

DOI: 10.11779/CJGE2021S2005

# 原生各向异性影响下湛江黏土小应变剪切模量特征

刘炳恒<sup>1, 2</sup>, 孔令伟<sup>\*1, 2</sup>, 舒荣军<sup>1, 2</sup>, 李甜果<sup>1, 2</sup>, 简涛<sup>1, 2</sup>

(1. 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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了研究原生各向异性对湛江黏土小应变剪切模量的影响, 对  $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$  方向的原状试样进行了一系列不同围压下的共振柱试验。试验结果表明: 在同一围压下, 不同  $\alpha$  试样经孔隙比函数归一化的最大动剪切模量  $G_{max}/F(e)$  与  $90^\circ$  方向试样  $G_{max}/F(e)$  的比值  $K_\alpha$  随  $\alpha$  增大而减小; 当围压低于与高于结构屈服应力  $\sigma_k$  时, 同一  $\alpha$  试样的  $K_\alpha$  随围压增大分别呈基本保持恒定与明显减小趋势, 即围压低于  $\sigma_k$  时, 围压的增大几乎不影响原生各向异性对  $G_{max}$  的影响, 围压高于  $\sigma_k$  时, 围压的增大减弱了原生各向异性对  $G_{max}$  的影响; 随围压增大, 不同方向试样的  $G_{max}/F(e)$  均呈先增大后减小规律, 当围压在  $\sigma_k$  左右时出现转折; 基于不同方向试样  $G_{max}/F(e)$  随围压的变化规律, 提出了考虑原生各向异性的  $G_{max}$  演化规律的表征方法。

**关键词:** 湛江黏土; 原生各向异性; 小应变剪切模量; 共振柱试验; 屈服应力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0019-04

作者简介: 刘炳恒(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事特殊土的力学特性研究。E-mail: liubingheng17@mails.ucas.ac.cn。

## Characteristics of small-strain shear modulus of Zhanjiang clay under influence of inherent anisotropy

LIU Bing-heng<sup>1, 2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1, 2</sup>, SHU Rong-jun<sup>1, 2</sup>, LI Tian-guo<sup>1, 2</sup>, JIAN Tao<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of inherent anisotropy on the small-strain shear modulus of Zhanjiang clay, a series of resonance column tests are carried out on the specimens with  $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ , and  $90^\circ$  under different confining pressures. The test results indicate that the ratio of the maximum dynamic shear modulus normalized by the void ratio function  $G_{max}/F(e)$  of the specimens with different  $\alpha$  to  $G_{max}/F(e)$  of the specimen with  $90^\circ$  (i.e.,  $K_\alpha$ ) decreases with the increasing  $\alpha$  under the same confining pressure. When the confining pressure is lower than or higher than the yield stress  $\sigma_k$ ,  $K_\alpha$  keeps basically constant or obviously decreases with the increasing confining pressure for the specimen with the same  $\alpha$ . When the confining pressure is lower than  $\sigma_k$ , the increase of the confining pressure hardly affects the influence of the inherent anisotropy on  $G_{max}$ . When the confining pressure is higher than  $\sigma_k$ , the increase of the confining pressure weakens the influence of inherent anisotropy on  $G_{max}$ . As the confining pressure increases,  $G_{max}/F(e)$  of specimens in different directions shows the law of first increasing and then decreasing, and a turning point occurs when the confining pressure is around  $\sigma_k$ . Based on the variation law of  $G_{max}/F(e)$  of specimens in different directions with confining pressure, a characterization method of evolution law of  $G_{max}$  considering the inherent anisotropy is proposed.

