水文·工程·环境

# 晋阳大佛边坡岩体风化分级研究

田小甫[1]， 孙进忠[2]， 柳亚千[2]
(1. 北京市地质工程勘察院,北京 100048;2. 中国地质大学(北京),北京 100083)

[摘 要]洞窟、造像等大型石质文物大多开凿在露天岩体崖壁上,风化病害是这类石质文物的主要病害之一,已经影响到了文物的传承。因此,开展石质文物风化分级的研究对于制定相应的保护措施具有重要的现实意义。目前,对石质文物风化的形态、机理、影响因素的研究较多,也取得了一些成果,但大多是依据对文物外观和岩体的某项指标进行风化分级,缺乏全面性。本文从岩体外观、岩体结构和岩体物理力学性质三方面出发建立了石质文物风化分级的指标体系,通过结合前人的研究成果并进行现场的实验研究,建立了风化等级的分级标准,将层次分析法与模糊数学理论结合起来,提出了一套兼顾岩体文物特性和工程特性的石质文物岩体风化分级方法。论文进一步将这套方法应用于太原晋阳大佛岩体风化分级研究,对于大佛边坡岩体的风化程度进行了评判,为大佛的重修提供了重要的依据。

[关键词]石质文物 岩体风化分级 指标体系 晋阳大佛
[中图分类号]P642 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2010)04-0722-06

**Tian Xiao-fu, Sun Jin-zhong, Liu Ya-qian. Weathering grading of rock mass on the slope at the Jinyang Buddha[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(4): 0722-0727.**

## 1 引言

风化病害是露天大型石质文物主要病害之一。经年累月的风雨侵蚀,使大量石质文物受到严重的破坏,已经影响到了文物本身的传承(黄克忠,1998)。为保护这些珍贵的文物,准确界定石质文物的风化程度是一个迫切需要解决的问题。为此,众多学者对石质文物的风化分级进行了研究(潘别桐等,1992;李智毅等,1995;牟会宠等,2000;尚彦军等,2001;方云等,2001;邵盛福等,2001;左三胜等,2002;李日运等,2004;孔广胜等,2005;巫锡勇等,2004;孙进忠等,2006;谭卓英等,2007),也提出了一些分级方法,但这些方法多从文物的外部特征出发,划分指标以定性指标为主,而缺乏定量化的描述。本文以晋阳西山大佛为研究对象,借鉴工程地质对岩体风化程度的划分方法,结合石质文物的特点选取评价指标,利用模糊评判方法对大佛边坡岩体的风化程度进行了分级,可为类似的摩崖石刻文物的风化分级提供借鉴。

## 2 晋阳大佛的概况

晋阳大佛位于太原市晋源区。开凿时间约为北齐宣帝高洋天保二年至后主高纬时(公元 551 ~576 年),迄今已有 1400 余年,比四川乐山大佛早 227 年,是目前所知世界上最早的大型石刻佛像(杜锦华,2001)。大佛所在岩体边坡为近直立的陡崖,陡崖面沿山势坐北朝南环抱山谷,崖高约 20m,东西长近 200m。断崖顶部大致在同一高程向两侧展开,崖底部地形逐渐升高与两侧山体连接过渡。大佛主体雕凿于中部陡崖较坚硬的石盒子组厚层块状砂岩中,宽度约 25m(见图 1)。

## 3 石质文物岩体风化分级指标选取

考虑石质文物评价的特殊性,本文主要从 3 方面选取岩体风化分级指标:1)表征岩体外部特征的指标,以定性指标为主;2)表征岩体结构的指标;3)表征岩体物理力学性质的指标。

[收稿日期]2010-04-19;[修订日期]2010-06-08;[责任编辑]郑 杰。
[第一作者简介]田小甫(1982 年-),男,2009 年毕业于中国地质大学(北京),获博士学位,现主要从事岩土工程勘察和工程地质灾害评价工作,Email: tianxiaofu2002@126.com。



图 1　晋阳大佛正面像

**Fig. 1　Front image of the Jinyang Buddha**

3.1　岩体外观指标

岩体的外部特征与文物的造型息息相关,从这方面选取评价指标与保护石质文物外观的出发点互相契合。

1)颜色变化程度:岩石的颜色是一种很直观的风化表征指标,现场很容易得到。对同一种岩性,不同风化程度的岩石颜色差异比较大,并且岩石的颜色在一定程度上决定石质文物的美观程度。

