

文章编号: 1000-7598-(2007)12-2614-05

加荷比对结构性软土沉降特性的影响

王 军^{1,2}, 高玉峰¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 南京市建设工程施工图审查中心, 南京 210024)

摘 要: 软土一般具有结构性, 试验表明, 加荷比会对结构性软土压缩特性有很大的影响, 加荷比增加土体剪切趋势, 降低土体结构强度, 使土体的结构屈服应力值和压缩指数降低。在试验的基础上, 给出了考虑加荷比影响的结构性软土地基的沉降计算方法。工程算例表明, 在加载终值相同的情况下, 如果加荷比过大, 就会增大结构性软土地基沉降产生附加沉降, 为了减小对软土结构性的破坏而影响土体压缩特性, 建议对结构性软土的加荷比不宜采用为 1:1 以上, 宜采用 1:0.25 或 1:0.5。

关 键 词: 软土; 结构性; 加荷比; 沉降特性

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

Effect of loading ratio to structured soft clay settlement

WANG Jun^{1,2}, GAO Yu-feng¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Censor Center of Construction Drawing Design, Nanjing 210024, China)

Abstract: Most natural clays have structural property; the experiments show that the influence of loading ratio on the settlement property of the structured soft clay is notable. The loading ratio increases the shearing trend in soft clay, which depress structure strength, structure yield stress and compression index. Based on the experiment, soft clay settlement calculation method considering influence of loading ratio is presented. The examples show that the bigger loading ratio in the course of loading enlarges settlement of structured soft clay ground. For the sake of reducing the influence of loading ratio on settlement property, it is suggested that the loading ratio of structured soft clay 1:0.25 or 1:0.5 should be adopted. If the loading ratio of structured soft clay is bigger than 1:1, it is not suitable.

Key words: soft clay; structural property; loading ratio; settlement characteristics

1 引 言

采用堆载预压法处理软土地基时, 施加载荷的控制一直是工程界所关心的问题, 尤其在地质条件差、工期短的工程中更是如此。对于软土地基而言, 因土体含水率高、结构性强、压缩性大、强度低, 其自身物理力学性质是制约加荷速率的主要因素, 加荷速率包含两个因素: 每级荷重的加荷比及其持续时间。对于加荷比的影响, 曾有过不同见解^[1]: Casagrande和Matlock分别用波士顿黏土和重塑土进行试验, 结论是加荷比不影响其压缩特性; 直到1960年以Leonards和Altschaeffl为首的一批学者通过试验得出黏性土的主压缩性随加荷比的减小而显著降低、加荷比对压缩曲线影响显著等结论, 加荷比的影响才逐渐得到认可, 不过对于这种影响的机制还

不是很清楚。Schmertmann从天然海相黏土的某些试验似乎得出了加荷速率影响不大的结论, 然而天然中存在着深厚而又均匀的黏土, 其含水率几乎不随深度而变, 这个事实使Terzaghi坚信加荷速率对土体的压缩性有很大的影响。笔者认为, 他们的结论也许都是正确的, 只是分别适用于不同的土类。对于结构性软土, 加荷比则影响显著^[2]。

结构性软土在堆载预压过程中, 会发生土体结构损伤: 一是加荷前, 地基处理扰动引起的初始损伤^[3]; 二是加荷过程引起的受荷损伤。加荷比(荷重增量比)作为土体结构损伤的影响因素所产生的土体结构损伤属于受荷损伤范畴, 加荷比影响土体的压缩指数和土体结构屈服应力。目前加荷比对于沉降影响程度的计算还鲜有报道, 本文通过试验和理论分析加荷比对结构性软土沉降的影响。