**Key words:** Zhanjiang clay; inherent anisotropy; small-strain shear modulus; resonant column test; yield stress

## 0 引言

各向异性是黏土的基本性质之一, 分为原生各向异性和次生各向异性。针对原生各向异性对黏土力学性状的影响, 许多学者对与沉积平面呈不同夹角试样进行压缩、无侧限压缩和三轴压缩等试验, 发现原生各向异性对黏土变形以及强度特性的影响不容忽视。

小应变剪切模量特性作为土的重要力学性质之一, 也同样受到原生各向异性的影响。Simpson 等<sup>[1]</sup>

的研究表明, 小应变剪切模量的原生各向异性对隧道及基坑周围土体变形的预测结果影响很大; Jovićić 等<sup>[2]</sup>和吴宏伟等<sup>[3]</sup>分别针对伦敦黏土和上海软黏土进行研究, 利用弯曲元测得两种土在低围压下水平和竖直方向上的最大剪切模量比值分别为 1.5 和 1.21, 说明对

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877281)

收稿日期: 2021-08-18

\*通信作者 (E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

表1 湛江黏土平均物理力学性质指标与颗粒组成

Table 1 Physical and mechanical indexes and particle composition of Zhanjiang clay

重度 $\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含水率 $w/\%$	孔隙比 $e$	渗透系数 $K(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	液限 $WL/\%$	塑限 $WP/\%$	塑性指数 $I_p$	结构屈服应力 $\sigma_k/\text{kPa}$	无侧限抗压强度 $/\text{kPa}$	灵敏度 $S_t$	颗粒组成/%			
										>0.05 /mm	0.005~0.05 /mm	0.002~0.005 /mm	<0.002 /mm
17.1	52.98	1.44	$2.73\times 10^{-8}$	59.6	28.1	31.5	400	143.5	7.2	8.2	39.5	20.7	31.6

于不同种类黏土，原生各向异性对其小应变剪切模量的影响不尽相同。

结构性黏土在我国东南沿海地区分布广泛，许多工程建设涉及到此类黏土，迄今已对其小应变剪切模量进行了诸多研究，但以往的研究主要考虑孔隙比、应力水平和结构损伤等对小应变剪切模量的影响<sup>[4]</sup>，而考虑原生各向异性对小应变剪切模量影响的研究较少，有必要进行系统探究。

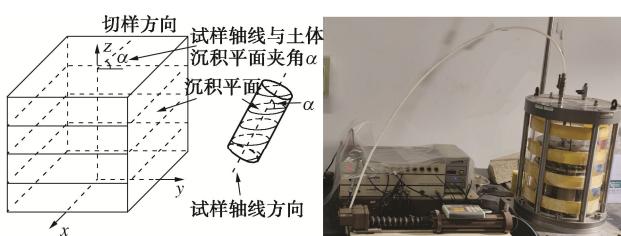
本文对不同削样方向的湛江黏土原状试样开展不同围压下的共振柱试验，研究原生各向异性对最大动剪切模量的影响以及考虑原生各向性的最大动剪切模量随围压演化规律的表征方法。

## 1 试验材料与试验方案

### 1.1 试验材料与试样制备

土样取自湛江市某基坑内地下10~11 m，尺寸为30 cm×30 cm×30 cm原状块状样。表1为其基本物理力学指标与颗粒组成。由表1可见，湛江黏土具有较差物理性质，与软黏土相似，但力学性质较优，呈现上述特性的原因为其具有的强结构性<sup>[4]</sup>。

图1(a)为不同方向圆柱试样示意图，定义试样轴线与土体沉积平面夹角为 $\alpha$ ，即竖直方向试样为90°，水平方向试样为0°。针对 $\alpha$ 为0°，22.5°，45°，67.5°，90°方向原状样进行研究，试样规格尺寸为直径50 mm，高度100 mm的圆柱体。



(a) 试样示意图  
(b) GDS共振柱仪  
图1 试样示意图与试验设备

Fig. 1 Schematic diagram of specimens and test apparatus

### 1.2 试验方法

试验所用设备为GDS共振柱仪，如图1(b)所示。试样的边界条件为一端固定，一端自由。通过电磁驱动系统对试样逐级施加扭矩，测得试样的共振频率和对应的剪应变，试样动剪切模量由下式得到：

$$G=\rho(2\pi fH/\beta)^2 \quad (1)$$

式中， $G$ 为试样动剪切模量， $\rho$ 为试样密度， $f$ 为共振

频率， $H$ 为试样高度， $\beta$ 为扭转振动频率方程特征值。

试样在抽气饱和后安装至共振柱仪上，随后进行反压饱和，当 $B$ 值达0.98后，进行固结，围压分别设定为50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 kPa。试样固结完成后，进行共振柱试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同方向试样 $G-\gamma$ 曲线规律

