

模拟堆载作用的黄土边坡土体变形机理试验

刘悦¹, 黄强兵²

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过固结不排水剪试验, 研究了堆载作用下不同深度、含水量和围压的原状黄土的变形和破坏特征, 并从黄土的微观结构角度分析了产生这一现象的原因, 结合黄土边坡特殊的工程地质条件, 分析了堆载作用下黄土边坡土体的变形破坏过程。试验结果表明, 不同深度、含水量和围压的原状黄土的应力应变曲线和抗剪强度具有不同的特征; 特殊的工程地质条件, 使黄土坡体的某些部位形成了堆载作用下不利于黄土材料强度保持的含水量和围压的组合, 导致了这些部位黄土的变形破坏, 进而诱发坡体的变形破坏。

关键词: 黄土; 边坡; 变形机理; 堆载; 三轴试验

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)02-0183-05

Test Study for Simulating Soil Deformation Mechanism of Loess Slope Under Load Condition

LIU Yue¹, HUANG Qiang-bing²

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: By means of triaxial compression test, the characteristics of deformation and failure of the natural loess which is sampled from the different depth of slope and has different confining pressure and moisture content are researched, and the reasons are analyzed according to the microstructure of loess samples. According to the above results, the process of deformation and failure of the loess slope under load condition are explained. The test results show that the natural loess which is sampled from the different depth of slope and has different confining pressure and moisture content have the different characteristics of stress-strain curves and the shear strength. The special conditions of engineering geology of loess slope result in the combination of moisture content and confining pressure that is adverse to maintain the strength of loess, this can result in the failure of loess and loess slope.

Key words: loess; slope; deformation mechanism; load; triaxial test

0 引言

近年来, 由于黄土地区交通、水利、能源、城市建设等领域基础设施建设规模的不断扩大, 坡体堆载诱发黄土边坡变形破坏的问题也日益增多。大量的黄土路堑边坡施工中开挖土方或废料的坡顶或坡体堆载, 线路穿越较大的黄土冲沟时大量的坝式或桥式路堤的填筑, 在坡顶或坡体上建筑房屋、

堆放废土和废渣等, 这些堆载活动不同程度地影响了黄土边坡的变形和稳定, 甚至诱发一系列黄土边坡灾害, 如崩塌、滑坡和泥石流等^[1-3]。然而, 目前对堆载作用下黄土边坡变形破坏机理的研究较少, 国内外学者对黄土滑坡机理的研究^[4-12]主要也是针对自然因素作用下的天然黄土斜坡, 基本没有考虑工程因素对黄土边坡变形和破坏的影响; 考虑了工程因素, 但所谓的机理分析大多是对滑坡影响因素

收稿日期: 2006-11-17

基金项目: 交通部重点科技项目(95-05-05-13); 长安大学科学基金项目(06Q15)

作者简介: 刘悦(1973-), 女, 陕西西安人, 讲师, 博士, 从事环境科学与地质灾害防治研究。E-mail: liuyueqb@163.com

或成因的定性分析, 缺少定量分析或基于力学理论与试验支撑的理论分析。因此, 笔者尝试在黄土三轴压缩固结水不排水试验(CU)成果的基础上, 结合黄土边坡特殊的工程地质条件, 对堆载作用下黄土边坡土体的变形破坏机理进行初步探讨。

1 黄土边坡土体变形机理试验

1.1 试验原理

黄土坡体或坡顶的堆载过程中, 其斜坡土体应力路径的变化与三轴压缩试验中的固结不排水试验过程类似。首先, 斜坡土体在自重应力作用下的堆积压密, 相当于试样在一定围压下的等压固结; 其次, 坡体中后部快速持续的堆载, 相当于不排水条件下增加轴向压力。因而, 利用黄土的 CU 试验, 模拟堆载作用下黄土边坡土体的变形破坏过程。

此外, 堆载对黄土斜坡不同部位或同一部位但含水量不同的土体产生的影响不尽相同, 因此, 分别对取自坡体不同部位的原状黄土进行 CU 试验, 得到了不同围压和含水量下黄土的变形和强度特征数据。

