

浅谈当宜高速公路膨胀土性质与路基稳定问题

张嘉翔,姜淑花

(中交第二公路勘察设计研究院,湖北武汉 430052)

摘要: 当宜高速公路沿线存在有大量膨胀土,为使其加固方案合理,避免滑坡、塌方等现象的发生,结合当宜高速公路膨胀土试验研究及稳定性分析,对沿线膨胀土性质与路基稳定问题进行了分析探讨,并提出了有针对性的处治方案。

关键词: 膨胀土;路基;治理措施。

中图分类号: TU471.91 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)04-0424-05

作者简介: 张嘉翔(1964—),男,高级工程师,1987年毕业于中国地质大学水文地质与工程地质系,主要从事公路工程地质、路基路面设计工作。

当(阳)—宜(昌)高速公路地处鄂西山区与江汉平原的过渡地带,属低山丘陵地形,冲岗相间。沿线地层上部为棕红色粘性土,具网状开裂,属风化残积、坡积及冲积土层,厚度3~5 m,局部地段8 m左右;在K26 km附近,其粘土呈灰白色,具网状开裂,土质较粘,裂隙发育,均具有膨胀土特性。其工程地质问题主要是由于粘土矿物颗粒的体积变化,引起岩土体发生膨胀或收缩,而导致路基失稳。本文结合当宜高速公路膨胀土试验研究,对路基边坡稳定问题进行分析探讨。

1 膨胀土工程地质类型与工程性质

1.1 工程地质类型

当宜高速公路膨胀土分布于当阳市坝陵区至宜昌鸦雀岭镇天峰村路段,主要形成于老第三纪至第四纪晚更新世,其物质来源于临近山地的各类基性火成岩、变质岩,沉积岩中的泥灰岩、粘土岩、碳酸盐岩、砾岩的风化物。由于形成环境的不同,年代有先后,其物质成分、颗粒大小、颜色及外观结构,原次生裂隙发育情况、充填物及物理力学性质存在差异。由于形成前后的古地理环境的不同,地壳运动的影响,加之自然营力、气候、物质源的变化,特别是水流的冲蚀切割,搬运厚度、外观颜色、结构组成,物理力学

表1 X射线衍射成果

Table 1 Results of X-ray diffraction %

试验编号	石英	长石	方解石	伊利石	高岭石	蒙脱石
ZK27-1	50				10	40
ZK13-4	50				5	45
ZK13-7	52	3			5	40
ZK13-10	50	3		5	5	37
ZK19-3	55	5		20	10	10
ZK19-7	50	7		20	16	5
ZK19-10	50	5		15	20	10
ZK23-3	50	12		25	5	8
ZK23-7	55	8	2	20	10	5
ZK23-9	60	4		15	15	6
ZK23-10	50		2	18	20	10
ZK64-2	50	5		15	10	20
ZK64-4	50	5		15	10	20
ZK64-7	60	3			10	27
ZK64-10	70			10	10	10

性质上也有差异。根据其地貌形态特征及其物质组成,将其分为冲积膨胀土和残坡积膨胀土。

冲积膨胀土主要分布于坝陵区至玉泉地段,颜色为褐黄色,粘土裂隙发育,裂面大多充填灰白色粘土条带,蜡状光泽,含钙质结核,有时富集成层形成钙盘;此外尚有铁锰结核及豆石。下部为砾石夹土。此类土一般为弱膨胀土,少数为中等膨胀土,时代为上、下更新统(Q₂—Q₃)。残坡积膨胀土从当阳市双莲镇境内至宜昌市鸦雀岭镇境内有广泛分布,且主要分布于丘陵和山麓斜坡地带。地层岩性与风化母岩有密切关系,一般为棕、红、黄等色的粘性土夹少

量基岩碎屑组成。粘性土中裂隙较发育,裂隙面有铁锰胶膜侵染,具孔隙,含铁锰结核,常在底面富集,时代为第四纪上、中更新统。这类粘性土膨胀变形小,收缩变形大,一般为中等膨胀土,部分属强膨胀土。

