

# 综合结构势下的路基沉降本构模拟分析

衣 君, 卫 宏, 吴小锋

(海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

**摘 要:** 土体结构性的数学模型是 21 世纪土力学的核心问题, 是决定土的性质的重要内在因素. 基于综合结构势的概念, 采用应力结构性参数和应变结构性参数, 通过  $q=0$  和等  $p$  剪切试验, 修正 K-G 模型. 为检验模型的可靠性, 以海口某实际工程为依托, 应用修正的 K-G 模型进行模拟计算路基沉降, 并与实测值进行对比, 发现此本构模型适用于海南红粘土这一类土质, 具有实际意义.

**关键词:** 综合结构势; 结构性; 修正 K-G 模型; 路基沉降

中图分类号: U 213.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)06-0864-06

1925 太沙基就曾指出土结构性研究的重要性, 沈珠江院士也称之为“21 世纪土力学的核心”<sup>[1-3]</sup>. 谢定义教授认为“土结构性是决定各类土力学特征的一个最为根本的内在因素”. 可见, 土结构性在土力学学科发展中的特殊地位. 红粘土是碳酸盐岩系出露的岩石经红土化作用形成的棕红、褐黄等色的高塑性粘土, 其广泛分布于海南省内, 由于特定的历史条件和矿物成分, 有着特殊的其结构类型. 这种结构性对土的工程性质有很大的影响. 它呈脆性破坏, 其破坏应变较小. 在工程中, 结构性土地基往往会在缺乏预兆情况下, 产生突然性破坏, 研究其结构性有着重要意义.

土体是将固液气三种物质凝聚在一起的一种不连续材料, 有着复杂的物理和力学性质, 尤其在受力变形后, 由于颗粒尺寸影响, 力学性质更为复杂. 且在外力作用时, 土体会根据自身尺寸效应而发生土体硬化现象, 表现出一种强度尺寸效应. 此外, 颗粒内外力学性质存在差异, 致使宏观特性与微观特性息息相关而又独立存在, 是一种跨尺度的力学行为. 因此一种简便的适于应用土体研究的结构性定量指标, 反应土体结构性参数的定义——综合结构势被提出<sup>[4-5]</sup>. 综合结构势的大小随着压力  $P$  的变化而相应变化. 土中颗粒排列越稳定, 受力后变形越小, 联接越弱时, 综合结构势越小, 反之亦然<sup>[6]</sup>.

一般结构性参数的建立相似, 不同试验条件下同样表达式中的变量发生改变, 相应的会产生新的结构性参数. 目前对于结构性参数的类型主要为应变结构性参数、应力结构性参数、孔隙比结构性参数、动应力结构性参数四种<sup>[7]</sup>. 第一种类型采用压缩试验, 操作简单, 虽能较全面反映土的结构性, 但不能反映剪切作用影响, 仅适用于静力作用; 此后, 应力结构性参数被谢定义等人提出, 该方法是采用三轴试验, 考虑了  $p$  和  $q$  对土体结构性的影响, 可以反映剪切作用对土体的破坏, 但等向作用应力无法体现; 孔隙比结构性参数采用压缩试验, 优点为同应变结构性参数, 但灵敏性较差; 对于动应力条件下土体结构性的研究, 需选用动三轴试验下的动应力结构性参数, 值得注意的是试验条件对初始剪切阶段土体的结构性变化影响很大.

本文通过  $q=0$  和等  $p$  剪切试验, 确定应力结构性参数和应变结构性参数. 并通过所得参数修正 K-G 模型, 为检验模型及程序的可靠性, 以海口某实际工程为依托, 应用修正后的 K-G 模型计算路基的固结沉降.

