

预压地基中止加固的综合判定

娄 炎

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 首先阐明了软基等载与超载预压的概念及工后沉降的组成, 然后从土力学压缩与固结的基本原理出发, 推导出能考虑等载、超载与固结度对工后沉降影响的工后主固结沉降计算式, 通过预压类型系数 Φ 和固结度 U , 把单纯考虑等载、超载工况及加固时间影响的工后主固结沉降各计算式统一于该式. 式中的最终沉降量、沉降速率和 β 值都通过实测沉降曲线或沉降速率曲线求得, 各参数间满足时间相一致的原则. 利用该式对两个工程实例进行了推算, 推算结果接近于实际观测值.

关 键 词: 预压加固; 工后沉降; 超载预压; 预压中止; 主固结; 综合判定

中图分类号: TU471.8: TU472.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)04-0006-05

预压法^[1]已广泛应用于软基处理, 但部分经预压处理的软土地基, 其沉降长期得不到稳定, 产生的工后沉降量也较大, 影响了建筑物的正常使用和功能发挥. 其重要原因是由于预压中止时间控制不当及预压中止时工后沉降量推算不准确. 对于工后沉降的规律和推算方法, 目前已取得一些研究成果, 如文献[2-4]研究了预压时沉降速率与剩余沉降的关系; 文献[5-6]研究了超载预压卸荷时沉降速率与工后沉降的关系; 文献[7]得出超载与等载预压对工后沉降有不同的影响. 本文从土力学压缩与固结的基本原理出发, 根据工程对工后沉降量的要求, 考虑不同预压类型对工后沉降的影响得到适应各种预压类型及能考虑预压时间的工后沉降量计算式. 并结合实际工程的现场沉降监测数据, 对计算结果进行验证和分析.

1 预压地基中止加固时的工后主固结沉降

1.1 预压地基工后沉降的组成

根据预压荷载大小与永久使用荷载的相对关系可分为欠载预压、等载预压和超载预压. 预压地基的工后沉降指构筑物建成后到大修期之间所发生的沉降量, 一般由处理深度内的剩余主固结沉降量、未处理深度内的剩余主固结沉降量和整个软土层的次固结沉降量三部分组成, 前两部分之和称工后主固结沉降. 如果处理深度内的主固结沉降在构筑物建成时已经完成, 则工后沉降量仅考虑未处理深度内的剩余主固结沉降量和整个软土层的次固结沉降量; 如果整个软土层的主固结沉降在构筑物建成时都完成了, 那工后沉降量只有次固结变形引起的次固结沉降量.

工后主固结沉降可用实测沉降曲线或实测沉降速率曲线来推求. 下面以高速公路工程为例加以说明. 由于一般公路的大修期较长, 本文将工后主固结沉降等同于整个软土层剩余主固结沉降, 由此引起的误差很小, 实际工程中可以略去不计.

1.2 用实测沉降曲线推算工后主固结沉降

预压类型对利用实测沉降资料推算最终沉降有影响, 从而也影响了推算工后主固结沉降量的正确性, 先考虑超载预压的情况. 高速公路超载预压时荷载变化路径见图1. 如果路堤是等载预压, 荷载应到达 P_a 位置, 超载后到达 P_b , 预压结束卸去超载部分和当量面层厚度的填土, 荷载由 P_b 退到 P_c , 然后再做面层, 荷载又回到 P_a . 相应的压缩路径是软土原在初始压缩曲线上的 O 点, 超载预压后沿初始压缩曲线到达 B 点, 预压

收稿日期: 2010-02-10

作者简介: 娄 炎(1944-), 男, 山东安邱人, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程专业研究. E-mail: ylounhri@126.com

结束卸去超载部分和当量面层厚度填土后,沿回弹曲线 BE 到达 E 点,之后再做面层,沿再压缩曲线到达 D 点,此时的应力状态与运行时应力状态相同. 超载预压使主固结沉降量增大,增大部分是图中的 AD 段,最终压缩后孔隙比为 e_d .

如果超载预压结束后没有卸载及再加载的过程,用超载预压期间的沉降资料推求最终沉降量时,理论上应落在 B 点;经卸载及再加载过程,则落在 D 点,总的压缩量增大. 因此,用超载预压期间的沉降曲线推求预压结束后有卸载及再加载过程的最终沉降量会有误差,需加以修正.

