

高速公路厚软土层地基段不同扩建方案 路基沉降的有限元对比分析

常占一, 罗肇剑

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510440)

摘要: 为解决厚软土层地基段高速公路扩建后新旧路基差异沉降过大的问题, 应有效控制路基沉降变形、保障运营安全。以广东某高速公路软基段扩建工程为依托, 结合工程实际, 提出水泥搅拌桩+填土路基、管桩+填土路基、管桩+气泡轻质土路基三种扩建方案, 并通过有限元数值模拟方法对三种方案的路基沉降进行了研究分析。结果表明, 三种方案的路表总沉降、工后沉降和新旧路基差异沉降存在差异, 其中管桩+气泡轻质土路基方案对路表总沉降、工后沉降的控制效果最优, 且新旧路基间差异沉降也小于其他两种方案。研究成果不仅能为该高速公路软基段路基扩建工程提供设计指导, 也对珠三角地区类似工程具有借鉴意义。

关键词: 厚软土层; 高速公路; 扩建工程; 沉降; 有限元分析

中图分类号: U416.14

文献标识码: A

Finite Element Comparative Analysis of Embankment Settlement for Expressway Expansion on Thick Soft Soil Layer Foundation Sections

CHANG Zhanyi, LUO Zhaojian

(Guangdong Provincial Transportation Planning and Design Research Institute
Group Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: To solve the problem of excessive differential settlement between new and existing embankments after expressway expansion in thick soft soil foundation sections, and to effectively control subgrade settlement and ensure operational safety, this study takes an expressway expansion project in Guangdong Province as the engineering background. Three treatment schemes are proposed according to the actual site conditions, namely cement mixing pile with filled embankment, pipe pile with filled embankment, and pipe pile with foamed lightweight soil embankment. Finite element numerical simulation is employed to analyze and compare the embankment settlement performance of the three schemes. The results indicate that the three schemes differ significantly in controlling total surface settlement, post-construction settlement and differential settlement. The scheme of pipe pile combined with foamed lightweight soil embankment presents the best performance in reducing total surface settlement and post-construction settlement. Meanwhile, its differential settlement between new and existing embankments is also smaller than that of the other two schemes. The research results not only provide design guidance for the subgrade expansion of the soft soil foundation sections of this expressway, but also offer valuable references for similar projects in the Pearl River Delta region.

Key words: thick soft soil layer; expressway; expansion project; settlement; finite element analysis

1 引言

随着公路交通行业迅速发展, 部分既有道路

的交通量逐渐超出通行能力, 不能满足日益增长的社会发展需求, 因此公路改扩建成为提高公路通行能力的一种途径^[1]。而由路基拼宽引发的新

收稿日期: 2025-12-16

作者简介: 常占一, 工程师, 硕士, 研究方向为路桥及岩土工程

旧路基差异沉降问题也随之凸显,该问题在厚软土地基路段尤为突出。导致该问题的主要原因是,旧路经过多年运营沉降已基本稳定,而拼宽扩建的路基会对地基土体产生附加压缩荷载,致使新旧路基衔接区域产生不均匀差异沉降,由此诱发路面反射纵缝、折线横坡等病害^[2]。同时,路表水会沿新旧路基衔接处的纵向裂缝渗入路基内部,进而软化路堤土,降低路基土体参数,严重时会引起边坡失稳,影响车辆通行安全。近些年,许多学者对公路扩建路基沉降的诱因和控制措施进行了大量研究,提出影响沉降的主要因素:软土层厚度及埋深、旧路软基处治情况、新旧路基连接部压实度不足、填高和填筑速率等^[3-5]。部分学者利用数值模拟软件对扩建路基沉降进行了研究,其中黄先刚^[6]利用 PLAXIS 软件分析了某公路扩建工程在不同扩建宽度工况下旧路边线外侧路基的变形规律;杨丽珍^[7]利用 ABAQUS 软件分析了新路基作为附加荷载对老路基的变形影响,并提出管桩在处理深厚软基时能较好地控制路基变形;叶红英^[8]采用数值模拟方法分析了路基变形规律,提出新旧路基沉降在通车后仍继续发展。从公路扩建工程全周期考虑,为控制新旧路基连接部差异沉降和工后沉降,保证运营车辆安全,不仅要控制施工质量、加强运营养护,还应当在勘察设计阶段对不同软基扩建方案进行比选,但目前这方面的研究较少。本文以广东某高速公路厚软土层地基段路基扩建工程为依托,结合珠三角地区软基处理经验,提出三种常用的公路扩建软基处理方案,利用有限元方法对扩建路基的沉降进行模拟分析,研究不同处理方案对路基沉降的影响,进而得出最佳方案。

2 软土沉降计算方法

软土主要指具有含水率高、孔隙比大、透水性差、强度低、压缩性强等特性的细粒土,主要分布在我国沿海地区,一般呈软塑至流塑状,常见的有淤泥、淤泥质粉质黏土等。在软土地区修建高速公路时,地基在填筑土体、路面及汽车荷

载等附加应力作用下产生沉降,主要包括瞬时沉降 S_d 、主固结沉降 S_c 和次固结沉降 S_s 。目前,国内主要采用《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中7.7.2条规定的两种软基总沉降计算方法进行计算^[9]:

$$\text{方法一: } S = m_s S_c \quad (1)$$

$$m_s = 0.123 \gamma^{0.7} (\theta H^{0.2} + \nu H) + Y \quad (2)$$

式中, S 为总沉降; m_s 为沉降系数; θ 为地基类型系数; H 为填土高度; γ 为填料重度; ν 为加载速率修正系数; Y 为地质修正系数。

$$\text{方法二: } S = S_d + S_c + S_s \quad (3)$$

式中, S_d 为瞬时沉降; S_c 为主固结沉降; S_s 为次固结沉降。

《公路路基设计规范》中提到主固结沉降 S_c 采用分层总和法计算,固结度采用太沙基一维固结理论计算,该理论仅考虑竖向荷载作用下的单向排水固结变形。但高速公路改扩建工程中,加宽路基一般在既有路基达到15年设计年限后才实施。此时,旧路路基沉降基本趋向稳定,再进行拼接路基时,扩建路基将作为边部荷载施加在旧路路基上,引发新旧路基间差异沉降和地基侧向位移。同时,路基扩建还需考虑旧路软基处理和填筑、旧路运营、扩建软基处理和填筑等分阶段实施的影响。为更贴合实际情况,本文采用二维分析方案对施工、运营、扩建全过程开展模拟,计算工后沉降及新旧路基间的差异沉降,依托有限元数值分析方法,对广东某高速厚软土层地基典型段扩建路基开展数值模拟研究。