收稿日期: 2005-11-29

修改稿收到日期: 2006-03-23

作者简介: 王 军, 男, 1971 年生, 博士后, 主要从事于软土工程特性和基础工程方面的研究。E-mail: wjnjw@yahoo.com.cn

2 加荷比对压缩试验曲线影响

加荷比对压缩试验曲线影响从温州取土, 采用薄壁取土器, 钻孔深度为 36.6 m, 地基从上到下依次为硬壳层, (2-1)淤泥, (2-2)淤泥, (3-1)淤泥质黏土, (3-2)淤泥质粉质黏土, 本次试验选代表性的土样: 3 号、9 号和 19 号, 并制备相应的重塑土, 土样基本情况见表 1, 地基土体的基本物理力学性质指标如表 2 所示。试验起始压力为 12.5 kPa, 终止压力为 800 kPa, 分三组不同的加荷比进行固结试验。三组不同加荷比的具体情况如下: (1) 加荷比 1:1, 压力共分 6 级。(2) 加荷比 1:0.5, 且在自重压力附近以 50 kPa 增量予以加密, 压力共分 16 级。(3) 加

荷比 1:0.25, 压力共分 20 级。考察不同的加荷比对原状土和重塑土的压缩曲线随着压力变化趋势的影响。3 号、9 号和 19 号土样的原状土样及其重塑土样在 3 种不同的加荷比下的压缩曲线分别如图 1~3。

表 1 试验土样基本情况

Table 1 Basic conditions of soil samples

土样 编号	取样深 度/m	含水 率/%	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙 比 e	自重应 力/kPa
3	-7.8~8.3	63.0	1.632	1.737	50
9	-16.8~17.3	62.8	1.607	1.776	105
19	-24.3~24.8	45.1	1.838	1.289	220

表 2 地基土体的基本物理力学性质指标

Table 2 Basic physico-mechanical parameters of ground soil

土层 编号	厚度 /m	天然含水 率 $W/\%$	重 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙 比 e_0	$\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{zo}}$	回弹指 数 C_s	原状土压 缩指数	重塑土压 缩指数
①黏土	1.0	49.5	17.5	1.35	4.0	0.022 0	0.165	0.105
②淤泥	5.8	78.5	15.4	2.18	2.1	0.050 5	0.525	0.320
③淤泥	6.3	70.5	15.8	1.95	1.9	0.058 0	0.580	0.340
④淤泥	15.5	59.3	16.2	1.68	1.69	0.065 2	0.609	0.230
⑤黏土	6.0	37.3	17.6	1.02	1.09	0.046 9	0.352	

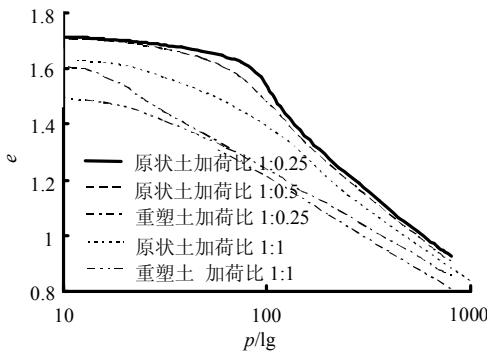


图 1 3 号土样在不同加荷比下的压缩曲线
Fig.1 Compression curves of various loading ratios (soil sample No.3)

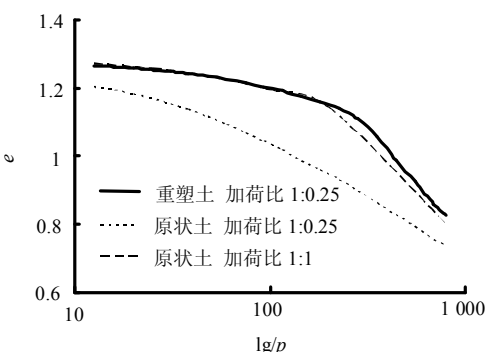


图 3 19 号土样在不同加荷比下的压缩曲线
Fig.3 Compression curves of various loading ratios (soil sample No.19)

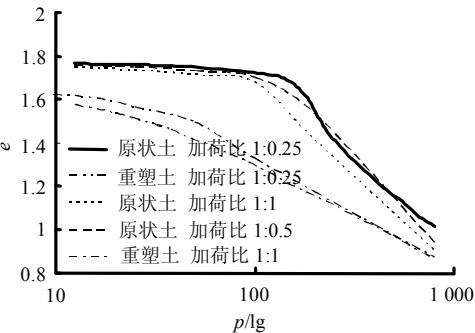


图 2 9 号土样在不同加荷比下的压缩曲线
Fig.2 Compression curves of various loading ratios (soil sample No.9)

