

文章编号: 1674—8247(2019)06—0001—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.001

复杂结构软基任意点固结度计算

赵晓彦¹ 丁子豪¹ 严 群¹ 蒋楚生²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:固结度是软基稳定性计算及固结效果评价的重要参数,现行规范中的固结度确定方法主要适用于软土层厚度均匀的均质理想地基条件。孟加拉国达卡铁路沿线广泛分布三角洲相及冲积相软土,设计使用排水板堆载预压法对软土地基进行处理。该线路地基结构复杂,线路横纵断面软土厚度不均,常有土层尖灭或夹砂层、砂质透镜体,规范方法不能很好地适用于该地基的固结度计算。为此,文章提出适用于求解复杂结构软土地基中任意位置、任意时刻固结度的“有效应力法”,论证了该方法的可行性,并采用该方法对达卡铁路代表性横断面进行计算,得到地基固结度分布情况。研究成果可为软土地基处理地基固结度计算提供参考。

关键词:复杂结构; 软基; 固结度; 排水板; 堆载预压

中图分类号:TU471⁺.8 **文献标志码:**A

Calculation Method of Consolidation Degree at Arbitrary Points of Soft Foundation with Complex Structures

ZHAO Xiaoyan¹ DING Zihao¹ YAN Qun¹ JIANG Chusheng²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Consolidation degree is an important parameter for foundation stability calculation and consolidation effect evaluation of soft foundation. The calculation method of consolidation degree in current codes is more suitable for homogeneous ideal foundation conditions with uniform thickness of soft soil layers. The delta facies and alluvial clay is widely distributed along Dhaka railway in Bangladesh. For the geological condition, the preloading consolidation method with the drainage plate is adopted for treatment of soil foundation. The foundation structure of the line is complex, soft soil is uneven in cross-section and profile of the railway and there are often soil layer pinchout, or sandy layers and sand lenses. It is considered that the method in the code cannot be well applied to the foundation consolidation degree calculation of Dhaka railway. For this reason, an "effective stress method" is put forward to solve consolidation degree at any position and any time in soft foundation and the feasibility of this method is proved in the paper. This method is used to calculate the consolidation degree of a typical cross-section of Dakar railway. Research results can provide reference for the calculation of consolidation degree in soft soil foundation treatment.

Key words: complex structure; soft foundation; consolidation degree; drainage plate; preloading

收稿日期:2019-09-30

作者简介:赵晓彦(1977-),男,博士,教授。

基金项目:国家自然科学基金项目(41672295)

引文格式:赵晓彦,丁子豪,严群,等. 复杂结构软基任意点固结度计算[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):1-7.

ZHAO Xiaoyan, DING Zihao, YAN Qun, et al. Calculation Method of Consolidation Degree at Arbitrary Points of Soft Foundation with Complex Structures [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 1-7.

1 工程概况及研究现状

孟加拉国达卡铁路是连接中国及“泛亚铁路”的重要通道之一。铁路起自达卡, 终至邦嘎, 总长约 80 km, 途经帕德玛河, 沿线广泛分布第四系全新统三角洲相及冲积相软粘土。钻孔资料显示, 达卡铁路软土地基厚 4~20 m, 具有高压缩性、低渗透性、承载力极低且夹不规则砂层等特点^[1]。设计采用塑料排水板堆载预压法对软土地基进行排水固结处理, 以提高软基承载力并减少路基工后沉降量。代表性钻孔柱状图, 如图 1 所示。

土层 层号	土层 名称	层 厚	柱状图	土层 描述	深度 /m
<1-1>	人工填土	2.6		以粘性土为主	5
<2-2>	软黏土	2.5		含粉细砂	
<3-1>	松散粉细砂	2.2		含云母	
<2-2>	软黏土	2.5		含粉细砂	10
<2-1>	软土	2.3		含粉细砂	
<2-2>	软黏土	2.4		含粉细砂	
<3-1>	松散粉细砂	2.1		含云母	15
<2-2>	软黏土	2.8		含粉细砂	
<3-1>	松散粉细砂	2.2		含云母	
<3-3>	中密粉细砂	2.3		含贝壳碎屑	20
<4-3>	中砂	2.2		含小砾石	
<3-4>	密实粉细砂	2.3		含贝壳碎屑	
<3-3>	中密粉细砂	2.2		含贝壳碎屑	30
<3-4>	密实粉细砂	8.4		含贝壳碎屑	
<3-4>	密实粉细砂	8.4		含贝壳碎屑	35

图1 达卡铁路代表性钻孔柱状图

按现行规范要求^[2], 采用考虑固结的稳定系数计算公式进行路堤和地基的整体稳定性分析, 如式(1)所示。

F_s = \frac{\sum (S_i + \Delta S_i) + \Delta S_j}{P_T} \tag{1}

式中: ΔS ——由固结度增长的地基强度, $\Delta S_i = W_{ui} U_i \cos \alpha_i \tan \varphi_{gi}$;