如图2所示，不同方向试样动剪切模量 $G$ 和剪应变 $\gamma$ 的关系曲线形态与规律类似。剪切模量在小剪应变下衰减速度较小；随剪应变发展，衰减速度增大。低围压下 $G-\gamma$ 曲线随围压增大而上移，围压超过600~700 kPa， $G-\gamma$ 曲线随围压增长而下移，与通常软黏土 $G-\gamma$ 曲线大多随围压增大而单调上移规律存在明显差异，说明结构性对湛江黏土 $G-\gamma$ 曲线规律影响较大。

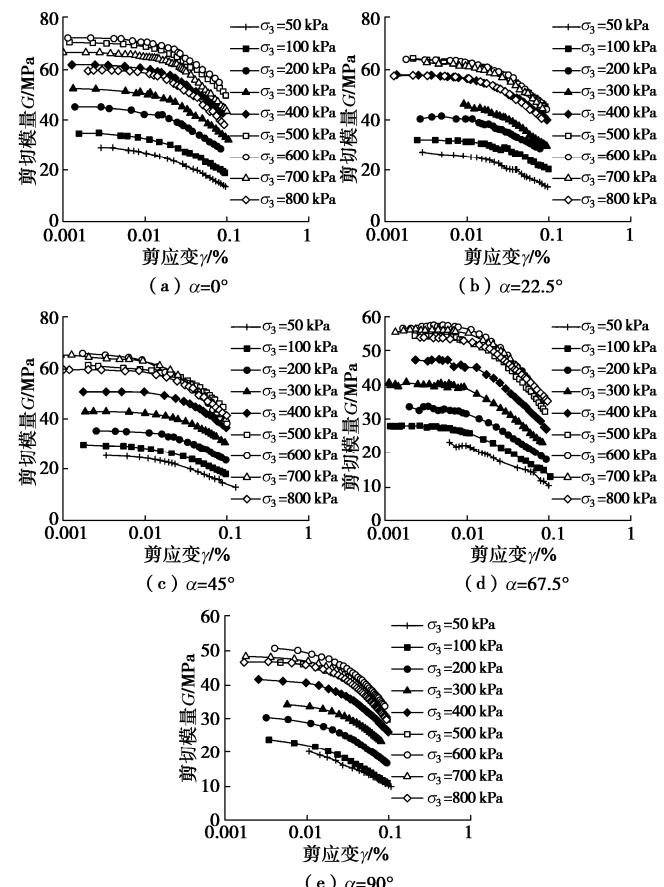


图2 不同方向试样剪切模量 $G$ 与剪应变 $\gamma$ 关系

Fig. 2 Relationship between shear modulus  $G$  and shear strain  $\gamma$  for specimens in different directions

## 2.2 原生各向异性对最大动剪切模量的影响

湛江黏土动应力-应变关系可用 Hardin-Drnevich 双曲线模型表征, 如下式:

$$\tau = \frac{\gamma}{a + b\gamma} , \quad (2)$$

式中,  $a$ ,  $b$  为拟合参数。式(2)可以写为

$$1/G = a + b\gamma . \quad (3)$$

式(3)中, 当  $\gamma$  趋近于 0 时, 得到最大动剪切模量  $G_{\max} = 1/a$ , 利用式(3)求得不同方向试样在各围压下的  $G_{\max}$ 。为了消除孔隙比对  $G_{\max}$  的影响, 引入孔隙比函数  $F(e) = 1/(0.3 + 0.7e^2)$  将  $G_{\max}$  进行归一化处理, 图 3 为经孔隙比函数归一化的  $G_{\max}/F(e)$ -围压  $\sigma_3$  曲线。随围压增大, 不同方向试样  $G_{\max}/F(e)$ - $\sigma_3$  曲线均呈现先上升后下降的规律, 在围压为 400~500 kPa 即在  $\sigma_k$  左右时, 曲线出现转折。

