

# 基于导管注浆的现役高速公路不均匀 沉降处治技术研究

祝争艳<sup>1</sup>, 袁青泉<sup>2</sup>

(1. 江苏高速公路工程养护技术有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 江苏京沪高速公路有限公司)

**摘要:**在役高速公路路面不均匀沉降直接影响路面的力学响应,并决定了路面的长期使用性能和路面寿命,通过数值模拟和工程实践相结合的方法,研究了导管注浆在现役高速公路不均匀沉降处治问题上的应用。结果表明:相比于原不均匀沉降路段,经过直径6 cm,长3.5、4.0、5.0 m 3种导管长度注浆后,路面结构内部沉降量逐渐减小,但随着导管长度的增加,路面结构内部沉降量减小的幅度有限,因此导管不宜过长。工程实践表明:导管长度大于4.5 m时,即可以在黏土层内注浆时,均可以有效减小路面结构内部沉降,提高路基整体强度。相比未处治段落,经导管注浆处治后,路面沉降得到了有效控制。

**关键词:**沥青路面;不均匀沉降;导管注浆;数值模拟

目前,对于在役高速公路软基路段不均匀沉降,虽然采用过多种处治方法进行养护,但处治方法缺乏针对性,在运营一段时间后仍出现平整度不足、线形较差的问题。结合收集的沿海高速公路历年不均匀沉降处治资料,路面不均匀沉降目前通常采用的加铺罩面处治方案,只能在短期内起到恢复路面线形的作用,且成本高、有效期短,因此需研究经济性好、长效的路面不均匀沉降养护技术。针对该问题,该文提出采用导管注浆方法对高速公路不均匀沉降进行处治,结合有限元模拟对其技术理念、作用机理及关键影响因素进行深入分析,并进行试验段试验和效果分析,提高软基路段沥青路面处治技术水平、改善高速公路沥青路面不均匀沉降。

## 1 计算模型及参数

模型选取一长 $l=20$  m的路段进行有限元分析,其横断面如图1所示。其中,路面厚76 cm(沥青面层18 cm,水稳基层38 cm,底基层20 cm),路床80 cm,路堤约为120 cm。采用Ansys建立该路面的三维有限元实体模型,各层路面的材料属性如表1所示。路面沉降主要是由于淤泥层的含水率不一致所导致,因此有限元模型可简化模拟为弹性模量沿路面断面纵向逐渐变化,采用随机函数自动生成弹性模量,其变化范围为0.5~2.5 MPa。导管是内径为60 mm的钢管,从底基层向下延伸,导管的弹性模量取为1.95 GPa,

- \*\*\*\*\*
- [5] Macdonald D F. Uplift Resistance of Caisson Piles in Sand[D]. Nova Scotia Technical College, 1963.
- [6] Celemece S P, Veesaert C J. Dynamic Pullout Resistance of Anchors in Sand[J]. Proceedings - Annual Allerton Conference on Circuit and System Theory, 1977: 389 - 397.
- [7] Chattopadhyay B C, Pise P J. Breakout Resistance of Horizontal Anchors in Sand[J]. Soils and Foundation, 1986, 26(4): 16-22.
- [8] Saeedy H S. Stability of Circular Vertical Anchors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(3): 452-456.

- [9] 陈万鹏. 考虑应力扩散的复杂受荷桩非线性分析方法[J]. 中外公路, 2017(5).
- [10] 陈万鹏, 罗忠涛. 多层地基中摩擦型单桩沉降分析的传递矩阵法[J]. 中外公路, 2017(6).
- [11] Tsuha C H C, Aoki N, Rault G, et al. Evaluation of the Efficiencies of Helical Anchor Plates in Sand by Centrifuge Model Tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1102-1114.
- [12] 郝冬雪, 陈榕, 符胜男. 砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015(1).