1.2 试验方案

试验仪器: 本次试验是在国土资源部岩土工程开放研究实验室的 CSS-2901TS 型土体三轴流变试验机上完成。该试验机可以通过自动或手动控制开关实现按一定的加、卸载速率加卸围压和轴向力, 并按一定的采样程序, 采集作用到试样上的力、变形值及围压、孔隙压力、孔隙水流量等数值, 在计算机屏幕上显示并处理数值。

试验材料: 试验用 Q₂ 黄土取自西安市灞桥区红旗乡姜家村滑坡后壁。该黄土颜色较深, 呈褐黄色, 坚硬, 大孔隙较少, 土质较均匀, 部分含小的钙质结核, 无湿陷性。

试验目的: 获取试样在固结不排水过程中的最大主应力、最小主应力、轴向应变值, 观察其最终的破坏形式。

试验步骤: ①试样制备。取自距离滑坡后壁坡顶埋深约 10、12、14、16 m 的土样, 分别制成 $\varnothing 39.1\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的试样, 并测定各试样的天然含水量, 然后将埋深为 16 m 的试样, 分别利用滴定注入法和抽气饱和法配制成含水量为 23%和饱和和试样各 4 个; ②固结。将埋深为 10 m 的 4 个试样分别在围压 200、300、400、500 kPa 下固结; ③加荷。保持固结完成后试样各自的围压(σ_3)不变, 以速率

(v_1)为 41.7 kPa/min 逐步增加轴力(σ_1)直到各试样破坏; ④同前, 对埋深 12、14 m 各自的 4 个试样及埋深 16 m 的配制而成的含水量为 25%和饱和的试样各 4 个, 重复上述的固结和加荷过程。

1.3 试验结果及分析

1.3.1 不同深度、含水量和围压下原状黄土的应力应变曲线特征和破坏型式

图 1~图 5 为不同深度、不同含水量、不同围压下原状黄土的应力应变曲线。由图可见: 原状黄土试样应力-应变曲线均有一个明显地转折点。在转折点之前, 无论埋深、含水量和围压的大小, 原状黄土应力-应变基本呈线性关系, 曲线很陡, 应变很小, 应力随应变量的增加而急剧增大; 在转折点之后, 应力-应变曲线基本都呈非线性关系, 但随着深度、含水量和围压的不同, 原状黄土的应力-应变曲线变化趋势有较大差异, 结果为: 对埋深 10、12、14 m 的浅层黄土, 在含水量较低($w \leq 18\%$)、围压大于 200 kPa 时, 黄土的应力-应变曲线均表现为硬化型; 在含水量较高($18\% < w \leq 23\%$)时, 黄土仅在特定围压下, 应力-应变曲线表现为弱软化型。除此之外, 无论是该含水量范围内的低含水量与高围压、低含水量与低围压、高含水量与低围压、高含水量与高围压组合, 黄土的应力-应变曲线均表现为硬化型或弱硬化型。当围压相同时, 发生应变软化的土的含水量随土层埋深而增加, 如在围压 300 kPa 时, 对埋深 12 m 的黄土, 发生应变软化的土的含水量为 18.6%, 而埋深 14 m 的黄土, 发生应变软化的土的含水量为 23.0%。

对浅层黄土, 当土的应力-应变曲线表现为硬化型或弱硬化型时, 则破坏时均无明显剪切带, 破坏时都呈现鼓胀状; 当土在特定围压下的应力-应变曲线表现为软化型或弱软化型时, 试样破坏时出现明显剪切带。根据有关文献^[13-14]的研究, 前者可能发生了剪缩现象, 后者的变形破坏形式可能应为先剪缩后剪胀(图 6)。

