

通信作者:董小波(1986-),男,安徽安庆人,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程勘察设计工作.E-mail:253241906@qq.com

表1 第三系泥灰岩矿物化学成分测试成果统计表

矿物、化学成分	组数	最大值	最小值	平均值	方差
石英	6	34	20	28	5.47
方解石	6	19	13	16	2.34
白云石	6	3	2	3	0.55
钠长石	6	7	4	5	1.22
正长石	3	9	5	6	2.31
伊利石	6	17	8	13	3.83
高岭土	6	15	9	12	2.61
蒙脱石	6	20	13	17	2.70
绿泥石	-	-	-	-	-
斜绿泥石	-	-	-	-	-
其它	6	6	5	6	0.41
SiO ₂	6	55.19	46.52	50.08	3.59
Al ₂ O ₃	6	15.34	13.20	14.22	0.77
Fe ₂ O ₃	6	6.19	5.46	5.83	0.26
CaO	6	11.26	8.05	9.93	1.40
MgO	6	2.70	1.87	2.32	0.35
SO ₃ T	6	0.98	0.08	0.37	0.40
K ₂ O	6	2.26	1.73	1.99	0.21
Na ₂ O	6	0.84	0.43	0.53	0.16
P ₂ O ₅	6	0.24	0.22	0.23	0.01
TiO ₂	6	0.74	0.67	0.70	0.02
PF	6	15.12	12.35	13.81	1.10
CaCO ₃	6	19.4	15.2	17.3	2.04

测试结果表明, 第三系泥灰岩以石英、方解石及黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石)成分组成, 成分及组成较为均匀, 受地域影响不大。黏土矿物成分含量一般在 34% ~ 42% 之间, 以蒙脱石、伊利石、高岭石为主。根据碳酸盐含量测定试验和分类标准, 泥灰岩内部 CaCO₃ 含量平均在 17% 左右, 为低泥灰质岩类。

2 第三系泥灰岩物理性质指标

汇总阿尔及利亚东西高速、贝贾亚连接线高速公路及南北高速公路等三条公路第三系泥灰岩样品, 共计 256 组, 统计黏粒含量、界限含水量、土壤密度(干、湿)和天然孔隙比指标见表 2 所列。

表2 第三系泥灰岩的物理性质指标统计

项目	统计值				
	组数	最小值	最大值	平均值	均方差
黏粒含量	256	4.2	64.5	30.3	15.1
$P < 0.002\text{mm}/\%$	256	4.2	64.5	30.3	15.1
含水量 $W/\%$	256	9.0	33.4	18.3	4.0
液限 $w_L/\%$	256	24.8	65.0	43.8	9.7
塑限 $w_p/\%$	256	11.6	31.8	20.6	3.8
塑性指数 I_p	256	8.9	39.3	23.2	7.0
稠度 I_c	256	0.82	1.77	1.14	0.17
活动度 A_c	256	0.39	3.9	0.95	0.53
天然密度 $\rho_h/(g/cm^3)$	256	1.83	2.25	2.06	0.09
干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	256	1.54	2.00	1.75	0.12
孔隙比 e	256	0.350	0.884	0.579	0.114

* 注: 液限含水量是按法标 NF P94-052-1 测定, 指 80 g 锥贯入 17 mm 时的含水量

表2 显示, 第三系泥灰岩平均黏粒含量达 30.3%。这一结果与泥灰岩矿物成分中含大量的蒙脱石、伊利石及高岭石等高分散性矿物成分有关。同时泥灰岩液限 w_L 平均值达到 43.8%, 具有高液限性, 塑性指数 I_p 平均值达 23.2%, 其天然密度及液限塑指标与上覆第四系松散土类相近, 因此有着类似第四系松散土的工程物理性质。

