

# 原位直剪试验中岩体弹性模量求取方法探讨

陈建胜, 陈从新, 鲁祖德, 陈维维

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 对利用原位直剪试验法向压缩变形曲线求取弹性模量的两种传统方法进行了分析和探讨, 认为利用压缩曲线法和间接现场荷载试验法的经验公式计算出的结果均小于实际值。提出了一种新的利用原位直剪压缩曲线求取弹性模量的综合方法, 同时采用 3 种方法求取了岭澳 3 期工程强风化角岩的弹性模量。分析表明, 原位直剪试验压缩曲线综合法求得的弹性模量为压缩曲线法与间接现场荷载法取值之和, 其计算原理与直剪试验法向加载时力学变形机制一致, 计算值更接近于真实值, 有效地解决了边坡岩体变形稳定性分析中弹性模量取值问题。

**关 键 词:** 弹性模量; 原位直剪; 压缩曲线; 强风化角岩

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

## Discussion of computational method of rock elastic modulus on in-situ direct shear test

CHEN Jian-sheng, CHEN Cong-xin, LU Zu-de, CHEN Wei-wei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Through the discussion and analysis of the two traditional computing method of elastic modulus with the normal compressed deformation curve of in-situ direct shear test, which indicate that the real value is bigger than its directly calculated modulus of confined compression and the modulus calculated by the empirical formula of the in-situ load test. A novel integrated method is proposed to calculate the elastic modulus with the in-situ direct shear compression curve. At the same time, the three methods are used to calculate the elastic modulus of highly weathered hornfels in Lingao III. The elastic modulus calculated with integrated method of in-situ direct shear compression curve is the sum of the directly calculated modulus of confined compression and the modulus calculated by the empirical formula of the in-situ load test. The calculating principle of integrated method is consistent with the mechanics and deformation mechanism of direct shear test with normal direction load. The calculated value is more close to the real value with which the problem of calculating elastic modulus is resolved effectively in the stability analysis of slope rock deformation.

**Key words:** elastic modulus; in-situ direct shear test; compression curve; highly weathered hornfels

## 1 引 言

在岩土工程的设计和计算中, 包括地基的沉降变形估算、地下工程的变形分析、矿区的地表塌陷区预测分析、边坡在外部条件(荷载等)作用下的响应的数值分析均要用到岩土体的弹性模量——压缩模量  $E_s$  和变形模量  $E_0$ , 其中  $E_s$  为无侧向膨胀的压缩模量。根据弹性理论的推导, 压缩模量与变形模量存在一种内在的联系<sup>[1]</sup>:

$$E_0 = E_s \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (1)$$

对于压缩模量  $E_s$ , 可以用实验室的方法求得; 而变形模量  $E_0$  多在天然岩土层上进行荷载试验或旁压试验求得, 泊松比  $\nu$  一般为常数。弹性模量对岩土体的变形计算及数值模拟的准确度起着重要的作用, 是岩土体的一个重要参数。赖琼华<sup>[2]</sup>根据岩土层的现场压板试验结果与地质资料提供的参数统计分析, 提出了变形模量的计算公式, 其研究表明: 影响岩土变形模量的因素很多, 且表现出非线性。在岩土体边坡工程设计中, 通常需对边坡岩土进行现场直剪试验, 以确定其强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值用于坡体极限平衡检算。若同时进行现场荷载试验, 则会

收稿日期: 2010-03-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 10872207); 交通部西部科技项目“高速公路结构健康监测关键技术研究”。

第一作者简介: 陈建胜, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学及边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: cjs163830123@163.com

增加试验费用。现场直剪试验<sup>[3]</sup>在法向力加载阶段类似于岩土层荷载试验。童志怡等<sup>[4]</sup>通过现场直剪试验的成果求取了某风化花岗岩层的压缩模量,但其压缩模量的求取方法存在一定的系统误差。对岩土体变形模量的求取,很多学者做过广泛的研究。梅国雄等<sup>[5]</sup>研究了一种利用  $e-p$  (孔隙比-荷载) 曲线求取土体侧限压缩模量的简易方法,用于解决工程关心的沉降问题。周翠英<sup>[6]</sup>、张振南等<sup>[7]</sup>研究了软土及松散岩块侧限压缩模量与孔隙率及岩块抗压强度的关系,得出其侧限压缩模量与孔隙率成幂指数关系,且与岩体抗压强度呈线性关系。能否通过现场直剪试验较准确地求取强风化岩体的弹性模量? 本文对这一问题进行相关探讨,由岭澳3期工程强风化角岩的现场直剪试验结果的统计分析 & 弹性理论推导提出可靠的岩土体弹性模量求取方法。

