

浅层固化层应力扩散效果分析及优化设计

周俊杰

(安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 就地固化技术形成的人造硬壳层的实际处理效果受设计施工影响大。以南京某软基就地固化处理段为工程背景, 建立 Plaxis 2D 有限元模型, 通过不同浅层固化层设计参数计算结果对比, 分析低路堤荷载作用下地基附加应力系数与路基沉降分布规律, 探究固化层的应力扩散效果, 同时结合下卧软土层超静孔压的消散特征, 对现有固化方案进行优化设计。结果表明, 固化层的抗弯刚度是应力扩散效果的主要控制因素, 固化层厚度小于 1 m、宽度超过路基宽度或与下卧软土接触面 R_{inter} 大于 0.4, 对应的固化层模量或厚度的变化对路基沉降影响很小, 同时综合固化层应力扩散效果、路基沉降影响因素及地基孔压消散规律, 提出对固化层设计的合理性优化建议。

关键词: 浅层固化; 应力扩散; 路基沉降; 超静孔压

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0070-04

Analysis of Stress Diffusion Effect in Shallow Solidified Layer and Optimization Design

ZHOU Junjie

(Anhui Transport Consulting and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: The actual treatment effect of artificial hard shell formed by the local curing technology is greatly affected by the design and construction. Based on the local curing treatment section of a soft foundation in Nanjing, a Plaxis 2D finite element model is established. Through the comparison of the design parameters of different shallow solidified layers, the distribution of additional subgrade stress coefficient and roadbed settlement under low embankment load is analyzed. The stress diffusion effect of the solidified layer is explored. At the same time, combined with the dissipation characteristics of the superstatic pore pressure in the underlying soft soil layer, the existing curing schemes are optimized and designed. The results show that the bending stiffness of the solidified layer is the main factor to control the effect of stress diffusion. The thickness of the solidified layer is less than 1m, the width exceeds the width of the roadbed or the contact surface R_{inter} with the underlying soft soil is more than 0.4. The corresponding change of the modulus or thickness of the solidified layer has little effect on the settlement of the roadbed. At the same time, by synthesizing the stress diffusion effect of the solidified layer, the influencing factors of the roadbed settlement and the dissipation law of the subgrade pore pressure, the reasonable optimization suggestions are put forward for the design of the solidified layer.

Keywords: shallow solidification; stress diffusion; roadbed settlement; superstatic pore pressure

0 引言

随着高速交通的快速发展, 软土地基沉降问题成为道路建设周期中的重点控制对象, 而对于南方水网地区, 池塘、沼泽等所含的淤泥质土含水率高、孔隙比大, 基本呈流动状态, 是道路工程中处理的重难点问题^[1]。传统清淤处置不仅会耗费巨大工程量, 城市废弃淤泥土的无害化处理也是一大

难题^[2-3]。

通过就地固化技术对深厚淤泥土的表层掺入适量固化剂, 同时进行快速机械硬化处理, 在淤泥表层形成具有一定厚度和强度的人工硬壳层(MMC)^[4]。现有研究表明, 道路中硬壳层的存在会在路基顶部形成类似“梁体”的存在, 抗弯和抗剪强度较大, 能够有效对上部路堤的附加荷载进行应力扩散作用, 匡志平^[5]、王颖^[6]、刘青松^[7]等基于模型试验, 说明浅层固化形成的人工硬壳层能够起到显著减小下部软土的附加应力系数, 增大地基极限承载力的作用, 刘建民^[8]、王晓谋^[9]等认为不同处理深度和施工参数,

收稿日期: 2025-11-13

作者简介: 周俊杰(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程设计工作。

在提高固化层强度、稳定性和沉降协调性方面均存在一定差异。

上述研究均说明,对软土的浅层固化处理,能够大大增强地基表层软土的抗弯刚度,提高承载能力,同时减小下卧软土的附加应力系数与路基沉降变形。然而,固化层的长期存在,导致下卧深层软土的排水路径受到堵塞,固结过程受到抑制,施工期会在固化区底部形成较大的超静孔隙水压力。而由于渗透过程的限制,超静孔压只能在长期运营过程中缓慢消散,从而产生较大的工后沉降^[10-14],导致工程质量下降,造成较大的经济损失和社会影响。

