路改扩建项目中,老路基高 4 m、宽 26 m,老路抬高加宽后路基高 5 m、宽 42 m,新老路基坡比均为 1:1.5,台阶高×宽为 1.0 m×1.5 m。根据土工格栅处置机制,在共同作用层和台阶处将土工格栅水平布置于水平向拉应力集中区域。图 1 为计算断面。

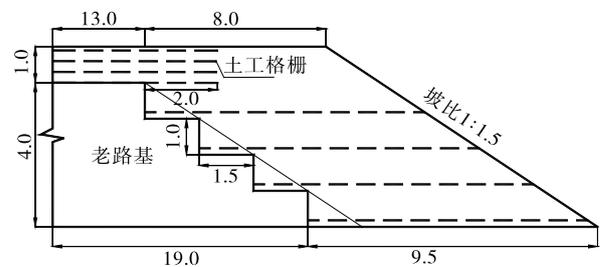


图 1 计算断面(单位:m)

1.2 荷载取值及计算参数

将车辆荷载简化为 10 kPa 的均布荷载, 79 cm 的面层荷载等效为 18.5 kPa 的均布荷载^[13], 即路基顶面共计 28.5 kPa 的均布荷载。路基和地基的计

表 1 路基和地基的计算参数

竖向分层	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
旧路基	4	50	0.35	19.5	25	28
新路基	5	40	0.35	18.5	25	28
地基	20	8	0.35	17.0	16	25
土工格栅	—	2 600	0.33	—	—	15

注: 土工格栅的等效厚度为 5 mm, 切向刚度为 2.3×10^7 N/m³ (双向塑料土工格栅)。

作用时, 基于虚功原理得到节点的不平衡力, 然后将不平衡力在节点间不断迭代, 直至不平衡力很小时完成计算^[14]。地基、路基采用 Brick 六面体单元模拟, 土工格栅构件采用 CST 壳有限单元模拟^[15]。

计算的基本条件: 1) 老路沉降已基本完成, 不考虑水土的流固耦合; 2) 路基为连续介质变形体系, 层与层之间不存在脱空现象; 3) 路基断面与沉降变形以老路中心为对称轴, 取半幅路基为研究对象; 4) 路基、地基为均质的各向同性材料, 采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型; 5) 地基深度取 20 m, 水平向计算长度取 50 m; 6) 模型两侧水平向约束, 底面三向约束, 竖向变形自由; 7) 计算过程分为地基的初始应力平衡、老路的初始应力平衡、台阶开挖、加宽路基加载 4 个阶段; 8) 网格划分后共计 2 209 个六面体单元、4 620 个节点(见图 2)。

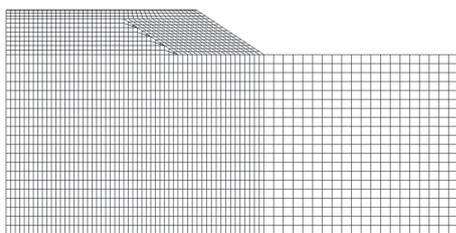


图 2 路基模型网格划分

3 计算结果及分析

3.1 路基的变形与水平应力集中

在老路抬高加宽工程中, 由于新老路基固结程度的差异, 加宽路基的加载首先对地基产生较大压缩变形, 加宽路基底面与地基接触部位出现差异沉降, 导致在加宽路基下部出现水平拉应力; 老路上部共同作用层作为新加路基, 受路基变形方式的影响

算参数见表 1。

2 计算方法

采用 FLAC^{3D} 进行计算, 当节点受到外力荷载

出现水平拉应力集中[见图 3(a)], 水平应力呈盆形分布, 极值出现在老路中心顶面。

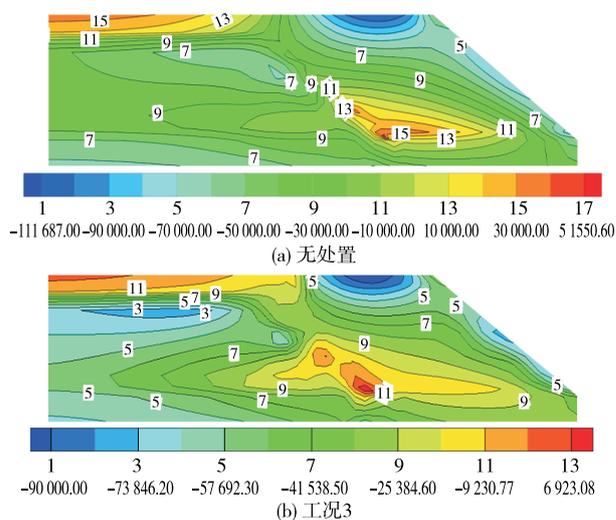


图 3 路基水平应力云图(单位: Pa)