## 2 弹性模量的求取方法

弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  是对岩土体进行变形分析所必需的力学参数,其选取准确与否将直接影响到后续数值计算结果的准确性。传统的求取方法主要有实验室压缩试验法及现场荷载试验法。

### (1) 压缩曲线法<sup>[1]</sup>

土的压缩曲线是通过压缩试验求得的,把原状土体置入仪器钢环中,上下加透水石及钢板,分级加载,用百分表测土样的下沉量并计算其相应的孔隙比,从而得出  $e-p$  压缩曲线。由  $e-p$  曲线求取土体的压缩模量:

$$E_s = -\frac{\Delta p}{\Delta e}(1+e_0) \quad (2)$$

### (2) 现场荷载试验法<sup>[1]</sup>

挖试坑至需测试的土层顶面,在坑底置放刚性承压板,在板上分级施加荷载,压板面积大致为  $2\ 500\sim 10\ 000\text{ cm}^2$ 。在分级加压过程中用百分表测取压板的沉降量,每级荷载相当于预估极限荷载的  $1/10\sim 1/15$ ,持续加载至岩土地基破坏;利用  $p-S$  曲线直线段的实测资料并借助弹性理论公式,可计算出土的变形模量:

$$E_0 = \frac{\pi}{4} \frac{1-\nu^2}{S} pD \quad (\text{圆形压板}) \quad (3)$$

式中:  $D$  为直径;  $\nu$  为泊松比;  $S$  为相应与  $p$  的荷载板下沉量。

$$E_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1-\nu^2}{S} pB \quad (\text{方形压板}) \quad (4)$$

式中:  $B$  为边长。

对于强风化的岩体,由于颗粒比较大及其类土性,一般采用现场荷载试验法。

现场直剪试验是求取岩土体  $c$ 、 $\varphi$  值的有效方法,试验过程中的法向加载一般分  $3\sim 5$  级加载,因此,可以用法向加载的成果来估算该岩土层的变形模量。童志怡等<sup>[4]</sup>根据压缩模量的定义式  $E_s = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon} =$

$\frac{\Delta p}{\Delta H/H}$ , 其中  $H$  为试样的初始高度 ( $\Delta \varepsilon$  为应变增量),在试验报告中取  $H$  为剪切盒的高度  $50\text{ cm}$ ,其前提需假设试件下部岩土体近似为刚体,不产生竖向变形。但由于剪切盒内岩土体与下部岩层相连,压缩土层的厚度大于剪切盒土层的高度,故根据剪切盒高度计算出来的应变是偏大的,计算出来的  $E_s$  值及换算得到的  $E_0$  整体偏小。同时试验岩土层均存在一定的侧向限制作用,上部剪切盒岩体横向变形受刚性剪切盒的限制,而下部岩体则受周围岩层的侧向限制;因此,在一定程度上类似现场荷载试验,压缩土层的影响深度约为试件尺寸的  $2\sim 3$  倍<sup>[1]</sup>;但上部试件框的刚性约束使得其上部压力并未分散到周围空间而直接通过试件传递到试件下部的岩土体。因此,测得的岩土体沉降量  $S$  要大于实际值,依此计算得到的弹性模量相对实际值偏小。上述分析表明了现有的两种弹性模量近似算法的结果均偏小,并且未能估计其误差的大小。

### (3) 原位直剪压缩曲线综合法

如图1所示,  $KM$ 、 $LN$  为刚性试件框,将原位直剪试验的法向加载引起的岩土体竖向沉降量分为两部分:试件  $KLMN$  压缩固结产生的竖向位移  $\Delta H_1$  为试件在无侧向位移条件下压缩固结产生的变形量;  $\Delta H_2$  为试件下部岩土体在法向荷载作用下引起的竖向沉降位移,相当于荷载试验中竖向荷载作用于下部岩土体上时引起的下部岩土体的沉降量。  $H$  和  $B$  分别为试件的高和边长,依此分别采用式(2)、(4)计算出岩土体的弹性模量。

