

高原斜坡软土地基处理实践

尤昌龙^{1,2} 赵成刚¹ 张焕城² 李明领² 杨凡成²

(¹北方交通大学土木工程学院 北京 100044) (²中铁十四工程局 济南 250014)

摘要 通过挤密碎石桩处理高原斜坡软土地基的实践,指出利用挤密碎石桩结合深渗水盲沟处理斜坡软土地基可以增强坡体的抗滑稳定性,对于坡度较大的斜坡将地基处理和抗滑支挡相结合可确保其路基的稳定性。

关键词 土力学, 高原斜坡软土, 挤密碎石桩, 渗水盲沟, 抗滑桩

分类号 U 213.1, TU 472

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)01-0126-05

SUBGRADE TREATMENT PRACTICE OF THE PLATEAU SLOPE ON SOFT CLAY

You Changlong^{1,2}, Zhao Chenggang¹, Zhang Huancheng², Li Mingling², Yang Fancheng²

(¹College of Civil Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044 China)

(²No.14 Construction Bureau of CRCC, Jinan 250014 China)

Abstract The effects of subgrade treatment of the plateau slope on soft clay by the compacted stone column are analyzed. It is shown in practice that the stability of the plateau slope soft clay can be increased by combining the compacted stone column and the deep infiltration ditch. So the treatment method of combining the compacted stone column, the deep infiltration ditch and the anti-slide pile can be used if the slope angle of plateau soft clay is large, and in this way the stability of the slope will be ensured.

Key words soil mechanics, plateau slope soft clay, compacted stone column, infiltration ditch, anti-slide pile

1 工程特点

内昆铁路李子沟—老锅厂路基工程为全线重难点工程之一,坐落于高原斜坡软土地基上,坡面倾角约 $12.5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,斜坡软土的流滑性、膨胀性等特点影响着路基工程的安全施工和未来列车的安全运营^[1]。当进行路堑施工时,施工形成的临空面就会因坡体自身平衡作用的破坏、雨水的浸蚀、地下水的冲蚀等作用发生滑裂破坏。当进行路堤填筑施工时,则会因路堤重力的作用导致路基发生滑裂破坏。因此,彻底解决斜坡软土对路基工程造成的危害便成为施工中首先需要解决的课题。

2 地层分布

该斜坡软土分布的坡面倾角约 $12.5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,各土层因沉积的自然条件不同分布于坡面上,其地层特点自上而下依次为:

(1) 膨胀土,通常为植物覆盖,由于自然蒸发等原因,形成了表层硬壳。

(2) 淤泥质膨胀土,灰黄色或黑灰色,推测为坡前膨胀土遇水逐渐泥化并沉积,经地下水的长期浸蚀作用演化而成。

(3) 淤泥质土,灰黑、黑灰色,软塑,相对上层土而言,具有较小的膨胀性,含树根等腐殖质,

2001年11月12日收到初稿,2002年1月10日收到修改稿。

作者 尤昌龙 简介:男,38岁,1986年毕业于华北水电学院,现为中铁十四局高级工程师,在北方交通大学攻读博士学位,主要从事岩土工程施工与科研方面的工作。

渗水性较低,由此形成了相对隔水层,造成坡面长期处于饱和状态。

(4) 泥炭质膨胀土,黑灰色,泥炭含量高,比重轻,具高液限、高塑性,具有浸水流滑性,含水量较小时具有较高的抗剪强度,其压缩模量近似于一般土体。

(5) 强风化页岩层,较薄,其岩芯暴露在大气中极易风化,遇水浸泡有湿滑感、流滑性,含水量较小时具有较高的抗剪强度,自然气候条件下,约15d即完全风化。

3 路基施工对斜坡软土稳定性的影响

分布于山坡上的斜坡软土大多处于自然平衡状态,即在其形成过程中,因自然堆积作用而静止在山坡上,随着自然条件的演变,表面植被保护,逐渐形成了硬壳层,一旦维系平衡的自然条件遭到破坏,就可能被触发滑坡^[2~10]。