2)细部轮廓清晰程度:文物外形轮廓的清晰程度变化也可以作为一个衡量的指标,这样直接考虑了各种风化应力对石质文物岩体的作用又兼顾了文物自身的特点。

3)矿物蚀变程度:在各种内、外风化应力的作用下,岩石矿物成分势必要发生变化,尤其是以水为主要影响因素的化学风化作用。岩石在化学风化作用下会变得疏松,并出现蜂窝状或絮状物。另一方面,岩石的风化会导致石质文物观赏性的降低,所以,矿物成分变化也可以作为反映石质文物岩体风化程度的指标。

3.2　岩体结构指标

岩体结构是主要反映岩体裂隙的发育和岩体完整性的指标,而岩体中一部分裂隙的产生是物理风化作用的结果(廖颜萱,1994),因此,岩体裂隙发育的程度可以反应岩体的风化程度。裂隙的发育破坏了石质文物的完整性,这也是石质文物治理保护中着力解决的问题,所以在石质文物的风化分级可以引入反映裂隙发育程度的岩体结构指标,这样可以把风化应力对石质文物完整性的破坏作用考虑在内。目前,工程上已经建立起一些成熟的反映岩体结构的指标,如 RQD 值,结构面间距,单位体积岩体节理数量等,所以,在选择表征岩体结构指标时,可以借鉴目前成熟的岩体结构指标体系,从而将石质文物岩体风化分级和岩体结构分类有机的结合起来(聂德新,2002)。

3.3　岩体物理力学性质指标

对于大型石刻文物在进行风化分级时,除了要体现风化作用对其造型和完整性方面的影响,还要体现风化应力对石刻文物所在岩体稳定性的削弱作用,这方面通过岩体物理力学参数变化来实现。风化作用使岩石组织结构破坏,矿物颗粒间的粘结力

