

# 桩—土工格栅联合处置的道路拓宽数值模拟

常诚, 徐永福

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海市 200240)

**摘要:**利用 Abaqus 建立软土地基高速公路拓宽工程的有限元模型, 模拟从开始施工到竣工 15 年后的路基与地基工作状态。通过对比无加固、桩基加固、土工格栅加固以及联合加固等方法, 分析路基的工后沉降、土工格栅拉力和路基稳定安全系数等问题。计算结果表明: 桩和土工格栅共同作用优于两种处置方法的单独作用之和, 联合加固的方法可显著改变路基土的应力分布, 减小路基的不均匀沉降, 增加拓宽路基的整体性与稳定性, 所获得的土工格栅拉力与实际工程相符, 表明了模拟的合理性。

**关键词:**拓宽工程; 有限元; 桩—土工格栅; 位移; 稳定性

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

由于受高速公路修建时期设计水平的限制, 目前中国部分高速公路的设计交通量不能满足实际交通量的需要, 高速公路拥堵时有发生。高速公路改扩建工程可以有效提升高速公路通行能力, 从而缓解交通拥堵。一般情况下, 既有路基地基固结度一般比新路基地基的固结度高<sup>[1]</sup>, 同时新老路基在结构强度方面存在一定差异, 使得拓宽后的路基在路基路面拼接处受力十分复杂, 容易产生纵向裂缝与差异沉降。

长江漫滩相软土分布于苏南地区, 具有较高的结构性抗力与附加抗力<sup>[2]</sup>。由于新旧路基下方地基的固结度差异, 直接在软土地基上进行高速公路改扩建工程将会引发差异沉降大等严重问题。傅珍等<sup>[3]</sup>研究新旧地基不同固结度对新路基拓宽后的差异沉降的影响, 得出了老路基地基固结度高, 可以有效减小差异沉降的结论; 刘巍巍等<sup>[4]</sup>研究了土工格栅对路基差异沉降的影响, 得出了土工格栅的合理配置对于减小路基差异沉降具有一定的作用; 孙平<sup>[5]</sup>、章海明<sup>[6]</sup>研究了高速公路改扩建工程中使用桩基进行处理的工法, 提高新路基下方地基土性质, 得出复合地基可以有效改善工后差异沉降的结论; 徐光斌<sup>[7]</sup>研究搅拌桩对软土路基上高速公路的影响, 发现搅拌桩可以显著提高路基的稳定性, 减小变形。然而, 现有研究中考虑桩基—土工格栅联合处置下的地基应力和桩基对土工格栅拉力影响的研究较少。此外, 采用联合处置时土工格栅和桩基分别对路基稳定性贡献的研究尚有不足。基于

此, 该文以苏南某高速公路改扩建工程为研究对象, 建立拓宽路基沉降的有限元模型。基于比奥固结理论, 对新路基分层填筑过程以及工后固结等力学行为动态仿真, 并综合对比采用不同加固措施的路面工后沉降、地基水平位移、土工格栅拉力; 基于强度折减法, 分析路基潜在滑动面与路基安全系数。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 几何尺寸与网格划分

该高速公路拓宽前为双向四车道高速公路, 采用中心对称拓宽方式, 拓宽后为双向八车道。图 1 给出了处置软土地基高速公路路基双侧对称拓宽的有限元计算模型。在此次拓宽工程中, 采用 Abaqus 有限元软件对路基标准横断面进行建模, 为了简化计算, 做出如下假设:

(1) 假定路基无限长, 因此路基横断面按照平面应变问题考虑, 采用二维有限元进行分析。

(2) 在新路基施工之前, 地基固结已经完成, 拓宽后的沉降完全由新路基修建而产生。

(3) 新老路基结合良好, 不会发生滑移, 接触条件为完全连续。

(4) 基于等刚度原理, 将群桩等效为地下连续墙, 并假设土体渗透系数不会因为桩基的插入发生改变。

(5) 采用 Abaqus 内置的 Embedded Region 模拟

收稿日期: 2022-06-11(修改稿)