通过将塑性指数指标在液塑性曲线图(图2)里做成的散点图(其中 A 线 $I_p = 0.73 \times (w_L - 20)$, 当 $w_L \leq 30\%$ 时 $I_p = 7.3\%$), 结果显示几乎所有点都位于 A 线之上, 第三系泥灰岩按土属性分类为粘土类。

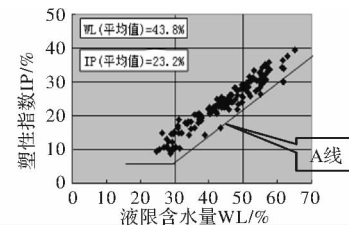


图2 泥灰岩塑性图

图3 通过将液限含水量与黏粒含量进行相关分析, 得出其相关关系式: $w_L = 0.5214P_{0.002} + 27.603$, $R^2 = 0.6931$, 从图3中可以看出泥灰岩中黏粒含量越多, 其液限含水量相应呈线性增加。图4 将泥灰岩含水量与干密度进行相关分析, 得出关系式: $\rho_d = -0.0274w + 2.242$, $R^2 = 0.7316$, 干密度随含水量变化呈负相关性。

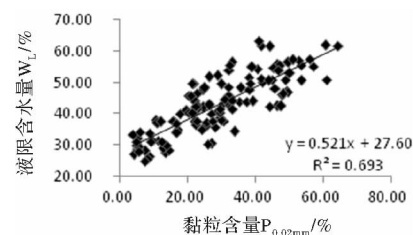


图3 液限含水量与黏粒含量关系曲线

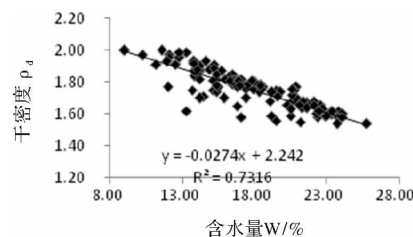


图4 含水量与干密度关系

3 第三系泥灰岩水理性

3.1 膨胀性

泥灰岩膨胀性主要表现在其具有吸水膨胀、

失水后收缩的特性, 该性质与其含有的膨胀性黏土矿物有关, 主要是蒙脱石含量有关。根据表2 泥灰岩矿物成分表, 其蒙脱石含量均值达到了约17%, 具较强膨胀性能。

3.1.1 膨胀性指标

在阿尔及利亚地区, 根据法国规范, 首先是参照 Van Der Merwe 膨胀潜势图5(1964 年)。根据各类土中小于0.002 mm 的颗粒含量及 I_p (塑性指数)值, 用来判定膨胀土的膨胀潜势^[6]。

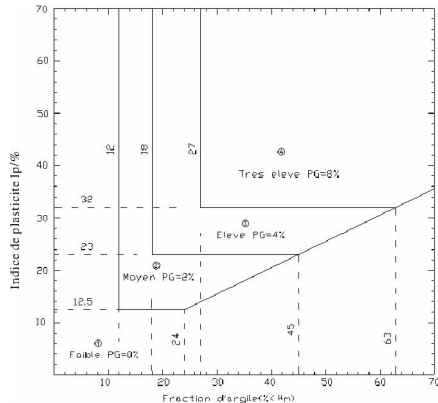


图5 膨胀潜势图

注：纵坐标为塑性指数(一般用 I_p 表示)，横坐标为小于0.002 mm 的粘粒含量

对于判定具有膨胀潜势岩土体根据法国标准 NF P94 -091 进行膨胀力试验, 主要采用 $\delta_{ep} - P$ 曲线法, 即在不同垂直荷载作用下浸水, 测定相应的膨胀率 δ_{ep} 来绘制曲线, 其曲线与 P 轴的交点为所求膨胀力 σ_g 。结果按照膨胀力 σ_g 的指标(表3) 对膨胀土进行膨胀分级。

表3 膨胀分级(膨胀力指标) /kPa

σ_g /kPa	膨胀类型
<50	弱(faible)
(50) * 150 ~ 250	中(moyen)
250 ~ 500	强(fort)
> (500) * 1000	极强(tres fort)