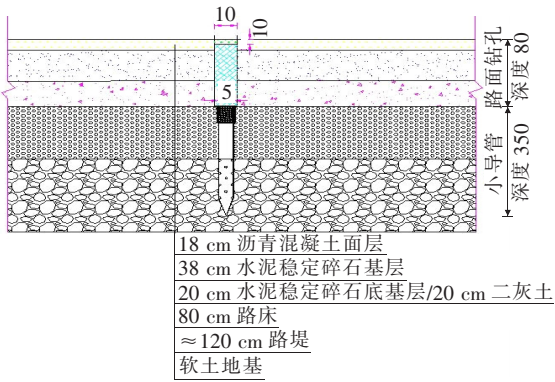


图 1 路面示意图(单位:cm)

表 1 路面各层材料属性

层位类型	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
沥青路面	1 300	0.35	2 450
水稳基层	1 500	0.25	2 000
底基层	1 400	0.25	2 050
路床	40	0.40	2 000
路堤	20	0.35	1 850
软土地基	5	0.40	1 760
淤泥层	0.5~2.5	0.40	1 500

泊松比为 0.2。注浆后导管周围的土体弹性模量会增加,范围为 20 cm。路面左右两侧的纵向和横向自由度都约束,淤泥层地面约束竖向自由度,如图 2 所示。在沥青路面层施加均布荷载 10 kN/m。

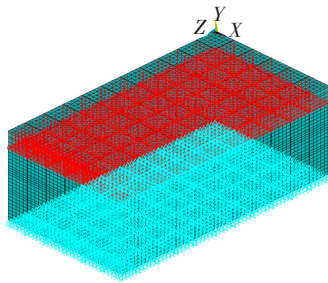


图 2 有限元模型边界条件和加载方式

2 计算方法

首先假设弹性模量沿路面断面纵向逐渐变化,采用随机函数自动生成弹性模量,将搜集到的不同材料参数如密度、弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、体积模量、剪切模量、抗拉强度,作为计算的初始条件,然后将其输入到分析软件中。注浆模型中在弹性范围内都由体积模量  $K$  和剪切模量  $G$  来描述,其与弹性模量

$E$ 、泊松比之间的关系一般可用以下公式表示:

$$K=\frac{E}{3(1-2\mu)} \tag{1}$$

$$\theta=\frac{\sigma}{K} \tag{2}$$

式中: $\sigma$  为 3 个主应力的平均值, $\sigma=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ ;  $\theta$  为体应变。

式(2)表明:体应变与体积模量成反比,体积模量越大,产生的体应变越小。

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)} \tag{3}$$

$$\tau=G\gamma \tag{4}$$

式中: $\tau$  为剪切应力; $\gamma$  为剪切应变。

$G$  值越大,表示材料抵抗剪切变形的能力越强。

根据前期对施工区域的地质勘查,原路面结构厚 76 cm(18 cm 沥青面层、38 cm 水稳基层、20 cm 水稳基层/灰土),以下为 80 cm 路床、120 cm 路堤填土、100 cm 左右的黏土层,黏土层以下为淤泥层,制定了导管注浆法的注浆层位示意,如图 3 所示,分别讨论分析导管长度和注浆前后软土地基结构内部的响应特征,其中方案 1、2、3 的导管长度分别为 3.5、4.0、5.0 m。模拟分析分为以下两个工况:

工况 1:导管插入,但未注浆,研究导管长度对路面结构内部沉降的影响。

工况 2:导管插入后注浆,研究注浆后土体强度对路面结构内部沉降的影响。

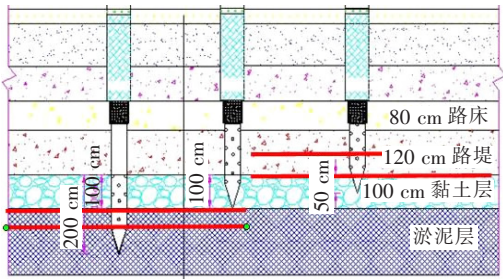


图 3 不同导管注浆层位示意

3 软土地基导管注浆特性分析

3.1 不同导管长度对沉降量的影响

导管注浆技术是一种竖向处治深度 3~5 m,水平方向上通过一定数量的注浆导管形成的“板筏”,增强处治路段的整体性,从而控制路表不均匀沉降的加固技术。因此导管长度对处治路段的整体刚度有较大的影响。图 4 为导管长度不同时,路面的位移曲线。

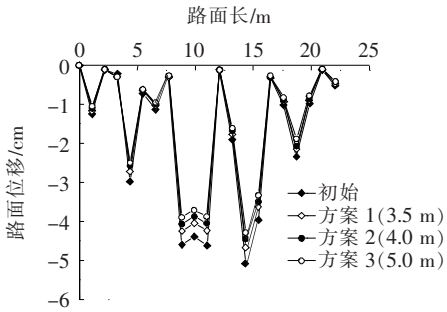


图4 导管长度对路面结构内部位移的影响

从图4可知:

(1) 相比于原路面,经过长3.5、4.0、5.0 m,直径均为6 cm的导管注浆处治后,路面结构内部沉降量分别降低了8.1%、11.9%和15.6%,说明增加导管长度可以明显改善路面沉降状况,主要因为导管增加了路面的竖向刚度。

(2) 以3.5 m的导管为参考,导管长度增加至4.0、5.0 m时,路面结构内部沉降量分别减少了46.91%、92.59%;当导管长度从4.0 m增加至5.0 m时,路面结构内部沉降量仅减少了31.09%,说明随着导管长度的增加,路面结构内部沉降会逐渐减小,随导管长度的增加,减小的幅度有限,因此从经济性角度考虑,导管不宜过长。

3.2 不同导管长度及土体强度对沉降量的影响

导管注浆后导管上部与基层齐平,下部按设计深度打入路基中,在完成施工后,导管上部与基层固结,下部连接注浆体,形成一体化的增强体。当其注浆量达到一定量级后,处治路段整体刚度得到加强,并形成类似“板筏”的结构,后期路基发生不均匀沉降时,通过假设不同导管长度下的土体强度变化,来分析导管注浆后土基内部结果的响应规律。

(1) 注浆后土体位移响应规律

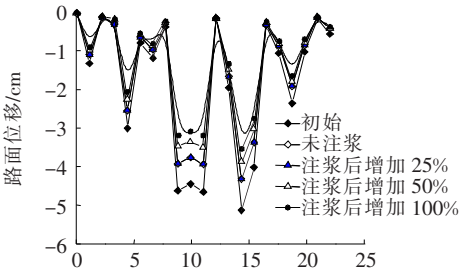
假定注浆后土体强度分别增加25%、50%和100%,图5为分别采用3种导管注浆方案时,注浆后土体强度对路面结构内部位移的影响。

从图5可知:相比于注浆前,对于方案1,注浆后土体强度增加25%、50%、100%时,路面结构内部沉降分别减小了5.19%、11.1%和18.2%;对于方案2,注浆后土体强度增加25%、50%、100%时,路面结构内部沉降分别减小了18.3%、36.2%和45.5%;对于方案3,注浆后土体强度增加25%、50%、100%时,路面结构内部位移分别减小了21.6%、41.8%和56.5%。以上结果说明注浆可以明显地改善路面结构内部不均匀沉降情况,这是因为注浆后,土体的整体刚

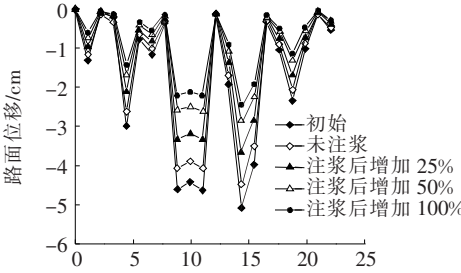
度增加,增强了路面结构的竖向刚度,从而更利于改善路面的不均匀沉降。

(2) 导管适宜长度分析

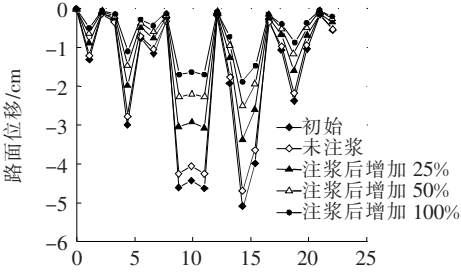
假设注浆后土体强度均增加50%时,3种导管长度方案,经注浆后的路面结构内部沉降见图6。



(a) 方案 1(3.5 m)



(b) 方案 2(4.0 m)



(c) 方案 3(5.0 m)

