

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0474-07

古建筑风化石质构件力学参数的确定方法

刘成禹¹, 何满潮²

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福州 350108; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对目前常规确定岩石力学参数的方法只能得出岩块的整体强度, 不能反映古建筑石质构件风化层内力学参数逐渐变化, 无法很好地满足石质古建筑稳定性、耐久性研究的不足, 提出了综合运用现场穿透波 CT 测试、表面回弹测试和室内试验确定风化石质构件力学参数的方法。方法的实施主要包括: 通过现场穿透波 CT 测试, 获得纵波波速在石质构件深度剖面上的分布; 现场选取与欲研究的石质构件类似的岩石做室内力学试验和波速测试, 得出力学参数与波速的统计关系; 上述两者结合得出力学参数在石质构件深度剖面上的分布, 在此基础上分析风化层内力学参数随深度的变化关系; 对不同风化分区代表性石构件进行风化深度研究和表面回弹测试, 得出构件表面强度比与风化深度的关系。以义乌宋代古月桥为例, 对其方法进行了系统的介绍, 并对古月桥承载条石风化层内力学参数随深度的变化关系以及表面强度与风化深度的关系进行了研究。研究表明: 义乌宋代古月桥承载条石风化层内的抗压强度比、弹性模量比随深度呈负指数关系变化; 表面强度比与风化深度呈 2 次多项式关系。

关 键 词: 风化; 石质构件; 力学参数; 声波测试; 回弹测试

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Methods to obtain mechanical parameters of weathered rock constructional elements of ancient buildings

LIU Cheng-yu¹, HE Man-chao²

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

2. College of Mechanics and Architecture, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The conventional method of determining rock mechanical parameters now can only obtain the overall strength of the rock; while in the weathered layer of ancient buildings rock constructional elements, of which the mechanical parameters gradually change. It is not enough to study the stability and durability of rock ancient buildings. So a method with integrated use of on-site sonic CT test, surface rebound and laboratory test to obtain the mechanical parameters of rock constructional elements is proposed. The method is put into action as follows. The longitudinal wave velocity distributions along the depth profile in the rock constructional elements are acquired by the on-site sonic CT test. The statistical relation of the mechanical parameters and wave velocity is obtained by selecting rock on-site that analogous to the rock constructional element studied to do the indoor mechanical tests and the wave velocity test. The mechanical parameters distribution along the depth profile in the rock constructional elements is derived by combining the outcomes mentioned above; based on this, the relationship between mechanical parameters and depth within the weathered layer is analyzed. The relationship between the surface compressive strength ratio and the weathered depth is derived by weathered depth studying and surface rebound test on the typical rock constructional element in different weathering zones. This method is systematically introduced in this paper with the example of Guyue Bridge in Yiwu built in the Song Dynasty. This paper studied the relationship between mechanical parameters and depth within the weathered layer and the relationship between surface strength of rock constructional element and weathered depth of weathered rock constructional element which were in the bearing structure of the Song Dynasty Guyue Bridge in Yiwu. The studies show that: in the bearing block stone of the Song Dynasty Guyue Bridge, the compressive strength ratio and the elastic modulus ratio vary negative-exponentially with the depth in weathered layer; the relationship between compressive strength ratio of surface and weathered depth conforms to the two order polynomial.

Key words: weathering; rock constructional element; mechanical parameters; sonic test; rebound test

收稿日期: 2012-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41272300)。

第一作者简介: 刘成禹, 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要从事工程地质、隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: Liuchengyuphd@163.com

1 引言

保存于地上的古建筑是祖先为我们留下的无价之宝和得天独厚的旅游资源,对这些古建筑进行保护并进行合理的开发利用是我国的一项长期国策^[1-3]。这些珍贵的古建筑中很多是以岩石作为主要建筑材料建造的。古建筑的石质构件在持续不断地风化作用下,力学性质逐渐劣化,严重影响石质古建筑的稳定性和耐久性。风化石质构件的力学参数是石质古建筑稳定性、耐久性 & 保护方案研究所需的基础参数。在尽可能减少对古建筑损伤的前提下获得满足研究需要的风化石质构件力学参数,对石质古建筑稳定性、耐久性研究具有重要意义。