## 1 土结构性参数本构模型计算

K-G 模型是通过体积模量  $K$  和剪切模量  $G$  反映土的弹性性质, 在作弹性增量分析时用切线体积模量和切线剪切模量代替弹性常数  $K$  和  $G$ . 应力与应变表达式如(3)式所示<sup>[8]</sup>:

收稿日期: 2013-01-17 修改稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51368017)

作者简介: 衣 君(1988-), 女, 辽宁大连人, 硕士, 主要从事岩土体稳定及数值模拟等方面的研究.

$$\begin{aligned} dp &= K_t d\epsilon_v \\ dq &= 3G_t d\epsilon_d \end{aligned} \tag{1}$$

其中:

$$K_t = \frac{p}{\lambda} \tag{2}$$

$$G_t = K p_a \left(\frac{p}{p_a}\right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)q}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi}\right]^2 \tag{3}$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_u} \tag{4}$$

$K_t$  体积模量;  $G_t$  剪切模量;  $K, n$  无量纲系数;  $R_f$  破坏比.

对海口现场工地取红粘土,对该非饱和红粘土进行等向固结试验,通过  $\ln p \sim \epsilon_v$  压缩曲线计算出  $\bar{\lambda} = 0.523$ . 取不同  $p$  值进行等  $p$  试验得到  $G_t$  曲线,拟合得到  $K = 1.121, n = 0.794, p_a = 101 \text{ kPa}$ ;此外进行三轴试验,得到土体的粘聚力及摩擦角.具体参数可见表 1.

表 1 原状土 K-G 模型参数

Tab. 1 K-G model parameters of undisturbed soil					
$\lambda$	$K$	$n$	$R_f$	$\varphi/^\circ$	$c/\text{kPa}$
0.523	1.121	0.794	0.815	16.	35.61

## 2 结构性参数的确定

### 2.1 等 P 试验的应力型结构性参数的确定计算

$K-G$  模型常常要引入球应力  $p$  与偏应力,  $K, G$  分别反映了土体在球应力和偏应力作用下的弹性性质,而应力型结构性参数无法体现等向应力的对结构性的影响,因此应力型结构性参数引入到偏张量中.应力性结构参数用公式 5 计算:

$$m_{qs} = \frac{q_0^2}{q_r \cdot q_s} \tag{5}$$

式中:  $m_{qs}$  为应力型结构性参数;  $q_r$  为重塑土在剪应变  $\epsilon_d$  时的剪应力值;  $q_s$  为饱和土在剪应变  $\epsilon_d$  时的剪应力值;  $q_0$  为原状土在剪应变  $\epsilon_d$  时的剪应力值.

分别对原状土样、饱和处理的原状土样,以及重塑土进行  $p = 100 \text{ kPa}, p = 200 \text{ kPa}, p = 250 \text{ kPa}$  下的等  $p$  剪切试验.用公式 6 进行计算,得到  $p = \text{const}$  时的结构性参数曲线.

通过对图 1 的数据处理,得到应力与应变的关系式为:

$$m_{qs} = 1.35 + 5.19e^{-\epsilon_d/1.88} \tag{6}$$

### 2.2 等向固结实验的应变型结构性参数的确定

应变型结构性参数无法考虑剪切作用的影响,因此,将应变型结构性参数引入到球张量.应变性结构参数计算公式如下:

$$m_{pe} = \frac{\epsilon_{pr} \cdot \epsilon_{ps}}{\epsilon_{p0}^2} \tag{7}$$

其中:  $m_{pe}$  为应变型结构性参数;  $\epsilon_{pr}$  为重塑土在应力  $p$  时的体应变值;  $\epsilon_{ps}$  为饱和土在应力  $p$  时的体应变值;  $\epsilon_{p0}$  为原状土在应力  $p$  时的体应变值.

分别对原状土样、饱和处理的原状土样,以及重塑土(含水率与原状土相同)进行  $0 \sim 100 \text{ kPa}, 0 \sim 200 \text{ kPa}, 0 \sim 250 \text{ kPa}$  的等向固结试验,用公式 7 进行计算,得到各等向固结试验的应变型结构性参数曲线(见图 2).