注：* 原标准分级不连续, 为便于实际操作而进行的修改, 括号内的数字为调整后的分级标准。

取19 组第三系泥灰岩样品进行膨胀力试验, 试验成果统计见表4 所列。测试成果表明第三系泥灰岩平均膨胀力达156 kPa, 具中等膨胀潜势, 局部具弱——强膨胀潜势。同时, 统计泥灰岩膨胀力指标有较大离散性, 表明泥灰岩的膨胀潜势在空间分布上的随机性教大, 局部相同地层相邻地点的膨胀潜势差异很大, 同一地点不同深度的膨胀潜势差异亦较大, 这一结果反映了第三系泥灰岩的膨胀潜势在水平方向和垂直方向上的不均匀性。

表4 泥灰岩的膨胀试验成果统计表

项目	特征值				
	组数	最小值	最大值	平均值	均方差
膨胀比 R_g (10^{-2})	27	0.36	5.04	2.08	1.07
膨胀力 δ_g /kPa	27	24	550	156.1	121.21

3.1.2 膨胀性指标与物理指标相关性

根据泥灰岩膨胀力试验及相关物理指标成果, 对比分析液限、塑性指数、黏粒含量指标等对膨胀力的影响分析, 其相关性见图6~图8 所示。

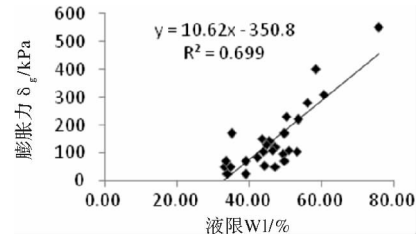


图6 膨胀力与液限含水量关系图

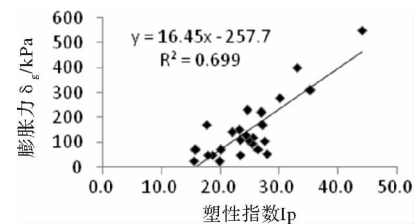


图7 膨胀力与塑性指数关系图

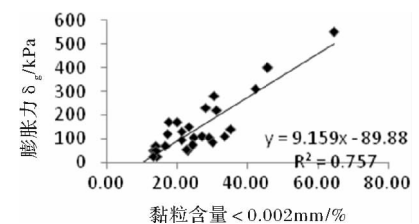


图8 膨胀力与黏粒含量关系图

图6 显示膨胀力与液限含水量具近似线性关系式： $\delta_g = 10.625W_L - 350.82$ ，相关性系数 $R^2 = 0.6991$ ，膨胀力随液限含水量的增加而增大。图7 显示膨胀力与塑性指数具近似线性关系式： $\delta_g = 16.453W_L - 257.74$ ，相关性系数 $R^2 = 0.6998$ ，膨胀力随塑性指数的增加而增大。图8 显示膨胀力与黏粒含量具近似线性关系式： $\delta_g = 9.159P_{0.002} + 89.882$ 相关性系数 $R^2 = 0.7572$ ，膨胀力随黏粒含量增加而增大。图6~8 表明, 泥灰岩风化层的膨胀性能与其物理亲水性指标具有很强的相关性, 亲水性指标越高, 其膨胀力就越大。

3.2 泥灰岩崩解性

3.2.1 野外崩解试验

将第三系泥灰岩新鲜岩样放置于室外观察其宏观崩解过程如图9 所示。新鲜矿物放置在野外其

表面有几条风化裂隙;在野外放置 7 d 后,风化裂隙面增加,裂隙加深,野外放置 18 d 后,岩体部分沿裂隙面崩解散开,部分受氧化作用崩解成此生黏土矿物。野外放置 32 d 后,岩块完全崩解成更小的约 1 cm 的近球状的颗粒,并风化成土状。其风化过程表明其具有膨胀岩湿胀干缩的特性,泥灰岩在野外失水干燥,并且吸湿压力增大,产生大量的裂隙,岩体龟裂。