从试验结果中可以得出: (1) 加荷比对原状土压缩曲线的性状影响很大, 原状土在不同加荷比下的压缩曲线形状相差较大, 在相同压力下, 加荷比越小, 土的孔隙比越大。即原状土在 1:0.25 加荷比时的孔隙比大于其在 1:0.5 加荷比时的孔隙比; 原状土在 1:0.5 加荷比时的孔隙比大于其在 1:1 加荷比时的孔隙比。加荷比越大, 结构性软土的结构屈服应力和压缩指数越小, 这说明加荷比越大, 对土体扰动越大, 土体的结构性遭到破坏越大。(2) 加荷比对重塑土压缩曲线的性状影响较小。不同加荷比

下, 重塑土压缩曲线基本一致。(3) 加荷比对 3 号、9 号原状土压缩性的影响大于对 19 号原状土压缩性的影响。3 号、9 号是淤泥, 19 号是淤泥质黏土; 可见土体结构性越强, 加荷比对土体的压缩曲线的影响就越大。如果加荷比较大, 就会在结构性软土中产生较大的剪切趋势, 这种剪切趋势会对土体结构产生损伤, 造成土体结构屈服应力和压缩指数下降, 因此, 在确定土体结构屈服应力时, 对于软土初始段的加荷比应小一些, 硬土可适当大一些。

3 加荷比引起土体结构损伤度

从压缩试验曲线中可以看出, 加荷比不同会使土体结构受到不同程度地损伤, 降低土体结构屈服应力, 因此, 可以通过结构屈服应力值的变化定量计算加荷比对土体结构的损伤程度。

$$SD \% = \frac{\sigma_{pc} - \sigma_{pf}}{\sigma_{pc} - \sigma_{zo}} \times 100 \% \quad (1)$$

式中 $SD\%$ 为土体结构损伤度; σ_{pc} 为原状土结构屈服应力; σ_{pf} 为损伤土结构屈服应力; σ_{zo} 为有效自重应力。

表 3 不同加荷比下试验土样损伤度
Table 3 Damage degrees of soil samples with various loading ratios

土样 编号	σ_{zo}/kPa	σ_{pc}/kPa	σ_{pf}/kPa (1:0.25)	σ_{pf}/kPa (1:0.5)	σ_{pf}/kPa (1:1)
3	50	95	90	70	55
9	105	178	170	140	110
19	220	370	340	270	230
损伤度 $SD\%$			10~20	50~60	80~90

对不同加荷比情况下, 使用式 (1) 对 3 号、9 号和 19 号土样的土体结构损伤程度进行计算, 结果如表 3 所示。加荷比在 1:0.25 时土体结构的损伤度为 10 % 左右; 加荷比在 1:0.5 时土体结构的损伤度为 50 % 左右; 加荷比在 1:1 时土体结构的损伤度为 90 % 左右, 土体结构损伤度与加荷比基本呈线性关系。通过计算结果可以看出, 当加荷比超过 1:1 时, 土体结构破坏程度是相当高的。因此, 为了减小对软土结构性的破坏而影响试验结果, 建议对软土压缩试验的加荷比不宜采用 1:1, 最好选择 1:0.25 或 1:0.5。

4 不同加荷比结构性软土压缩曲线

大量的室内试验及 Nagaraj 和 Schmertmann 试验结论的基础上^[5,9,12], 结合薄壁取土样的室内压缩曲线, 得到结构性软土的原位压缩曲线: 水平段、