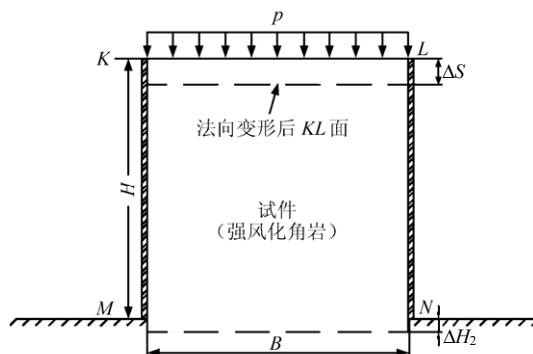


图1 原位直接试验法向加载示意图  
Fig.1 Sketch of in-situ direct shear test with normal loads

$$E_0 = E_s \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) = \frac{\Delta p}{\Delta H_1} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) H \quad (5)$$

$$E_0 = \frac{\sqrt{\pi} (1-\nu^2)}{2} \frac{\Delta p B}{\Delta H_2} \quad (6)$$

而总沉降量是试件及其下部岩土体的竖向变形的总和，即  $\Delta S = \Delta H_1 + \Delta H_2$ ：

$$\Delta S = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{\Delta p}{E_0} \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) H + \frac{\sqrt{\pi}}{2} (1-\nu^2) B \right] \quad (7)$$

由式 (7) 则可求出该岩土体的变形模量为

$$E_0 = \frac{\Delta p}{\Delta S} \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) H + \frac{\sqrt{\pi}}{2} (1-\nu^2) B \right] \quad (8)$$

根据其变形模量与压缩模量之间的关系式(1)，得到其压缩模量  $E_s$  为

$$E_s = \frac{\Delta p}{\Delta S} \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) H + \frac{\sqrt{\pi}}{2} (1-\nu^2) B \right] (1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu})^{-1} \quad (9)$$

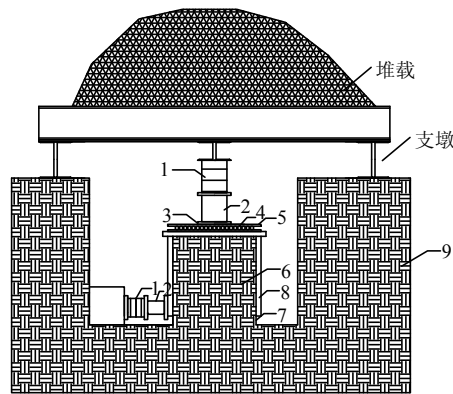
由式 (9) 明显可以看出，岩土体的弹性模量由试件的固结部分与其下部岩土体荷载试验之和构成。因此，原位剪切试验中压缩曲线法与间接现场荷载法求得的模量之和是岩土体的真实模量。由此可见，工程中应用的近似求法存在较大的误差。因此，在利用直剪压缩曲线求取弹性模量时应综合分析并采用原位直剪试验压缩曲线综合法 (式 (8)、(9)) 进行计算，保证弹性模量取值的准确性。

### 3 现场试验概况

岭澳 3 期核电站厂址区范围内出露泥盆世和第四系地层。泥盆系主要分布于厂址区北部，出露面积为 0.355 km<sup>2</sup>，占厂址区陆域面积的 56.8%。厂址区仅出露晚泥盆世春湾组，其特征为一套浅海-海湾-湖坪沉积为主的细碎屑岩、泥质岩夹钙、硅质建造，总厚度大于 1 090 m。第四系主要分布于厂址区南部，出露面积为 0.3 km<sup>2</sup>，占厂址区总面积的 43.2%。地层岩石中节理较为发育，且沿节理面发生风化蚀变和崩解，加之潮湿炎热气候，常有季候风剥蚀和长时期的水化学作用等，岩石风化较强烈，风化壳厚度变化较大。

在预先选定的试验场地，先清理地表土层并开挖试验槽，在强风化角岩层出露的位置，将岩体加工成 50 cm×50 cm×50 cm 的试样。试件间距不小于试件边长，即 50 cm，试件周围岩面修凿平整后将 50 cm×50 cm 的试保护件框套在试件上，试件框下部预留一定的剪切缝。安装法向荷载系统时应保证试件顶面水平，并且液压千斤顶的轴线通过试件剪切面的中心。此次试验采用平推法，在剪切荷载系统安装时，在试体受力面用水泥砂浆粘贴一块垫板

