

# 成宜高速某浅层软土上路堤填筑的稳定性分析

张冲, 刘钢, 赵明志, 郭文博, 王光义

(西华大学 土木建筑与环境学院, 四川 成都 610000)

**摘要:**以成宜高速公路 ZCB1 标段为工程背景,采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件建立相应路基模型,计算分析了地基土在固结与未固结两种工况下的路堤填筑稳定性,得出以下结论:①未固结软土天然强度薄弱,但经固结后强度满足一般路基设计需求;②地基土抗剪强度较低时,地表倾斜对地基土的位移影响更为明显。临界状态时,路基结构倾向于从薄弱一侧先发生破坏,另一侧保持相对稳定;③软土天然渗透系数较低,仅依靠堆载促进软土渗流固结,所需施工时间偏长,在工程中应结合工期和成本,合理选择地基处理方式。

**关键词:**软土路基;数值模拟;稳定性分析

## 1 前言

软土一般指天然含水率大、压缩性高、承载力小、抗剪强度低且呈现软塑或流塑状态的细粒土。软土地基是一种常见的特殊地基,它极易发生变形和破坏,在工程中需进行加固处理。根据上覆荷载大小和地基中软土层厚度的不同,常用的处理方式有换填法、排水固结法和复合地基法等。在施工过程中,当软土地基厚度较小时,可以采用在路堤面进一步堆土的方式对软土地基进行堆载预压。利用堆载产生的先期较大荷载促进地基土排水固结,能够显著提高地基土强度和抗变形能力,达到节省施工成本的目的。

进行堆载施工时,地基土剪切强度会随固结时间逐渐提高。根据摩尔库仑准则,土的剪切强度提高可

以表述为抗剪强度参数的增长。对于软土固结过程中,剪切强度和抗剪强度参数的变化规律,有很多学者进行了研究。理论方面,秦植海在 1996 年利用莫尔应力圆法推导出了任意固结度下的不排水抗剪强度指标的理论解;杨嵘昌在 2001 年利用应力路径法推导出了另一套不排水抗剪强度指标随固结度增长的计算公式;基于上述研究成果,汪洪星等在 2014 年对其所提公式的等效性进行了验证,并从孔隙水压力的角度进行分析,提出了新的抗剪强度指标随固结度增长的计算公式,且认为固结过程中内摩擦角  $\varphi$  随固结度  $U$  的增大而单调增大,而黏聚力  $c$  随着固结度  $U$  的增长而单调减小。试验方面,包伟力等通过对不同固结度下的淤泥土进行三轴剪切试验发现, $c$ 、 $\varphi$  值随固结度  $U$  的增加而呈现双曲线形的增加,增加的幅度随固结度的提升逐渐减小;何群等在 2005 年通过固结和直剪试

- \*\*\*\*\*
- [2] 张军辉,彭俊辉,郑健龙.路基土动态回弹模量预估进展与展望[J].中国公路学报,2020(1).
- [3] 邱帅华.路基回弹模量检测方法对比研究[J].公路与汽运,2019(2).
- [4] 姚永胜,张军辉,李岷,等.江西省昌樟高速公路改扩建工程老路基渗水处治方法研究[J].中外公路,2018(3).
- [5] 蒋红光,曹让,马晓燕,等.考虑路基平衡湿度状态的黄泛区中高液限黏土抗剪强度研究[J].岩石力学与工程学报,2018(12).
- [6] 李聪,黄科,王峥.干旱地区非饱和路基土湿度的气候依赖性[J].水利与建筑工程学报,2017(6).

- [7] 曾宇乐.干湿循环作用下某路基土强度特性研究[J].公路工程,2017(4).
- [8] 武丹,巨玉文.冻融循环对黄土路基填料抗剪强度影响的实验研究[J].中国科技论文,2017(1).
- [9] 王理吉,石云.路基回弹模量季节变化规律研究[J].公路交通技术,2015(3).
- [10] 阮艳彬,吴万平.与路面协调设计的公路路基设计指标及使用环境探讨[J].公路,2012(3).
- [11] 孔震宁.压实度及含水率对路基回弹模量影响规律研究[J].公路与汽运,2015(6).