弹性压缩段、结构破损压缩段。该模型能反映软土的结构性特征, 各段具有较明确的物理意义。不同加荷比重塑土压缩曲线基本一致, 加荷比重塑土压缩曲线影响较小。黏性土回弹和再压缩指数的平均斜率 C_s 一般被认为受影响很小^[5,10], 在结构性软土地基加荷比试验的基础上, 不同加荷比得结构性软土压缩曲线可以简化为如图 4 模型所示进行沉降计算, 重塑土压缩曲线从点 $A(e_0, \sigma_{zo})$ 到 $C(0.42e_0, \sigma)$, 图中为 AC 段, 在加荷比很小的情况下, 对土体结构屈服应力影响较小, 压缩曲线为 ABC 段, 当加荷比增加到一定程度耐土体结构因剪切趋势受到损伤, 结构屈服应力值降低, 压缩曲线为 AEC 段, 不同加荷比的结构性软土地基应该按图 4 所示模型进行沉降计算。

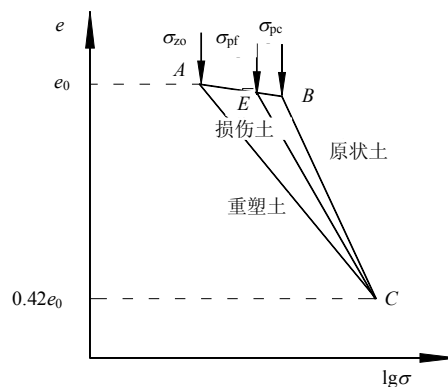


图 4 结构性软土压缩曲线

Fig.4 Compression curves of structured soft clays

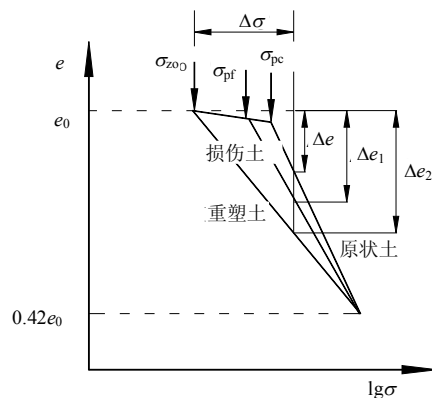


图 5 附加沉降计算原理

Fig.5 Calculation principle of additional settlement

5 考虑加荷比影响结构性软土地基沉降计算

结构性软土地基沉降计算公式, 关键是结构屈服应力和压缩性指标的选取, 结构性软土的抗变形能力与应力水平及损伤度有关, 在计算中按实际应力水平选取不同的计算参数; 即应力低于土体结构

屈服应力时, 选用回弹指数, 当超过土体结构屈服应力时选用压缩指数。研究表明, 压缩指数随损伤度增加而减小, 结构性软土压缩指数随损伤度增加而减小的幅度较大, 结构屈服应力随损伤度增加而减小, 结构屈服应力与损伤度间基本呈线性关系^[8,9], 回弹指数由回弹试验确定, 加荷比引起土体结构损伤度由式 (1) 计算得到, 则考虑加荷比影响的结构性软土地基沉降计算公式如下:

(1) 结构屈服应力的确定

$$\sigma_{pf} - \sigma_{zo} = (1 - SD\%)(\sigma_{pc} - \sigma_{zo}) \quad (2)$$

(2) 结构性软土地基的压缩指数确定

$$C_d = SD\%C_r + (1 - SD\%)C_c \quad (3)$$

(3) 结构性软土地基的沉降公式

当 $\sigma_{zo} + \Delta\sigma \leq \sigma_{pf}$ 时

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{oi}} [C_{si} \lg \frac{\sigma_{zoi} + \Delta\sigma_i}{\sigma_{zoi}}] \quad (4)$$

当 $\sigma_{pf} < \sigma_{zo} + \Delta\sigma$ 时

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{oi}} [C_{si} \lg \frac{\sigma_{pfi}}{\sigma_{zoi}} + C_{di} \lg \frac{\sigma_{zoi} + \Delta\sigma_i}{\sigma_{pfi}}] \quad (5)$$