3 工程概况

扩建前该高速公路设计速度为120 km/h,其中K1+400—K32+225段既有路基标准横断面宽度为28.0 m。路基组成为:行车道宽 $2 \times 2 \times 3.75$ m + 硬路肩宽 2×4.25 m + 中间带宽3.5 m + 土路肩宽 2×0.5 m,采用双向四车道,既有路基横断面见图1。

高速公路扩建后一般路段采用两侧整体拼宽

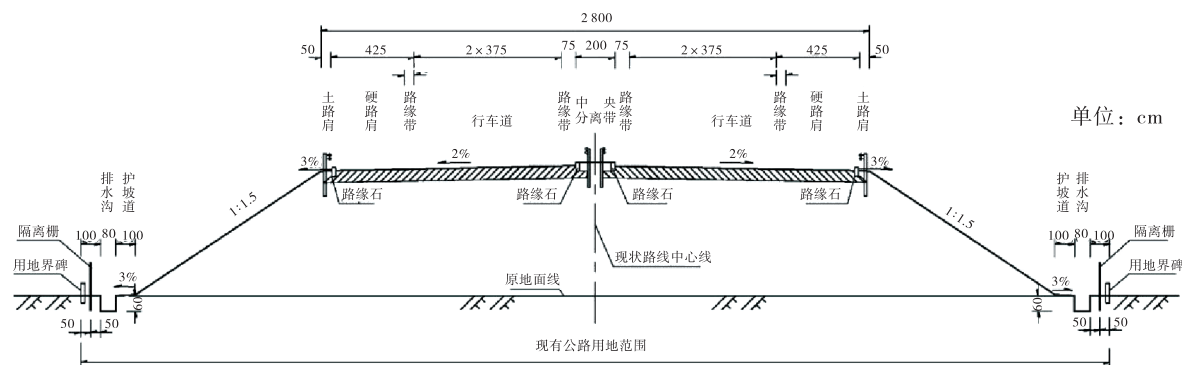


图1 既有路基横断面图

方案，设计速度为 120 km/h，路基标准横断面宽度为 42.0 m。路基采用双向八车道，路基组成为：中央分离带宽 3.0 m、左侧路缘带宽 2 × 0.75 m、

单幅行车道宽 4 × 3.75 m、单幅硬路肩宽 3.0 m、单幅土路肩宽 0.75 m，单侧路基拼宽平均宽度为 7 m，拼宽路基横断面见图 2。

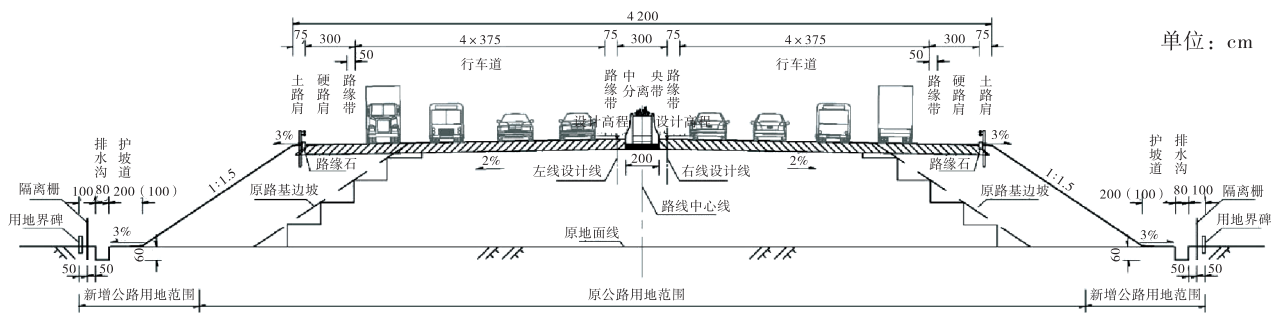


图 2 两侧整体拼宽路基横断面图

4 处理方案

勘察资料显示，该高速公路基底软土主要为淤泥、淤泥质粉质黏土、淤泥质砂、软塑状黏性土等，多分布于平原地段，局部土层厚度较大。复合地基处理断面如图 3 所示，路基填土高度为 6 m，共一级边坡，坡率为 1 : 1.5。地基层层从上往下依次为：3.5 m 素填土（欠压实）、6.0 m 淤泥（饱和流塑状）、9.1 m 淤泥质粉砂（饱和松散）、13.4 m 粉质黏土（可塑状）。旧路采用预应力管桩处理，桩径 400 mm，桩间距为 2.2 m，桩长为 23.6 m，采用矩形布置。桩顶设置 1.4 m × 1.4 m × 0.35 m（长 × 宽 × 厚）的 C30 现浇钢筋混凝土桩帽，并在桩帽顶面设置 50 cm 厚碎石褥垫层；碎石褥垫层顶部设置有土工格栅。

