

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2133-05

有限元和有限层元研究横向同性土 对建筑物沉降的影响

肖仁成¹, 赵锡宏²

(1. 南华大学 土木工程系, 衡阳 421001; 2. 同济大学 岩土工程系, 上海 200092)

摘要: 从常规三轴压缩试验得到横观各向同性土层的力学参数, 综合 9 种来自于不同国家和地区的横观各向同性土层的土样参数, 研究分析了横观各向同性土层参数对建筑物沉降的影响。作为典型例子, 对上海一幢剪力墙结构的箱形基础与横观各向同性土进行共同作用分析, 并与各向同性土层上的分析结果进行比较, 结果表明: 横观各向同性土层参数对沉降的影响有些不同, 尤其是不排水加载条件确定的土层参数影响的结果大不相同。

关键词: 横观各向同性; 各向同性; 共同作用; 子结构法; 有限层法

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Effect of transversely isotropic soil on settlement of buildings

XIAO Ren-cheng¹, ZHAO Xi-hong²

(1. Department of Civil Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The parameters of transversely isotropic soil are obtained from the conventional triaxial compression tests. In order to study the effect of transversely isotropic soil parameters on settlements of buildings, nine types of transversely isotropic soils taken from different countries are used. As a typical example, the interaction analysis of cross-wall structure and box foundation on transversely isotropic soil has been made and compared with the results on isotropic soil. In this example the structure is analyzed by using the double extended substructure (finite element) method and the transversely isotropic soil by the finite layer (element) method. The results show that the effect of transversely isotropic soil on settlement is somewhat different, especially for the soil parameters determined by the consolidated-undrained tests. It is expected that these conclusions are useful to the foundation designers.

Key words: transversely isotropy; isotropy; settlement; interaction; substructure method; finite layer method

1 前言

土层通常是成层状的, 因此, 许多学者一般都采用横观各向同性和弹性半空间理论模型来描述土层的这一性质, 该观点也受到研究学者越来越多的关注。对于每一层土, 在垂直于 XOY 平面的方向弹性对称的课题中, 共有 5 个独立弹性参数: E_1 , E_2 , ν_1 , ν_2 和 G_2 (图 1)。Gazetas (1981 年) 汇总了横观各向同性土的有关参数^[1], 提供有用的信息, 便于研究横观各向同性参数对建筑物沉降的影响。张问清、赵锡宏和宰金珉 (1982 年) 给出了横观各向同性层状弹性土体受任意力系统的理论分析解^[2]。

宰金珉、张问清和赵锡宏 (1985 年) 分析了横观各向同性土体对结构-基础-土层的共同作用的影响^[3]。本文分析研究了来自于不同国家和地区的 9 种横观各向同性土层参数对建筑物沉降的影响, 以表明研究横观各向同性土特性的重要性。

2 参数的确定

2.1 室内试验

横观各向同性土层的 5 个独立弹性参数 E_1 , E_2 , ν_1 , ν_2 和 G_2 , 有条件时, 最宜通过真三轴压缩试验确定。但是, 在常规三轴压缩试验中, 使用垂直切土和横向切土 (图 2) 也可以方便地确定这些参数。

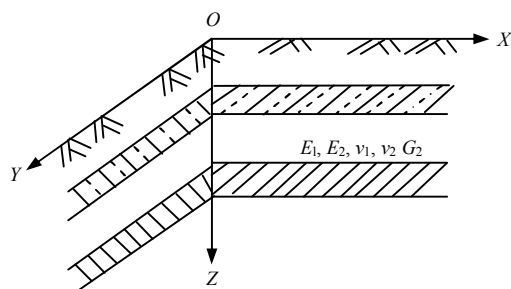


图1 横观各向同性土层示意
Fig.1 Transversely isotropic layered soils
错误!