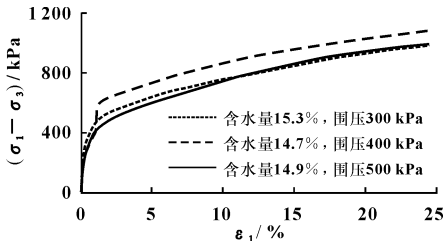


图 1 埋深 10 m 处黄土应力-应变曲线

Fig.1 Stress Strain Curve of Loess from the Depth of 10 m

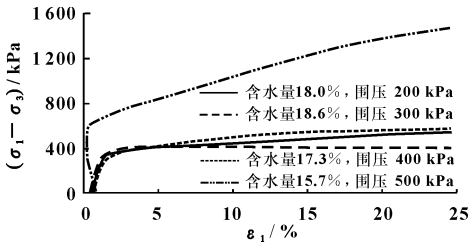


图 2 埋深 12 m 处黄土应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-Strain Curve of Loess from the Depth of 12 m

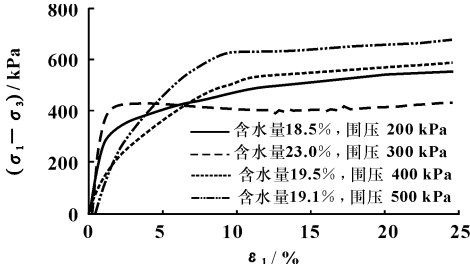


图 3 埋深 14 m 处黄土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-Strain Curve of Loess from the Depth of 14 m

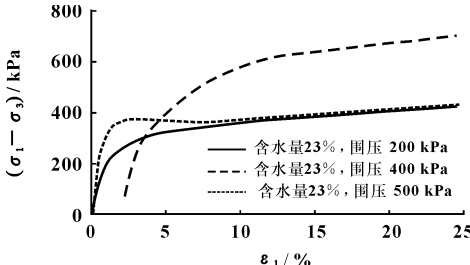


图 4 含水量 23% 黄土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-Strain Curve of Loess with 25% Water Content

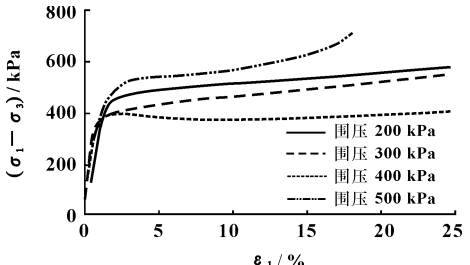


图 5 饱和黄土应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-Strain Curve of Saturated Loess

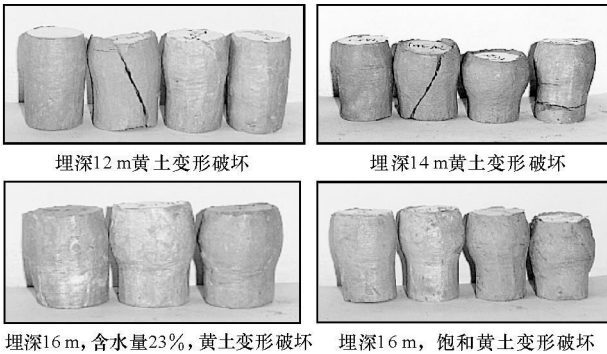


图 6 黄土试样变形破坏

Fig. 6 Failure Pictures of Nature Loess

对埋深 16 m 的深层黄土, 当含水量较高 ($\geq 23\%$) 但未饱和时, 土的应力-应变曲线表现为硬化型或弱硬化型, 试样破坏时均无明显剪切带, 破坏时呈现鼓胀状; 当含水量饱和时, 黄土应力-应变曲线只在特定围压下表现为弱软化型, 黄土发生应变软化, 此外, 无论围压高低, 土的应力-应变曲线均表现为硬化型。然而, 无论黄土的应力-应变曲线表现为硬化型还是弱软化型, 试样破坏时均无明显剪切带, 破坏时呈现鼓胀状 (见图 6)。

1. 3. 2 不同深度、含水量和围压下原状黄土的强度特征

根据三轴试验的有关规定, 以应力-应变曲线峰值点对应的强度为土的抗剪强度 (τ_f), 如果无明显的峰值点, 则以轴向应变 15% 的主应力差值作为破坏点和土样的抗剪强度。同时如果以与原状黄土应力-应变曲线转折点对应的点作为非饱和黄土的天然结构发生破坏的起点, 则可以利用原状黄土应力-应变曲线转折点处所对应的应力差为非饱和黄土的结构强度 (τ_s)^[15], 所对应的应变为结构强度极限应变 (ϵ_s)。

