DOI: 10.11779/CJGE2017S2008

# 深基坑降水沉降计算土体弹性参数取值方法探讨

梁发云, 贾亚杰, 邓 航, 姚笑青

(同济大学地下建筑与工程系,上海 200092)

摘 要:针对上海和天津软土地区敏感环境下的深基坑降水工程,对比由室内土工试验获得的土体剪切模量 G与抽水试验反算得到的剪切模量 G'及土体小应变初始剪切刚度 G。之间的关系,采用土体小应变模型 (HSS)分析 G/G。  $\gamma$  关系,指出敏感环境条件下,基坑降水引起土体应变范围约为  $0.1%\sim0.5%$ ,可取土体剪切刚度  $G=(0.25\sim0.35)G$ 。估算土层变形。以上海地铁 10 号线航中路站和彭越浦泵站基坑工程降水为例,根据所建议的取值方法确定含水层压缩模量计算含水层变形,与采用抽水试验结果计算得到的变形相近,验证了本文建议取值方法的合理性。

关键词: 基坑降水; HSS 模型; 地面沉降; 剪切模量; 压缩模量

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2017)S2 - 0029 - 04

作者简介: 梁发云(1976 - ), 男, 博士, 教授, 主要从事土力学与基础工程的教学科研工作。E-mail: fyliang@tongji.edu.cn。

# Discussions on elastic parameters of soil for land subsidence caused by decompression of confined aquifer in deep excavation

LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DENG Hang, YAO Xiao-qing

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The relationships among the soil shear modulus G obtained by oedometer tests, G' by pumping tests and the initial shear modulus  $G_0$  of hardening soil small (HSS) model for soft soil under sensitive circumstance in Shanghai and Tianjin are studied. The HSS model is used to fit the relationship between shear modulus ratio  $G/G_0$  and shear strain  $\gamma$ . It is found that the soil strain caused by excavation dewatering under sensitive circumstance is about 0.1%-0.5%. The shear modulus G of  $(0.25\sim0.35)G_0$  can be adopted to estimate soil deformation. Taking the deep foundation pit dewatering projects of Hangzhong Road Station of Shanghai Metro Line No. 10 and Pengyuepu Pumping Station as examples, the deformation calculated by adopting the elastic modulus determined by the proposed method is close to that by adopting the parameter obtained from in-suit pumping tests, and thus the rationality of the proposed method is verified.

Key words: excavation dewatering; HSS model; land subsidence; shear modulus; compression modulus

# 0 引 言

城市地下空间的开发使得基坑工程向着大规模、大深度的方向发展,当基坑下卧深厚承压含水层时,常需要对承压含水层降压。在基坑工程中,当止水帷幕不能完全隔断含水层时,往往在基坑周边  $3H\sim5H$  (H 为基坑开挖深度)范围以外仍会引起明显的地面沉降。承压层降压引起地面沉降计算模型包括顺序耦合和直接耦合模型等,无论采用何种模型,其准确性很大程度上依赖于土体参数的选择。恰当地选取土体参数对于计算结果的影响甚至可能大于方法本身带来的差异[ $^{11}$ ]。文献[ $^{2}$ ]根据上海地区 62 根打入桩的实测沉降反 算 地 基 土 的 弹 性 模 量  $^{2}$ 

轴试验和静力触探试验,推算出土体弹性模量  $E_0$  约为  $E_{sl-2}$  的 8 倍。基坑降水的理论分析方面,获取土体压缩模量的方法有两种,一种由室内土工试验确定,另一种由现场抽水试验确定。后者获取的土体压缩模量远大于前者确定的压缩模量,Preene<sup>[4]</sup>指出这种情况可能是由于深基坑工程的土体处于小应变状态所致。

本文针对上海和天津软土地区敏感环境下的典型深基坑降水工程,对比由室内土工试验获得的剪切模量 G、抽水试验反算得到的剪切模量 G' 及土体小应变初始剪切刚度  $G_0$  之间的关系,采用土体小应变模型(HS-Small)分析  $G/G_0$  -  $\gamma$  关系,为计算基坑降水引起地面沉降的土体参数选取提供依据,并以实际的

**基金项目**: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0800204); 上海市人才发展资金项目 (201548)

收稿日期: 2017-08-02

深基坑工程降水沉降计算为例,验证该参数取值方法的合理性。

#### 1 基坑降水的土体弹性参数

计算土层因基坑降水引起的压缩变形,关键的土体参数是压缩模量  $E_s$ 。由常规土工试验可直接确定土体压缩模量  $E_{sl-2}$ ,由现场抽水试验通过反演可得到含水层储水率  $S_s$ ,由式  $(1\sim3)$  可转换得到剪切模量 G'。

