DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250827

基于有限元的山区高填方道路路基沉降分析

陈永刚
[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200065]

摘 要: 随着山区城镇化的推进,山区道路的建设一般存在深挖高填的情况,尤其在高填方路段,沉降控制是道路路基设计的重要内容之一。结合湖南蒙华铁路平江火车站连接线工程,选取 3 个典型断面采用有限元软件 ANSYS 对高填方路基填筑进行建模计算,并对不同填筑高度路基沉降的主要因素进行分析。通过对原状地基和填筑路基的弹性模量、材料密度等参数的调整计算,并结合工程实际,提出合理的路基处理措施,以减小高填方路基的沉降,为类似工程设计和分析提供一定的思路。

关键词: 高填方路基;路基沉降;有限元分析;弹性模量;材料密度
中图分类号: U416.1;TU997 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)01-0148-05

FEA-Based Settlement Analysis of High-Fill Subgrades in Mountainous Areas

CHEN Yonggang
[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China]

Abstract: With the advancement of urbanization in mountainous areas, the construction of mountain roads generally involves the deep excavating and high filling. Particularly in high-fill road sections, the settlement control is a crucial aspect of road subgrade design. Combined with the Pingjiang Railway Station Connection Project of the Menghao Railway in Hunan, three typical cross-sections are selected to model and calculate the high-fill subgrade construction by the finite element software ANSYS. The main factors of subgrade settlement at different filling heights are analyzed. By adjusting and calculating the parameters such as the elastic modulus and material density of the in-situ foundation and the filled subgrade, and combined with the engineering practice, the reasonable subgrade treatment measures are proposed to reduce the settlement in high-fill subgrades, which provides some insights for the design and analysis of similar projects.

Keywords: high-fill subgrade; subgrade settlement; finite element analysis; elastic modulus; material density

0 引 言

在山区道路建设中,由于地势复杂,地形起伏较大,道路路基设计中往往会出现深挖高填的情况。在挖方路段,原状地基经过长年累月的固结压缩,沉降已基本趋于稳定;在填方路段,特别是局部高填方区域,沉降变形较为显著,易产生不均匀沉降,不仅直接影响路面的平整度和使用功能,而且影响道路的使用寿命[1-2]。对此,需对高填方路基进行沉降计算,分析高填方路基沉降的主要因素,并采取合理的措施,尽量减小路基沉降。

1 工程概况

蒙华铁路平江火车站连接线工程位于湖南平江县北部,是平江县主城区内环、外环的重要组成部分,在路网架构中起到沟通主城区内部交通、与外部交通相互联系的作用。工程贯通东西方向,连通北部居住区、东部工业区以及城市重要交通节点—蒙华铁路平江火车站,是城市居民出行的重要通道。

蒙华铁路平江火车站连接线工程,西起规划道路一,东至站前路,道路总长约 3.8 km,规划等级为一级公路兼城市主干路,设计速度为 60 km/h,标准段红线宽度为 40 m。工程沿线共与 8 条道路相交,跨越现状仙江河和规划平汝高速地面道路。工程范围内以山地丘陵为主,地形起伏较大,道路纵断面设计见图 1。

根据道路纵断面设计,本工程存在多处高填方区域,本次选取 3 处填方较大的区域进行分析:第 1 处位于组团路六至喻泥岭路段,其中桩号 K1+460 处填方高度最大,为 9.41 m;第 2 处位于喻泥岭路至仙江河路段,其中桩号 K1+640 处填方高度最大,为

收稿日期:2025-08-20
作者简介:陈永刚(1988—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