从对本地区斜坡软土的调查来看,处于凸起部分的斜坡软土,其稳定性有的低于低洼地带或谷地中的软土,一旦有外力作用就会诱发滑坡。斜坡软土路基施工过程中诱发滑动破坏的机理,分析如下。

如图1所示。当斜坡处于自然平衡状态时,假定坡脚抗力为 F_0 ,参与滑动坡体的重量为 W_1 ,滑裂面上的摩擦系数为 f ,坡面倾角为 θ ,其安全系数可简化为

$$F_{s0} = \frac{F_0 + W_1 f \cos \theta}{W_1 \sin \theta} \quad (1)$$

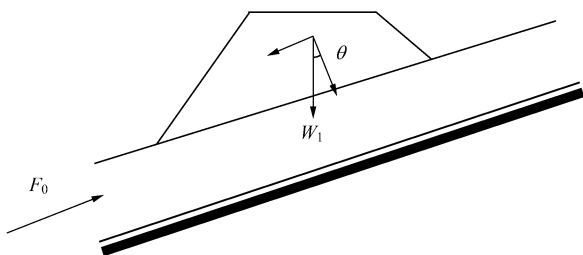


图1 抗滑稳定性分析示意图

Fig.1 Schematic of anti-slide stability analysis

假定 $F_{s0}=1$,则:

(1) 当进行路堑开挖施工时,坡脚抗力 F_0 自然消失,显然坡体安全系数减小,亦即 $F_{s0} < 1$,坡体处于不稳定状态,尤其是在坡体表层硬壳层挖除后,暴露出的软土在施工扰动、雨水浸蚀等的作用下发生强度降低,会迅速导致坡体滑裂。

(2) 处于平衡状态的土体受到填筑土体自重的作用后,下滑力增加,其稳定安全系数降低。

若路基填筑体的重量为 W_2 ,则路堤填筑后坡体的抗滑稳定安全系数为

$$F_{s1} = \frac{F_0 + (W_1 + W_2) f \cos \theta}{(W_1 + W_2) \sin \theta} \quad (2)$$

假定路基填筑前处于极限平衡状态, $F_{s0}=1$,则

$$W_1 \sin \theta = F_0 + W_1 f \cos \theta \Rightarrow f = \frac{W_1 \sin \theta - F_0}{W_1 \cos \theta} \quad (3)$$

于是路基填筑后的安全系数为

$$F_{s1} = \frac{F_0 + (W_1 + W_2) f \cos \theta}{(W_1 + W_2) \sin \theta} = \left(1 - \frac{W_2 F_0}{(W_1 + W_2) W_1 \sin \theta} \right) < 1 \quad (4)$$

显然,填筑路基本体后,坡体的抗滑稳定难以保证。

从现场调查分析,施工中暴露出的炭质页岩具强烈的崩解性和泥化性,遇水后流滑感增加,失水后流滑感消失。因此降水、提高坡体地基土的抗剪强度、增强其抗滑稳定性是斜坡软土路基施工中要着力解决的问题。

4 地基处理及效果分析

地基处理主要采用碎石挤密桩和高压旋喷桩,本文着重分析碎石挤密桩处理地基。

4.1 地基处理参数

桩距1.8m,桩径0.8m,正三角形布置,施工要求桩底嵌入强风化岩。

针对地下水对地基处理效果的影响,沿路基纵向增设了深渗水盲沟,并与支撑渗沟相连,用以排出沿碎石挤密桩出逸的孔隙水或地下水,确保地基处理后上部土体快速固结硬化。

4.2 地基处理效果

地基处理后,经现场K30检测和大型载荷板试验检验,复合地基承载力相对原状土增加幅度为38.5%~55%。

复合地基的内摩擦角增大。试验计算分析表明,复合地基处理层范围内的内摩擦角相对原状土而言有较大程度提高。其中一试验区的内摩擦角增量如表1。

表 1 复合地基内摩擦角增量

Table 1 Increment of the internal friction angle for composite foundation

取样深度/m	土样名称	桩间土内摩擦角/(°)	复合地基内摩擦角/(°)	复合地基内摩擦角增加/%
1.3	膨胀土	12	17.2	43.3
3.6	淤泥质膨胀土	9.5	14.7	54.7
4.8	淤泥质土	5	11.8	136
6.5	泥炭质膨胀土	20.9	23.8	13.8