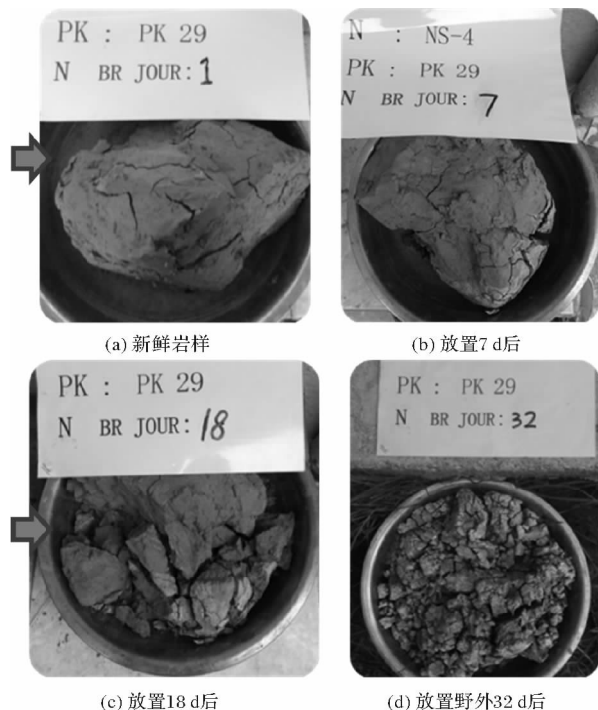


图9 泥灰岩野外崩解过程图

3.2.2 室内崩解试验

依据法标(NF P11-300)选取3组泥灰岩试验样品进行崩解试验,将测试岩样经历4次干湿循环后的崩解物采用10 mm筛进行筛分,以筛通过率的变化来衡量崩解物级配的变化,以降解系数 DG 值为衡量标准。泥灰岩遇水在短时间内就急速崩解成泥状,其降解系数 DG 值平均值达 165,具极强降解性。

4 第三系泥灰岩力学性能指标统计分析

4.1 泥灰岩力学性能指标统计

对第三系泥灰岩 78 件试样的天然抗压强度、剪切、饱和固结剪切试验成果进行统计,结果见表 5 所列。

根据表 5,对比全、强风化第三系泥灰岩两种试验方法测定其抗剪强度值,结果表明土体在经饱和后固结作用下,其剪切强度指标发生了较明显的降低。中风化泥灰岩的天然抗压强度指标平均值为 2.42 MPa,天然抗剪强度指标表明其第三系泥灰岩属于极软岩类。

4.2 泥灰岩力学性能相关性分析

对泥灰岩天然抗压强度、内摩擦角分别与含水率及干密度间采用散点图进行回归分析,除粘聚力相关性较为离散外,抗压强度与内摩擦角均体现了极强相关性,总体而言泥灰岩工程力学性质受含水率、干密度影响较大。

图 10 显示, $R_c = 2.18\rho_d - 1.5374$, 相关性系数 $R^2 = 0.8504$ 。抗压强度随干密度增加而增大,两者呈近似线性关系。图 11 显示, $R_c = -1.059\ln(w) + 5.2922$, 相关性系数 $R^2 = 0.6929$ 。抗压强度随含水率的增加而减小,当含水率达到一定界限后抗压强度趋于稳定,两者呈近似对数关系。图 12 显示, $\varphi = -19.045(\rho_d)^2 + 96.056\rho_d - 85.56$, 相关性系数 $R^2 = 0.6178$ 。内摩擦角随干密度增加而增大,增加幅度逐渐减小,两者呈近似多项式关系。图 13 显示, $\varphi = -0.089w^2 + 1.8125w + 28.083$, 相关性系数 $R^2 = 0.842$ 。内摩擦角随着含水率的增加而减小,当含水率较小时,其内摩擦角变化幅度不明显,但当含水率在 15%~30% 区间其曲线近似直线下降,是内摩擦角急剧降低的过程。

