

离子土固化剂加固滑坡滑带土的试验研究

项伟, 崔德山, 刘莉

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 研究开发快速经济和行之有效的滑坡治理方法与理论, 一直是各国滑坡防治研究工作的重点. 本试验研究使用一种经济适用的离子土固化剂(Ionic Soil Stabilizer, 简称 ISS)对提高滑带土的抗剪强度进行了探索. 滑带土首先通过 ISS 不同配比水溶液的处理, 然后进行阿太堡试验、剪切试验、固结试验和自由膨胀率试验. 试验结果表明: 滑坡滑带土在加入离子土固化剂后, 土的塑性指数降低, 粘聚力提高, 孔隙比和自由膨胀率减小. 其机理为: 在以粘性土为主的滑带土中加入离子土固化剂, 通过物理化学原理, 它能取代吸附在粘土表面的可交换性阳离子, 改变粘土颗粒表面的双电层结构, 减小结合水膜厚度, 将滑带土的亲水性改为憎水性, 从而提高滑带土的抗剪强度.

关键词: 离子土固化剂; 滑带土; 塑性指数; 剪切强度; 结合水.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2007)03-0397-06

收稿日期: 2007-03-19

Experimental Study on Sliding Soil of Ionic Soil Stabilizer-Reinforces

XIANG Wei, CUI De-shan, LIU Li

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract Research and development of fast, economic and effective controlling method and theory of landslide has always been the focus of anti-sliding projects for all the countries. In this research, a new kind of economic and suitable Ionic Soil Stabilizer (ISS for short) for improving the shear strength of sliding soil is studied. The sliding soil is treated by different matches of ISS and water at first, then is tested in the Atterberg limits test, direct shear test, routine consolidation test and free swell test. The results show that the plastic index decreases and the cohesion increases and the void-ratio deflates and the free swell shrinks after mixing the ISS into the sliding soil of landslide. The mechanism is that the sliding soil that consists mainly of clay soil is mixed with ISS, which can replace the exchangeable cationic of clay surface, changes the pair-electricity layer of soil grain surface, reduces the thickness of adsorbed water, transforms the hydrophilic sliding soil to the hydrophobic and increases the shear strength of sliding soil by the function of physics and chemistry.

Key words: ionic soil stabilizer; sliding soil; plastic index; shear strength; adsorbed water.

0 引言

我国是地质灾害多发的国家, 为了保护人民生命财产安全, 国家每年都要投入巨资治理滑坡, 现在通常采用的多为抗滑桩、挡土墙和预应力锚索等工程措施, 工程投资较大, 一个滑坡的治理动辄几百万乃至几千万元. 因此研究开发新的滑坡治理方法与理论, 建立滑坡监测系统(唐辉明等, 2002)一直是滑

坡防治研究工作的重点, 对中国这样一个地质灾害严重的发展中国家则显得更为重要, 也是目前我国地质灾害防治工作中最为迫切的任务之一.

斜坡岩土体沿着贯通的剪切破坏面所发生的滑动现象, 称为滑坡. 滑坡的机制是某一滑移面或滑动带(简称滑带)上的剪应力超过了该面的抗剪强度所致. 滑坡的特征通常是较深层的破坏, 滑移面深入到坡体内部; 质点位移矢量水平方向大于铅直方向; 有

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40672188).

作者简介: 项伟(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事大型水利水电工程地质、软弱夹层、岩土性质、地质灾害防治、遥感监测和环境地质工程的教学与科研工作. E-mail: xiangwei@cug.edu.cn

依附面(即滑移面或滑带)存在;滑移速度往往较慢,且具有“整体性”。因此滑带土的岩土工程性质常控制滑坡体的稳定性,其抗剪强度的高低直接影响到滑坡治理的规模和投资。

对于因滑动带土质不良而引起的滑动,除了工程措施外,长期以来采用的主要有电渗排水、焙烧、灌浆等改良土质的办法,也可以采用疏干工程来减少水的作用(张登良,1990)。电渗排水方法是利用电场作用而把地下水排除,达到稳定滑坡的一种方法。这种方法最适用于粒径 $0.05\sim 0.005\text{ mm}$ 的粉质土的排水,因为粉土中所含的粘土颗粒在脱水情况下就会变硬,由于需要额外的能源向滑坡体充电,该方法并不经济。焙烧法是利用导洞焙烧滑坡脚部的滑带上,使之形成地下“挡墙”而稳定滑坡的一种措施。用煤焙烧粘土时,当土达到一定温度后,粘土会变成象砖块一样,具有相当高的抗剪强度和防水性,同时地下水也可从焙烧形成的土裂缝中流入坑道而排出,但是焙烧的深度、温度和焙烧的程度不宜控制。化学灌浆采用石灰、磷酸铵、氧化铝、氧化钙及其他三价金属阳离子溶液,将其灌入饱和粘性土滑带中,交换出土中的阳离子,可使饱和粘性土的抗剪强度提高;但是对饱和粘性土滑带而言,由于粘土颗粒的结合水膜较厚,土渗透系数低,所以如何将浆液灌入滑坡体是一大难题。