验,对常德至张家界高速公路软土路基中的土样进行了研究,得出  $c$ 、 $\varphi$  值均随固结度  $U$  的增加而线性增加,但黏聚力  $c$  在固结度  $U < 30\%$  时,随固结度  $U$  的增加变化较小;刘红军等在 2008 年采用与何群相似的试验方法,探讨了寒区湿地软土的抗剪强度指标随不同固结度的增长特征,发现软土的  $c$ 、 $\varphi$  值基本满足随固结度  $U$  增加而增长的变化规律,但当  $U < 20\%$  时,黏聚力  $c$  随固结度  $U$  的增加而减小。

目前,中国对于高速公路建设中所遇浅层软土问题的研究相对较少。李如敏认为相比传统的软土地基处理技术,为降低工程造价,可采用新型的土壤固化剂对山区道路所遇浅层软土地基进行稳定或加固;龙森等依托于惠莞高速某软土层厚度约为 3 m 的工点,比较了清淤换填法、堆载预压法、强夯法、粉喷桩法和砂垫层法的技术及经济的优劣性;曹正波等以河北省高速公路建设为例,将浅层软土在地层中的分布类型分为 3 类,以适应不同的地基处理方法。当前对于路基工程中浅层软土的研究,多以各种施工方法的对比选择为主,少有结合数值模拟软件,分析浅层软土地基对路基结构稳定性的影响。

该文基于软土固结后抗剪强度指标会显著增长的客观事实,对成宜高速公路某处地基新近沉积的欠固结浅层软土进行研究。测量该软土的基本物理力学参数。并利用数值模拟软件分析该软土固结前后,抗剪强度参数对路基结构稳定性的影响。

## 2 工点概况

研究工点位于成都至宜宾高速公路项目 ZCB1 标段,设计道路跨越河谷区域,其地形概况和工点平面示意图如图 1 所示。以图中虚线为界,河谷南面地表近似水平,北面地表向北倾斜,地基土表层为 4~6 m 软土层,下层为泥岩层。

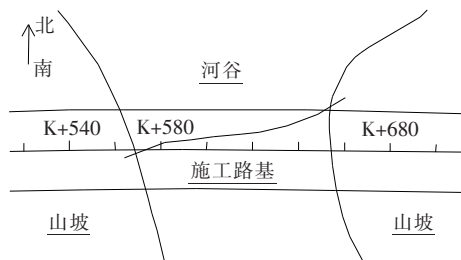


图 1 工点平面示意图(单位:m)

工程项目在 K540~K680 标段进行路基填方。为保证路基填筑过程中地基的稳定性,并尽可能降低后

期沉降,同时节省施工成本,拟定采用分层填筑方法填筑路基。利用先期填土产生的先期较大荷载促进地基土排水固结,使地基土满足设计承载力要求。因此需对该软土的物理力学性质及路基结构的稳定性进行分析。

忽略沿线路方向的路基截面尺寸和荷载变化,稳定性分析简化为平面应变问题。选取地基实际所受荷载最大断面作为计算断面(K580 附近),建立图 2 所示土层分布图。路基顶宽 34.5 m,总填筑高度 14.76 m,分上下两层填筑。其中:上级高度 8 m,坡度为 1:1.5;下级高度 6.76 m,坡度为 1:1.75。中部台阶宽度 2 m。原地基面非水平对称,路基中线右侧地表水平,路基中线左侧地表向坡脚倾斜。以路基中线为基准,地基土从下至上分别为中风化泥岩层、3.5 m 强风化泥岩层、4.5 m 软土层。

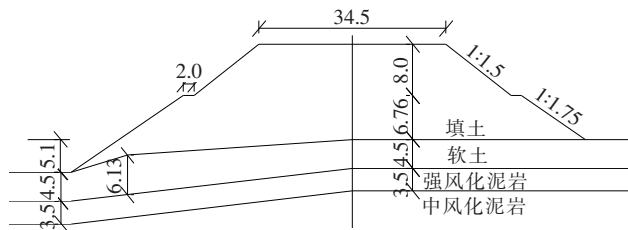


图 2 土层分布计算图(单位:m)

## 3 软土层的物理力学性质

地基软土层的密度为  $1\,960\text{ kg/m}^3$ 。从现场采集原状软土,通过室内试验对其基本物理力学指标进行测定。

采用烘干法测得原状土样的天然含水率为 39.2%。采用变水头法测得原状土样的渗透系数为  $4.5 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。