关于风化岩石的力学参数,多位学者已进行过研究并取得一些对工程实践有价值的研究成果,但这些研究主要集中于强风化和弱风化岩块力学参数、本构关系的试验研究,得出的是风化岩块的力学参数;力学参数的测定主要采用常规的岩石力学试验方法^[4-6]。由于研究对象工程尺度较小的原因,古建筑石质构件的风化程度不能笼统地看作相同的,它的风化程度具有由表及里逐渐减弱,力学性能具有由表及里逐渐变化的特点。上述风化岩块力学特性的研究成果和测试方法是不能反映古建筑石质构件的上述力学特征的。

古建筑石质构件风化后,由于下列条件的限制,不能采取现场取样,再在室内做力学试验的常规方法来确定风化层的力学参数。

(1) 风化层不便取样。很多古建筑都属文物,由于文物保护的需要,对取样尺寸及取样位置均有十分严格的要求,很多情况下基本无法取到能用之进行力学试验的试样;即使能取到试样,由于风化层结构松散,试样制作过程中也极易破坏。

(2) 古建筑石质构件的风化层一般较薄,它的物理、力学参数在风化层内是逐渐变化的,常规的室内力学试验只能得出试件整体的力学参数,不能反映风化层内力学性能由表及里逐渐变化的特征。

针对风化石质构件的特点和石质古建筑稳定性、耐久性研究的要求,笔者提出了综合运用现场穿透波 CT 测试、表面回弹测试和室内试验确定风化石质构件力学参数的方法。现结合笔者完成的义乌宋代古月桥稳定性、耐久性研究项目对这一方法及主要研究成果进行说明。

2 工程概况

古月桥位于浙江省义乌市赤岸镇雅治街村西

龙溪上,建于宋嘉定六年(公元 1213 年),为全国重点文物保护单位,其承载结构由 40 根长 2.80~4.75 m,宽 0.30 m,高 0.55~0.58 m 的由粉砂岩加工而成的纵肋条石和横锁石组成,如图 1、2 所示。



图 1 义乌宋代古月桥全貌

Fig.1 Overall perspective of Guyue Bridge in Yiwu built in the Song Dynasty

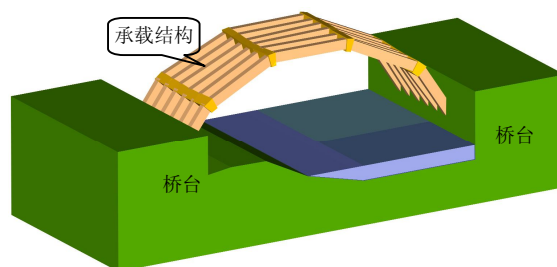


图 2 义乌宋代古月桥承载结构示意图

Fig.2 Sketch of bearing structure of Guyue Bridge in Yiwu built in the Song Dynasty

现场调查发现,古月桥的桥台和基础是稳固的,桥体的变形和破坏主要由承载结构决定。为满足古月桥稳定性、耐久性研究的需要,必须对组成承载结构的石质构件(纵肋条石、横锁石)现状条件下的力学参数进行研究。

3 石质构件力学参数确定的技术路线

为满足义乌宋代古月桥稳定性、耐久性研究的需要及文物保护对现场取样的具体要求,笔者采用如图 3 所示的技术路线确定石质构件风化层的力学参数。

确定风化石质构件力学参数的方法简述如下:

(1) 在现场勘察的基础上,根据研究需要及风化程度对研究区石质构件进行分区;

(2) 在各风化分区内选取代表性条石在现场做穿透波 CT 测试,得出纵波波速在深度剖面上的分布图;

(3) 在现场选取与欲研究的风化条石类似的岩石,做室内力学试验和波速测试,在此基础上得出力学参数与波速的统计关系式;

(4) 综合步骤(1)得到的波速在深度剖面上的分布图和步骤(3)得出的力学参数与波速的统计关系,作出力学参数在深度剖面上的分布图,在此基础上得出风化层内力学参数与深度的关系;