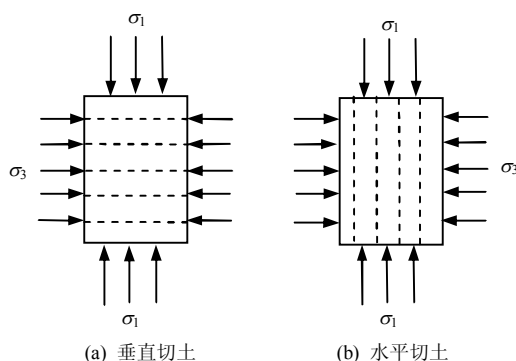


图2 室内试验
Fig.2 Laboratory test

本文所采用的试样是从上海某建筑工地 6 m 深的基坑中直接手工切块取样, 将这些试样进行固结排水真三轴压缩试验。试样制备时, 3 个采用垂直切土, 3 个进行横向切土。土层性质列于表 1, 应力应变关系示于图 3。

表 1 土层性质
Table 1 Soil properties

土层	$w / \%$	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	G	e	$\phi / (^\circ)$	c / kPa
砂质黏土	37	18.4	2.7	1.010	30	9

在上海的另一个建筑工地, 土样(淤泥质软黏土)取自于 9~13 m 的深度, 其试验方法也采用固结排水三轴压缩试验。从这些试验结果得到的确定横观各向同性土层模量的经验公式为^[4]

$$E_{0.5}^v = 34.30 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{0.955} \quad (1)$$

$$E_{0.5}^h = 36.23 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{1.023} \quad (2)$$

$$E_i^v = 58.03 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{1.016} \quad (3)$$

$$E_i^h = 59.50 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{1.050} \quad (4)$$

式中: $E_{0.5}^v$ 为应力水平, $E_{0.5}^v = (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 时的割线模量(垂直切土); $E_{0.5}^h$ 为应力水平, $E_{0.5}^h = (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 时的割线模量(横向切土); E_i^v 为初始模量(垂直切土); E_i^h 为初始模量(横向切土); P_a 为大气压力。

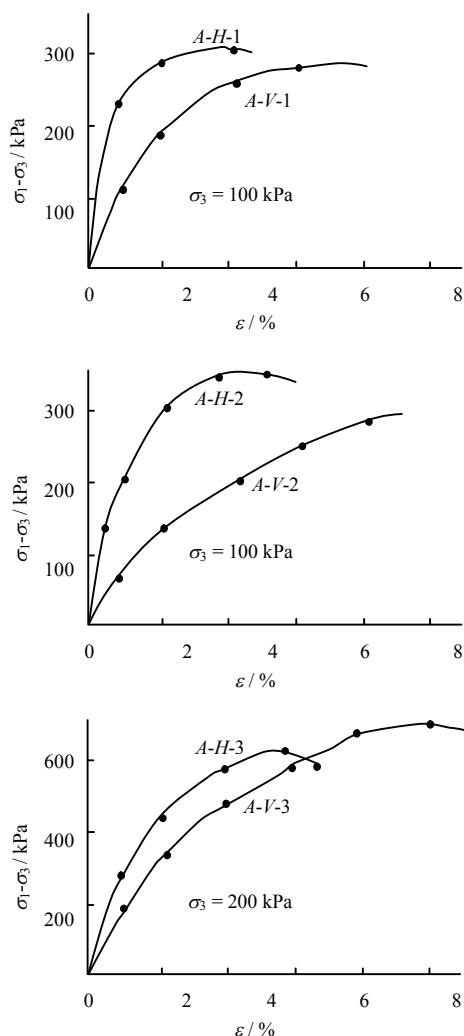


图3 应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve

2.2 弹性参数和室内试验参数的关系

为应用方便, 弹性参数和室内试验参数的关系简述如下:

对于排水三轴压缩试验, 确定弹性参数 E_1 , E_2 , v_1 和 v_2 的公式为^[5]

垂直向切土:

$$D_v = 2v_2 \quad (5)$$

$$E_{D_v} = E_2 \quad (6)$$

横向切土:

$$D_h = v_1 + nv_1 \quad (7)$$

$$E_{D_h} = nE_{D_v} \quad (8)$$

式中：\$D\$ 为剪胀，\$D=1-d\varepsilon_v/d\varepsilon_{vol}\$；\$E_D\$ 为表观排水模量，\$E_D=(d\sigma_v-d\sigma_h)/d\varepsilon_v\$；\$n=E_1/E_2\$；\$d\varepsilon_{vol}\$ 和 \$d\varepsilon_v\$ 分别为体积应变和垂直应变；\$d\sigma_v\$ 和 \$d\sigma_h\$ 分别为垂直和水平应力。