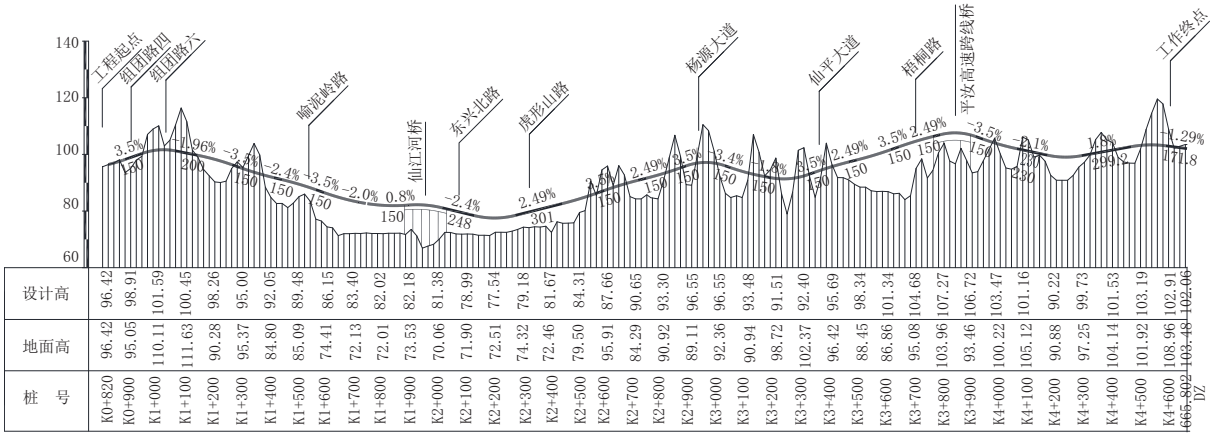

图1　道路纵断面设计图

13.58 m;第3处位于仙平大道至梧桐路路段,其中桩号K3+660处填方高度最大,为19.39 m。本次路基沉降分析和设计主要针对这3处填方位置。

2　沉降模型与假定

2.1　材料模型

土是岩石风化而成的碎散颗粒的集合体,本构模型十分复杂。ANSYS中的Drucker-Prager(DP)屈服准则是莫尔-库仑准则的近似,通常称为DP准则或广义密塞斯准则,是在密塞斯准则的基础上考虑平均主应力对土抗剪强度的影响而发展的一种准则[3]。DP准则的屈服面不随材料的逐渐屈服而改变,其本构模型采用理想弹塑性。该准则的屈服强度随着侧限压力的增加而增加,考虑了由于屈服而引起的体积膨胀,但不考虑温度变化的影响[4]。本次结合有限元分析,采用DP屈服准则进行路基沉降计算分析。

2.2　计算假定

在实际工程应用中,由于土体受周边环境的影响,土体的受力变形状况极其复杂,完全精准地模拟施工过程中高填方路基的受力情况相当困难,故为方便有限元计算,在考虑其主要因素的前提下提出以下计算假定[5-6]:

(1)不考虑土体的排水固结,采用总应力法计算;

(2)土石料为各向同性连续介质、理想弹塑性体模型;

(3)土层层间接触状态为完全连续接触;

(4)地基在自重应力下的变形已经完成,其变形主要是上部填筑路基荷载作用所致。

3　有限元计算分析

3.1　典型高填方横断面

根据前述道路纵断面设计,取断面1(K1+460处)、断面2(K1+640处)和断面3(K3+660处)进行分析。根据地质勘察报告,将原状地层上部物理力学性质差的①杂填土、②耕土、③淤泥等不良土层进行清除换填,路基计算高度考虑此部分换填厚度。断面1处、断面2处和断面3处地表以下不良土层总厚度分别约0.51、0.84、0.47 m,故断面1、断面2和断面3填筑路基计算高度分别按10、15、20 m进行计算。忽略边坡对路基沉降的影响[7],边坡均按1∶1.5进行设置建模。考虑到地层情况和道路设置基本对称,为了减小计算机时,采用半幅横断面进行计算分析[8],横断面示意见图2。

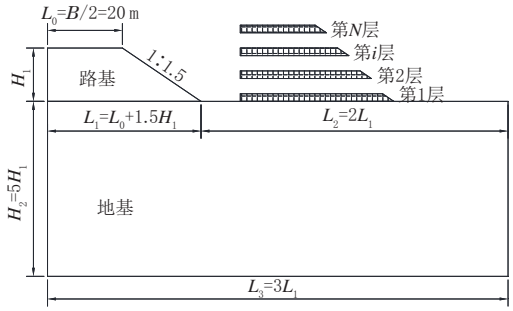

图2　计算横断面示意图

3.2　材料技术参数

路基填筑材料采用素填土,其下层为原状稳定地基土层,主要为④粉质黏土、⑤粗砂、⑥全风化泥质粉砂岩、⑦强风化泥质粉砂岩、⑧中风化泥质粉砂岩。结合地质勘察报告各土层指标,路基填土和地基土层的相关参数见表1,各断面地基土层分布情况见表2。