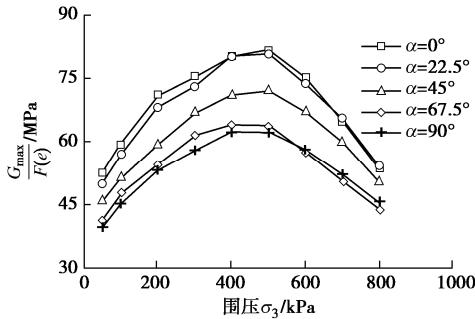


图 3 不同方向试样  $G_{\max}/F(e)$  与围压  $\sigma_3$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $G_{\max}/F(e)$  and confining pressure  $\sigma_3$  for specimens in different directions

为了更好描述原生各向异性对最大动剪切模量的影响, 定义  $G_{\max}/F(e)$  的原生各向异性系数:

$$K_\alpha = D_\alpha / D_{90^\circ} , \quad (4)$$

式中,  $D_\alpha$  定义为  $\alpha$  方向试样的  $G_{\max}/F(e)$ ,  $D_{90^\circ}$  定义为  $90^\circ$  (竖直) 方向试样的  $G_{\max}/F(e)$ 。

$G_{\max}/F(e)$  的原生各向异性系数  $K_\alpha$  与围压的关系如图 4 所示。相同围压下,  $K_\alpha$  随方向角  $\alpha$  变化,  $K_\alpha$  整体上随  $\alpha$  增大而减小, 即试样的方向越靠近水平其刚度越大, 说明原生各向异性对湛江黏土最大动剪切模量  $G_{\max}$  的影响十分显著。湛江黏土基本单元为扁平状片堆、粒状碎屑矿物与单片颗粒, 上述基本单元在沉积时, 其长轴更倾向于水平方向, 导致颗粒间水平方向的接触更紧密, 结构更强<sup>[3]</sup>, 进而更靠近水平方向试样的刚度更大。

当围压低于 400~600 kPa 时, 同一方向试样  $K_\alpha$  随围压增长基本保持恒定,  $K_{0^\circ}$ ,  $K_{22.5^\circ}$ ,  $K_{45^\circ}$ ,  $K_{67.5^\circ}$ ,  $K_{90^\circ}$  分别为 1.314, 1.279, 1.148, 1.045, 1; 当围压高于 400~600 kPa 时, 同一方向试样  $K_\alpha$  随围压增长呈明显减小趋势, 不同方向试样的  $G_{\max}/F(e)$  差异减小。说明围压低于  $\sigma_k$  时, 围压的增大几乎不影响原生各向

异性对  $G_{\max}$  的影响, 但当围压超过  $\sigma_k$  后, 围压的增大减弱了原生各向异性对  $G_{\max}$  的影响。文献[2]中伦敦黏土在围压超过屈服应力后, 其水平与竖直方向试样的最大剪切模量的差异随围压增长也呈减小趋势, 与本文试验结果一致。

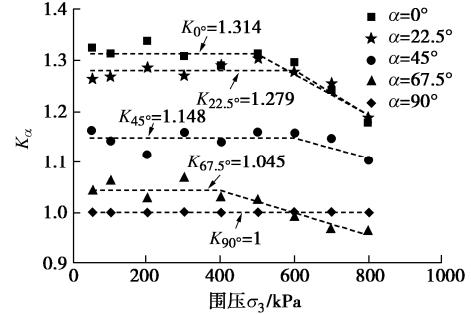


图 4 不同方向试样  $K_\alpha$  与围压  $\sigma_3$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $K_\alpha$  and confining pressure  $\sigma_3$  for specimens in different directions

