

土壤交流电阻率与其化学风化程度的关系

刘京铄^{1,2}, 陈宇龙³, 聂闻⁴, 宁果果⁵

- (1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南水利水电职业技术学院, 湖南长沙 410131;
3. 东京大学土木工程系, 日本东京 113-8656; 4. 重庆大学资源与环境工程学院, 重庆 400030;
5. 湘潭市安全生产监督管理局, 湖南湘潭 411100)

摘 要: 利用交流电桥研究了含水率和电流频率对土体电阻率的影响, 并探讨电阻率与土体的化学风化指数 CWI 的关系. 试验结果表明, 土样的电阻率随着含水率和电流频率的增加而减小; 当含水率低时, 随着含水率的增加, 电阻率快速降低; 当含水率高时, 随着含水率的增加, 电阻率的降幅较小; 而电流频率引起的降幅较小; 基于风化程度与电阻率正相关的观点, 建立了电阻率与化学风化指数的关系式, 并给出了拟合参数的计算方法; 拟合公式预测的化学风化指数值与实测数值基本吻合, 可为风化程度的评价提供参考依据.

关键词: 土力学; 电阻率; 化学风化指数; 含水率; 电流频率

中图分类号: TU 411 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)03-0446-06

Relationship Between AC Electrical Resistivity and the Degree of Soil Chemical Weathering

LIU Jing-shuo^{1,2}, CHEN Yu-long³, NIE Wen⁴, NING Guo-guo⁵

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Hydroelectric Occupational College, Changsha 410131, China; 3. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan; 4. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 5. Xiangtan Municipal Administration of Work Safety, Xiangtan 411100, China. Corresponding author: LIU Jing-shuo, E-mail: ljs7327@163.com)

Abstract: By using alternating current (AC) bridge, the effects of the water content and electric current frequency on the electrical resistivity of soils were studied to investigate the relationship between resistivity and soil chemical weathering index (CWI). The test results show that the electrical resistivity of soils decreases with the increase of water content and electric current frequency. When the water content is relatively low, the electrical resistivity decreases very sharply with the increase of water content, but turned slowly at relatively high water content. However, the electrical resistivity has only a smaller reduction with the increase of the electric frequency. Based on the viewpoint of that the weathering degree is positively related to the electric resistivity, the relationship between resistivity and chemical weathering index was established, and the computing method for fitted parameters was given. A comparison between CWI predicted by fitted equation and actual CWI was made to show its reliability. The electrical resistivity can provide reference for the evaluation of the degree of weathering.

Key words: soil mechanics; electrical resistivity; chemical weathering index (CWI); water content; electric current frequency

风化是引起岩土力学性能劣化的重要因素^[1-2]. 由于风化程度的不同, 土体的工程特性大相径庭, 即使是同样的内部结构, 形成过程的差异

也会造成土体截然不同的物理力学性质. 因此, 有必要在测定土体工程特性前判定其风化程度. 风化程度的准确划分及工程特性研究, 对于高层建

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB035401); 国家自然科学基金资助项目(51174228); 湖南省教育厅科学研究项目(14C0746).

作者简介: 刘京铄(1979-), 男, 湖南邵东人, 中南大学博士研究生.

筑、大型水电工程和道路桥梁等工程建基面的选择以及地基基础设计施工方案的确定具有关键性作用,对于评价土体稳定性和边坡工程亦具有重要的意义^[3].

现有风化程度的划分较多采用工程地质定性评价方法,即从结构、颜色、破坏程度、矿物成分、掘进难易程度与物理力学性质指标等角度综合分析得到.但在长期的生物化学作用和水土化学作用下必然引起土壤化学、矿物成分和结构的变化,并导致岩土工程性质的明显变化.根据这些具有不确定性的判据分析得到的风化程度也带有较大的随意性.特别是当 2 个风化等级之间具有渐变关系时,这样的现存的风化程度划分方法对过渡带分界线的划定造成较大困难.因此,亟待进一步研究风化程度的定量分析评价方法.