并使垫板垂直预定剪切面，剪切荷载作用轴线应平行预定剪切面着力点与剪切面的距离不宜大于剪切方向试体长度的 5%，现场直剪试验装置如图 2 所示。试件的加载系统安装完毕后，即可开始剪切试验，先将法向荷载分级加载到一定值后，用压力表及百分表记录每级法向荷载大小及其对应的垂直位移，然后分级加载剪切荷载直至试件破坏，并记录相对应的数据。



1—传力柱 2—液压千斤顶 3—钢垫板 4—滚轴排 5—承压板及钢板  
6—试件 7—剪切缝 8—试件框 9—强风化角岩

图 2 现场直剪试验装置示意图  
Fig.2 Sketch of in-situ direct shear test

### 4 试验结果分析

本文从岭澳三期核电厂址原位直剪试验中选取 16<sup>#</sup>孔 A、B、C 共 3 组试验数据做为分析样本，对强风化角岩的弹性模量不同求取方法及结果进行分析。

#### 4.1 强风化角岩的 p-S 曲线

在岭澳核电选址区 16<sup>#</sup>孔附近对强风化角岩进行了原位直剪试验，按试验目的对 A、B、C 组天然状态下的试样求取其弹性模量，包括压缩模量及变形模量。弹性模量的求取方法主要是对试验法向加载段的压缩曲线做一定程度的近似来进行取值，图 3 为 A 组试件 4 种不同级法向加载情况下的 p-S 曲线图。由图 1 的 p-S 曲线可以看出，第 1 次法向加载 (预压) 时的垂向沉降变形比重复加载时的大，并呈现出一定的非线性趋势，而第 2 次法向加载时的压缩曲线基本呈线性增长；出现上述现象主要是由于在制作试件时，周围土体开挖对试件有一定的松动，初次加载时存在一个压密实的过程，所以难以很好地反映强风化岩体的弹性变形性质，从而表现出一定的非线性。在低法向荷载作用下，沉降变形随荷载增加呈线性增加，当法向荷载为 450 kPa

时，两次加载的最后阶段， $p$ - $S$  曲线均出现非线性现象，表明已接近达到极限荷载。

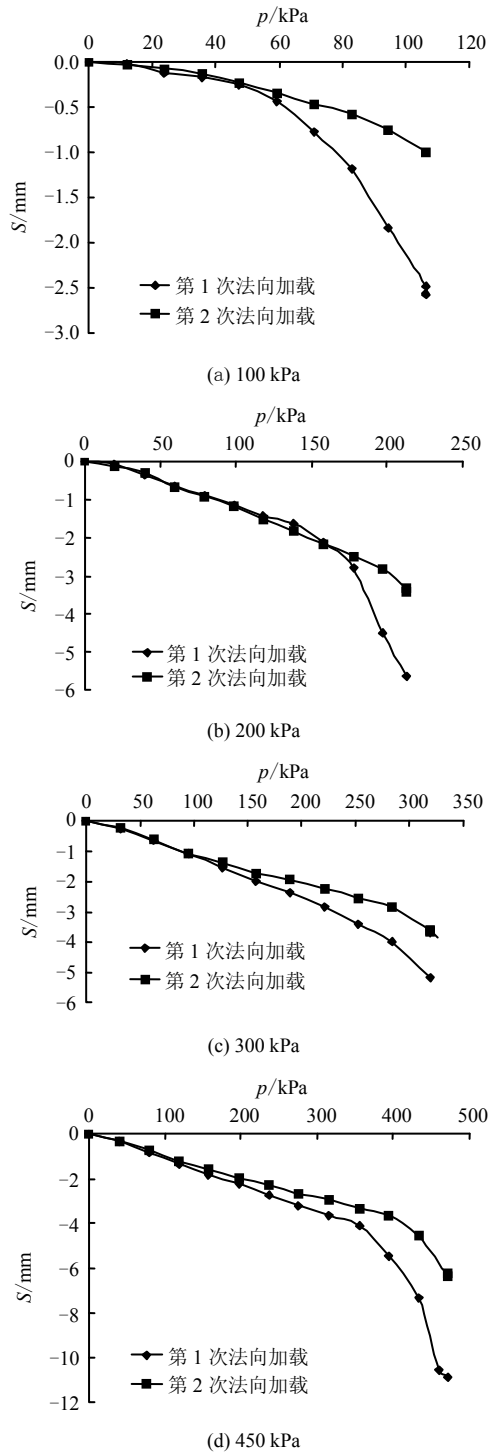


图3 A组试件4种不同法向应力反复加载情况下的  $p$ - $S$  曲线图

Fig.3  $p$ - $S$  curves of group specimen A with 4 normal stress repetitive loadings