本试验研究对物理化学方法加固滑坡进行了新的探索,采用一种经济适用的离子土固化剂来加固滑坡滑带土,增加滑带土的抗剪强度,从而提高滑坡的稳定性。

离子土固化剂是一种由多个强离子组合而成的水溶性化学物质,适用于粘土粒组含量在 25% 以上的各种土类(Dong *et al.*, 2004)。把它加入土中,与土相互作用,通过物理化学原理,将粘土矿物的结合水去除,使土由亲水性变成憎水性,减小粘土结合水膜的厚度,能有效地改进土的工程性质,包括增加土的压实度和抗剪强度,减小土的孔隙比和水敏性等。采用离子土壤强化剂(ISS)强固粘土,不仅施工周期短、费用低而且保护环境,对人、牲畜、植物和大自然无损害(陈彦生和董建军,1999)。离子土固化剂加固技术提供了一种低成本、施工简便、就地取材的土木工程加固方法,被广泛应用于道路和水利工程中加固土体,但用离子土固化剂加固滑坡滑带土,目前国内尚未见报道。

1 试验材料

1.1 试验用土

本试验研究以湖北省清江水布垭水电站的大岩淌滑坡的滑带土为例。大岩淌滑坡位于水布垭坝址左岸,距坝址 0.2 km ,为顺层一微切层基岩滑坡。滑坡边界清楚,西侧为大崖陡壁,东侧以榨房沟为界。后缘高程为 430 m ，“圈椅”状地形明显,前缘向南弧形突出,滑体剪出口高程约 $200\sim 210\text{ m}$,呈南北向狭长的扁形,南北向长度 870 m ,东西向 $120\sim 370\text{ m}$,面积 0.196 km^2 ,滑坡厚度为 $25\sim 40\text{ m}$,体积约 580 万 m^3 (周欣华和饶锡保,2000)。

大岩淌滑坡滑带主要分布于滑体与基岩之间,厚 $0.10\sim 9.15\text{ m}$,呈带状。物质成分为灰黄、浅黄色粘土夹碎石碎屑,局部见有明显的挤压碾磨特征,并可见擦痕。

试验用土来自大岩淌滑坡滑带土的原状土样,土样中的碎石和碎屑被剔除,实验主要针对细颗粒部分。

试验所用滑带土的粒度成分如表 1 所示,基本物理力学性质指标如表 2 所示。

表 1 滑带土的粒度成分

Table 1 Granulometric composition of the sliding soil

粒组	粒径(mm)	滑带土(%)
砾	10~5	0.02
	5~2	1.63
	2~0.5	10.46
砂	0.5~0.25	4.44
	0.25~0.074	28.53
粉	0.074~0.002	26.43
粘粒	<0.002	28.49

表 2 滑带土的基本性质

Table 2 Basic property of the sliding soil

土样名称	天然含水量(%)	密度(g/cm^3)	比重
滑带土	24.46	1.87	2.65
土样名称	液限(%)	塑限(%)	塑性指数(%)
滑带土	40.52	16.51	24.01

1.2 离子土固化剂

两种不同离子含量的离子土固化剂,分别称为 ISS_1 和 ISS_2 ,都具粘滞性, ISS_1 呈黄褐色液体, ISS_2 呈灰黑色液体。分子量在 $(5\sim 20)\times 10^4$,阳离子交换容量 $5\sim 6\text{ mg}/100\text{ g}$,碳当量差 $50\sim 56\text{ mg}/100\text{ g}$ 。根

据需要稀释成不同浓度的水溶液。

2 ISS 加固滑带土的试验研究

2.1 ISS 加固滑带土的配合比设计

在道路工程中, ISS 加固土的配合比设计是以无侧限抗压强度为评价指标来进行的. 但是笔者认为 ISS 加固滑坡滑带土的本质是减小粘土中结合水膜的厚度, 故应该从加入 ISS 后滑带土的塑性指数的降低来确定 ISS 加固土的最佳配合比。