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \approx \rho g \alpha$$
 , (1)

式中, $S_s$ 为储水率( $m^{-1}$ ), $\rho$  为水的密度( $kg/m^3$ ),g 为重力加速度(N/kg), $\alpha$  为土的体积压缩系数 ( $Pa^{-1}$ ),n 为土体孔隙率(无量纲), $\beta$  为水的体积压缩系数 ( $Pa^{-1}$ )。

假设土体只发生竖向压缩,则

$$S_{\rm s} \approx \frac{\gamma_{\rm w}}{E_{\rm s}}; \quad \vec{\boxtimes} \quad E_{\rm s} \approx \frac{\gamma_{\rm w}}{S_{\rm s}} \quad . \tag{2}$$

剪切模量 G 和 G' 可由其与弹性模量与压缩模量的关系推算如下:

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}\right) E_s$$
,  $G = \frac{E_0}{2(1 + \mu)}$ , (3)

式中, μ为泊松比(量纲为1)。

土体小应变初始剪切刚度  $G_0$  可根据共振柱试验确定,或由现场波速测试结果确定。现场波速测试方法可根据式 (4) 进行计算:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad , \tag{4}$$

式中, $\rho$ 为土体密度 (kg/m³);V。为剪切波速 (m/s)。

### 2 土体弹性参数确定方法

Atkinson 等<sup>[5]</sup>将应变定义成 3 个范围: 非常小应变 (不大于 0.001%)、小应变 (在 0.001%与 1%之间)和大应变 (大于 1%),多数重要岩土工程的土体在工作荷载下处于小应变状态。在小应变区域,尤其是剪应变位于 0.01%~1%范围内,土体刚度随应变增加而迅速降低。土体小应变模型 (HS-Small)可以考虑小应变范围内土体剪切模量随应变增大而衰减的特点,在深基坑开挖分析方面得到较多运用,但在基坑降水引起地面沉降方面的运用还较少。根据 HS-Small 模型,分析土体剪切模量随应变增加的衰减过程,可获得适用于计算基坑降水引起地面沉降的土体剪切模量。

通过室内压缩试验得到土体压缩模量  $E_{s1-2}$  ,由抽水试验得到储水率  $S_s$  ,由式(2)得到  $E_s$  ,取  $\mu$  = 0.3,由式(3)将  $E_{s1-2}$  和  $E_s$  换算成 G 和 G' 。

以上海世纪大都会 2-3 地块项目<sup>[6]</sup>和天津文化中心站<sup>[1]</sup>的实测资料进行分析,计算得到G,G'和 $G_0$ 三者的关系如表 1 所示。由表 1 可知,上海世纪大都会和天津文化中心站各土层由抽水试验反算得到的剪切模量与初始剪切模量之比 $G'/G_0$ 约为 0.25~0.35。

在 PLAXIS 软件手册<sup>[7]</sup>,给出了剪切模量G,  $G_0$  与剪应变 $\gamma$  关系式如下:

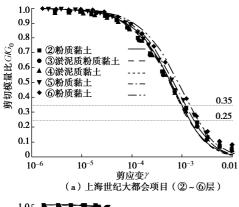
$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{(1 + 0.385 \gamma / \gamma_{0.7})^2} , \qquad (5)$$

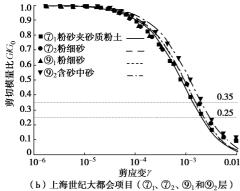
式中, $\gamma_{0.7}$  为割线剪切模量  $G_s$  减小到初始值  $G_0$  的 70%时对应的剪应变。