剪切模量 \$G_2\$ 可由下式计算得到^[6]：

$$G_2/E_2 = \frac{d_1 d_4 - d_3^2}{d_1 + 2d_3 + d_4} \quad (9)$$

式中：\$d_1=\lambda n(1-nv_2^2)\$；\$d_3=\lambda nv_2(1+v_1)\$；\$d_4=\lambda(1-v_1^2)\$；\$\lambda=E_2/(1+v_1)(1-v_1-2nv_2^2)\$；\$E_1\$ 为 \$XOY\$ 平面内的杨氏模量；\$E_2\$ 为 \$Z\$ 方向的杨氏模量；\$v_1\$ 为 \$XOY\$ 平面内的泊松比；\$v_2\$ 为 \$Z\$ 方向的泊松比；\$G_2\$ 为 \$Z\$ 方向的剪切模量。

值得指出的是，式 (9) 的结果是相当满意的^[1]。因此，5 个独立弹性参数减少到 4 个，\$E_1\$，\$E_2\$，\$v_1\$ 和 \$v_2\$。总应力和有效应力的弹性参数方程已由 Uriel 和 Canizo^[7] (1971 年) 提出。有效应力表示的弹性参数以符号' 表示，其关系式如下：

$$n = \frac{2(n' - n'v_1' - 2n'^2v_2'^2)}{(2 + n' - 4n'v_2' - 2v_1') - (1 - v_1' - n'v_2')^2} \quad (10)$$

式中：\$v_2=0.5\$；\$v_1=1-n/2\$；\$G_2=G_2'\$；\$E_1=\frac{(4-n)E_1'}{2(1+v_1')}\$；

\$n=E_1/E_2\$；\$n'=E_1'/E_2'\$。由此可得：

$$\frac{E_2}{E_2'} = \frac{E_1}{E_1'} \times \frac{n'}{n} \quad (11)$$

$$\frac{G_2'}{E_2'} = \frac{G_2}{E_2} \times \frac{E_2}{E_2'} \quad (12)$$

因此，采用常规三轴室内压缩试验和上述方程，可得 5 个独立弹性参数 \$E_1\$，\$E_2\$，\$v_1\$，\$v_2\$ 和 \$G_2\$。

2.3 9 种横观各向同性土层参数综述

为研究横观各向同性土层参数对建筑物沉降的影响，先把来自于不同国家的公开发表的试验数据总结在表 2 中，然后，把这些不同参数对同一大楼进行沉降分析，以便寻找对沉降影响的规律。

表 2 横观各向同性土的参数汇总
Table 2 Summary of transversely isotropic soil parameters

土层表述	参考文献	量测值				式 (9) 计算值
		\$n=E_1/E_2\$	\$v_2\$	\$v_1\$	\$G_2/E_2\$	\$G_2/E_2\$
重超固结 伦敦黏土 (Ashford) (不排水加荷)						
深度: 30 ft	[8]~[10]	1.35	0.50	0.325	0.35	0.355
深度: 50 ft		1.59	0.50	0.205	0.37	0.41
全部土样平均值		1.80	0.50	0.080	0.38	0.46
重超固结伦敦黏土 (Barbican Arts Centre) (排水加荷)	[5]	2.00	0.190	0.000	0.536	0.553
轻超固结高岭石黏土 (Florida Edgar 塑性高岭石) (不排水加荷)	[11]					
\$\sigma_c=40\$ lb/in ² ; \$w=40.7\%\$		1.250	0.500	0.375	0.356	0.364
\$\sigma_c=60\$ lb/in ² ; \$w=38.7\%\$		1.355	0.500	0.322	0.362	0.378
超固结黏土 (排水加荷)	[12]	1.600	0.12	0.156	0.692	0.536
(不排水加荷)		1.219	0.48	0.391	0.433	0.364
正常固结 Illite 黏土 (伊利石) (排水加荷)	[13]					
\$\sigma_c=70\$ lb/in ² ; \$w=29.5\%\$		1.17	0.50	0.415	0.355	0.353
\$\sigma_c=60\$ lb/in ² ; \$w=38.1\%\$		1.13	0.50	0.436	0.322	0.310
自然沉积灵敏海相黏土 (加拿大) (排水加荷)	[14]	0.62	0.35	0.20	0.205	0.187
正常固结砂质黏土 (上海) (排水加荷)	[15]	2.50	0.23	0.00	0.580	0.580