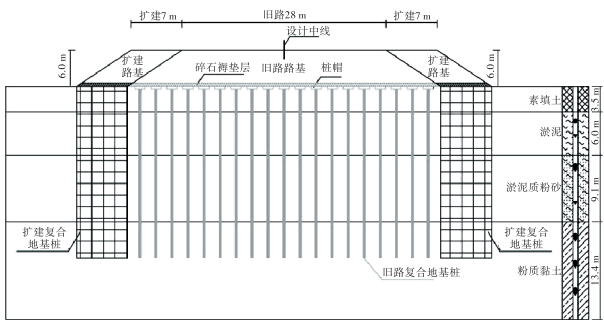


图 3 复合地基处理断面示意图

软基段路基扩建方案需重点考虑软基处理方式和路基填筑材料两大因素。首先，本工点软基埋深为 18.6 m，软土层厚度为 15.1 m，主要为淤泥和淤泥质粉砂，上覆 3.5 m 厚的素填土，下卧层为 13.4 m 厚粉质黏土，结合地质情况和珠三角地区软基处理经验，可采用管桩、水泥搅拌桩等复合地基处理形式。其次，公路路基填筑材料

通常采用路基合格土，但近些年，气泡轻质土凭借重量轻、可直立浇筑的特性，不仅能节约用地、降低征拆成本，还可以有效减少路基填料引起的附加应力，控制工后新老路基间差异沉降，被广泛用作扩建路基的填料^[10-11]，结合上述因素，本文分别提出以下三个处理方案。

(1) 方案一：双向水泥搅拌桩复合地基桩 + 填土路基方案。平均桩长需满足嵌入持力层深度不小于 1 m，单桩长度为 20 m，桩间距为 1.2 m，桩径为 0.4 m，采用矩形布置，桩顶设置 50 cm 厚碎石褥垫层和一层 GGR/SP/BW100 - 100 双向钢塑土工格栅。桩体固化剂材料选用 P · O42.5 普通硅酸盐水泥，每米水泥掺量不小于 60 kg，采用四搅两喷施工工艺，浆液的水灰比取 0.5 ~ 0.7，桩体芯样 28 天无侧限抗压强度设计值不小于 0.8 MPa。填土材料采用正常路基土，该水泥搅拌桩 + 填土路基扩建断面见图 4。

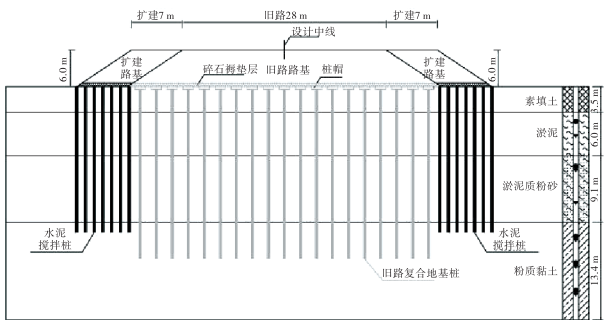


图 4 水泥搅拌桩 + 填土路基扩建断面图

(2) 方案二：管桩复合地基桩 + 填土路基方案。桩长按进入持力层不小于 5 m 控制，为 23.6 m，桩间距为 2.2 m，桩径为 0.4 m，采用矩形布置，桩顶设置 1.4 m × 1.4 m × 0.35 m（长 × 宽 × 厚）的 C30 现浇钢筋混凝土桩帽和 50 cm 厚

碎石褥垫层, 碎石垫层顶铺设一层 GGR/SP/BW100-100 双向钢塑土工格栅。填土材料采用正常路基土, 该管桩+填土路基扩建断面见图 5。管桩为预应力高强混凝土管桩, 桩身混凝土强度等级为 C80, 采用静压法或锤击法施工, 桩头和桩帽配筋大样见图 6。

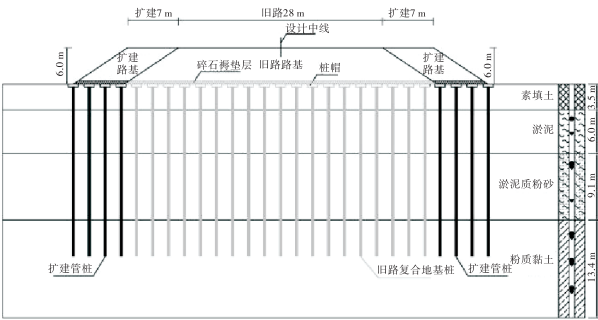


图5 管桩+填土路基扩建断面图

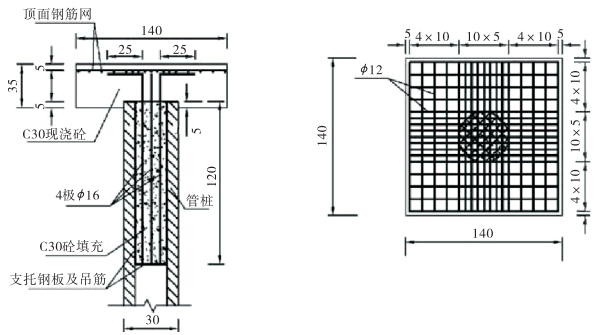


图6 桩头、桩帽配筋大样图

(3) 方案三: 管桩复合地基桩+气泡轻质土路基方案。平均桩长为 23.6 m, 桩间距为 2.2 m, 桩径为 0.4 m, 采用矩形布置。为减少路基材料

重量所造成的沉降, 填土材料采用气泡轻质土, 方案三扩建断面如图 7 所示。气泡轻质土基底易发生不均匀沉降, 产生应力集中并引发开裂, 为防范该问题, 在气泡轻质土路基底部(即桩帽顶)设置 35 cm 厚刚性筏板基础, 筏板采用 C30 现浇钢筋混凝土结构, 配筋大样见图 8。采用该方案需注意: 在气泡轻质土路基填筑前需对旧路边坡进行清表和开挖台阶处理, 台阶范围内的路基压实度应满足规范要求, 避免因压实不足而引起轻质土或路面拉裂的情况。开挖台阶后还应及时喷射 5 cm 厚的 C15 混凝土进行临时防护。开挖台阶宽度为 1.1 m, 台阶高度为 1 m, 每个台阶中间设置一根直径 25 mm 锚筋, 采用 HRB400 螺旋纹钢筋, 长 80 cm, 纵向间距 2 m。在轻质土底部以上 50 cm 和顶部以下 50 cm、100 cm 位置设置镀锌钢筋网片, 以提高轻质土路基整体性。气泡轻质土路基复合地基处理断面见图 9。