1.2 基本性质

(1)物质组成。膨胀土的物质组成包括粒度组成和矿物组成,后者主要利用 X 射线衍射仪进行相分析,同时辅以差热分析、失重分析等。其物质组成见表 1。

(2)物理化学性质。膨胀土的物理化学性质是指能反映土的物理化学活性的指标。膨胀土中的离子交换吸附作用是粘土矿物的一种重要物理化学性质。一般含交换阳离子成分以 Na^+ 为主的膨胀土,其水化能力较强,具有亲水性和膨胀性,呈现低塑性与低强度特性。同样,含阳离子交换量与盐基总量高的膨胀土,其亲水性和膨胀性愈强,塑性愈高,强度则愈低。

膨胀土中水溶性盐分的类型及其含水量,由于成土母岩和成因类型的不同,具有一定的差别。一般情况下,当膨胀土中水溶性盐分含量较多,且以胶结物形式存在为主时,将使土的结构联结有所加强,同时形成一定的固化结构强度。然而,一旦条件发生变化,土中盐分被水溶解,则结构联结受到破坏,结构强度亦随之消失,土体将产生较大的膨胀^[1]。土体物理化学性质结果见表 2 和表 3。

(3)结构特征。膨胀土在成土过程中由于温度、湿度、压密以及不均匀胀缩效应形成了许多网状交

错裂隙和软弱结构面,使膨胀土产生一系列独特的力学性质和各向异性的复杂介质,影响高速公路边坡工程稳定性。

(4)胀缩特性。膨胀土的胀缩特性除了受土体粘土矿物成分及含水量控制外,土体的基质吸力及湿度的变化也是重要的因素。膨胀土与水作用时,随着含水量的增加,其体积也显著地增大,即表现了强烈的膨胀性。若土体积增大过程中膨胀受到限制,则土中随即显示一定地内应力,此即一般微膨胀力。显然,如果土中含水量减少,土体积也必然随之缩小,即出现收缩现象并产生收缩应力。因此,在特定条件下,土体的膨胀与收缩是由于膨胀土与水体系中介质的相互作用而引起土中内应力改变的结果。也即土中含水量变化是膨胀土产生膨胀与收缩、强度变化等重要特性的基础,是影响边坡稳定的重要因素之一。膨胀土随着气候、地质环境和工程建设活动等条件的变化而发生水分迁移和转化。因此,在水分变化的影响下,膨胀土性质也显示出不同的改变,当膨胀土处于干燥状态下,具有高的膨胀潜势,反之则低。膨胀与收缩试验结果见表 4、表 5。

2 膨胀土路堤边坡稳定性分析

膨胀土路堤系指以膨胀土作填料,由人工或机械填筑,并压实到足够的压实度,以承载公路路面和汽车动荷载的土工建筑物。路堤的边坡表层、顶部基

表 2 物理化学性质测试结果

Table 2 Test results of physical and chemical properties

样号	总量	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	%
ZK13-4	0.026	0.009 9	0.000 91	0.002 1	0.000 24	0.001 30	0.001 60	0.000 19	
ZK13-7	0.025	0.006 7	0.000 77	0.001 8	0.000 11	0.001 00	0.001 40	0.000 15	
ZK13-10	0.020	0.004 8	0.000 39	0.000 6	0.000 10	0.000 97	0.000 66	0.000 06	
ZK19-3	0.024	0.011 0	0.001 40	0.000 9	0.000 19	0.001 80	0.001 30	0.000 14	
ZK19-7	0.032	0.014 0	0.000 94	0.001 0	0.000 19	0.002 00	0.000 89	0.000 11	
ZK19-10	0.032	0.014 0	0.001 10	0.002 8	0.000 33	0.001 20	0.001 40	0.000 19	
ZK23-3	0.035	0.004 0	0.000 55	0.002 3	0.000 26	0.000 53	0.000 98	0.000 15	
ZK23-7	0.024	0.007 5	0.000 63	0.001 6	0.000 14	0.000 70	0.000 76	0.000 08	
ZK23-9	0.028	0.005 4	0.001 10	0.002 1	0.000 27	0.000 68	0.000 92	0.000 13	
ZK23-10	0.018	0.011 0	0.000 94	0.001 0	0.000 21	0.000 82	0.000 99	0.000 11	
ZK64-2	0.025	0.078 0	0.001 00	0.004 8	0.000 10	0.001 10	0.007 30	0.001 40	
ZK64-4	0.023	0.005 8	0.000 64	0.002 6	0.000 16	0.000 76	0.000 79	0.000 10	
ZK64-7	0.030	0.007 4	0.000 91	0.002 5	0.000 20	0.000 63	0.000 79	0.000 11	
ZK64-10	0.025	0.011 0	0.000 63	0.001 9	0.000 25	0.001 60	0.001 50	0.000 21	
ZK27-1	0.028	0.004 4	0.000 82	0.001 1	0.000 11	0.000 50	0.000 73	0.000 08	