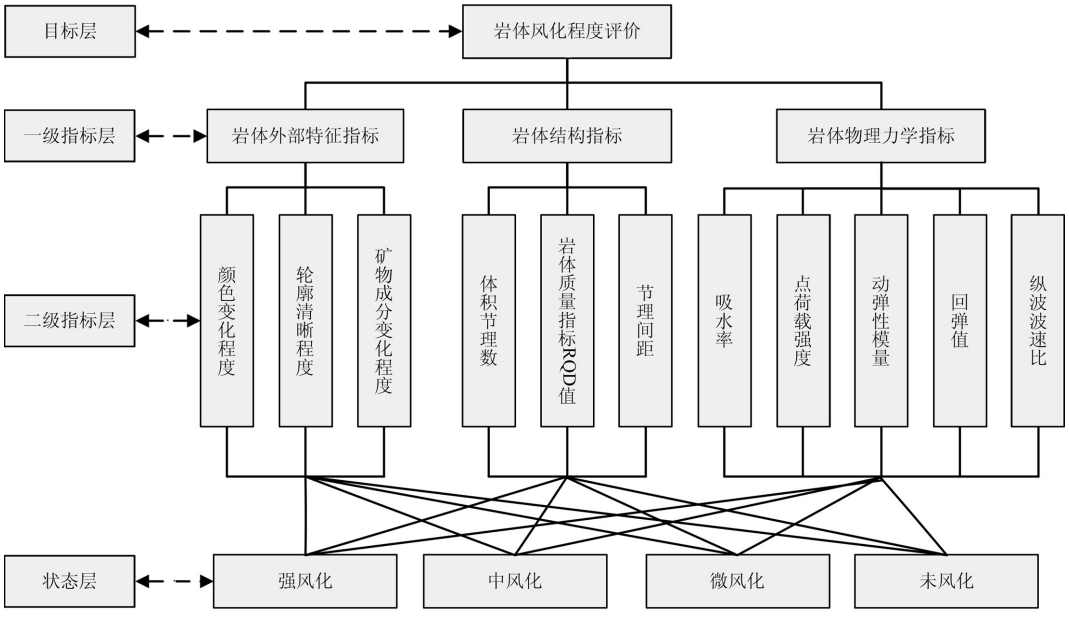



图 2　边坡岩体风化程度评价层次分析图

**Fig. 2　Evaluation index system of weathering degrees for lithical cultural relics**

表 1 评价标准值表

Table 1 Criteria of evaluation of weathering degrees for lithic cultural relics

| 评价指标 | | 评价指标标准值 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 未风化Ⅰ | 微风化Ⅱ | 中风化Ⅲ | 强风化Ⅳ |
| | | S1 | S2 | S3 | S4 |
| 岩体外部特征指标 | 颜色变化程度 | 基本无变化(1) | 少量变化(2) | 显著变化(3) | 极其显著变化(4) |
| | 细部轮廓清晰程度 | 轮廓完整清晰(1) | 轮廓基本清晰(2) | 轮廓模糊不清(3) | 轮廓面目全非(4) |
| | 矿物蚀变程度 | 基本无变化(1) | 少量变化(2) | 显著变化(3) | 极显著变化(4) |
| 岩体结构指标 | 体积节理数(条/$m^3$) | <3 | 6.5 | 20 | >30 |
| | RQD 值(%) | >90 | 82.5 | 62.5 | <50 |
| | 节理间距(m) | >0.65 | 0.525 | 0.35 | <0.3 |
| | 波速比 | >0.9 | 0.85 | 0.7 | <0.6 |
| 岩体物理力学指标 | 点荷载强度(MPa) | >8.0 | 6.0 | 4.0 | <2.0 |
| | 动弹性模量(GPa) | >12 | 9 | 5.8 | <2.7 |
| | 回弹值指标 | >40 | 34 | 27 | <20 |
| | 吸水率(%) | <1.05 | 2.0 | 2.95 | >3.9 |

注:( )内为定性评价指标的取值,如颜色基本无变化则评价取值为 1。

变弱,变形增大,这就促使风化岩体的抗压强度,弹性模量,摩擦系数,纵波波速等指标值改变,所以岩体物理力学指标是全面位的反映三种风化作用的典型指标。为了达到经济方便的目的,应选取工程现场比较容易获得和经过简单室内试验即可获得的指标,因此,决定以纵波波速比、吸水率、点荷载度、动弹性模量、回弹值作为反映石质文物岩体风化程度的物理力学指标。

## 4 构建指标体系与分级标准

根据第 3 小节选择的评价指标构建边坡风化程度层次分析指标体系如图 2 所示。

通过在大佛场地内选取不同风化程度岩石试样进行试验,然后对试验结果进行统计分析。研究表明,除吸水率跟岩体风化程度正相关外,点荷载、回弹值、动弹性模量等指标均随着风化程度的增加而降低,各个风化等级的岩石的物理力学参数基本上都是集中在一定值范围内分布,并且分布范围的平均值与风化等级成良好的线性关系。因此,综合前人的研究成果(聂德新,2002;巨广弘,2006)及对不同风化程度岩石的物理力学实验的成果确定风化等级的分级标准值如表 1 所示。

## 5 隶属度及权重的确定

在模糊数学中,是以隶属度来描述事物中的模糊界限的(陈守煜,1998)。本文建立的指标体系中的评价指标分为定性指标和定量指标。对于定性指标,其取值是离散的,故其各个取值的隶属度通过专家评定的方法来确定,其取值见表 2。对于定量指标,指标取值是连续变化的,隶属函数采用公式法确定,对于与岩体风化严重程度正相关的指标如体积节理数,吸水率,采用升半梯形隶属函数,计算公式如(1)所示:

表 2 定性指标隶属度取值表

Table 2 Membership values of qualitative indices

| 工程评价取值 | 隶属度 | 颜色变化程度 | 轮廓清晰程度 | 矿物蚀变程度 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $U_Ⅰ$ | 0.75 | 0.9 | 0.70 |
| | $U_Ⅱ$ | 0.25 | 0.1 | 0.25 |
| | $U_Ⅲ$ | 0.0 | 0.0 | 0.05 |
| | $U_Ⅳ$ | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | $U_Ⅰ$ | 0.25 | 0.30 | 0.25 |
| | $U_Ⅱ$ | .65 | 0.60 | 0.55 |
| | $U_Ⅲ$ | 0.10 | 0.10 | 0.15 |
| | $U_Ⅳ$ | 0.0 | 0.0 | 0.05 |
| 3 | $U_Ⅰ$ | 0.0 | 0.0 | 0.05 |
| | $U_Ⅱ$ | 0.10 | 0.10 | 0.15 |
| | $U_Ⅲ$ | 0.65 | 0.60 | 0.55 |
| | $U_Ⅳ$ | 0.25 | 0.30 | 0.25 |
| 4 | $U_Ⅰ$ | 0.0 | 0.0 | 0.00 |
| | $U_Ⅱ$ | 0.0 | 0.0 | 0.05 |
| | $U_Ⅲ$ | 0.25 | 0.10 | 0.25 |
| | $U_Ⅳ$ | 0.75 | 0.90 | 0.70 |