采用液、塑限联合测定法进行了界限含水率试验,测得该软土的塑限为 28%, 17 mm 液限为 57%,塑性指数为 29,液性指数为 0.39。塑性图(图 3)中其位置在 A 线上侧, B 线右侧。根据 SL 237—1999《土工试验规程》,该软土定名为高液限黏土。

通过一维压缩固结试验测得该原状软土的压缩曲线如图 4 所示。

由图 4 可知:其标准压缩系数为  $0.94\text{ MPa}^{-1}$ ,侧限压缩模量  $E_s$  为 2.02 MPa。根据 JGJ 83—2011《软土地区岩土工程勘察规程》,可推断该软土属于高压缩性土。

对原状土样分别进行快剪和固结快剪试验,竖向

应力为 100、200、300 和 400 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min。

图 5 为快剪试验中剪应力随剪切应变的变化曲线。

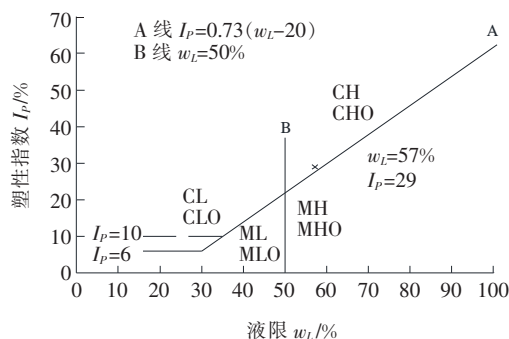


图 3 高液限黏土塑性图

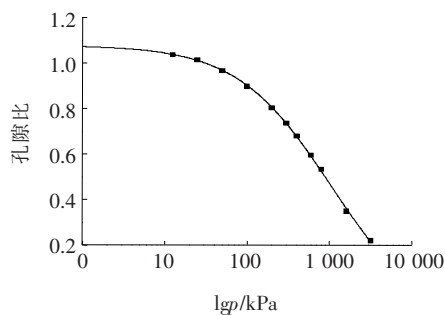


图 4 孔隙比与固结应力的  $e-lgp$  关系曲线

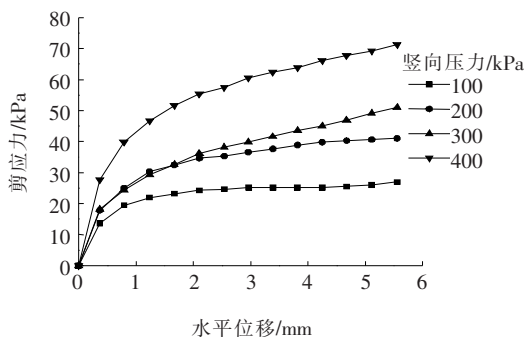


图 5 快剪试验剪切应力-水平位移曲线

由图 5 可以看出:随着竖向应力的增加,曲线始终未出现明显峰值,应力应变曲线为应力硬化型。对每条曲线分别取剪切位移 4 mm 对应的剪应力作为该竖向应力下的抗剪强度。随竖向应力增大,对应的剪切强度分别为:25.2、39.1、44.3、65.0 kPa。

由于原状土样取自新近沉积的欠固结土,因此进行快剪试验时,在竖向应力作用下,土样在剪切过程中同时产生压缩固结。剪切初始阶段,竖向应力越大,土样的初始压缩变形越大,初始剪切模量越大,剪应力-剪切应变曲线越陡峭。在后续剪切过程中,较大的竖

