

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0121-07

坡积松散体稳定性模型试验研究

袁从华, 吴振君

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 云南西北部三江源高海拔、高深切地区, 坡积松散体稳定性是公路边坡面临的主要问题之一, 模型试验是研究松散体稳定性各影响因素最有效的手段。根据相似原理, 设计模型试验的主要几何相似常数, 采用一系列手段改造模型试验材料, 使其达到材料强度、重度相似。一系列模型破坏条件真实再现现场坡积松散体的滑坡条件, 试验结果分析对相关设计、施工和科研人员有较好的借鉴作用。模型试验材料从松散状态到较密实状态, 开始破坏的自然坡角提高 42%~100%, c 值提高约 50%~120%, φ 值提高约 6%~8%, 密实状态提高, 坡体的强度提高, 相应坡体的稳定性提高, 起始破坏的自然坡角也显著提高; 降雨使坡体含水率提高近饱和时, 充分软化的 c 值下降约 70%, φ 值下降约 7%, 表明雨水下渗软化是导致坡积松散体产生滑动的最根本、最直接的因素。模拟降雨的土体强度变化过程对松散体边坡稳定性研究有较好的参考价值。

关 键 词: 坡积松散体; 模型试验; 密实状态; 软化; 强度下降

中图分类号: TU442

文献标识码: A

Study of model test on stability of colluvial slopes

YUAN Cong-hua, WU Zhen-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The stability of colluvial slopes in high-altitude mountain areas, three rivers sources regions, northwestern Yunnan is one of the main problems in road construction. Model test is one of the most effective means for investigating the factors for the slope stability. Based on the theory of similarity and the definition of safety factor of the slope, a range of tools are used to transform the model test materials to reach the strength similarity requirements. A series of model tests were carried out, which reproduced the real conditions for the failure of colluvial slope. The model test results can give references for geotechnical designers and researchers. The slope angle when the slope fails increases by about 42%-100%, the cohesion increases by about 50%-120%, the internal friction angle increases by about 6%-8% when model test material changes from loose state to more dense state. The results show that when material density increases the strength increases and the slope stability increases; thus slope angle also significantly increases when slope fails. When water content of the material increases and the material is nearly saturated under rainfall, the cohesion decreases by about 70% and the internal friction angle decreases by about 7%. It is indicated that the material softening by infiltration is the most fundamental factor for the stability of colluvial slope.

Key words: colluvial slope; model test; dense state; softening; strength degradation

1 引 言

高海拔高深切条件下的边(滑)坡坡面, 由于岩性、地形等的差异以及不同风化、剥蚀条件, 再加上地表松散体顺坡向下溜滑, 在坡面的某一区域, 常出现一个相对缓坡和凹坡地形而形成的坡积体。这种坡积体在不同的地段因海拔高差、气候、温差和地表风化程度不同, 坡积体面积与厚度差别

很大, 有的厚度可达十几至几十米。坡积体坡度一般在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间。植被稀少区坡积体基本以碎石为主, 具有一定分层性, 植被较好区域坡积体以黏性土为主。在凹坡面堆积形成的面积与厚度都很大的坡积体, 厚度达到几十米至近百米。

这些以坡积物为主的松散堆积体, 在自然条件下, 有的处于稳定状态, 有的大部分时段稳定, 但在不利的内外动力作用(如强降雨条件)下, 坡积

收稿日期: 2012-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助(No.40802077); 云南省交通运输厅科技项目资助(No.2011(D)11-b)。

第一作者简介: 袁从华, 男, 1961 年生, 本科, 副研究员, 主要从事边坡方面的研究工作。E-mail: ych_yts@126.com

体发生变形, 形成不稳定斜坡体, 有的发生持续变形, 最终形成滑坡^[1-3]。

在公路选线时, 线路通过这类坡积体地段, 大多采用外帮、内切的形式修筑路基。很多情况下, 路基在坡积体的中下部(即位于斜坡体的抗滑段)开挖, 易造成原先稳定的自然坡积体和欠稳定的斜坡体失稳发展成滑坡^[4-5]。

