

堆载作用下含炭质软弱地层的变形特征分析

柳丹¹, 曾家玉², 朱四超¹, 金宇轩³, 吴高桥²

(1. 湖南省茶江高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410203;

2. 长沙理工大学 交通学院, 湖南 长沙 410114;

3. 湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要:含炭质的软弱土体通常具有强度低、压缩性高、易产生塑性流动的特性,其地层在堆载作用下极易进入塑性屈服状态,导致地层出现显著侧向变形,可能对其所在地层及周围地基造成不利影响。以湖南某高速公路含炭质深厚淤泥地层条件下的混凝土拌合站建设为工程背景,针对地表堆载可能引发地层侧向变形并危及邻近地基的问题开展了研究。首先,建立了能反映含炭质软土层力学特性的地层数值模型,并利用现场实测数据验证了该模型的合理性;然后,基于验证的计算模型,采用数值模拟方法系统分析了深厚含炭质淤泥地层在堆载作用下的变形与附加应力分布模式;最后,通过参数分析,探讨了地层组合(特别是全风化炭质泥灰岩层厚度)以及堆载大小、堆载方式对地层侧向位移的影响规律。具体结论如下:地层的侧向位移主要由软弱土体进入塑性屈服状态并产生持续侧向流动所致;堆载对侧向位移的影响范围约为2倍填土宽度,且侧向位移对堆载的响应比沉降更为敏感;全风化层越厚,受堆载影响的范围和深度越大;在总填筑高度相同的情况下,分层填筑次数越多,产生的侧向位移越小。研究揭示了堆载作用下含炭质软弱地层的变形机理,以期含炭质深厚淤泥地区评估堆载填筑影响提供借鉴和参考。

关键词:路基工程;淤泥;堆载;侧向变形;数值模拟

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2026)02-0052-07

地基稳定关系到行车安全与公路运营安全,地基一旦丧失强度,将造成上部结构垮塌、路面塌陷等灾害,造成不可估量的经济损失,严重时,还可能造成人员伤亡^[1-4]。地基的稳定是工程界十分重视的问题之一,软土层由于其强度低、稳定性差以及变形量大等特点,常常是地基发生失稳破坏的原因^[5-9]。而在实际工程中,因地质条件复杂导致勘察资料与实际情况不符,或受场地及红线等条件限制,常有在软弱地层上进行工程建设的情况出现^[10-12]。因此,对软土地层受力变形特性及提高其承载能力的方法开展研究很有必要,学者们对软土路基的受力变形特征、极限承载能力及处理进行了大量的研究。余闯等^[13]指出软土在荷载作用下,其侧向变形沿深度成“弓”形分布,最大值出现在土层中部。顾绍付等^[14]对在役高速公路深厚软基段失稳滑移及其处治开展了数值模拟研究,提出水平位移随着桩间距增大而增大,水平位移随排间距增大会先减小后增大。孟园英等^[15]结合室内试验与数值模拟研究了淤泥地层在堆载作用下的变形特性及侧向位移分布规律,提出地层侧向位移主要是由于软弱土体进入塑性屈服状态并产生持续侧向流动导致的。侯兰新^[16]以明珠湾大桥为例,研究了深厚软土地基差异堆载对邻近桥梁桩基偏移、桩体开裂的影响,并指出差异堆载作用下地基极易产生超过规范限制的侧向位移。贺志勇等^[17]采用有限元法对非对称堆载条件下某高速公路匝道桥堆载后的安全性进行评估,提出堆载造成的地基土侧向位移主要发生在软弱土层中。李雪峰等^[18]总结了桥台桩基在路基堆载下的变形规律,提出了路堤下覆软土侧移对桩身的极限侧压力计算方法以及桩土相互作用计算方法。冯忠居等^[19]采用数值模拟法分析了堆载作

收稿日期:2026-01-19 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20260014

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52578503)

作者简介:柳丹(1976—),男,高级工程师,研究方向为施工技术、项目及工程管理。E-mail:29885467@qq.com

柳丹,曾家玉,朱四超,等.堆载作用下含炭质软弱地层的变形特征分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):52-58.