$$U_{\mathrm{I}}=\begin{cases}1 & (x\leqslant S_1)\\ \dfrac{S_2-x}{S_2-S_1} & (S_1<x\leqslant S_2)\\ 0 & (x>S_2)\end{cases}$$

$$U_{\mathrm{II}}=\begin{cases}\dfrac{x-S_1}{S_2-S_1} & (S_1<x\leqslant S_2)\\ \dfrac{S_3-x}{S_3-S_2} & (S_2<x\leqslant S_3)\\ 0 & (x>S_3)\end{cases}$$

$$U_{\mathrm{III}}=\begin{cases}\dfrac{x-S_2}{S_3-S_2} & (S_2<x\leqslant S_3)\\ \dfrac{S_4-x}{S_4-S_3} & (S_3<x\leqslant S_4)\\ 0 & (x>S_4)\end{cases}$$

$$U_{\mathrm{IV}}=\begin{cases}0 & (x<S_3)\\ \dfrac{x-S_3}{S_4-S_3} & (S_3<x\leqslant S_4)\\ 1 & (x>S_4)\end{cases}\qquad(1)$$

对于与岩体风化程度负相关的指标,如 RQD 值、节理间距、点荷载强度、动弹性模量、回弹值、波速比,则采用降半梯形的隶属度函数,计算公式(2)所示。式中 $U_{\mathrm{I}}$、$U_{\mathrm{II}}$、$U_{\mathrm{III}}$、$U_{\mathrm{IV}}$ 为某一指标实测值对四个级别的隶属度值,式中 $S_1$、$S_2$、$S_3$、$S_4$ 分别是风化程度分级标准值,$x$ 为实测值。

$$U_{\mathrm{I}}=\begin{cases}1 & (x\geqslant S_1)\\ \dfrac{x-S_2}{S_1-S_2} & (S_1>x\geqslant S_2)\\ 0 & (x<S_2)\end{cases}$$

$$U_{\mathrm{II}}=\begin{cases}\dfrac{S_1-x}{S_1-S_2} & (S_1>x\geqslant S_2)\\ \dfrac{x-S_3}{S_2-S_3} & (S_2>x\geqslant S_3)\\ 0 & (x<S_3)\end{cases}$$

$$U_{\mathrm{III}}=\begin{cases}\dfrac{S_2-x}{S_2-S_3} & (S_2>x\geqslant S_3)\\ \dfrac{x-S_4}{S_3-S_4} & (S_3>x\geqslant S_4)\\ 0 & (x<S_4)\end{cases}$$

$$U_{\mathrm{IV}}=\begin{cases}0 & (x>S_3)\\ \dfrac{S_3-x}{S_3-S_4} & (S_3>x\geqslant S_4)\\ 1 & (x<S_4)\end{cases}\qquad(2)$$

综合评判中,权重采用层次分析法确定(王莲芬等,1990),各级权重因子如表 3 所示。

表 3　评价指标权重分配一览表

**Table 3　Assigned weights of evaluation indices**

| 评价指标 | | 二级权重分配 | 一级权重分配 |
|---|---|---|---|
| 岩体外部特征指标 | 颜色变化程度 | 0.4 | 0.222 |
| | 轮廓清晰程度 | 0.4 | |
| | 矿物成分变化程度 | 0.2 | |
| 岩体结构指标 | 体积节理数(条/$m^3$) | 0.375 | 0.319 |
| | 岩体质量指标 RQD 值(%) | 0.375 | |
| | 节理间距 (m) | 0.250 | |
| 岩体物理力学指标 | 波速比 | 0.298 | 0.459 |
| | 点荷载强度(MPa) | 0.209 | |
| | 动弹性模量(GPa) | 0.209 | |
| | 回弹值指标 | 0.142 | |
| | 吸水率(%) | 0.142 | |