在云南维西至德钦二级公路中, 三江(金沙江, 澜沧江, 怒江)并流深切, 该地区特有的地质构造运动, 使得沿线松散坡积体失稳滑动破坏在维德二级公路沿线滑坡中占有相当大的比例, 几个大的坡积松散体滑坡的滑动面都是在坡积体内部产生的, 滑动面临空后坡体快速滑移, 并短时间内阻断澜沧江。以坡积物为主的松散体稳定性是维德二级公路边坡面临的主要工程问题之一。这些以坡积物为主的松散体有的分布面积与高差都很大, 甚至沿线路延伸数百米, 有的坡积体厚度近百米, 形成高海拔、高深切地区独特的滑坡破坏模式。为了研究坡积松散体稳定性的影响因素, 本次进行了模型试验研究。

2 模型试验设计思路及方案

2.1 模型试验相似常数

为使模型产生的物理现象与原型相似, 必须使模型材料、模型形状和荷载等遵循相似原理。对于地质力学模型试验, 除要求模型与原型的平衡方程、相容方程、几何方程、物理方程和边界条件一致外, 还要求模型材料的重度、强度及变形特性等方面均须满足相似原理。在实际应用中, 全部相似判据都满足的完全相似模型是极难获得的, 只能使模型满足主要的相似判据。

根据相似原理, 本次模型试验应满足下列相似判据:

$$C_c = C_l; C_\rho = 1; C_\gamma = 1 \quad (1)$$

式中: C_l 为几何相似常数; C_γ 为重度相似常数; C_ρ 为内摩擦角相似常数; C_c 为黏聚力相似常数。

室内模型尺寸(长×高×宽)为 2 m×1 m×0.6 m, 现场松散体滑动厚 10~50 m, 破坏面长度在 20~100 m, 取 $C_l = 10 \sim 50$, 则室内模型能反映现场松散体一般的滑动厚度和滑动长度。模型材料黏聚力的相似常数也为 10~50, 而内摩擦角 φ 和重度的相似常数为 1。

根据边坡安全系数的定义:

$$K = \frac{W \cos \psi \tan \varphi}{W \sin \psi} + \frac{cL}{W \sin \psi} \quad (2)$$

式中: W 为滑体的重量; ψ 为破坏面的倾角; L 为滑体的长度; c 、 φ 分别为材料的黏聚力和内摩擦角。通过式(2)可以得出, 模型边坡安全系数的相似常数为 1。

2.2 模型试验方案

室内模型试验平台一端的底部为铰支, 另一端可以自由抬升, 如图 1 所示。图中, α 为滑动面倾角; β 通过抬升模型框尾部(手动滑轮)模拟不同自然坡度的情况; H 为模型框尾部抬升的高度; L 为初始的滑动范围。

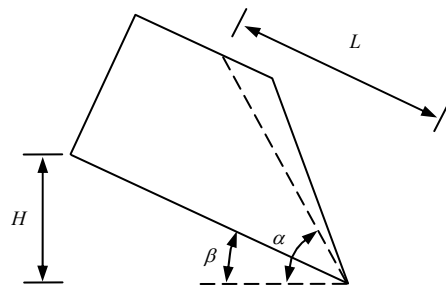


图 1 模型的示意图
Fig 1 Sketch of model

模型框的侧壁为有机钢化玻璃, 为减少模型框侧壁的边界约束效应, 在侧壁涂有润滑油薄膜, 减小模型材料和内壁的摩擦。

通过干燥, 掺砂砾, 增加空隙等手段改造现场土体, 达到模拟材料所需的强度相似, 改造后的土体重度基本满足相似要求。综合现场勘察、室内剪切试验以及失稳边坡滑动面强度参数反分析结果可知, 现场碎石土体 c 值多为 10~80 kPa, φ 值多为 $27^\circ \sim 35^\circ$, 因此模型材料参数 c 值为 0.5~5.0 kPa, φ 值为 $27^\circ \sim 35^\circ$, 才能反映现场实际边坡土体的强度状况。