5 计算参数

(1) 网格划分与边界条件。既有路基顶面宽为 28 m, 采用两侧扩建, 左右两侧各扩建 7 m, 扩建后路基顶面宽度为 42 m。采用 Midas GTS NX 有限元软件模拟计算路基沉降, 计算模型宽度取 157 m, 高度取 32 m, 边坡坡率为 1:1.5, 路基高度为 6 m。计算模型左右侧边界为横向固定约束, 底部为纵向、横向固定约束, 初见水位为地面以下 0.8 m, 稳定水位为地面以下 1 m。网格划分横断面见图 10。

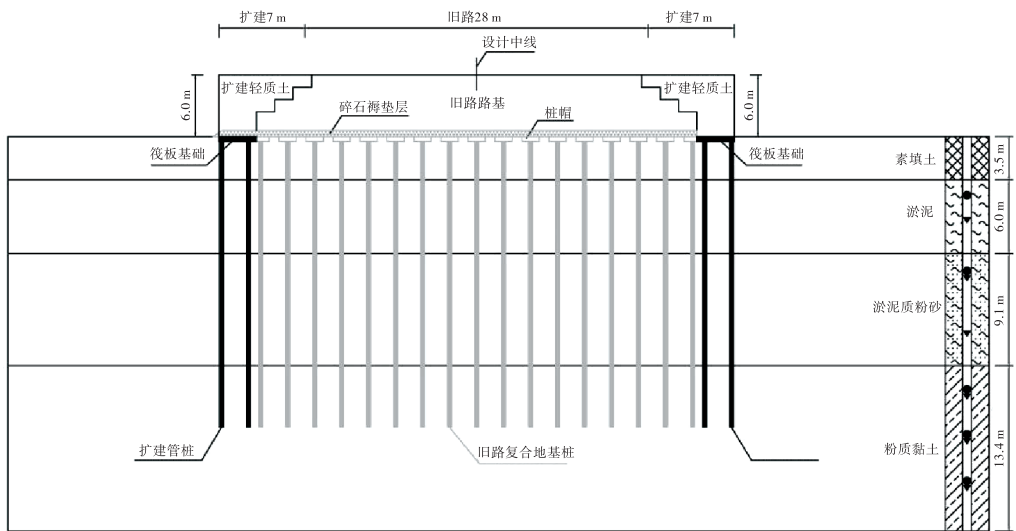


图7 管桩+气泡轻质土路基扩建断面图

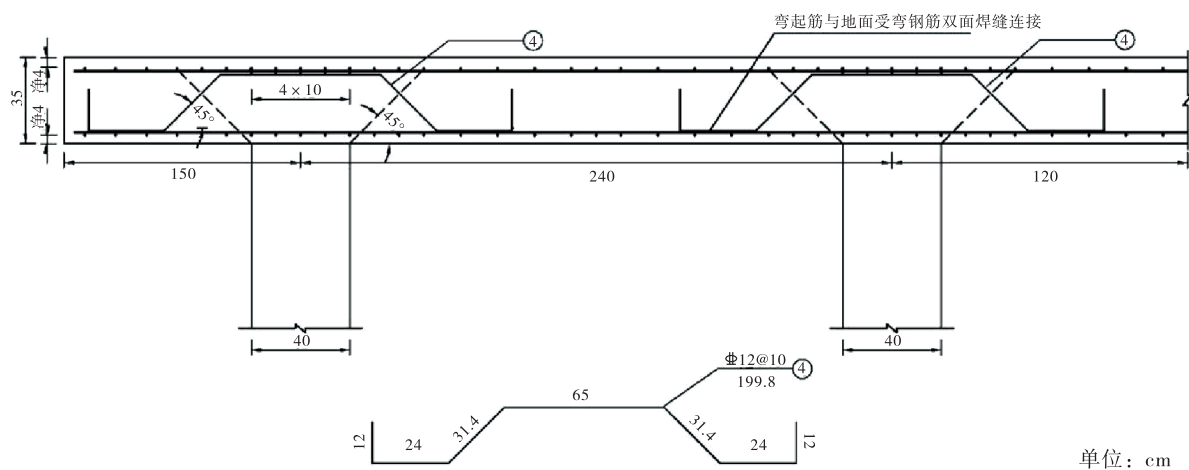


图 8 筏板基础配筋大样图

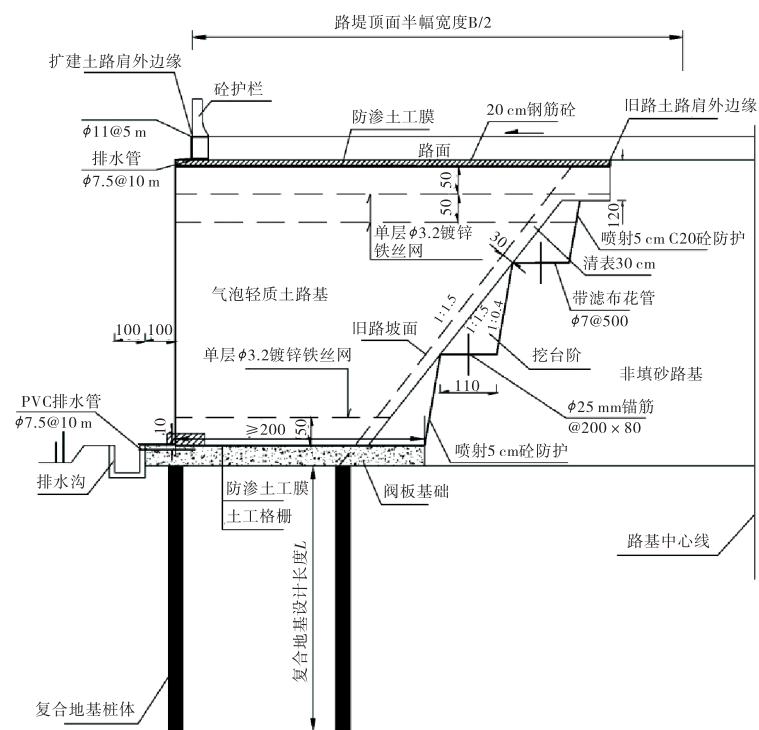
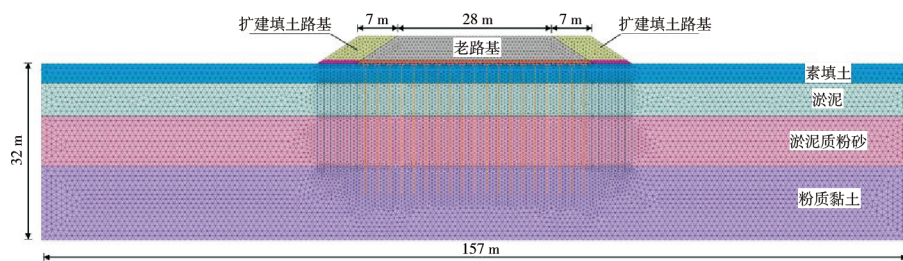


图9 气泡轻质土路基复合地基处理断面图



(a) 方案一

图 10 网格划分断面图

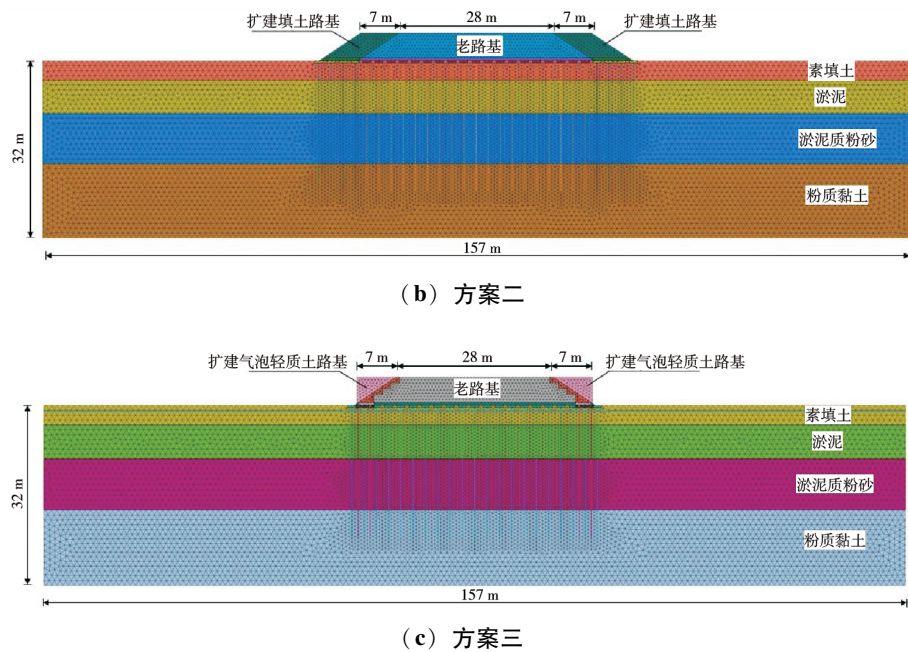


图 10 网格划分断面图 (续)

(2) 荷载历程。为模拟高速公路从新建到扩建后运营 15 年的全过程, 主要荷载历程考虑以下几个阶段: 旧路施工前初始固结期→旧路施工期 (4 年)→旧路运营期 (15 年)→扩建施工期 (4 年)→扩建后运营期 (15 年)。

