

不同软基处理方法工后沉降与稳定研究

张传峰¹, 陈礼仪¹, 周应华², 祝世强³

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司交通设计研究院, 四川 成都 600031;

3. 四川地勘局华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 600081)

摘要:目前高速公路深厚软土地基常用的处理方法主要有排水固结法、刚性桩复合地基法以及它们的组合方法,为了更好的了解这些软基处理方法的固结与沉降情况,以及施工过程对沉降与稳定的影响情况,确定预压卸载时间和路面施工时间,很有必要对这些软基处理方法的沉降与稳定变化规律进行研究。本文建立4种常用深厚软基处理有限元分析模型,通过超孔隙水压力的消散探讨总沉降、工后沉降随时间变化的规律,以及不同施工阶段的稳定变化规律,以期针对具体工程选用合适的处理方法,一方面保证路堤施工期和运营期的安全,另一方面达到工程建设经济性的要求。

关键词:软基处理;数值模拟;工后沉降;稳定

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672-7428 (2009) S1-0284-04

1 引言

当前按照工后沉降控制沉降越来越得到人们的重视和应用,这主要是因为工程实践中经常出现虽然施工期稳定和沉降满足要求但是工后沉降则较大,严重的可能造成道路损毁阻断交通,可见按工后沉降设计的重要性。按控制工后沉降设计就是把工后沉降控制在规定的限制值内作为目标,它概括了保证安全稳定和正常使用功能两方面的要求^[1]。本文采用数值分析手段对不同软基处理方法的沉降稳定规律研究,为设计者合理选择软基处理方法和进行工后沉降控制设计提供参考。

2 模型的建立

2.1 模型的建立

高速公路软土地基处理方式多种多样,本文只针对常用软土地基处理进行数值模拟,软件采用二维有限元计算软件 PLAXIS8.2,建立四种模型,模型1为单独采用袋装砂井处理的路基,模型2为单独采用刚性桩复合地基处理的地基,本工程选用的是 CFG 桩,模型3、模型4均为采用袋装砂井和 CFG 桩的组合地基处理方案,不同的是二者施工顺序不同,模型3为先施工 CFG 桩再施工袋装砂

井,模型4正好相反,目的是探讨施工顺序对稳定和沉降的影响。本工程路幅宽40m,路面结构层厚1m,路堤填筑高度4m,分两层填筑,每层2m;路堤下有一层0.5m厚的水平排水砂垫层,砂垫层下为深厚软土层,其下为粘土层。刚性桩和袋装砂井的间距均为2m,正方形布置,桩长穿过软土层。几何模型如图1~3所示。

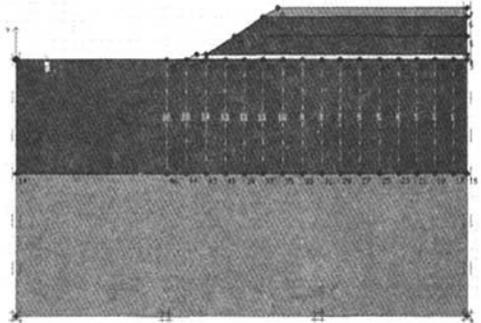


图1 模型1的几何图示

2.2 参数取值(表1)