基金项目: 江苏省交通工程建设局科研项目(编号: 2020Y)

作者简介: 常诚, 男, 硕士, 工程师, E-mail: changcheng96@sjtu.edu.cn

土工格栅与路基土的相互作用,其中土工格栅采用 T2D2 单元进行模拟,土工格栅只能承受拉应力。

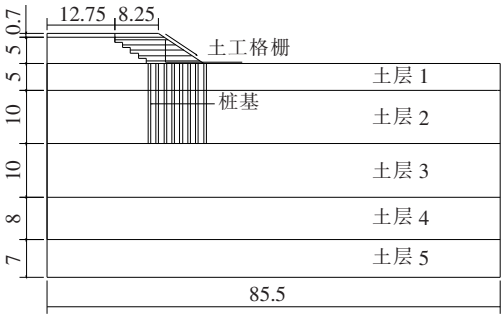


图 1 计算模型(单位:m)

由于拓宽路基施工采用左右对称施工方式,因此只取右侧部分进行分析。路面几何参数为:旧路路面保留部分为 12.75 m,新建路面部分为 8.25 m,扩建后路面宽度为 21 m,边坡高 5 m,坡比 1:1.5。路基高 5 m,分 5 次填筑,每次填筑 1 m,路基修建部分的仿真采用“生死单元”技术,将对应的单元依工序激活。待路基填筑完成后,修筑道路面层、基层,最后施加交通荷载,汽车荷载取值为 24 kN/m<sup>2</sup>。在新路基下方布置 8 排桩基。布置形式如图 1 所示,桩间距为 1.5 m,桩长 15 m,已经穿透表面淤泥质土层,并进入粉质黏土持力层中,桩径  $d=0.5$  m,在新路基每隔 1 m 布置一层土工格栅,以增强新建地基的整体性。模型中,地基的计算厚度由式(1)确定:

$$\sigma_z = (0.1 \sim 0.2) \sum \gamma_i H_i \quad (1)$$

进行试算,确定计算深度为 40 m。

对于无处置措施和仅有一种处置措施的工况,显然可以由上述情况退化得到,即不设置桩基与土工格栅,其他参数不变,各工况定义如表 1 所示。

表 1 工况示意

项目	桩基	无桩基
土工格栅	工况 1	工况 3
无土工格栅	工况 2	工况 4

## 1.2 桩基由三维空间向二维平面的简化

当采用二维平面应变模型代替三维模型进行道路拓宽处理仿真时,必须将三维空间中沿道路纵向间隔一定距离布置的桩基等效转化为二维平面内沿道路纵向分布的地下连续墙。根据文献[8],采用结构力学中的等效刚度原理,假定沿道路纵向分布的桩间土和桩基在垂直于道路方向上的变形始终相同,则转化后的总刚度与转化前的总刚度一致,如图 2 所示。

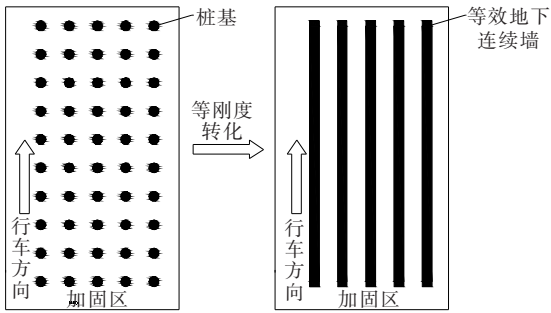


图 2 桩基等刚度转化示意图

在该文中,地基处理采用圆形实体桩,桩长 15 m,穿越两层土体。取沿道路纵向两相邻桩基的桩心范围为一个单元,见图 3。因此该单元内桩基面积可以表示为:

$$A_p = \pi d^2 / 4 \quad (2)$$

等效地下连续墙面积为:

$$A_c = n d^2 \quad (3)$$

加固区面积为:

$$A_s = A_c - A_p = (n - \pi/4) d^2 \quad (4)$$

依据等刚度的原理:

$$E_s A_s + E_p A_p = E_c A_c \quad (5)$$

将式(2)、(3)、(4)代入式(5)中,得到等效刚度为:

$$E_c = [\pi E_p + E_s (4n - \pi)] / (4n) \quad (6)$$

式中: $d$  为桩基直径; $nd$  为桩基的桩心距; $A_p$  为单元长度范围内桩基面积; $A_s$  为单元长度范围土体面积; $A_c$  为单元长度范围地下连续墙面积; $E_p$  为桩基的弹性模量; $E_s$  为土体的弹性模量; $E_c$  为等效地下连续墙的弹性模量。

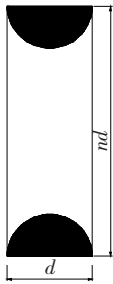


图 3 等刚度转化计算单元示意图

代入原始数据,得到土层 1 中等效后的地下连续墙弹性模量为 7.253 2 GPa,土层 2 中的等效地下连续墙弹性模量为 7.254 8 GPa,显然地下连续墙在两层土体中的弹性模量差异并不明显,为了简化计算,故统一取地下连续墙的弹性模量为 7.25 GPa。

## 1.3 边界条件及材料参数

模型底部采用固定约束,排水条件为不排水;地基

两侧采用水平向约束, 竖直向自由, 不排水; 模型上部自由, 不约束任何方向的位移, 同时排水。根据地质条件及降水量的变化, 当地地下水位常年为 0.5~2.2 m, 因此取地下水位线在地面线下 1 m 处。

地基土与路基土均采用莫尔—库仑理想弹塑性本构模型, 其中路基土透水而地基土不透水。路面材料与筋材均采用线弹性本构模型。根据工程地质勘察报告以及相关工程资料, 取值如表 2、3 所示。

表 2 地基土与路基土相关材料参数

材料	深度/ m	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	渗透系数/ (10 <sup>-7</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )
土层 1	0~5	4	0.30	10.9	10	5.32	17.5
土层 2	5~15	6	0.30	18.5	48	5.27	19.0
土层 3	15~25	9	0.30	14.8	32	4.19	18.9
土层 4	25~33	8	0.25	19.4	51	4.33	18.7
土层 5	33~40	13	0.30	30.4	5	35.7	19.5
新路基	—	20	0.35	35.0	25	透水	20.0
旧路基	—	25	0.25	30.0	20	透水	19.0
桩基	0~15	7250	0.30	30.4	100	5.32	17.5

表 3 路面材料参数

结构层	材料	厚度/ cm	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )
上面层	沥青玛蹄脂 SMA	4	1 400	0.35	24.2
中面层	沥青混凝土 AC20	6	1 200	0.30	24.2
下面层	沥青稳定碎石 ATB	25	1 000	0.30	24.1
上基层	级配碎石 GM	15	500	0.35	23.6
下基层	水泥稳定碎石 CTB	20	1 500	0.25	23.5
—	双向玻纤土工格栅	1	240	0.25	9.4

2 计算结果分析

2.1 路基不均匀沉降分析

4 种不同工况下的路面总沉降量如图 4 及表 4 所示。

由图 4 可知: 4 种工况下的路面沉降曲线均呈现“浅盆状”分布, 沉降最大值出现在新路基一侧。同时, 4 种工况下路基的沉降具有明显的差异, 同时采用加筋和插桩处理的工况 1, 路基工后沉降最小, 其次为仅采用插桩处理工况, 再次为仅加筋工况, 未做任何处置工况下的路基沉降最大。由于土路肩部分不承担行车荷载, 因此表 4 中沉降值不包括土路肩部分。