据此, 对图 2 ~ 图 6 进行分析可以发现: 对埋深 10、12、14 m 的浅层黄土, 土样的结构强度和结构强度极限应变均随围压的增加而增加, 但随含水量的增加结构强度减小而结构强度极限应变增加; 当土的应力-应变曲线表现为硬化型或弱硬化型时, 土的抗剪强度随围压的增加而增加, 随含水量的增加而减小, 而且含水量的影响远大于围压的影响; 当土的应力-应变曲线表现为软化型或弱软化型时, 黄土发生应变软化, 在同深度的试样中, 抗剪强度最低 (表 1)。

对埋深 16 m 的深层黄土, 当含水量较高 ($\geq 23\%$) 但未达到饱和时, 低围压 (200 kPa) 和高围压 (500 kPa) 的黄土强度都较低, 而中等围压 (400 kPa) 的黄土强度较高; 当含水量饱和时, 低围压 (200 kPa) 和高围压 (500 kPa) 黄土的强度都较高, 而中等围压 (300、400 kPa) 的黄土强度较小, 发生应变软化的黄土的抗剪强度最低 (表 1)。

1. 3. 3 堆载作用下黄土物理性质变化与黄土变形和强度的关系

众多研究^[13-15]表明: 原状黄土是一种典型的结构性欠压密土, 在长期的沉积过程中形成了以粗粉粒为主的大孔隙骨架结构, 土颗粒和集合体团粒构成了黄土的骨架, 粘土矿物和碳酸盐等共同构成了

表 1 黄土试样物理力学参数和变形破坏特征

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters and Failure Characteristics of Loess							
埋深 /m	土样 序号	含水量 /%	围压 /kPa	极限应 变/%	结构强 度/kPa	抗剪强 度/kPa	可能的变形破坏型式
10	1	15.3	300	0.16	207	848	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	2	14.7	400	1.42	608	958	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	3	14.9	500	0.36	264	862	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
12	1	18.0	200	1.45	327	478	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	2	18.6	300	1.47	345	423	弱软化型, 先剪缩后 剪胀, 有明显剪切带
	3	17.3	400	1.10	186	539	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	4	15.7	500	0.49	610	1225	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
14	1	18.5	200	0.99	251	512	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	2	23.0	300	1.15	375	429	弱软化型, 先剪缩后 剪胀, 有明显剪切带
	3	19.5	400	1.05	114	440	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	4	19.1	500	1.28	153	639	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
16	1	23.0	200	0.75	159	376	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	2	23.0	400	4.25	347	627	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	3	23.0	500	0.81	285	385	弱硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	1	饱和	200	1.15	357	522	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	2	饱和	300	0.66	320	479	硬化型, 剪缩, 鼓胀状
	3	饱和	400	0.89	340	395	弱软化型, 剪缩, 鼓胀状
	4	饱和	500	1.66	455	616	硬化型, 剪缩, 鼓胀状

连接骨架颗粒的胶结物。因此, 原状非饱和黄土的强度主要由摩擦强度和凝聚强度组成。摩擦强度由土颗粒接触面或颗粒与胶结物质接触面上的摩擦产生, 反映指标为主要随含水量发生变化的土的内摩擦角。凝聚强度主要包括: ①由粘土矿物颗粒的粘结和颗粒间的分子引力形成的原始凝聚力; ②胶结物质形成的加固凝聚力, 即胶结强度或结构强度; ③主要由非饱和土的基质吸力形成的强度(吸附凝聚力), 即基质吸力强度。因此, 当含水量增加时, 土粒表面结合水膜增厚, 使土颗粒间的分子引力减弱, 导致原始凝聚力降低, 而胶结物中可溶盐的溶解, 引起加固凝聚力降低, 含水量的增加也引起基质吸力的降低, 导致由基质吸力引起的吸力强度的降低, 即吸附凝聚力的降低。同时, 含水量的增加还使内摩擦角减小, 摩擦强度降低。当固结围压增加时, 若大于黄土结构强度, 则其结构完全破坏, 原生结构单元将趋于紧密排列, 呈现硬化型, 强度较大; 若小于黄土结构强度, 而含水量又较低, 则黄土一般表现为应变软化或弱软化, 强度较低; 相反, 若含水量较高, 则可能表现为应变硬化或弱硬