图5 不同导管长度下注浆后不同土体强度等级对路面结构内部位移的影响

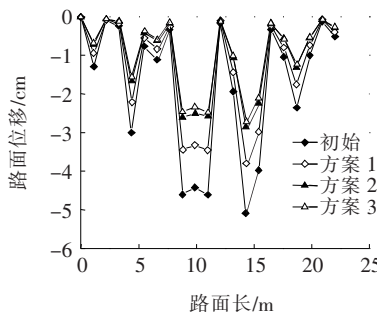


图6 注浆后路面结构内部位移

从图 6 可知:与原路面相比,经长 3.5、4.0、5.0 m 共 3 种导管注浆后的路面结构内部沉降分别减小了 26.6%、43.8%、58.2%,说明导管越长,路面结构内部沉降控制效果越好;长 4.0 m 和 5.0 m 导管下沉降量,相比长 3.5 m 导管,路面结构内部沉降控制效果分别提高了 64.66%、118.80%,而长 5.0 m 导管仅比长 4.0 m 导管沉降控制效果提高了 32.88%,说明随着导管长度的增加,路面结构内部沉降控制效果提升并不显著,这主要是因为 3.5 m 长导管,注浆深度并未贯穿黏土层,而 4.0 m 和 5.0 m 长导管注浆深度贯穿黏土层,浆液能与黏土层有效混合,提高了黏土层强度,注浆后,黏土层的刚度比淤泥层刚度要大很多,提高了路基结构的整体性,减少了软土地基形变对上部结构的影响。根据以上分析可知,增加导管长度和在黏土层内进行注浆都可以有效减小路面结构内部位移。

4 试验段取芯验证及跟踪观测分析

结合中国沿海某高速公路不均匀处治工程,选取了年累计沉降量大于 6.6 mm 的段落进行导管注浆处治设计,处治用导管直径均为 6 cm,长度分别为 3.5、

4.0、4.5、5.0 m 共 4 种,处治半幅车道,注浆孔呈梅花形布置,间距 2 m,如图 7 所示,试验段长度 198 m。

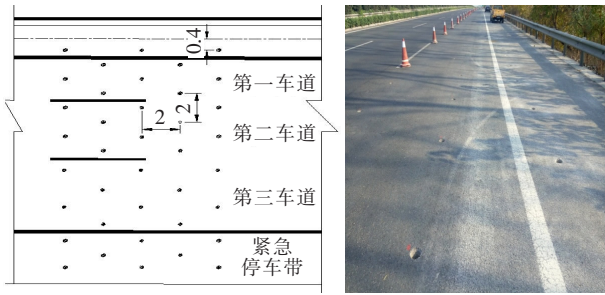


图 7 导管处治布孔示意图(单位:m)

4.1 试验段土体取芯检测

根据现场处治情况,选取了具有代表性的注浆孔位进行钻芯取样,结果见表 2,分别在距注浆孔 10、50、100 cm 的位置钻芯取样,以观测注浆材料在出浆层位的分布情况。

通过对现场取芯样品的外观检测,可以得出如下结论:注浆材料主要分布于黏土层到淤泥层的过渡段中,并在该过渡段中的分布范围较大,在注浆孔 50 cm 范围内;外观上对比不同距离注浆孔的芯样,在距离注浆孔越近的软土,其上下土层含水率明显低于其外土

表 2 取芯孔分布特征

位置 编号	导管长 度/m	取芯深 度/m	取芯位置	注浆/ kg
1	3.5	5.5	注浆孔向外 10 cm、50 cm、100 cm	244
2	3.5	5.5	注浆孔向外 10 cm、100 cm	1 268
3	3.5	7.0	注浆孔向外 10 cm、50 cm、100 cm	223
4	4.0	6.0	注浆孔向外 10 cm、50 cm、100 cm	1 407
5	4.0	6.0	注浆孔向外 10 cm、100 cm	1 017
6	4.0	6.0	注浆孔向外 10 cm、50 cm	446
7	5.0	8.0	注浆孔向外 10 cm、50 cm	164

层的含水率;注浆材料在土基中有效与软土进行混合,提高了软土地基的强度。

结合取芯结果,选取黏土层和淤泥层交界处的土样进行无侧限抗压强度检测(图 8)。由图 8 可知:距离注浆孔越近,土体无侧限抗压强度越强,并随距离的增加逐渐减小;在距离注浆孔 100 cm 处土的无侧限抗压强度与未注浆段相近。