塑性指数是反映土颗粒与水相互作用的灵敏指标之一, 在一定程度上反映了土的亲水性能. 它与土的颗粒组成、粘土矿物成分、阳离子交换性能、土的结合水膜厚度和比表面积、以及水溶液的性质等有着十分密切的关系, 塑性指数越高, 结合水膜越厚(方云等, 2003)。

取滑坡滑带土样进行不同配比的阿太堡试验, 并计算液限、塑限和塑性指数, 试验结果如表3所示. 由

表 3 不同配比下滑带土的塑性指数

Table 3 Plastic indexes of the sliding soil in different matches

ISS ₁ : 水(体积比)	塑性指数(%)	塑限(%)	液限(%)
0	24.01	16.51	40.52
1/100	23.96	16.19	40.15
1/150	23.88	16.02	39.90
1/200	23.84	14.01	37.85
1/300	19.68	15.59	35.27
1/350	21.42	16.34	37.76

ISS ₂ : 水(体积比)	塑性指数(%)	塑限(%)	液限(%)
0	24.01	16.51	40.52
1/100	22.05	16.05	38.10
1/150	22.03	15.01	37.14
1/200	19.84	15.29	35.13
1/300	22.51	15.95	38.46

表 3 可见, 对于 ISS₁ 和 ISS₂ 而言, 当其与水的配比分别为 1 : 300 和 1 : 200 时, 即 ISS₁ 和 ISS₂ 与滑带土的剂量比分别采用 1.13 L/m³ 和 1.95 L/m³ 时, 能够使滑带土的塑性指数降至最低. 与不加 ISS 的土相比, 加入 ISS 后, 这种滑带土的塑性指数可以控制在 20% 左右. 分别比不加 ISS 时的塑性指数降低了 18.03%(ISS₁) 和 17.36%(ISS₂), 而且可以看出, 并不是 ISS 加入越多越好, 相反, 当 ISS 浓度较大之后, 塑性指数又有所增加. 表明不但不能很好地去掉土中的结合水, 而且影响土的压实性, 并增加了成本。

表 4 滑带土剪切试验成果

Table 4 Shear test of the sliding soil

土样编号	粘聚力 C(kPa)	内摩擦角 Φ(°)
原样	4.8	12.4
ISS ₁ (1 : 300)	10	11.6
ISS ₂ (1 : 200)	8.8	11.9

2.2 ISS 对滑带土剪切强度的影响

取液限状态下的试样进行直接剪切试验, 分别取 ISS₁ 和 ISS₂ 与水的体积比为 1 : 300 和 1 : 200 的水溶液进行对比试验。

滑带土的抗剪强度不仅取决于土的物质组成、土的结构、土的性质和应力历史等, 而且还取决于土当前所受的应力状态. 为了模拟滑带土所受的实际应力状态, 本试验采用固结排水快剪法, 即土样均在液限含水量状态下装入剪切盒, 在垂直压力下试样完全排水固结稳定后, 快速施加水平剪力. 共进行 3 组试验, 每组 4 个试样, 分别在 50、100、200、300 kPa 的垂直压力下进行剪切. 因滑带土的土质松软, 所以试样需分次施压以防土样挤出. 当土样垂直变形在 1 h 内小于 0.005 mm, 认为固结稳定, 再施加下一级垂直荷载. 在施加第一级压力后, 立即向容器中注满水, 避免水分蒸发. 试验结果如表 4 所示。

可以看出, 加入 ISS 后滑带土粘聚力明显增大, 平均增加 2 倍以上, 但内摩擦角却基本不变。

因为粘性土的内摩擦系数不但涉及土颗粒间的相对移动所引起的滑动摩擦力和咬合摩擦力, 而且还因为粘性土中的粘土矿物的比表面积较大, 颗粒表面存在着吸附水膜, 土颗粒间可以在接触点处直接接触, 也可以通过吸附水膜而间接接触, 接触点处的颗粒表面, 又由于物理化学作用而产生吸引力, 对土的摩擦强度也有影响, 其体系相当复杂. ISS 作用后, 土颗粒表层的结合水膜变薄, 层状结构的矿物颗粒趋向于面一面的定向排列, 在剪切时, 土颗粒之间主要是面一面的滑动, 所以其内摩擦角并未有明显增大。