3.3　有限元模型

根据道路纵向线形的特点,有限元分析采用平面应变进行建模,其竖向按土层类型和计算厚度进行划分。此次分析主要是针对竖向沉降变形,土层交界处节点采用共节点方式进行处理,单元采用四

表1　各土层有限元分析参数

土层分类	分层	弹性模量/MPa	泊松比	密度/（kg·m^{-3}）	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
路基	填土	19	0.35	1 900	55	30
地基	④粉质黏土	5.03	0.30	1 860	24.39	13.81
	⑤粗砂	10	0.28	1 950	—	25
	⑥全风化泥质粉砂岩	11.13	0.32	1 960	45.49	21.49
	⑦强风化泥质粉砂岩	50	0.27	2 100	50	30
	⑧中风化泥质粉砂岩	900	0.25	2 400	180	50

表2　各断面地基土层分布情况　单位：m

计算断面	路基高度	④层高度	⑤层高度	⑥层高度	⑦层高度	⑧层高度
断面1	10	2.3		1	2.5	44.2
断面2	15	2	1.6	—	4.8	66.6
断面3	20	1	—	0.8	1.2	97

边形单元plane82，自动网格进行划分，考虑到土层材料的非线性特性，在路基区网格进行加密处理。

有限元模拟分级加载填土时，模型计算区域，竖向应延伸至坚硬持力层，取地表以下3~5倍路基高度，宽度范围取3倍路基底面宽度。在保证计算效率的情况下，避免底部约束和侧向约束对计算结果的影响。

3.4　边界及荷载条件

在有限元模型中，约束模型底边竖向位移，约束模型左右两侧的水平方向位移[9]。

路基采用分层填筑的施工方法，在有限元模拟中通过ANSYS中的生死单元功能，从下至上按顺序逐步分层激活相应填土单元，以达到模拟实际施工阶段。第一层填土竣工时，结构为第一层，荷载为该层填土自重；第二层竣工时，结构为第一层和第二层，荷载增量为第二层填土自重，以此类推完成整个填土的模拟分析。为提高计算效率，每一工况土层填筑厚度按1.0 m进行模拟分析。

3.5　有限元计算结果分析

3.5.1　初始地应力平衡

原状地基经过长年累月的固结，沉降已基本趋于稳定，为了消除地基在自重作用下发生的前期变形，通过对模型进行地应力平衡处理模拟地基的应力状况。ANSYS软件通过生死单元模拟路基的填筑过程[10]。在路基填筑前，将模型中的填筑体设置为死单元，使其刚度、质量、荷载均被置为零，这些不能参与计算[11]；仅地基部分进行正常计算，采用iswrite输出地基应力状态。在模拟路基填筑前，再通过isfile读入初始应力。通过地应力平衡处理，地基的应力状态保留，位移均为零，以达到地基在路基填筑施工前已经完成沉降。

以断面3为例，根据图3计算结果可知，地基竖向最大位移1.33×10^{-8} m，在沉降分析中当最大值小于1.0×10^{-6} m时，地应力可视为达到了较好的平衡状态。根据有限元计算结果，地基最大应力为2 340 kPa，与采用总应力解析法计算$\sigma=\sum(\gamma_i\times h_i)$结果一致，进一步论证了有限元分析的可靠性。