用下不同布置形式和不同处理距离下的刚性长短桩对填土侧桩基础受力分布特性的影响,提出软弱土层的侧向挤压变形对桩身位移、桩侧土抗力和桩身弯矩等均有明显影响。宋修广等^[20]对既有桩体在较大侧向堆载作用下的变形特性开展了研究,提出堆载对桩基的侧向土压力影响主要分布在桩体的上半部分,受到的侧向土压力占桩体总侧向土压力的86%以上。随着堆载高度的增加,桩的侧向土压力、侧向位移和弯矩均呈现出增大的趋势。

以湖南某高速混凝土拌合站建设为背景,结合现场监测与数值模拟分析,探究了堆载作用下软弱土层的变形特征,通过计算得到了软土层在堆载作用下的沉降、侧向位移曲线。同时,在此基础上,研究了软弱层厚度、堆载方式对地基侧向变形的影响,以期类似工程建设提供参考经验。

1 工程概况

1.1 拌合站概况

拌合站占地约 14 800 m²,渣土直接沿山坡堆放,填方区坡脚分布 2 个水塘,其水平面高程均低于边坡高程,下方分布较深厚软土及淤泥质土,坡脚水塘的存在可能进一步软化堆土区地层,增加软土厚度,降低堆土区地层强度。堆土施工时,可能对场区填方边坡及路基软弱层的稳定性造成影响。拌合站场地原地貌见图 1。

1.2 场区建设概况

场地平整过程中渣土直接沿山坡排放,在场地北、东、西 3 面形成填方边坡,边坡坡比 1:1.00,边坡平均填高约 8 m,填方过程中采用压路机对堆填渣石按需进行分层压实处理,考虑现行规范中仅要求弃土场进行分层压实,但对压实度、分层厚度等参数未提出明确要求,施工方参考《公路路基设计规范》JTG D30—2015,采用三、四级公路地表压实标准,要求弃土场压实度不小于 85%,分层填筑厚度不大于 2 m,并采取局部锚杆+挂网喷播草籽进行坡面防护。拌合楼、生活区、地磅及料仓均建在实地上,未对填方边坡形成负载。堆土及场区建设过程见图 2。

1.3 场地工程地质

边坡区属丘陵地貌,处于丘陵地貌向河流冲积平原过渡地段,地形起伏不大,总体地形较为平缓。该区域覆盖层主要为第四系更新统坡积成因粉质黏土,下伏基岩为白垩系下统东井组泥质粉砂岩,其中软土层厚度达 8 m。

2 数值建模及验证

2.1 数值分析模型

采用大型有限差分软件对拌合站堆载过程进行模拟分析,建立模型如图 3 所示。模型采用 zone 单元模拟岩土体及堆土,地层分布及各岩土体采用的计算参数根据地质勘察报告确定,拌合站填土平均高 8 m,堆土边坡按坡率 1:1.00 进行放坡,一坡到底不设置平台,拌合站按正方形设置,下底边长为



图1 拌合站场地原地貌



图2 建设中的混凝土拌合站

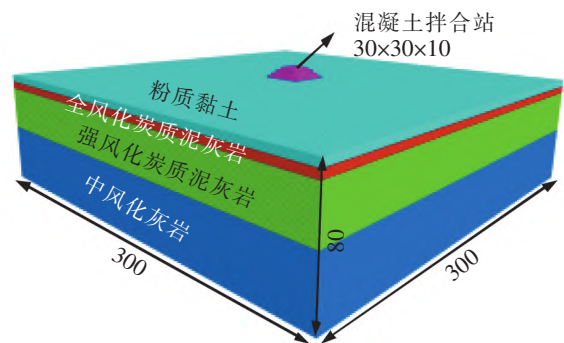


图3 数值计算模型(单位:m)