通过对图 2 的数据处理,得到应力与应变的关系式为:

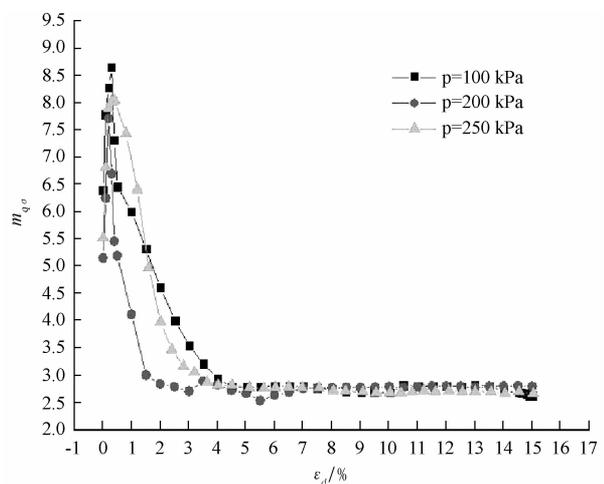


图 1 等  $p$  剪切试验应力型结构性参数曲线

Fig. 1 The stress-type structural parameter curves under drainage shear of constant tests

$$m_{pe} = 1.28 + 8.1e^{-p/11.12} \quad (8)$$

此外,从图 2 的形态趋势可以看出,在压力未达到强度峰值时,土的结构性参数随着  $p$  的增大而增大,说明土体进行结构调整并压密所产生的效果,结构稳定势较大,综合结构势较大,结构性较强.但当加压到一定程度后,即超过土体强度峰值后,土体的不稳定势减弱,不会发生大突变,联接性遭到破坏,综合结构势变小,结构性参数相应降低并趋于稳定,土体结构遭到破坏.

### 3 修正 K-G 模型

相同的实验条件时,由于土体颗粒的结构性,会导致其表现出不同的不同的力学特性. K-G 模型里  $p$  为常数的三轴压缩排水试验,原状土与重塑土在剪应变相同时对应的偏应力不同.可以认为偏应力的差值是为了达到相同应变量<sup>[8]</sup>,得到公式(9)(10).

$$d\epsilon_{po} = d\epsilon_{pr} + d\epsilon_m \quad (9)$$

$$dq_o = dq_m + dq_r \quad (10)$$

式中  $d\epsilon_{po}$  为原状土样体积应变增量、 $d\epsilon_{pr}$  为重塑土样所对应的体积应变增量;  $d\epsilon_m$  则是两者间的差值.  $dq_o$  为原状红粘土对应于某剪应变的偏应力,  $dq_r$  为重塑土对应于某剪应变的偏应力;  $dq_m$  为两者的差值.

同理,对重塑土样进行土工试验确定其结构性参数见表 2.

绘制  $p/(\epsilon_m/m_{pe})-p$  和  $\epsilon_d/(q_m/m_{qs})-\epsilon_d$  曲线,其中数据分别为 0~200 等向固结以及等  $p$  试验结果,见图 3、4.

根据上述两图作曲线归一性分析,并对得到公式进行增量式微分,见公式(11)(12).

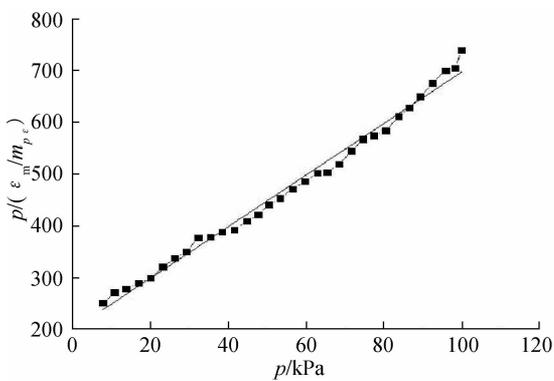


图 3 0~200 kPa 等向固结试验的  $p/(\epsilon_m/m_{pe})-p$  曲线

Fig. 3 The  $p/(\epsilon_m/m_{pe})-p$  curves under isotropic consolidation test

$$d\epsilon_m = d\left[m_{pe} \times \frac{p}{200.3 + 4.99p}\right] = d\left[(1.28 + 8.1e^{12}) \times \frac{p}{200.3 + 4.99p}\right] \quad (11)$$

$$dq_m = d\left[m_{qs} \times \frac{\epsilon_d}{0.021 + 0.06\epsilon_d}\right] = d\left[(1.35 + 5.19e^{-\epsilon_d/1.88}) \times \frac{\epsilon_d}{0.021 + 0.06\epsilon_d}\right] \quad (12)$$

