

文章编号:1671-1637(2014)03-0015-09

## 风化岩路基填料路用性能试验与风化程度评价

郭寅川, 申爱琴, 高 韬, 李炜光

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**选取了4种代表性风化岩,分析了其级配组成、击实参数与破碎特性,研究了风化岩路基长期稳定性的影响因素。开发了能够模拟路基填料自然风化的水温循环试验方法,研究了风化程度对风化岩填料加州承载比和水温敏感性的影响与水温循环效应对风化岩性质的影响。采用物理风化与化学风化相结合的评价方法,提出以风化特征指数作为风化程度的评价指标,分析了风化特征指数与各项路用性能的相关性,并建立了基于各项路用性能的风化程度分级标准。分析结果表明:随着风化程度的加大,风化岩力学性能与水温敏感性降低;应用水温循环模拟试验能够判别风化岩的长期路用性能;风化特征指数与风化岩路用性能决定系数大于0.85,相关性良好,可用来判定风化岩的风化程度与路用性能;选用风化特征指数为0.78的风化岩铺筑试验路,经18个月观测的路基最大沉降为7.8 cm,路用性能良好。

**关键词:**路基工程;路基填料;风化岩;风化程度;风化特征指数;评价指标;分级标准

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## Assessment of weathering degree and road performance test of weathered rock as subgrade filling

GUO Yin-chuan, SHEN Ai-qin, GAO Tao, LI Wei-guang

(Key Laboratory for Special Region Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Four kinds of typical weathered rocks were selected. Their gradation compositions, compaction parameters and fragmentation properties were analyzed. The affecting factors of long-term stability of weathered rock were researched. Water-temperature cycle test method was developed to simulate the natural weathering of subgrade filling. The influence of weathering degree on CBR (California bearing ratio) and water-temperature sensitivity and the influence of water-temperature cycle effect on the properties of weathered rock were researched. Combining physical and chemical weathering evaluation methods, weathering characteristic index was proposed to evaluate the weathering degree. The correlations between weathering characteristic index and road performances of weathered rock were analyzed. The grading standard of the weathering degrees based on the road performances was established. Analysis result shows that when the weathering degree increases, the mechanics performances and water-temperature sensitivity of weathered rock reduce. The long-term road performances of weathered rock can be distinguished by using water-temperature cycle test method. The determination coefficients between weathering characteristic index and road performances are greater than 0.85, so their

收稿日期:2014-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51278059)

作者简介:郭寅川(1983-),男,江西九江人,长安大学讲师,工学博士,从事道路材料研究。

correlations are good, and the index is available to judge the weathering degree and road performances of weathered rock. When the weathering characteristic index is 0.78, after 18 months, the maximum settlement of test road with weathered rock subgrade is 7.8 cm, so its road performances are well. 7 tabs, 24 figs, 16 refs.

**Key words:** subgrade engineering; subgrade filling; weathered rock; weathering degree; weathering characteristic index; evaluation index; grading standard

**Author resume:** GUO Yin-chuan(1983-), male, lecturer, PhD, +86-29-86199259, silver007007@163.com.

## 0 引 言

随着中国高速公路的主战场由平原逐渐转向山区,公路构造物增多,对路基填料的需求量加大,而山区风化岩居多,优质路基填料匮乏,因此,就地取材,科学评价与合理利用风化岩来填筑路基已成为山区高速公路建设的关键技术之一。对于填石与填土路基,国内外已有大量的研究成果,现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)<sup>[1]</sup>中也提出了具体要求。但风化岩与普通填石、填土路基填料不同,具有强度低、抗风化能力差、遇水易膨胀和承载能力明显下降等特点,压实特性、破碎特性与长期稳定性的差异显著<sup>[2-4]</sup>。如何科学合理地评价风化岩风化程度,建立风化程度与路用性能的相关性,对于指导风化岩填筑路基与保障路基稳定具有重要的现实意义。

风化岩用于路基填筑,必须满足路用性能的要求,包括颗粒组成、强度、变形、水稳性及耐久性。国内外学者就风化岩材料本身的性能进行了研究,赵建军等研究了全风化花岗岩的力学性能,认为风化岩微结构的特点决定了材料的强度特点<sup>[5]</sup>;Song等研究了风化岩在隧道中的变形与破坏规律<sup>[6]</sup>;Li等研究了风化岩在路基中的压实变形规律,探讨了含水量与压实度的关系<sup>[7]</sup>;郑民新等研究了大量软质千枚状板岩和泥质粉砂岩,在分析风化软岩基本矿物成分、耐崩解性的基础上,结合风化软岩力学强度和击实试验结果,研究了风化软岩填筑路基的可行性,提出了软岩填筑路基可行性的初步判定方法<sup>[8]</sup>。关于风化岩风化程度的评价主要有矿物学法和岩石化学法,即分别依据风化岩中石英与斜长石等几种粘土矿物含量比和各种氧化物含量比评价风化程度。物理学法依据岩土的颜色、地震波及声波速率、标准贯入量与点荷载。斜长石溶蚀度法和熟化度法分别依据风化岩中斜长石风化过程中孔隙发育程度和岩石次生蚀变程度<sup>[9-13]</sup>。关于风化岩分级,Heidari等利用残余强度与孔隙率等物理力学参