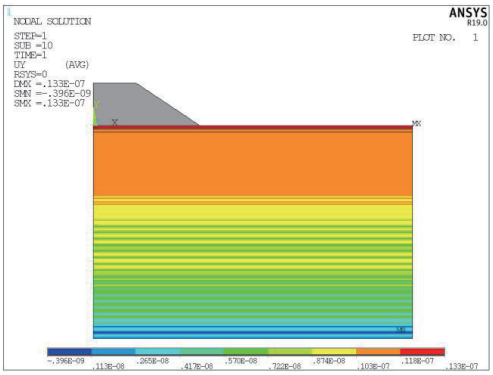

图3　地应力平衡后沉降云图（断面3）

3.5.2　沉降分析

断面1处填筑路基计算高度为10 m，其竖向沉降变形等值线见图4，顶部最大沉降为123 mm。

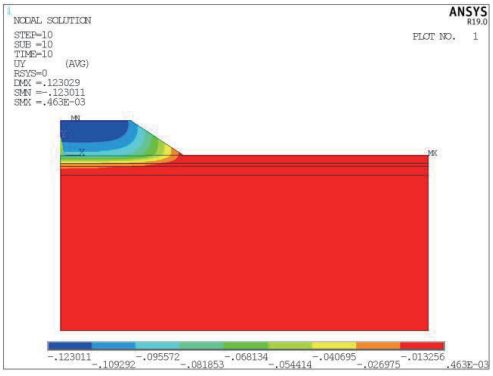

图4　断面1竖向位移图

断面2处填筑路基计算高度为15 m，其竖向沉降变形等值线见图5，顶部最大沉降为236 mm。

断面3处填筑路基计算高度为20 m，其竖向沉降变形等值线见图6，顶部最大沉降为244 mm。

由以上断面的位移云图可知，随着竖直方向深度的加深，路基沉降逐渐减小至稳定；水平方向上，路基中线处沉降最大，靠近路基中线，沉降逐渐增大，远离路基中线，沉降逐渐减小，路基沉降呈凹形曲线。

在行车荷载的作用下，分别对3个断面沉降进行

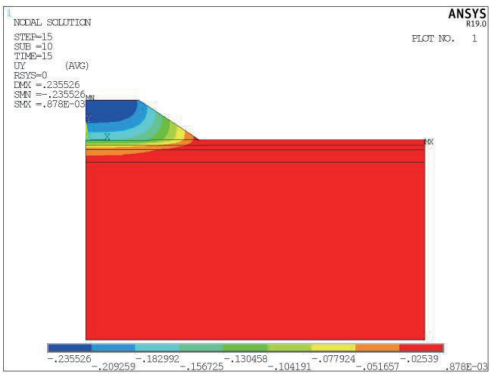

图 5　断面 2 竖向位移图

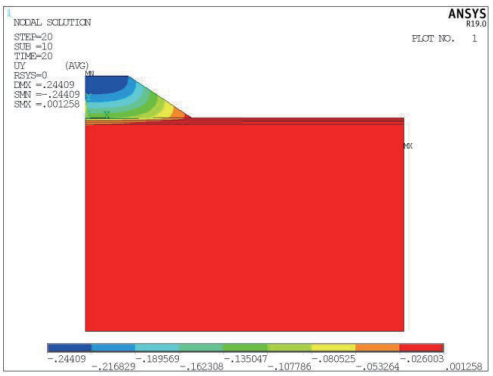

图 6　断面 3 竖向位移图

模拟分析，见表 3。行车荷载对路基的沉降变形影响较小，且路基填筑高度越高，行车荷载的影响越小。

表 3　行车荷载对沉降的影响

计算断面	路基高度/m	路基填土沉降/mm	行车荷载沉降/mm	行车荷载引起沉降的占比
断面 1	10	131.03	8.00	6.1%
断面 2	15	247.54	12.01	4.9%
断面 3	20	254.54	10.45	4.1%

3.5.3　沉降组成分析

道路总沉降由填筑路基自身压缩沉降和地基沉降变形两部分组成[7]。分别分析断面 1、断面 2 和断面 3 的路基在不同填筑高度下的总沉降、地基沉降和路基自身沉降。

断面 1 路基填筑高度为 10 m，总沉降 123 mm，其中地基顶面沉降为 89 mm，约为总沉降的 72.4%，填筑路基自身沉降为 34 mm，约为总沉降的 27.6%，见图 7。

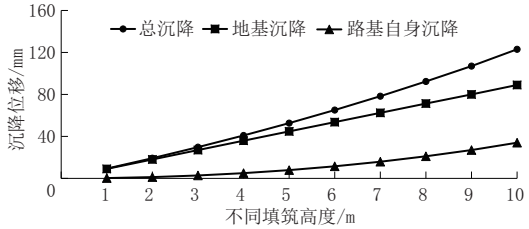

图 7　断面 1 沉降组成分析图

断面 2 路基填筑高度为 15 m，总沉降 236 mm，其中地基顶面沉降为 157 mm，约为总沉降的 66.5%，填筑路基自身沉降为 79 mm，约为总沉降的 33.5%，见图 8。