2.3 计算步骤

根据路堤填筑的实际情况,每个模型所采用的

收稿日期: 2009-08-30

作者简介:张传峰(1981-),男,安徽六安人,成都理工大学防灾减灾工程及防护工程专业硕士研究生,主要从事地质灾害治理与施工技术方面的研究工作。

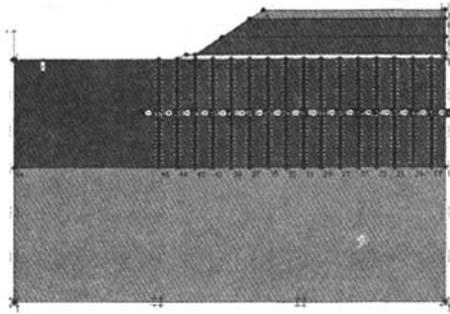


图2 模型2的几何图示

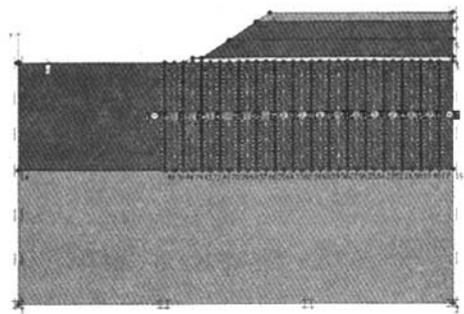


图3 模型3、模型4的几何图示

表1 各土层参数

名称参数	弹性模量 E /MPa	内摩擦角 c /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	粘聚力 ϕ /($^\circ$)	泊松比 ν	水平渗透系数 $k_x/(\text{m} \cdot \text{day}^{-1})$	竖直渗透系数 $k_y/(\text{m} \cdot \text{day}^{-1})$	界面强度 折减因子
路面结构层	1000	30	32	0.2	0	0	刚性
路堤	35	20	30	0.25	0.1	0.1	0.7
砂垫层	20	1	32	0.25	1.0	1.0	0.7
软土层	1.3	8	10	0.4	8×10^{-5}	8×10^{-5}	0.6
粘土层	11	25	16	0.3	8×10^{-4}	8×10^{-4}	刚性

计算步骤也有所不同。程序中所采用的详细步骤如 表2 所示。

表2 不同模型的施工步骤

模型步骤	第一步 (天)	第二步 (天)	第三步 (天)	第四步 (天)	第五步 (天)	第六步 (天)
模型1	袋装砂井 $T_{11} = 10$	路堤第一部分 $T_{12} = 70$	路堤第二部分 $T_{13} = 130$	固结 180 天 $T_{14} = 310$	路面结构层 $T_{15} = 340$	$T_{16} = X$
模型2	刚性桩 $T_{21} = 60$	路堤第一部分 $T_{22} = 120$	路堤第二部分 $T_{23} = 180$	路面结构层 $T_{24} = 210$	$T_{25} = X$	无
模型3	刚性桩 $T_{31} = 60$	袋装砂井 $T_{32} = 70$	路堤第一部分 $T_{33} = 130$	路堤第二部分 $T_{34} = 190$	路面结构层 $T_{35} = 220$	$T_{36} = X$
模型4	袋装砂井 $T_{41} = 10$	刚性桩 $T_{42} = 70$	路堤第一部分 $T_{43} = 130$	路堤第二部分 $T_{44} = 190$	路面结构层 $T_{45} = 220$	$T_{46} = X$

注:表中 T_{ab} 代表累积时间, a 代表模型数, b 代表计算 (施工) 步数, 单位为天, 最后一步的累积时间由固结至最小孔压 $1\text{kN}/\text{m}^2$ 来控制。

3 工后沉降分析

工后沉降分析主要从地表路堤各阶段沉降、工后沉降这两个方面对结果进行分析对比, 指出不同地基处理方法的地基沉降的规律。

3.1 沉降分析

根据有效应力原理 $\sigma = \sigma' + u$, 软土固结的过程主要是软土中超孔隙水压力 u 消散, 有效应力

σ' 增加的过程^[2,3], 而固结的过程其实就是土体压缩的过程, 通过程序对四种模型的计算, 再结合超孔隙水压力的消散分析地表路堤在不同时刻的沉降, 找出沉降变化规律, 为设计者在软土路堤设计时提供参考, 为实际施工中控制工后沉降提供理论依据。选择地表路堤在四种模式的四个阶段沉降对比图, 图中的时间见表2。

对以上分析可以得出：

(1) 图 4 很好的展示了固结过程地基沉降的发展，在第一次加载时由于土中附加应力增大，超静水压力增大，同时由于袋装砂井的存在，孔隙水很快排除，沉降增加明显，同样第二次加载后沉降也有显著增加，与 T_{12} 时刻相比增加了 24.8cm，可见在排水固结过程中上部荷载对沉降影响是很大的。

