

文章编号:1671-6833(2014)05-0054-05

# 软土结构性分析与扰动评价

刘海涛<sup>1,2</sup>, 郭院成<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 华北水利水电学院 土木工程系, 河南 郑州 450045)

**摘要:** 结构性软土一般具有明显的结构屈服应力, 外界扰动导致软土地基的结构屈服应力减小、压缩性增加。在分析软土压缩变形过程中的孔隙比及应力变化特征的基础上, 采用五段折线表示扰动结构性软土的压缩曲线, 并在此基础上提出虚拟前期固结压力的概念。通过对结构性软土扰动状况进行定量分析, 利用对数形式结合虚拟前期固结压力定义软土的扰动度, 使扰动度的定义与  $e - \lg p$  曲线相结合进而利于土体扰动强度和变形的计算分析, 并指出扰动结构性软土地基的沉降计算应合理考虑土体形成过程中的欠固结问题。工程算例显示笔者的计算方法能够合理的预测扰动软土的最终沉降。

**关键词:** 结构性; 扰动土; 虚拟前期固结压力; 沉降计算

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.013

## 0 引言

天然饱和软土在沉积过程中处于欠压密状态, 形成特有的片架结构<sup>[1]</sup>。原状软土的结构性使其具有超固结土的部分特性<sup>[2-5]</sup>。

研究结构性软土扰动状况对了解和认识软土的工程特性具有重要意义, 很多学者研究了土体扰动的评价方法<sup>[2-8]</sup>。在研究结构性土体压缩曲线的基础上, 从孔隙比变化的角度对土体扰动程度进行评价, 孔隙比对应的应力可以取原状土的自重应力或结构屈服应力; Nagaraj<sup>[5]</sup>基于结构性土体的力学特征从结构屈服应力角度给出土体扰动程度的评价方法, 并通过室内试验于 2003 年对扰动度的定义进行了改进; 王军<sup>[6]</sup>考虑到受扰动的软土地基的力学参数难以通过室内试验模拟准确测定, 以十字板试验测定的不排水强度为特征量来定量评价地基处理的扰动程度; 王立忠, 李玲玲<sup>[7]</sup>用原状土的结构屈服应力与上覆自重应力之间的差值定义原状土体的结构强度, 定义原位扰动度来评价土体在原位的扰动程度; 刘维正等<sup>[8]</sup>采用屈服应力比、应力灵敏度及衡量土体结构性对变形影响的稳定指数作为定量分析和评价土体结构性的指标。笔者在前人研究成果的基础

上分析软土扰动损伤机理, 基于扰动土虚拟前期固结压力的概念建议了一种新的软土扰动度表示方法, 研究表明采用虚拟前期固结压力定义软土扰动度的概念更加符合扰动软土的力学特征及演变发展规律, 并易于工程实践应用。

## 1 软土压缩曲线研究

### 1.1 扰动软土压缩曲线分析

地基勘探过程中, 不同地层的土样被取出后通过室内试验获取土性参数, 进而对土体的工程性质进行评价以指导工程实践。为方便分析问题, 基于工程实践可按土体状态不同定义。

图 1 为结构性软土扰动模型。图 2 为软土压缩变形分析。基于荷载作用下结构性软土的变形特点及发展趋势, 将原状土看作以较大孔隙及支撑骨架为主的片架结构部分、以较小孔隙及支撑骨架为主的稳定结构部分、以细微孔隙及土颗粒为主的不可压缩部分的组合(图 1a)。在有限外荷载作用下, 土体变形首先从具有较小弹性模量的片架结构部分开始, 土工试验中的原状土样由于在取样过程中受到有限扰动其压缩变形曲线如图 2 所示。通过室内试验曲线模拟原状土的变形曲线, 以原状土上覆土自重应力和结构屈服应力为

收稿日期:2014-05-25; 修订日期:2014-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978235)

作者简介:刘海涛(1977-), 男, 河南扶沟人, 郑州大学博士研究生, 主要从事岩土工程研究工作, E-mail: liuht@ncwu.edu.cn.

转折点其压缩曲线可表示为三段直线<sup>[2-3]</sup>. 基于图 1 中的结构性软土扰动模型,荷载作用下扰动土样的压缩变形曲线与原状土样相似,但二者变形相同时原状土样能够承受较大的荷载. 如果考虑片架结构损伤部分无法承受外界荷载<sup>[1]</sup>,借鉴原状土压缩曲线的特点,扰动土的变形曲线也可由三段直线表示.