表 1 表明,地基处理后,复合地基的内摩擦角相对原状土体而言有较大幅度的提高,同时由于碎石桩深入至炭质风化页岩,有利于改善软土与风化页岩接触处的抗剪强度,提高路基的稳定性。

4.3 斜坡软土地基抗滑稳定性分析

根据本地区斜坡软土的特性,斜坡软土多成层状分布在斜坡上,因此考虑按比较简单的模式即滑块模式分析边坡的稳定性。

视参与路基滑动土体的重量为 W_1 ,路基本体的重量为 W_2 ,并假定路基本体与滑动土体组成一个滑动体,则坡体滑动稳定系数为

$$F_s = \frac{c_{sp}L + (W_1 + W_2)\cos\theta \tan\varphi_{sp}}{(W_1 + W_2)\sin\theta} \quad (5)$$

式中: c_{sp} 为复合地基粘聚力(kPa); θ 为斜坡坡度; φ_{sp} 为复合地基内摩擦角; L 为计算滑体长度(m)。为计算方便和安全,取 $W_1 = \gamma_{sp}h_{sp}L$, $W_2 = \gamma HL$, γ_{sp} 为复合地基的容重(kN/m³), γ 为填土的容重(kN/m³), h_{sp} 为参与滑动的斜坡土体厚度(m), H 为路基填筑高度(m)。于是式(5)可简化为

$$F_s = \frac{c_{sp} + (\gamma_{sp}h_{sp} + \gamma H)\cos\theta \tan\varphi_{sp}}{(\gamma_{sp}h_{sp} + \gamma H)\sin\theta} = \frac{c_{sp}}{(\gamma_{sp}h_{sp} + \gamma H)\sin\theta} + \text{ctn}\theta \tan\varphi_{sp} \quad (6)$$

当坡体处于极限平衡状态时, $F_s = 1$ 。于是,坡面倾角 θ 与复合地基的粘聚力 c_{sp} , φ_{sp} 的关系为

$$\tan\theta = \tan\varphi_{sp} + \frac{c_{sp}}{(\gamma_{sp}h_{sp} + \gamma H)\cos\theta} \quad (7)$$

从式(7)不难分析,维持斜坡软土路基稳定性的最小坡角为复合地基的最小内摩擦角。

若不考虑复合地基的作用和路基填筑重量的作用,则当坡体自身平衡时,式(7)简化为

$$\tan\theta = \tan\varphi + \frac{c}{\gamma_s h \cos\theta} \quad (8)$$

式中: φ 为原地基土内摩擦角,见表 1; c 为原地基

土粘聚力,见表 2; γ_s 为原地基的重度。

表 2 路基未填筑时维持自身平衡的最小坡度

Table 2 The minimum angle of the original equilibrium slope

土层名称	土层厚度/m	原地基 c/kPa	原地基 $\varphi/(^\circ)$	复合地基 $\varphi/(^\circ)$
膨胀土	1.7	9	27.7	29.8
淤泥质膨胀土	3.3	5.9	13.8	18.5
淤泥质软土	3.6	10.7	13.6	18.4
泥炭质膨胀土	4.4	19.1	25.5	27.9

因此,维持斜坡自身平衡稳定的坡度可由式(8)给出,它取决于自身的粘聚力和内摩擦角,为此分别给出各层土维持自身平衡的最小坡度,如表 2。

从表 2 看出,采用碎石挤密桩处理斜坡软土地基后,土体的抗滑能力有所提高,但提高程度有限。从表 2 中还看出,其提高幅度对于软弱的淤泥质软土而言,可使其稳定坡度提高 4.8°,相对提高幅度最大为 35%。