Lumb 等^[4-7]提出利用矿物成分和结构的改变来划分风化物的风化程度.至今,国内外诸多学者已提出了多种化学风化指数^[8-14]来定量表示.其中,Sueoka^[15]提出的化学风化指数是部分对风化程度敏感的矿物成分与所有矿物成分的摩尔数比值.Duzgoren - Aydin 等^[16]认为 CWI 反映的风化模式较好.

虽然化学风化指数能够较准确地评价土体的

风化程度,但耗时较长,且成本较高,所以,亟需快速经济的方法.为此,Iliev^[17]通过研究得出了弹性波速与风化程度的关系式.但弹性波的到达时间不容易确定,而且易受干扰.

Abu - Hassanein 等^[18-19]证明随着土壤矿物成分的改变,其电阻率将随之改变.有鉴于此,笔者试图通过测定土体电阻率的方法来分析探讨土体的风化程度,尝试探讨电阻率与土壤的化学风化指数 CWI 的关系.

1 试验介绍

试验所用的土样取自某基坑工程.为了最大程度地减少取样过程中的扰动,笔者以如下方式进行取样:当基坑开挖到一定标高时,用铁铲挖出一整块原状土样,然后用细铁丝削平四周边缘,用保鲜膜包好后放在盒子里运回实验室并妥善保存,以备试验.通过 X 射线荧光光谱法(XRF)检测获得的试验用土样的物质组成及 CWI(式(1)),如表 1 所示.

$$CWI = \frac{w(Al_2O_3) + w(Fe_2O_3) + w(TiO_2)}{w(\text{所有矿物成分})} \times 100\% . \tag{1}$$

表 1 土样成分 XRF 检测结果(质量分数)
Table 1 XRF analysis results of soils(mass fraction) %

| 土样编号 | 取样深度 /m | 土粒密度 /($g \cdot cm^{-3}$) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | MnO | P ₂ O ₅ | CWI |
|------|---------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------|-------------------------------|----------|
| A-1 | 1.0 | 2.75 | 63.37 | 16.04 | 0.62 | 8.65 | 1.64 | 0.26 | 0.65 | 1.20 | 0.11 | 0.07 | 28.155 6 |
| A-2 | 2.0 | 2.73 | 59.72 | 17.20 | 0.88 | 9.42 | 2.68 | 1.51 | 1.02 | 0.99 | 0.14 | 0.11 | 31.729 5 |
| A-3 | 3.0 | 2.72 | 61.11 | 17.27 | 0.80 | 8.31 | 2.09 | 1.16 | 1.31 | 1.82 | 0.11 | 0.07 | 27.244 8 |
| A-4 | 4.0 | 2.68 | 60.55 | 15.13 | 0.87 | 8.53 | 1.88 | 0.58 | 0.46 | 1.30 | 0.11 | 0.09 | 32.165 1 |

将过筛风干的土与去离子水按照 $w = 5\%$, 10% , 15% , 20% , 25% 的比例均匀混合,干密度 $\rho_d = 1.5 g/cm^3$,装入 $100 mm \times 100 mm \times 50 mm$ 的塑胶模具手工压筑成型,模具两端为电极,如图 1 所示.

为避免电极的极化^[20],电阻率测量使用安捷伦 4263B LCR 数字交流电桥.试验测试了不同含水率的土样在不同频率 f 下的电阻率,电流频率 f 为 $50 Hz$ (中国电网频率), $0.1, 1, 10, 100 kHz$.电阻率的测试均在数秒内完成,以免土长期通电升温影响测量结果^[21].

根据二相电极的电阻率电学模型,假设在恒定电流作用下土样中的电压降也处于恒定状态,通过电阻测试仪(型号:MF2516 - 2517)直接测

出土的电阻值 R ,则试样的电阻率 ρ 为

$$\rho = \frac{RS}{L} . \tag{2}$$

式中: ρ 为介质总电阻率($\Omega \cdot m$); L 为电极间距(m); S 为电极面积(m^2); R 为测量电极间的电阻(Ω).