模型材料的颗粒级配曲线见图 2。为了尽量达到材料强度相似, 需要的粗颗粒成分较多。根据模型的几何相似常数, 模型材料选用砂砾来模拟现场的碎石、块石是较合适的。

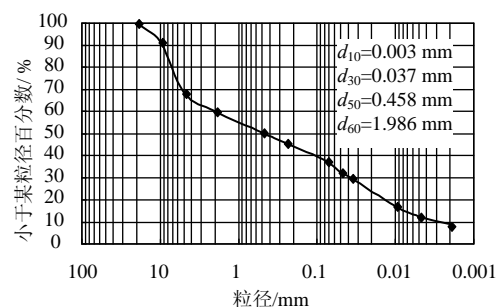


图 2 松散体材料的颗粒分析级配曲线
Fig 2 Gradation curve of material

很多试验结果表明，含水率和饱和度等因素对土体抗剪强度有较大影响^[6-11]。为了研究现场坡积松散体滑坡的影响因素，分别进行以下单项试验，

- (1) 整体不同密实状态：松散、稍密实、较密实（重度控制）。
- (2) 不同坡高：50、75、100 cm。
- (3) 上下不同密实程度：下部较密实或稍密实，上部松散。
- (4) 不同切坡坡率：有 1: 0.5 和 1: 1 两种自然初始坡率。
- (5) 松散层内含软弱夹层：一种是平行自然坡，另一种比自然坡陡。
- (6) 不同含水率条件：干燥松散、较高含水率、模拟降雨，研究各单项因素对坡积体边坡稳定性的影响，

模拟降雨条件是在模型材料按边坡设计方案堆放后采用喷雾方式模拟降雨，降雨使模型土体达到或接近饱和后间隔 2~4 h 再进行降雨模拟，观察 24 h 降雨和 48 h 降雨坡体内部的变化。根据小试件和模型材料同状态的饱和和含水率来判断模型材料是否饱和。降雨过程中土体密度增加，土体表面下沉，再填充土体达到原设计高度。

模型试验主要观测松散体的破坏形态以及反分析破坏面强度参数，因此未在模型材料内部埋设位移、压力等传感器，主要记录内容包括模型试验中尾部抬升高度、破坏面后缘距离、破坏面形态以

及模型材料的密度、含水率等参数，通过这些参数结合破坏面形态，可以反分析不同条件下破坏面的强度参数。

限于篇幅，这里仅分析松散体材料不同密实状态、不同含水率及降雨条件下的试验结果。

3 不同密实条件下的试验结果分析

3.1 试验结果

由于坡积物堆积时间的不同以及材料和结构的不同，一般有着不同的密实程度，这里考虑材料松散、稍密实、较密实 3 种状态分析不同的滑坡机制，模型破坏形态如图 3 所示。通过对模型破坏条件进行反分析得到模型材料的强度参数，结果见表 1。

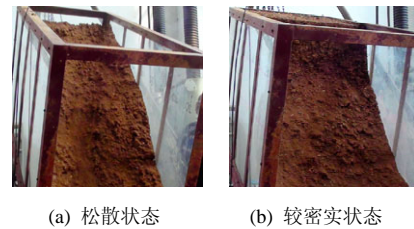


图 3 典型破坏模式

Fig 3 Typical failure of the slope model

表 1 坡体不同密实状态下的试验结果

Table 1 Results of slope model tests with different compactness

状态	参数						滑动面状态
	H/cm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	l/cm	c/kPa	$\phi/(\circ)$	
松散 $W=8.2\%, \gamma=15.46 \text{ kN/m}^3$	60			200			滑后 200 cm 有变形迹象
	80	57	24	100~150	1.2	35	直线型，200 cm 处有变形
	92	44	27	150~200	1.2	35	100 cm 高度处整体下滑
稍密 $W=8.3\%, \gamma=16.4 \text{ kN/m}^3$	70	59	21	100~124	1.3	35	上部 40 cm 较陡，下部 60 cm 为弧形斜面
	80	67	25	124~135	1.3	35	上部 50 cm 较陡，下部 50 cm 较缓
	90	59	27	135~160	1.3	35	上部 38 cm 较陡，62 cm 较缓，200 cm 裂缝出明显
较密实 $W=8.3\%, \gamma=17.3 \text{ kN/m}^3$	111	74	34	100~116	1.6	36	30 cm 较陡，下部不规则弧形
	116	74	35	116~126	1.6	36	滑动后壁有约 40 cm 较陡，中间平缓，最下部 35 cm 也较陡
	121	64	37	126~200	1.7	36	顶面以下 30 cm 整体滑动，中间滑面平缓