数,将风化岩分为5个风化等级<sup>[14]</sup>;Che等通过分析风化岩的元素组成提出风化指数对风化岩进行分级<sup>[15]</sup>;李日运等分析了风化岩显微裂隙的发育状况及其次生充填特点,建立了岩石风化程度划分的判据<sup>[16]</sup>。

分析上述研究成果可知,风化岩风化程度评价的物理方法与化学方法都主要出自岩土工程领域或水利部门,多是从岩石色泽、结构破坏程度、掘进难度、微裂隙发育等方面进行定性划分,并无针对路用性能的相关量化指标,在公路工程领域的相关研究非常少。现有的风化程度评价方法尚未考虑公路路基工程特有的工作状态和自然环境,更未能将风化岩填料的风化程度评价与路用性能建立联系,致使工程界选择风化岩作为路基填料时存在很大的盲目性。本文将依托商界高速公路,选取沿线代表性风化岩类,根据公路路基的工作性状,开发能够模拟路基填料自然风化的水温循环试验方法,通过模拟试验,测试与分析风化程度对填料力学性能和水温稳定性的影响,进而探索风化岩长期路用性能随风化程度的变化规律。采用物理风化与化学风化相结合的评价方法,提出以风化特征指数作为风化程度的评价指标,分析该指标与路用性能的相关性,建立基于路基路用性能和工程特性的风化岩填料评价指标及分级标准,用以指导商界高速公路风化岩路基填料的评价及选择。

## 1 风化岩路基填料性能试验

### 1.1 代表性风化岩选取

通过考察商界高速公路沿线岩石结构、颜色、破碎程度与路基用料掘进的难易程度,分别在不同的合同段选取了4种代表性的风化岩路基填料,分别为:以青灰色岩石为主的风化岩(风化岩A)、掺杂黄色岩石的风化岩(风化岩B)、隧道开挖出的隧道石(风化岩C)与以灰色岩石为主的风化岩(风化岩D)。风化岩A属于长石类砂岩,其他均属于杂砂岩

类(图 1~4)。



图 1 风化岩 A  
Fig. 1 Weathered rock A



图 2 风化岩 B  
Fig. 2 Weathered rock B



图 3 风化岩 C  
Fig. 3 Weathered rock C



图 4 风化岩 D  
Fig. 4 Weathered rock D

1.2 风化岩性能测试

1.2.1 天然级配组成

4 种不同风化岩填料的颗粒组成见图 5。根据

土质土力学不均匀系数的概念,可以计算出 4 种风化岩的不均匀系数  $C_1$  及  $C_2$ ,计算结果见表 1

$$C_1 = d_{60}/d_{10} \tag{1}$$

$$C_2 = d_{30}^2/(d_{60}d_{10}) \tag{2}$$

式中: $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$  分别为相当于累计质量百分数分别为 10%、30% 和 60% 的粒径, $d_{10}$  为有效粒径, $d_{60}$  为限制粒径。

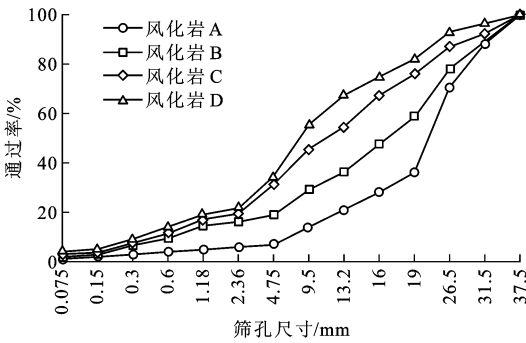


图 5 风化岩天然级配曲线  
Fig. 5 Natural grading curves of weathered rocks

表 1 风化岩填料的不均匀系数与曲率系数

Tab. 1 Coefficients of uniformity and curvature of weathered rocks

测试指标	风化岩 A	风化岩 B	风化岩 C	风化岩 D
不均匀系数	2.79	16.00	22.00	22.00
曲率系数	1.01	4.03	2.85	2.85

从表 1 可知,风化岩 B、C、D 的不均匀系数均大于 10,曲率系数比较接近,级配良好;风化岩 A 不均匀系数为 2.79,级配不良。

1.2.2 击实与击实破碎特性

4 种风化岩的击实试验结果见图 6。击实试验结果表明,风化岩 B 干密度最大,而 A 的最大干密度与含水量(质量分数)最小。风化岩在击实过程中出现的不同程度破碎可采用破碎率来表征,破碎率在某种程度上也可以反映 4 种风化岩路基填料在路基施工碾压过程中粒料的破碎情况,因为风化程度不同,路基填料抵抗破碎的能力也不同,风化越严