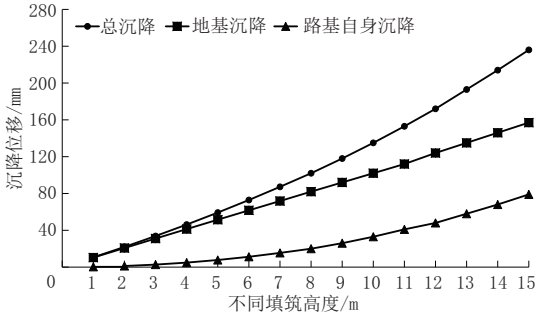

图 8　断面 2 沉降组成分析图

断面 3 路基填筑高度为 20 m，总沉降 244 mm，其中地基顶面沉降为 109 mm，约为总沉降的 44.7%，填筑路基自身沉降为 135 mm，约为总沉降的 55.3%，见图 9。

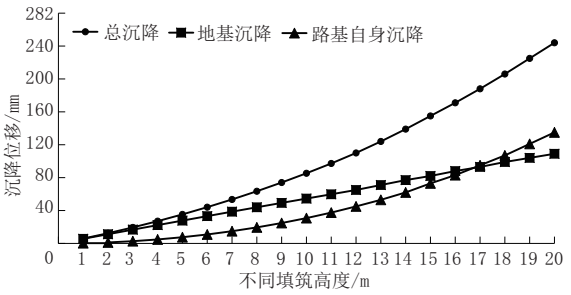

图 9　断面 3 沉降组成分析图

根据图 7 至图 9 可知，在相同的填筑高度下，3 个断面的路基自身沉降一致，与下层地基土层分布无关，仅与路基自身填筑高度相关。

在相同填筑高度下，3 个断面地基沉降不一致。断面 1 和断面 2 的地基沉降较为接近，断面 3 的沉降与前两者相差较大，这是因为断面 3 的低弹模地基土层（粉质黏土、粗砂和全风化泥质粉砂岩层）厚度较断面 1 和断面 2 小，土层性质更好，其沉降更小。故地基沉降不仅与路基填筑高度相关，还与断面所处的地基土层分布相关。

综合前述 3 个断面沉降组成分析可知，路基填筑过程中沉降的共同特点：随着路基填筑高度的增加，路基重力增加，路基自身沉降呈非线性增长，地基沉降呈线性增长；随着路基填筑高度的增加，路基自身沉降在总沉降占比中逐步增大，地基沉降占比逐步减小。

3.5.4　影响沉降的主要因素

根据前述沉降计算分析并结合已有研究可知，

路基沉降主要与填筑路基重力、路基和地基材料的弹性模量等因素有关[12-13]。以断面3为例，通过调整路基填筑材料的密度和弹性模量、地基材料的弹性模量等参数，分析减小路基沉降的有效方法。