而粘性土的粘聚力则取决于土颗粒间的各种物理化学作用, 包括库仑力、范德华力和胶结作用等等, 是土颗粒内部连结的宏观反映, 可以划分为结合水连结、胶结连结和毛细水连结. 原苏联学者把粘聚力 C 分成原始粘聚力和固化粘聚力. 原始粘聚力来源于颗粒间的静电吸引力和范德华力. 固化粘聚力决定于颗粒之间胶结物质的胶结作用(方云等, 2003)。

滑带土加入 ISS 后, 吸附在土颗粒表面的结合

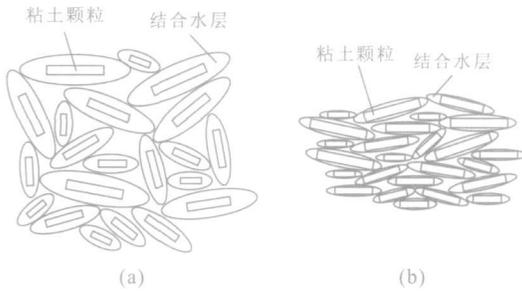


图 1 加入 ISS 前后土颗粒结构示意图

g. 1 Sketch map of soil grains' structure mixed ISS(b) or not(a)

水已经被置换掉,从而使土颗粒的扩散层的厚度减小,增大了土颗粒之间的原始粘聚力和固化粘聚力,并使其密度变大,因而滑带土的粘聚力 C 值明显增大(图 1)。

2.3 ISS 对土压缩性能的影响

为了模拟滑带土最不利的工况,取液限状态下的试样进行高压固结试验,分别取 ISS₁ 和 ISS₂ 与水的体积比为 1 : 300 和 1 : 200 的水溶液进行对比试验。

本试验采用稳定压缩,试验时施加的预压力 1 kPa,依次施加的压力为:1, 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1 600, 3 200 kPa。每加一级荷载后,在时间分别为 6'', 15'', 1', 2' 15'', 4', 6' 15'', 9', 12' 15'', 16', 20' 15'', 25', 30' 15'', 36', 49', 64', 100', 200', 400', 23 h, 24 h 时记录百分表读数,当土样趋于稳定且百分表读数不再变化时,测读土样变形量,接着施加下一级荷载。在施加第一级压力后,立即向容器中注满水,避免水分蒸发。

试验完成后,计算加入 ISS 后试样的初始孔隙比 e_0 ,各级压力下变形稳定后的孔隙比 e_s ,压缩系数 a_v 和压缩模量 E_s ,试验结果如表 5 所示。

在《建筑地基基础设计规范》(DBJ15-31-2003)中规定,以 $p_1=0.1 \text{ MPa}$, $p_2=0.2 \text{ MPa}$ 时相应的压缩系数 a_{1-2} 作为判断土的压缩性的标准。试验结果如表 6 所示。结果表明经过 ISS 作用后,在同一压力变化范围内,经过 ISS 处理后,滑带土的压缩系数和孔隙比减小得更少,说明土变得更密实,进一步证明了粘土表面结合水膜厚度减小。

2.4 ISS 对滑带土自由膨胀率的影响

自由膨胀率是指松散的烘干土粒在水和空气中分别自由堆积的体积之差与空气中自由堆积的体积之比,是反映粘性土膨胀性的指标之一 (Saiyouri *et al.*, 2004)。它与粘土的矿物成分、胶粒含量、化学成分和粘土颗粒结合水膜厚度等有着密切的关系。

表 5 滑带土固结试验成果
Table 5 Results of consolidation test of the sliding soil

正应力 p (kPa)	S (mm)	e_s	a_v (1/MPa)	E_s (MPa)
未加 ISS				
1		1.125		
12.5	0.029	1.122	0.266	7.975
25	0.066	1.118	0.315	6.716
50	0.138	1.110	0.306	6.906
100	0.235	1.100	0.205	10.220
200	0.333	1.089	0.105	19.946
400	0.425	1.079	0.049	42.647
800	0.509	1.070	0.022	92.263
1 600	0.584	1.063	0.010	207.935
3 200	0.654	1.055	0.005	446.029
加入 ISS ₁				
1		1.096		
12.5	0.047	1.091	0.429	4.872
25	0.089	1.086	0.355	5.884
50	0.155	1.080	0.274	7.586
100	0.243	1.070	0.185	11.200
200	0.331	1.061	0.092	22.479
400	0.415	1.052	0.044	46.355
800	0.499	1.043	0.022	92.420
1 600	0.571	1.036	0.009	217.084
3 200	0.640	1.029	0.005	448.276
加入 ISS ₂				
1		1.062		
12.5	0.060	1.055	0.536	3.835
25	0.116	1.050	0.464	4.415
50	0.195	1.041	0.324	6.291
100	0.288	1.032	0.192	10.980
200	0.377	1.023	0.092	21.925
400	0.457	1.014	0.041	48.918
800	0.535	1.006	0.020	100.077
1 600	0.609	0.999	0.009	210.776
3 200	0.675	0.992	0.004	469.208