由表 4 可知: 新旧路基最大沉降位置均出现在新旧路基结合部处, 且由于采取了加固措施, 因此最大沉降位置向老路基方向移动。对于最小沉降位置, 工况 1 由于采用了插桩和土工格栅处理, 因此新路基的沉降小于老路基沉降, 最小沉降发生在新路基边缘, 其他工况下均呈现出道路中心线沉降最小的现象, 且老路基沉降小于新路基沉降。显然采用桩—土工格栅联合处置可以有效地减小沉降和差异沉降, 效果好于独立应用两种方法。

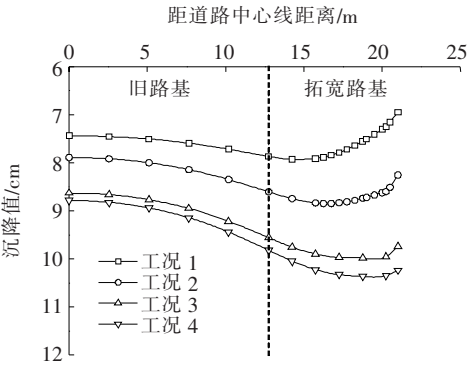


图 4 路面总沉降曲线

表 4 路面沉降

工况	最大沉降/cm	最大沉降减少率/%	最小沉降/cm	最小沉降减少率/%	沉降差/cm	沉降差减少率/%	最大沉降位置/m	最小沉降位置/m
1	7.93	23.3	7.25	17.4	0.68	57.0	14.25	20.25
2	8.85	14.4	7.89	10.1	0.96	39.2	15.75	0
3	9.98	3.7	8.63	1.7	1.35	14.6	15.75	0
4	10.36	0	8.78	0	1.58	0	18.75	0

注:最大、最小沉降位置为距道路中心线的距离;各个工况的减少率均相对工况 4 计算。

工况 1、4 的地基表面沉降曲线对比如图 5 所示。

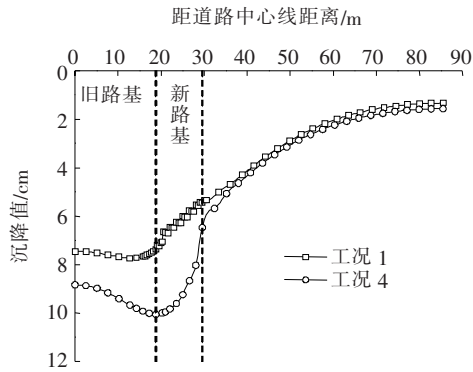


图 5 地基表面沉降曲线

由图 5 可知:工况 1、4 的地基表面工后沉降曲线都近似为盆状,且与路基表面沉降情况类似。工况 4 的地基表面沉降偏大,且在新路基下方变化剧烈,不均匀沉降严重。而工况 1 下的路基不均匀沉降虽然小,但沉降曲线呈现轻微的锯齿形,桩顶处沉降偏小,桩间土沉降偏大,该现象显然与桩基的插入有关,桩基的存在提升了该部分区域的刚度,使得荷载的分布、传递发生了变化。

结合图 4、5 可知:工况 1 的路基沉降为 7.93 cm,相应的地基沉降为 7.72 cm,路基自身的压缩沉降为 0.21 cm,路基变形在路基沉降的比例中只占了 2.6%,路基本身沉降很小。工况 4 的路基沉降为 10.36 cm,相应的地基沉降为 10.05 cm,路基变形在路基沉降的比例中只占了 3.0%。因此,无论是否采用桩基处置路基,路基本身的压缩变形都很小,路面沉降主要是由地基沉降引起,因此采用软基处理技术对于减小路面沉降具有重要的意义。

2.2 土工格栅拉力

土工格栅材料具有较高的抗拉刚度,但没有较高的抗弯刚度和抗压刚度,而土体的抗压强度较好,但抗拉强度较弱。因此两种材料具有良好的互补效果。该文约定最底层的格栅层号为第 1 层,向上层号逐步增加。第 1 层到第 5 层格栅间隔 1 m 布置于每一层路基