#### 4.2 弹性模量求取结果

根据原位直剪试验法向加载段的  $p$ - $S$  曲线，本文先采取了两种传统简化方法求取强风化角岩弹性模量的方法，即压缩曲线法及间接现场荷载法。压

缩曲线法采用模量的定义来求取其侧限压缩模量，计算垂直应变时，近似取试件高度为法向荷载影响区高度，故计算得到的应变值比真实的应变值偏大，求取的压缩模量将小于实际值；间接现场荷载法，由于试验岩体试件的四周用刚性模板支护，其侧向变形受到限制，与受侧向变形限制的现场荷载试验相一致，因此，可采取其经验公式计算岩体变形模量，而现场荷载法的相关试验表明，其垂直影响深度是试件尺寸的2~3倍<sup>[1]</sup>。原位直剪试验压缩曲线综合法则把位移沉降分解成试件和其下部岩土体两部分分别计算（上部按压缩曲线理论求解，下部岩土体套用现场荷载试验经验公式），其计算结果见表1。由表可看出，间接现场荷载法的结果均大于压缩曲线法的取值，表明间接荷载法在直剪试验中求取弹性模量具有一定的可行性；同时原位直剪试验压缩曲线综合法的弹性模量取值为两者之和，说明前两种方法在工程应用中有很大的局限性。

表1 3种方法得到的强风化角岩弹性模量值

Table 1 Calculated values of highly decomposed hornfels elastic modulus with three methods

编号	压缩曲线法		间接现场荷载法		原位直剪压缩曲线综合法	
	$E_s$ /MPa	$E_0$ /MPa	$E_s$ /MPa	$E_0$ /MPa	$E_s$ /MPa	$E_0$ /MPa
A1-1	65.504	48.660	74.118	55.059	139.622	103.719
A1-2	66.128	49.124	78.049	57.979	144.177	107.103
A2-1	36.822	27.353	45.469	33.777	82.291	61.130
A2-2	33.329	24.759	42.388	31.488	75.717	56.247
A3-1	35.310	26.230	41.891	31.119	77.201	57.349
A3-2	46.468	34.519	52.538	39.028	99.006	73.547
A4-1	42.280	31.408	47.117	35.001	89.397	66.409
A4-2	53.322	39.611	56.238	41.777	109.560	81.388
B1-1	47.294	35.133	63.432	47.121	110.726	82.254
B1-2	37.793	28.075	55.548	41.264	93.341	69.339
B2-1	50.558	37.557	60.733	45.116	111.291	82.673
B2-2	51.369	38.160	62.169	46.183	113.538	84.343
B3-1	71.394	53.036	77.858	57.837	149.252	110.873
B3-2	47.066	34.963	54.060	40.159	101.126	75.122
B4-1	60.974	45.295	67.308	50.000	128.282	95.295
B4-2	51.651	38.369	56.705	42.124	108.356	80.493
C1-1	63.703	47.322	75.425	56.030	139.128	103.352
C1-2	49.534	36.797	55.750	41.414	105.284	78.211
C2-1	41.846	31.086	50.136	37.244	91.982	68.330
C2-2	42.904	31.872	46.712	34.700	89.616	66.572
C3-1	87.573	65.054	105.007	78.005	192.580	143.059
C3-2	57.879	42.996	69.782	51.838	127.661	94.834
C4-1	35.009	26.007	37.166	27.609	72.175	53.616
C4-2	42.713	31.730	46.135	34.272	88.848	66.002