4.2 试验段路表沉降观测

项目在试验段内布置了自动化观测系统,监测点平均间距 20 m,监测范围为注浆处治路段及其临近未处治路段(作为和导管注浆段沉降的对比),监测点布

置及跟踪观测结果见表 3 和图 9。

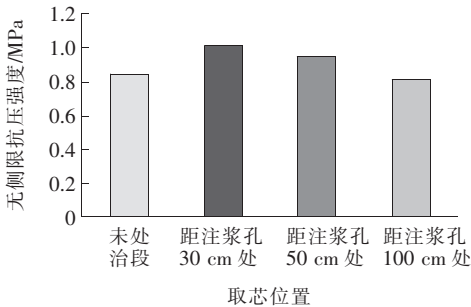


图 8 导管注浆周围芯样强度试验结果



表 3 导管分布与各监测点沉降情况

桩号	所含监测点	导管长度/ m	处治后路表年平均 沉降量/(mm·年 <sup>-1</sup> )
K871+860~K872+902	监测点 0、1、2	未处治段	7.50~9.29
K871+902~K871+940	监测点 3、4	3.5	4.21~4.24
K871+941~K871+981	监测点 5、6	4.0	3.30~3.35
K871+982~K872+039	监测点 7、8	4.5	1.25~1.26
K872+040~K872+100	监测点 9、10、11、12	5.0	0.12~0.14

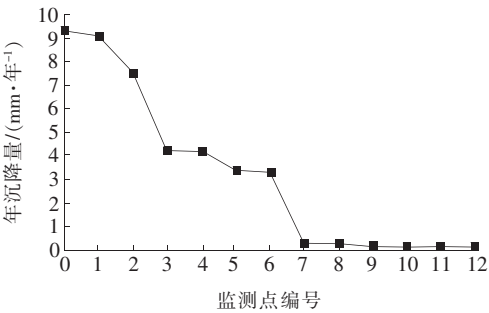


图 10 各监测点年累积沉降量

结合表 3 和图 9 可知:相比未处治段落,经导管注浆处治后,路面沉降得到了有效控制;注浆导管长度的增加可有效控制路表沉降量,但不宜过长,当前工程导管适宜长度 4.5 m 与数值模拟结果吻合。

5 结论

通过有限元软件模拟分析了软土地基经过导管注浆处治后软土地基结构内部位移响应的规律,并结合实际工程进行了实施验证,结果表明:

- (1) 增加导管长度可以明显改善路面沉降,因为导管增加了路面的竖向刚度;随着导管长度的增加,路面结构内部位移逐渐减小,但减小的幅度有限,因此从经济性角度考虑,导管不宜过长。
- (2) 相比于原路面,在增加了不同长度的导管后,路面结构内部位移分别降低了 8.1%、11.9% 和 15.6%;在土体强度增加相同的情况下,3 种注浆方案的路面结构内部位移分别减小了 26.6%、43.8% 和 58.2%。
- (3) 当注浆深度位于黏土层以下时,浆液能与黏土层有效混合,提高了黏土层强度,说明增加导管长度和在黏土层内进行注浆都可以有效减小路面结构的内

部位移,提高路基整体强度。

(4) 注浆材料主要分布于黏土层到淤泥层过渡段中,并在该过渡段中的分布范围较大,在注浆孔 50 cm 范围内;距离注浆孔越近,土体无侧限抗压强度越强,并随距离的增加逐渐减小;在距离注浆孔 100 cm 处土的无侧限抗压强度与未注浆段落相近。

(5) 相比未处治段落,经导管注浆处治后,路面沉降得到了有效控制,注浆导管长度的增加可有效控制路表沉降量,但不宜过长,适宜长度为 4.5 m,这与数值模拟的结果相吻合。

参考文献:

[1] 陈亮,沈军辉,沈中超,等. 川汶公路 K95+300~K95+490 段堰塞湖相沉积地层路基变形机制研究[J]. 中外公路,2017(5).

[2] 邱伟,易善昌,龚维亮,等. 基于 EPS 的海相深厚软基区路基不均匀沉降处治研究[J]. 中外公路,2018(4).

[3] Ara G L, Palmeira E M, Mac L. Comparisons between Predicted and Observed Behavior of a Geosynthetic Reinforced Abutment on Soft Soil[J]. Engineering Geology, 2012: 101-113

[4] 严守靖,刘敬辉,杨泽众,等. 沥青路面路基工作区深度研究[J]. 中外公路,2018(5).

[5] 张志宙,桂志鹏,章荣军. 深厚软土上填筑路堤引起邻近既有受荷桩基水平附加响应分析[J]. 中外公路,2018(6).

[6] Liu G B, Jiang R J, Ng C W, et al. Deformation Characteristics of a 38 m Deep Excavation in Soft Clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(12):1 817-1 828.

[7] 邓学钧,黄晓明,沈伟新. 弹性层状体系的动力响应分析[J]. 土木工程学报,1995(3).

[8] 梁烈. 复杂冻土地区公路加固技术实施与监测分析[J]. 中外公路,2018(6).