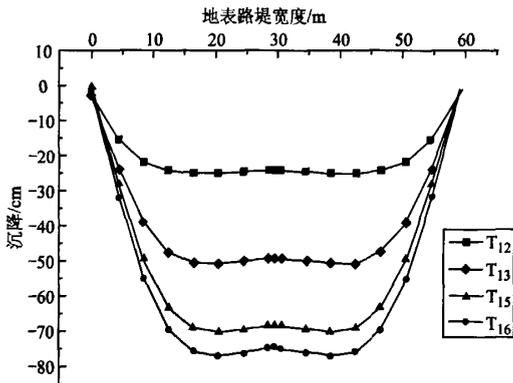


图 4 模型 1 四阶段沉降

(2) 图 5 很好的反映出在刚性桩复合地基上施工路堤时沉降是很均匀的，由此降低了差异沉降，如此对地基稳定性也是很有帮助的，不会因为过大的沉降差而导致失稳现象的出现。刚性桩复合地基沉降受时间控制因素弱，一旦施工完成就可以有效降低路基沉降。

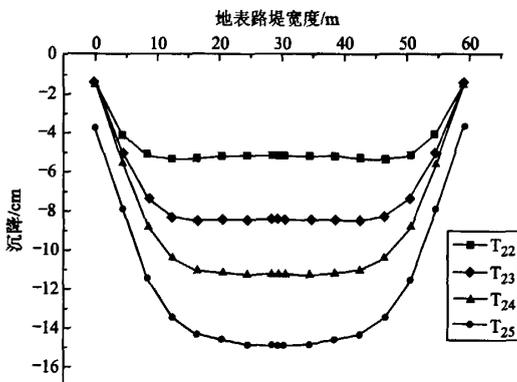


图 5 模型 2 四阶段沉降

(3) 模型 3 与模型 4 的总沉降相差无几，但是在 $T_{33} = T_{43}$ 时刻，沉降分别为 7.7cm 和 9.5cm，说明先施工袋装砂井可以促进软土固结。

(4) 图 6、图 7 与图 5、图 6 对比可以发现组

合方案具有模型 1 工后沉降小的优点同时又具有刚性桩复合地基减小总沉降的优点，并且避免出现弯沉盆给砂垫层和袋装砂井带来的危害^[4]。

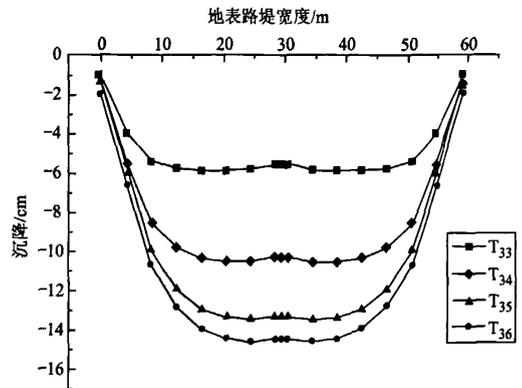


图 6 模型 3 四阶段沉降

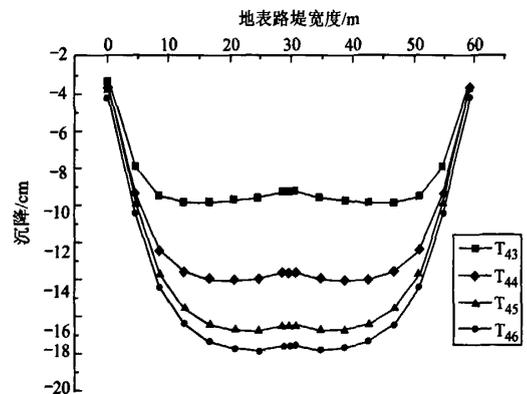


图 7 模型 4 四阶段沉降

沉降的过程与固结及加载的过程是分不开的，要根据不同地基处理方法来分析沉降的不同。

3.2 工后沉降分析

从上面也可以看出地表路堤工后沉降的情况，以下选择四种模型中路面的工后沉降进行对比，对比见表 3。

表 3 工后沉降表

模型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
总沉降/cm	76.05	16.17	16.80	18.78
施工期总沉降/cm	69.67	12.45	15.70	17.69
差值/cm	6.4	3.7	1.1	1.1