U_i ——土条滑裂面所处位置的固结度^[3]。

该计算方法属瑞典条分有效固结应力法, 计算稳定系数须首先获取各土条在滑面位置的固结度。

对排水竖井穿透压缩层的堆载预压固结度的求解问题, 早期 Barron 基于“自由应变”和“等应变”假定对瞬时加载情况进行了研究, 自由应变假定在均布荷载作用下地基竖向变形自由, 等应变假定砂井地基中无侧向变形且同一深度上任意一点垂直变形相等^[4]。Yoshikuni 等人在 Baron 应变假定的竖井固结经典理论基础上, 对考虑井阻和涂抹的情况进行了严格推导^[5], 但结果极其复杂, 难以应用于工程实践。此后

Hansbo^[6]、Xie^[7] 等人相继提出简化算法, 但此类简化算法主要适用瞬时加载、软基厚度均匀、土体渗透性一致且不随时间变化等条件, 不适用于多级堆载、成层地基、可变固结系数等情况。

罗勇^[8] 等人对土层厚度、性质分布均匀的成层地基中, 不同定义下的总平均固结度进行了对比研究。考虑到实际情况更复杂的边界情况, 郭彪^[9] 等人研究了半透水边界条件下的双层竖井地基固结特性。周煜^[10] 等人考虑了起始水力坡降对竖井影响区渗流的影响, 在传统固结理论上建立了新的固结模型。刘忠玉^[11] 等人基于 Hansbo 渗流, 对理想砂井地基按差分法进行了分析, 认为地基不满足 Darcy 渗流条件将导致固结减缓; 与通常将排水体影响区视为圆柱状的方法不同。谢康和^[12]、牛犇^[13] 等人对竖向排水体的影响区形状作出多种假设, 推导了相应的固结度。夏高翔^[14]、黄朝煊^[15] 等人考虑井阻时效性, 讨论了竖井影响区渗透系数随深度和时间变化对地基固结的影响。

对排水体未打穿压缩层的情况, 王立忠^[16]、刘加才^[17] 等人分别按照瞬时加载和变荷载的情况对砂井区和下卧层的平均固结度进行了推导。周开茂^[18] 等人提出在排水板底面以下土层中设置虚拟砂井, 考虑三维渗流情况, 得到单面和双面排水条件下地基总平均固结度的解析解。

国内现行规范^[2] 中, 对砂井区的固结度求解多采用“改进高木俊介法”, 该方法由谢康和、曾国熙等人, 在高木俊介法的基础上进一步改进^[19], 将径向固结度与竖向固结度进行了整合; 对于下卧层则按照一维渗流固结计算, 得到下卧层在单、双面排水情况下的总平均固结度。

以上竖井地基固结理论, 虽有涉及更加复杂的边界透水特性、可变井阻、渗流理论等情况, 相较于理想井固结理论更符合真实情况, 但一般均以单个竖井影响区域作为研究对象, 没有充分考虑井群的相互作用和加载范围的有限性, 亦未考虑软土层厚度不等、夹杂不透水砂层等不均匀情况, 由单井理论得到的平均固结度不能完全反应地基的固结发展情况。

从平均固结度的定义来看, 对于塑料排水板穿透压缩层的情况, 只有在土层厚度均匀、土体渗透性质一致时, 整个压缩层的平均固结度才等于任意某根排水板影响范围内土柱体的平均总固结度, 同时才约等于地基土中任意一点的固结度, 亦即瑞典条分有效固结应力法计算时任意土条滑裂面所处位置的固结度 U_i 。对于地基中土层厚度均匀但层数较多的情况, 通常采用各土层的固结系数平均值(加权平均或算术平均)

计算地基的平均固结度^[20]。

达卡铁路软土地基土层层数多且厚度不均,在同一路基横断面上(如图2所示)软土层厚度可从几米变化到十几米,且常夹杂不透水的砂质透镜体或粉细砂层。由于地层条件复杂,无法直接套用对固结系数取平均值的方法计算平均固结度。且对于软土厚度超过6 m的区域,规范中的计算公式也已不能完全符合地基的实际情况。

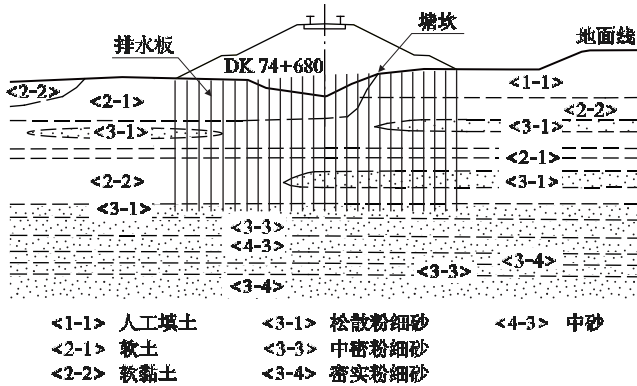


图2 达卡铁路代表性地基断面示意图

对于孟加拉国达卡铁路的不均匀软基,为进行稳定性分析,在求解地基中任意某点固结度时,现行规范提供的方法已不完全适用。因达卡铁路软基的实际地质条件较为复杂,堆载中心处单个排水板影响区域不能代表整个地基的固结情况,继而规范方法求出的砂井区及下卧层平均固结度不能代表该区域内任意一点的固结度。为此,本文作者提出“有效应力法”,该方法不受地基复杂程度的约束,可获得地基中任意位置在任意时刻的固结度。