注：岩土体泊松比为经验取值， $\nu=0.3$ 。

#### 4.3 不同方法结果对比分析

原位直剪试验中两种方法求取强风化岩体的弹性模量都存在一定的近似假设，图4为两种方法对试件弹性模量的取值图。由图可以明显看出，间接

现场荷载法计算得到的弹性模量值均在一定程度上大于压缩曲线法。图 5 为间接现场荷载法与压缩曲线法取值相对于原位直剪试验压缩曲线综合法取值的相对误差。从图中可以看出，压缩曲线法的弹性模量计算值的相对误差比间接现场荷载法的取值误差更大，且两者的计算取值相对误差均在 40%~60%，故在利用原位直剪压缩曲线求取岩土体弹性模量时应综合分析计算，以免产生较大的误差而影响到工程设计。

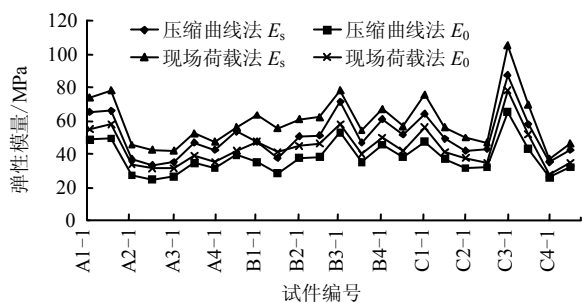


图 4 不同方法的弹性模量取值  
Fig.4 Calculated values of elastic modulus with different methods

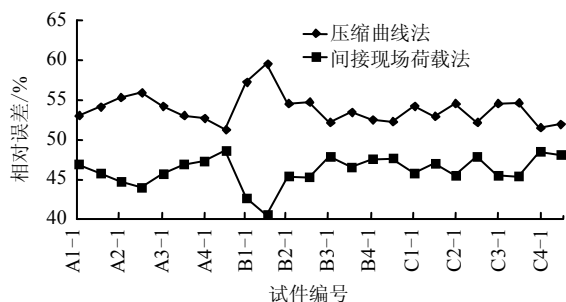


图 5 现场荷载法与压缩曲线法取值的相对误差  
Fig.5 Relative error of calculated values in methods of in-situ loading and compression curves

### 5 结 论

(1) 压缩曲线法忽视了其下部岩体为弹性变形体，在确定垂直变形时应变值偏大，使得计算得出的弹性模量值小于实际值。

(2) 间接现场荷载法中刚性模板强化了对试件侧向变形的限制作用，其法向荷载通过试件全部传递到试件下部岩土体，加大了其竖向沉降量，因而其弹性模量计算值较实际值偏小。

(3) 较大的法向荷载会使强风化岩体的压缩变形曲线呈现一定的非线性，弹性模量的计算点只能取在垂直变形的线性区。

(4) 原位直剪压缩曲线综合法，揭示了直剪试

验法向加载状态下岩土体竖向变形机制，其弹性模量的取值是相对科学的，且符合实际情况。因此，建议在利用原位直剪试验压缩曲线求取岩土体弹性模量时采用此方法。

### 参 考 文 献

[1] 刘成宇. 土力学(第二版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 93-100.

[2] 赖琼华. 岩土变形模量取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1750-1754.

LAI Qiong-hua. Determination of deformation moduli for rock and soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.): 1750-1754.

[3] 陈建胜, 陈从新, 鲁祖德. 强风化角岩力学变形特性的直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2869-2874.

CHEN Jian-sheng, CHEN Cong-xin, LU Zu-de. Direct shear test for strength and deformation characteristics of highly decomposed hornfels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2869-2874.

[4] 童志怡, 鲁祖德. 台山核电站 1 期厂区内边坡强风化花岗岩体原位直剪试验报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.

[5] 梅国雄, 宰金珉, 赵维炳. 土体侧限压缩模量简易计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1057-1060.

MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, ZHAO Wei-bing. A simplified calculation method of oedometric modulus of soil and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 1057-1060.

[6] 周翠英, 林春秀, 林鲁生, 等. 外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2040-2044.

ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu, LIN Lu-sheng, et al. Research on dynamic evolution law of compression modulus of soft clay under external loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2040-2044.

[7] 张振南, 茅献彪, 葛修润. 松散岩块侧限压缩模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3049-3054.

ZHANG Zhen-nan, MAO Xian-biao, GE Xiu-run. Testing study on compressive modulus of loose rock blocks under confining constraint[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(18): 3049-3054.