表 6 滑带土的固结试验

Table 6 Consolidation tests of the sliding soil

试样名称	压缩系数(MPa ⁻¹)	压缩模量(MPa)
原状样	0.21	10.2
ISS ₁ 处理后	0.18	11.2
ISS ₂ 处理后	0.19	11.0

不同粘土矿物成分和不同结合水膜厚度的土粒具有不同的亲水性能,其膨胀性也有显著差异。

取两组天然状态下的滑带土进行自由膨胀率试验,然后分别取 ISS₁ 和 ISS₂ 与水的体积比为 1 : 300 和 1 : 200 的水溶液进行试验,试验结果如

表 7 滑带土的自由膨胀率试验

Table 7 Free expansion ratio test of the sliding soil

ISS: 水	自由膨胀率(%)
天然状态	53
ISS ₁ : 水(1 : 300)	15
ISS ₂ : 水(1 : 200)	19

表 7 所示. 由表可以看出, 加入 ISS 后滑带土的自由膨胀率明显减小, 这进一步证明了滑带土颗粒表面已由亲水性变为憎水性, 水敏性降低.

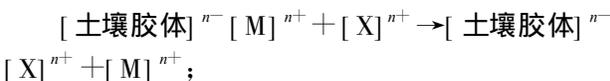
3 ISS 加固土的机理

离子土固化剂具有一种复合的化学配方, 其中含有活性成分的磺化油, 由植物油或鱼油与硫酸作用, 再经中和而得. 磺化油是一种阴离子表面活性剂, 由磺基(-SO₃H)和羟基(R-H)的碳原子直接相连而成. 有机化合物(RSO₃H)由磺酸的“亲水头”与由碳及氢的原子组成的“疏水尾”所构成. 这样, 由于 ISS 中的“亲水头”与“疏水尾”的“二元性”, 使得其与粘土等土作用后就能除去其粘土矿物的水分并使 ISS 与土的质点之间产生永久的结合固化. 这种固化, 主要依靠 ISS“亲水头”与粘土质点表面所形成的化学链, 其性质表现为:

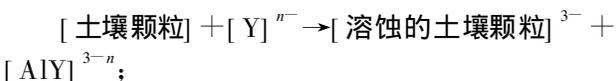
(1)SO₃ 的阴离子头与粘土表面上之金属阳离子之间形成直接化学链, 且在金属阳离子与 SO₃ 之氢原子间形成感应链; (2)ISS 侵占在粘土表面上空出的离子位置; (3)ISS 的“亲水头”, 在很薄层的结合水中溶解, 并吸附在粘土矿物的表面, 置换出粘土表面的结合水.

以高岭土为例, 由于 ISS 是一种带高密度电荷的磺化油树脂, 是一种能溶于水的电解质, 所以在水中能离解出带正电荷的阳离子[X]ⁿ⁺和带负电的阴离子[Y]^{m-}.

离解出来的阳离子与土壤胶体颗粒表面的阳离子[M]ⁿ⁺产生交换作用:

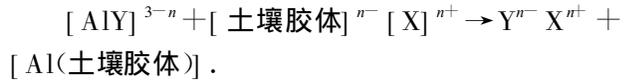


离解出来的阴离子与土壤中的铝产生络合作用:



铝离子的树脂络合物[AlY]³⁻ⁿ再与[土壤胶

体]^{m-}[X]ⁿ⁺作用, 使得树脂得以再生:



总反应式:



由此可见, ISS 作用的结果是赶走吸附在土壤颗粒表面的、非常容易水合的阳离子, 取而代之的是水合度较低、粘结力较强的铝离子及其水化合物(陈彦生和董建军, 1999).