这里用孔隙比的增量 Δe 表示经超载预压、卸载、再加载后的最终压缩量(图1),

$$\Delta e = e_o - e_d = (e_o - e_b) - (e_d - e_b) = C_c \lg(P_b/P_o) - C_e \lg(P_b/P_a) = C_c \lg(P_b/P_o) [1 - C_e \lg(P_b/P_a)/C_c \lg(P_b/P_o)] \quad (1)$$

$$\Phi = [1 - C_e \lg(P_b/P_a)/C_c \lg(P_b/P_o)] \quad (2)$$

$$\Delta e = \Phi C_c \lg(P_b/P_o) \quad (3)$$

式中: Φ 为预压类型系数,修正用超载预压沉降曲线推求有卸载、再加载过程的正常固结土的最终沉降量. 式(3)中的 $C_c \lg(P_b/P_o)$ 部分就是超载预压无卸载、再加载过程正常固结土的最终沉降量,从理论上说,它可以用实验室得到的参数通过(如分层综合法)计算求得,也可用实测沉降曲线来推求最终沉降量. 预压类型系数 Φ 的取值范围为 0.90~0.99,对于超载比大者取小值. 如果测定了回弹指数与压缩指数,可用式(2)计算 Φ 值. 那么用超载预压期间的沉降曲线来推求运行期的最终沉降量 S_∞ 和工后主固结沉降量 S_r 时,有

$$S_r = \Phi S_\infty - S_t \quad (4)$$

式中: S_∞ 为用超载预压期间沉降资料推求的最终沉降量; S_t 为超载阶段中止预压时的实测沉降量.

对于超载预压阶段主固结没有完成的情况,推求的工后主固结沉降量为

$$S_r = \Phi S_\infty / U_t - S_t \quad (5)$$

式中:固结度 U_t 最好按照土中平均超静孔隙水压力的消散比例确定,若通过固结理论来计算,误差会比较大.

对于等载预压情况,式(2)中 $P_b = P_a$,此时,易得 $\Phi = 1$,亦可用式(5)计算工后主固结沉降量 S_r .

1.3 用实测沉降速率推算工后主固结沉降

当用指数曲线拟合实测沉降曲线时,指数曲线可用下式表示:

$$S_t - S_0 = \alpha(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\beta}}) \quad (6)$$

式中: α 和 β 为系数;其余各符号的意义详见图2. 坐标为 (t_0, S_0) 的点称为沉降曲线的拐点,其后的图形曲线设定按指数曲线规律延伸. 可见,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $S_t \rightarrow S_\infty$, 即有:

$$S_\infty = S_0 + \alpha \quad (7)$$

对式(6)求导可得:

$$S_t = \frac{dS_t}{dt} = \frac{\alpha}{\beta} e^{-\frac{t-t_0}{\beta}} \quad (8)$$

当超载预压主固结未完成时, t 时刻的工后沉降量应是 $S_r = \Phi S_\infty / U_t - S_t$, 结合式(6)和(7),经推演可得

$$S_r = \dot{S}_t \beta + (\Phi / U_t - 1) S_\infty \quad (9)$$

式(9)即为超载预压下主固结未完成时用沉降速率表示的工后主固结沉降计算式. 若主固结已完成,则 $U_t = 1$;若是等载预压,则 $\Phi = 1$.

式(9)表明用超载预压期间的沉降速率推求的工后主固结沉降量要加上 $(\Phi / U_t - 1) S_\infty$,才等于经卸载、再加载工况的工后主固结沉降量. 当固结度 U_t 小于 Φ 值时,这一项大于

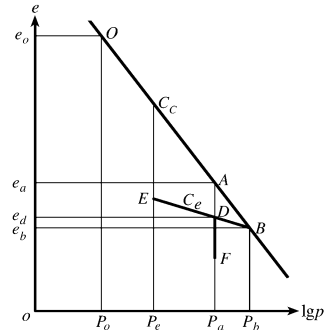


图1 超载预压软土压缩路径

Fig. 1 Surcharge preloading soft soil compression path

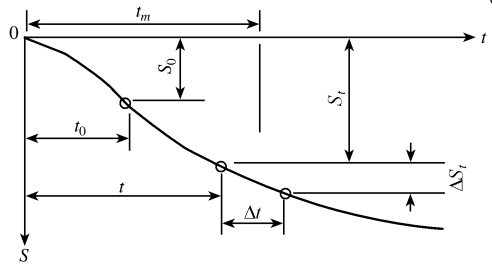


图2 运用指数曲线法推求最终沉降量

Fig. 2 Final settlement calculation with exponential curve

0,说明超载下未完成主固结工况的工后主固结沉降大于主固结完成工况的工后主固结沉降.当主固结完成时,则减去 $(1-\Phi)S_{\infty}$,说明超载预压经过卸载、再加载工况的工后主固结沉降比没有卸载、再加载工况的工后主固结沉降小.