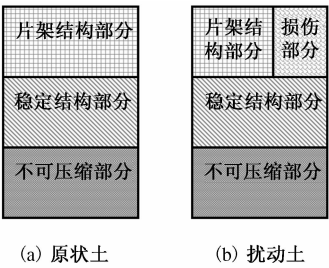


图 1 结构性软土扰动模型

Fig.1 Disturbed model of structural soft clay

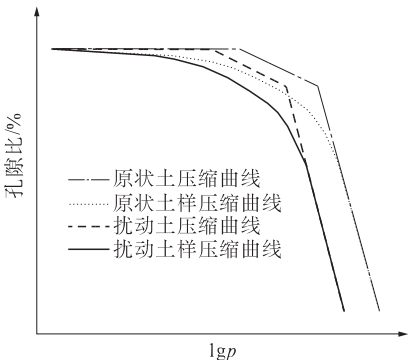


图 2 软土压缩变形分析

Fig.2 Deformation analysis of soft clay

1.2 结构性软土压缩曲线的改进

改进的软土压缩曲线如图 3 所示. 基于前文分析可以采用五段折线(图 3:ABCDEF)模拟原状土的压缩曲线,B、C 点对应于原状土的前期固结压力(上覆土自重应力)和结构屈服应力. AB 段是小于自重应力  $p_0$  的部分,为过  $e_0$  点的水平线,等效于施加土体前期固结压力;BC 段是自重应力和结构屈服应力之间的部分,其斜率等于室内回弹曲线与再压缩曲线的平均斜率,理想化为土体架空骨架结构的弹性压缩;CD 段应平行于试验室压缩曲线,但考虑到原状土样取土扰动等影响,其长度要达到其孔隙比与室内试验曲线上相应段端部孔隙比相同,此阶段土样孔隙比出现剧烈变化,表示土体片架结构出现整体性破损;DE 段表示组团结构等土体相对稳定结构破损,土体进一步压密;EF 段土体压密到一种稳定状态(室内试验较

难达到的应力状态),外力作用下其孔隙比几乎不发生变化, $e_m$  表示一种区域性软土可能的最小孔隙比.

对于重塑土变形曲线采用两段折线模拟(图 3:IEF),IE 段体现土体压密过程,EF 段表示土体的稳定状态.

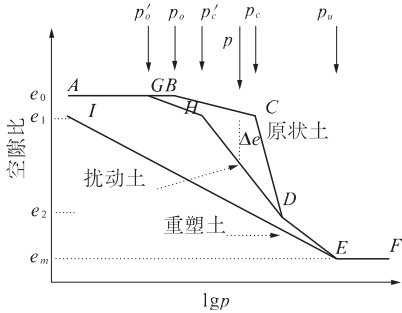


图 3 改进的软土压缩曲线

Fig.3 Revised deformation curve of soft clay

外界扰动打破结构性土体的平衡体系,损伤片架结构胶结强度. 基于细观损伤概念<sup>[9]</sup>及前文分析如图 1(b)将扰动土分解为原状土和重塑土的组合,则扰动土压缩曲线必介于二者曲线之间(图 3:AGHDEF);AG 段体现扰动土能够承受的前期固结压力,为过  $e_0$  点的水平线;GH 段的受力变形表现为扰动土结构性部分的受力变形和损伤部分的受力变形,其斜率等于扰动土样室内回弹曲线与再压缩曲线的平均斜率,理想化为扰动土体架空骨架结构的弹性压缩(H 点和 C 点具有相同的孔隙比  $e_1$ );HD 段土样孔隙比出现剧烈变化,表示土体片架结构出现整体性破损(建议  $e_2 = 0.42e_0$ <sup>[2]</sup>);其后的曲线与原状土压缩曲线相同.

2 基于虚拟前期固结压力的土体扰动度评价

原状土受到扰动后部分结构胶结强度损失导致其屈服应力减小,受扰动土体的受力变形包括结构性部分受力变形和损伤部分受力变形. 土体扰动度 SD 可定义为受扰动软土面积 S 范围内因扰动而导致结构强度失效的片架结构面积之和  $\sum S_i$ (图 1(b) 中损伤部分面积)与 S 之比,即:

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \times 100\%, \tag{1}$$

对于受到扰动的结构性土,由于软土前期固结变形主要是大孔隙变化所致,且扰动土体的受

力变形表现为结构性部分的受力变形和损伤部分(重塑土)的受力变形两部分,在  $GH$  线段上扰动土所能承担的固结压力  $p'$  为原状土体部分和重塑土体部分所承受压力的组合(图 3). 结构性软土一般具有片架结构和大孔隙特征,常规压缩试验中在 1.0 kPa 荷载下进行预压的重塑土样在  $e_0$  处几乎无法保持形状<sup>[1]</sup>,更无法承担外界荷载,结构性软土的上覆土体有效应力全部由土体的结构性强度承担,则可以认为:在  $e_0$  水平线上扰动土体承受的外界荷载全部由结构性完好的土体面积承担,胶结强度失效的片架结构面积  $\sum S_i$  不承受外界荷载(图 1(b)). 如果考虑在  $e_0$  点的水平线上(即软土保持孔隙比不变的情况下),软土受到扰动前后图 1 中片架结构部分能承受的上覆土应力不变,则有

$$p'_0 = \frac{S - \sum_{i=1}^n S_i}{S} \times p_0, \quad (2)$$

式中: $p'_0$  定义为扰动土虚拟前期固结压力,表示受到扰动后的软土在孔隙比保持不变的情况下能够承受的有效应力,扰动土的虚拟前期固结压力可以很容易从土样室内  $e - \lg p$  曲线的修正曲线上获得<sup>[7]</sup>. 由式(1),式(2)可知,结构性软土扰动度可表示为

$$SD = \frac{p_0 - p'_0}{p_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $p_0$  为原状土的前期固结压力; $p'_0$  为扰动土的虚拟前期固结压力. 根据分析可以看出式(3)扰动度的变化范围为 0% ~ 100%.

在相同的孔隙比条件下,利用原状土体的前期固结压力和扰动土体的虚拟前期固结压力定义结构性软土的扰动度有效地剔除了土体损伤部分受力变形的影响,使扰动度的定义与  $e - \lg p$  曲线相结合,在实践上更加符合实际,计算参数易于获取并且具有横向可比性,有利于土体扰动强度和变形的计算分析.

### 3 软土扰动变形计算分析

软土地基变形计算精确度的关键是选择合适的计算模型和土性参数,而在试验室内土样压缩曲线的基础上模拟原状土和扰动土的压缩曲线具有极为重要的实践价值. 图 3 显示结构性软土在有效应力  $p$  作用下的变形计算模型. 考虑到实际工程中的荷载范围一般不会超过  $D$  点,则按分层总和法计算土体受到扰动后的压缩变形如下

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (4)$$

其中,对于第  $i$  层土:当  $p'_{0i} \leq p < p'_{ci}$  时,  $\delta_i = \frac{h_i}{1 + e_{0i}}$

$$C'_{si} \lg \frac{p}{p'_{0i}}; \text{ 当 } p'_{ci} \leq p \text{ 时, } \delta_i = \frac{h_i}{1 + e_{0i}} (C'_{si} \lg \frac{p'_{ci}}{p'_{0i}} + C'_{ci} \lg \frac{p}{p'_{ci}}).$$

式中: $\Delta$  为扰动土体地基沉降; $n$  为地基沉降计算分层层数; $p'_{0i}$ 、 $p'_{ci}$  为地基中第  $i$  分层土的虚拟前期固结压力和结构屈服应力; $h_i$  为地基中第  $i$  分层土厚度; $e_{0i}$  为地基中第  $i$  分层土中点的初始孔隙比; $C'_{si}$  为地基中扰动土第  $i$  分层土的回弹指数; $C'_{ci}$  为地基中扰动土第  $i$  分层土的压缩指数; $\delta_i$  为地基中第  $i$  分层土体变形值.

## 4 算例分析

### 4.1 软土扰动附加沉降计算

某结构性软土地基排水板预压<sup>[6]</sup> 试验区面积为 130 m × 67 m,排水板梅花形布置,间距 1.4 m,入土深度 20 m,各土层的基本物理力学性质指标如表 1 所示(考虑试验区排水板设置深度范围为扰动土,以下为未扰动土),软土地基排水板施工对土体的扰动度一般在 30% 左右. 由于结构性软土沉降变形影响因素复杂,笔者仅考虑一维压缩对试验区堆载预压中心点进行扰动附加沉降计算,分析扰动导致结构性软土地基的沉降变形的影响.

由于是借用已有算例来检验本模型的计算模式,其参数调整过程如下:对于基本土样,由图 3 和表 1 中的数据可以计算出  $e_1$  的值,如果考虑到  $e_2 = 0.42e_0$ ,则可得出  $D$  点对应的荷载值;由于扰动土的扰动度可表示为原状土体结构屈服应力的损失值和结构屈服应力的比值,且扰动土体的受力变形可由结构性部分受力变形和损伤部分受力变形的线性组合表示,则利用表 1 中的数据结合图 3 的计算模型可以计算结构性软土的扰动附加沉降.