注：表中 l 为滑动范围(cm)。

3.2 结果分析

根据模型试验观察的边坡破坏形态以及现场的实际情况，对不同密实状态下的不同抬高度度下的材料进行参数反分析（见表 1），其中材料参数为边坡开始破坏时的反分析结果。

为研究不同密实度下松散体的强度变化，补充进行了含水率为 8.3%，较密实条件下 20 cm×20 cm 中型剪切试验，结果见表 2 和图 4。

表 2 不同密实度条件下松散体强度变化试验结果
Table 2 Shear test results of material under different unit weights

强度	重度/(kN/m ³)				
	15.4	16.4	17.3	18.4	18.8
c/kPa	1.1	1.3	1.6	2.1	2.5
$\phi/(\circ)$	34.5	35.0	36.0	36.5	37.0

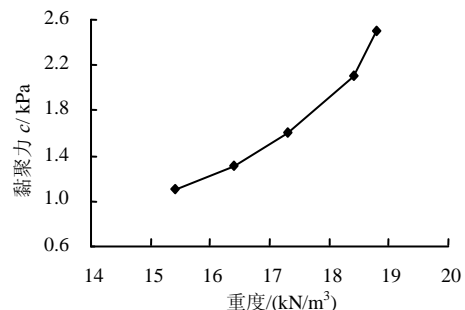


图 4 不同密实条件下松散体黏聚力变化

Fig 4 Cohesions of material under different unit weights

根据模型试验中边坡的破坏形态以及参数反分析的结果可以看出，(1) 模型材料从松散到较密实状态，滑动条件从 $\beta=17.5^\circ$ 变到 34° ，说明砂砾土

的密实状态对模型稳定性起控制作用。现场实际边坡中,有的坡积层在较缓坡条件出现滑坡,例如较松散的白济汛滑坡体。有的坡积层在较陡坡时,仍能保持相对稳定,如 13 标两个隧道出口坡都有密实坡积层,自然坡较陡,仍能保持相对稳定。因此,残坡积体的密实状态是影响边坡稳定性的一个重要因素。(2)从模型材料反分析及模型试验的强度参数 c 、 φ 值看,从松散状到较密实状, c 值明显提高,上升超过 1 倍,这对边坡稳定性影响极其重要。实际上,残坡积体切坡后,稳定性下降,变形范围扩大,坡体强度下降,也主要是影响坡体的 c 值。因此,切坡后尽量保持坡体强度参数 c 值不变是保持边坡稳定性的一个重要方面。(3)模型破坏滑动面在松散状态时,以直线型为主,而在较密实状时,呈现明显的陡坎,反映模型材料的 c 对破坏形态的影响较大。(4)不论是松散或是密实状,自然坡角 β 对模型的破坏起重要控制作用,自然坡上升到一定坡度时,模型出现失稳,此时失稳范围较小。当 β 进一步增加时,滑动范围迅速增加,有的甚至达到模型的最后缘,这说明出现松散坡积体滑坡需要在一定自然坡度的山体中出现。较陡的自然山坡,可能出现较大范围的滑坡,如在维德二级公路 K126~K127 和 K194+300~+800 两处坡积体超过几百万方大滑坡中,自然坡都超过 30° ,局部接近 38° 。滑动面在坡积体内部,没有明显的软化夹层。对于高陡的自然坡,在切坡前自然稳定,但其下滑力较大,未切坡前,抗滑力超过下滑力,一旦在前缘坡脚切坡,坡体中的稳定性平衡被打破,坡体出现变形、软化,潜在巨大的下滑力将带动大片坡体产生滑坡。(5)由表 2 和图 4 可以看出,随着密实度提高,松散体抗剪强度中的黏聚力 c 迅速提高,重度从 15.4 kN/m^3 到 18.8 kN/m^3 时, c 值提高超过 1 倍,而 φ 值仅提高了 10%。