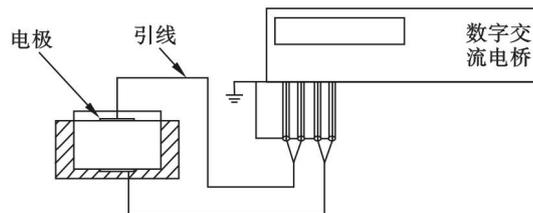


图 1 土体电阻率测试示意图
Fig. 1 Sketch of electrical resistivity testing for soils

2 试验结果及分析

在室温下电阻率随电流频率的变化曲线以及电阻率随含水率的变化曲线如图 2 所示. 由于弛豫特性的作用, 随着电流频率的增加, 电阻率稍有减小. 而与电流频率的影响相比, 含水率的增加将引起电阻率的大幅减小. 若含水率较低 ($\leq 15\%$), 电阻率随含水率的增加而递减的速率较大. 若含水率较大 ($> 15\%$), 电阻率降幅逐渐

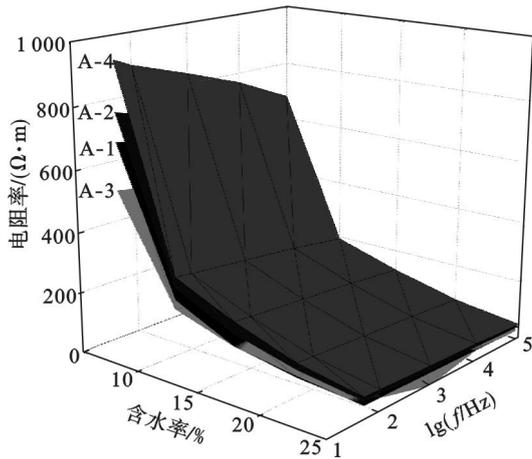


图 2 土样电阻率与含水率和电流频率的三维变化曲面
Fig. 2 3D variation surface among electrical resistivity of soils, water content and electric current frequency

减小, 并趋于稳定, 曲线开始变得平缓, 而且 4 条曲线越来越靠近. 这是由于水的电阻率远小于土颗粒和孔隙气体的电阻率, 所以土体的电阻率将随着含水率的增大而降低. 图 3 描述了高低含水率情况下土体孔隙结构的变化. 在含水率相对

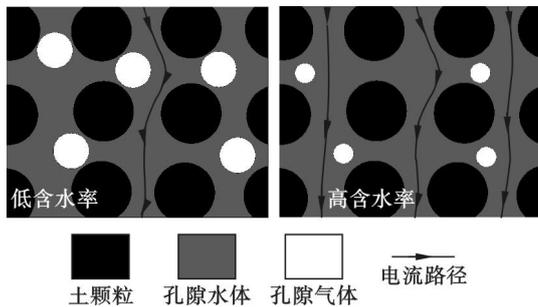


图 3 不同含水率下土体结构变化图
Fig. 3 Variation of soil body structure under different water content conditions

较小的情况下, 孔隙水体被孔隙气体分割成若干独立的单元, 连通性较差, 电流流经的路径较少较狭窄, 电阻率较大. 随着含水率的增加, 饱和度快速增大, 能较大地提高土中孔隙水的连通性, 扩展

了电流流经的通道, 因此含水率越高, 电阻率越小. 在含水率相对较高时, 土内孔隙水的连通性已然很好, 继续增大含水率对电流流经的通道的扩展作用不明显. 由于土壤材料自身的电阻率限制, 电阻率不会随着含水率的升高而无限地减小下去, 故电阻率减小的趋势逐渐减小, 导致含水率越大, 单位含水率变化引起的电阻率的降幅越小. 通过上述分析可以得出, 土样的含水率在较大程度上是由孔隙水控制.

表 1 说明不同的取样深度与土样的风化程度不存在直接关系. 而风化程度越高的土样所对应的电阻率曲面越在上方, 说明风化程度越高, 电阻率越大.

从图 2 中可以发现, 电阻率三维曲面在电阻率-含水率平面上的投影呈幂函数关系, 在电阻率-电流频率平面上的投影呈线性关系. 以含水率 5% 和电流频率 50 Hz (中国电网频率) 条件下的电阻率变化曲线为例 (见图 4), 电阻率随着含水率的增大而呈幂函数减小, 随着电流频率的增大而线性减小. 所以对图 2 中的数据点进行拟合, 分别选择线性和幂函数进行趋势描述, 图 5 绘出了各拟合参数的变化曲线.