鉴于此,本文建立低路堤软土地基就地浅层固化处理工程的二维有限元模型,分析固化层性状对地基附加应力系数和路基沉降量的影响,同时根据下卧软土层超静孔压的消散规律,提出对现有就地固化方案的合理性优化建议,以期对软土浅层固化的设计施工提供依据。

1 建立浅层固化层数值模型

低路堤浅层固化工程可简化为二维平面问题,以软土层一定深度和宽度作为研究的典型单元体,建立 Plaxis 2D 有限元模型。算例模型尺寸:软土层采用均质土层,尺寸为 120 m×30 m,路基采用低路堤形式,高度为 2 m,横断面底部长 40 m,地基浅层固化层从路堤坡脚两侧分别向外延伸 20 m,如图 1 所示。

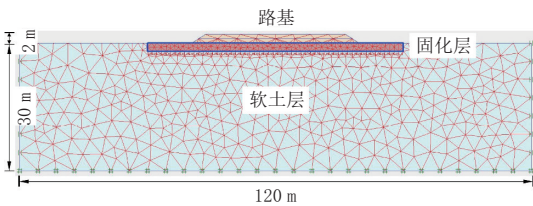


图1 有限元网格

以南京某软基就地固化处理段为工程背景,土体本构为 Mohr-Coulomb 模型,假定土体横向与竖向渗透系数相同,固化层渗透系数相较于土体可忽略不计,故设置为完全不透水,且根据不同的固化材料、固化方式会产生不同的固化层性质,具体参数如表 1 所示。

表 1 模型计算参数

类型	弹性模量 E MPa	泊松比 ν	内摩擦角	黏聚力 c kPa	渗透系数 m/d
下卧软土	3.5	0.3	15	20	8.64×10^{-4}
固化层	20~400	0.22	30	200	0
路堤填土	4.0	0.25	25	10	0.01

2 浅层固化应力扩散作用

对淤泥质软基进行浅层固化,最终会得到一层介于下卧软土地基和低路堤之间的人工硬壳层,且由于低路堤高度较低,路基工作区范围往往会深入地基层中^[11],人工硬壳层的存在会降低下卧软土层的附加应力,能够有效减小地基沉降变形。通过对比不同固化层参数,分析浅层固化形成的人工硬壳层对应力扩散作用的影响,分析路堤中心竖向不同深度地基附加应力系数随深度的分布情况进行进一步说明。

图 2 为固化层厚度 2 m 时不同模量固化层的应力扩散效果的对比,可知固化层的存在能够显著减小下卧软土层的附加应力系数,均质地基浅层部分 2 m 范围内附加应力系数达到 1 左右,而不加处理的均质地基抵抗变形能力较弱,往往会产生过大的沉降变形。而固化层的存在能够显著减小深层地基软土的附加应力,增大地基承载力,应力扩散作用明显,且固化层模量越大,应力扩散的效果越好,但过大的固化层模量对附加应力系数增大的效果并不明显。

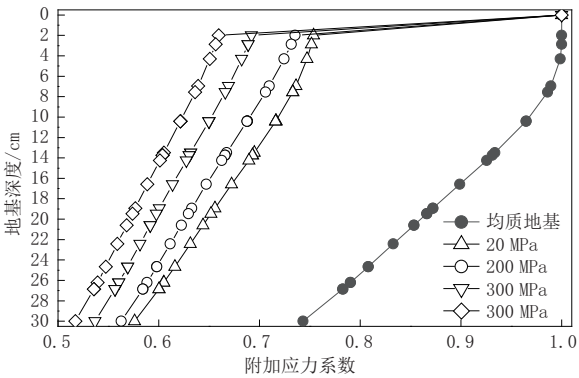


图2 不同模量固化层地基附加应力系数随深度分布

由图 3 可知,浅层固化层厚度会显著影响地基附加应力随深度变化,说明固化层厚度越大,抗弯刚度越大,抵抗上部荷载变形能力越强,应力扩散的效果越好,故上部荷载传递至下卧软土层的附加应力越小,附加应力系数随之变小。同时可以看出,当浅层固化层厚度大于 3.5 m 后,不同深度处的下卧软土层的附加应力系数均不超过 0.2,说明固化层厚度达到一定厚度后,上部荷载对下卧软土的影响很小,可以忽略不计。