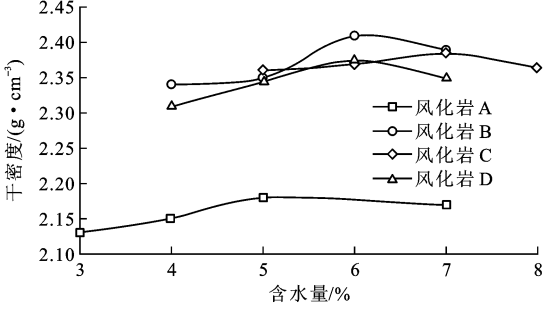


图 6 风化岩击实试验结果  
Fig. 6 Compaction test result of weathered rocks

重,施工过程中的破碎率也越大。相比而言,4种风化岩填料中,风化岩D的破碎率最大,高达41%。

### 1.2.3 风化岩风化粘土矿物含量

风化岩长期经受自然环境作用会导致部分矿物发生分解,形成新的风化粘土矿物,主要包含高岭石、蒙脱石和伊利石等。经大量研究发现,风化岩风化程度与其内部风化粘土矿物含量之间存在一种关系,即风化程度越严重,风化粘土矿物含量越高,因此,风化粘土矿物含量可以在某种程度上反映风化岩的风化程度。本文对4种风化岩试样进行X射线分析(XRD),确定风化粘土矿物含量(质量分数),检测结果见表2。

试验结果表明,4种试样主要原生矿物组成为石英、斜长石和白云石,占总体的54%~81%,而风化粘土矿物以伊利石、高岭石为主,含量见表3。

表2 风化岩X衍射结果

Tab. 2 XRD result of weathered rocks %

矿物名称	风化岩 A	风化岩 B	风化岩 C	风化岩 D
斜长石	45	16	10	9
白云石	24	12	18	
伊利石	9	20	20	27
石英	12	42	46	45
高岭石			3	
赤铁矿	3	2		
黄铁矿			1	
方解石		2		
绿泥蛭纹石	4	4		15
闪石				2
未检出	3	2	2	2

表3 风化岩粘土矿物含量

Tab. 3 Clay mineral contents of weathered rocks

风化岩类别	风化岩 A	风化岩 B	风化岩 C	风化岩 D
矿物含量/%	9	20	23	27

风化岩风化过程实质就是其内部风化粘土矿物逐渐增加的过程,从XRD分析结果可知,4种填料风化程度从小到大的排序为A、B、C、D。相比而言,D填料的风化程度最严重,A填料的风化程度较轻。

### 1.2.4 风化岩膨胀性能分析

风化岩中风化粘土矿物具有膨胀性,填于路基后会导致路基结构体产生一定膨胀性。一定范围内的膨胀可使路基结构体更加密实和稳定,提高路基的承载力,但膨胀过大将会导致路基破坏,引发道路出现多种病害。本文对4种填料的自由膨胀性和结构体膨胀性进行了试验,前者可以反映风化岩遇水

膨胀特性,后者不仅可表征不同风化程度风化岩路基遇水膨胀特性和路基整体稳定性,而且可为风化岩填料的分级提供重要的工程特性参数。

自由膨胀率和CBR试件结构体膨胀率测试参照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007),结果分别见图7、8。无论是自由膨胀率还是CBR结构体膨胀率,风化岩D都较突出,其膨胀率最大,而风化岩A膨胀率最小。4种风化岩膨胀率从小到大的排序为:A、B、C、D。相较而言,虽然B膨胀性粘土含量较高,但是其遇水敏感性较C、D小,其膨胀率远远小于C和D。

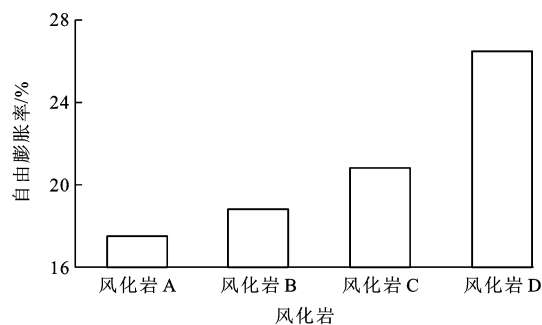


图7 风化岩自由膨胀率

Fig. 7 Free expansion rates of weathered rocks

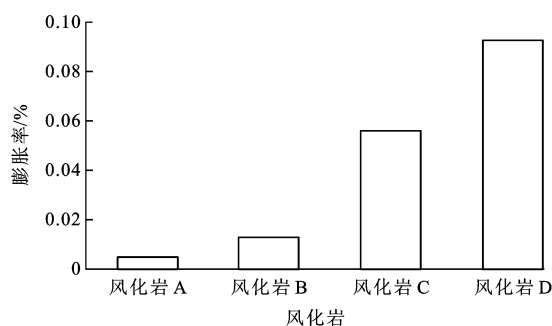


图8 风化岩CBR结构体膨胀率

Fig. 8 CBR expansive rates of weathered rocks

## 2 风化岩长期性能模拟试验结果分析

岩石风化作用主要有物理风化和化学风化,物理风化主要是填料受到日晒和风雨的侵蚀而发生级配变化,这种风化主要受湿度与温度的影响;化学风化是当风化岩填料长期浸泡水中时,填料中的水溶性物质就会溶解,从而改变了填料的结 构,因此,用风化岩填筑的路基对水、荷载的变化更敏感。为了模拟物理风化和化学风化过程,即风化岩填料在水温循环作用下填料性质的变化规律,本文分别对固定粒径的风化岩填料和原级配填料进行水温循环模拟试验,加速风化岩的自然风化过程,导致填料发生溶解或崩解,填料粒径、