2 软基任意点固结度计算方法

在堆载预压地基处理过程中,地基土体在附加应力作用下将产生超静孔隙水压力,超静孔隙水压力完全消散即代表固结完成,对应固结度 U 等于 100%。为此笔者认为可将地基中任意点在任意时刻的固结度视作该点在该时刻竖向有效应力的增量与该点附加应力之比,即:

$$U_t = \frac{\Delta\sigma'_t}{p} \tag{2}$$

根据有效应力原理,任意点总应力由式(3)计算。

$$\sigma = \sigma' + u = \sigma'_z + u_0 + p \tag{3}$$

式中: σ 、 σ' 、 u ——分别为该点的总应力、总有效应力和孔隙水压力;

σ'_z 、 u_0 、 p ——分别为该点的自重有效应力、静孔隙水压力和附加应力。

结合式(3),可将式(2)改写:

$$U_t = \frac{\sigma'_t - \sigma'_0}{\sigma_t - \sigma_0} \tag{4}$$

式中: σ_0 、 σ_t ——分别为堆载前和堆载结束后的总应力;

σ'_0 、 σ'_t ——分别为该点在堆载前和堆载过程中任意 t 时刻的总竖向有效应力。

式(4)即为本文提出的“有效应力法”。

3 有效应力法的正确性验证

3.1 计算模型

选取地层单一、土层均匀,满足规范法理想地基条件的算例,将本文提出的“有效应力法”与规范法的求解结果进行对比,以验证本文方法的准确性。

该算例为双面排水、排水板穿透软土层的多级等速加载问题。路堤顶宽 8 m,填高 9 m,按 1:2 坡比 4 m 一级放坡。软土层厚 12 m,其下为砂土层。排水板宽 100 mm、厚 20 mm,间距 1.2 m,正方形布置,穿透软土层,并深入顶部填土和底部砂土层各 0.5 m,如图 3 所示。

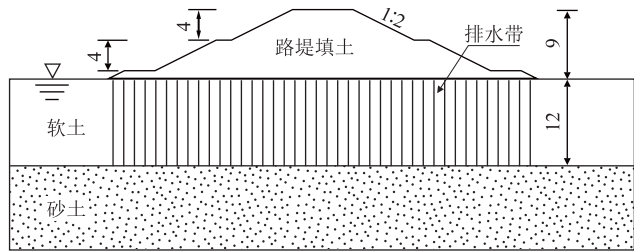


图3 验证算例示意图(m)

选用通用岩土有限元程序 Plaxis 2D 求解路堤堆载过程中地基总应力、有效应力的变化情况,软件采用可精确反映孔压消散和土骨架变形相互关系的比奥固结理论,计算选用平面应变模型,15 节点三角形单元。计算参数如表 1 所示,各土体均采用摩尔库伦模型。

表1 土体参数表

土体类型	路堤填土	软土	砂土
天然重度/(kN/m ³)	18	17.4	18
饱和重度/(kN/m ³)	19	18	18.5
水平渗透系数/(cm·s)	1	8.87×10 ⁻⁸	1
竖向渗透系数/(cm·s)	1	5.63×10 ⁻⁸	1
弹性模量/kPa	4×10 ⁴	4.02×10 ³	2.4×10 ⁴
泊松比	0.26	0.33	0.28
内聚力/kPa	15	16.9	11.7
内摩擦角/(°)	27	7.6	28.8

路堤填筑分 5 级完成,前 4 级每级堆载 2 m,最后一级堆载 1 m。每级堆载用时 30 d,两级堆载之间间

隔30 d, 9 m堆载全部填筑结束后静置130 d, 至此整个堆载过程结束, 共用时400 d。以荷载大小表示的路堤分级填筑过程如图4所示。

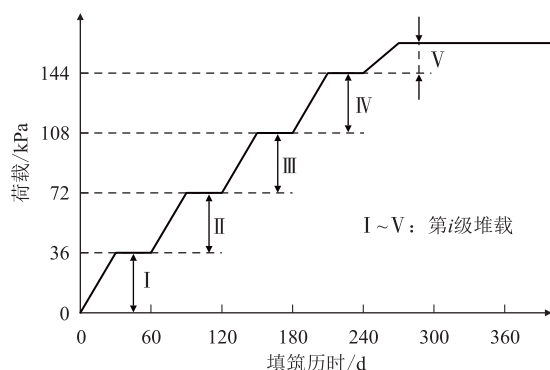


图4 路堤填筑过程示意图

3.2 计算结果及分析

规范中“改进高木俊介法”计算公式如下。

$$\bar{U}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} \left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right] \quad (5)$$