(3) 土体参数。地基土层由上到下依次为素填土、淤泥、淤泥质粉砂、粉质黏土。计算中淤泥、淤泥质粉砂两类软土层采用修正剑桥模型; 路基填土、碎石褥垫层、素填土、粉质黏土采用莫尔-库仑模型; 气泡轻质土、桩帽、水泥搅拌桩、管桩、筏板基础采用弹性模型, 具体参数见表 1。

表 1 土体和桩的力学参数

土层	γ / (kN/m^3)	C / kPa	ψ / ($^\circ$)	μ	E / MPa	k / (m/d)
路基填土	20	35	20	0.4	60	—
碎石垫层	21	3	32	0.35	21	0.09
素填土	19.3	17	19	0.3	4.2	4.60×10^{-4}
淤泥	17.1	8	5	0.35	2.0	1.10×10^{-6}
淤泥质粉砂	18.3	5	12	0.35	3.5	3.20×10^{-4}
粉质黏土	19.2	27	23	0.3	15.0	5.30×10^{-5}
气泡轻质土	6	—	—	0.3	10.5	—
筏板基础	25	—	—	0.2	30 000	—
管桩	25	—	—	0.2	38 000	—
桩帽	25	—	—	0.2	30 000	—
水泥搅拌桩	20.5	—	—	0.3	80	—

6 计算结果分析

6.1 路表总沉降

旧路不扩建的情况下, 旧路路基继续运营 19 年 (对应扩建时的 4 年施工期 + 通车后 15 年运

营期) 后总沉降云图见图 11。从图中可以看出, 最大总沉降位于路基顶面中心附近, 约为 9.6 cm, 并沿水平方向向两侧逐渐变小, 且随着深度加深而逐渐变小。这表明路表中心基底的附加应力大于两侧, 随着深度增加, 附加应力的影响逐渐减弱。