强度与膨胀率均会发生变化,这些变化程度可表征填料本身的风化程度。

固定单粒径风化岩水温循环模拟试验就是对风化岩填料进行筛分,选取不同粒径的试样约 2 kg,在室温浸水 24 h 后放入 105 ℃ 烘箱烘干 24 h,以此为一个试验周期。原级配填料水温循环模拟试验方法相同,只是无需筛分试验,直接取一定量原始级配风化岩填料进行试验。经初步探索试验发现,7 次水温循环后,填料质量变化已不明显,因此,本文选用的试验条件为 7 次循环。

## 2.1 单粒径风化岩崩解率和质量损失率

固定单粒径风化岩 A、B、C、D 水温循环模拟试验结果分别见图 9~12。从试验结果可看出,风化岩种类不同,水温循环过程中各级粒径的质量损失即崩解程度不同,风化岩 C 和 D 各粒径的质量损失更大;对于同种风化岩而言,粒径不同其质量损失即崩解程度也不同,相比而言,粒径越大,受水温循环的影响越大。为了评价 4 种风化岩填料受水温循环影响的程度,本研究用水温循环崩解率来评价,即干湿循环前后各粒径的崩解量之和与干湿循环之前各粒径质量之和的比值,具体计算结果见表 4。表 4 显示,4 种代表性风化岩填料在加速模拟自然风化的试验中,均产生了一定程度的破碎崩解,崩解率从小到大的排序为:A、B、C、D。岩类不同,其崩解率也不同,风化岩 D 经过 7 次干湿循环之后的崩解率高达 34.8%,风化岩 C 高达 31.5%,说明这 2 种风化岩受水影响较大,用作路基填料必须谨慎。

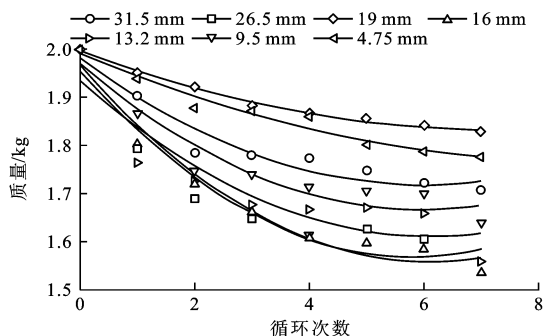


图 9 风化岩 A 水温循环次数与质量损失关系

Fig. 9 Relationships between water-temperature cycle times and mass losses for weathered rock A

## 2.2 水温循环对原级配风化岩性能的影响

为了综合考察 4 种风化岩各种性能受水温循环的影响,本研究通过模拟风化试验,考察 4 种风化岩填料风化前后的质量变化、膨胀性以及 CBR(加州承载比)等方面性能的变化,分析其性能受风化程度的影响。

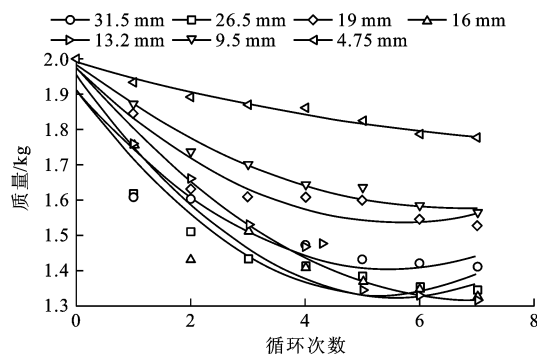


图 10 风化岩 B 水温循环次数与质量损失关系

Fig. 10 Relationships between water-temperature cycle times and mass losses for weathered rock B

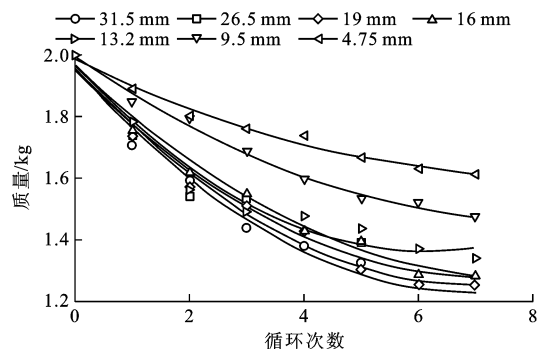


图 11 风化岩 C 水温循环次数与质量损失关系

Fig. 11 Relationships between water-temperature cycle times and mass losses for weathered rock C

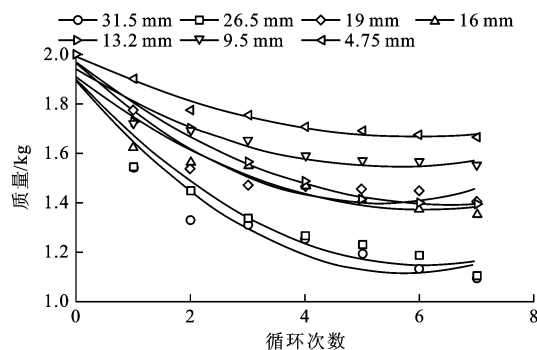


图 12 风化岩 D 水温循环次数与质量损失关系

Fig. 12 Relationships between water-temperature cycle times and mass losses for weathered rock D