30 m。为消除边界效应对计算的影响,地层边界取堆土下底边长的 10 倍 300 m 进行计算^[15],土层深度取 80 m。综上,模型的整体边界尺寸为 300 m×300 m×80 m 的长方体。模型底面采用固定约束,4 个侧面采用法向约束,模型顶面及堆土均不进行约束。地层采用 Mohr-Coulomb 强度准则模拟,本研究探究堆载作用下原土层深层变形特性,地层本构模型及相关参数的确定较为关键,而堆土仅起到堆载加压的作用,其自身稳定性对计算分析影响较小,故可不考虑堆土自身的稳定性。考虑到数值模拟的计算效率需要,计算时,堆土采用 Elastic 准则以提高计算效率^[15]。

模型地层分布情况以及计算采用的物理力学参数取值根据地勘报告确定,具体情况如下:建设场地地层主要分为 4 层,最下层为中风化灰岩。第 3 层为强风化炭质泥灰岩,整体呈灰黑色,原岩结构组织基本破坏,层厚 12~18 m。第 2 层为全风化炭质泥灰岩,整体呈黄褐色,软塑-流塑状态,层厚较薄。钻芯最上层为粉质黏土层,主要成分为黏粒,含少量细角砾、碎石。典型岩芯照片见图 4,物理力学指标见表 1。



图 4 典型岩芯照片

表 1 岩土体物理力学指标推荐值

岩层	容重/(kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土	19	0.32	12	26	24
全风化炭质泥灰岩	21	0.30	18	20	18
强风化炭质泥灰岩	22	0.26	40	15	32
中风化灰岩	24	0.21	230	17	38

2.2 拌合站堆载对路基稳定性的影响

对混凝土拌合站建设堆载过程进行计算,计算时,设置多条测线记录堆载后地层的变形响应,测线设置如图 5 所示。

在坡脚设置竖向测线 1,测线距堆土中心线距离为 $D=15$ m,在距堆土中心线 $3D$ 、 $5D$ 位置设置竖向测线 2、3。其中,测线 2 位置与实际测斜位置一致。地表设置 1 条横向测线(测线 4),与实际地表监测位置保持一致。

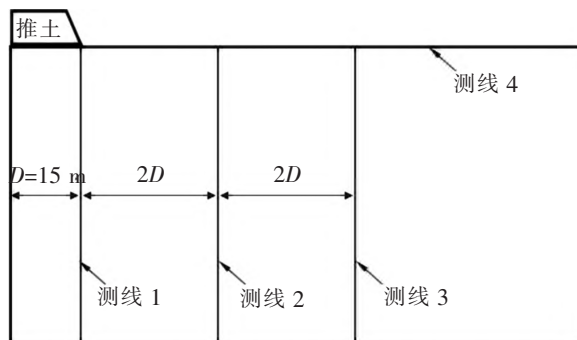


图 5 测线设置示意图

图 6 为不同堆土高度条件下,中间剖面土层塑性区分布及侧向位移分布云图。考虑到模型具有对称性,为直观展示塑性区分布与侧向位移分布的对比,取模型的左半部分显示土层塑性状态分布情况,取模型的右半部分显示侧向位移分布情况。