向应力促进了土样的压缩固结。竖向应力更大的土样,后期剪应力-剪切应变的曲线斜率越大。

图 6 为固结快剪试验中剪应力随剪切位移变化的曲线。

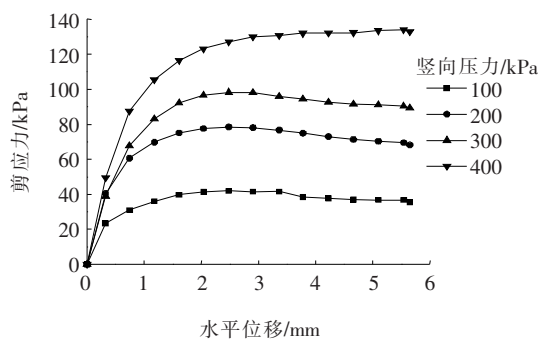


图 6 固结快剪试验剪切应力-水平位移曲线

由图 6 可知:在竖向应力为 100、200 和 300 kPa 时,曲线有明显的剪应力峰值。取该峰值作为各竖向应力下的抗剪强度,分别对应为 41.9、78.5 和 98.3 kPa;在 400 kPa 竖向应力下,曲线未出现明显剪应力峰值,取剪切位移 4 mm 所对应的剪应力 132.1 kPa 作为该竖向应力下的抗剪强度。

当剪切过程中的竖向应力较低时,土样呈现出接近于超固结黏土的性质,应力应变曲线为应变软化型;当剪切过程中竖向应力很大时(400 kPa),土样在剪切中更近似于正常固结黏土,其应力应变曲线转为应力硬化型。

图 7 为原状土样经快剪试验和固结快剪所得抗剪强度包络线。快剪试验土样黏聚力  $c = 12.1$  kPa,固结快剪试验土样黏聚力  $c = 15.1$  kPa,提升了约 24.7%;快剪试验土样内摩擦角  $\varphi = 7.1^\circ$ ,固结快剪试验土样内摩擦角  $\varphi = 16.2^\circ$ ,提升了约 128.2%。在试验的竖向应力范围内,快剪试验土样的剪切强度为 24.6~65.1 kPa,固结快剪试验土样的剪切强度为 44.1~132.2 kPa。土样固结后,抗剪强度较原状土样的抗剪强度增长了大约 2 倍。

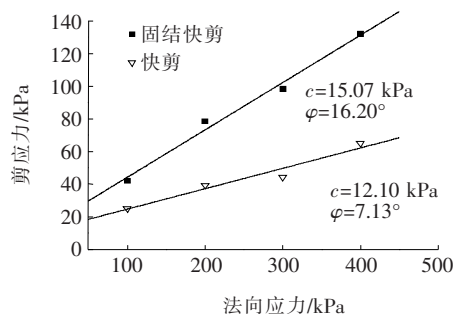


图 7 抗剪强度包络线

## 4 路堤填筑的稳定性分析

采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件模拟路基的施工填筑;分析软土地基在固结与未固结状态下,路基结构的稳定性特征。

### 4.1 计算模型

#### 4.1.1 模型尺寸

依据路基断面图(图 2)建立了如图 8 所示路基计算模型。以路基中线与地基面的交点作为直角坐标原点建立坐标系。 $X$  轴沿水平地基表面,向右为正,计算范围为  $-100 \sim +100$  m; $Y$  轴沿线路方向,垂直截面向外为正,计算范围为单位网格宽度; $Z$  轴沿路基中线,垂直向上为正,计算范围为路基右侧地表以下 50 m 至路基顶面(图 8 中:  $-50 \sim +14.76$  m)。单位网格宽度设为 1.25 m,共建立 6 154 个网格,12 684 个节点。经试算,所建模型在该计算范围,能较好地表现出路基结构整体的力学性质和变形特征,且不会占用过

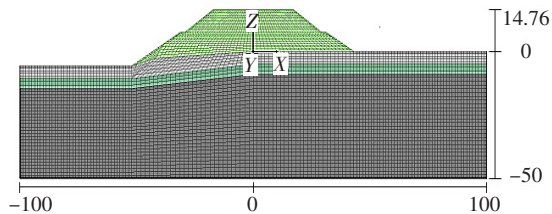


图 8 计算模型示意图(单位:m)

多的计算资源,影响计算效率。

#### 4.1.2 边界条件

为反映实际结构真实的受力和变形情况,需对计算模型设置相应的边界条件。地层中土体侧向变形受到相邻土体的约束,底面相当于固定支座,因此边界条件设为: $z = -50$  m 平面在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向无位移和速度, $x = -100$  m 和  $x = +100$  m 平面在  $x$  方向无位移和速度, $y = 0$  m 和  $y = +1.25$  m 平面在  $y$  方向无位移和速度。