表 1 土体模量  $G \times G'$  和  $G_0$  的关系

Table 1 Relationship among various soil moduli

实例	土层	室内侧限 压缩模量 E <sub>sl-2</sub> /MPa	常规土工试 验剪切模量 G/MPa	储水率 S <sub>s</sub> /(m <sup>-1</sup> )	反算压缩模 量 <i>E<sub>s</sub></i> /MPa	反算剪切模量 <i>G</i> /MPa	也初始剪切刚 度 <i>G</i> <sub>0</sub> /MPa	$G$ / $G_0$	G' /G <sub>0</sub>
	⑦1粉砂夹砂质粉土	12.5	3.6	$9.9 \times 10^{-5}$	100.8	28.8	101.5	0.035	0.28
上海世纪	⑦2粉细砂	42.0	12.0	$3 \times 10^{-5}$	333.3	95.2	176.7	0.068	0.54
大都会	⑨1粉细砂	53.0	15.2	$3 \times 10^{-5}$	333.3	95.2	243.8	0.062	0.39
	⑨2含砾中砂	59.0	16.8	$3 \times 10^{-5}$	333.3	95.2	287.7	0.058	0.33
天津文化 中心站	①粉质黏土夹粉土	5.0	1.4	$2.5 \times 10^{-4}$	40.1	11.5	50.5	0.028	0.23
	②粉砂	18.1	5.2	$8.7 \times 10^{-5}$	114.9	32.8	99.6	0.052	0.33
	③粉土夹粉质黏土	6.8	1.9	$1.7 \times 10^{-4}$	59.0	16.9	68.3	0.028	0.25
	④粉砂	19.9	5.7	$8.7 \times 10^{-5}$	114.9	32.8	99.6	0.057	0.33
	⑤粉质黏土	7.4	2.1	$1.9 \times 10^{-4}$	52.0	14.9	81.4	0.026	0.18
	⑥粉砂	29.8	8.5	$7.4 \times 10^{-5}$	135.1	38.6	141.3	0.060	0.27
	⑦粉质黏土	12.6	3.6	$1.1 \times 10^{-4}$	92.5	26.4	121.4	0.030	0.21
	⑧粉土、粉砂	25.4	7.3	$6.5 \times 10^{-5}$	154.9	44.3	170.8	0.042	0.26
	⑨粉质黏土	18.5	5.3	$8.5 \times 10^{-5}$	118.3	33.8	161.8	0.033	0.21





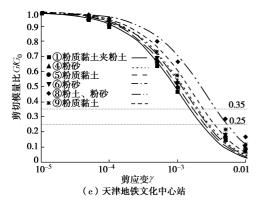


图 1 土体剪切刚度比  $G/G_0$  与剪应变  $\gamma$  关系

Fig. 1 Relationships between shear stress ratio G /  $G_0$  and shear stress  $\gamma$ 

用式 (5) 拟合通过试验获取的上述两个工程各土层  $G/G_0$  -  $\gamma$  关系 (图 1),各土层拟合相关系数  $R^2>0.99$ ,表明 HSS 模型可以描述土体剪切模量随应变增加而衰减的特点。由图 1 可知,上述工程的基坑降水引起土体平均应变范围约为  $0.1\%\sim0.5\%$ 。当土体处于小应变状态,尤其是剪切应变为  $0.01\%\sim1\%$ 时,土体剪切模量随剪应变增加迅速衰减,当剪应变为 1%时,刚度值约为  $0.1G_0$ 。对于常规土工试验,其土体应变约为  $1\%\sim15\%$ ,获取的土体剪切刚度可能更低。

表 1 给出的各土层室内试验剪切模量与初始剪切模量之比  $G/G_0$  约为  $0.03\sim0.06$ ,不能直接采用常规室内侧限压缩试验获取的土体刚度计算基坑降水引起的地面沉降。应根据土体实际发生的应变范围,采用

合适的土体刚度计算地层变形。

## 3 算例分析

含水层降压引起含水层的压缩量为

$$s = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta P_i}{E_{si}} H_i \quad . \tag{6}$$

式中 s 为含水层总压缩量 (m);  $H_i$  为第 i 含水层厚度 (m);  $E_{si}$  为第 i 含水层压缩模量 (kPa);  $\Delta P_i$  为第 i 含水层降水引起土层附加荷载 (kPa)。

$$\Delta P_i = \gamma_{\rm w} (h_{i1} - h_{i2}) \quad , \tag{7}$$

式中, $\gamma_w$  为水的重度( $kN/m^3$ ), $h_n$  为含水层降压前后的水头高度(m)。

分别以上海地铁 10 号线航中路站<sup>[8]</sup>和彭越浦泵站<sup>[9]</sup>基坑工程降水为例,对上述弹性参数确定方法进行验证。降压含水层土层参数见表 2。

表 2 含水层土层参数

Table 2 Parameters for dewatering aquifers

项目名称	降压含水层	层厚 /m	初始剪切模 量 $G_0$ /MPa	孔隙比 <i>e</i>	水平渗 透系数 /(m·d <sup>-1</sup> )	竖向渗透 系数 /(m·d <sup>-1</sup> )
bil Mil to El Mi	⑤2-1 粉质黏土	3.5	66.6	0.98	0.181	0.088
地铁10号线 航中路站	⑤2-2 粉砂层	26.2	66.6	0.83	0.372	0.143
/1/6   1 1 1 1 1 1	⑦粉细砂	5.5	176.7	0.76	3.59	2.54
彭越浦泵站	⑤粉砂层	24.9	66.6	1	0.166	0.242