从表 3 可以看出：

(1) 模型 1 工后沉降最大，模型 3、4 工后沉

降最小, 并且模型 1 弯沉盆现象明显, 这有可能造成工后不均匀沉降而导致路面开裂, 而模型 3、4 有效减小了工后沉降, 这与袋装砂井所起的作用是分不开的。

(2) 袋装砂井由于施工期预压时间很长, 对减小工后沉降差很有帮助, 结合上节分析可知, 其并不能减小总沉降^[4]。

(4) 模型 3 和模型 4 的工后沉降相同, 与模型 2 相比减小了 70% 左右, 可见袋装砂井排水固结在减小工后上所起的作用是很大的。结合超孔隙水压力消散可知模型 3、4 达到工后沉降最大值的时间要比模型 2 要短许多。同时由于刚性桩复合地

基的作用, 模型 2 和模型 3、4 在总沉降上相差无几, 由此也可以看出袋装砂井在减小总沉降上所起的作用是很小的。

4 稳定性分析

在设计路基时, 不仅要考虑最终的稳定性, 而且还要考虑施工期间的稳定性, PLAXIS 程序采用有限元强度折减法进行稳定性分析, 既可以分析是施工期间的稳定性, 也可以分析最终的稳定性, 可根据不同施工期 4 中模型的安全系数来探讨不同处理方法对地基稳定性的影响。四种模型在不同阶段的安全系数见表 4 所示。

表 4 不同模型不同阶段的安全系数

模型	阶段	T_{12}	T_{13}	T_{15}	T_{16}	最后两阶段增幅
模型 1	安全系数	1.965	1.374	1.166	1.218	0.052
	阶段	T_{22}	T_{23}	T_{24}	T_{25}	0.221
模型 2	安全系数	4.227	2.755	2.207	2.428	0.267
	阶段	T_{33}	T_{34}	T_{35}	T_{36}	0.256
模型 3	安全系数	3.468	2.465	2.081	2.348	0.256
	阶段	T_{43}	T_{44}	T_{45}	T_{46}	
模型 4	安全系数	3.470	2.481	2.093	2.349	

注: 最后一步时间控制仍是采用达到最小孔压 1.0 kN/m^2 的时间, 同上。

从表 4 可以看出:

(1) 四种模型均存在随着荷载的增加, 安全系数在不断的减小, 当路面结构层施工完成时达到最小值。由此可知路基失效机制在开始加载后逐渐发展, 在最后一次加载过程中达到最大值, 即安全系数最小, 可见施工期的稳定性的不断变化的, 这点不容忽视。

(2) 就最后两阶段的安全系数增幅而言, 模型 2、3、4 均大于模型 1, 这主要跟刚性桩的存在有很大关系。

(3) 模型 3、模型 4 在最后时刻的稳定系数相同。

(4) 模型 2、3、4 一旦刚性桩施工完成, 软土地基的稳定则提高很多, 所以桩体复合地基增大地基承载力的同时也增加了路基的稳定性^[3,5], 用承载力控制稳定是合理的。

5 结论

本文通过建立四种不同软基处理方法的有限元模型进行固结、沉降分析, 得出以下结论:

(1) 不同软基处理方法所产生的沉降变化规律差别很大, 把握不同软基处理的沉降规律对实际应用选择何种处理方法很有帮助。

(2) 排水固结法可以有效地减小工后沉降, 但不能降低总沉降, 同时还必须注意弯沉盆现象对排水结构的影响; 刚性桩复合地基可以有效地提高地基承载力, 从而减小总沉降和工后沉降, 并增加沉降的均匀性。

(3) 对于组合方案处理的软土地基, 其沉降与施工顺序有一定的关系, 先施工袋装砂井对减小工后沉降影响不大, 但根据工程经验可以减少 CFG 桩成桩时的挤土效应。

(4) 软土地基的沉降与施工时的加荷速率有密切的关系。加荷过程中, 一方面地基土的强度因固结而提高, 另一方面剪应力也在增大, 所以合理加载计划, 对保证地基施工期间的稳定性十分重要。

(5) 软土地基施工加载期的稳定性不容忽视。

(6) 由于计算理论存在诸多假设, 计算参数

(下转第 291 页)