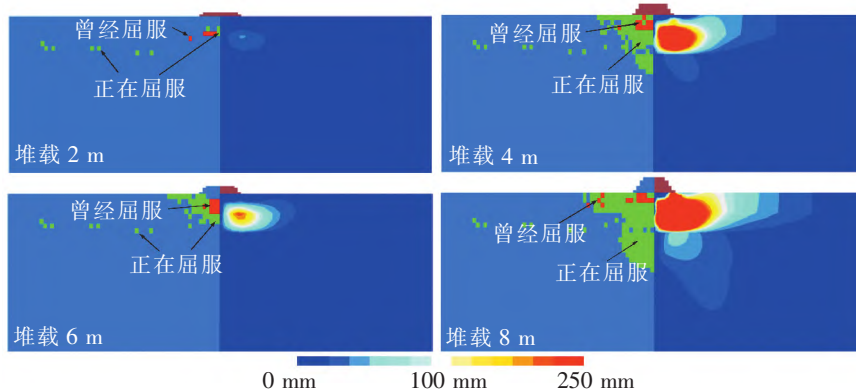


图 6 不同堆土高度土层塑性区分布及侧向位移云图

由图6可知,当拌合站堆载开始时(堆土2 m),土堆周边软土层出现零星塑性单元,而土堆正下方软土层出现少量塑性单元,此时土层整体处于稳定状态,土层位移较小,仅与塑性区相对应的土层区域产生了少量侧向位移。当堆土高度为4 m时,拌合站场区范围外未出现塑性区,土层仍处于稳定状态,因此无明显侧向位移出现。而拌合站范围内土体出现小片塑性区,此时该区域土体将产生塑性流动,侧向位移显著增长。当堆土高度达到6 m时,塑性区沿深度、宽度方向发展,进入塑性的土体保持塑性流动状态,因此其侧向位移进一步增长。当堆土完成时(堆土高度8 m),塑性区沿深度方向,尤其是沿宽度方向扩张迅速,已发展成连续整体,且呈现出“漏斗”状,与之对应的位移云图亦呈现沿横向、深度方向发展的趋势。

图7为测线4在堆载过程中的变形响应,其中图7(a)为测线所在单元的侧向位移(x 方向),图7(b)为测线所在单元的侧向位移(沉降, z 方向)。由图7可知,随着堆土高度的增加,土体变形不断增加,且堆土高度大于6 m后,土体的变形速率明显加快,这与堆载6 m后堆土范围内下方土体大面积进入塑性状态相关。同时,侧向位移最大值出现在堆土坡脚,且侧向位移值沿测线向外不断衰减,在距离坡脚2倍填土宽($2D=30$ m)后,侧向位移趋近于0。沉降最大值出现在堆土中心,同时沉降沿测线方向迅速衰减,在距离坡脚1倍填土宽($D=15$ m)后,沉降趋近于0。此外,图7(a)中,线条为数值计算结果,散点为实际的地表位移监测结果。因堆载将部分地表覆盖,实际测量时,只能从坡脚开始,因此散点沿测线分布从距堆土中心15 m位置开始。通过对比可知,数值结果与实测值基本吻合,数值计算结果与实测值在数值上相近,反映的侧向位移变化趋势也基本相同。

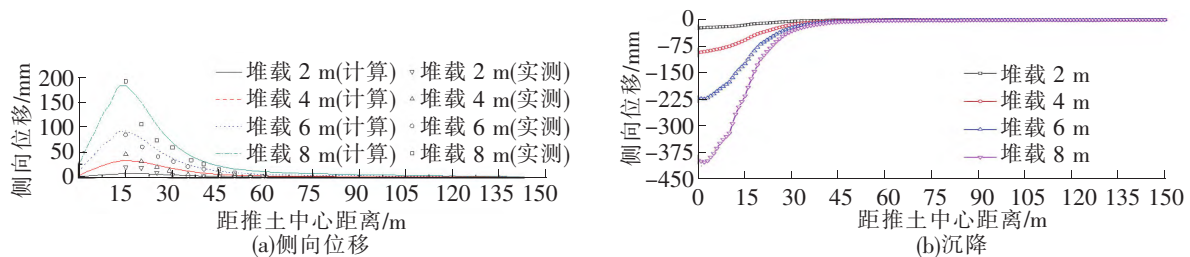


图7 堆载过程监测数据(测线4)