(5) 选取不同风化分区的代表性岩石及新鲜岩石在现场作表面回弹测试,在此基础上得出风化岩石表面强度比与风化深度的关系。

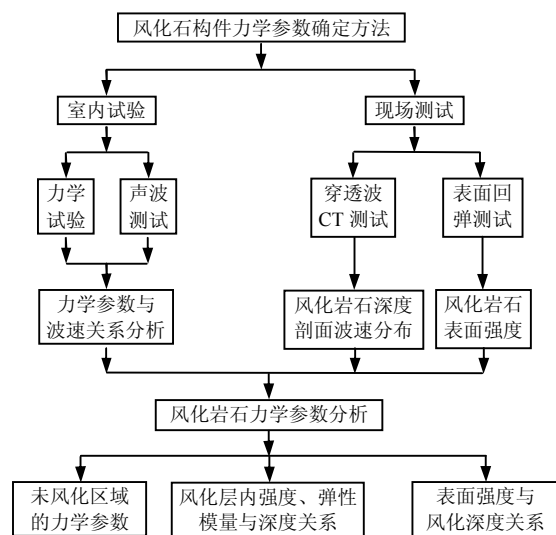


图3 风化石质构件力学参数确定的技术路线

Fig.3 Technical line to obtain mechanical parameter of weathered rock constructional element

4 古月桥石质构件力学参数的确定

为确定承载结构中条石的风化深度及其力学参数,在现场调研的基础上,根据承载结构中各条石的风化程度将承载结构分为严重风化、中等风化和轻微风化3个区,如图4所示。

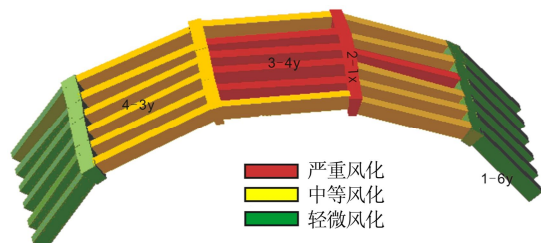


图4 承载结构风化分区及代表性检测条石位置图

Fig.4 Weathering partitions and the positions of representative tested block stones in bearing structure

在承载结构风化分区的基础上,选取各分区的代表性条石(图4中编号4-3y、3-4y、2-1x、1-6y条石)进行风化深度研究、穿透波CT测试及表面回弹测试。

4.1 风化深度研究

从现有资料看,确定石质古建筑风化深度的方法主要是基于风化前后,岩石的结构、强度及成分等会发生不同程度的变化,在此基础上,取不同深度岩样作物理指标、化学成分、矿物成分等测试。以这些测试结果的单一指标或多个指标沿深度的变化趋势来确定岩石的风化深度^[7-8]。由于风化岩样的物理力学指标(如重度、强度、孔隙率等)的测试结果受取样扰动影响较大,所以根据这些指标沿深度的变化来确定风化深度的准确性决定于取样的扰动程度。风化岩样的矿物成分和化学成分不受取样扰动的影响,且具有测试方便、所需样品少、取样对研究对象损伤少等优点,所以根据它们随深度的变化来确定风化深度比较适宜于石雕、石窟及石质古建筑。

为确定风化深度,在代表性风化条石不同深度取岩样做X射线衍射和化学分析,得出不同深度岩样的矿物成分和化学成分。图4中4-3y条石不同深度岩样矿物成分、化学成分的测试结果见表1、2。

表1 4-3y条石不同深度处岩样的矿物质量百分数

Table 1 Mineral mass percentage of rock specimens in different depths of block stone 4-3y

矿物成分	距表面深度/cm					
	0~1.5	1.5~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0	7.0~9.0	9.0~12.0
石英	37.1	36.3	35.7	36.3	38.0	43.9
长石	33.6	37.8	33.1	24.6	27.4	39.6
方解石	0.7	2.4	0.0	1.7	0.0	0.8
黄铁矿	0.6	0.9	0.0	1.3	0.0	0.0
黏土	28.0	22.6	31.2	36.1	34.6	15.7

表2 4-3y条石不同深度处岩样的化学成分质量百分数

Table 2 Chemical constituent mass percentage of rock specimens in different depths of block stone 4-3y