表 4 风化岩水温循环崩解率和质量损失率

Tab. 4 Disintegration rates and mass loss rates of weathered rocks after water-temperature cycle %

计算指标	风化岩 A	风化岩 B	风化岩 C	风化岩 D
崩解率	15.5	26.7	31.5	34.8
质量损失率	0.25	0.54	0.70	0.99

### 2.2.1 水温循环对风化岩质量损失的影响

4 种风化岩质量随水温循环次数的变化见图 13。经 7 次水温循环后,4 种风化岩的质量损失从

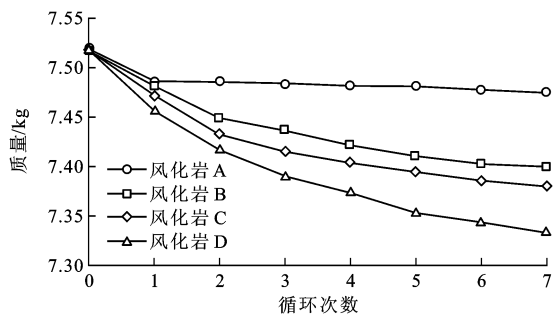


图 13 水温循环次数与风化岩质量的关系

Fig. 13 Relationships between water-temperature cycle times and masses of weathered rocks

小到大的排序为 A、B、C、D。风化岩 D 的质量损失最大,且对水温循环次数非常敏感,风化岩 A 的质量损失最小。风化岩 A 经 1 次循环后,其质量损失曲线已趋于水平,即变化已不敏感,这与风化粘土矿物含量和 CBR 结构体膨胀率试验结果一致。

### 2.2.2 水温循环对风化岩结构体膨胀率的影响

模拟风化前、后 4 种风化岩模的 CBR 结构体膨胀率的变化见图 14。4 种风化岩填料的膨胀率均下降,尤其在水温循环试验中遇水比较敏感的风化岩 C 和 D 变化最明显,主要是由于水温循环试验改变了这 2 种填料中细料的结构,而且水温循环的作用使得填料中亲水性矿物对水的敏感性下降,致使 CBR 结构体膨胀率明显下降。这说明模拟风化中水和温度的循环作用可以改善易亲水性物质的膨胀效应。

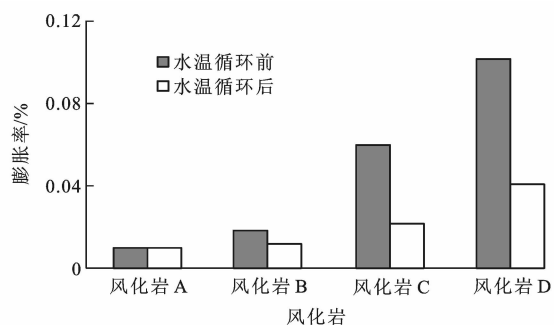


图 14 模拟风化前、后 CBR 结构体膨胀率

Fig. 14 CBR expansive rates before and after weathering simulation

### 2.2.3 水温循环对风化岩 CBR 的影响

为了评价各种风化石料作为公路基层的可行性以及潜在强度,测试填料在模拟风化前、后力学性能的衰变规律,评估风化岩填料应用于路基填筑中时,水温循环作用对填料力学性能的影响,进行了 CBR 贯入试验。4 种风化岩贯入曲线分别见图 15~18, CBR 变化见表 5。当贯入量较小时,模拟风化作用受水温循环影响小,除了青质料 A 外,其他 3 种贯

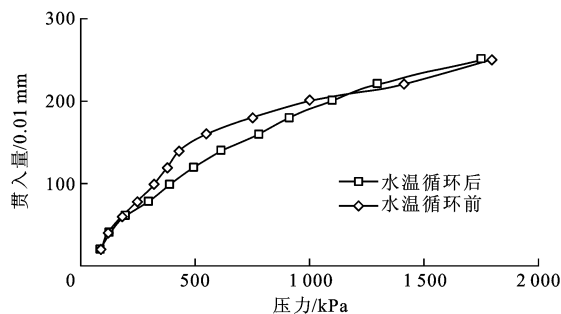


图 15 模拟风化前、后风化岩 A 的贯入试验结果

Fig. 15 Penetration test results of weathered rock A before and after weathering simulation

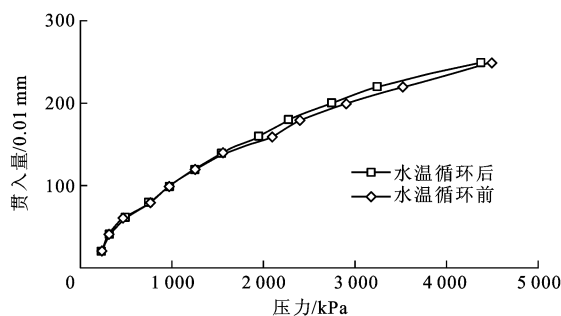


图 16 模拟风化前、后风化岩 B 的贯入试验结果

Fig. 16 Penetration test results of weathered rock B before and after weathering simulation