4 含水率提高及模拟降雨条件下的试验结果

4.1 试验结果

试验结果见表 3。在坡积体中,通常降雨软化对边坡稳定性影响极为明显,这里考虑各种因素造成的坡体含水率以及降雨条件下坡体的破坏机制。典型模型破坏形态见图 5。

4.2 试验结果分析

根据模型试验中边坡的破坏形态以及参数反分析的结果可以看出,(1)从含水率稍高的松散状态到密实状态,起始滑动条件明显提高。松散状态时, $\beta=15^\circ$;较密实状态时, $\beta=24^\circ$ 。相比较含水

率较低状态时(见表 1),这一起始破坏条件降低,说明在其他条件同等的情况下随着含水率上升,坡体稳定性下降。在现场实际松散体边坡中,切坡体经雨水影响,强度下降是难以避免的,但尽量减少雨水向深部发展,产生较大的影响。切坡后,坡体稳定性下降,产生变形,这种影响深度显著扩大,可能导致大规模的滑坡,以对坡积体需要考虑切坡后雨水对坡体软化的程度和深度影响,切坡后坡体变形,雨水对坡体影响程度发展,产生较大的影响。坡体整体稳定程度可能出现显著下降,需要对其特别重视。(2)含水率提高后,材料强度参数有所下降(当密度变动不大时)。由表 1 和表 3 比较可以看出,二者的密度变动不大时, c 值从含水率较低时的 1.2 kPa ,含水率从 8.3% 提高至 15.4% 时 c 值下降为 0.8 kPa ,见图 6, c 值有约 $30\% \sim 50\%$ 的下降, φ 值变动不大。而从松散状态到较密实状态时,由表 3 可以看出,随着密实度的提高, c 值也有明显提高,提高约 50% , φ 值变动不大。由此可以看出,坡体特别是潜在滑带附近土体的密实程度对松散边坡稳定性有很大影响,同是坡积体,一个是潜滑带的不定期的变形,一个是相对稳定的正常固结,二者的密实程度也会有极大差别,所以有必要了解坡体上是否有变形迹象,间接了解坡体内潜在滑带的密实程度,推测其强度变化,计算分析判断切坡前后坡体稳定性变化。(3)在了解含水率稍高、不同密实度的破坏条件后,将模型的 β 值都降低至 12° ,在坡面上进行喷雾式模拟降水。经 24 h 后,坡体仍然稳定,此时坡体稳定安全系数在 1.1 至 1.05 附近,坡体表面有约 15 cm 的沉降,坡体的重度从初始的 15.4 kN/m^3 变化到 18.1 kN/m^3 ,密实度的提高表明材料的强度提高。模拟降雨前为低密实状态,依据松散体材料强度 $c=0.8 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=35^\circ$,在 $\beta=12^\circ$ 时,边坡安全系数 $K_1=1.10$,密实度稍高后, c 值有较明显的提高,若不考虑水的软化作用,依据该密实度对应的强度值,此时坡体稳定性安全系数远高于 $K_1=1.10$,可以达到 $1.2 \sim 1.3$ 。由此可见,降雨对坡体强度的影响。将沉降的下沉变形用对应土体回填后,经过约 10 h ,还有沉降,再次回填,此时模型密度为 19.6 kN/m^3 ,经过近 48 h 模拟降雨,坡体内产生 2 道裂缝,分别在 $l=155 \text{ cm}$ 和 $l=170 \text{ cm}$ 处,见图 5,此时坡体已不稳定,假定 $K_2=0.98$,则 c 值降至 0.6 kPa , φ 降至 34° ,显然此时坡体内密实程度增加,在降雨作用下强度明显下降,参照含水率较低时从松散状态(重度为 15.4 kN/m^3)到较密实状态(重度 18.4 kN/m^3) c 值从 1.2 变为 2 kPa 以上(见图 4 和图 8),提高约 $40\% \sim 70\%$,降雨后降

低约 20%，对比可分析判断在经 48 h 强降雨后，充分软化后的 c 值至少从大于 2 kPa 降低到 0.6 kPa，下降超过 70%， φ 值至少从 36° 下降到 34° ，降幅约 7%，见表 2 和图 4。经过 72 h 降雨，坡体下滑明显，产生整体性失稳，形成较快速滑移，这与 K126 和 K194 两处滑动过程基本一致，都是在降雨后一段