化学成分	距表面深度/cm					
	0~1.5	1.5~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0	7.0~9.0	9.0~12.0
SiO ₂	67.50	67.80	69.20	71.10	70.00	69.60
Al ₂ O ₃	13.10	12.10	12.50	12.70	12.10	12.50
Fe ₂ O ₃	1.40	1.33	1.64	2.14	1.17	1.01
MgO	0.54	0.60	0.48	0.46	0.47	0.50
CaO	1.95	1.53	1.33	1.34	1.83	1.35
Na ₂ O	2.54	2.71	2.59	3.29	3.08	2.99
K ₂ O	5.07	4.71	4.79	3.64	4.80	4.52
TiO ₂	0.30	0.31	0.29	0.27	0.25	0.25
H ₂ O ⁺	2.19	2.14	1.82	1.46	1.22	1.15

在上述不同深度岩样矿物成分、化学成分测试的基础上,根据化学风化指数沿深度的变化趋势来确定代表性条石的风化深度,详细内容见文献[9]。

4.2 穿透波 CT 测试

岩石的力学参数与声波波速有较好的对应关系, 超声波测试技术已经成功地运用于岩石、岩体和土体动弹性参数测试、岩体结构分类、参数确定以及岩体质量评价等诸多方面^[10-13]。用穿透波 CT 测试可得出波速在深度剖面上的分布^[14], 以此为基础可确定条石的风化深度, 结合波速与岩石力学参数的统计关系可得出风化层内力学参数沿深度的变化关系。

采用湘潭天鸿电子研究所研制的 DB4 型工程多波参数分析仪进行波动观测与采集。发射端和接收端分别布置在条石的两侧, 如图 5 所示。测试前对发射点和接收点的坐标作了精确测量, 测点间距 $\Delta x = 5 \text{ cm}$ 。发射端用压电陶瓷发射换能器在相应点位进行超声脉动激发, 接收端用石膏固定的压电陶瓷换能器拾取超声波动, 仪器以 $\Delta t = 0.5 \mu\text{s}$ 的时间间隔将波动信息转换为数字记录。在现场测试的基础上, 采用专用的分析软件经反演分析得出测试剖面的纵波波速分布图, 部分测试结果如图 6 所示。图中, V_p 为纵波波速, H 为侧面测试高度, B 为底面宽度。



图 5 1-6y 条石测点照片

Fig.5 Photo of measured points of block stone 1-6y

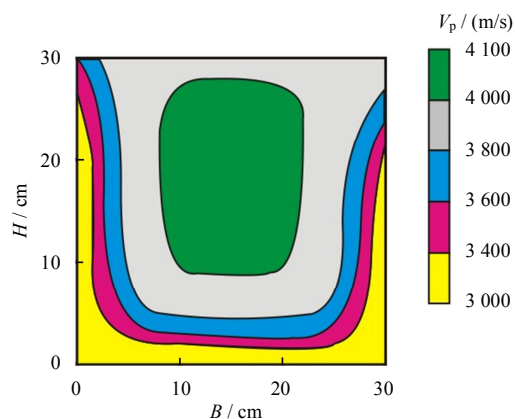


图 6 4-3y 条石剖面纵波波速分布图

Fig.6 Distribution of longitudinal wave speed in cross section of block stone 4-3y

由图可看出: 4-3y 条石侧面、底面出现了小片

低速区, 内部波速变化较小。将 $V_p = 4000 \sim 4100 \text{ m/s}$ 的区域看作该条石的未风化区, 则 4-3y 条石侧面的风化深度约为 $8 \sim 8.5 \text{ cm}$, 该条石按化学风化指数沿深度的变化趋势确定的风化深度为 $7 \sim 9 \text{ cm}$ (详见文献[9]), 两者非常接近, 这说明上述穿透波 CT 测试的结果是可靠的。