图8为坡脚及距坡脚2倍填土宽($2D$)竖向测线上侧向位移分布图。由图8可知,全风化炭质泥灰岩层侧向位移大,其上粉质黏土层侧向位移相对较小,侧向位移沿竖向呈“勺形”分布,其影响深度约2.5倍填土高度($2.5H$)。对比图8(a)与图8(b)可知,距坡脚 $2D$ 处侧向位移显著降低,受堆载作用的影响相对较小。同时,通过对比可知,数值结果与实测值基本吻合,数值计算结果与实测值在数值上相近,反映的侧向位移均呈“勺型”分布。

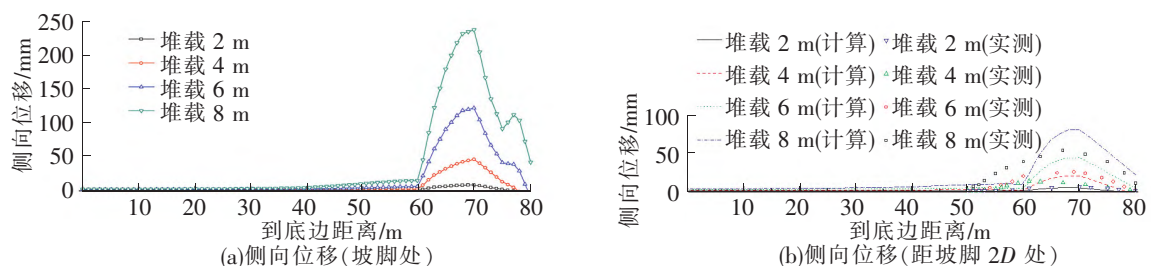


图8 侧向位移分布图(测线1、测线2)

综上可知,堆土作用下,土体的沉降数值明显高于其侧向位移数值(1.7倍~1.9倍)。但与此同时,侧向位移向外扩散的影响范围约2倍填土宽($2D$),竖向沉降向外扩散的影响范围约1倍填土宽($1D$),侧向位移受堆土作用的影响范围要大于竖向沉降,其对堆载作用的响应更为敏感。数值模拟结果与实测值接近,土层变形分布规律基本一致。

3 影响因素分析

为进一步研究软土地基在堆载作用下的变形特征,拟对软土厚度、堆土高度等开展进一步的参数分

析,分析不同计算工况下,软土地基在堆载作用下的变形特征,为类似工程提供参考。

3.1 全风化炭质泥灰岩层厚影响

对全风化炭质泥灰岩层的厚度、力学参数进行参数分析,探究各参数对土层侧向位移的影响。

图 9 为不同全风化层厚度条件下堆载塑性区分布及侧向位移云图。由图 9 可知,当堆载完成时,土层塑性区均呈“漏斗”状分布,全风化层越厚,塑性区分布范围越大,与之相对应的侧向位移越大。同时,全风化层越厚,土层塑性区分布越广,深度越深。这是因为全风化层越厚,同一堆载高度条件下,土层的沉降及侧向位移越大,从而导致受堆载作用影响的土层范围越大,当变形达到一定程度时,土层进入塑性流动状态造成的。

图 10 为不同全风化层厚度条件下地表侧向位移沿横断面方向分布情况(测线 4)。与图 7(a)分布类似,侧向位移最大值均出现在坡脚处,且侧向位移值沿测线向外不断衰减。同时,全风化层越厚,受堆载作用影响的范围越广,侧向位移降为 0 的点距堆载中心越远。

图 11 为不同全风化层厚计算工况下侧向位移分布图。由图 11 可知,全风化层越厚,侧向位移突变位置越深。综合图 10 与图 11 土层位移分布可知,全风化层的厚度与堆载作用的影响范围及深度密切相关,全风化层越厚,受堆载作用影响的范围越大,深度越深。