填土中部,第 6 层格栅布置于第 5 层路基土上部。

工后 15 年,铺设于新路基中每层格栅横向拉力情况如图 6 所示,其中,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>等符号代表预先插入的桩基的位置。

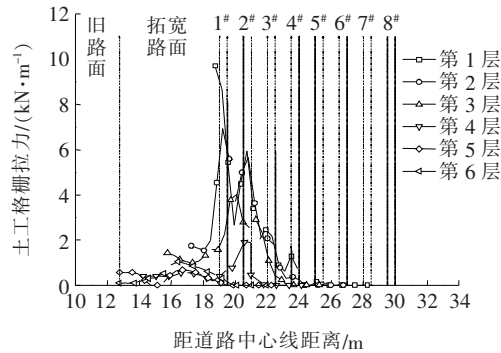


图 6 工后 15 年土工格栅拉力

由图 6 可以发现:土工格栅的受力情况具有较大的差异性,位于较低位置的土工格栅,所受到的拉力越大,且其应力峰值出现在桩顶处,在桩间土部分的应力值较小。产生该现象的原因是桩土之间巨大的刚度差异产生的差异沉降。因此,传递而来的上部荷载一部分由桩间土承担,而另一部分则通过土工格栅传递给桩。从而,形成了桩间土部分的土工格栅张力较小,而在桩顶处的土工格栅张力较大的现象,于进江等<sup>[9]</sup>所做的现场试验中也观察到了相同的现象,证明了数值分析的合理性。

选取桩顶拉力为峰值现象较为明显的第 1 层格栅和第 2 层格栅,土工格栅拉力随时间变化如图 7、8 所示。

从图 7、8 可以发现:随着堆载的增加,土工格栅的受力也随之增大,由于桩土之间的沉降差,路基土荷载传递给土工格栅,土工格栅拉力在桩顶处达到峰值。两层土工格栅拉力峰值随着距道路中心线的距离增大而逐渐减小。当仅有一层填筑的情况下,土工格栅的拉力为 0,表明了土工格栅产生拉力有一定的荷载要求。当填土高度不足,荷载不大时,土工格栅不影响荷



载的传递。根据文献[10],土拱效应形成高度为桩净间距的 1.1~1.5 倍。在该文中,桩净间距为 1 m,土工格栅产生拉力时的填土高度为 2 m,而在填土高度为 1 m 时,不产生拉应力,与理论值符合很好,进一步证明了数值计算的合理性。该现象表明由于土工格栅改变了荷载的传递路径,新路基自重荷载通过土工格栅集中到桩顶,并且由于桩基的插入对软土地基起到了加固作用,大幅减小了软土层所受的荷载,从而使软土层所受到的扰动小于不做任何处置的工况。