岩体结构复杂, 架空、漏失严重, 钻进中卡钻、套管断裂等事故频繁发生。造成套管跟进深度无法达到设计基岩面, 大大降低成孔速度, 影响工期, 同时增加施工成本。其中数量最多的 1800kN 级锚索跟管选用 $\Phi 168\text{mm}$ 套管, 在常规工艺下很难突破 50m, 一般在 40m 时套管靴断裂比例大幅提高。一旦管靴断裂就必须拔管重钻, 极大地影响工程进度。由于频繁的提拔钻具, 发现二次跟管时较第一次跟管容易; 于是出现了在超过 50m 深的锚索孔先用 $\Phi 178\text{mm}$ 一次跟管, 拔出后换 $\Phi 168\text{mm}$ 二次跟管的工艺。这种方法在现场是可行的, 证明降低管阻能够提高跟管钻进的效率, 由于冲击器频率是一定的, 相应地也就增加了套管的跟管钻进寿命。

基于以上分析和现场条件, 小湾堆积体施工在以下几方面做了相应的改进并取得较好的效果。2004 年在左岸饮水沟 2 号山梁抢险时完成 1800kN 级堆积体锚索 242 根, 最深施工孔深 80.0m, 平均跟管深度 43.0m, 最大跟管深度 65.0m, 保证了左岸饮水沟 2 号山梁堆积体抢险加固施工的需要, 对 2 号山梁的变形稳定起到了决定性作用。

(1) 材质和热处理性能改善。偏心跟管钻具(含管靴)选用 35CrMo 或 40CrMnMo 高强度材料, 经调质、渗碳、淬火热处理工艺处理, 材料韧性和强度与传统钻具 DZ40 相比均有很大提高。

(2) 改进套管与管靴连接方式。为了提高管靴寿命, 套管靴以内螺纹结构取代传统外螺纹, 增加管靴壁厚使结构更加合理;

(3) 管靴长度调整。加长管靴长度使冲击跟管台阶与套管连接螺纹的距离增加, 减弱冲击力引起的应力集中对连接螺纹根部的影响。

(4) $\Phi 89\text{mm}$ 螺旋叶片钻杆。复杂地层钻孔较深时, 在粗径钻杆外部焊接螺旋叶片, 在不影响气体流动情况下, 相当于直径增大, 起到扶正器保直

的作用, 提高成孔质量。同时螺旋钻杆将压缩空气排粉和螺旋叶片携带岩渣(屑)的作用结合起来, 有效地将岩屑携带出孔底下部, 减少卡钻、埋钻内事故, 提高钻进效率。

5 结论和建议

(1) 调整材质、热处理工艺, 提高套管和钻具的强度; 同时改善套管与管靴丝扣连接形式(外径改内径, 梯形扣改弧形扣), 增加管靴根部与冲击台阶的距离是增加套管跟管寿命的基础。

(2) 降低摩阻力是增加套管跟管寿命的主要途径;

(3) 优化钻具结构设计, 调整偏心钻头偏心距、合金齿出刃, 偏心和中心钻头的齿型、分布、有利于改善孔壁间隙、成孔的规则程度, 从而降低套管的卡阻系数。

(4) 从冲击器的冲击功、冲击频率和钻具结构、工艺规程参数的合理配合, 可以改善单次冲击套管的冲击行程, 降低单位跟管的冲击次数。

参考文献:

- [1] 李世忠, 等. 钻探工艺学(上)[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [2] 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001.
- [3] 张祖培, 殷琨, 蒋荣庆, 孙友宏, 等. 岩土钻掘工程新技术[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [4] 陈礼仪, 胥建华. 岩土工程施工技术[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008.
- [5] 彭振斌, 陈昌富. 锚固工程设计计算与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [6] 张涌泉, 杨俊志, 陈修星. 小湾堆积体锚索孔造孔工艺及配套机具研究[J]. 水电站设计, 2006, (4).

(上接第 287 页)

的精度问题, 理论计算的结果与工程实际情况有时并不符合。所以还要做好监测工作, 通过监测数据来推算工程的稳定与沉降, 用来指导施工。

参考文献:

- [1] 赵维炳, 唐彤芝, 高长胜, 戴济群. 控制工后沉降处理深厚软土地基[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业

出版社, 2001.

- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 汪时敏. 地基与基础(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4] 宋飞, 闫澍旺. 土工格栅加筋与排水板联合处理软土地基的弹塑性有限元分析研究[J]. 石油工程建设, 2005, 31(1): 34-39.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.