表 3 物理化学性质测试结果

Table 3 Test results of physical and chemical properties

CaSO ₄ · 2H ₂ O	CaCO ₃	Fe ²⁺	Al ³⁺	w _B /%			阳离子交换量	H ₂ O*	有机质	pH	A/ (m ² · g ⁻¹)
				SiO ₄ ⁻	Fe ³⁺	Al ³⁺					
0.000 09		0.032	0.025	0.94	0.86	0.08	48.85	5.27	0.23	7.53	343.96
0.000 36		0.021	0.008	0.34	0.57	0.04	36.07	4.03	0.25	7.45	248.22
0.000 18		0.026	0.010	0.68	1.13	0.06	35.08	4.68	0.18	7.35	251.81
0.000 47	0.001 1	0.047	0.029	1.59	2.38	0.50	23.10	9.37	0.34	7.88	167.97
0.000 19	0.001 2	0.027	0.032	1.79	2.17	0.26	21.66	10.50	0.16	8.06	171.13
0.000 39	0.002 2	0.030	0.030	1.46	2.71	0.26	28.05	10.56	0.18	7.97	207.28
0.000 29		0.074	0.046	2.25	1.61	0.23	14.98	10.15	0.38	7.19	165.87
0.000 18		0.041	0.038	1.77	2.49	0.29	20.02	2.96	0.14	7.46	175.61
0.000 12		0.031	0.024	1.64	2.77	0.42	19.98	7.73	0.25	7.43	153.77
0.000 57		0.031	0.022	1.79	2.33	0.40	24.72	8.76	0.28	7.73	185.02
0.000 09		0.080	0.061	1.69	2.43	0.28	24.56	3.02	0.46	7.47	161.22
0.000 37	0.001 6	0.065	0.047	1.79	1.62	0.27	20.31	4.37	0.38	7.33	168.06
0.000 37		0.047	0.012	0.99	1.24	0.08	28.02	5.30	0.12	7.77	206.49
0.000 44		0.049	0.022	0.93	1.55	0.12	25.34	2.07	0.13	7.89	206.43
0.000 29	0.001 2	0.035	0.034	1.48	1.83	0.33	27.21	10.21	0.24	7.19	277.51

测试样号顺序同表 2; *, 风干水质量分数; A, 比表面积。

表 4 膨胀性能试验结果

Table 4 Swelling test results

样号	膨胀力 p/kPa	w(H ₂ O)/%			三相膨胀力 p/kPa			三相膨胀率 η/%			η ₂ /%	η ₃ /%
		试验前	试验后		I—I面	II—II面	III—III面	I—I面	II—II面	III—III面		
ZK19	38~71 54	25.9~28.0 26.2	27.6~28.0 27.8	38.8~49.3 44.1	41.9~48.3 45.1	32.9~45.7 39.3	0.34~0.70 0.52	0.31~0.34 0.33	0.69~1.05 0.87	1.34~2.09 1.72	30~70 48.3	
ZK23	9.0~40.0 18.3	24.6~26.1 25.4	26.1~27.3 26.7	22.3~26.0 24.2	30.5~32.5 31.5	23.3~32.4 27.9	0.43~0.45 0.44	0.37~0.60 0.49	0.32~0.38 0.35	1.12~1.43 1.28	30~69 56.8	
ZK64	3.4~90.0 19.3	24.2~25.9 24.8	25.6~27.5 26.6	2.0~8.5 5.3	2.0~2.8 2.4	5.9~7.2 6.6	0.12~0.15 0.14	0.23~0.36 0.30	0.23~0.24 0.24	0.58~0.75 0.67	37~61 49.3	
ZK13	34~120 79.5	16.3~18.2 17.3	20.4~23.0 21.7	20.0~33.5 26.8	32.0~34.3 33.2	20.2~29.3 24.8	0.48~1.27 0.88	0.40~1.03 0.72	0.70~0.73 0.72	1.61~3.00 2.31	57~87 71	