计算显示:当加荷为 30 kPa 时,扰动引起的附加沉降量约为 0.03 m;当加荷为 90 kPa 时,扰动引起的附加沉降量约为 0.18 m. 由于计算模型及基本假设不同,当荷载较低时本文计算结果比文献[6]中的沉降偏小;当荷载较高时本计算结果比文献[6]中的沉降偏大.

表 1 地基土基本指标

Tab. 1 Basic parameters of ground soil

| 编号 | 土层 | 厚度/<br>m | 天然含<br>水率 $w/\%$ | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 孔隙<br>比 $e_o$ | $P_c/p_0$ | 原状土回<br>弹指数 $C_s$ | 原状土压<br>缩指数 $C_c$ | 重塑土压<br>缩指数 $C_r$ |
|----|----|----------|------------------|--|---------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ①  | 黏土 | 1.0      | 49.5             | 17.5                                       | 1.35          | 4.0       | 0.022             | 0.165             | 0.105             |
| ②  | 淤泥 | 5.8      | 78.5             | 15.4                                       | 2.18          | 2.1       | 0.055             | 0.525             | 0.320             |
| ③  | 淤泥 | 6.3      | 70.5             | 15.8                                       | 1.95          | 1.9       | 0.058             | 0.580             | 0.340             |
| ④  | 淤泥 | 15.5     | 59.3             | 16.2                                       | 1.68          | 1.69      | 0.065             | 0.609             | 0.230             |
| ⑤  | 黏土 | 6.0      | 37.3             | 17.6                                       | 1.02          | 1.09      | 0.047             | 0.352             | —                 |

4.2 软土扰动最终沉降算例分析

结合某结构性软土地基排水板预压试验分析软土扰动最终沉降<sup>[10]</sup>. 本工程中塑料排水板梅花形布置,间距 1.2 m,深度 20 m,各土层分布以及相应的物理力学性质指标见表 2,黏土土样的试验数据显示其结构屈服应力和上覆应力的关系式可以表示为<sup>[10]</sup>

$$p_c = 1.509 \times p_0 + 26.56. \quad (5)$$

软土地基在荷载(36 kPa)作用下固结约 240 d,根据沉降实测值采用指数曲线法预测排水板处理区的最终压缩量约为 48 cm<sup>[10]</sup>. 根据现场十字

板强度的试验值及扰动度的定义,排水板施工对软土造成的扰动度约在 46% 左右<sup>[7]</sup>.

沉降计算中不考虑第 1 层土的结构性,主要考虑第 2、3 层土体的结构性以及施工扰动后的沉降变形. 由于是借用已有算例来检验本模型的计算模式,其参数需经优化和调整后才能使用. 考虑重塑土在孔隙比  $e_0$  到  $e_1$  的范围内没有荷载承受能力,借鉴式(2)则有

$$p'_c = 1.509 \times p'_0 + 26.56 \times (1 - \frac{p_0 - p'_0}{p_0}). \quad (6)$$

表 2 土体力学指标

Tab. 2 Mechanics parameters of soil

| 编号 | 土层    | 厚度/<br>m | 天然含<br>水率 $w/\%$ | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 孔隙<br>比 $e_o$ | 原状土回<br>弹指数 $C_s$ | 原状土压<br>缩指数 $C_c$ | 重塑土压<br>缩指数 $C_r$ |
|----|-------|----------|------------------|--|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ①  | 硬壳层   | 2        | 37.5             | 17.54                                      | 1.039         | —                 | 0.165             | —                 |
| ②  | 淤泥    | 14       | 65.5             | 16.86                                      | 1.824         | 0.12              | 1.30              | 0.69              |
| ③  | 淤泥    | 10       | 59.3             | 16.17                                      | 1.612         | 0.12              | 1.30              | 0.69              |
| ④  | 淤泥质黏土 | 9        | 40.7             | 17.35                                      | 1.131         | —                 | —                 | —                 |

表 3 地基土体扰动度与最终沉降值

Tab. 3 Disturbed degree and ultimate settlement of ground soil

|       |        |      |      |             |      |                   |
|-------|--------|------|------|-------------|------|-------------------|
| 文献[7] | 扰动度/%  | 0    | 30   | <u>46</u>   | 60   | 最终<br>沉降<br>48 cm |
| 计算模式  | 沉降值/cm | 22.0 | 32.5 | <u>40.2</u> | 48.3 |                   |
| 笔者    | 扰动度/%  | 0    | 13.5 | <u>21</u>   | 27.1 |                   |
| 计算模式  | 沉降值/cm | 22.2 | 38.6 | <u>47.1</u> | 58.6 |                   |