由表 2 可知,水泥掺量(表征固化层强度)和固化层厚均对处理造价影响显著。考虑到固化层厚度对附加应力较小更为显著,设计时应在保证造价不

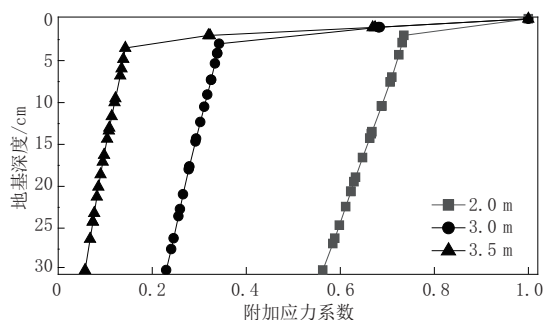


图3 不同厚度固化层地基附加应力系数随深度分布

增的同时,适当增大固化层厚度,减小水泥掺量,以达到更优的应力扩散效果。

表2 不同固化层水泥掺量与固化厚度道路每延米造价对比

固化层厚度	水泥掺量		
	5%	8%	10%
2.0 m	7 000	11 200	14 000
3.0 m	10 500	16 800	21 000
3.5 m	12 250	19 600	24 500

注:表中造价按照计算模型尺寸和南京地区水泥当月造价计算。

3 浅层固化对路基沉降影响规律分析

在浅层软土层设置固化层的主要作用在于减少路基沉降。软土地基沉降变形是道路建设过程中的控制重点,通过对比不同固化层性状条件下路基变形特征,分析浅层固化层对路基沉降的影响规律。

如图4所示,固化层模量与厚度的增加均会减小路基最终沉降量,说明固化层的抗弯刚度是抑制路基沉降的关键因素。当固化层厚度小于1 m的情况下,模量的增加并不会使路基明显下降,说明固化层必须达到足够厚度,才能充分发挥人工硬壳层的应力扩散作用。随着固化层厚度的增加,沉降量随模量的增大速率逐渐减小,说明固化层厚度越大,越能够充分发挥固化层自身属性,能够为固化层设计提供参考。

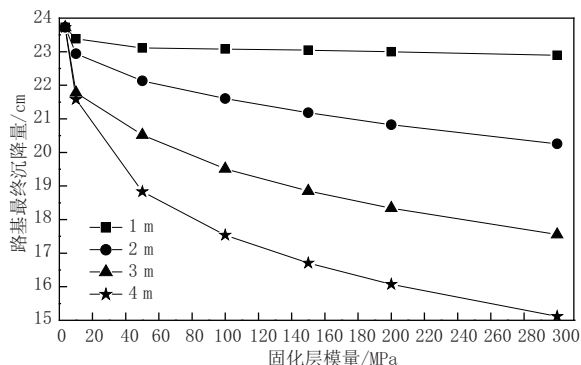


图4 不同固化层模量和厚度下路基最终沉降量分布

如图5所示,固化宽度表明了应力扩散范围的大小,说明扩散范围约大,路基沉降越小。但当单侧固

化层宽度超过20 m(即为路基底部宽度)后,宽度的继续增大对路基沉降影响较小。随着固化层厚度的变化,此种影响减小的结果并不会改变。然而,实际工程中往往根据现场施工条件,固化区会在路基坡脚两侧分别向外延伸一段距离。综上可知,在实际建设过程中,可以对固化层不同位置设计不同的厚度,以达到最佳的沉降控制效果和经济性。