式中: S_c 为地基沉降; C_{si} 为地基中原状土第 i 分层土的回弹指数; C_{ci} 为地基中原状土第 i 分层土中点的压缩指数; C_{di} 为地基中损伤土第 i 分层中点的压缩指数, C_{ri} 为地基中重塑土第 i 分层中点的压缩指数。

6 加荷比引起的附加沉降计算

在孔隙比为 e_0 和 $0.42 e_0$ 所对应的应力水平范围内, 加荷比会使结构性软土地基产生附加沉降, 原理如图 5 所示, 附加沉降的计算公式为

$$\Delta S = \Delta e_1 - \Delta e \quad (6)$$

式中: ΔS 为附加沉降; 根据本文的计算模型可以得出, 在一定的应力水平下, 加荷比小的沉降小, 加荷比大的沉降大, 加荷比会引起软土地基的附加沉降。

7 工程算例分析

结合温州地压某工程预压试验进行计算分析, 试验区面积为 $130 \text{ m} \times 67 \text{ m}$, 各土层的基本物理力学性质指标如表 2 所示^[11]。温州软土具有较强的结

构性, 所以沉降计算公式应采用结构性软土的沉降计算公式, 这里假设加荷比最大影响深度为 20 m , 以下为不受加荷比影响区, 其上部按损伤土地基沉降公式计算, 下卧层按原状土地基沉降公式, 两部分相加即可得到地基的总沉降值。根据文中沉降公式对软土地基沉降进行对比计算, 计算结果如图 6~8。试验表明, 加荷比和土体结构损伤度基本呈线性关系, 图中加荷比就用土体损伤度代替表示。

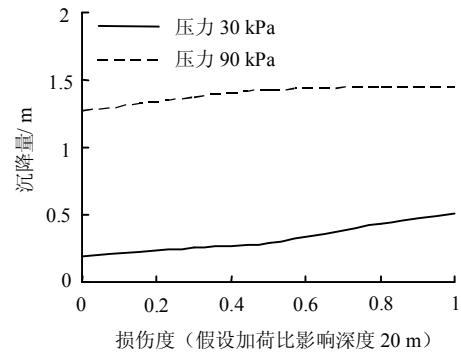


图 6 损伤度与沉降量关系

Fig.6 Relation between damage degree and settlement

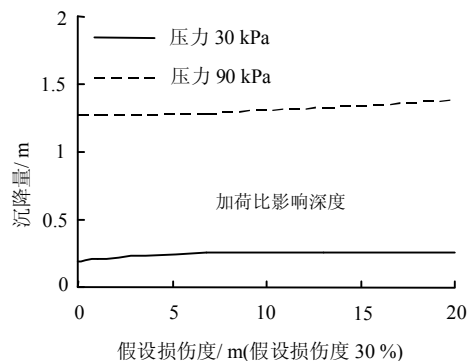


图 7 加荷比影响深度与沉降量关系

Fig.7 Relation between the influence depth of loading ratio and settlement

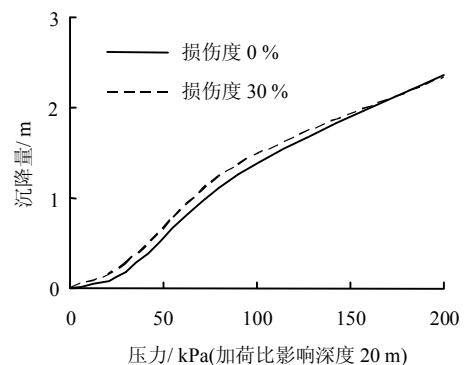


图 8 不同损伤度的沉降曲线

Fig.8 Settlements of various damage degree

图 6 的计算结果表明,地基的沉降量随损伤度的增加而增加,加荷比对地基沉降计算结果影响明显;图 7 表明随着加荷比影响深度的增加,则地基的沉降量增加;应力水平大于结构屈服应力时,加荷比影响深度增加影响相对明显。图 6~8 分析表明,在一定的应力水平下,随损伤度和加荷比影响深度的增加,则地基的附加沉降越大。图 8 的计算结果表明,因加荷比影响产生地基的附加沉降有一个峰值,随着应力水平的提高附加沉降量会先增加后减小,随着应力水平的升高,不同加荷比条件下,地基最终沉降量则趋于相等,峰值位置在土体结构屈服应力附近。计算结果表明,加荷比对土体结构存在影响,进而影响地基的沉降特性,在实际工程的沉降计算中应引起重视。由于影响软土地基沉降因素很多,很难精确计算预测得出实际沉降值,加荷比的影响只是其中因素之一,这里旨在分析其影响规律,以做工程参考。