通过上述分析比较发现,地基处理后地基稳定性有所增强,但维持斜坡软土路基稳定的最大坡度接近复合地基的最小内摩擦角;由于本区段斜坡坡度为 12.5°~30°,大于维持地基稳定的最小坡度,并且路基填筑厚度越大,维持路基稳定的坡度越小,因此仅靠碎石挤密桩处理后增大的抗滑性不能满足斜坡稳定要求,还需增加抗滑支挡建筑物才能维持斜坡软土路基的稳定和未来车辆动力荷载作用下的长期稳定。

分析还表明,当地基处理深度不足或不能穿过软土层进入稳定的土层时,坡体的滑动面将在复合地基层与下伏稳定土层间的软弱夹层中最先出现,导致深切状滑坡。因此,利用碎石挤密桩处理斜坡软土地基时,桩基部分必须穿透软弱层进入稳定土层,否则会造成切层滑坡,给斜坡软土路基的稳定运营带来隐患。

某些软土地基在处理仍发生滑动破坏变形可能即源于此。

4.4 抗滑桩增强斜坡地基稳定性分析

4.4.1 抗滑桩受到的推力分析

由于斜坡软土已经处理,因此分析时着重考虑路基本体填筑过程中填土荷载和车辆荷载作用以及降雨渗水造成的土层中的流滑变形,其模型按图 2 分析。

设填土路基及参与滑动的土体重 W_1 ,施工机械

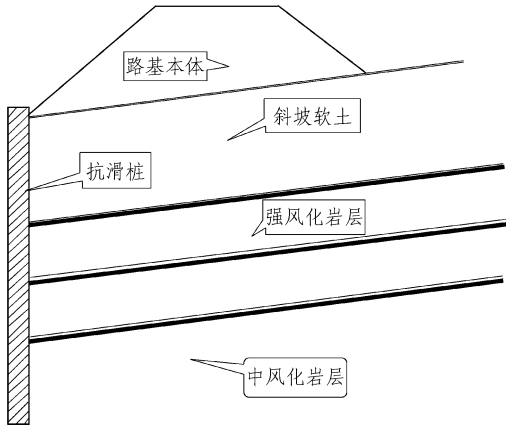


图 2 抗滑支挡及斜坡软土路基示意图

Fig.2 Schematic of slope soft roadbed and anti-slide support

静重及动力作用产生的力概化为 W_2 ，路基本体及施工车辆对桩体产生的斜向推力概化为

$$F = W \sin \theta - W \cos \theta f - cL \quad (9)$$

式中： $W = W_1 + W_2$ ； θ 为滑动面的倾角； c ， L 分别为参与滑动的地基土粘聚力和滑裂面长度； f 为复合地基摩擦系数，取 $f = \tan \theta_{sp}$ 。

不考虑路基土体的粘聚力影响，则桩体所受的推力为

$$F = (W_1 + W_2)(\sin \theta - f \cos \theta) \quad (10)$$

当 $f < \tan \theta$ 时，即产生对桩的滑动阻力。

显然，地基经处理初始，摩擦系数最小，当地基土固结后，按 $\tan \varphi_{sp} = m \tan \varphi_p + (1 - m) \tan \varphi_s$ ， m 为面积置换率， φ_s 与 φ_p 为原地基与置换地基的内摩擦角。则 φ_{sp} 取决于滑动面上方土体之内摩擦角，取

$$\varphi_{sp} = \min(\varphi_{sp上}, \varphi_{sp下}) \quad (11)$$

从上述分析可知，地基土在处理初始对桩基的压力最大，而后随着地基土的固结，对桩基的压力逐渐减小，其最软弱的滑动面位于最软弱土层处。

4.4.2 抗滑桩增大斜坡地基稳定性分析

路基的最大填筑高度不仅取决于路基所在斜坡的坡度、复合地基的强度指标，而且取决于抗滑桩的抗滑稳定性要求，因此路基最大填筑高度是斜坡坡度、复合地基强度、抗滑桩抗滑能力综合作用的结果。