#### 4.1.3 参数取值

FLAC<sup>3D</sup> 需要选择本构模型来描述岩土材料的力学性质特性。该试验选取 Mohr-Columb 本构模型来表达土体在外荷载条件下的应力-应变关系。该本构模型在计算时,需要使用体积模量  $K$  和剪切模量  $G$  来表征材料的变形特征。其各自与侧限压缩模量  $E_s$  的换算关系如下:

$$K = \frac{1+\nu}{3(1-\nu)} E_s \quad (1)$$

$$G = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} E_s \quad (2)$$

式中: $\nu$  为泊松比,依据《工程地质手册》相关经验参数,确定填土泊松比取 0.3,软土泊松比取 0.35,泥岩层泊松比取 0.25。

各土层相应模量的换算结果及抗剪强度指标列于表 1。

表 1 FLAC<sup>3D</sup> 计算参数值

岩土类型	体积模量 $K/\text{kPa}$	剪切模量 $G/\text{kPa}$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
路基填土	$4.95 \times 10^3$	$2.29 \times 10^3$	10.0	32.00	19.0
软土(未固结)	$1.38 \times 10^3$	$4.62 \times 10^2$	12.1	7.13	19.6
软土(固结)	$1.38 \times 10^3$	$4.62 \times 10^2$	15.1	16.20	19.6
强风化泥岩	$1.11 \times 10^4$	$6.67 \times 10^3$	24.0	26.00	22.0
中风化泥岩	$1.39 \times 10^4$	$8.33 \times 10^3$	5.0	40.00	22.0

### 4.2 计算要点与流程

计算中,仅考虑软土层固结引起的剪切强度的增长对结构稳定性的影响;对未固结软土取快剪试验强度指标,对固结后软土取固结快剪试验强度指标。

考虑到实际工程中,设计施工时通常不会直接按结构的极限强度进行计算,而是会对结构预设一个安全系数。基于该安全系数,使用容许强度对结构进行设计计算,可以保证一定的安全储备。该数值模拟试

验通过不设安全系数和设置安全系数,分别分析路基结构在极限强度指标和容许强度指标下的稳定性。设置安全系数时,采用强度折减法确定结构的安全系数。强度折减法对安全系数定义为:岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时的折减后剪切强度的比值,据此折减后的剪切强度指标  $c_F$ 、 $\varphi_F$  可取为:

$$c_F = \frac{c}{F} \quad (3)$$

$$\tan\varphi_F = \frac{\tan\varphi}{F} \quad (4)$$

式中: $c$ 、 $\varphi$  为实际剪切强度指标; $c_F$ 、 $\varphi_F$  为折减后剪切强度指标; $F$  为强度折减法安全系数。

根据上述对比需求可得 4 组试验工况:Ⅰ、软土未固结,未设置安全系数;Ⅱ、软土未固结,设置安全系数;Ⅲ、软土固结,未设置安全系数;Ⅳ、软土固结,设置安全系数。

Ⅰ 和 Ⅲ 工况将直剪试验所得实际剪切强度指标作为结构极限强度指标进行计算;Ⅱ 和 Ⅳ 工况根据式(3)、(4),通过设置安全系数  $F$  将极限强度指标折减为容许强度指标后再进行计算。根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》,Ⅱ 和 Ⅳ 工况的安全系数  $F$  同取为 1.2。

经试算发现,地基下部泥岩层强度相对上部软土层和路基偏大,结构的失稳破坏只发生在地基上部软土层和路基部分。因此此次试验在Ⅱ 和 Ⅳ 工况中不对泥岩层进行强度折减,仅对软土层和路基进行强度指标折减。

### 4.3 计算结果

#### 4.3.1 未固结软土地基填筑稳定性

图 9(a)为工况Ⅰ极限状态下结构位移云图。采用极限强度指标,以路基中线为基准,填筑高度达到 4.4 m 时,左侧坡面下方产生大范围的滑动。左侧坡肩和坡脚之间形成贯通的圆弧形滑面,坡脚土体被挤出。结构发生失稳破坏,填筑高度未能达到设计高度。由于地表向左倾斜,发生失稳破坏时,路基中部及右侧呈相对稳定状态。