式中： \dot{q}_i 、 $\sum \Delta p$ ——分别表示第*i*级荷载的加载速率和各级荷载的累加值；

T_i 、 T_{i-1} ——分别为第*i*级荷载加载的起始和终止时间；

α 、 β ——是与地基土排水固结条件有关的参数，可在规范中查表获取，本文取 $\alpha = 0.81$ ， $\beta = 0.03$ 。

该方法针对的计算区域为路堤堆载中心线附近的软土层，如图5所示。

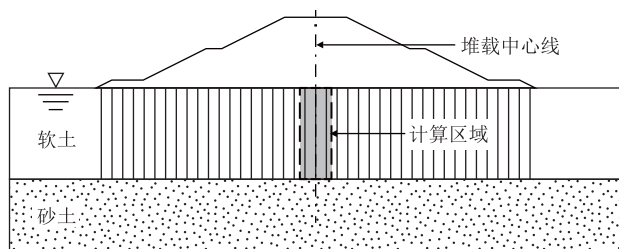


图5 规范方法的计算区域示意图

按此方法可得与填筑历时相关的地基平均固结度变化曲线，如图6所示。计算时将 $\sum \Delta p$ 视作某级堆载前包括该级堆载的各级荷载累加值，而非9 m填高对应总荷载，故图中第II~V级堆载开始时刻固结度曲线出现下降。

由图6可知，在每级堆载过程中，固结度近似呈直线快速增长；在每两级堆载间隔的30 d中，固结度继

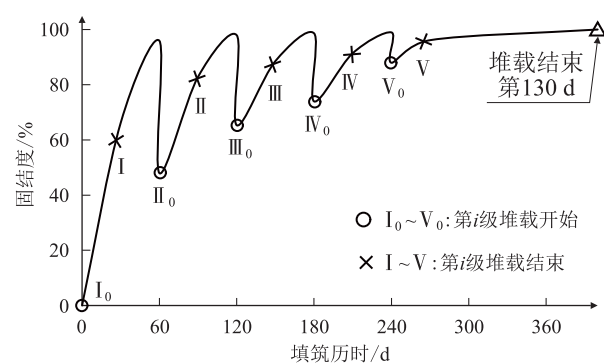


图6 规范方法求得的固结度变化曲线图

续增长但增长速率减小。在第4次堆载结束时固结度已经达到90%以上。

在有限元模型中选取8个计算点，编号如图7所示。计算获得各点总有效应力、总应力随时间变化曲线分别如图8、图9所示。

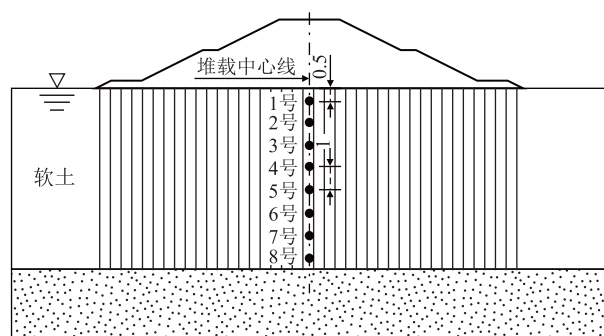


图7 有限元计算点示意图(m)