4.3 室内试验

为得出条石力学参数与声波波速的统计关系, 在现场选取两块条石, 其中一块取自桥位处, 它为修桥时的散落构件, 岩样的成分、结构、表面风化程度与承载条石相近, 将它当作承载条石的风化岩样; 另一块取自距桥位约 2 km 的采石场, 岩样的成分、结构与承载条石相近, 由于它们开采后不久, 可将其当作本桥承载条石的新鲜岩样。风化岩样制样时, 试件端部至所取岩样表面的距离设为不同, 如图 7 所示 (图中黑线位置为圆芯试件端面), 这样做可使风化岩样试件中包含不同风化深度的试样。将所取岩样制成 21 个直径为 5 cm , 高度为 10 cm 的试件, 其中新鲜岩样 6 个, 编号为 X1~X6, 风化岩样 15 个, 编号为 F1~F15。在室内对上述 21 个岩样先做波速测试然后进行单轴抗压强度测试。



图 7 古月桥风化岩样端部切除前照片

Fig.7 Photo of weathered rock specimens of the Guyue Bridge before head end abscission

4.4 力学参数与声波波速的关系

国内外学者对岩石单轴抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 与纵波波速 V_p 的关系进行了大量的研究。研究表明: σ_c 、 E 与 V_p 大多呈幂指数或指数关系^[15-17]。根据岩样波速和力学试验的结果并参考国内外的相关研究成果, 经统计分析得出承载条石 σ_c (MPa)、 E (MPa) 与 V_p (m/s) 的关系如图 8、9 所示。

由图 8、9 可看出: 古月桥承载条石的单轴抗压强度、弹性模量与纵波波速有较好的相关性, 相关系数 r 的绝对值都在 0.9 以上; 单轴抗压强度、弹性模量与纵波波速呈幂指数关系, 统计关系式如下:

$$\text{即: } \sigma_c = 1.179 \times 10^{-9} V_p^{3.03} \quad (1)$$

$$E = 1.2 \times 10^{-6} V_p^2 \quad (2)$$

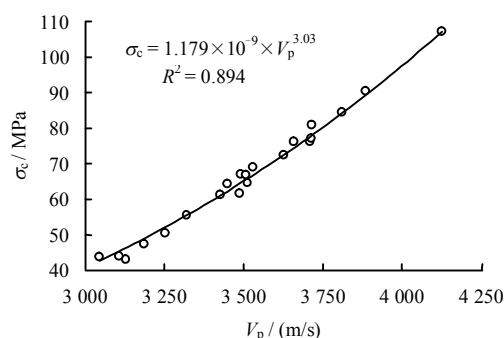


图8 单轴抗压强度与纵波波速关系

Fig.8 Relation of uniaxial compressive strength with longitudinal wave speed

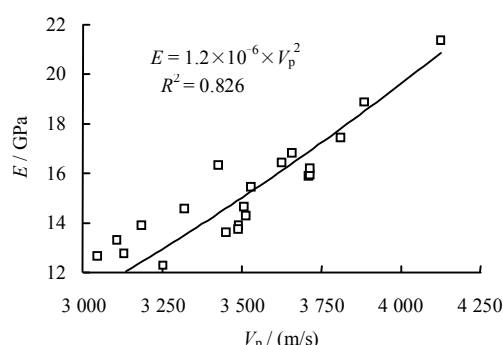


图9 弹性模量与纵波波速关系

Fig.9 Relation of elastic module with longitudinal wave speed

在上列统计关系式(1)、(2)的基础上结合波速在深度剖面上的分布图(图6)可得出单轴抗压强度、弹性模量在剖面上的分布。图10为4-3y条石其中一个剖面上的单轴抗压强度分布图。

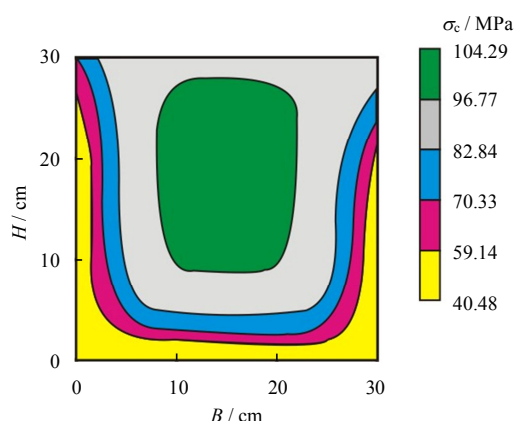


图10 4-3y条石剖面抗压强度分布图

Fig.10 Distribution of uniaxial compressive strength in cross-section of block stone 4-3y