## 6　大佛边坡岩体风化分级评价结果

对权重向量 A 和模糊关系矩阵 R 进行复合运算可以得到最终的综合评价结果,复合运算公式见(3):

$$U=WOR\qquad(3)$$

式中:$U$ 为综合评价隶属度向量;$O$ 为复合运算算子;$W$ 为权重向量;$R$ 为隶属度矩阵

复合算子 $O$ 通常分为主因素突出型,加权平均型和全面制约型(沈良峰,2001)。为综合考虑各个指标的影响,复合运算采用“加权平均型”,综合评价隶属度向量 $U$ 如下所示。

$$U=\{R_{\mathrm{I}},R_{\mathrm{II}},R_{\mathrm{III}},R_{\mathrm{IV}}\}\qquad(4)$$

式(4)中 $R_{\mathrm{I}}$,$R_{\mathrm{II}}$,$R_{\mathrm{III}}$,$R_{\mathrm{IV}}$ 分别代表石质文物对于风化等级Ⅰ-Ⅳ的隶属程度,根据最大隶属度原则对石质文物的风化级别进行判定。

在大佛主体之外的两侧山体与大佛胸部和腹部相对应的位置布置两个深 10m 的水平钻孔,进行原位岩体的测试,以便获得评价指标的取值。实测得到大佛腹部和胸部岩体的各个评价指标的取值见表 4。根据评价指标的取值,求出大佛各个一级指标隶属度矩阵,进而得到大佛边坡胸部和腹部岩体风化等级评价向量如表 5 所示。

根据最大隶属度原则,大佛胸部岩体属于中风化,大佛腹部岩体属于强风化,整个大佛边坡存在着明显的差异风化,见图 3。在制定风化治理措施和稳定性分析的参数选择上要予以考虑。

表 4 大佛边坡岩体风化分级评价指标取值表

**Table 4 Measured values of evaluation indices for weathering grade of Jinyang Grand Buddha**

| 评价因子 | | 大佛胸部风化程度评价取值 | 大佛腹部风化程度评价取值 |
|---|---|---|---|
| 岩石外部特征指标 | 颜色变化程度 | 少量变化(3) | 极其显著(4) |
| | 轮廓清晰程度 | 轮廓基本清晰(2) | 轮廓模糊不清(3) |
| | 矿物变异程度 | 少量变化(2) | 少量变化(2) |
| 岩体结构指标 | 体积节理数(条/$m^3$) | 10 | 20 |
| | 岩体质量指标 RQD 值(%) | 70 | 56 |
| | 节理间距 (m) | 0.31 | 0.1 |
| | 波速比 | 0.72 | 0.58 |
| 岩体物理力学指标 | 点荷载强度(MPa) | 2.62 | 1.87 |
| | 动弹性模量(GPa) | 8.82 | 5.52 |
| | 回弹值指标 | 28 | 22 |
| | 吸水率(%) | 2.75 | 3.50 |

表 5 大佛边坡岩体风化分级评价表

**Table 5 Weathering classification evaluation of the Grand Buddha slope**

| 评价位置 | 综合评价隶属度向量 $U$ | 风化等级 |
|---|---|---|
| 胸部 | {0.0377,0.3421,0.4658,0.1544} | Ⅲ |
| 腹部 | {0.0111,0.1196,0.3151,0.5542} | Ⅳ |

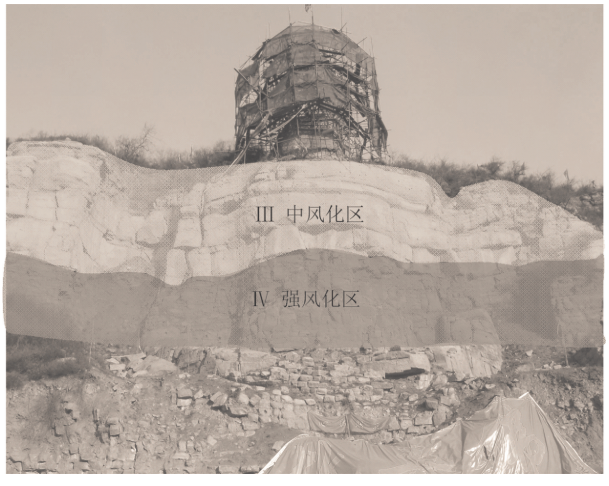



图 3 大佛风化分级成果图

**Fig 3 Weathering classification of Jinyang grand buddha**

## 7 结论

为满足大佛整修的需要,对晋阳大佛风化分级进行了研究,取得了如下的成果:

(1) 考虑石质文物的风化评价的特殊性,从岩体外观特征、岩体结构和岩体物理力学性质三方面建立了石质文物风化分级的指标体系。

(2) 据前人研究成果和场地岩石物理力学指标实测结果,建立了大佛岩体风化等级的分级标准。

(3) 运用层次分析和模糊数学方法对于大佛胸部及腹部岩体的风化程度进行了评判。评判结果表明,大佛腹部岩体为强风化,大佛胸部岩体为中风化,大佛岩体存在着严重的差异风化,这为大佛整修提供了依据。

[References]

Chen Shou-yu. 1998. Engineering fuzzy set Theory and application[M]. Beijing: National Defence Publishing House: 1-8 (in Chinese)

Du Jin-hua. 2001. Literature and historical document of Jinyang (Volume 5)[M]. The first printed. Taiyuan: Committee of Cultural and Historical Document of Jinyuan District in Taiyuan: 1-10 (in Chinese)

Fang Yun, Deng Chang-qing, Li Hong-song. 2001. Environment geological problems in prevention and cure of weathering diseases of carved stone relics[J]. Geoscience, 15(4): 458-468 (in Chinese with English abstract)

Huang Ke-zhong. 1998. The conservation of the lithic and earthy ancient buildings[M]. Beijing: China Architecture and Building Press: 1-3 (in Chinese)

Ju Guang-hong. 2006. Study on granite weathering at damsite of Laxiwa Hydropower station on the Yellow River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 17(1): 124-129 (in Chinese with English abstract)

Kong Guang-sheng. 2005. The application of borehole acoustic televiewer logging results to the classification of rock weathering degrees[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 29(4): 367-368 (in Chinese with English abstract)

Liao Yan-xuam. 1994. Quantitative study of zoning indices for weathered rock mass[M]. Beijing: Earthquake Press: 23-28

Li Ri-yun, Wu Lin-feng. 2004. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics And Engineering, 23(22): 3830-3833 (in Chinese with English abstract)

Li Zhi-yi, Zhang Xian-gong, Li Hong-song. 1995. A Study on the weathering disease of stone cultural relics in Zhongxian, Sichuan[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 20(4): 378-382 (in Chinese with English abstract)

Mou Hui-chong, Yang Zhi-fa, Wu Fa-quan. 2000. Study on engineering geology mechanics for protection of lithical relics[M]. Beijing: Earthquake press: 1-20 (in Chinese)

Nie De-xin, Han Ai-guo, Ju Guang-hong. 2002. Study on Integrated Zoning of Weathering Degree of Rock Mass[J]. Journal of Engineering Geology, 10(1): 20-25 (in Chinese with English abstract)

Shen Liang-feng Gu Su-Lin. 2001. Fuzzy comprehensive evaluation for the slope stability analysis[J]. Journal of Heilongjiang Commercial College (Natural Sciences Edition), 17(4): 111-113 (in Chinese

with English abstract)

Sun Jin-zhong, Chen Xiang, Yuan Jia-bei, Tian Xiao-pu. 2006. Test Methods for Detecting Weathering Degrees of Stone Cultural Relics [J]. Science & Technology Review, 24(8): 19-24(in Chinese with English abstract)

Shao Sheng-fu, Li Yuan-bing. 2001. Application of pyrite to weathering zones division of rocks[J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 15(2): 42-44(in Chinese with English abstract)

Shang Yan-jun, Wu Hong-wei, Qu Yong-xin. 2001. Comparison of chemical indices and micro-properties of weathering degrees of granitic rocks-a case study from Kowloon, Hong Kong[J]. Scientia Geologica sinica, 36(3): 279-294(in Chinese with English abstract)

Tan Zhuo-ying, Yue Zhong-qi, Tan Guo-huan, Li Huan-fen. 2007. Study on specific energy of diamond drilling and real-time classification of weathered granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics And Engineering, 26(supp.): 2907-2912(in Chinese with English abstract)

Wang Lian-fen, Xu Shu-bai. 1990. Introduction to analytic hierarchy process[J]. Beijing: China Renmin University Press: 1-20(in Chinese with English abstract)