#### 3.1 地铁 10 号线航中路站

上海地铁 10 号线航中路站<sup>[8]</sup>降压 100 d,根据降水方案 1,距离隔水帷幕 5,10,20,40 m,⑤<sub>2-1</sub> 水位降深分别为 5.27,5.21,5.00,4.38 m,⑤<sub>2-2</sub> 水位降深分别为 9.27,8.10,6.44,4.68 m,⑦水位降深分别为 0.97,0.97,0.96,0.94 m,分别取  $G = 0.25G_0$  和  $G = 0.35G_0$ ,各点沉降如图 2 所示。

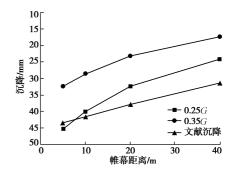


图 2 航中路地铁站基坑附近沉降

Fig. 2 Land subsidences around Hangzhong Road Station

从图 2 中可见,距离帷幕 5,10,20,40 m,文献[8]不计其它土层变形影响的地面沉降分别为 43.42,41.55,37.8 mm 和 31.32 mm;当  $G=0.25G_0$ ,沉降分别为 45.19,39.89,32.30 mm 和 24.01 mm,本文结果与原文较为接近。

#### 3.2 彭越浦泵站

彭越浦泵站<sup>[9]</sup>连续墙内径为 59.2 m,连续墙厚度为 0.8 m,地连墙深度为 37.4 m,含水层顶板埋深为 17.5 m,底板埋深为 42.4 m。降压 60 d,坑内降深 7.9 m,坑外降深  $s_{\rm w}=4.4$  m。如图 3 所示,距离帷幕 90,140,170 m 处, $G=0.25G_0$ ,沉降分别为 9.4,7.2,6.1 mm; $G=0.35G_0$ ,沉降分别为 6.7,5.1,4.4 mm;文献[9]沉降分别为 8,6,5 mm,介于两者之间。

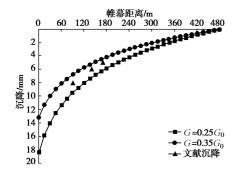


图 3 彭越浦泵站基坑附近沉降

Fig. 3 Land subsidences around Pengyuepu Pumping Station

#### 4 结 论

针对软土地区敏感环境下的深基坑降水工程,对比由常规土工试验获得的土体剪切模量 G、抽水试验反算得到的压缩模量 G'及土体小应变初始剪切刚度  $G_0$ 三者之间的关系,得到以下 3 点结论。

- (1) 敏感环境条件下,基坑降水引起土体变形剪应变范围约为 0.1%~0.5%,处于小应变范围,土体刚度远大于常规室内试验获得的剪切刚度。
- (2) 计算基坑降水引起地面沉降,可根据地面沉降控制要求估算土体实际发生的应变范围,进而采用合适的土体刚度估算土层变形,或取土体剪切刚度为 $(0.25\sim0.35)$   $G_0$  估算土层变形。
- (3)以上海地铁 10 号线航中路站和彭越浦泵站基坑工程降水为例,根据本文取值方法确定含水层压缩模量计算含水层变形,计算结果与根据抽水试验结果计算得到的变形相近,验证了本文取值方法的合理性。

#### 参考文献:

[1] 郑 刚, 曾超峰, 薛秀丽. 承压含水层局部降压引起土体 沉降机理及参数分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 802 - 817. (ZHENG Gang, ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li.

- Settlement mechanism of soils induced by local pressure-relief of confined aquifer and parameter analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 802 817. (in Chinese))
- [2] 杨 敏, 赵锡宏. 分层土中的单桩分析法[J]. 同济大学学报, 1992, **20**(4): 421 428. (YANG Min, ZHAO Xi-hong. An approach for a single pile in layered soil[J]. Journal of Tongji University, 1992, **20**(4): 421 428. (in Chinese))
- [3] 贾 堤, 石 峰, 郑 刚, 等. 深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 155 158. (JIA Di, SHI Feng, ZHENG Gang, et al. Elastic modulus of soil used in numerical simulation of deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S0): 155 158. (in Chinese))
- [4] PREENE M. Assessment of settlements caused by groundwater control[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering. 2000, **143**(4): 177 190.
- [5] ATKINSON J H, SALLFÖRS G. Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in-situ tests[C].// General Report. Proceedings of 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence, 1991: 915 – 956.
- [6] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 269 278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental Study on Parameters of HSS Model for Soft Soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 269 278. (in Chinese))
- [7] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis material models manual [R]. Delft: the Netherlands, 2006.
- [8] ZHOU N Q, VERMEER P A, LOU R X, TANG Y Q, JIANG S M. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J]. Engineering Geology, 2010, 114 (3/4): 251 260.
- [9] 孙文娟. 软土地基中基坑围护结构的挡水作用机理及其工程应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. (SUN Wen-juan. Cutoff mechanism of retaining structure on groundwater seepage during dewatering of excavation in soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)