时间出现后缘裂缝，持续降雨后出现快速滑移，形成短时堵江，假定此时的安全系数 $K_3=0.95$ ，则 $c=0.5$ kPa， $\varphi=34^\circ$ 。由此可见，降雨对松散坡积体稳定性的影响是非常显著的。模拟降雨过程再现了两处大滑坡体滑动过程，间接地说明模拟降雨条件下土体强度变化过程反映了实际坡体强度变化过程。

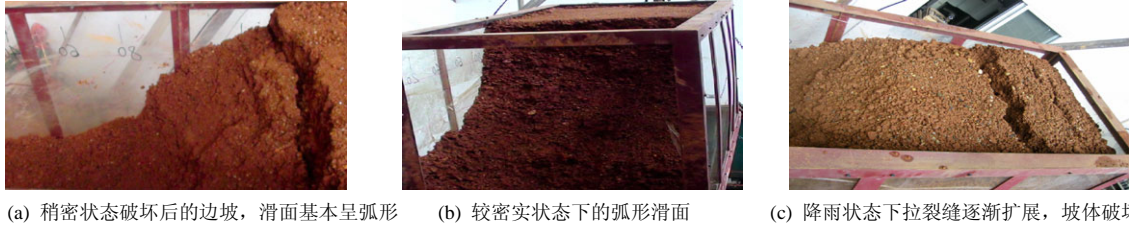


图 5 含水率较高及模拟降雨条件下的模型破坏图
Fig 5 Typical failure of slope model under higher water content and rainfall

表 3 不同密实状态及模拟降雨条件下的试验结果

Table 3 Results of slope model tests with different compactnesses and under rainfall condition

状态	参数						滑动面状态
	H/cm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	l/cm	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	
松散状态 $W=13.1\%, \gamma=15.4 \text{ kN/m}^3$	52	51	15	100~136 (150)	0.8	35	前缘坍塌至 136 cm，后有 20~25 cm 陡坎至 150 cm 处裂缝明显，200 cm 处也产生裂缝显示 c 值在含水率提高后上升 200 cm 处裂缝有 10 cm 最大深度 40 cm 后缘有约 30 cm 陡坎 下部为弧形，近似于直线型 200 cm 处出现滑动破裂面 高出后缘裂缝 5 cm 滑面为圆弧形，上陡下缓 后缘 50 cm 较陡直，下部为弧形 200 cm 处出现裂缝，深度近 67 cm，宽度 2~4 cm 200 cm 处裂缝宽度扩大至 12 cm，滑动速度加快 1 666 cm 前缘滑移更快 整体下滑，坡顶下 45 cm 整体滑出，下部近直线 经过 48h 模拟降雨后出现两道裂缝，分别在 155 cm 和 170 cm 处，最后缘 200 cm 处也有明显裂缝
	87	57	26	136~150 (200)	0.8	35	
稍密实状态 $W=13.2\%, \gamma=16.4 \text{ kN/m}^3$	65	57	19	100~140	1.1	35	
	109	60	35	140~200	1.6	35	
较密实状态 $W=13.2\%, \gamma=17.3 \text{ kN/m}^3$	80	71	24	80~103	1.5	35	
	95	59	28	93~166	1.5	35	
模拟降雨状态	107	59	32	103~200	10.5	35	
	40	44	12	100~150~170			

注：模拟降雨状态时，经 48 h 模拟降雨后，破顶面经过两次下沉变形，再回填至 100 cm 高，即从开始的松散状态经降雨润滑，土体密实度从 15.4 kN/m^3 变化到 19.55 kN/m^3 ，初始含水率为 17.4%，饱和含水率为 21.3%。强度参数 (c_1, φ_1) 对应模拟降雨的初始状态；强度参数 (c_2, φ_2) 对应模拟降雨 48 h 后出现裂缝阶段；强度参数 (c_3, φ_3) 对应模拟降雨 72 h 后较快速滑移状态。通过喷雾式洒水模拟降雨，需让模型材料饱和，近饱和状态停止降雨 4~10 h 后观察变形，稳定后再继续模拟降雨。