8 结 论

(1) 试验表明加荷比会对结构性软土地基压缩特性有很大的影响,加荷比增加土体剪切趋势、降低土体结构强度,使土体的结构屈服应力值和压缩指数降低。

(2) 在试验的基础上,给出了考虑土结构性和加荷比影响的沉降计算方法,算例表明,在一定的应力水平下,地基的沉降量随土体损伤度和加荷比影响深度的增加而加大,亦即附加沉降越大,加荷比及土结构性对沉降影响越明显。在加载终值相同的情况下,如果加载前期加荷比较大,就会使结构性软土地基产生附加沉降,为了减小对软土结构性的破坏而影响土体压缩特性,建议对软土的加荷比宜采用 1:0.25 或 1:0.5。加荷比引起地基的附加沉降有一峰值,附加沉降量会先增加后减小,随着应力水平的升高,不同加荷比条件下,地基最终沉降量则趋于相等,峰值位置在土体结构屈服应力附近。

(3) 天然软土一般都具有结构性,结构性对软土地基存在影响,在实际工程的沉降计算中应予以考虑,由于影响软土地基沉降因素很多,加荷比和土结构性的影响只是其中因素之一,这里旨在分析其影响规律,以做工程参考。

参 考 文 献

- [1] 魏汝龙.软黏土的强度和变形[M].人民交通出版社,1987:9:113-117.
- [2] 丁利.软土结构性与砂墙地基固结理论及应用[博士学位论文 D],杭州:浙江大学,2003.3
- [3] DING Li, Study of Structured Soft Clay and Consolidation Behavior of Sand-wall Ground[Ph.D. thesis]. Hangzhou: Zhejiang University,2003.
- [4] 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(5):789—795.
- [5] WANG Jun, GAO Yu-feng, GAO Hong-zhen. Quantitative analysis of foundation treatment disturbance of structured soft clay ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (5): 789—795.
- [6] Casagrande, A. the Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance[A]. **Proceedings of 1st ICSMFE**[C]. [s.L]:[s.n] 1936, 3: 60—84.
- [7] Schmertmann, J. H. The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay[J]. **Transport, ASCE**, 1955,120: 1201—1227.
- [8] Egerov,K.E.,The observed settlements of buildings as compared with preliminary calculation[A].**Proceedings of 4th ICSMFE**[C]. [s.L]:[s.n]1957, 1:291.
- [9] 张诚厚.两种结构性黏土的土工特性.水利水运科学研究,1983(4): 65—71.
- [10] 徐永福.土体受施工扰动影响程度的定量化识别[J].大坝观测与土工测试,2000,24(2):8—10.
- [11] XU Yong-fu. Quantitative determination of disturbance degree of soils influenced by construction[J]. **Large Dam Observation and Civil Test**, 2000, 24(2): 8—10.
- [12] Nagaraj,T.S.et al.Analysis of compressibility of sensitive soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1990, 116(GT1):105—118.
- [13] Rutledge,P.C, Relation of undisturbed Sampling to laboratory Testing[J]. **Transport, ASCE**, 1944, 109:1164
- [14] 陈云敏.温州电厂 2#、3#煤场工程试验研究报告[R].浙江大学岩土工程研究所,2000.5.
- [15] 王军,高玉峰.扰动结构性软土地基沉降特性分析[J].岩土力学,2006,27,(8):1 384—1 388.
- [16] WANG Jun, GAO Yu-feng. Settlement characteristics analysis of disturbed structured soft clay ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006,27, (8): 1 384—1 388.