表5 泥灰岩力学试验指标

项目			特征值				
			组数	最大值	最小值	平均值	均方差
全、强风化泥灰岩	不固结不排水剪切	C/kPa	78	74	12	42.3	13.4
		$\Phi/(\text{ }^{\circ})$	78	30.5	12.3	22.5	4.35
	饱和固结排水剪切	C'/kPa	78	56	2	16.8	12.2
		$\Phi' /(\text{ }^{\circ})$	78	38.7	11.5	27.3	7.49
中风化泥灰岩	干密度	$\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	55	2.39	1.48	2.00	0.29
	含水率	$W/\%$	55	29.5	3.5	15.22	6.90
	天然抗压强度	R_c/MPa	55	4.14	1.42	2.42	0.58
	天然抗剪强度	$C(\text{MPa})$	30	1.6	0.02	0.14	0.30
		$\Phi(\text{ }^{\circ})$	30	42.7	9.0	23.83	8.62

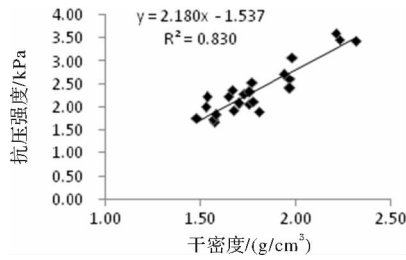


图 10 抗压强度与干密度关系曲线

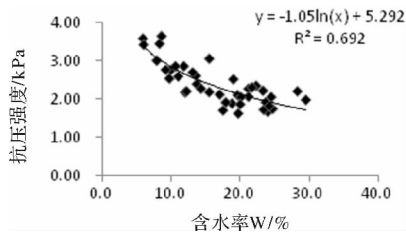


图 11 抗压强度与含水率关系曲线

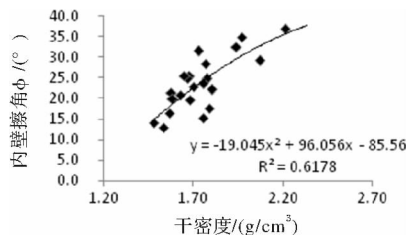


图 12 干密度与内壁摩擦角关系曲线

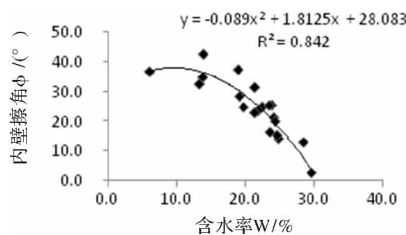


图 13 含水率与内壁摩擦角关系曲线

4.3 含水量对抗剪强度的影响

选取阿尔及利亚第三系泥灰岩试验样品, 采用人工重塑样, 控制试样的干密度及含水量, 进行不同含水量条件下的直剪试验, 分析含水量与泥灰岩粘聚力及内摩擦角之间的关系, 试验结果见图 14 ~ 图 15 所示。图 14 可知, 泥灰岩的粘聚力随含水量的增加而降低, 其关系曲线呈对数关系。在含水量较低时, 含水量对粘聚力影响较大, 即在低区间含水量的变化对粘聚力的影响较为敏感, 在含水量接近液限值时, 其粘聚力接近于零。图 15 可知, 泥灰岩内摩擦角与含水量变化关系曲线为幂函数关系, 初始原样其含水量为 13.0%, 内摩擦角为 35.0°, 随着含水量的增加, 内摩擦角急剧变化, 在含水量在 32% 时, 其粘聚力降至 3.5°, 随后含水量增加其粘聚力趋于稳定。