根据 Gouy-Chapman 模型, 溶液中的水分子、阳离子扩散在粘土颗粒周围的空间里, 由于静电吸引, 离粘土颗粒表面愈近, 反离子浓度愈大, 吸附力愈大, 吸附愈紧; 离粘土颗粒愈远, 反离子浓度愈小, 吸附力愈小, 到距表面很远处(约 1~10 nm)过剩的反离子浓度为零(沈钟等, 2004).

离子土固化剂用水稀释后, 迅速离子化, 溶液离子浓度高, 交换能力强, 与土粒表面的离子进行强烈交换, 也会改善土粒表面的电荷性质, 使土粒与水分子间的作用由原来的相互吸引变为相互排斥, 打开了土粒与水分子之间的“电化键”, 从而释放出束缚在吸附层和扩散层内的结合水, 使粘土表面的电位势下降.

该反应为一不可逆反应, 即当土被 ISS 处理后, 土粒将不会恢复到原来的离子不平衡状态. 这些试剂会牢牢地粘附在土颗粒上, 能永久地将土的亲水性变为疏水性, 从而减小粘土矿物表面扩散层滑动面的距离 Δ 和 ζ 电位. 当两个相邻的粘土颗粒靠近(小于 2.5 nm)时, 双电层重叠, 即形成公共结合水膜, 阳离子与粘土颗粒表面负电荷共同吸引产生静电力, 使土易于压缩, 能有效地提高土的抗剪强度和密度, 减小土的孔隙比, 而且 ISS 加固土的功效随着时间的推移逐渐增强, 从根本上将土内部毛细管水和结合水全部去掉, 使土强度不断增大.

4 结论

(1)离子土固化剂能够降低滑带土的塑性指数, 减小粘土的结合水膜厚度. 对 ISS₁ 和 ISS₂, 当其与水的配比分别为 1 : 300 和 1 : 200 时, 能够使滑带土的塑性指数降至最低. (2)离子土固化剂可以提高滑带土的抗剪强度, 特别是对粘聚力的提高比较大, 而对内摩擦角的影响较小. (3)离子土固化剂可以提高滑带土的压缩性能, 减小粘土的孔隙比; 可以降低

滑带土的自由膨胀率,减小水敏性。

对滑坡而言,滑带土是影响滑坡稳定性的重要因素;ISS 作为一种新型化学加固材料用来加固滑带土尚处于初步探索阶段。特别是 ISS 加固滑带土后,土颗粒结合水改变和阳离子交换量的量化研究;滑带土微结构的变化;离子固化剂水溶液在滑带土中的运移机制;以及现场的灌注方案和工艺等问题均需进一步研究论证。

References

- Chen, Y. S., Dong J. J., 1999. Ionic soil stabilizer construction manual. Wuhan University of Technology Press, Wuhan (in Chinese).
- Dong J., Wei T., Li G., et al., 2004. A new way of sanitary landfill with ionic soil stabilizer (ISS) for domestic refuse. Proceedings of 1st Symposium of CGFGE, 71—76.
- Fang Y., Lin T., Tan S. L., 2003. Soil mechanics. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Liu X. L., Deng J. H., Li G. T., 2004. Shear strength properties of sliding soils of landslides; An overview. *Rock and Soil Mechanics*, 25(11): 1849—1854 (in Chinese with English abstract).
- Saiyouri N., Tessier D., Hicher P. Y., 2004. Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays. *Clay Minerals*, 39(4): 469—479.
- Shen, Z., Zhao Z. G., Wang, G. T. et al., 2004. Colloid and surface chemistry. Chemical Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Tang H. M., Ma S. Z., Liu Y. R., et al., 2002. Stability and control measures of Zhaoshuling landslide, Badong County, Three Gorges reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 621—625 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. L., 1990. Reinforced soil principle. China Communications Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, X. H., Rao, X. B., 2000. Study on stability of Dayantang landslide. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 17(2): 41—47 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈彦生, 董建军, 1999. 电离子土壤强化剂(ISS)施工指南. 武汉: 武汉工业大学出版社.
- 方云, 林彤, 谭松林, 2003. 土力学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 刘小丽, 邓建辉, 李广涛, 2004. 滑带土强度特性研究现状. 岩土力学, 25(11): 1849—1854.
- 沈钟, 赵振国, 王果庭, 等, 2004. 胶体与表面化学. 北京: 化学工业出版社.
- 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等, 2002. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 621—625.
- 张登良, 1990. 加固土原理. 北京: 人民交通出版社.
- 周欣华, 饶锡保, 2000. 大岩淌滑坡稳定性研究. 长江科学院院报, 17(2): 41—47.