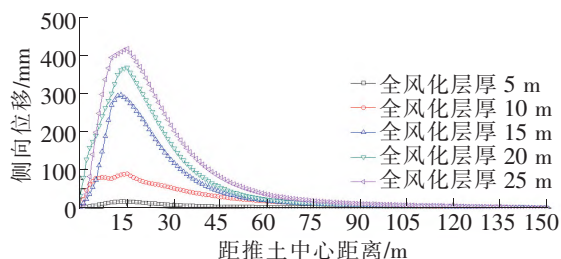


图 10 不同全风化层厚度条件下地表侧向位移(测线 4)

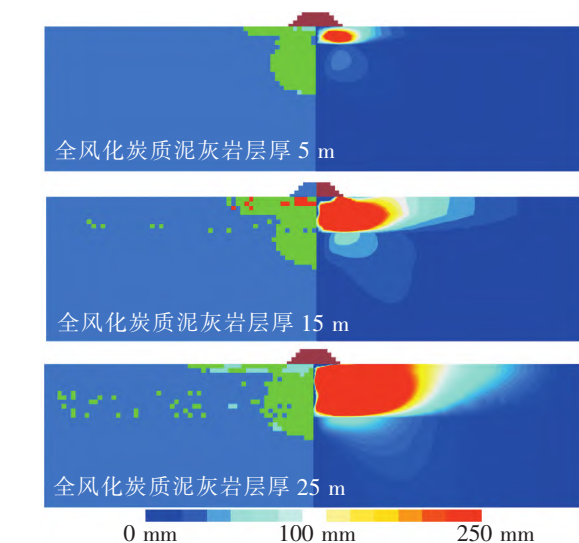


图 9 不同全风化层厚度条件下堆载塑性区分布及侧向位移云图

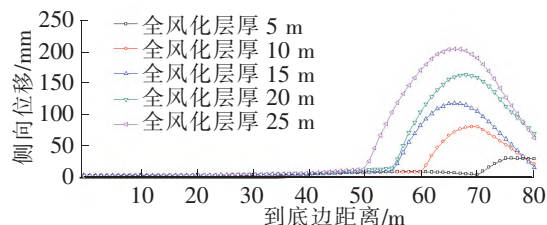


图 11 不同全风化层厚度计算工况下侧向位移分布图(测线 1)

3.2 堆土方式对土层位移的影响

为探究堆土方式对土层位移的影响,在之前模型的基础上,计算不同填筑方式对土层位移的影响。计算采用 3 种工况进行:工况 1 为分 4 次填筑,每次填筑 2 m;工况 2 为分 2 次填筑,每次填筑 4 m;工况 3 为 1 次填筑 8 m。

图 12 为不同填筑方式下塑性区分布及侧向位移云图。由图 12 可知,3 种填筑方式的塑性区分布范围及深度差别较小。由此可知,填筑方式对塑性区分布的影响较小。

图 13 为不同填筑方式条件下侧向位移分布图(测线 1)。由图 13 可知,侧向位移分布规律与前节一致。同时,分 4 次填筑时,土层侧向位移最小,侧向位移云图分布规模最小;1 次填筑时,土层侧向位移

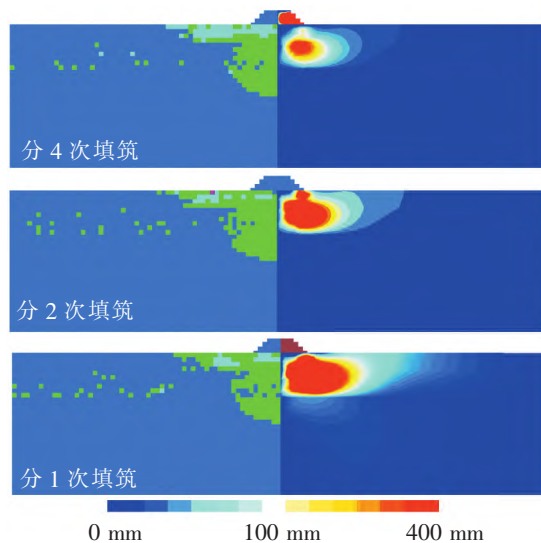


图 12 不同堆载方式条件下塑性区分布及侧向位移云图

最大,侧向位移云图分布规模最大。综合图6、图12与图13可知,塑性区分布规模主要受填筑高度影响,填筑方式对土层塑性区分布影响较小。而填筑方式对土层侧向位移及其分布规模影响显著,同一填筑高度时,填筑次数越多,土层侧向位移越小,影响范围越大。