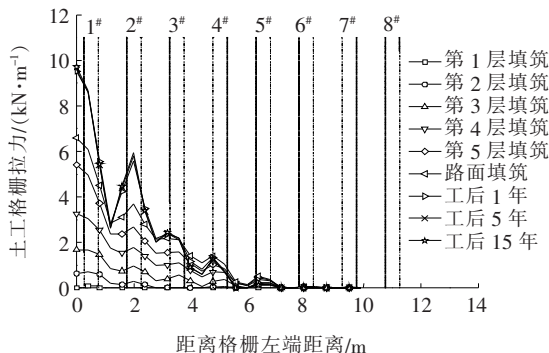


图 7 第 1 层土工格栅拉力

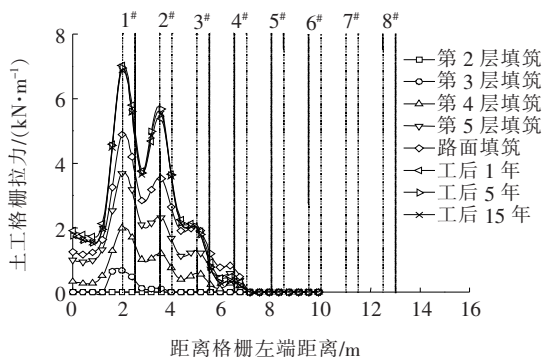


图 8 第 2 层土工格栅拉力

### 2.3 路基稳定性分析

路基稳定性是道路工程使用过程中的重要参考指标。路基稳定性不良的后果表现为路基沿着滑动面发生整体的滑动失稳,对道路安全的影响很大。基于有限元的强度折减法具有不需要假定滑动面的形状与位置,不必引入假定条件的优点,该节基于该方法分析路基的稳定性。强度折减法的基本原理是通过不断降低土体的黏聚力和内摩擦角直至极限状态,从而确定安全系数,并得到潜在的滑动破坏面。

采用非耦合的方法,在莫尔库仑模型下,筋材的强度和刚度均不发生折减<sup>[11]</sup>,采用强度折减法计算土层内摩擦角和黏聚力的公式如下:

$$\varphi_2 = \tan^{-1}(\tan \varphi_1 / F_r) \quad (7)$$

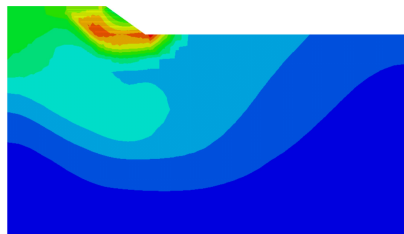
$$c_2 = c_1 / F_r \quad (8)$$

式中: $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为折减前、后的内摩擦角; $c_1$ 、 $c_2$  分别为折减前、后的黏聚力; $F_r$  为抗剪强度折减系数。

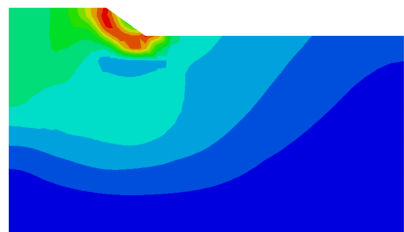
根据文献[8],基于有限元的强度折减法在当假定边坡内所有土体的抗剪强度发挥程度相同时,这种抗剪强度折减系数  $F_r$  相当于传统意义上的边坡整体稳定安全系数  $F_s$ ,又称强度储备安全系数,与极限平衡法所给出的稳定安全系数在概念上一致。因此,下文中将用边坡整体稳定安全系数  $F_s$  代指抗剪强度折减系数  $F_r$ 。

#### 2.3.1 路基潜在滑动面

图 9 给出了工况 1 和工况 4 拓宽后路基潜在滑动面形态。



(a) 工况 1



(b) 工况 4

图 9 路基潜在滑动面

由图 9 可以看到:两种工况下均为新路基发生失稳,由于工况 4 路基未采取任何处置措施,滑动面近似呈圆弧状从新路基的坡顶和坡脚处穿过,并深入至土层 1 中。对于工况 1,由于采取了加筋措施,使得新路基被良好地结合成了一个整体,从而使得滑动面后移到新老路基结合部处,又由于采用了桩基处置,稳定了软土层,使得滑动面不能大范围深入到软土层 1 中,限制了土体的位移大小,因此安全系数较高。