### 4 工程算例验证

#### 4.1 基于 ABAQUS 的土体本构模型模拟

ABAQUS 作为解决非线性有限元分析的通用软件,可以综合综合考虑土体的塑形体积应变、硬

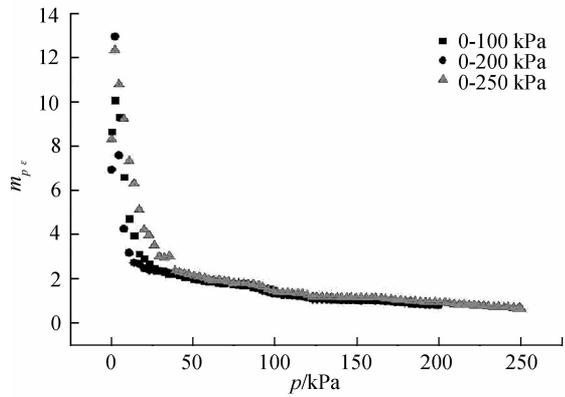


图 2 各等向固结过程应变型结构性参数曲线

Fig. 2 The strain-type structural parameter curves under isotropic consolidation test

表 2 重塑土的 K-G 模型参数

$\lambda$	$K$	$n$	$R_f$	$\varphi/^\circ$	$c/\text{kPa}$
0.501	1.279	1.012	0.887	13.97	30.11

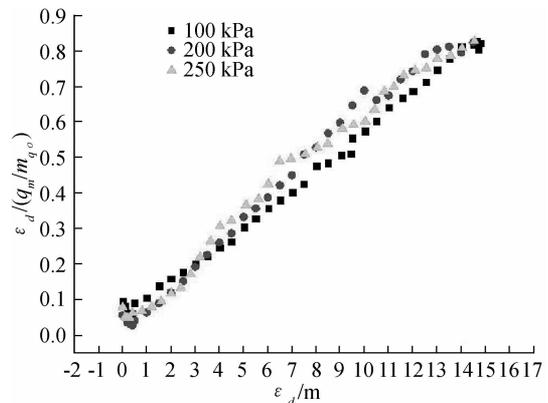


图 4 等  $p$  剪切试验  $\epsilon_d/(q_m/m_{qs})-\epsilon_d$  曲线

Fig. 4 The  $\epsilon_d/(q_m/m_{qs})-\epsilon_d$  curves under drainage shear of constant tests

化、软化等各个因素对土体变形的影响,能够解决各种复杂的线性和非线性问题,土木工程应用广泛<sup>[9]</sup>. 目前 ABAQUS 中土体的本构模型主要为剑桥模型、Drucker-Prager 模型等,未能全面反映土体变形,如软化,应力路径等对土体变形的影响. 基于徐远杰对 Duncan-Chang 模型的二次开发工作<sup>[10]</sup>,本文对修正的 K-G 模型进行 abaqus 接口开发工作.

若要对 ABAQUS 进行二次开发,需要定义土体本构模型关系的刚度系数矩阵

$$[D] = \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial \Delta \epsilon} \quad (13)$$

式中: $\sigma$  为应力; $\epsilon$  为应变张量; $\Delta \sigma$  为对应应力增量; $\Delta \epsilon$  为对应应变增量.