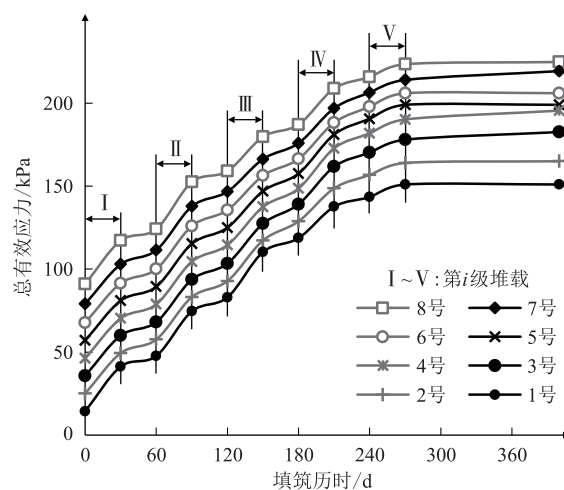


图8 各计算点的总有效应力变化曲线图

将总有效应力和总应力代入式(4)计算，得到各计算点固结度变化曲线如图10所示。

由图10可知，堆载中心线上各计算点固结度变化规律一致，每级堆载过程中，固结度近似呈直线快速增

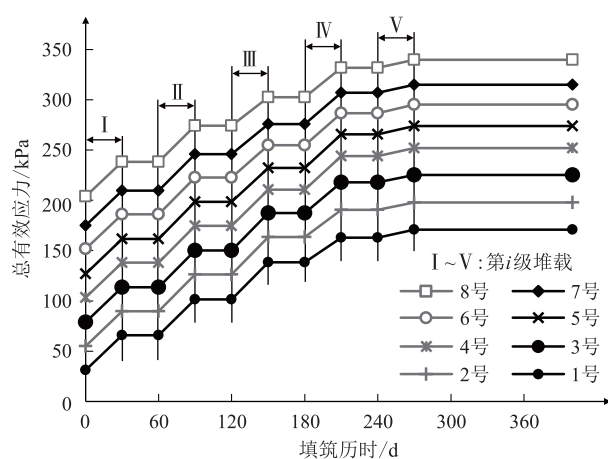


图9 各计算点的总应力变化曲线图

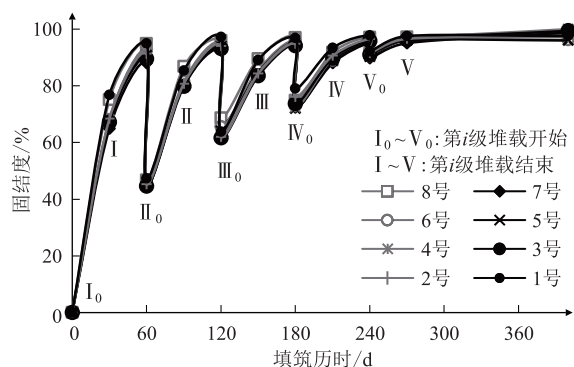


图10 有效应力法求得的不同位置处固结度变化曲线图

长;每两级堆载间隔的30 d中,固结度继续增长但速率减小。因总应力按照某级堆载前包括该级堆载的各级荷载累加值计算,故图11中第Ⅱ~Ⅴ级堆载开始时固结度曲线出现下降。

靠近上部砂垫层和底部砂土层两个透水界面的1号、8号计算点固结度虽相对较高,但整体上各计算点的固结度相差不大,最大仅2.3%,最小0.2%,即固结度沿深度基本一致。为此可将1~8号计算点在同一时刻的固结度取算数平均值,得到堆载中心线处地基内的平均固结度变化曲线,与规范法所得结果进行对比,如图11所示。

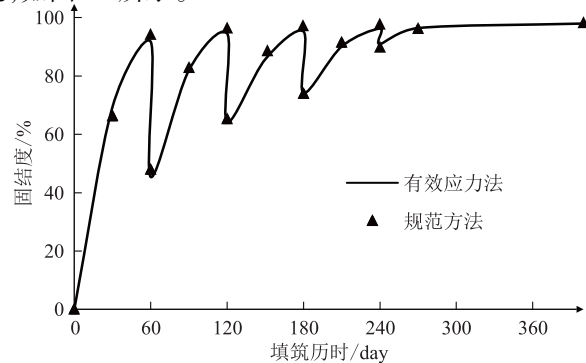


图11 两种方法求得的固结度变化曲线图

由图11可知,本文有效应力法与规范法得出的固结度变化规律一致,且同一时刻所得固结度相差最大仅1.8%,从而验证了本文有效应力法的正确性。

4 达卡铁路代表性断面固结度计算

4.1 计算模型

选取达卡铁路马瓦(Mawa)至邦嘎(Bhanga)段的一代表性断面(如图12所示),按有效应力法求解地基土中固结度分布情况。

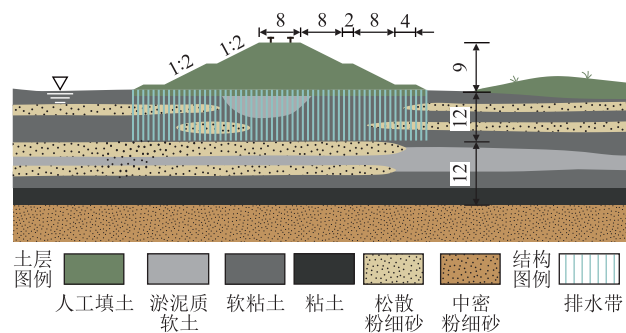


图12 计算断面示意图(m)

该断面地基软弱土层厚24 m,包含3种不同状态的粘性土,分别为淤泥质软土、软粘土和粘土;地基土层内夹杂厚度1~3 m不等的近水平粉细砂层及砂质透镜体,粉细砂层并未横贯整个断面,多数在路堤以下的土层中尖灭。

地基内打设塑料排水板,排水板宽100 mm、厚20 mm、间距1.2 m,按正方形布置,打设深度12 m。路堤填筑过程与图4反映的分级填筑过程相同。

现场取样及室内试验显示,软土层内粉细砂层含有大量淤泥,渗透性极差。故该算例属于单面排水、排水板未穿透软土层的多级等速加载问题。有限元计算的有关参数如表2所示,各土体类型均采用摩尔库伦模型。

4.2 计算结果及分析

针对该计算实例,本文关注9 m堆载结束时,地基内潜在滑面位置的固结度。稳定计算所得剪应变集中条带如图13所示,潜在滑面分左右两条,其中右侧滑面受路堤右侧土坡反压作用影响,发育不明显。左侧滑面对路堤稳定性起控制作用,故对左侧滑面固结度分布情况进行分析,按5 m水平等间距在滑面上选取7个计算点。利用Plaxis软件计算得到各计算点的总有效应力、总应力随时间变化曲线,分别如图14、图15所示。