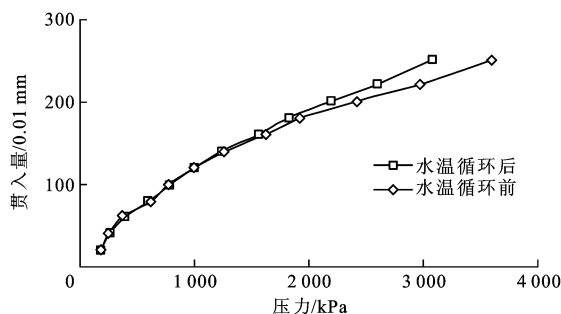


图 17 模拟风化前、后风化岩 C 的贯入试验结果

Fig. 17 Penetration test results of weathered rock C before and after weathering simulation

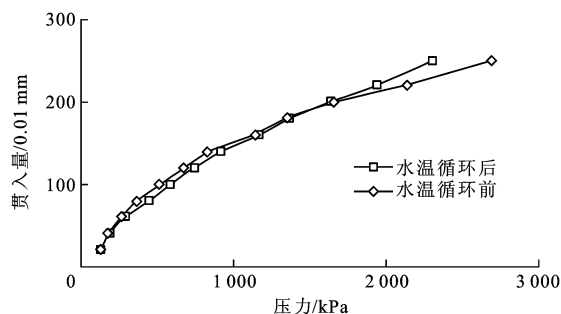


图 18 模拟风化前、后风化岩 D 的贯入试验结果

Fig. 18 Penetration test results of weathered rock D before and after weathering simulation

入曲线相差不大。当贯入量达到  $200 \times 0.01 \text{ mm}$  以上时,单位压力减小,说明在模拟风化的水温循环作

表 5 模拟风化前、后风化岩 CBR 值  
Tab. 5 CBR values of weathered rocks before and after weathering simulation

测试指标	风化岩 A	风化岩 B	风化岩 C	风化岩 D
模拟风化前 CBR 值	25.5	58.3	43.9	36.1
模拟风化后 CBR 值	24.9	55.0	39.5	31.6
损失率	2.5	5.7	10.1	12.5

用下风化岩填料的承载能力下降。

从表 5 可知,模拟风化循环试验后 4 种不同风化程度的风化岩填料 CBR 值降低,这说明在模拟风化试验水温的交替作用下,风化岩填料颗粒的力学性能发生衰减,承载力降低,其原因主要是填料中的风化产物在水化作用和填料颗粒在温度作用下热胀冷缩,导致颗粒中潜在裂缝发展,严重时可能导致料结构体的整体破坏。

### 3 风化特征指数与风化岩性能的相关性

#### 3.1 风化特征指数的提出

风化岩风化等级划分与评价如前所述,大多按物理或化学风化程度来评价,但实际上岩石风化是物理和化学作用的综合结果。基于风化岩性能测试,本文提出采用物理风化和化学风化相结合的评价方法,物理风化主要考虑风化填料的级配组成,采用  $d_{10}$  有效粒径的颗粒含量评价填料的风化程度  $w$ ,化学风化主要考虑风化粘土矿物的含量  $c$ ,最终提出用风化特征指数  $K$  作为评价指标

$$K = 100w \quad (3)$$

$$w = \frac{100 \sum_{i=1}^n p_i r_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (4)$$

式中:  $p_i$  为第  $i$  种粒径的通过率;  $r_i$  为第  $i$  种粒径的大小;  $n$  为粒径种类。

依据式(3)、(4)可计算出 4 种代表性风化岩的风化特征指数,见表 6。

表 6 风化岩的风化特征指数  
Tab. 6 Weathering characteristic indexes of weathered rocks

风化岩种类	风化岩 A	风化岩 B	风化岩 C	风化岩 D
$w/\%$	1.98	7.83	8.85	10.11
$c/\%$	9	20	23	27
$K$	0.178	1.566	2.036	2.730

#### 3.2 风化特征指数与风化岩路用性能的相关性

为了验证应用风化特征指数评价风化程度的合理性,对  $K$  与路用性能的相关性进行了探讨。风化岩风化特征指数与破碎率、粘土矿物含量、水温循环

试验 CBR 结构体膨胀率、质量损失率与水温循环试验前、后 CBR 变化的相关曲线分别见图 19~23。回归分析结果表明,风化岩填料路用性能  $y_j$  与  $K$  的相关性较好,决定系数  $R_j^2$  大于 0.85,充分说明风化岩作为路基填料时其工程特性与风化程度指数具有良好的相关性,同时也证实了本研究所提出的风化岩填料风化程度评价指标的合理性与科学性。