ABAQUS 中对于剪应变分量  $\epsilon_{ij}$  存储是与工程剪应变  $\gamma_{ij}$  相对应的. 土体的应力与应变相应认为应力率与应变率. 公式 (13) 中的  $[D]$  可以根据本构模型的需要定义为对称矩阵、或是非对称矩阵. ABAQUS 中的二次开发模块 UMAT 灵活多样,每计算一个积分点就要调用一次 UMAT,继而算出刚度系数矩阵  $[D]$ ,从而形成刚度矩阵  $[K]$ ,联合荷载增量  $\Delta R$  得出位移增量  $\Delta U$ ,进而校核平衡,若满足,继续下一增量步的求解.

#### 4.2 工程概况及模拟分析

海口市某工程钻孔 55 m 深度范围内,地层主要为新近人工填土(Qm1)、第四系中更新海相沉积土(Q2m)、第四系下更新海相沉积土(Q1m),第三系凝灰岩( $\beta N2$ )、玄武岩( $\beta N2$ )及风化残积土一(Qe1). 前四个地层自上而下,具体特征描述及参数如下:

第①层杂填土(Qm1):分布全场地地表,褐红,褐灰色,主要由粉质粘土、碎石、混凝土碎块等组成,欠压实或稍压实;厚度 0.40~2.20 m,平均值 1.52 m;标准贯入实测击数平均值 8.0 击.

第②层含砂粉质粘土(Q2m):除北侧废弃地下室及部分钻孔缺失外,分布全场地,褐红色,强度中等,切口稍有光泽,主要由含中砂的粘粒、粉粒组成,局部含小砾石,可塑或硬塑状,;厚度 0.70~4.60 m,平均值 2.84 m;标准贯入实测击数平均值 10.4 击. 孔隙比 0.893,压缩系数  $a_{1-2}=0.33$ .

第③层粗砂(Q2m):除北侧废弃地下室及部分钻孔缺失外,分布全场地,褐红色,主要由含砾石的石英质粗粒、中砂组成,粘粒含量约占 8%—13%;厚度 0.80~3.30 m,平均值 1.85 m;标准贯入实测击数平均值 17 击.

第④层粗砂(Q1m):分布全场地,灰白、黄色,主要由石英质粗粒、中砂组成,粘粒含量约占 5%;饱和态、稍密或中密,厚度 0.40~10.50 m,平均值 6.42 m;标准贯入实测击数平均值 18.3 击.

其中第二层褐红色含砂粉质粘土为海南特有的典型区域性红粘土. 并将模拟数据与计算数据进行对比,具体见图 5、图 6,两种模拟计算相对应的应力路径见图 7.

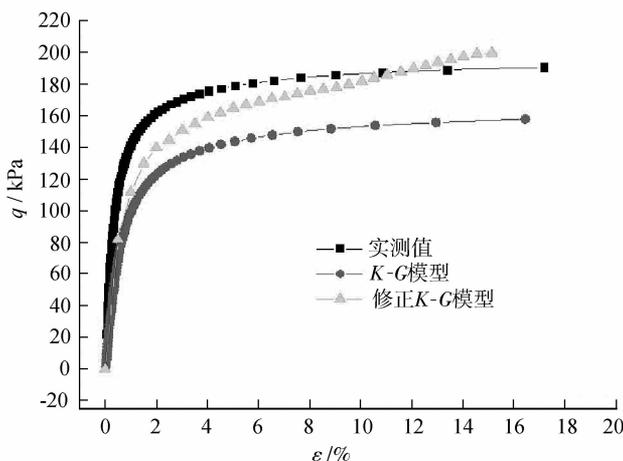


图 5  $\sigma_3 = 100$  kPa 时的模型计算值与试验结果对比  
Fig. 5 Theoretical and experimental  $\sigma_3 = 100$  kPa curves