由图10可看出:4-3y条石与水、汽接触较多的底面和侧面中下部强度最低,中间区域强度最高;条石强度由外向内逐渐增高,越靠外侧强度随深度

的变化越明显。

4.5 风化层内力学参数的变化规律^[14]

古建筑石构件风化层的力学参数是由表及里逐渐变化的。为得出风化层内力学参数随深度的变化关系,作如下简化和假定:

(1) 同一根石质构件的材质是均匀的,抗风化能力是相同的;

(2) 在同一根石质构件所处的小环境中,引起石材风化的外部环境是相同的。

在上述假设的基础上,同一深度处岩石的风化程度是相同的,风化层内任一深度处的力学参数可用深度 h 与该深度处的风化强度比 R_c 、风化弹模比 R_E 来表示。 R_c 、 R_E 的计算公式如下:

$$R_c = \frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{cf}} \quad (3)$$

$$R_E = \frac{E_w}{E_f} \quad (4)$$

式中: R_c 、 R_E 分别为风化强度比和风化弹模比。即风化后岩石的强度或弹性模量与新鲜岩石的强度或弹性模量之比。 σ_{cf} 、 σ_{cw} 、 E_f 、 E_w 分别为新鲜岩石、风化岩石的单轴抗压强度和弹性模量。

风化石质构件的抗压强度、弹性模量随深度的变化可表示如下:

$$R_c = \begin{cases} 1 & h \geq H_w \\ f(h) & h < H_w \end{cases} \quad (5)$$

$$R_E = \begin{cases} 1 & h \geq H_w \\ g(h) & h < H_w \end{cases} \quad (6)$$

式中: H_w 为石质构件的风化深度。

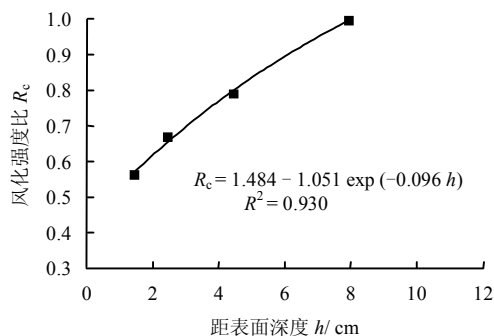
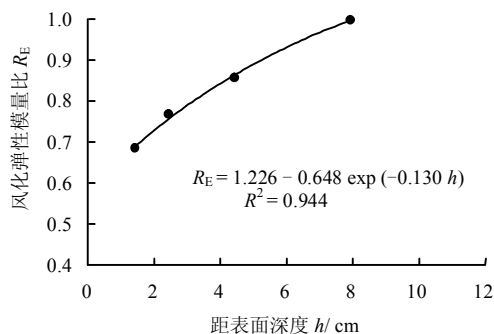
为得出 R_c 、 R_E 随深度的变化关系 $f(h)$ 、 $g(h)$ 。在剖面力学参数分布图中选择代表性区域。在这些区域,量出抗压强度、弹性模量等值线距石质构件表面的距离,求出它们的平均值,将其作为计算点距风化石质构件表面的距离 h 。以 h 为横坐标,以对应位置处的 R_c 、 R_E 为纵坐标,作出 R_c 、 R_E 随深度 h 变化的关系,如图11、12所示。其余条石的曲线形态也与图11、12的类似。

由图11、12可看出:4-3y条石风化层内的 R_c 、 R_E 与 h 有较好的相关性,相关系数 r 的绝对值都在0.96以上;风化强度比、风化弹模比与深度呈负指数关系,统计关系式如下:

$$R_c = f(h) = A_c - B_c \exp(-k_c h) \quad (7)$$

$$R_E = g(h) = A_E - B_E \exp(-k_E h) \quad (8)$$

式中: A_c 、 B_c 、 k_c 、 A_E 、 B_E 、 k_E 为与岩石性质、风化深度及引起岩石风化的外部环境有关的系数。

图 11 4-3y 条石 R_c 与 h 关系Fig.11 Relation of R_c with depth h of block stone 4-3y图 12 4-3y 条石 R_E 与 h 关系Fig.12 Relation of R_E with depth h of block stone 4-3y