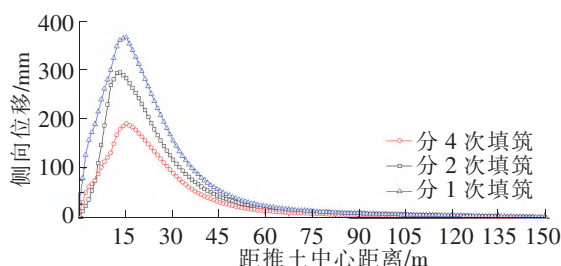


图13 不同填筑方式条件下侧向位移分布图(测线1)

4 结论

以湖南省一条在建高速的一处混凝土拌合站建设为依托,结合现场监测及数值模拟,探究了堆载作用下,软弱土层沉降及侧向变形分布规律,得到了堆载作用下软弱地层的侧向位移分布规律。并在此基础上,研究了软土地层厚度以及堆载方式对地层侧向位移分布的影响,具体结论如下:

(1)数值模拟结果与实测值接近,土层变形分布规律也基本一致,说明采用有限差分软件对堆载过程进行数值模拟是合理的,数值模拟能较真实地反映堆载作用下土层的受力及变形状态。同时,计算揭示堆载将引起地层产生显著的侧向位移。堆载作用下地层出现侧向位移主要是由于软土层进入塑性状态,持续产生侧向流动造成的。

(2)堆土作用下,软土地层侧向位移扩散及影响范围约2倍填土宽($2D$),显著高于竖向沉降。堆载作用对土层侧向位移的影响要大于堆载作用对土层沉降的影响,软土地层的侧向位移对堆载作用的响应更为敏感。

(3)全风化层的厚度与堆载作用的影响范围及深度密切相关,全风化层越厚,受堆载作用影响的范围越大,深度越深。塑性区分布规模主要受填筑高度影响,填筑方式对土层塑性区分布影响较小。而填筑方式对土层侧向位移及其分布规模影响显著,同一填筑高度时,填筑次数越多,土层侧向位移越小影响范围越大。

参 考 文 献

- [1]朱彦鹏,董怀堂,韦杰强,等.改进的分层总和法在黄土地区高填方地基沉降变形中的应用研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):159-168.
- [2]韩善鹏,付伟,张军辉,等.软土地基工后小荷载作用下不同沉降预测模型对比分析[J].中外公路,2024,44(6):1-10.
- [3]张军辉,林晨,杨毅.复合地基加固的半分离式路堤沉降特性研究[J].交通科学与工程,2023,39(1):7-16.
- [4]詹永祥,秦朗,柳刚,等.成南高速公路软土地基高路堤拓宽工程差异沉降及控制标准研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(3):82-90.
- [5]李程,贾战磊,徐成皓.软土地区某阶梯式深基坑变形监测与数值模拟[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(4):61-68.
- [6]陈花美.吹填软黏土地上堆载对防波堤稳定性的影响研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(增刊1):85-87.
- [7]丁敏.PTC管桩在高速公路拼宽路基深厚软土地基处理中的应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(增刊1):92-95.
- [8]张玲,邱泉,何奇,等.考虑蠕变影响的堆载作用下被动排桩受力变形分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(9):87-98.
- [9]柯劲波,顾松,徐峻,等.云贵高原山区高速公路软土路基滑移处治技术[J].公路交通科技,2023,40(5):44-49.
- [10]李文勇,张浩,关宏信,等.软土地基中预应力管桩荷载-沉降曲线计算[J].交通科学与工程,2021,37(3):17-21.