为控制老路上部共同作用层的水平拉应力, 对该作用层进行 30 cm 一层的土工格栅处置^[16]。根据水平拉应力分布情况, 从路基顶面往下依次设置土工格栅。土工格栅设置工况如下: 工况 1 为设置在新老路基结合部台阶, 共设置 3 层土工格栅; 工况 2 为设置在老路上部共同作用层内, 共设置 4 层土工格栅; 工况 3 为工况 1+工况 2。如图 3(b) 所示, 格栅处置能有效控制路基内水平拉应力集中。不同工况下路基变形见图 4。

由图 4 可知: 1) 工况 1 下路基变形控制效果最差; 工况 2 下老路上部共同作用层顶面沉降增大, 老路右侧加宽路基顶面沉降减小, 路基顶面差异沉降由无处置时的 4.00 cm 减小至 3.53 cm, 减小 11.75%, 格栅处置效果明显; 工况 3 在工况 2 的基础上增加结合部台阶处的格栅处置, 新老路基的整

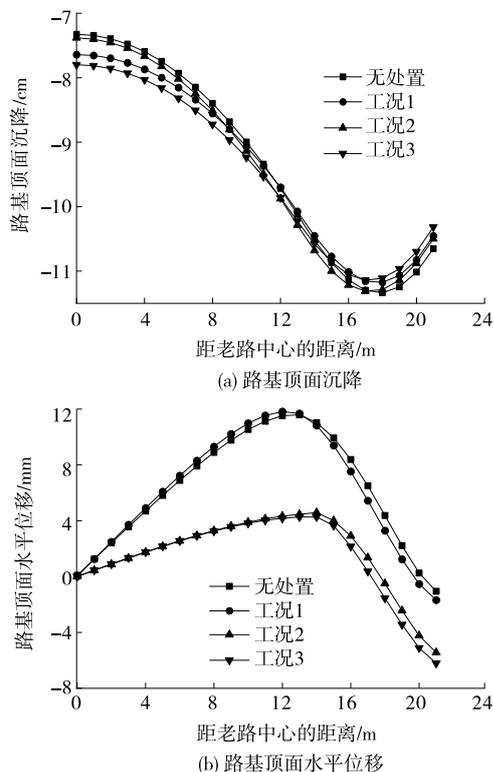


图 4 不同工况下路基顶面变形

体性进一步增强,与工况 2 相比,工况 3 下老路上部共同作用层顶面沉降进一步增大,老路右侧加宽路

基顶面沉降进一步减小,工况 3 对路基顶面的控制效果最好,差异沉降减小至 3.34 cm,比工况 2 时减小 5.38%,比无处置时减小 16.50%。2) 加宽路基顶面存在水平位移分界点,位于老路外侧加宽路基顶面,老路中心至水平位移分界点的水平位移指向新路肩,水平位移分界点至新路肩的水平位移指向老路中心。对老路上部共同作用层的格栅处置对路基顶面水平位移的控制效果明显;结合部格栅处置能小范围减小老路右侧加宽路基顶面的水平位移,效果不明显。

3.2 地基模量的影响

表 2 为地基模量为 16 MPa、8 MPa、4 MPa 时路基变形计算结果。由表 2 可知:随着地基模量的减小,路基差异沉降和水平拉应力增大,且水平拉应力的增长率大于差异沉降的增长率。在地基模量较小的软土地基中,须采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置;地基模量为 8 MPa 时,由于路基顶面水平拉应力较大,相比沉降控制,格栅处置能明显控制水平拉应力,格栅处置效果更倾向于水平应力控制;地基模量为 16 MPa 时,由于路基顶面差异沉降和水平拉应力较小,可不进行格栅处置,即地基模量较高时可不进行格栅处置。

表 2 不同地基模量下加宽路基变形计算结果

地基模量/MPa	老路中心沉降			最大沉降			差异沉降			水平拉应力		
	无处 置/cm	格栅处 置/cm	处置后变 化率/%	无处 置/cm	格栅处 置/cm	处置后变 化率/%	无处 置/cm	格栅处 置/cm	处置后变 化率/%	无处 置/kPa	格栅处 置/kPa	处置后变 化率/%
4	14.8	15.6	5.4	21.1	21.0	-0.47	6.3	5.4	-14.29	76.4	12.8	-83.25
8	7.3	7.6	4.1	11.3	11.2	-0.88	4.0	3.6	-10.00	41.3	3.6	-91.28
16	3.7	3.8	2.7	6.2	6.1	-1.61	2.5	2.3	-8.00	15.6	2.2	-85.90