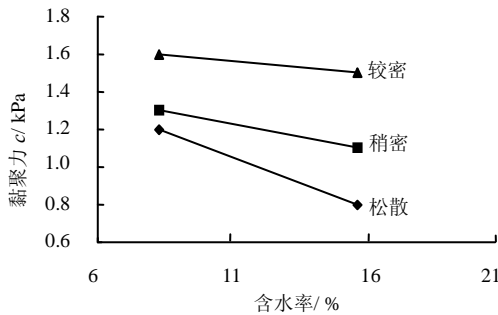


图 6 不同含水率下材料的黏聚力变化
Fig 6 Cohesions of material under different water contents

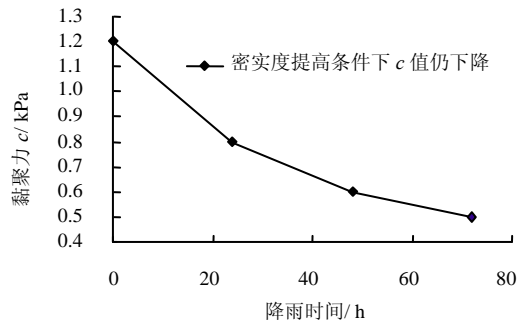


图 7 不同降雨历时下材料的黏聚力变化
Fig 7 Cohesions of material under different rainfall durations

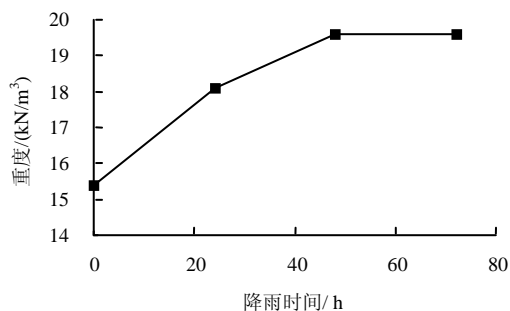


图8 不同降雨历时下材料的密实度变化

Fig 8 Unit weights of material under different rainfall durations

5 结 论

(1) 坡积松散体边坡模型试验不能简单地采用原位坡积松散体材料, 根据边坡稳定性系数的定义, 缩小的模型试验需要相应地缩小原材料的 c 值, ϕ 值保持不变, 通过一系列的改造材料, 使其模型材料与坡积松散体的 c 、 ϕ 强度比相似, 一系列的模型破坏条件真实再现了现场坡积松散体的滑坡条件。

(2) 坡积体从松散状态变化到较密实状态时, 坡体材料强度有明显提高, c 值提高约 30%, ϕ 值提高约 6%~14%, 开始破坏的自然坡角提高 42%~100%, 表明随着密实状态提高, 坡体强度提高, 相应的边坡稳定性提高, 起始滑动的自然坡角也显著提高。

(3) 模拟降雨软化时, 模型材料接近饱和状态时, c 值下降 42%~75%, ϕ 值提高约 6.3%~10%, 坡体从降雨前的稳定状态逐渐过渡到变形软化发展阶段, 再逐渐变化到整体失稳状态, 雨水下渗软化是坡积松散体产生滑动的最根本、最直接的因素。

参 考 文 献

[12] 肖汉忠. 公路沿线松散体滑坡发育机理探讨[J]. 重庆交通学院学报, 1996, 15(4): 127-130.
XIAO Han-zhong. Mechanism approaches on loose media landslide developing along highway[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 1996, 15(4): 127-130.

[13] 董倩, 朱正伟, 刘东燕. 崩塌堆积体的渐性破坏及稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(3): 358-364.
DONG Qian, ZHU Zheng-wei, LIU Dong-yan. The progressive failure and stability analysis for avalanche deposit slope[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture*

& *Technology(Natural Science Edition)*, 2010, 42(3): 358-364.

[14] 王唤龙, 孙毅, 周德培, 等. 红层堆积体高边坡坡体结构及变形规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 2887-2894.

WANG Huan-long, SUN Yi, ZHOU De-pei, et al. Slope structure and excavation deformation regularity of high slope composed with red bed accumulation body[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 2887-2894.

[15] 晏鄂川, 王晋. 浅析山区高等级公路中的边坡工程岩体[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2001, 26(4): 347-351.

YAN E-chuan, YANG Jin. Study on slope engineering rock mass of highway in mountainous area[J]. *Earth Science, Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(4): 347-351.