- [11]马坤全,孙运通,陈昊.上跨软土深基坑干线铁路便桥动力特性研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(3):10-16.
- [12]卞桂荣,李富有,钱晓彤,等.上覆硬壳层地基极限承载力特性研究[J].中外公路,2023,43(1):31-35.
- [13]余闯,刘松玉.路堤下土体侧向变形性状研究(英文)[J].东南大学学报(自然科学版),2005,21(1):78-81.
- [14]顾绍付,刘维正,石志国,等.在役高速公路深厚软基滑移病害微型桩处治分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):43-51.
- [15]孟园英,谭鑫,周嘉威,等.路堤堆载下深厚淤泥变形特征及演化规律[J].公路,2024,69(5):84-95.
- [16]侯兰新.深厚软土地基堆载预压对邻近桥梁桩基影响分析[J].铁道建筑技术,2022(6):140-144.
- [17]贺志勇,张浩然,杨程,等.某高速公路匝道桥非对称堆载下的安全性分析研究[J].中外公路,2021,41(6):107-113.
- [18]李雪峰,张军辉,郑健龙.路基堆载下软土侧移对桥台桩基影响研究综述[J].路基工程,2011(1):12-15.
- [19]冯忠居,何静斌,董芸秀,等.刚性长短桩软基预处理对堆载邻近桩基的变位影响分析及处理效果评价[J].公路交通科技,2019,36(8):67-77.
- [20]宋修广,李信,万立尧,等.堆载作用下被动桩的水平受力及位移分析[J].建筑科学与工程学报,2018,35(2):56-62.

Analysis of Deformation Characteristics of Carbonaceous Soft Strata Under Surcharge Loading

LIU Dan¹, ZENG Jiayu², ZHU Sichao¹, JIN Yuxuan³, WU Gaoqiao²

(1. Hunan Chajiang Expressway Construction and Development Co. Ltd., Changsha 410203, China;

2. School of Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

3. Hunan Communications Research Institute Co. Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: Carbonaceous soft soils typically exhibit low strength, high compressibility, and a tendency toward plastic flow. Under surcharge loading, such strata are prone to enter a plastic yield state, leading to significant lateral deformation, which may adversely affect both the stratum itself and the surrounding foundations. Taking the construction of a concrete batching plant under deep carbonaceous silty clay conditions along a highway in Hunan Province as its engineering background, research was conducted to address the potential problem of lateral deformation of the stratum caused by surface surcharge loading that could endanger nearby foundations. First, a numerical model of the soil strata reflecting the mechanical properties of carbonaceous soft soils was established and verified using field measurement data to confirm its validity. Then, based on the validated model, a numerical simulation method was systematically used to analyze the deformation and additional stress distribution patterns of the deep carbonaceous silty clay layer under surcharge loading. Finally, through parameter analysis, the study explored the effects of stratum composition (particularly the thickness of the fully weathered carbonaceous mudstone layer), as well as the surcharge magnitude and method, on lateral displacement of the strata. The specific conclusions are as follows: lateral displacement of the strata is mainly caused by the soft soil entering a plastic yield state and undergoing ongoing lateral flow. The influence range of surcharge loading on lateral displacement is approximately twice the width of the fill, and the lateral displacement is more sensitive to surcharge than settlement. The thicker the fully weathered layer, the greater the range and depth affected by the surcharge loading. Under the same total fill height, more layers of fill result in smaller lateral displacement. This study reveals the deformation mechanisms of carbonaceous soft soil under surcharge loading, aiming to provide reference and guidance for assessing the impact of surcharge fills in areas with deep carbonaceous silty clay.

Key words: roadbed engineering; silty clay; surcharge loading; lateral deformation; numerical simulation