注:格栅处置是指采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置。下同。

3.3 老路抬高高度的影响

表 3 为老路抬高高度为 1 m、2 m、3 m 时路基变形计算结果。由表 3 可知:土工格栅处置前,随着老路抬高高度的增大,共同作用层的荷载增大,老路的沉降变形增大量大于最大沉降的增大量,共同作用层厚度增加对差异沉降控制有利,对整体沉降控制不利。相比老路抬高 1 m,老路抬高 2 m 时差异沉降和水平拉应力分别减小 27.50%、15.25%;相比老路抬高 2 m,老路抬高 3 m 时差异沉降和水平拉应力分别减小 31.03%、7.71%。老路抬高高度增大对差异沉降的影响大于对路基顶面水平拉应力的影响。对比格栅处置前后路基变形,格栅处置对共同

作用层水平应力的控制效果较好;随着老路抬高高度的增大,路基顶面差异沉降减小,格栅处置对沉降变形的控制效果先增大后减小,其原因是老路抬高高度增大,格栅层数增加,格栅处置在某一抬高高度下达到最佳效果,之后开始减小。

3.4 最大变形位置的变化

表 4 为路基共同作用层格栅处置前后路基顶面最大变形点的位置。由表 4 可知:

(1) 在老路抬高路基加宽工程中,地基模量越小,路基顶面最大沉降点的位置越靠近老路中心。老路抬高高度为 1 m 时,路基顶面最大沉降点位置基本不受土工格栅处置的影响;地基模量为 8 MPa

表 3 不同老路抬高高度下加宽路基变形计算结果

老路抬高 高度/m	老路中心沉降			最大沉降			差异沉降			水平拉应力		
	无处 置/cm	格栅处 置/cm	处置后变 化率/%	无处 置/cm	格栅处 置/cm	处置后变 化率/%	无处 置/cm	格栅处 置/cm	处置后变 化率/%	无处 置/kPa	格栅处 置/kPa	处置后变 化率/%
1	7.3	7.6	4.11	11.3	11.2	-0.88	4.0	3.6	-10.00	41.3	3.6	-91.28
2	10.9	11.3	3.67	13.8	13.7	-0.72	2.9	2.4	-17.24	35.0	2.5	-92.86
3	14.5	14.7	1.38	16.5	16.5	0.00	2.0	1.8	-10.00	32.3	2.5	-92.26

时,老路抬高高度越大,路基顶面最大沉降点位置越靠近老路中心,且格栅处置后路基顶面最大沉降点位置向老路中心靠近。

(2) 水平位移分界点随地基模量的增加往外移动,随老路抬高高度的增加往老路中心靠近,格栅处置使水平位移分界点往老路中心移动。

表 4 路基顶面最大沉降点与水平位移分界点的位置

工况	最大沉降位置距 老路中心的距离/m		水平位移分界点距 老路中心的距离/m		
	无处置	格栅处置	无处置	格栅处置	
	地基模量				
	4 MPa	17.2	17.0	19.7	16.9
	8 MPa	17.8	17.8	20.1	17.8
	16 MPa	18.0	18.0	21.0	18.6
老路抬高 高度	2 m	17.2	16.8	19.7	16.9
	3 m	16.1	15.9	18.6	16.3

注:以地基模量为自变量时,假定路基抬高高度为 1 m;以老路抬高高度为自变量时,假定地基模量为 8 MPa。

综上,路基顶面差异沉降是老路上部共同作用层受水平拉应力的根本原因,路基模量较小和老路抬高高度较小是老路抬高加宽工程的最不利工况,采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置是控制路基顶面变形和水平应力集中的有效方法。

4 结论

(1) 老路抬高的路基加宽工程中,新老路基的差异沉降使老路上部共同作用层出现盆状的水平拉应力集中。采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置,能增大老路部位的沉降,减小老路右侧加宽路基顶面沉降和路基顶面水平拉应力。

(2) 地基模量大小和老路抬高高度变化是老路抬高路基加宽工程的影响因素,在其影响下,采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置对新老路基的处置效果存在差异。

(3) 水平拉应力大小受路基顶面差异沉降的影响,很小的差异沉降增加会引起路基顶面较大的水平拉应力集中。在软土地基和老路抬高高度较小时,必须采用土工格栅对老路上部共同作用层进行处置。

参考文献:

- [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.
- [2] 史芳,薛晓辉,李秋全,等.土工格栅二灰土加宽路基的力学特性[J].公路交通科技,2014,31(9):24-29.
- [3] 杨涛,阮一舟,张文彦,等.老路基抬高的公路拓宽工程变形特性数值分析[J].公路交通科技,2013,30(7):35-39.
- [4] 沈国印.高速公路新老路基拼接的台阶开挖效果分析[J].公路,2012,57(7):49-53.
- [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.
- [6] 李芬,唐韬.高速公路加宽工程中土工材料力学性能研究[J].公路与汽运,2019(5):79-82.
- [7] 张军辉,吴厚铭,周平.拓宽路基差异沉降监测及数值分析[J].交通科学与工程,2020,36(1):14-19.
- [8] 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):1216-1222.
- [9] 王家全,周健,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(增刊1):2943-2952.
- [10] 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.
- [11] 凌建明,钱劲松,黄琴龙,等.路基拓宽工程处置技术及其效果[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(1):45-49.
- [12] 周游.公路改扩建中新老路基差异沉降控制技术研究[J].公路与汽运,2021(4):101-104.
- [13] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG/T D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

(下转第 136 页)

$$O_i = \left\{ \frac{H_i G_i}{[(H_i + G_i)/l]^l} \right\}^{1/l} \quad (3)$$

$$Z_i = \alpha H_i + \beta G_i \quad (4)$$

$$X_i = \sqrt{O_i Z_i} \quad (5)$$

式中： O_i 为评价单元*i*的耦合度，其值越大，系统耦合程度越好，反之越差； l 为子系统个数，取2； Z_i 为“旱改水”建设适宜性和供土适宜性协同效应的综合指数； α 、 β 为待定系数，取 $\alpha = \beta = 0.5$ （建设适宜性和供土适宜性同等重要）； X_i 为评价单元*i*的协调度。

根据“旱改水”建设适宜性指数与供土适宜性指数的耦合协调度大小，将基于“旱改水”复垦的新建高速公路取土模式的适宜性分为4种类型（见表3），确定适宜复合取土模式的地块。

表3 基于“旱改水”的新建高速公路取土模式的耦合协调类型判别标准

耦合协调类型	协调度	实施复合取土模式的难易程度
优良协调型	≥ 0.8	适宜实施地块
中度协调型	$\geq 0.70 \sim 0.80$	可以实施地块
勉强协调型	$\geq 0.60 \sim 0.70$	较难实施地块
濒临失调或失调	< 0.60	不能实施地块

4 结语

本文提出基于“旱改水”复垦的平原地区新建高速公路取土模式，并从“旱改水”建设适宜性和为新建高速公路提供路基填筑材料的供土适宜性两方面构建复合取土模式适宜性评价体系，通过量化各评价指标，提出判断复合取土模式实施适宜性的方法。采用复合取土模式，能实现对高速公路建设的土方供给，同时提高土地利用率和产出率，实现耕地总量动态平衡。该取土模式能为平原地区工程建设取土提供新的思路。

参考文献：

[1] 林学春,刘文杰,阙云.不良地质高填方路堤边坡稳定性分析与治理[J].公路工程,2023,48(3):132-137.

[2] 张贤祥.安徽省高速公路项目建设成本控制研究[D].合肥:安徽大学,2015.

[3] 胡铁山,周忻,王勇.平原区高速公路装配式桥梁方案设计探讨[J].中外公路,2019,39(6):141-144.

[4] 陈风琴,赵莹.山东平原区高速公路取土场问题初探[J].甘肃水利水电技术,2010,46(4):16-17+38.

[5] 李少康.建筑垃圾在公路路基中的应用研究[D].西安:长安大学,2014.

[6] 张春雷,管非凡,李磊,等.中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J].环境工程,2014,32(12):95-99.

[7] 丁勇.高速公路粉煤灰路基填筑施工技术研究[J].交通世界(中旬刊),2020(10):51-52.

[8] 陈刘忠.安徽省新建高速公路临时用地复垦模式与技术研究[D].合肥:安徽农业大学,2015.

[9] 阙国坤.苏北地区农业旱改水的历史研究(1953—1983)[D].南京:南京农业大学,2010.

[10] 刘金鹏,赵华甫,梁健健,等.高速公路建设与耕作层土壤剥离利用组合关系研究[J].公路,2020,65(2):259-264.

[11] 黄占斌,冯俊义,马浩冉,等.腐植酸在旱地农业土壤改良和水肥增效中的作用研究[J].干旱地区农业研究,2023,41(3):49-54.

[12] 左松,蔡朕.基于GIS的旱改水潜力研究:以重庆市彭水县为例[J].农村经济与科技,2018,29(23):13-15.

[13] 罗晓虹.丘陵山区“旱改水”适宜性及整治技术研究:以重庆市万州区为例[D].成都:西南大学,2021.

[14] 李颖慧,姜小三,王振华,等.基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究:以山东省博兴县为例[J].土壤通报,2021,52(5):1052-1062.

[15] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.

收稿日期:2023-11-14

(上接第 70 页)

[14] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[15] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996.

[16] 陈星光.高速公路扩建工程差异沉降控制技术研究[D].西安:长安大学,2006.

收稿日期:2024-01-12