#### 2.3.2 边坡整体稳定安全系数

在道路拓宽工程结束后随着土体固结,路基的稳定性逐步提高,因此路面施工完成、交通荷载刚施加时路基稳定性面临较大的考验。为此需要对该时刻的路基稳定性进行必要的验算。

图 10 为 4 种工况下坡脚水平位移与边坡整体稳定安全系数的关系。

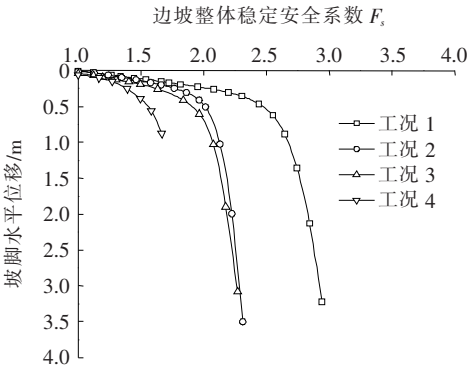


图 10 边坡整体稳定安全系数—坡脚位移示意图

由图 10 可知:坡脚水平位移随折减系数的增大而增大,坡脚水平位移为 0.5 m 时,存在明显的拐点,取该位移下的安全系数如表 5 所示。

表 5 边坡整体稳定安全系数

工况	安全系数	相对工况 4 变化/%
1	2.47	58.3
2	2.01	28.8
3	1.88	20.5
4	1.56	0

由表 5 可知:达到相同的位移值时,工况 1 的安全系数最大。同时,工况 1 下,路基稳定性的增长大于工况 2 与工况 3 之和,说明了同时采用桩—土工格栅处置补足了工况 2 和工况 3 在水平和竖直方向上加固的不足。因此,采用桩—土工格栅处置可以显著提高路基稳定性。

3 结论

运用 Abaqus 软件,基于比奥固结理论,分析了不同加固条件下路基的沉降、地基水平位移;计算了土工格栅拉力,结合相关实际工程反映了有限元计算的合理性;基于强度折减法,分析了路基的稳定性,主要结论如下:

- (1) 高速公路拓宽后,路面部分的沉降形态均为浅盆状,最大位移沉降均出现在新路基一侧。采用桩—土工格栅联合处置相较于其他工况可以减小沉降与不均匀沉降,从而减小路面开裂的可能性。
- (2) 采用桩—土工格栅联合处置的方法改变了浅层土体的附加应力,减小了浅层土体所受到的扰动,使

得地基表层土水平位移明显减小。

(3) 计算结果表明:土工格栅拉力随着堆载的增加而逐步增加,并且每层堆载都呈现出底层格栅的拉力在桩顶处达到峰值,出现明显的应力集中现象,与于进江等<sup>[8]</sup>所进行的现场试验现象相同,验证了仿真的合理性。

(4) 不做任何处置的工况,仅新路基发生滑动,滑动面进入软土层较深。采用桩—土工格栅处置后,新路基滑动面穿过老路基,减小了进入软土层中的厚度,表明桩—土工格栅联合处置增加了新路基整体性。

(5) 在路基安全系数方面,采用桩基—土工格栅联合处置弥补了仅采用一种处置方式的不足,使用土工格栅和复合地基分别增加了竖向与水平方向的刚度和强度,阻止了新路基沿滑动面产生较大滑动,使得新路基安全系数有较大的提升。

参考文献:

[1] 翁效林,张留俊,李林涛,等. 拓宽路基差异沉降控制技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 159—164.

[2] 刘维正,石名磊. 长江漫滩相软土结构性特征及其工程效应分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 427—432.

[3] 傅珍,王选仓,陈星光,等. 新旧地基不同固结程度对拓宽路基差异沉降的影响[J]. 公路, 2008, 53(5): 9—12.

[4] 刘巍巍,李永会,张百永,等. 路基拓宽工程中土工格栅加筋特性有限元分析[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 158—161.

[5] 孙平,刘云,芮勇勤. 高速公路软土路基拓宽处治数值分析[J]. 中外公路, 2012, 32(3): 23—25.

[6] 章海明. 高速公路软土路基沉降及处治数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 211—215.

[7] 徐光斌. 穿越湖区路段公路软土地基加固方案及处治效果研究[J]. 交通科技, 2018(3): 6—9.

[8] 费康,彭劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017.

[9] 于进江,程谦恭,李成辉,等. 超大面积深厚软土桩—网复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2 881—2 889.

[10] 饶为国. 桩—网复合地基原理及实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.

[11] DUNCAN J M, WRIGHT S G, BRANDON T L. Soil Strength and Slope Stability[M]. 2nd Edition. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2014.