η₂, 体积膨胀率; η₃, 自由膨胀率; 数值的分子为测试值, 分母为平均值。

表 5 收缩试验结果

Table 5 Shrinkage test results

样号	竖向			横向		
	ω ₁ /%	K	ω ₂ /%	ω ₁ /%	K	ω ₂ /%
ZK19-4	11.3	0.23	15.7	6.7	0.18	13.7
ZK23-4	11.1	0.39	13.5	13.2	0.25	13.8
ZK64-3	6.9	0.22	13.9	9.2	0.22	15.3
ZK13	6.2	0.35	13.0	8.4	0.05	9.5

ω₁, 体缩; ω₂, 缩限; K, 收缩系数。

床, 以及堤身内部土体, 由于所受的气候影响和动力影响各不相同, 其抗剪强度的变化情况也各不相同。在路堤内部, 气候的影响和汽车动力的影响都比较微小, 如果无地表水和地下水侵入, 则填筑后的抗剪强度基本不变; 但如果地表水和地下水侵入, 则填筑后的抗剪强度将大为降低。因此对膨胀土路堤的整体稳定性而言, 不但需要考虑压实土在填筑后的

抗剪强度, 还要考虑其侵水后的变化规律。在边坡表层的土必然受地表水的侵湿, 而且由于气候影响及湿胀和干缩的反复作用, 将发生许多裂隙, 使强度降低。顶部基床在受到反复胀缩作用的同时, 还将承受汽车通过时动应力的长期重复作用, 使路面发生变形并不断地积累增大, 因而其强度减弱。

2.1 膨胀土路基抗剪强度

铁道部科学研究所土工实验室曾在 1961 年用我国各地的 35 种粘性土进行了一批正常固结条件下的排水剪切试验, 试样是用重塑土在含水量等于液限时制成的, 试验所得的凝聚力值近于零。当土样的塑性指数(I_p)介于 7~8 的范围内时, 所得的内摩擦角 φ 与土的塑性指数 I_p 呈线形关系, 其表达式为:

$$\varphi = 43^\circ - 0.92I_p (7 < I_p < 8).$$

当土样的塑性指数大于 18 时, φ 值在 16°~26° 的范

围内变化. 另外,通过大量的试验,在最佳含水量条件下击实土的内摩擦角主要取决于土的矿物成分和种类,其 φ 值的范围可根据塑性指数或矿物成分作出大致的估计,但具体的 φ 值必须对击实后的土样进行试验测定. 如果击实时的制备含水量较最佳含水量有少量差异,或者击实后土体受侵水作用,对击实土的内摩擦角均无重大影响,其 φ 值仅降低 2° 左右^[2].

膨胀土路堤表层的抗剪强度的影响深度为 1.0~1.5 m,局部地区可达 2 m. 表层其湿度、温度随气候而急剧变化,胀缩变形变化剧烈,裂隙非常发育,强度衰减非常显著. 其深度与大气影响深度有密切的关系. 有关资料显示,路堑边坡表层原状膨胀土经过二次或三次干湿循环后,其强度衰减已基本完成. 因此可以认为,击实试样经过两次干湿循环后的 q_u 值,已基本接近其衰减后的最终强度.