3 分析方法

结构分析方法采用双向扩展子结构有限元法, 横观各向同性土层分析采用有限层法。

3.1 土层的刚度矩阵

在本文中假定基底无摩擦接触, 土的柔度矩阵 $[F]$ 的建立采用张问清^[2]等人的有限元方法, 其中对横观各向同性土层, 其弹性矩阵为^[16]

$$[D] = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & & & \\ d_2 & d_1 & d_3 & & & 0 \\ d_3 & d_3 & d_4 & & & \\ & & & d_5 & & \\ 0 & & & & d_6 & \\ & & & & & d_6 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $d_1, d_3, d_4, \lambda, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$ 和 G_2 的意义如前所述; d_5 为 XOY 平面内的剪切模量, $d_5 = G_1 = E_1 / 2(1 + \nu_1)$; $d_6 = G_2$; $d_2 = \lambda n(\nu_1 + m\nu_2^2)$ 。转换矩阵 $[F]$ 即可得到土的刚度矩阵 $[K_s]$ 。设 $\{W\}$ 和 $\{p\}$ 代表界面节点上的沉降和接触压力, 则有

$$[K_s]\{W\} = \{p\} \quad (14)$$

3.2 共同作用分析

对于剪力墙、框架和框筒结构, 子结构法可以逐板和逐层扩展, 最后, 得到上部结构的边界刚度矩阵 $[K_b]$ 和边界荷载向量 $\{S_b\}$ 。因此, 整个结构的平衡方程可以分块的形式写为

$$\begin{bmatrix} K_{bb} + K_b & K_{bs} \\ K_{sb} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_b \\ U_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_b + S_b \\ Q_s - p \end{Bmatrix} \quad (15)$$

式中: $[K_{bb}]$, $[K_{bs}]$, $[K_b]$ 和 $[K_{ss}]$ 为箱形或片筏基础的层子结构分块刚度矩阵; $[U_b]$ 和 $[U_s]$ 为位移向量的分块向量; $[Q_b]$ 和 $[Q_s]$ 为荷载向量的分块向量。

把式 (14) 代入式 (15) 并考虑接触面上竖向位移的连续条件:

$$[K_s]\{W\} = [K_s]\{U_s\} \quad (16)$$

则共同作用分析方程为

$$\begin{bmatrix} K_{bb} + K_b & K_{bs} \\ K_{sb} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_b \\ U_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_b + S_b \\ Q_s + K_s W \end{Bmatrix} \quad (17)$$

4 数值分析结果

4.1 简述

上海某建筑为 13 层、地下 2 层, 剪力墙结构, 高 51.8 m。该建筑采用基底面积为 57.6 m×16.5 m 的箱形基础, 其基底埋深平均为 7.0 m (图 4)。共