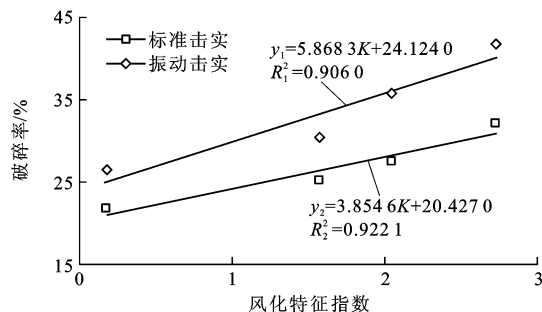


图 19 破碎率与  $K$  相关性曲线

Fig. 19 Correlation curves of  $K$  and breakage rate

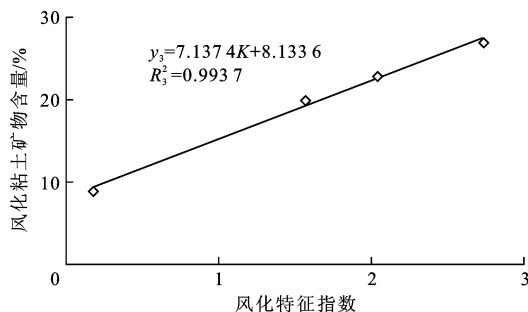


图 20 矿物含量与  $K$  相关性曲线

Fig. 20 Correlation curve of  $K$  and mineral content

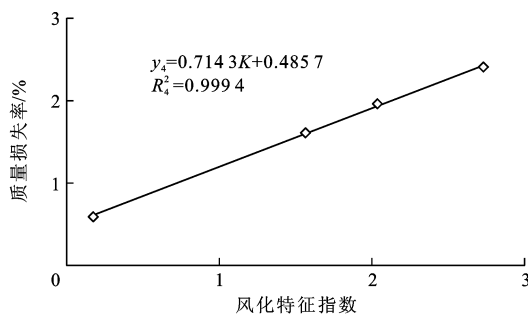


图 21 质量损失率与  $K$  相关性曲线

Fig. 21 Correlation curve of  $K$  and mass loss rate

对于路基填料而言,《公路路基设计技术规范》(JTG D30—2004)明确要求其 CBR 值大于 8%,利用  $K$  与 CBR 值的回归关系式,可计算出风化特征指数应小于 3.28,鉴于本研究试验样品数量有限,加之风化岩风化过程的复杂性和特殊性,风化特征指数上限取值为 3.25。另外,根据风化岩路基填筑中对工程性质影响最大的膨胀率测试结果,利用填料 CBR 结构体膨胀率与  $K$  的回归公式计算可知,

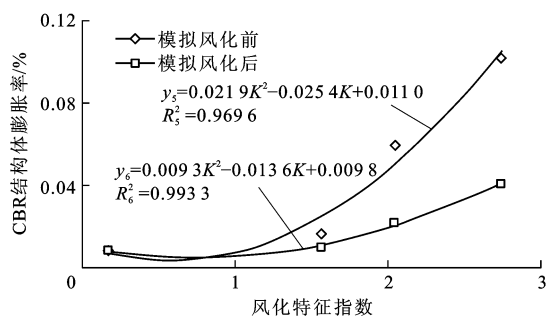


图 22 CBR 结构体膨胀率与 K 相关性曲线

Fig. 22 Correlation curves of K and CBR expansive rate

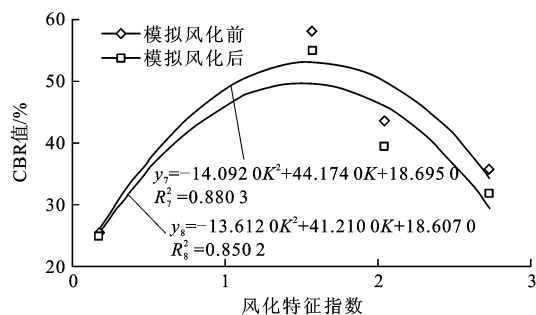


图 23 CBR 与 K 相关性曲线

Fig. 23 Correlation curves of K and CBR

当风化特征指数  $K < 0.57$  时对填料的膨胀率影响不明显,因此,  $K$  下限取值为 0.55。

综合以上分析,结合风化岩路基填筑实际状况,可依据  $K$  值将风化岩风化程度分为 3 级,即轻微风化、中度风化与重度风化,重度风化岩不能用于高速公路路基填筑。风化岩路基填料分级与性能指标见表 7。

表 7 风化岩风化程度分级

Tab. 7 Classification of weathering degrees of weathered rock

风化分级	风化特征指数	性能指标
轻微风化	$0 < K < 0.55$	水温循环崩解率小于 19%,天然级配下水温循环质量流失率小于 1%,模拟风化循环 CBR 损失率小于 4%
中度风化	$0.55 \leq K \leq 3.25$	水温循环崩解率介于 19%~40%之间,天然级配下的水温循环质量损失率介于 1%~3%之间,模拟风化作用下 CBR 损失率介于 3%~14%之间
重度风化	$K > 3.25$	水温循环崩解率大于 40%,天然级配下水温循环质量流失率大于 3%,模拟风化作用下 CBR 损失率大于 14%

为了验证室内研究成果,课题组于 2007 年在商界高速公路 20 合同段修筑了风化岩路基试验路段,全长 1.1 km(K208+700~K209+800),路基填筑高度平均为 6 m。该标段沿线风化岩填料大多以青灰色为主,外观接近于图 1(风化岩 A),通过计算得

到  $K$  为 0.78,由表 7 可知属于中等风化填料,可用于路基填筑。按照课题组确定的风化岩填筑工艺进行路基填筑,同时埋设了多功能沉降板,用以监测风化岩路基长期沉降,具体观测结果见图 24。经 1.5 年的观测发现,路基最大沉降为 7.8 cm,稳定性良好,完全满足规范的要求,因此,本研究成果完全可用于指导商界高速乃至类似地区的高速公路风化岩路基施工。