Wu Xi-yong, Luo Jian, Wei You-yi. 2004. Research of rock weathering and chemical composition of Rock[J]. Geology and Prospecting, (4): 85-88(in Chinese with English abstract)

Zuo San-sheng, Ren Guang-ming. 2002. Discussion of using quantitative indexes to study rock mass weathering[J]. Journal of Mountain Research, 20(3): 365-369(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

陈守煜. 1998. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社:1-8

杜锦华. 2001. 晋阳文史资料(第五辑)[M]. 太原:政协太原市晋源区文史资料委员会:1-10

方　云,邓长青,李宏松. 2001. 石质文物风化病害防治的环境地质问题[J]. 现代地质,15(4):458-468.

黄克忠. 1998. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社:1-3

巨广宏. 2006. 黄河拉西瓦水电站坝区花岗岩风化研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,17(1):124-129

孔广胜. 2005. 利用钻孔超声成像的图像特征进行岩石风化程度分类[J]. 物探与化探,29(4):367-368

廖颜萱. 1994. 风化岩分带指标定量研究[M]. 北京:地震出版社:23-28

李日运,吴林峰. 2004. 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,23(22):3830-3833

李智毅,张咸恭,李宏松. 1995. 忠县地面石质文物的风化病害研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报,20(4):378-382

牟会宠,杨志法,伍法权. 2000. 石质文物保护的工程地质力学研究[M]. 北京:地震出版社:1-20

聂德新,韩爱国,巨广宏. 2002. 岩体风化的综合分带研究[J]. 工程地质学报,10(1):20-25

沈良峰,顾苏林. 2001. 边坡稳定性分析的模糊综合评判法[J]. 哈尔滨商业大学学报,17(4):111-113.

孙进忠,陈 祥,袁加贝,田小甫. 2006. 石质文物风化程度超声波检测方法探讨[J]. 科技导报,24(8):19-24

邵盛福,李院兵. 2001. 黄铁矿在划分岩石风化带中的作用[J]. 湖北地矿,15(2):42-44

尚彦军,吴宏伟,曲永新. 2001. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比-以香港九龙地区为例[J]. 地质科学,36(3):279-294

谭卓英,岳中琦,谭国焕,李焯芬. 2007. 金刚石钻进比功及风化花岗岩实时分级研究[J]. 岩石力学与工程学报, 26(增刊):2907-2912

王莲芬,许树柏. 1990. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社:1-20

巫锡勇,罗健,魏有仪. 2004. 岩石风化与岩石化学成分的变化研究[J]. 地质与勘探,(4):85-88

左三胜,任光明. 2002. 运用定量指标研究岩体风化问题的探讨[J]. 山地学报,20(3):365-369

## Rock Mass Weathering Grading of Jinyang Grand Buddha

TIAN Xiao-fu[1], SUN Jin-zhong[2], LIU Ya-qian[2]

(1. *Beijing Institute of Geological Engineering*, *Beijing* 100048;
2. *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083)

**Abstract**: Large scale lithic cultural relics such as grottos and stone sculptures, mostly carved on rock cliff and standing in the open air for many years, are suffering from serious weathering diseases so that their existence is badly threatened. Therefore, it is significant to study the weathering classification of lithic cultural relics for their protection. So far, there have been many studies about the types and mechanisms as well as influence factors of weathering diseases of lithic cultural relics, and some useful results have been obtained. Many of them, however, focus on some individual factors such as appearance profiles or rock property parameters of lithic cultural relics, and are not integrated enough. In this paper, an evaluation index system is established based on colligating factors from appearance and rock mass integrality as well as physical and mechanical properties of lithic cultural relics, and weathering classification criteria of lithic cultural relics based on this index system are scaled according to the study results so far and the test results of this work. Furthermore, this study suggests a set of procedures for weathering classification of lithic cultural relics, colligating cultural relic peculiarity and engineering property of lithic cultural relics, and combining fuzzy mathematic method and analytic hierarchy process (AHP). Finally, the weathering state of the rock mass of Jinyang Grand Buddha in Taiyuan, China is evaluated by means of this method, which provides some lines of evidence for the repairing of the Jinyang Grand Buddha.

**Key words**: lithical cultural relics, rock weathering grading, index system, Jinyang grand buddha