由图 11、12 还可看出：在风化深度内，随着距表面深度的增加曲线越来越平缓，即越靠近风化条石外部，风化强度比、风化弹模比随深度的变化越明显。

李宏松^[18]曾对重庆大足宝顶山石窟砂岩不同深度处的强度进行了现场回弹测试。本文根据他的测试结果按上述方法整理出 R_c 与 h 的关系，如图 13 所示。

由图 13 可看出： R_c 与 h 也有较好的负指数关系；也有与图 11、12 相似的随着距表面深度的增加曲线越来越平缓的特点。

4.6 表面强度与风化深度的关系

为得出风化石质构件表面强度与风化深度的关系，义乌宋代古月桥稳定性研究中在现场用回弹仪在代表性条石及新鲜岩石表面作了回弹测试。根据测试结果计算风化条石表面的强度比 R_{c0} ，结果见表 3。对应条石的风化深度也列于表 3。

风化条石的表面强度将随风化深度 H_w 的增加而减小。为得出它与风化深度的关系，根据各条石的风化深度及其表面强度比 $R_{c(h=0)}$ （记作 R_{c0} ），以 H_w 为横坐标， R_{c0} 为纵坐标，作出它们的关系曲线，如图 14 所示。

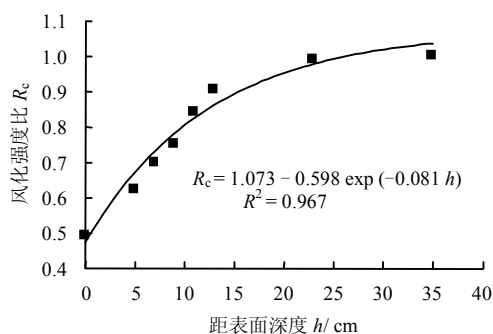
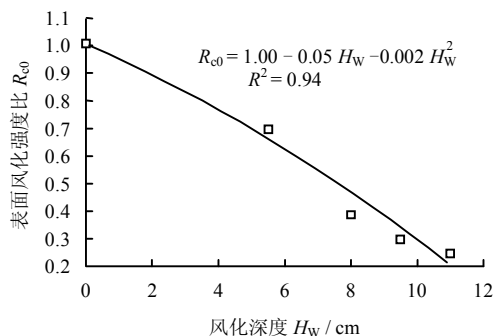
图 13 大足宝顶山石窟砂岩风化强度比 R_c 与深度 h 关系Fig.13 Relation of weathering strength ratio R_c with depth h of sandstone in cliff figures in Dazu Baoding mountain

表 3 代表性条石表面的风化强度比 R_{c0} 及风化深度
Table 3 Surface compressive strength ratios R_{c0} and weathered depth of representative block stone

条石编号	风化强度比 R_{c0}	风化深度 / cm
1-6y	0.69	5.50
3-4y	0.24	11.00
4-3y	0.38	8.00
2-3x	0.29	9.50
新鲜岩石	1.00	0.00

图 14 条石表面强度比 R_{c0} 与风化深度 H_w 关系Fig.14 Relation of surface strength ratio R_{c0} with weathered depth H_w of block stone

由图 14 可看出： R_{c0} 与 H_w 有较好的相关性，相关系数 r 的绝对值在 0.96 以上，它们间近似成 2 次多项式关系；随着风化深度的增加曲线越来越陡，即，风化条石的表面强度比随风化深度增加而降低的速度随风化深度的增加而逐渐加剧。

5 结 论

(1) 本文提出的综合运用现场穿透波 CT 测试、表面回弹测试和室内试验确定风化石质构件力学参数的方法，不仅减少了力学参数研究对古建筑的损伤，还可获得古建筑石质构件风化层内力学参数随深度的变化关系以及表面强度与风化深度的关系。义乌宋代古月桥承载条石力学参数研究的实践证