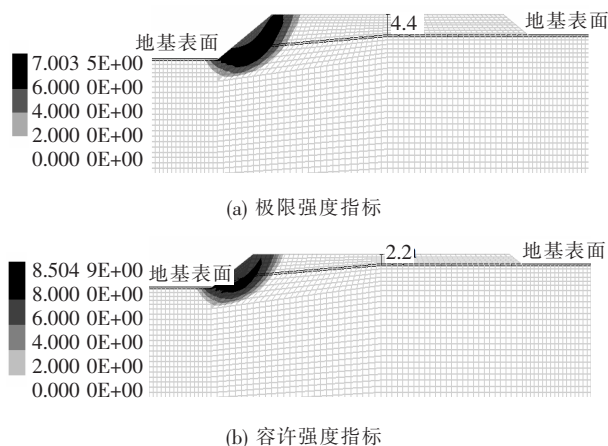


图 9 地基未固结时路基位移云图(单位:m)

图 9(b)为工况Ⅱ极限状态下结构位移云图。采用容许强度指标,以路基中线为基准,路基填筑高度达

到 2.2 m 时,左侧坡面下方即形成圆弧形滑面,结构发生失稳破坏。结构位移分布情况与工况Ⅰ相近。

可见未处理的软土地基强度薄弱,不足以承担上部路基荷载的设计需求。

#### 4.3.2 固结软土地基填筑稳定性

图 10(a)为极限强度指标(工况Ⅲ)下整体结构的位移云图。图中将各土层分界面标出,发现位移主要集中在填土和软土层中,泥岩层位移较小。位移整体呈现向下扩散衰减的气泡型。最大位移集中在坡顶左侧,约为 1.44 m。未出现明显的大范围滑动。

图 10(b)为容许强度指标(工况Ⅳ)下结构位移分布情况。与工况Ⅲ相比,路基左侧位移有较大范围的增加。位移较大区域呈现向左侧坡脚发展趋势,但最终未能贯通至坡脚。最大位移靠近左侧坡肩,约为 2.54 m。结构整体上依旧处于稳定状态,未出现大范围滑动。

可见试验工况Ⅲ、Ⅳ条件下路基结构均可完成设计高度的填筑。结构中位移较大区域未形成剪切破坏面,坡体未发生失稳破坏。软土层固结后的强度满足施工设计要求。

此外注意到在图 10(a)中,沉降云图在软土层有较为明显的集中衰减。对此绘出工况Ⅲ的体应变云图(图 11)。

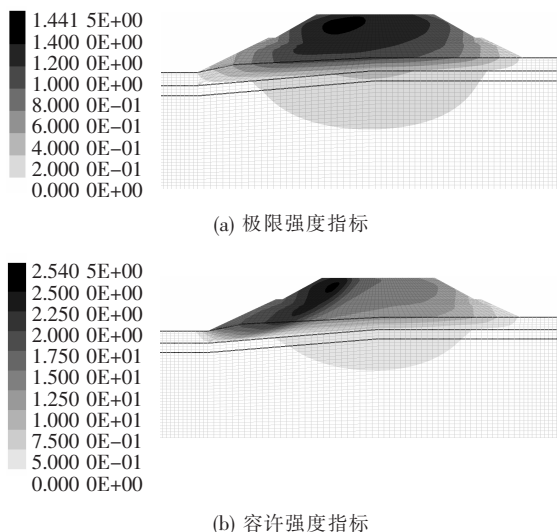


图 10 地基固结后实际强度下整体结构位移图(单位:m)

由图 11 可以发现:较大应变主要出现在软土层、路基台阶边缘以及坡肩位置。软土层主要表现为压缩应变,最大值为 0.14,台阶边缘和坡肩位置主要表现为拉伸应变,最大值为 0.46。

应变是在外力等因素作用下,物体局部产生的相

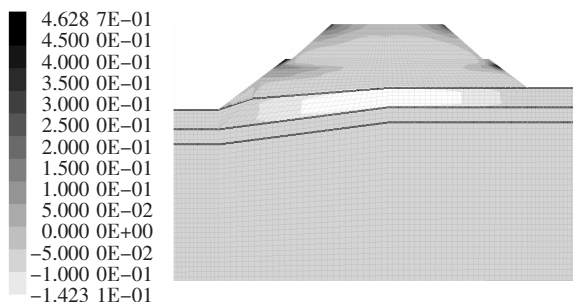


图 11 地基固结后实际强度下结构体应变云图(单位:%)