## 2.3 考虑原生各向性的最大动剪切模量表征方法

图 3 中出现  $G_{\max}/F(e)$  随围压增大呈先上升后下降的特殊现象, 文献[4]认为  $G_{\max}$  同时受到平均有效应力、孔隙比和结构损伤的影响, 采用该文的表征方法对试验结果进行分析, 具体的表达形式如下所示:

$$G_{\max}/F(e) = \frac{A \left( 1 + \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \right)}{1 + B \left( 1 + \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \right)} \left( k_r + \frac{1 - k_r}{1 + \left( \eta \frac{\sigma'_m}{p_c} \right)^\lambda} \right) . \quad (5)$$

式中  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $k_r$ ,  $\eta$  和  $\lambda$  为反映各种应力历史和土体性质的参数;  $\sigma'_m$  为围压;  $p_a$  为标准大气压;  $p_c$  为表观前期固结压力即结构屈服应力  $\sigma_k$ , 不同方向试样压缩试验得到的  $\sigma_k$  差异较小, 均取 400 kPa。

采用式(5)将不同方向试样  $G_{\max}/F(e)$  与围压的关系进行定量表征。从图 4 可得, 高应力下各向异性对试样的  $G_{\max}/F(e)$  影响减弱, 可假定不同方向试样  $G_{\max}/F(e)$  极限值相同。最终将试验数据与拟合曲线一同绘制于图 5, 发现拟合效果很好, 拟合参数见表 2。

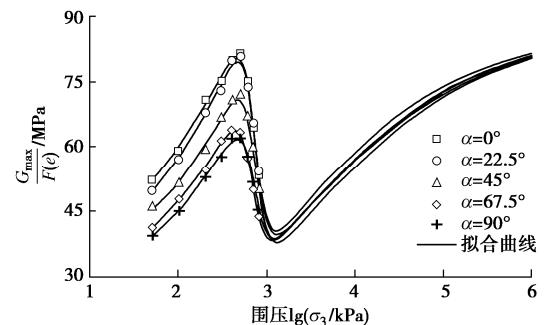


图 5 不同方向试样的  $G_{\max}/F(e)$  与固结围压  $\lg \sigma_3$  关系曲线

Fig. 5 Curves of  $G_{\max}/F(e)$  and confining pressure  $\lg \sigma_3$  of specimens in different directions

表 2 不同方向试样拟合参数

Table 2 Fitting parameters of specimens in different directions

$\alpha$	$A/\text{MPa}$	$B$	$n$	$k_r$	$\eta$	$\lambda$	$R^2$
0°	39.92489	0.16678	0.54309	0.35092	0.56433	6.42998	0.99251
22.5°	37.89951	0.15999	0.58264	0.35462	0.56426	6.37147	0.99075
45°	33.76328	0.15168	0.54642	0.37740	0.55402	6.38473	0.99432
67.5°	31.15476	0.15761	0.56254	0.42499	0.60889	6.07737	0.99727
90°	29.75422	0.15743	0.56067	0.44448	0.57750	6.05669	0.99835

分析表 2 中拟合参数与试样方向的关系, 可得参数  $A$ ,  $k_r$ ,  $\lambda$  和试样轴线与土体沉积平面夹角  $\alpha$  呈线性关系(图 6), 参数  $B$ ,  $n$ ,  $\eta$  随  $\alpha$  增大分别保持在 0.1587, 0.5591, 0.5738 上下, 且波动范围较小(参数  $B$ ,  $n$ ,  $\eta$  的标准差  $S$  分别为 0.005455, 0.01570 和 0.02131)。

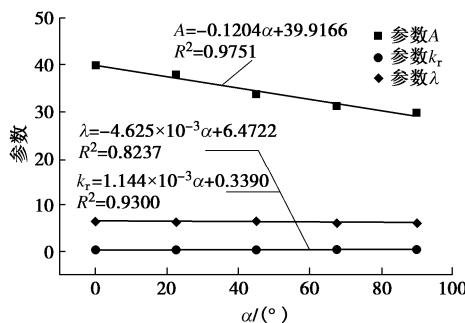
图 6 拟合参数  $A$ ,  $k_r$  和  $\lambda$  与试样方向的关系