明,这是获取古建筑石质构件力学参数的可行方法。

(2) 本文的研究表明: 义乌宋代古月桥承载条石风化层内的抗压强度比、弹性模量比随深度呈负指数关系变化; 承载条石表面的强度比与风化深度呈 2 次多项式关系。

参考文献

- [1] 方云, 邓长青, 李宏松. 石质文物风化病害防治的环境地质问题[J]. 现代地质, 2001, 15(4): 458—461.
FANG Yun, DENG Chang-qing, LI Hong-song. Environment geological problems in prevention and cure of weathering diseases of carved stone relics[J]. **Geoscience**, 2001, 15(4): 458—461.
- [2] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [3] 张秉坚, 陈劲松. 石材的腐蚀机制和破坏因素[J]. 石材, 1999, (11): 14—17.
ZHANG Bing-jian, CHEN Jin-song. Erode mechanism and damage factor for stone[J]. **Stone**, 1999, (11): 14—17.
- [4] 代伟, 陈建宏, 李志江. 不同风化程度砂岩力学特性实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 140—142.
DAI Wei, CHEN Jian-hong, LI Zhi-jiang. Research on mechanical properties about sandstone in different levels of weathering[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2008, 30(12): 140—142.
- [5] 张芳枝, 陈晓平, 吴煌峰. 风化泥质软岩变形特性及邓肯模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 610—613.
ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping, WU Huang-feng. Experimental study on deformation properties and Duncan model parameters of soft clayey rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 610—613.
- [6] 张卫中, 陈从新, 余明远. 风化砂岩的力学特性及本构关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 33—36.
ZHANG Wei-zhong, CHEN Cong-xin, YU Ming-yuan. Study of mechanical properties and constitutive relation of weathered sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.1): 33—36.
- [7] TAMER T. Quantification of weathering depths in slightly weathered tuffs[J]. **Environmental Geology**, 2002, 42: 632—641.
- [8] TAKAHIRO O, MASAHIRO C. Weathering rate of mudstone and tuff on old unlined tunnel walls[J]. **Engineering Geology**, 1999, 55:15—27.
- [9] 刘成禹, 何满潮. 石质古建筑风化深度确定方法[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 1(30): 69—73.
LI Cheng-yu, HE Man-chao. Method of determining weathering depth of rock ancient building[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2008, 1(30): 69—73.
- [10] PRASAD M, MANGHNANI M H. Effects of pore and differential pressure on compressional wave velocity and quality factor in Berea and Michigan sandstones[J]. **Geophysics**, 1997, 62(4): 1163—1176.
- [11] 赵明阶, 吴德伦. 工程岩体的超声波分类及强度预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 89—92.
ZHAO Ming-jie, WU De-lun. The ultrasonic identification of rock mass classification and rock mass strength prediction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(1): 89—92.
- [12] 王大雁, 朱元林, 赵淑萍. 超声波法测定冻土动弹性力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 612—615.
WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, ZHAO Shu-ping. Study on experimental determination of the dynamic elastic mechanical parameters of frozen soil by ultrasonic technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 612—615.
- [13] 李维树, 周火明, 陈华, 等. 构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体变形参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1333—1338.
LI Wei-shu, ZHOU Huo-ming, CHEN Hua, et al. Study of unloading rock mass deformation parameters for high arch dam foundation base of Goupitan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1333—1338.
- [14] 刘成禹, 何满潮. 石质构件风化层内力学性能变化规律研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 222—227.
LI Cheng-yu, HE Man-chao. Field and laboratory measurements of the depth variations of mechanical properties and weathering degrees[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(2): 222—227.
- [15] 孙成栋. 岩石声学测试[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [16] 赵明阶, 徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 720—722.
ZHAO Ming-jie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 720—722.
- [17] 燕静, 李祖奎, 李春城, 等. 用声波速度预测岩石单轴抗压强度的试验研究[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(2): 13—15.
YAN Jing, LI Zu-kui, LI Chun-cheng, et al. Experimental study on rock uniaxial compression strength prediction by using acoustic velocity[J]. **Journal of South West Petroleum Institute**, 1999, 21(2): 13—15.
- [18] 李宏松. 大足宝顶山摩崖造像岩体表层风化深度的研究[C]//第四届全国工程地质大会论文集. 北京: 地质出版社, 1997.