当路基路堤部分座落于斜坡上，其坡角 23.6° ，路基本体高度 7.8 m ，顶宽 7.9 m ，坡比 $1:1.5$ ，车辆荷载按 20 kPa 平均施加时，利用瑞典条分法和简化 Bishop 法分别分析了增加抗滑桩和不设抗滑桩相应于路基填筑最不利位置组合地段的滑动安全系

数，如表 3。

表 3 抗滑稳定安全系数计算结果
Table 3 Calculated results for the stability coefficient with and without the anti-slide support

坡度	瑞典条分法		简化 Bishop 法	
	设抗滑桩	无抗滑桩	设抗滑桩	无抗滑桩
23.6°	1.321	0.5775	1.530	0.621

由表 3 不难看出，增加抗滑桩后，斜坡路基填筑施工后的抗滑稳定性才能满足要求、斜坡地基在路基填筑施工及其后使用过程中才具有安全性。

将地基处理、挡护结构相互结合，组成复合加固地基体系，对斜坡地基稳定具有重要的作用。

5 施工实践

面对成因复杂、分布不均、多在斜坡上的软土路基，无论是路堑开挖还是路堤填筑都会增加斜坡的不稳定性，都可能会引起滑裂破坏；地基处理施工的目的就是消除斜坡坡体地基的不稳定性，因此，地基处理和路基施工中必须贯彻“强化斜坡地基”、“强化路基本体”、“强化路基本体和斜坡地基的整体性和兼容性”的指导思想，加强斜坡地基处理施工、加强斜坡路基挡护工程施工、增强路基本体的强度和稳定性便成为高原斜坡软土地区路基施工的主题。

施工实践表明，上述指导思想对本区间斜坡软土路基的施工具有通用性，尤其是深渗水盲沟和支撑渗沟加碎石挤密桩处理斜坡软土地基更具有实用性。

施工案例为高填方路基，位于李子沟车站进站端，桩号 DK440+517~DK440+610，长 293 m ，路基最大填方高度 18.2 m ，下伏地层为表层土、淤泥质粘土和强风化碳质页岩，其中软土厚度 $5 \sim 7 \text{ m}$ ，自然斜坡坡度 $12^\circ \sim 25^\circ$ ，分布于一构造型沟谷洼地中，地下水丰富，在个别坡点出逸，土体呈饱和状态。

5.1 施工方案

(1) 地基处理：碎石挤密桩处理斜坡软土，要求碎石桩基底落在强风化岩上，直径 $\phi 80 \text{ cm}$ ，间距 1.8 m ，梅花型布置，表层为砂垫层加土工格栅，砂垫层厚 30 cm 。

根据计算分析，地基沉降量可达 63.5 cm ，会在坡体中形成汇水凹槽，因此增设支撑渗沟，深度为 3 m ，宽 1.5 m ，沿路基横向方向每 10 m 布置一条；

沿路基中线纵向设主渗水盲沟, 深度 2 m, 宽 1.5 m。

(2) 边坡挡护: 路基坡脚采用 1.5 m×3.5 m 的抗滑桩挡护, 桩长 16 m, 间距 7 m, 中间设 3.5 m 深的挡土板, 组成桩板墙挡护结构。

(3) 路基填料: 采用路堑施工中弃渣, 碳质页岩。考虑到碳质页岩的崩解性、水解性等不稳定特点, 采用掺 10%~15% 的生石灰进行改良; 外包 3.5 m 的粘土层进行防护。

(4) 路基土填筑: 为增强路基本体的整体稳定性, 防止路基本体在自然气候等因素作用下发生沉降, 并发生结构性变形, 路基压实度统一按 92% 控制, 以最大限度地降低工后沉降量和路基本体变形量。分层填筑厚度统一采用 25 cm, 填筑速率控制在 25 cm/d; 10 m 以内控制在 25 cm/2d。