[16] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[17] 张存根, 张怀静. 粉质黏土含水率与抗剪强度参数关系的试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2): 27-29.

ZHANG Cun-gen, ZHANG Huai-jing. Experiment study on the relationship between water content and shear strength parameters of silty clay[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2011, 8(2): 27-29.

[18] 边加敏, 王保田. 含水率对非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(11): 124-125.

[19] 汤新福, 赵云刚. 含水率对压实黏土抗剪强度的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(3): 49-53.

TANG Xin-fu, ZHAO Yun-gang. Effects of moisture content on the shear strength of a compacted clay[J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2009, 37(3): 49-53.

[20] 盛维高, 李国维, 袁俊平. 基于含水率变化对土体强度影响的高边坡稳定分析[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 12-15.

SHENG Wei-gao, LI Guo-wei, YUAN Jun-ping. Stability analysis of high slopes based on the influence of water content change on soil strength[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(1): 12-15.

(2) 对于相同地层不同测点而言, 不同测试时间内的垂直位移沉降速率不同, 前期沉降速率达, 后期沉降速率低; 对于不同地层相同测点而言, 不同测试时间内的垂直位移沉降速率也不相同, 距地表较浅地层的沉降速率大于较深地层的沉降速率。两条隧道的沉降曲线类似 2 个单线的叠加, 沉降槽曲线变宽加深。先行隧道地表沉降槽曲线呈典型的正态分布, 宽度和深度较小, 后行隧道地表沉降槽明显不对称, 先行隧道一侧沉降较大, 是由于先行隧道施工对地层产生扰动, 引起地层软化所致, 两隧道之间地表沉降明显叠加, 沉降较大。左右平行布置的两隧道盾构同向不同时开挖, 两隧道轴线之间水平位移很小, 在两洞轴线上水平位移随深度近似成线性递减, 而对称轴线上的水平位移不再为 0。2#、5#水平线的地层出现较明显的剪切层, 如果在此区域有桩基、剪力墙等结构物, 那么在隧道开挖时将受到附加剪切作用, 最容易出现裂缝, 在施工中应做好切实的防护措施。

参 考 文 献

- [1] 朱合华, 徐前卫, 傅德明, 等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1437—1441.
ZHU He-hua, XU Qian-wei, FU De-ming, et al. Study on design principle of shield machine applicable to different strata[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1437—1441.
- [2] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [3] 林韵梅. 实验岩石力学模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [4] 康建荣, 王金庄. 相似材料模拟试验经纬仪观测方法分析[J]. 矿山测量, 1999, 27(1): 43—46.
KANG Jian-rong, WANG Jin-zhuang. Theodolite observation of displacement of similarity material in simulation test method and analysis[J]. **Mine Surveying**, 1999, 27(1): 43—46.
- [5] 汪恩清, 丁世敬. 土应力传感器动态匹配误差理论研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 78—83.
WANG En-qing, DING Shi-jing. The investigation for dynamic matching error in the registration of soil pressure cells[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 78—83.
- [6] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [7] 孙广忠. 岩体力学的进展——岩体结构力学[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(2): 112—116.
SUN Guang-zhong. Advance in rockmass mechanics——Rockmass structural mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1991, 10(2): 112—116.
- [8] 蒋建平, 章杨松, 阎长虹, 等. 地下工程中岩移的断层效应探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1257—1262.
JIANG Jian-ping, ZHANG Yang-song, YAN Chang-hong, et al. Study on strata displacement under fault effect in underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1257—1262.
- [21] 陈海明, 班凤其, 刘小伟. 非饱和土抗剪强度指标 c 、 φ 值与含水率 w 的关系[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2006, 29(6): 736—738, 746.
CHEN Hai-ming, BAN Feng-qi, LIU Xiao-wei. Relationship between water content ω and unsaturated soil shear strength indices c and φ [J]. **Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)**, 2006, 29(6): 736—738, 746.
- [22] 胡展飞, 傅艳蓉. 基于不同初始含水率的软黏土抗剪强度的试验研究[J]. 上海地质, 2001, 77(1): 38—42.
HU Zhan-fei, FU Yan-rong. Experimental study of the shear strength of soft soil with different initial water content[J]. **Shanghai Geology**, 2001, 77(1): 38—42.

上接第 126 页