对变形。位移是应变根据边界条件的积分。结合图 10、11 可知:填土层的位移主要源于自身土体和软土层的变形累积;软土层的位移则主要源于自身的压缩变形;泥岩层变形很小,几乎没有位移。因此,在软土层过渡到泥岩层时产生了明显的位移衰减。

根据图 11,认为地基表面为软土层最大位移面。分析该面的位移特征,可以推断薄层软土地基的主要位移和变形特点。基于已建立直角坐标系,固结后软土层与填土层交界面处的竖向位移和水平位移分布分别如图 12、13 所示。

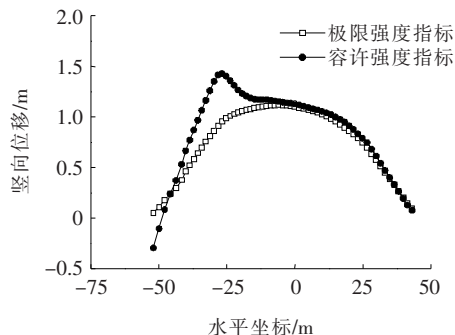


图 12 地基固结后软土层表面竖向位移

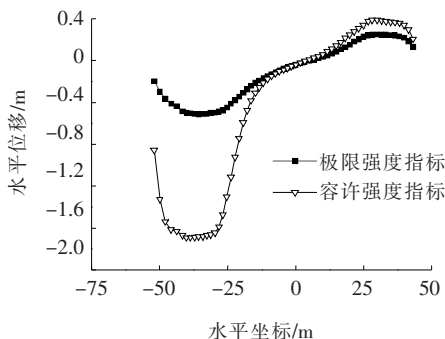


图 13 地基固结后软土层表面水平位移

由图 12 可知:采用极限强度指标时,最大竖向位移位于路基中线附近,两侧坡脚处竖向位移趋近于零。分布曲线近似呈以路基中线对称,开口向下的抛物线形。采用容许强度指标时,最大竖向位移位于路基中

线左侧,位移最大值增加,左侧坡脚位置出现较为明显的土体挤出。分布曲线在路基中线以右与极限强度指标下的曲线重合,整体表现出较大的非对称性。

由图 13 可知:两种工况均在路基两侧坡脚位置产生较大水平位移。采用极限强度指标时,水平位移分布曲线近似呈以(0,0)中心对称,路基中线左侧位移略大于右侧。采用容许强度指标时,交界面处的水平位移整体增加,且路基中线左侧位移增幅大于右侧,分布曲线整体表现出较大的非对称性。

整体来看,当剪切强度较大时,地表倾斜因素对位移分布影响较小,软土层表面位移近似呈对称分布。随着剪切强度减弱,地基表面位移最大值增加,地表倾斜因素影响突显,位移分布曲线呈非对称性增长,坡体左侧更容易发生滑动破坏。

采用不同的强度指标计算,会造成地基固结后软土层表面竖向和水平位移分布曲线产生较大区别。这是因为当采用容许强度指标时,软土层的内摩擦角和黏聚力预估值均降低。在相同应力状态下,软土层内部土颗粒更易达到极限状态,并产生滑动,进而发生更大的变形。

采用极限强度指标进行路基填筑稳定性分析,相当于完全发挥了路基结构的全部承载能力,在该临界状态下,路基结构将无法再承受更多的荷载。采用容许强度指标估算路基填筑过程中产生的位移,会得到偏大的结果,但是这对于工程而言是偏于保守和安全的。因此,采用极限强度指标判断路基的稳定性时,由于模型计算难以全面涵盖实际工况,又未留任何安全储备,有可能得到偏于危险的分析结果。所以,应尽量采用容许强度指标进行路基填筑稳定性分析,以预留一定的安全储备。

为了探明该试验中软土固结后整体结构的强度富余程度,对该路基整体结构进行了稳定性计算。对软土层取固结快剪强度参数,其余土层按表 1 实际参数取值,计算得该结构的实际安全系数为 1.22。证明该软土地基固结后作为结构持力层有足够的储备。