(5) 变形观测点布置: 设置边桩, 观测地基沿斜坡位移量; 设置沉降板, 观测地基沉降变形, 控制填土速率; 建立观测网, 观测抗滑桩顶部位移; 埋设土压力盒, 监测抗滑桩受力情况; 埋设孔隙水压力仪, 控制填筑速率并用以监测孔隙水压力变化程度。

5.2 应用施工技术取得的成效

(1) 根据连续观测资料分析, 在施工完成 15 d 后边桩逐渐处于稳定状态, 最大斜坡位移 75 mm, 最大位移率 12 mm/d, 发生在填土初期。经过 2 个雨季后稳定在 78 mm。

(2) 地基沉降量小于计算值, 施工完成后 20 d 观测值为 48.68 cm, 施工后 1a 历经 2 个雨季后观测值为 55.6 cm, 变形基本上稳定。

(3) 抗滑桩受力, 除施工完成后一个月内受力略有变化外, 后基本稳定; 土压力盒反应的资料表

明, 施工过程中的土压力最大, 工后土压力逐渐减小并趋于稳定。

(4) 挡土板初始变形量较大, 最大外凸 28 mm, 分析认为是初始施工荷载集中作用所致, 后逐渐稳定, 并略有回缩, 稳定在 26.5 mm。

该案例表明, 采用碎石桩辅以渗水盲沟处理斜坡软土地基并结合抗滑桩约束斜坡软土的变形, 可有力地加速斜坡软土固结、增强地基稳定性和地基与路基的整体稳定性。

参考文献

- 1 魏永幸. 内昆铁路李子沟“斜坡软土”特性及路基工程对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 104~106
- 2 何漓江, 刘祖德. 膨胀土路基边坡等厚式封面层稳定性计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 382~385
- 3 黎建华, 颜荣贵, 陈寿如等. 高等级公路缓斜坡节理边坡的复合破坏机制与治理对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 415~418
- 4 陈晓平, 杨春和, 白世伟. 软基上吹填边坡蠕变特性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 514~518
- 5 贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层边坡位移矢量角的形成作用机制及其与稳定性演化关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 185~192
- 6 朱文彬, 刘宝琛. 降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 509~512
- 7 冯仲仁, 朱瑞庚, 姚爱民. 高速公路软基处理方案的多层次模糊决策[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 915~918
- 8 陈静曦, 章光, 韩行忠等. 切方路基开挖程序的合理化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 072~1 074
- 9 李海光. 路基工程中软质岩边坡的几种不良地质现象及其防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 404~1 407
- 10 蒋忠信, 曾令录, 李安洪. 南昆铁路路基边坡工程技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 408~1 414

《面向 21 世纪可持续发展的岩石力学与工程研究》 学术交流大会在清江水布垭工区召开

《面向 21 世纪可持续发展的岩石力学与工程研究》学术交流大会于 2002 年 11 月 4~6 日在清江水布垭工区召开。这次会议由湖北省岩石力学与工程学会主办, 清江水布垭工程建设公司和长江科学院承办。

钱七虎院士代表中国岩石力学与工程学会到会祝贺, 并在会上作了题为“为了可持续发展的地下工程——地下建设的第四次浪潮”的学术报告。刘广润院士在会上作了题为“三峡水库沿岸地质灾害特征及其防治”的学术报告。董学晨、程良奎、白世伟、周创兵、邓建辉、盛谦、杨启贵、吴贵新、朱全宝、肖金发、周火明、丁秀丽、罗光启等专家学者在会上作了相关领域岩石力学课题的学术报告。

会议组织代表参观了正在施工的水布垭工地, 并就“水布垭工程的岩石力学问题”进行专题讨论。会议期间还召开了湖北省岩石力学与工程学会第三届第四次理事会, 讨论了省学会理事的换届事宜。会议最后一天代表们沿清江顺流而下, 考察了已建成的隔河岩和高坝洲水利枢纽工程。

(王可钧供稿)