试验结果表明,不同胀缩等级的膨胀土,其抗剪强度有着很大的差别,胀缩等级越强,抗剪强度越低. 因此用不同胀缩等级的膨胀土填筑的路堤,为保证其稳定所需的最低稳定坡度应当是不一样的.

膨胀土路堤边坡土体的抗剪强度具有变化的特性,既随气候的变化而变化,又随深度的变化而变化. 气候变化对边坡土体抗剪强度的影响,是由于气候变化使边坡土体的湿度发生变化. 干旱时湿度小,抗剪强度大大提高;潮湿时湿度变大,抗剪强度大大降低. 由于气候条件对边坡土体的影响是随深度而变化的,所以边坡土体的抗剪强度也随深度而变化. 同时,当边坡土体饱水时,由于膨胀土饱水后的抗剪强度受其上所受压力的影响,而边坡土体在不同深度处有不同的自重压力,所以边坡土体在不同深度处具有不同的抗剪强度. 因此,对膨胀土路堤边坡,在气候影响的不同深度范围内应采用不同的抗剪强度指标. 在气候影响深度以下土体的抗剪强度应视为不变. 对于气候影响深度范围的抗剪强度指标 c , φ 值,应当从最不利的情况考虑. 假定土体处于饱水状态,因此,采用土样在与该处自重压力相当的压力下膨胀后测得的 c , φ 值,测试结果见表 6.

对于气候影响深度以下的抗剪强度指标 c , φ 值,从最不利考虑,假定土体是饱和的,故采用饱和快剪法测得,表 7 中为全国各地百余组土样的试验结果,并参考了多种路堤边坡塌滑反算的 c , φ 值.

2.2 膨胀土路堤稳定性分析

膨胀土路堤整体稳定性分析以通过坡脚的圆弧

表 6 气候影响深度范围内的 c 和 φ 值

Table 6 Values of c and φ at different depths affected by weather

深度范围 h/m		0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
相当压力 $p/10$ kPa		0.0~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0
γ_1 I	$c/10$ kPa	0.8	1.0	1.2	1.4
	$\varphi/(^\circ)$	2.0	2.5	3.0	3.5
γ_2 II	$c/10$ kPa	1.3	1.4	1.5	1.6
	$\varphi/(^\circ)$	5.0	5.5	6.0	6.5
γ_3 III	$c/10$ kPa	1.8	1.9	2.0	2.1
	$\varphi/(^\circ)$	10.0	10.5	11.0	11.5

I. 强膨胀土; II. 中等膨胀土; III. 弱膨胀土,其土体容量 γ_1 , γ_2 , γ_3 分别为 1.8, 1.9, 2.0 t/m³.

表 7 膨胀击实土($\omega=\omega_0$, $\gamma_d=\gamma_{dmax}$)的抗剪强度指标

Table 7 Parameters of shear strength of consolidated swell soil

膨胀土	快剪		饱和快剪		自重压力下胀后快剪	
	$c/10$ kPa	$\varphi/(^\circ)$	$c/10$ kPa	$\varphi/(^\circ)$	$c/10$ kPa	$\varphi/(^\circ)$
强	4.0	5.0	2.0	4.0	0.8	2.0
中等	5.0	10.0	2.5	8.0	1.3	5.0
弱	6.0	15.0	3.0	12.0	1.8	10.0

稳定性分析方法进行计算. 据膨胀土路堤的高度和坡率进行在各种不同强度指标(c , φ)条件下的圆弧稳定性分析,最小稳定系数不小于 1.25. 由于膨胀土路堤的表层受气候影响强度衰减,所以圆弧滑面通过 1 m 厚度的范围内不计其抗剪强度.

膨胀土路堤边坡的表层稳定性一般表现在膨胀土路堤完工的初期,表层和内部土的强度基本上是一致的. 在经过几年的气候变化及风化后,由于湿胀干缩的反复作用,表层中产生很多裂隙,雨水沿着裂隙深入,使土块崩解、软化、膨胀并使密度变小,就易导致边坡浅层溜滑,造成路基病害. 其安全系数可通过下式进行推算:

$$K = 4c(d \sin 2\alpha + H) / \gamma d (2H + d \sin^2 \alpha) \sin 2\alpha.$$

式中: c . 凝聚力,等于无侧限抗压强度之半, kPa; γ . 土的容重, t/m³; α . 边坡的倾角, ($^\circ$); H . 滑面的高度, m; d . 滑面的深度,即表层软化的深度, m.