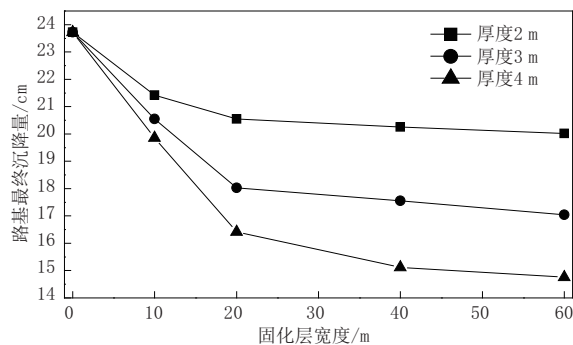


图5 不同固化层宽度(单侧)的路基最终沉降量分布

Plaxis 对刚柔接触面使用的弹塑性模型为:

当界面处于弹性状态时: $|\tau| < \sigma_n \tan \phi_i + c_i$

当界面处于塑性状态时: $|\tau| = \sigma_n \tan \phi_i + c_i$

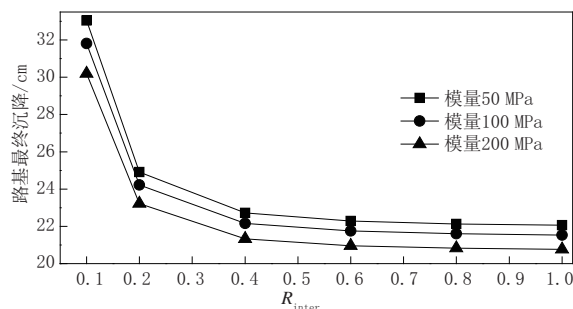
式中: ϕ_i 和 c_i 分别为界面的摩擦角和黏聚力。

软件使用折减因子 R_{inter} 进行土体界面强度折减:

$$\begin{cases} \phi_i = R_{\text{inter}} c_{\text{soil}} \\ \tan \phi_i = R_{\text{inter}} \tan \phi_{\text{soil}} \end{cases}$$

当 $R_{\text{inter}}=1$ 时,接触面为绝对刚性;当 $R_{\text{inter}}<1$ 时,接触面变为柔性。 R_{inter} 值的大小,取决于软土与固化层的表面参数。

图6反映了不同界面特性和固化层模量下的路基最终沉降量分布情况。从中可以看出,当下卧软土与固化层界面 $R_{\text{inter}}>0.4$,界面特性的变化不会对路基沉降造成影响,且不会随固化层模量的增加而改变,说明界面特性对沉降的影响与固化层刚度无关。

图6 不同 R_{inter} 的路基最终沉降量分布

4 下卧层孔隙水压力消散规律及优化设计

较大的固化层模量与厚度虽然能够增加浅层软

土区的抗弯刚度,减小路基沉降,然而由于固化后的软土几乎不能排水,渗透系数趋近于0,严重抑制孔隙水压消散过程。选取地基深度2 m处路基中部、坡脚和固化层外三个位置处的超静孔隙水压力随时间变化作为研究对象,路堤高度与固化层厚度均为2 m,固化层向路基坡脚两侧分别延伸20 m,固化层模量为20 MPa。施工步骤为:固化层施工(30 d);第一层路堤(1 m)施工(15 d);第二层路堤(1 m)施工(15 d);固结(5 480 d)。

如图7所示,在上部路基附加应力长期作用下,下卧软土由于上部浅层固化层的存在,排水通道阻塞,在固化层底部产生较大的超静孔隙水压力,在建设期结束后仍然保持较大的水压。随着运营期上部荷载的长期作用,固化层下方超静孔压缓慢消散,但是直至15年后依然存在8 kPa左右的孔压,工后沉降随持续消散的超静孔压不断增大,最终出现工后沉降超限问题。