根据式(6)及文献[7]对软土扰动度的定义取不同深度  $H=3,5,7,9,11,13,15,17,19$  m 计算扰动度的平均值,并计算几种不同的扰动度与文献[7]进行对比(表 3). 基于不同的软土结构性假设、采用不同的扰动度计算模式,对于同一工况其扰动度值差别较大:笔者考虑了软土的欠固结状态及重塑土无法成型的工程特点,计算的扰动度数值较为合理.

基于本计算模型得到处理区的最终压缩量列于表 3,从表中可以看出沉降值比文献[7]的结果

偏大,除原状土体沉降变形计算值因误差原因引起数据不同外,其他沉降偏差值则主要因考虑扰动土的虚拟前期固结压力小于原状土的前期固结压力而使计算结果更接近工程实际.

5 结论

(1)在沉积形成的过程中软土处于一种欠压密状态,但软土的结构性使其在宏观上表现出超固结土的部分特性.

(2)通过土体结构性分析,认为原状土是以

较大孔隙及支撑骨架为主的片架结构部分、以较小孔隙及支撑骨架为主的稳定结构部分、以细微孔隙及土颗粒为主的不可压缩部分的组合. 在有限外荷载作用下, 相对具有较小弹性模量的片架结构部分决定了原状土的变形趋势和工程特点.

(3) 建议结构性原状土体的压缩曲线可通过包括水平段、弹性压缩段、片架结构破损段、稳定结构破损段、土体稳定段的五段折线形式表现出来; 重塑土体的压缩曲线通过压缩段和土体稳定段的两段折线表示; 扰动土体的压缩曲线介于二者之间.

(4) 对于扰动土体提出虚拟前期固结压力的概念, 其数值可以从土样的室内  $e - \lg p$  曲线的修正曲线上获得. 在孔隙比相同的条件下采用虚拟前期固结压力定义软土的扰动度, 使扰动度的定义与  $e - \lg p$  曲线相结合进而利于土体扰动强度和变形的计算分析.

(5) 工程算例显示同一工况下笔者的扰动度计算数值相对较为合理, 建议扰动度定义和计算合理考虑土体形成过程中的欠固结状态.

## 参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 26 - 28.
- [2] SCHMERTMANN J H. The undisturbed consolidation behavior of clay [J]. Transport, ASCE, 1955 (120): 1201 - 1227.
- [3] 张诚厚. 两种结构性粘土的土工特性[J]. 水利水电科学研究. 1983(4): 65 - 71.
- [4] 李涛, 钱寿易. 土样扰动影响的评价及其先期固结压力的确定[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 21 - 29.
- [5] NAGARAJ T S, MIURA N, CHUNG S G, et al. Analysis and assessment of sampling disturbance of soft sensitive clays[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 679 - 683.
- [6] 王军, 高玉峰, 高红珍. 结构性软土地基施工扰动定量分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 789 - 795.
- [7] 王立忠, 李玲玲. 结构性土体的施工扰动及其对沉降的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 697 - 704.
- [8] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 太湖湖沼相天然沉积土结构性评价[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1616 - 1620.
- [9] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984 (80): 233 - 245.
- [10] 陈云敏. 温州电厂 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 煤场工程试验研究报告[R]. 杭州: 浙江大学岩土工程研究所, 2000: 16 - 42.

## Evaluation of Structure and Disturbance of Soft Ground

LIU Hai-tao<sup>1,2</sup>, GUO Yuan-cheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Civil Engineering Department, North China Institute of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** There is an obvious yield stress for structural soft soil, and external disturbances result yield stress decrease and compression increase. Five-section line was used to simulate the compression curve of disturbed soil, and virtual pre-consolidation pressure was put up after the varied characteristics of pore ratio and stress were analyzed in the process of deformation. Disturbed degree of soft soil that defined of logarithmic form was closely connected with  $e - \lg p$  curve, and thus conducive to strength calculation and deformation analysis of disturbed soil. Engineering practice showed that inadequate consolidation of soft soil should be considered when disturbance degree was calculated, and this method in the assay could reasonably predict the ultimate settlement of disturbed soil.

**Key words:** structure; disturbed soil; virtual pre-consolidation pressure; settlement calculation