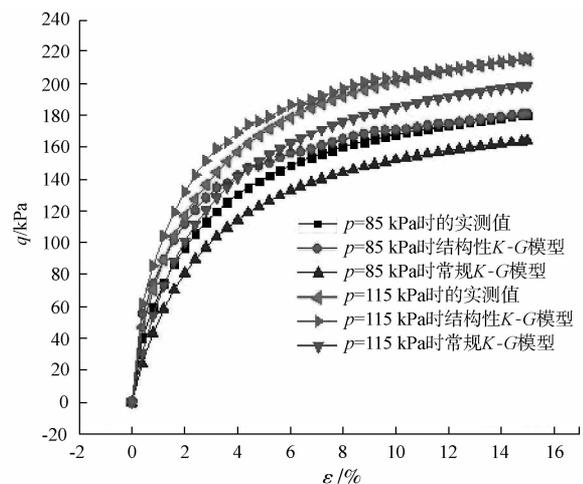


图 6 等  $p$  试验模型计算值与试验结果对比  
Fig. 6 Theoretical and experimental curves under drainage shear of constant tests

从图 5、6 中可以看出:修正 K-G 模型相对于原 K-G 模型,考虑了土的结构性,更好的预测及反映原状土的力学性能.此外,对此路堤进行网格划分,见图 8,模拟计算其沉降,并与实测数据对比,见图 9.

从沉降对比图中可以看出,修正的 K-G 模型比原 K-G 模型更接实测沉降结果,其最大沉降点的沉降过程及大小与实际结果基本相同,验证了模型及程序具有可靠性.

## 5 结 论

本文以原常规 K-G 模型为基础,进行等向固结排水试验( $q=0$ )和  $p=$ 常数的三轴压缩排水试验,得到海口地区红粘土常规 K-G 模型参数.基于谢定义的综合结构势的概念下,分别引入应力结构性参数与应变结构性参数至 K-G 模型,并对所得曲线结果进行拟合处理,从而得到了修正的 K-G 模型.

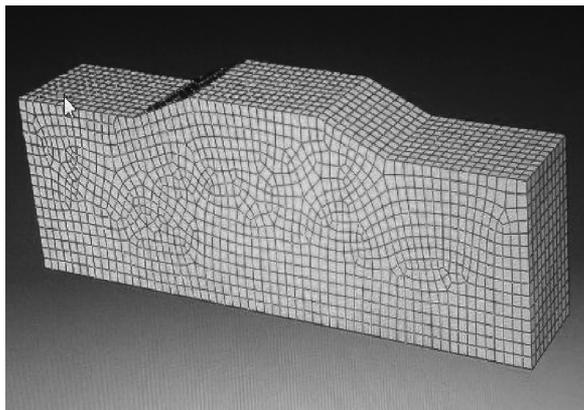


图 8 路堤有限元网格划分  
Fig. 8 Embankment finite element mesh

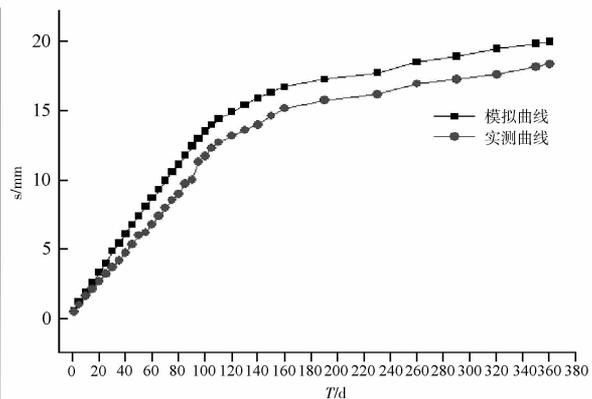


图 9 路堤沉降实测值与模拟结果对比  
Fig. 9 Embankment settlement measured value compared with simulation results

修正的 K-G 模型与原模型中参数确定的方法相差无几,其优点为可以考虑土体的结构性,并且等向固结试验( $q=0$ )和  $p=$ 常数的三轴试验中,还对饱和红粘土及重塑土(含水率与原状土样相同)进行了试验分析.