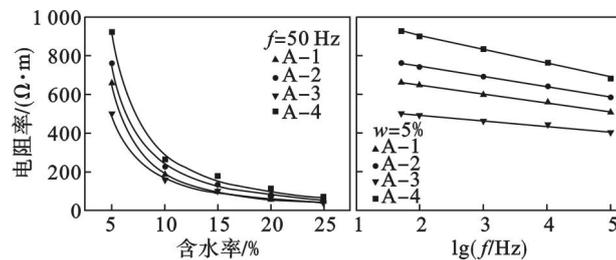


图 4 土样电阻率与含水率和电流频率的变化关系
Fig. 4 Relationship among electrical resistivity of soils, water content and electric current frequency

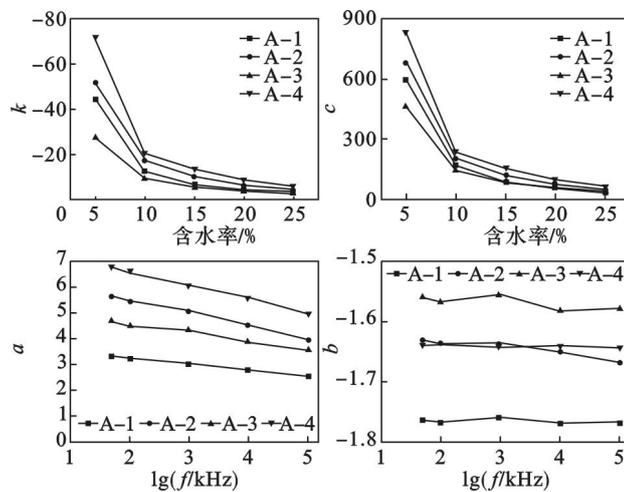


图 5 拟合参数变化曲线
Fig. 5 Changing curves for fitted parameters

随着含水率的增加,斜率 k 值在负向上减小. 说明含水率越高,曲线越平缓,尤其是含水率超过 15% 以后,更为明显. 截距 c 的减小趋势与之相同,都是在含水率小于 15% 时,减小速率较大,含水率大于 15% 时,减小速率较小. 而且各土样对应的参数大小次序符合图 2 描述的变化趋势.

相比之下,随着电流频率的增加,参数 a 近乎线性缓慢减小. 参数 b 在小范围内无序波动,但几乎不变.

孔隙的曲折性给水在孔隙中的分布造成了不可避免的不均匀性. 而这种不均匀性将随着含水率的变化而变化,进一步加剧了电流在土中流通的曲折性. 有鉴于此,Archie^[22]提出了结构因子 F 的概念:

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (3)$$

式中: F 为结构因子(无量纲); ρ_w 为孔隙水电阻率($\Omega \cdot m$). 结构因子能够反映非饱和土的饱和度、孔隙比以及微结构特征,与土的颗粒大小和形状、胶结指数、饱和度、孔隙率等有关.

董晓强等^[23]在借鉴 Fukue 等^[24]建立的土的导电模型的基础上,根据土的三相结构和电路基本原理,非饱和土由土颗粒、孔隙水体和孔隙气体通过并联和串联方式组成,如图 6a 所示,其等效电路如图 6b 所示.

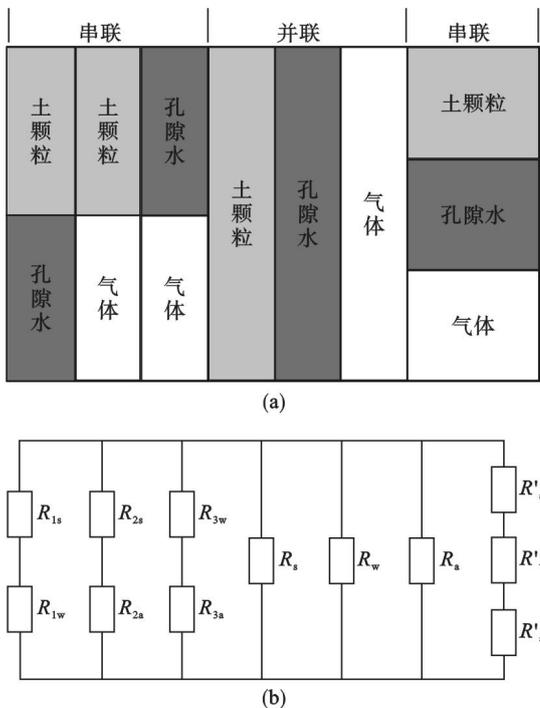


图 6 非饱和土的电路模型^[23]