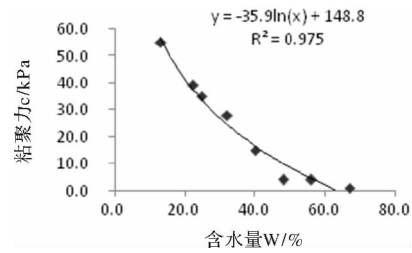


图 14 粘聚力随含水量关系曲线

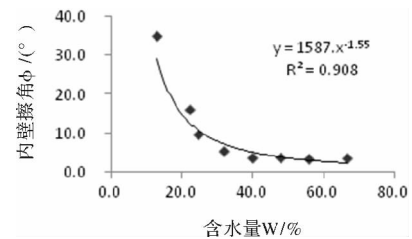


图 15 内摩擦角随含水量关系曲线

5 第三系泥灰岩公路边坡破坏机理分析

阿尔及利亚穿越第三系泥灰岩地区公路工程, 由于膨胀性泥灰岩遇水强度急剧降低影响, 及当地不接受我国预加固的边坡治理理念, 工程建设中引发公路边坡产生大面积失稳, 形成大量滑坡灾害 (图 16), 第三系泥灰岩边坡失稳率高达 50%。

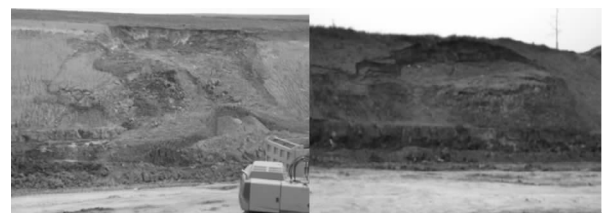


图 16 阿尔及利亚泥灰岩边坡失稳

泥灰岩边坡的失稳是不良岩性、构造作用、地下水作用和人类工程活动等诸多因素共同作用下的结果, 但最根本的原因是当地第三系泥灰岩的工程性质及其水理性特征所决定的。

首先, 由于泥灰岩具有崩解、裂解的特性, 根据现场调查, 阿尔及利亚北部地中海沿岸地区夏季高温雨少, 岩体高温失水, 大面积发生开裂, 最大开裂深度可达 8 m, 而到雨季时, 集中、持续、强度虽然不大的降雨, 快速抬高了坡体地下水位, 致使上部岩土体饱和, 重度增加, 同时顺着裂缝和节理裂隙面下渗、软化岩体, 降低了抗剪强度, 并且在裂缝位置形成静水压力, 增大了软弱带的孔隙压力, 导致坡体容易变形滑动。

其次,第三系泥灰岩层相对隔水,其渗透系数为 $2 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-8}$ cm/s,同时泥灰岩具有很强的吸水性能,在雨季持续降雨条件下,边坡坡体长期处于近饱和状态,泥灰岩饱水后抗剪强度急剧降低,试验结果显示饱水泥灰岩内摩擦角降至 $3^\circ \sim 8^\circ$ 区间,远远小于自然坡角,造成边坡容易发生变形滑动。

6 泥灰岩公路边坡防治措施建议

依据法国标准,当地泥灰岩边坡防治一般采用“缓边坡、宽平台、表面封水、渗沟导水”的原则,其监理也要求我们按照法标进行设计施工,但是在建设中依然发生了大量工程滑坡事故,我们在分析了阿尔及利亚第三系泥灰岩的工程性质、水理性及力学相关性后,认为法标中虽然也考虑了泥灰岩力学性质随含水量增加而降低的性质,同时采取了坡面封水的办法,但是没有考虑到地下水在泥灰岩层中富集的影响,而且泥灰岩的膨胀力也是影响岩层变形破坏的主要因素,该方法治标不治本。因此,在分析泥灰岩特性及破坏机理,结合已实施公路工程泥灰岩边坡的变形特点,提出边坡截排水和挡墙工程相结合的综合防治措施建议。首先应尽量减少开挖面,采用挡墙进行支护,其次应采用截排水措施有效降低坡体地下水位,防止泥灰岩岩体软化。另外应避免在雨季施工,同时坡体开挖后应及时防护,避免泥灰岩暴露在外,造成风化崩解。建议具体工程措施如下。