在其他参数保持不变时，随着路基材料密度的增加，地基沉降和路基自身沉降均增加，且呈线性变化，见图10。

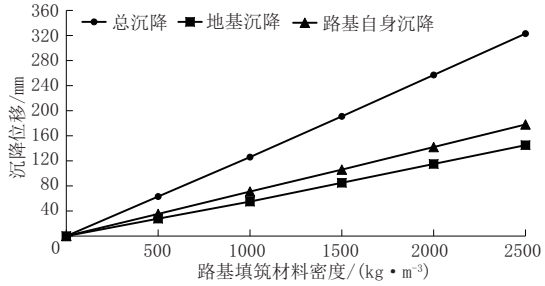

图10　路基材料密度和路基沉降关系图

当仅路基弹性模量提高时，路基自身沉降呈非线性减小，并逐渐趋于稳定，地基沉降不变，见图11。

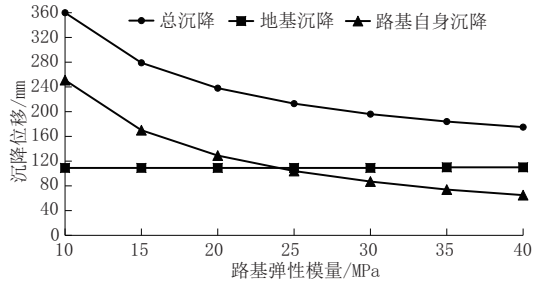

图11　路基弹性模量和路基沉降关系图

当仅地基（除⑦、⑧土层）弹性模量提高时，地基沉降呈非线性减小，并逐渐趋于稳定，路基自身沉降不变，见图12。

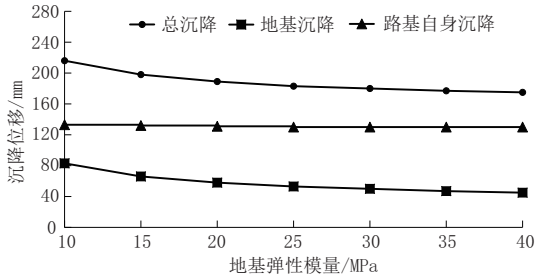

图12　地基弹性模量和路基沉降关系图

综合以上路基、地基参数对沉降的影响分析可知，在一定范围内路基和地基弹性模量的提高均可以减小沉降，但当弹性模量进一步提高时，沉降基本不再变化，弹性模量的提高对减小沉降效果不明显；填筑路基材料密度对路基沉降影响较显著，减小路基填筑材料的密度不仅可以减小路基自身沉降，而且可以减小地基的沉降。实际工程中，路基可采用密度较小的材料进行填筑，如土工泡沫塑料（EPS块）、泡沫轻质土、粉煤灰等[14-15]。

除了材料因素外，施工过程控制对路基的沉降起到重要作用。可以通过提高路基压实度，提高路基的弹性模量[16-17]，进而减小路基沉降[18-19]。此外，路基填筑速率对路基沉降也有一定的影响。以断面3为例，分别模拟计算0.25、0.5、1.0 m/d填筑速率下路基的沉降变形，最大沉降速率分别为4.9、9.1、20.9 mm/d。虽然在不同的填筑速率下总沉降基本一致，但是较大的填筑速率导致较大的沉降速率，可能引起路基失稳，故在填筑过程中应选择合理的填筑速率，做好沉降监测。

4　结　语

（1）在竖直方向，随着深度的加深，路基沉降逐渐减小至稳定；在水平方向，路基中线处沉降最大，靠近路基中线，沉降逐渐增大，远离路基中线，沉降逐渐减小，路基沉降呈凹形曲线。

（2）路基总沉降由路基自身沉降和地基沉降两部分组成，路基自身沉降仅与路基自身填筑高度相关，地基沉降和路基填筑高度、地基土层情况均相关。

（3）随着路基高度的增加，地基沉降呈线性增长，路基自身沉降呈非线性增长，且路基自身沉降在总沉降占比中逐步增大，地基沉降占比逐步减小。

（4）调整路基和地基材料参数可以减小路基沉降。沉降与路基填筑材料密度呈正相关线性变化，与弹性模量呈负相关非线性变化，其中减小路基填筑材料密度可以显著降低路基沉降。

（5）通过提高路基压实度可以减小路基沉降；路基填筑速率对路基总沉降影响较小，但是对路基填筑安全影响较大，选择合理的路基填筑速率以保证路基施工的安全性和工期。

参考文献：

[1] 黄永强，李海波，马兴峰，等.路基不均匀沉降对沥青混凝土路面结构影响数值分析[J].公路工程，2012，37(5)：34-40.

[2] 刘美芳，蒋鑫，陈晓丽，等.考虑分层填筑的高路堤沉降变形特性分析[J].交通运输工程与信息学报，2020，18(1)：62-68；77.

[3] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京：人民交通出版社，2007.

[4] 吴维义，姬同旭，李昌龙.基于D-P本构模型的某公路高填方路基沉降规律研究[J].路基工程，2020(3)：137-139；160.

[5] 李刚，郭艳玲.高速公路改扩建新旧路基差异沉降影响因素分析[J].

（下转第164页）