Fig. 6 Circuit model of unsaturated soil
(a)—土体结构示意图; (b)—等效电路图.

由于气体和土颗粒的电阻率非常大,所以将 $1/\rho_a$ 和 $1/\rho_s$ 作近似于 0 处理. 故基于非饱和黄土的等效电路,综合考虑饱和度附加的孔隙微观分布的不均匀性与电流在土中流通的曲折性及电流频率等影响因素,推导其电阻率模型:

$$\frac{\rho}{\rho_w} = \frac{(1+e)(1+\theta)}{e} \frac{1}{S_r} \quad (4)$$

式中: θ 为体积含水率; e 为孔隙比; S_r 为饱和度.

饱和度与体积含水率的换算关系为

$$S_r = \theta(1+1/e) \quad (5)$$

将式(4)代入到式(3)中得到

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 1 + \frac{1}{\theta} = 1 + \frac{1+1/e}{S_r} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,结构因子与体积含水率和饱和度均呈反比例函数关系. 图 7 以 $e=1$ 为例,描述了结构因子与饱和度的变化关系,随着饱和度或体积含水率的增加,结构因子先急剧减小($S_r \leq 0.2$),后逐渐稳定($S_r > 0.2$).

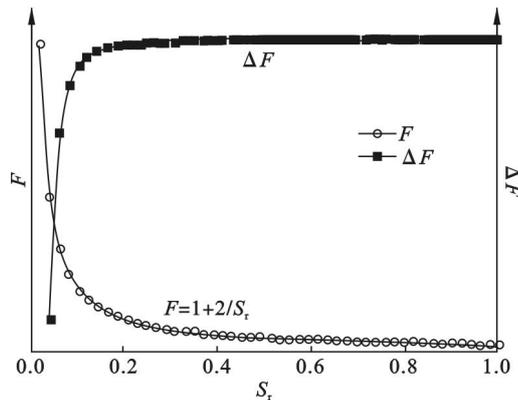


图 7 结构因子与饱和度的变化关系

Fig. 7 Relationship between structure factor and degree of saturation

为研究电阻率与化学风化指数的关联性,选用中国电网频率 50 Hz 下测得的电阻率对化学风化指数进行关联,如图 8 所示. 对不同含水率下的数据进行拟合,得到的拟合参数见图 8 中的表格. 可见电阻率与化学风化指数的线性相关性较好. 拟合参数 A 和 B 与含水率的关系如图 9 所示.

对于拟合参数 A 和 B ,二次多项式的拟合程度较好. 参数 A 随着含水率的增加而加速增加,参数 B 先随着含水率的增大而增大,在含水率 15% 时达到最大值,之后逐渐减小.

通过测定含水率和电阻率,便可利用如下公式计算得到化学风化指数:

$$CWI = (0.000314w^2 - 0.00159w + 0.02004)\rho + (-0.0276w^2 + 0.69499w + 16.928) \quad (7)$$