(1) 截排水工程

截排水工程主要包括边坡渗沟、坡体排水盲沟、排水沟和路基边沟等,需要组成有效统一的网状排水系统,共同发挥作用。排水盲沟应根据泥灰岩的渗透性布设,间隔 $20 \sim 40$ m为宜。排水盲沟的布置深度视大气影响深度而定,一般埋入潮湿带以下地层内或地下水位以下。

(2) 挡墙工程

为建设坡体开挖面,收缩边坡坡脚,需要设置挡墙工程进行防护,必要时采用多级挡墙或小

直径抗滑桩进行支护,设计中应考虑泥灰岩参数的长期效应。

7 结论

(1) 统计分析阿尔及利亚第三系泥灰岩的矿物组成、物理性质及其相关性,表明泥灰岩黏土矿物(蒙脱石)含量高,具有高液限、高塑性指数的特征。

(2) 通过在欧标体系下的膨胀性及崩解性试验,表明阿尔及利亚地区第三系泥灰岩具有强膨胀性,且风化、崩解性能极强,膨胀力大小与液限含水量、塑性指数及黏粒含量具有线性正相关性。

(3) 分析不同含水量条件下泥灰岩的力学性能的变化,表明泥灰岩抗压及抗剪强度值随含水量的增加均呈现出显著的降低。内摩擦角随干密度增加而增大,增加幅度逐渐减小。通过重塑相同干密度情况下,不同含水量条件下直剪试验,结果表明其粘聚力、内摩擦角与含水量呈对数相关性,

(4) 通过第三系泥灰岩的物理力学性质相关性分析、及泥灰岩边坡的破坏机理分析,提出截排水措施与挡墙相结合的边坡综合治理措施建议。

参考文献:

- [1] 韩信. 中欧(法)岩土工程标准规范体系差异研究[J]. 铁道工程学报, 2011(11): 117-121.
- [2] 岳永利, 丁小军, 王佐, 等. 阿尔及利亚东西高速公路(中、西标段)泥灰岩分布及工程性能[J]. 公路, 2008(9): 80-85.
- [3] 刘运平, 岳永利, 张敏静. 阿尔及利亚东西高速公路工程地质勘察的特点[J]. 公路, 2008(9): 275-278.
- [4] 李德林, 吴臻林, 拜亚男. 膨胀性泥灰岩边坡病害的防治[J]. 公路, 2008(9): 123-126.
- [5] 陈元元. 阿尔及利亚东西高速公路路基病害的特征及处治对策[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 14-17.
- [6] 王勤, 刘汉启. 欧洲规范中的土体分类及土体膨胀性的判别方法[J]. 公路, 2008(9): 279-282.

Engineering Geological Performance of Tertiary Marlite and Impact on Slope Hazard

XU Huaxiang, YOU Dingjian and TIAN Xueyun
(CRCC International Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: The Tertiary marlite in the northern Mediterranean coastal areas of Algeria are widely distributed, and belongs to the very soft rock formation. The joint fissure is very developed and the weathering is strong. The rock body is rapidly expanding and softening after water, and it is easy to disintegrate after water loss, which could cause landslide, collapse and other geological disasters in highway slope construction. Relying on Chinese enterprises in Algeria to build a number of highway projects, we carry out the mineral composition of limestone, physical and mechanical properties, swelling and disintegration test study, analysis of the weathering of limestone, water features and their relevance. Further analysis is made on the failure mechanism of the third series marl highway slope engineering, and the technical measures for the protection of highway slope are put forward.

Key words: marlite; expansibility; water reason; disintegration; highway slope engineering; destruction machine