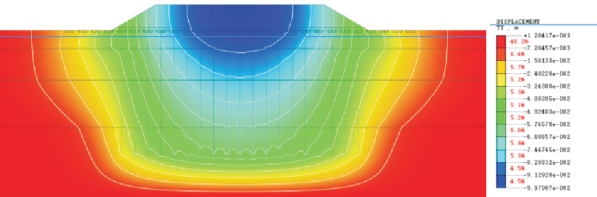


图 11 旧路不扩建时路基继续运营 19 年后的总沉降云图

旧路扩建情况下, 三种路基扩建方案在通车 15 年运营期后累计总沉降云图见图 12。图 12 (a) 为采用方案一扩建后运营 15 年的总沉降云图, 最大值位于两侧扩建路基顶面土路肩附近, 约为 18.3 cm。图 12 (b) 为方案二扩建后运营 15 年的总沉降云图, 最大值位于两侧扩建路基顶面中间处附近, 约为 14.9 cm。图 12 (c) 为方案三扩建后运营 15 年的总沉降云图, 最大值位于旧路路表中心处附近, 约为 10.1 cm。

为研究三种方案路表总沉降的分布规律, 在计算模型路基顶面, 从左到右每间隔 1 米提取 1 个测点, 旧路不扩建工况共提取了 28 个测点的路表总沉降, 旧路扩建的三种工况分别提取 43 个测点的路表总沉降, 四种工况运营 15 年后不同测点的总沉降见图 13。

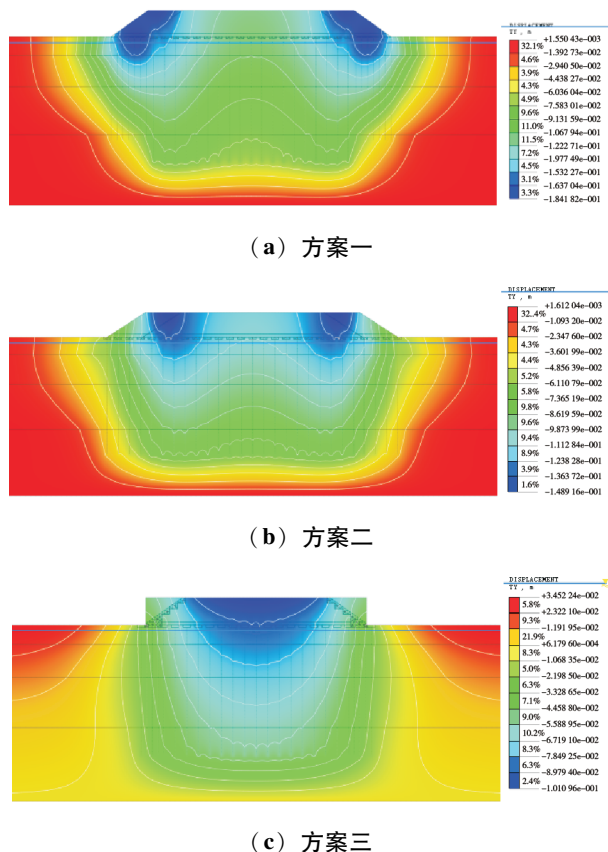


图12 通车15年后公路扩建的总沉降云图

从图13整体来看,旧路不扩建和方案三的累计沉降曲线呈“U”形;方案一的累计沉降曲线呈“凸”形;方案二的总沉降曲线呈“W”形。对比总沉降量可得, $S_{\text{旧路不扩建}} < S_{\text{方案三}} < S_{\text{方案二}} < S_{\text{方案一}}$,旧路不扩建工况的总沉降最小;扩建方案中,方案三控制路表总沉降的效果最好,主要是因为旧路不扩建工况无新增填土附加荷载,而扩建方案均有扩建填土新增附加荷载,表明路堤填土产生的附加应力是影响软基沉降的主要因素之一。

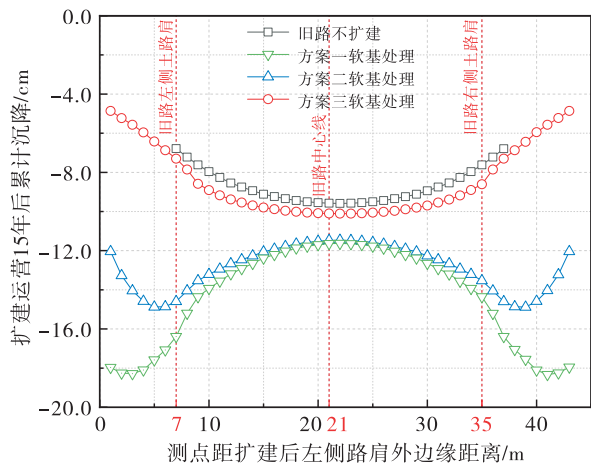


图13 不同方案全过程路表总沉降

6.2 路表工后沉降

采用三种方案扩建并运营15年后的工后沉降云图见图14。图14(a)、图14(b)为采用方案一和方案二扩建并运营15年的工后沉降云图,最大工后沉降位置均位于两侧扩建路基顶面中间附近,分别约为8.6 cm和6.6 cm。图14(c)为方案三扩建后运营15年的工后沉降云图,最大工后沉降位于扩建路表土路肩附近,约为1.5 cm。