由图14、图15可知,1号点总应力增量最小,2~4号点因深度相近,总应力大小及变化情况基本一致。

表2 土体参数表						
土体类型	人工填土	淤泥质软土	软粘土	粘土	含淤泥松散粉细砂	中密粉细砂
天然重度/(kN/m ³)	18	17.4	18	18.5	18.5	19
饱和重度/(kN/m ³)	19	18	18.5	19	19	19.5
水平渗透系数/(cm·s)	1	3.44×10^{-8}	3.76×10^{-8}	1.29×10^{-7}	3.87×10^{-7}	1
竖向渗透系数/(cm·s)	1	2.28×10^{-8}	3.05×10^{-8}	8.84×10^{-8}	1.58×10^{-7}	1
弹性模量/kPa	2.8×10^4	2.3×10^3	4.5×10^3	6.3×10^3	1.6×10^4	2.3×10^4
泊松比	0.28	0.33	0.3	0.3	0.28	0.26
内聚力/kPa	15	17.9	22.5	28.1	12.3	14.7
内摩擦角/(°)	38	8.6	8.9	10.3	30.9	33.9

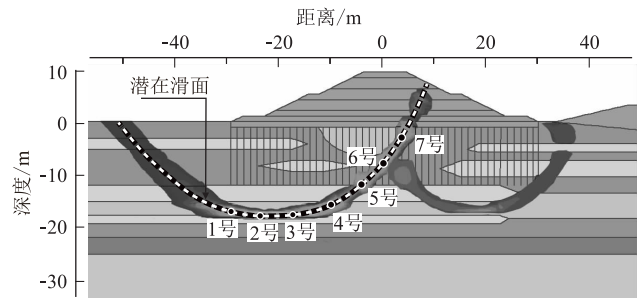


图13 潜在滑面及计算点图

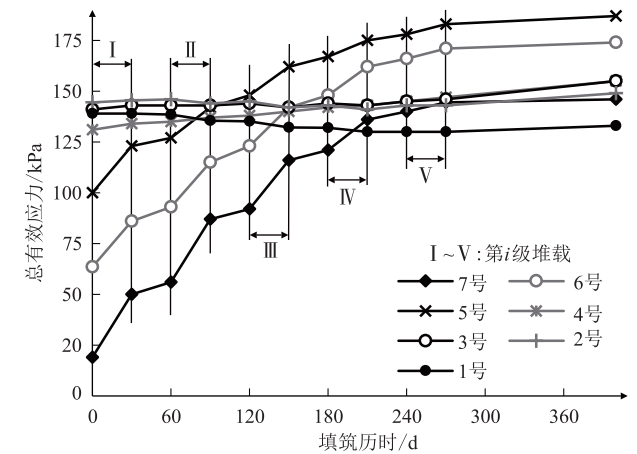


图14 各计算点的总有效应力变化曲线图

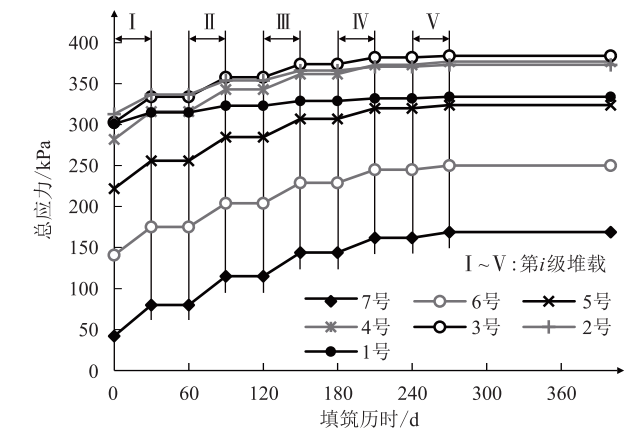


图15 各计算点的总应力变化曲线图

排水板区的5~7号点总应力及总有效应力有明显增长;下卧层中的2~4号点总有效应力略有增加。1号点在整个堆载过程中总有效应力持续降低,至第270 d堆载全部结束时才开始缓慢升高,第400 d时总有效应力仍低于初始应力。

按固结度定义,认为1号点固结度始终为0。除1号点外,其余各计算点固结度按有效应力法计算,得到固结度变化曲线如图16所示。第400 d排水板区中上部的6号、7号点固结度均达98%,排水板区底部的5号点固结度为85%;滑面底部的2~4号点,因排水条件较差,固结程度较低,固结度分别为7%、17%、25%。以各计算点固结度为分界点,插值得到滑面位置固结度分布如图17所示。