化, 强度较高。

因而, 不同深度、围压和含水量下原状黄土物理力学性质不同, 决定了它在堆载等外部因素作用下的变形和强度的反应不同。对同一深度黄土, 围压相同时, 随含水量增加, 非饱和黄土的结构强度和抗剪强度都降低; 含水量相同时, 随围压增加, 结构强度增大而抗剪强度变化比较复杂。

2 黄土边坡土体变形机理

2.1 工程地质条件与土体变形破坏关系

堆载作用下黄土边坡的变形破坏与黄土边坡特殊的工程地质条件有着必然的联系, 尤其与构成边坡主体黄土材料特殊的物理性质及黄土边坡特有的地形地貌、地质结构和水文地质条件有关。黄土地区的黄土边坡具有特殊的工程地质条件: 黄土斜坡多高而陡, 具典型的幔覆结构特征, 一般是由黄土地层覆盖于下伏基岩层而构成, 上层黄土中的 Q₄ 和 Q₃ 黄土孔隙比较大, 渗透性强, 具强烈的湿陷性, 浸水后结构迅速破坏, 结构强度减小或丧失, 但厚度较薄; 下层 Q₂ 和 Q₁ 黄土孔隙比较小, 渗透性弱, 湿陷性较小, 强度较高, Q₂ 具垂直节理, 且厚度较大, Q₁ 厚度较薄; 基岩地层一般为上新世三趾马红粘土(N)或第三纪以前的基岩, 老第三纪以前的基岩在不同地区由不同时代不同岩性的基岩构成。两者相比, 上部疏松而渗水, 下部隔水, 雨季的大气降水沿黄土中孔隙和裂隙入渗, 通过黄土的垂直和侧向渗透, 积聚在下伏的红土不整和面或基岩风化壳上。

正是在这种特殊的工程地质条件作用下, 黄土坡体的某些部位形成了堆载作用下不利于黄土材料强度保持的含水量和围压的组合, 导致了这些部位黄土材料的变形破坏, 进而诱发坡体的变形破坏。首先, 高陡的地形地貌, 使处于同一埋深的黄土固结围压不同, 靠近坡体前部的土体所受固结围压小于坡体后部土体的围压, 坡体同一部位, 深层土体的固结围压大于浅层土体; 其次, 上部疏松渗水而下部致密隔水的坡体结构, 使得降水积聚在下伏的红土不整和面或基岩风化壳上, 导致接触面上部一定范围内的黄土含水量较大甚至饱和, 即深层黄土的含水量较大。因此, 黄土边坡的特定部位, 具有特殊的围压和含水量的组合, 加荷作用下表现出不同的变形和破坏特征:

(1) 坡体表层黄土含水量较低, 均发生应变硬

化,强度增加,加荷时不易变形破坏。

(2)坡体表层以下的浅层黄土含水量稍高,仅在特定围压下发生应变软化,强度较低;此外,则发生硬化,强度增加,总体上强度较高,不易变形破坏。

(3)坡体深层非饱和黄土含水量较高,由坡体前部至后部,围压依次增大,均发生应变硬化或弱硬化,总体强度较高,但坡体前部和后部土体抗剪强度较低,变形破坏容易先从坡体前部及后部开始。

(4)坡体深层饱和黄土含水量饱和,由坡体前部至后部,围压依次增大,仅在特定围压(中部坡体)下发生应变软化,强度降低;此外,均发生应变硬化或弱硬化,总体强度增加;但是,加荷作用下,坡体中部围压中等的黄土抗剪强度最小,容易先产生变形破坏。