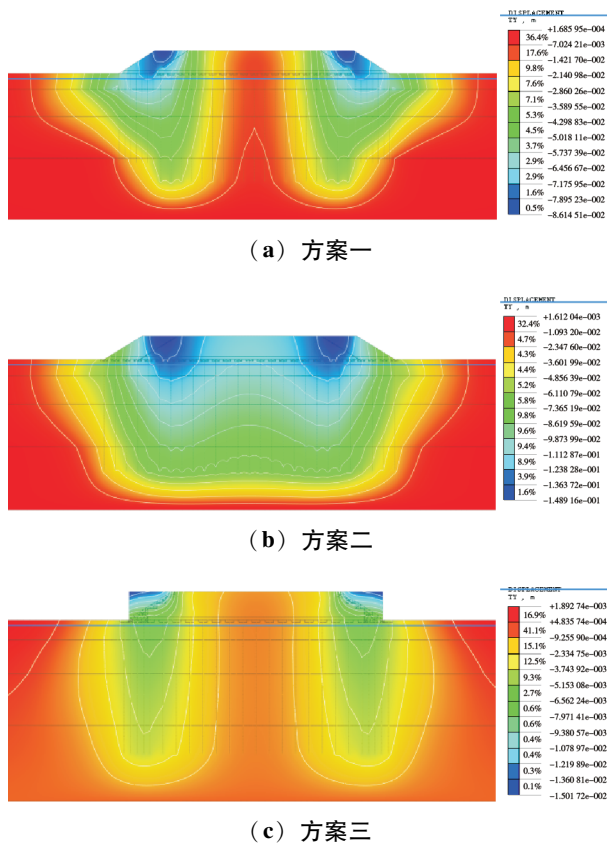


图14 扩建后工后沉降云图

为研究三种方案路表工后沉降的分布规律,按6.1节中的测点提取工后沉降,四种工况下运营15年后的工后沉降见图15。

由图15可知,旧路不扩建时工后沉降基本为零,表明旧路经过多年运营,沉降基本稳定,无新增沉降;方案一和方案二的工后沉降曲线呈“W”形;方案三的工后沉降曲线呈“微凸”形。对比工后沉降量可得, $S_{\text{旧路不扩建}} < S_{\text{方案三}} < S_{\text{方案二}} < S_{\text{方案一}}$,扩建方案中,方案三对控制路表工后沉降的效果最好。

6.3 路表工后差异沉降

该高速公路分别按三个方案扩建并运营15年后,扩建范围内路表各测点与原旧路土路肩边缘测点的差异沉降见图16。

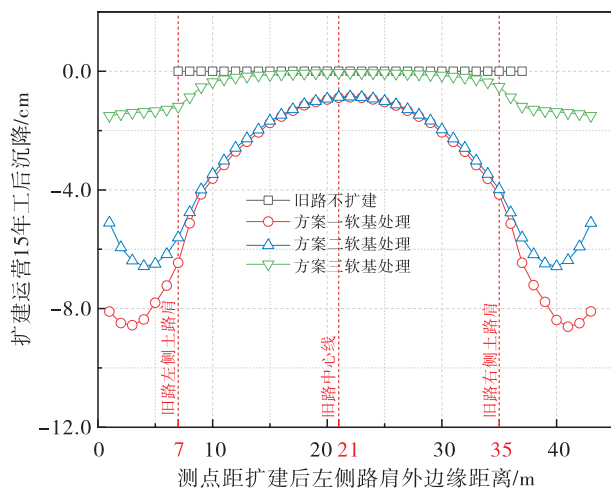


图15 不同方案扩建后路表工后沉降

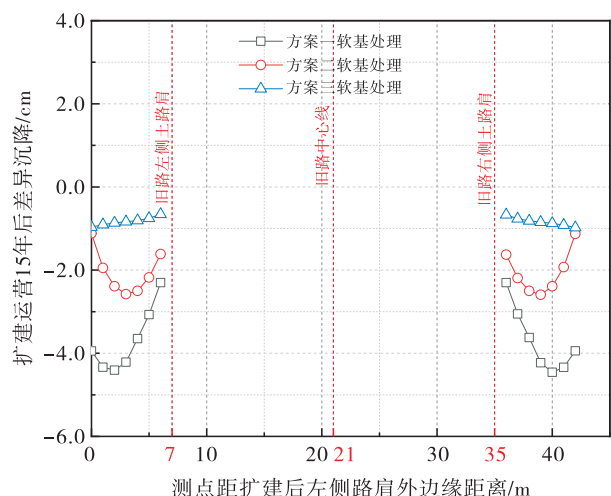


图16 不同方案扩建后新旧路基间差异沉降

从图16整体来看,方案一和方案二的工后沉降曲线均呈“V”形,拼宽范围路表的最大差异沉降位于扩建路基中心附近,分别约为4.5 cm和2.6 cm。方案三的工后沉降曲线由路基中心向外呈“斜直线”形,拼宽范围路表的差异沉降随测点到旧路土路肩距离的增大而增大,最大差异沉降位置位于扩建后土路肩边缘附近,约为1.0 cm。整体来看工后沉降量大小关系为: $S_{\text{方案三}} < S_{\text{方案二}} < S_{\text{方案一}}$,在扩建的三个方案中,方案三对控制路表差异沉降的效果最好。

6.4 方案对比分析

6.4.1 沉降对比

从图13、图15、图16可以看出,扩建路基宽度范围内,三种扩建方案路表的总沉降、工后沉降和差异沉降均满足: $S_{\text{方案三}} < S_{\text{方案二}} < S_{\text{方案一}}$ 。这表明方案三路基的填筑材料轻质土自重小于方案一、方案二的路基土,因此方案三的总沉降、工后沉降和差异沉降相对较小。方案一和方案二

虽然均为填土路基,但采用水泥搅拌桩处理的方案一,其沉降要大于采用管桩处理的方案二,间接表明管桩控制总沉降、工后沉降和差异沉降的效果要好于水泥搅拌桩。旧路路基宽度范围内,路表的总沉降、工后沉降和差异沉降大小关系均为: $S_{\text{方案三}} < S_{\text{方案二}} < S_{\text{方案一}}$,主要是因为扩建路基填料重力作为旧路边部荷载,由此产生的附加应力大小直接影响旧路路表的总沉降、工后沉降和差异沉降。方案三扩建路基采用轻质土填筑,材料自重较轻,对地基的附加应力相对较小,因而所产生的沉降量也就较小。而方案一和方案二的扩建路基采用路基土作为填筑材料,其对地基的附加应力比方案三大,总沉降、工后沉降和差异沉降也相应较大,间接表明扩建路基填料采用轻质土控制总沉降、工后沉降和差异沉降的效果相对较好。