当宜高速公路膨胀土路堤设计结合具体情况,当填土高度小于 6 m,采用低—中等膨胀性膨胀土作路基填料时,路槽底 ≥ 1.5 m,采用非膨胀性填料,路基范围分层铺设土工格栅,间距 80 cm,坡面采用浆砌片石进行防护. 当填土高度大于 6 m,采用低—中等膨胀性膨胀土作路基填料时,路槽底 ≥ 1.5 m,采用非膨胀性填料,边坡采用变坡坡率,并设置台

阶,坡率取 1.5~2.0,路基范围分层铺设土工格栅,间距 60 cm. 坡面采用浆砌片石进行防护,并应先作好排水工作. 在路基底部设置 50 cm 厚碎石层,用土工网包裹,以增加其稳定性.

3 膨胀土路堑边坡稳定与分析

当宜高速公路膨胀土路堑主要分布于地貌较为平坦开阔,斜坡低缓的丘陵一带,一般均在上层 3~5 m,最厚 8 m 左右. 通常情况下膨胀土破坏是由于边坡失去平衡、裂隙作用、水的作用、风化作用等因素所造成的,因膨胀土具有蒙脱石、伊利石粘土矿物含量高,侵水性和强度低等特点,是边坡失稳的内在因素. 而外因则是环境平衡的丧失,在边坡开挖过程中,上覆土层重量卸除,引起土体结构松弛和应力状态改变,而应力重分布导致软弱结构面剪应力增大. 同时,雨水下渗促使结构面强度软化,引起滑坡.

膨胀土路堑设计在采用多种方法进行综合分析的基础上,结合静力平衡分析法、统计比较判别法、有限元分析法等进行理论计算. 参照原有的解决膨胀土路堑处理的成功经验进行设计,应先作好排水. 当膨胀土在表层,下为砂岩时,膨胀土层边坡坡率取 1.75~2.0,采用混凝土预制块或浆砌片石进行防护,作好防水保湿工作. 在路面底基层下设砂砾垫层. 当边坡高度较低,路床处在膨胀土上,地基层下

设砂砾垫层,路槽底 0.8 m 范围土层掺灰处理. 边坡坡率取 1.75~2.0,采用混凝土预制块或浆砌片石进行防护,并设置路面下排水设施,如管式渗沟.

4 结语

对于膨胀土路基,在勘察阶段应详细查明工程地质条件,对膨胀土的整体稳定性作出正确判断;设计阶段应充分应用资料,正确选择设计方案,选择适合于膨胀土特性的合理边坡形式、高度等,选择必要的工程措施;施工阶段应充分掌握膨胀土所具有的卸荷膨胀、风化膨胀和遇水膨胀等重要工程地质特性与规律,选择适合于膨胀土特性的正确施工方法与季节;养护维修应经常注意边坡与防护工程设施的工作状态,发现问题及时采取措施进行养护维修. 并应建立观测系统,进行紧急预报,以防止突然灾害的发生,相信当宜高速公路膨胀土处理在多方面的努力下,一定会取得满意的效果.

参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [2] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.

A BRIEF DISCUSSION ON PROPERTIES OF SWELL SOIL AND STABILITY OF FOUNDATION IN DANGYANG-YICHANG SPEEDWAY

Zhang Jiaxiang, Jiang Shuhua

(The Second Highway Survey & Design Institute of MC, Wuhan 430052, China)

Abstract: Based on the situation of large-scale distribution of swell soil along Dangyang-Yichang speedway, the paper presents the studies on the swelling soil test and stability analysis. In order to optimize the reinforcement measures, to avoid slope movement, rock-fall as well, it further discusses the properties of swell soil and the stability of foundation so as to find the remedial measures.

Key words: swell soil; foundation; remedial measure.