#### 4.4 固结时间预估

经上述计算,该新近沉积的欠固结软土经固结处理后,可作为工程地基土使用。若采用路基堆载对软土层进行固结处理,现对其所需的固结时间进行预估。一般通过太沙基单向渗流固结理论计算土层的平均固结度( $\bar{U}_z$ ),计算式如下:

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{m^2} e^{-\frac{m^2 \pi^2}{4} T_v} \right) \quad (5)$$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (6)$$

$$C_v = \frac{k E_s}{\gamma_w} \quad (7)$$

式中: $m$  为正奇数; $T_v$  为时间因数; $t$  为固结历时; $H$  为排水最长距离,据图 2 取 6.13 m; $C_v$  为土层的固结系数; $k$  为渗透系数; $E_s$  为侧限压缩模量; $\gamma_w$  为水的重度。

研究认为泥岩层不透水,土层满足太沙基单向渗流固结理论的基本假设。经计算该软土层经堆载作用,平均固结度达到 95% 所需要的固结时间约为 17 个月。所需施工时间偏长,建议使用其他地基处理方式。

## 5 结论与建议

分析成宜高速公路某段软土地基软土层的基本物理力学性质,通过数值模拟计算,对该段软土路基结构的稳定性进行了研究,探讨了该软土层作为工程地基土使用的可能性,得到以下主要结论:

(1) 该软土为新近沉积的欠固结高液限黏土,天然含水率较大,具有高压缩性,天然抗剪强度较低。固结后抗剪强度增长了大约 2 倍。

(2) 未固结软土作为地基土使用时,不足以支撑上部路基荷载;但经充分固结后,该软土的强度满足路基设计需求,此时路基整体结构的实际安全系数为 1.22。

(3) 地基土抗剪强度较低时,地表倾斜对地基土的位移影响更为明显。临界状态时,路基结构倾向于从薄弱一侧先发生破坏,另一侧保持相对稳定。

(4) 该软土天然渗透系数较低。仅依靠堆载促进软土渗流固结,所需施工时间偏长。在工程中应结合工期成本合理选择地基处理方式。

## 参考文献:

- [1] 鞠恩林. 换填法在公路软土地基处理中的应用研究[J]. 交通标准化, 2009(Z1).
- [2] 肖策. 静力排水固结法在软土路基处理中的应用研究[J]. 施工技术, 2015(8).
- [3] 陈贺, 李兴庆, 李桂林, 等. 土工材料包裹碎石桩复合地基试验研究[J]. 中外公路, 2019(1).
- [4] 秦植海. 饱和粘性土任意固结度的不排水剪强度指标推求方法[J]. 工程勘察, 1996(5).
- [5] 杨嵘昌. 饱和粘性土任意固结度的不排水抗剪强度[J]. 南京建筑工程学院学报(自然科学版), 2001(4).
- [6] 汪洪星, 杨春和, 陈锋, 等. 软土抗剪强度指标随固结度变化规律分析[J]. 岩土力学, 2014(S1).
- [7] 包伟力, 周小文. 地基强度随固结度增长规律的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2001(4).
- [8] 何群, 冷伍明, 魏丽敏. 软土抗剪强度与固结度关系的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005(2).
- [9] 刘红军, 陶夏新, 程培峰. 寒区湿地软土抗剪强度特征试验研究[J]. 公路交通科技, 2008(8).
- [10] 李如敏. 浅层软土地基处理新技术的探讨[J]. 北方交通, 2007(7).
- [11] 龙森, 洪宝宁, 林梓煜. 浅层软土路基的处理方案选择实例分析[J]. 西部探矿工程, 2008(3).
- [12] 曹正波, 王晓明. 常见软基处理方法在河北省高速公路建设中的应用[J]. 交通标准化, 2014(24).
- [13] SL 237—1999 土工试验规程[S].
- [14] JGJ 83—2011 软土地区岩土工程勘察规程[S].
- [15] 石振华, 王梅, 咸大庆, 等. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [16] 陈育民, 徐鼎平. FLAC<sup>3D</sup> 基础与工程实例[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [17] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [18] 段彦福, 宋玲, 刘杰, 等. 地震作用下土工格栅加筋土边坡路堤动力分析[J]. 中外公路, 2019(6).
- [19] 陈子敬. 砾石隔断层对寒区盐渍土路基边坡稳定性的影响[J]. 中外公路, 2019(6).