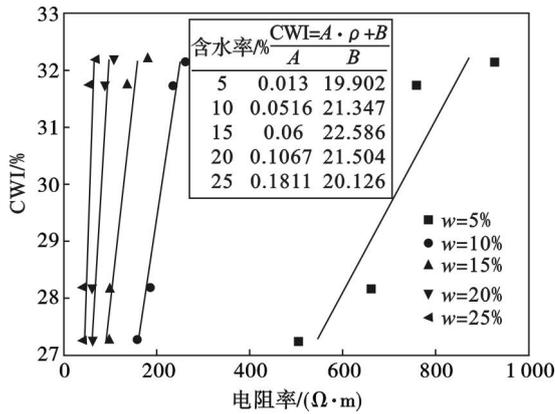


图 8 电阻率随化学风化指数的变化曲线
Fig. 8 Relationship between electrical resistivity and CWI

为验证上述拟合公式是否能较为精确地测定土的化学风化指数,将拟合公式应用于同一取样点不同深度取得的土样在其自然含水率下的化学风化指数预测工作,将预测的化学风化指数值与实测数据比较,并计算相对误差,结果如表 2 所示.由表 2 可知:通过拟合公式推算出的化学风化指数值与实测值相对误差均在 10% 以内,最小只有 2.1%,说明该拟合公式推算的结果较理想,可供参考使用.

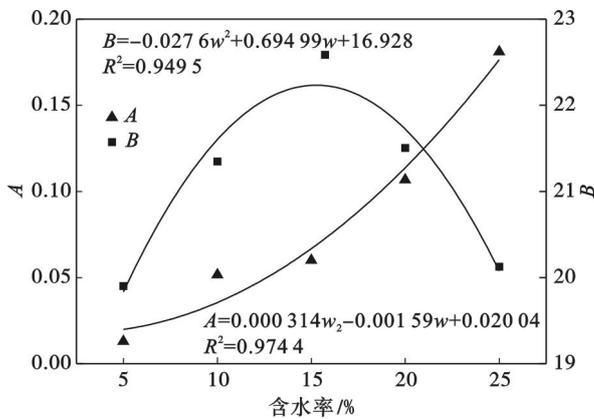


图 9 拟合参数 A 和 B 与含水率的关系
Fig. 9 Relationship between fitted parameters A&B and water content

表 2 预测化学风化指数与实测数值对比分析
Table 2 Comparison between CWI predicted and actual CWI

| 取样深度 /m | 预测化学风化指数/% | 实测化学风化指数/% | 相对误差 /% |
|---------|------------|------------|---------|
| 4.5 | 30.806 | 28.01 | 9.9 |
| 6.7 | 33.917 | 33.23 | 2.1 |
| 7.5 | 26.102 | 28.87 | 9.6 |
| 9.0 | 34.185 | 32.22 | 6.1 |
| 10.0 | 37.536 | 34.47 | 8.9 |

3 结 论

1) 含水率和电流频率与电阻率呈负相关关系.当含水率较低时,随着含水率的增加,电阻率快速降低;当含水率高时,随着含水率的增加,电阻率的降幅较小,而电流频率引起的降幅较小.

2) 基于风化程度与电阻率正相关的观点,建立了电阻率与化学风化指数的关系式,并给出了拟合参数的计算方法.拟合公式预测的化学风化指数值,与实测数值基本吻合,可为风化程度的评价提供较好的参考依据.

3) 通过测定含水率和电阻率,便可利用该公式对风化程度进行估算.本文的研究成果只对应于部分土壤材料,有关材料变化对风化程度判定的影响和对现场无限边界电阻率将在后续研究中进一步开展.

参考文献:

- [1] Gupta A S, Seshagiri R K. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state [J]. *Engineering Geology*, 2000, 56(3): 257 - 274.
- [2] Atiye T. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey [J]. *Engineering Geology*, 2004, 75(3): 215 - 227.
- [3] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 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.)
- [4] Lumb P. The properties of decomposed granite [J]. *Geotechnique*, 1962, 12(3): 226 - 243.
- [5] Mendes F M, Barros L A, Rodrigues F P. The use of modal analysis in mechanical classification of rock masses [C]// *Proceeding of the 1st Congress International Society of Rock Mechanics*. Lisbon, 1966: 217 - 223.
- [6] Irfan T Y, Dearman W R. Engineering classification and index properties of weathered granite [J]. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 1978, 17(1): 79 - 90.
- [7] Park B K, Lee K C. Evaluation methods of weathering degree for Korean decomposed granite soils [J]. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 1999, 15(1): 127 - 140.
- [8] Nesbitt H W, Young G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715 - 717.
- [9] Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3): 319 - 322.
- [10] Parker A. An index of weathering for silicate rocks [J]. *Geological Magazine*, 1970, 107(6): 501 - 504.

(下转第 456 页)