同作用分析中采用了表 3 中所列的 9 种横观各向同性土层参数, 其 E_2 假定为 13.6 MPa。

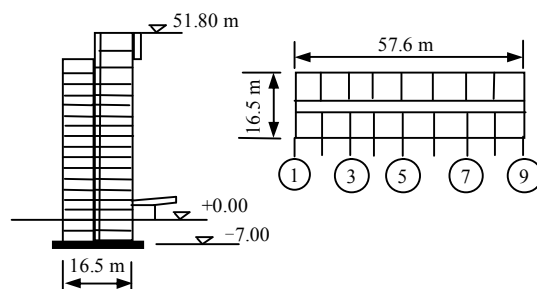


图 4 典型建筑物

Fig.4 Typical building

表 3 分析中采用的 9 种横观各向同性土层参数

Table 3 Nine types of transversely isotropic soil parameters used in analysis

情况	E_2 / kPa	$n = E_1 / E_2$	ν_2	ν_1	G_2 / E_2
1-a	13.6	1.00	0.50	0.50	0.33
1-b	13.6	1.80	0.50	0.08	0.46
2-a	13.6	1.00	0.19	0.19	0.42
2-b	13.6	2.00	0.19	0.00	0.54
3-a	13.6	1.00	0.50	0.50	0.33
3-b	13.6	1.36	0.50	0.32	0.38
4-a	13.6	1.00	0.48	0.48	0.34
4-b	13.6	1.20	0.48	0.39	0.44
5-a	13.6	1.00	0.12	0.12	0.44
5-b	13.6	1.60	0.12	0.16	0.69
6-a	13.6	1.00	0.50	0.50	0.33
6-b	13.6	1.13	0.50	0.44	0.32
7-a	13.6	1.00	0.20	0.20	0.42
7-b	13.6	1.38	0.20	0.27	0.52
8-a	13.6	1.00	0.35	0.35	0.37
8-b	13.6	0.62	0.35	0.20	0.19
9-a	13.6	1.00	0.23	0.23	0.41
9-b	13.6	2.50	0.23	0.00	0.58

注: a 和 b 分别代表均质土层和横观各向同性土层。

4.2 分析结果

由式 (22) 计算得到 9 种情况的平均纵向沉降剖面分布见图 5。由此可见, 不同的 9 种土层都有下述共同特征:

(1) 可以看出结构刚度在减少差异沉降方面起着决定性作用。很明显, 当考虑结构—基础—土层的共同作用时, 基础的边点和中点的差异沉降, 即纵向挠度值是相当小的。对于横观各向同性和均质土, 其纵向挠度曲线的形状大致是相同的。

(2) 对于横观各向同性土层, 当 $E_1 / E_2 > 1$ 时, 其沉降计算值比均质土层小。相反, 当 $E_1 / E_2 < 1$ 时, 其沉降计算值大于均质土层值 (见情况 8)。

(3) 采用排水参数(有效应力参数)时,对于横观各向同性土层和均质土层,采用相同的模量值 E_2 计算的沉降值没有明显的差别(见情况 2, 4, 5,

7, 8 和 9), 而采用不排水参数(总应力参数)时,采用相同的模量值 E_2 计算的沉降值有着明显的差别(见情况 1, 3 和 6)。

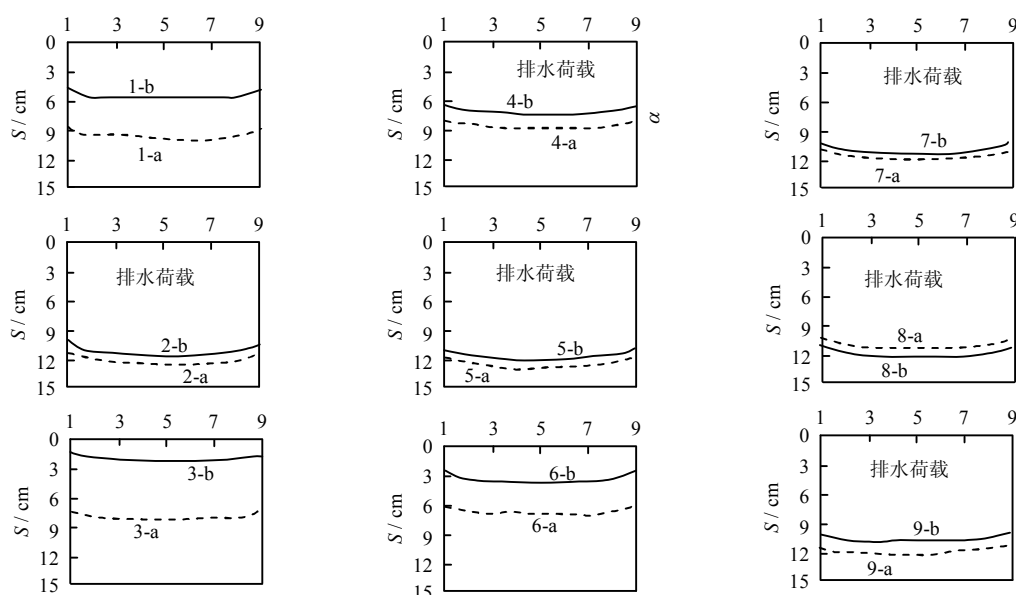


图 5 9 种情况的平均纵向沉降剖面图

Fig.5 Average longitudinal settlement profiles for 9 cases

5 结 语

从上面的分析可以得出如下两点结论:

(1) 当考虑结构-基础-土层的共同作用时,在相同模量值 E_2 的条件下,横观各向同性土层与均质土的纵向挠度曲线的形状是大致相同的,而最大沉降值是不同的;

(2) 横观各向同性土层参数对建筑物沉降的影响程度,取决于所采用的土层参数、总应力和有效应力参数。因此,应该反复强调的是在共同作用分析中,土层参数的选择是十分重要的。

但是,对于参数确定问题,例如,真三轴压缩试验和一般固结排水三轴压缩试验所得的参数的相关关系,可通过系列试验进行确定。也可以通过 2.2 节进行对比,寻找其相应关系。

参 考 文 献

- [1] Gazetas G. Strip foundations on a cross-anisotropic soil layer subjected to dynamic loading[J]. *Geotechnique*, 1981, 31(2): 161—179.
- [2] ZHANG Wen-Qing, ZHAO Xi-hong, ZAI Jin-min. Finite layer analysis for layered and elastic half-space under arbitrary force systems[A]. *Proc. of Inter. Conf. on FEM*[C]. Shanghai, China: [s. n.], 1982. 460—464.
- [3] ZAI Jin-Min, ZHANG Wen-Qing, ZHAO Xi-hong. Analysis of interaction between space shear wall structures and supporting soil[A]. *Proc. of 5th Inter. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*[C]. Nagoya, Japan: [s. n.], 1985, 789—798.
- [4] 赵锡宏, 肖仁成. 上海软黏土的横观各向异性性质的

试验研究[J]. 勘察科学技术, 1987.

ZHAO Xi-hong, XIAO Ren-cheng. A lab study on cross-anisotropic properties of Shanghai soft soil[J]. *J. Scientific Technology of Survey*, 1987.

- [5] Atkinson J H. Anisotropic elastic deformations in laboratory tests on undisturbed London clay[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(2): 357—374.
- [6] Carrier G F. Propagation of waves in orthotropic media[J]. *Q. Appl. Math.*, 1946, 4: 160—165.
- [7] Uriel A O, Canizo L. On the elastic anisotropy of soil[J]. *Geotechnique*, 1971, 21(3): 262—267.
- [8] Gibson R E. The analytical method in soil mechanics[J]. *Geotechnique*, 1974, 24(2): 115—140.
- [9] Ward W H, Marsland A, Samuels S G. Properties of the London clay at the ashford common shaft[J]. *Geotechnique*, 1965, 15(4): 321—344.
- [10] Ward W H, Samuels S G, Gutler M E. Further studies of properties of the London clay[J]. *Geotechnique*, 1959, 9(2): 33—58.
- [11] Saada A S, Bianchini G F, Shook L. Strength of 1-dimensionally consolidated clays[J]. *J. Geotech. Engng.Div., Am. Soc. Civ. Engrs.*, 1978, 103(6): 660.
- [12] King G J W. Introduction to superstructure/raft/soil interaction[A]. *Proceedings-Annual Allerton Conference on Circuit and System Theory*[C]. [s. l.]: [s. n.], 1977. 453—466.
- [13] Biannnchini G. Effects of anisotropy and strain on the dynamic properties of clays[PhD]. Cleveland: Case Western Reserve University, 1980.
- [14] Yong R N, Silvestri V. Anisotropic behaviour of a sensitive clay[J]. *Can. Geotech. J.*, 1979, 16: 335—350.
- [15] 吴国溪. 真三轴研制和土性在高层建筑与地基基础共同作用中应用[硕士论文 D]. 上海: 同济大学, 1987.
- [16] Zienkiewicz O C, Cheung Y K. Finite element method in structural and continuum mechanics[M]. London: McGraw-Hill, 1967.