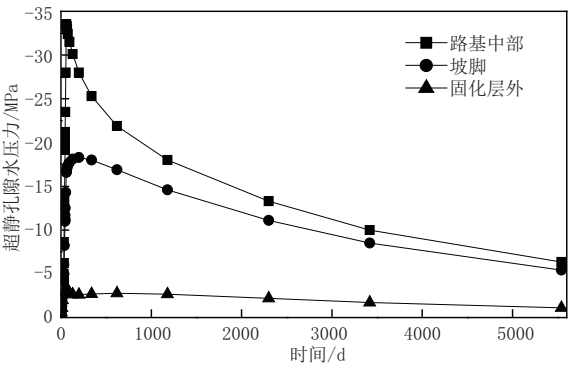


图7 固化层与下卧软土交界处超孔隙水压力分布

针对上述问题,采取以下方案:对于下卧软土附加应力系数较大(固化层抗弯强度较弱)的浅层固化层,固化层施工完成后,在固化层中钻孔,置入塑料排水板,按照6 m×6 m正方形布置,长度贯穿固化层,延伸至深厚软土层中,塑料排水板总长度设置为20 m,如图8所示。

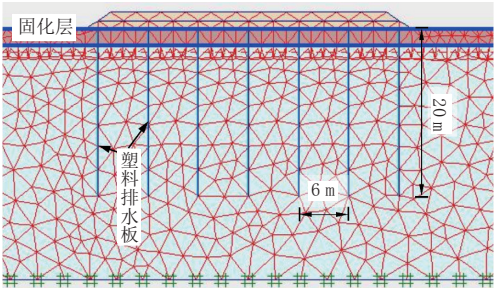


图8 塑料排水板位置分布

图8为塑料排水板在固化层和下卧深厚软土层中的设置情况。在固化层和软土层中设置间距较大的塑料排水板,既不会对固化层的应力扩散作用产

生明显影响,又能够使下卧软土层快速固结。

如图9所示,设置塑料排水板后,路基中部和坡脚位置的地基中,超孔隙水压力迅速消散,均在填筑期结束后迅速消散,对工后沉降基本没有影响,而固化层外由于没有改变排水方式,对超静孔压的消散影响较小。

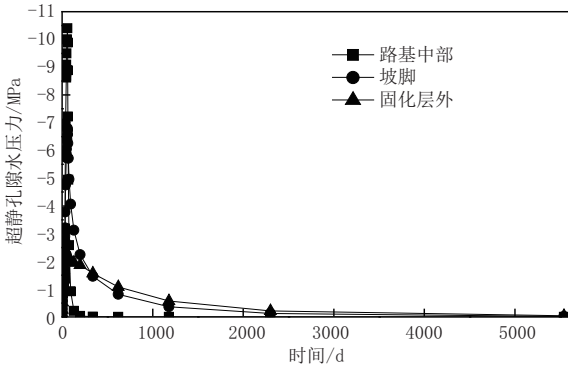


图9 设置排水板后的超孔隙水压力分布

5 结 语

研究低路堤深厚软基浅层固化层性状对道路建设过程的影响,主要得到以下结论。

(1)固化层模量和厚度的增加均能有效减小地基的附加应力系数,且固化层厚度对应力扩散作用影响较大,厚度大于3.5 m,上部荷载对下卧软土层的影响可忽略不计。

(2)固化层厚度小于1 m,模量的增大对路基沉降的影响很小;固化层宽度超过路基宽度,厚度对路基沉降的影响较小,固化层 R_{inter} 大于0.4,模量对路基沉降的影响很小。

(3)通过对固化层性状对应力扩散、路基沉降、孔压消散作用的进一步分析,拟提出对现有浅层固化方案的优化设计思路:a.在保证造价不增的同时,可适当增大固化层厚度,减小固化强度(模量),以达到更优的应力扩散效果。b.增加路基底部固化层厚度,同时减小路基边坡两侧固化层厚度,在不增加工程造价的前提下,充分发挥路基底部固化层的应力扩散作用,以达到减小路基沉降的目的。c.对于模量和厚度较小的浅层固化层(应力扩散作用较弱,下卧层附加应力系数较大),设置贯穿固化层的钻孔,同时设置深层下卧层的排水设施(塑料排水板等),以增加建设期的地基土固结效率,降低超静孔隙水压力,最终达到减小工后沉降的目的。

参考文献:

[1] 高彦斌,张松波,郭永发.软土地基的变形速率及稳定性控制[J].

(下转第116页)