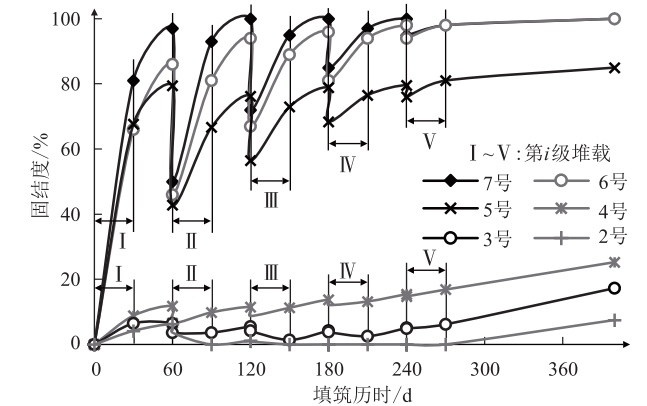


图16 有效应力法求得不同位置处固结度变化曲线图

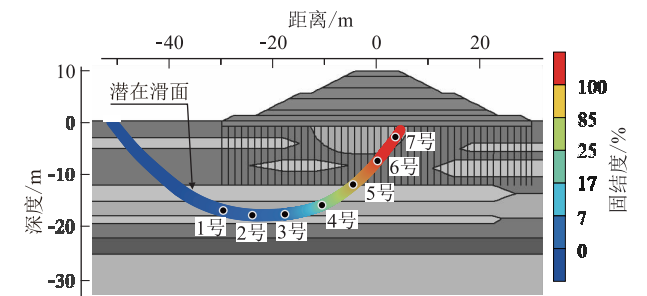


图17 第400天时滑面位置固结度分布图

由图 17 可知,滑面不同位置固结度有明显差异。通过加权平均可得排水板区平均固结度为 93.6%,下卧层平均固结度为 23%;采用规范“改进高木俊介法”,通过简化地层条件及固结系数加权平均的方法,求解出排水板区平均固结度在 400 d 时可达 98%,下卧层按一维固结计算平均固结度可达 35%。可见规范方法在计算复杂结构软基时,整体高估了地基土的固结程度,按有效应力法可更真实反映潜在滑面附近固结度的分布情况。

5 结论

本文针对复杂结构软基,提出了求解排水板堆载预压软基任意点固结度的有效应力法,并应用于达卡铁路软基的固结度计算,验证了本文所提出的有效应力法的正确性和对复杂结构软基固结度计算的准确性。

参考文献:

- [1] 郑晓晶,张世殊,冉从彦,等.孟加拉国达卡软黏土的工程特性及地基处理方法探讨[C]//2015 年全国工程地质学术年会论文集.长春,2015:194-198.
ZHENG Xiaojing, ZHANG Shishu, RAN Congyan, et al. Discussion on the Engineering Characteristics and the Suitable Treatment Methods of Dhaka Soft Clay in Bangladesh [C] //2015 Proceedings of the National Annual Meeting of Engineering Geology. Changchun, 2015: 194-198.
- [2] TB 10106-2017 铁路工程地基处理技术规程[S].
TB 10106-2017 Technical Code for Ground Treatment of Railway Engineering[S].
- [3] 赵维炳.排水固结加固软基技术指南[M].北京:人民交通出版社,2005.
ZHAO Weibing. Technical Guide for Drainage Consolidation for Soft Foundation Treatmeng [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [4] BARRON R A, LANE K S, KEENE P, et al. Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells [J]. Trans of Asce, 1948, 113(118): 324-360.
- [5] YOSHIKUNI H, NAKANODO H. Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability [J]. Soils and Foundations, 1974, 14(2): 35-46.
- [6] HANSBO S. Consolidation of Fine-grained Soils by Prefabricated Drains [C]//Proc 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1980: 677-682.
- [7] XIE K H, LEE K K, CHEUNG Y K. Consolidation of A Two-Layer System with Vertical Ideal Drains [C]//Proceedings of the 8th ICCMAG. Morgantown, 1994: 789-794.
- [8] 罗勇,龚晓南,连峰.成层地基固结性状中不同定义平均固结度研究分析[J].科技通报,2006,22(6):813-816.

LUO Yong, GONG Xiaonan, LIAN Feng. Comparable Analysis of Different Definitions of Average Degree of Consolidation of Layered Soils [J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(6): 813-816.

- [9] 郭彪.竖井地基轴对称固结解析理论研究[D].杭州:浙江大学,2010.
GUO Biao. Analytical Study on Axisymmetric Consolidation Theory of Ground with Vertical Drains [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [10] 周煜,谢康和,刘兴旺.考虑起始比降和涂抹作用的竖井地基固结解[J].工程力学,2014,31(2):103-109.
ZHOU Yu, XIE Kanghe, LIU Xingwang. Analytical Solution for Vertical Drains Considering Threshold Gradient and Smear Effect [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 103-109.
- [11] 刘忠玉,焦阳.基于 Hansbo 渗流的理想砂井地基固结分析[J].岩土工程学报,2015,37(5):792-801.
LIU Zhongyu, JIAO Yang. Consolidation of Ground with Ideal Sand Drains Based on Hansbo's Flow [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 792-801.
- [12] 谢康和,余坤,童磊,等.考虑影响区真实形状的竖向排水井地基固结解[J].岩土力学,2011,32(10):2944-2950.
XIE Kanghe, YU Kun, TONG Lei, et al. Analytical Solution for Consolidation by Vertical Drains Considering Actual Shape of Influence Zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2944-2950.
- [13] 牛犇,唐晓武,张超杰,等.竖井正方形地基固结度解答及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(5):1283-1292.
NIU Ben, TANG Xiaowu, ZHANG Chaojie, et al. Solution and Application of Vertical Drain Consolidation Theory Considering a Square Influence Area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1283-1292.
- [14] 夏高翔,周峰,刘加才.考虑井阻时效的非线性单井地基径向固结解答[J].南京工业大学学报(自然科学版),2016,38(4):105-113.
XIA Gaoxiang, ZHOU Feng, LIU Jiakai. Radical Consolidation Solution of Non-linear Single Sand-drained Foundation Considering Well Resistance Changing with Time [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2016, 38(4): 105-113.
- [15] 黄朝煊,邓岳保,胡国杰.基于排水体椭圆柱假定的井阻非线性竖井地基固结理论[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):725-735.
HUANG Chaoxuan, DENG Yuebao, HU Guojie. Consolidation Theory for Prefabricated Vertical Drain Assuming Elliptic Cross Section and Nonlinear Well Resistance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 725-735.
- [16] 王立忠,李玲玲.未打穿砂井地基下卧层固结度分析[J].中国公路学报,2000,13(3):4-8.
WANG Lizhong, LI Lingling. Consolidation Analysis for Partially Penetrating Sand Drains [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 4-8.