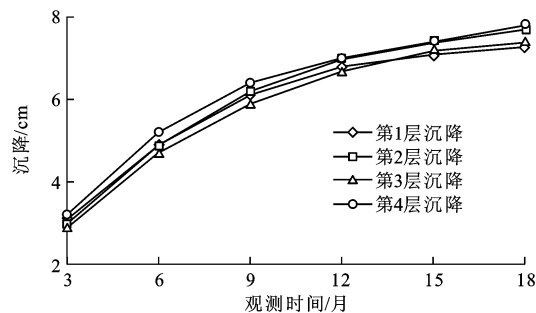


图 24 风化岩路基累计观测沉降

Fig. 24 Accumulated observation settlements of weathered rock subgrade

## 4 结 语

(1)分析了商界高速公路沿线 4 种代表性风化岩的级配组成、击实破碎特性、矿物成分及膨胀性,风化岩 D 综合性能较差,风化程度较高。

(2)提出了模拟风化岩填料长期风化作用的试验方法,即水温循环试验,揭示了风化岩填料的崩解率、膨胀率与 CBR 等路用性能随风化作用的衰变规律。

(3)提出用风化特征指数表征公路路基风化岩填料的风化程度,分析了填料风化程度与工程特性的相关性,通过  $K$  与工程特性的相关性分析验证了风化岩风化分级指标的合理性和科学性,并提出了路基用风化岩填料分级标准。

(4)基于研究成果铺筑试验路段,经 18 个月观测发现路基沉降满足相关规范要求,路用性能良好。

## 参考文献:

### References:

- [1] JTG D30—2004, 公路路基设计规范[S].  
JTG D30—2004, specifications for design of highway subgrades[S]. (in Chinese)
- [2] 申爱琴,郭寅川,高 韬,等. 商界高速公路风化岩填筑路基研究报告[R]. 西安:长安大学,2006.  
SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, GAO Tao, et al. Research report on weathered rock subgrade of Shangjie Highway[R]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [3] 刘 润,闫 玥,闫谢旺,等. 强风化岩质边坡滑坡治理及有限



- 元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2790-2794.
- LIU Run, YAN Yue, YAN Shu-wang, et al. Improvement and finite element analysis of an intense weathering rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2790-2794. (in Chinese)
- [4] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 复杂应力下强风化软岩湿化变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 925-930.
- LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, LIU Zu-de, et al. Experimental study on slaking deformation of intense weathering soft rock under complicated stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 925-930. (in Chinese)
- [5] 赵建军, 王思敬, 尚彦军, 等. 全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 624-628.
- ZHAO Jian-jun, WANG Si-jing, SHANG Yan-jun, et al. Control factors on shear strength of completely decomposed granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 624-628. (in Chinese)
- [6] SONG K I, CHO G C, LEE S W. Effects of spatially variable weathered rock properties on tunnel behavior[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2011, 26(3): 413-426.
- [7] LI Xiao-qing, JIN Qing-ping. Compacting deformation engineering characteristics of weathered soft rock mixture in subgrade[J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(3): 298-306.
- [8] 郑民新, 方 焘, 刁心宏, 等. 风化软岩填筑路基可行性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 53-56.
- ZHENG Min-xin, FANG Tao, DIAO Xin-hong, et al. Experimental study on feasibility of filled subgrade with weathered soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 53-56. (in Chinese)
- [9] 胡瑞林, 岳中琦, 王立朝, 等. 斜长石溶蚀度: 一种评价花岗质岩石风化度的新指标[J]. 地质论评, 2005, 51(6): 649-655.
- HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, WANG Li-chao, et al. Application of plagioclase solution degree to evaluating the weathering degree of CDG of granites[J]. Geological Review, 2005, 51(6): 649-655. (in Chinese)
- [10] 颜 波, 汤连生, 胡 辉, 等. 花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2009(6): 68-71, 84.
- YAN Bo, TANG Lian-sheng, HU Hui, et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009(6): 68-71, 84. (in Chinese)
- [11] 魏 伟, 沈军辉, 苗 朝, 等. 风化、蚀变对花岗斑岩物理力学特性影响分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 599-606.
- WEI Wei, SHEN Jun-hui, MIAO Zhao, et al. Influence analysis of weathering and altering for physical and mechanical characteristics of granite-porphry[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 599-606. (in Chinese)
- [12] WANG Y S, LIU S H. Treatment for a fully weathered rock dam foundation[J]. Engineering Geology, 2005, 77(1/2): 115-126.
- [13] DAGDELENLER G, SEZER E A, GOKCEOGLU C. Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 7476-7485.
- [14] HEIDARI M, MOMENI A A, NASERI F. New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters[J]. Engineering Geology, 2013, 166(1): 65-73.
- [15] CHE V B, FONTIJN K, ERNST G G J. Evaluating the degree of weathering in landslide-prone soils in the humid tropics: the case of limbe, SW Cameroon[J]. Geoderma, 2012, 170: 378-389.
- [16] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(22): 3830-3833.
- LI Ri-yun, WU Lin-feng. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3830-3833. (in Chinese)