Fig. 6 Relationship between fitting parameters  $A$ ,  $k_r$  and  $\lambda$  with directions of specimens

将图 6 中参数  $A$ ,  $k_r$ ,  $\lambda$  的拟合方程和参数  $B$ ,  $n$ ,  $\eta$  的平均值同时代入式(5), 得到考虑原生各向异性最大的动剪切模量的表征方法:

$$G_{\max} / F(e) = \frac{(c_1\alpha + c_2) \left( 1 + \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \right)}{1 + B \left( 1 + \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \right)} \cdot \left( \frac{(d_1\alpha + d_2) + \frac{1 - (d_1\alpha + d_2)}{1 + \left( \eta \frac{\sigma'_m}{p_c} \right)^{(e_1\alpha + e_2)}}}{1 + \left( \eta \frac{\sigma'_m}{p_c} \right)^{(e_1\alpha + e_2)}} \right) \quad (6)$$

式中  $\sigma'_m$  为围压;  $\alpha$  表示试样的方向, 为试样轴线与土体沉积平面夹角;  $p_a$  为标准大气压, 取 101.325 kPa;  $p_c$  为  $\sigma_k$ , 取 400 kPa;  $B=0.1587$ ,  $n=0.5591$ ,  $\eta=0.5738$ ;  $c_1=-0.1204$ ,  $c_2=39.9166$ ;  $d_1=1.144 \times 10^{-3}$ ,  $d_2=0.3390$ ;  $e_1=-4.625 \times 10^{-3}$ ,  $e_2=6.4722$ 。

### 3 结 论

(1) 在同一围压下, 不同  $\alpha$  试样经孔隙比函数归一化的最大动剪切模量  $G_{\max}/F(e)$  与 90° 方向试样

$G_{\max}/F(e)$  的比值  $K_\alpha$  随  $\alpha$  增大而减小。当围压低于和高于  $\sigma_k$  时, 同一  $\alpha$  试样  $K_\alpha$  随围压增长分别呈基本保持恒定与明显减小趋势, 说明当围压低于  $\sigma_k$  时, 围压几乎不影响原生各向异性对  $G_{\max}$  影响, 围压超过  $\sigma_k$  后, 不同方向的  $G_{\max}/F(e)$  差异减小, 围压的增大减弱了原生各向异性对  $G_{\max}$  的影响。

(2) 受固结压硬和结构损伤的影响, 湛江黏土的  $G_{\max}/F(e)$  变化规律与通常软黏土试验结果不同, 不同方向试样的  $G_{\max}/F(e)$  随围压增大均呈先增大后减小规律, 当围压在  $\sigma_k$  左右时出现转折。

(3) 基于采用考虑结构损伤的公式可很好拟合湛江黏土不同方向试样  $G_{\max}$  与围压关系曲线, 提出了考虑原生各向异性影响的  $G_{\max}$  演化规律表征方法。

### 参 考 文 献:

- [1] SIMPSON B, ATKINSON J H, JOVIĆIĆ V. The influence of anisotropy on calculations of ground settlements above tunnels[C]// International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, England, 1996: 591 – 594.
- [2] JOVIĆIĆ V, COOP M R. The measurement of stiffness anisotropy in clays with bender element tests in the triaxial apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 1998, 21(1): 3 – 10.
- [3] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 利用弯曲元测量上海原状软黏土各向异性剪切模量的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 150 – 156. (NG C W W, LI Qing, LIU Guo-bin. Measurements of small-strain inherent stiffness anisotropy of intact Shanghai soft clay using bender elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 150 – 156. (in Chinese))
- [4] 孔令伟, 藏蒙, 郭爱国. 湛江黏土动剪切模量的结构损伤效应与定量表征[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2149 – 2157. (KONG Ling-wei, ZANG Meng, GUO Ai-guo. Structural damage effect on dynamic shear modulus of Zhanjiang clay and quantitative characterization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2149 – 2157. (in Chinese))