6.4.2 造价和工期对比

造价方面,该高速公路位于城区,两侧房屋较多,方案一和方案二需征地拆迁,而方案三无需征拆。经初步测算,方案一每延米造价约4.2万元,方案二每延米造价约6.5万元,方案三每延米造价约6.2万元。方案二和方案三的造价基本相当,均高于方案一的造价。

工期方面,三种方案在软基处理工程的工期差异较小。在路基填筑时,因全线无挖方,需借土分层填筑,方案一、方案二的工期受土源影响较大,填筑后路基还需待沉降稳定后才能进行路面施工,而方案三采用外购气泡轻质土,施工工艺为泵送浇筑、自流平成型,无需碾压作业可连续施工,作业效率更高。该方案材料容重小,路面施工前所需沉降预留周期短,因此三种扩建方案里,方案三的整体工期最短。

综上,方案一造价较低,但该方案对扩建后路基沉降的控制效果较差,工期较长;方案二与方案三造价基本相当,但方案二工期要长于方案三,且方案三对扩建后路基沉降的控制效果要优于方案二。考虑该高速公路位于城区,扩建时用地受限,为有效控制新旧路基间的差异沉降,减少远期运营时新旧路差异沉降引起的路面病害,提高行车舒适性,推荐采用方案三,即管桩复合地基桩+气泡轻质土路基方案。

7 结论

通过上述对三种方案处理后路表的总沉降、工后沉降和差异沉降的对比分析,得出以下结论:

(下转第50页)

- [6] WANG X, LIU J. Multiscale parallel algorithm for early detection of tomato gray mold in a complex natural environment [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 620273.
- [7] WANG Y, SUN Y, LIU Z, et al. Dynamic graph CNN for learning on point clouds [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(5): 1-12.
- [8] NAIRA E, WZEL A, MOHAMMED E. A multi-class brain tumor grading system based on histopathological images using a hybrid YOLO and RESNET networks [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1), 4584-4596.
- [9] 李子豪, 王正平, 贺云涛. 基于自适应协同注意力机制的航拍密集小目标检测算法 [J]. *航空学报*, 2023, 44(13): 244-254.
- [10] HE W, LI C, NIE X, et al. Recognition and detection of aero-engine blade damage based on Improved CascadeMask R-CNN [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(17): 5124-5133.
- [11] 崔晓宁, 王起才, 李盛, 等. 基于 YOLO-v5 的双块式轨枕裂缝智能识别 [J]. *铁道学报*, 2022, 44(4): 104-111.
- [12] 周中, 闫龙宾, 张俊杰, 等. 基于自注意力机制与卷积神经网络的隧道衬砌裂缝智能检测 [J]. *铁道学报*, 2024, 46(9): 182-192.
- [13] LI T, LIU G, TAN S. Superficial defect detection for concrete bridges using YOLOv8 with attention mechanism and deformation convolution [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(13): 1-18.
- [14] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-Excitation Networks [C]. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, 7132-7141.
- [15] WANG Q, WU B, ZHU P, et al. ECA-Net: efficient channel attention for deep convolutional neural networks [C]. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, 11534-11542.
- [16] WOO S, PARK J, LEE J, et al. CBAM: convolutional block attention module [C]. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018: 3-19.
- [17] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design [C]. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021: 13713-13722.
- [18] 黄承孝, 刘娉婷. 基于 CA-YOLOv5s 的水下目标识别方法研究 [J]. *海洋技术学报*, 2024, 43(3): 17-24.
- [19] 仲重光. 集成电路晶圆图像针印缺陷检测研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2024.

(上接第 15 页)

(1) 软土路基扩建时, 扩建范围内路基土作为新增附加荷载是导致路基沉降的主要因素。

(2) 软土路基扩建并运营 15 年后, 对比分析不同方案处理的总沉降、工后沉降和差异沉降, 得出地基采用管桩复合地基处理的效果要优于水泥搅拌桩。扩建路基填料采用气泡轻质土对差异沉降的控制效果要优于路基填土。

(3) 珠三角地区软基段高速公路路基扩建时, 采用管桩复合地基桩 + 气泡轻质土路基填筑的处理方案, 可以有效控制总沉降、工后沉降和差异沉降, 可为类似工程提供技术参考。

参考文献:

- [1] 廖朝华, 王家强. 高速公路扩建工程主要技术问题及对策 [C]// 中国公路学会. 2005 年全国公路勘察设计技术交流会议论文集. 武汉: 中交第二公路勘察设计研究院, 2005: 15-22.
- [2] 胡志强. 路基加宽不均匀沉降及其对路面结构应力影响分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [3] 曹海莹, 窦远明, 刘熙媛, 等. 影响软基沉降因素的分解与研究 [J]. *河北工业大学学报*, 2005(6): 82-86.
- [4] 路炜. 高速公路扩建工程差异沉降控制技术 [J]. *交通世界*, 2020(25): 76-77.
- [5] 于恒, 汪益敏, 王兆阳. 旧路软基处治欠佳道路扩建后路面裂缝形成机理研究 [J]. *中外公路*, 2017, 37(2): 18-23.
- [6] 黄先刚. 公路改扩建中新旧路基不均匀沉降的有限元模拟及处治研究 [J]. *公路交通科技 (应用技术版)*, 2020, 16(1): 74-75.
- [7] 杨丽珍. 软土地区高速公路扩建工程复合地基差异沉降数值模拟 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [8] 叶红英, 张再武, 张艺. 软土地基上高速公路扩建工程的三维有限元模拟 [J]. *交通科技*, 2017(2): 25-27.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [10] 周旺. 泡沫轻质土在道路扩建工程中的应用分析 [J]. *西部交通科技*, 2023(5): 42-44, 78.
- [11] 王鹏程. 泡沫轻质土在道路扩建工程中的应用 [J]. *工程建设与设计*, 2022(16): 188-190.