2.2 堆载作用下黄土边坡土体变形破坏过程分析

将上述具有一定含水量和围压组合的坡体部位与试验研究结果进行比较,理论上可以得到堆载作用下黄土边坡主要的变形破坏过程为:坡体或坡顶堆载→坡体深层含水量较大(未饱和)的黄土产生较大不均匀压缩变形,坡体前部和后部的土体变形较大,可能首先局部破坏,中部变形小→坡体前部土体向下蠕动→堆载体后部产生裂缝→水沿裂缝入渗至岩土分界面,使其含水量急剧饱和→坡体中部饱和的主滑段滑带土剪切破坏,破坏区向前扩展→导致更大范围坡体向前加速蠕动→后部土体受到拉力,裂缝逐渐向下、向前扩展→后部裂缝与主滑段破坏区连通→牵引段土体拉裂破坏→牵引段和主滑段共同推动坡体前部的抗滑段土体加速蠕动→前部抗滑段饱和滑带土剪切破坏,破坏区随应力转移,快速向前扩展→抗滑段土体全部破坏→滑面全部贯通、滑坡发生。据此分析,堆载作用下黄土边坡变形破坏的力学机制应为“推动式滑坡”。

3 结语

(1)堆载作用下,浅层黄土含水量较低时,发生应变硬化,破坏时无明显剪切带;含水量较高时,仅在特定围压下表现为弱软化型,破坏时有明显剪切带。

(2)堆载作用下,含水量较大的深层黄土,破坏时都无明显剪切带。含水量未饱和时,表现为应变硬化型或弱硬化型,低围压和高围压黄土的抗剪强度较低,中等围压土抗剪强度较高;饱和时,强度变

化与未饱和时相反,但在特定的中等围压下发生应变弱软化,抗剪强度较低。

(3)不同深度、围压和含水量下原状黄土物理力学性质不同,决定了在堆载等外部因素作用下变形和强度的反应不同

(4)特殊工程地质条件下,使黄土坡体的某些部位形成了堆载作用下不利于黄土材料强度保持的含水量和围压的组合,导致了这些部位黄土的变形破坏,进而诱发坡体的变形破坏。堆载作用下黄土边坡变形破坏的力学机制应为“推动式滑坡”。

参考文献:

- [1] 雷祥义. 陕西关中人为黄土滑坡类型的研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, 23(3): 36-42.
- [2] 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西省公路勘察设计院, 长安大学. 铜黄公路高边坡稳定性与治理对策研究[R]. 西安: 陕西省高速公路建设集团公司, 2002.
- [3] 张永双, 曲永新. 陕北砂黄土区公路地质灾害及其防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 15-19.
- [4] Derbyshire Ed. Geological Hazards in Loess Terrain, with Particular Reference to the Loess Regions of China[J]. Earth Science Reviews, 2001, 54(1/3): 231-260.
- [5] Dijkstra T A. The Loess of North Central China: Geotechnical Properties and Their Relation to Slope Stability[J]. Eng Geo, 1994, 36: 153-171.
- [6] Dijkstra T A. Geotechnical Thresholds in the Lanzhou Loess of China[J]. Quaternary International, 2001 (76/77): 21-28.
- [7] Sassa Kyoji. Undrained Dynamic-Loading Ring-Shear Apparatus and Its Application to Landslide Dynamics[J]. Landslides, 2004, 1: 7-19.
- [8] Baumler Rupter. Pedogenic Studies in Aeolian Deposit in the High Mountain Area of Eastern Nepal[J]. Quaternary International, 2001 (76/77): 93-102.
- [9] 王家鼎, 张倬元, 肖树芳. 灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 241-246.
- [10] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670-674.
- [11] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 36-40.
- [12] 程谦恭, 张倬元, 崔鹏. 平卧“支撑拱”锁固滑坡动力学机理与稳定性判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2855-2864.
- [13] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.
- [14] 邵生俊, 谢定义. 土的变形非线性与剪胀剪胀性新认识[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 72-76.
- [15] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 79-83.