基于 abaqus 的二次接口,编制相应程序,对海口市一实际路基工程实例进行了三维模拟计算验证,计算结果显示,修正的 K-G 模型较之前原 K-G 模型更能反映海南地区其特殊的地域性红粘土;路基实际沉降的观测值与修正 K-G 模型的模拟结果计算值大小基本相同,更好的验证了模型及程序的可靠性,对于研究红粘土的结构性具有借鉴作用,对实际工程具有指导价值.

## 参考文献 References

- [1] 刘恩龙, 沈珠江, 范 文. 结构性粘土研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 1-8.  
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang, FAN Wen. Advance in researches on structured clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1): 1-8.
- [2] 沈珠江. 土体结构性的数学模型: 21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.  
SHEN Zhu-jiang. Mathematical model of soil structural property-kernel problem of soil mechanics in 21 Century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97.
- [3] 沈珠江. 现代土力学的基本问题[J]. 力学与实践, 1998, 20(6): 1-6.  
SHEN Zhu-jiang. The basic problems of modern soil mechanics[J]. Mechanics and practice, 1998, 20(6): 1-6.
- [4] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1998, 20(6): 1-6.

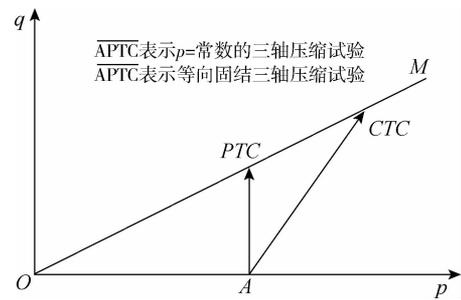


图 7 三轴试验应力路径  
Fig. 7 Triaxial stress path

- XIE Ding-yi, Mechanical properties of loess and applied research in the past, present and future [J]. *Underground space*, 1998, 20(6): 1-6.
- [5] 谢定义, 齐吉林. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 651-656.  
XIE Ding-yi, QIN Ji-lin, New approach of soil structural and quantitative parameters research [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 651-656.
- [6] 谢定义, 齐吉林, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系[J]. *水利学报*, 1999, 10(10): 1-6.  
XIE Ding-yi, QIN Ji-lin, Zhu Yuan-lin, relationship between soil structure parameter and its deformation and strength[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 10(10): 1-6.
- [7] 徐耘野, 非饱和红土结构性参数与结构性本构关系研究[D]. 海口: 海南大学, 2012: 7-35.  
XU Yun-ye. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement For the Master Degree in Geotechnical Engineering [D]. Haikou: Hainan University, 2012: 7-35
- [8] 吴小峰, 李光范, 胡 伟, 等. 海口红粘土的结构性本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 35-41.  
WU Xiao-feng, LI Guang-fan, HU Wei, et al. Study of the structural constitutive model for red clay in Haikou[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 35-41.
- [9] Hibbitte Karlsson, Sorenson. ABAQUS/Standard user's manual[S]. U. S. A. : [s. n. ], 2002.
- [10] 徐远杰, 王观琪, 李 健, 等. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. *岩土力学*, 2004, 25(7): 1032-1036.  
XU Yuan-jie, WANG Guan-qi, LI Jian, et al. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive in ABAQUS[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(7): 1032-1036.

## Embankment settlement constitutive model Analysis based on the comprehensive structure potential

YI Jun, WEI Hong, WU Xiao-feng

(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** The mathematical model for the structured soil is the key problem of soil mechanics in the 21<sup>st</sup> century, an important internal factors for soil properties. In this paper, the stress of structural parameters and structural parameters of strain based on the concept of comprehensive structure potential is used to modify *K-G* model by  $q=0$  and *P* shear test. To checkout the model reliability, the modified *K-G* is used for the model simulation calculation of embankment settlement based on an engineering practice in Haikou and is compared with the measured values. It is found that this constitutive model is applicable to this type of Hainan red clay soil, with practical significance.

**Key words:** *comprehensive structural potential; structural; modified K-G model; subgrade settlement*