(下转第29页)

土区及深厚层软土等变形不易控制的特殊地质条件地段,建议采用有砟轨道。

(2)地下水是造成隧道内出现上拱、下沉、翻浆冒泥等病害的主要原因,应加强隧道内排水设计,从源头上防止病害的发生。

(3)建立无砟轨道位移观测制度,对隧道内出现的病害及时进行治疗,根据不同病害提出经济合理的维修方案,避免病害范围扩大,影响行车安全。

(4)为便于无砟轨道维修,应研发可快速修复的轨道结构和轨道部件,比如高调节量的扣件等。

参考文献:

[1] 何华武. 无砟轨道技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2005.
HE Huawu. Ballastless Track Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[2] 王继军,尤瑞林,杜香刚,等.重载铁路隧道内无砟轨道结构选型分析[J].铁道建筑,2013,53(5):132-136.
WANG Jijun, YOU Ruilin, DU Xianggang, et al. Structural Analysis of Ballastless Track in Tunnel of Heavy-haul Railway [J]. Railway Engineering, 2013, 53 (5): 132-136.

[3] 李成辉. 铁路轨道[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
LI Chenghui. Railway Track[M]. Beijing:China Railway Publishing House, 2010.

[4] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
ZHAO Guotang. Ballastless Track Structure of High Speed Railway

[M]. Beijing: China Railway Publishing House,2006.

[5] 谢旭. 黔桂线定水坝隧道内无砟轨道病害成因及整治研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
XIE Xu. Reaseach on the Cause and Regulation of Ballastless Track Disease in Dingshuiba Tunnel of Guiyang-Guilin Line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[6] 师杨杨. 高速铁路路基沉降病害整治技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2016.
SHI Yangyang. Researches on High-speed Railway Subgrade Settlement Treatment Technology [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.

[7] 赵彦旭. 岩溶隧道内无砟轨道上拱原因分析与治理[J]. 铁道建筑,2017,57(12):113-115.
ZHAO Yanxu. Analysis and Treatment of Upward of Ballastless Track Slab in Karst Tunnel [J]. Railway Engineering, 2017, 57 (12): 113-115.

[8] 王冲,王起才,张戎令,等. 无砟轨道高速铁路路基上拱病害成因分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(12):252-256.
WANG Chong, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Analysis of Arch Disease of Ballastless Track High-speed Railway [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12): 252-256.

[9] 李传勇,罗木华. 高速铁路无砟道床上拱病害整治技术研究[J]. 上海铁道科技,2018,40(1):96-97.
LI Chuanyong, LUO Muhua. Research on Treatment Technology of Disease on the Crown of Ballastless Track of High-speed Railway [J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2018, 40(1): 96-97.

(编辑:车晓娟 白雪)

(上接第7页)

[17] 刘加才,施建勇,赵维炳,等. 变荷载作用下未打穿竖井地基固结分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1041-1046.
LIU Jiakai, SHI Jianyong, ZHAO Weibing, et al. Consolidation of Ground with Partially Penetrated Vertical Drains under Time-dependent Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1041-1046.

[18] 周开茂,谢康和,应宏伟,等. 双面排水条件下未打穿竖井地基固结计算[J]. 浙江大学学报(工学版),2007,41(1):151-156.
ZHOU Kaimao, XIE Kanghe, YING Hongwei, et al. Computation for Consolidation of Soft Soil with Partially Penetrated Vertical Drain

under Double-drainage Condition[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(1): 151-156.

[19] 张长生,高明显,强小俊. 深圳前海湾海相淤泥固结系数变化规律研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(S1):247-252.
ZHANG Changsheng, GAO Mingxian, QIANG Xiaojun. Variation Laws of Consolidation Coefficient of Marine Clay in Houhai Bay of Shenzhen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 247-252.

[20] TB 10035-2018 铁路特殊路基设计规范[S].
TB 10035-2018 Code for Design on Special Subgrade of Railway [S].

(编辑:赵立红 张红英)