2 预压地基中止加固时的工后次固结沉降及预压中止的判定

预压中止后的工后沉降量中还应包括工后次固结沉降量,特别是软土的含水率、液限、黏粒含量高及软土层厚时.推求工后次压缩量的方法是室内试验加计算.研究成果^[8-9]表明,预压类型对次压缩量也有影响.

对于等载预压工况,其荷载等于预压荷载,工后次压缩与荷载大小无关^[9].工后次压缩量按下式计算:

$$\Delta e_s = -C_{\alpha} \lg(t_1/t_2) \quad (10)$$

$$S_s = \sum \frac{\Delta e_{si}}{1 + e_{0i}} H_i \quad (11)$$

式中: t_1 为主固结结束时间(a); t_2 为到大修期的时间(a), $t_2 = 15 + t_1$; H_i 为第*i*层土层厚度.

对于超载预压工况,工后次压缩量与超载预压时的荷载大小有关^[9].本文次压缩的计算引用文献^[9]的研究成果,超载预压的工后次压缩在图3上就是E点垂直向下的一段,也即图1上的DF段.

$$\Delta e_x = C_{\alpha} \lg \frac{t_i + \Delta t}{t_i} \quad (12)$$

$$t_i = t_c \left(\frac{P_c}{P_i} \right)^{\frac{C_c - C_e}{C_{\alpha}}} = t_c (OCR)^{\frac{C_c - C_e}{C_{\alpha}}} \quad (13)$$

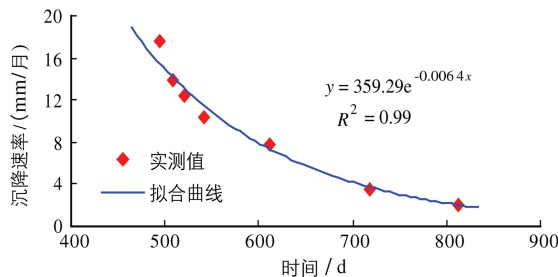
式中: C_c , C_e , C_{α} 分别为压缩指数、回弹指数和次固结系数; OCR 为超固结比; t_c 为超载主固结完成时间,这里规定等于0.003 a; t_i 为回弹再压缩完成后工后次固结开始的时间; Δt 为大修期时间,可取15 a,即图3中的 $(t - t_i)$.

计算出工后主固结沉降 S_p 和工后次固结沉降 S_s 后,总的工后沉降就是二者之和,当它小于构筑物工后沉降的容许值时就可以中止预压,进入后续施工.不同构筑物工后沉降的容许值不同,均有相应的标准.

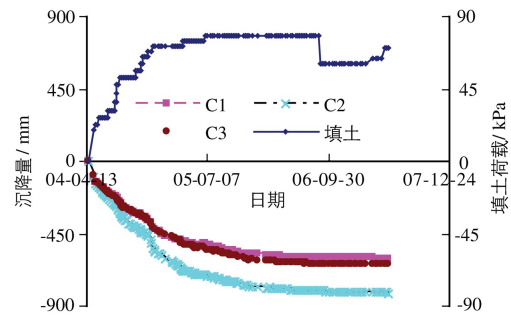
3 工程实例

3.1 等载预压工况

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路工程A14路段是有效等载预压的一般路段,其工后沉降控制标准是300 mm.路堤填土达设计高程后,等载预压自第485天起到第855天止,该时段沉降速率如图4所示,在等载预压时段内的沉降速率时程曲线可用指数曲线表示.



(a) 沉降速率曲线



(b) 地表沉降变化曲线

图4 A14段等载预压期间沉降速率曲线及地表沉降变化曲线

Fig.4 Settlement rate curve and ground surface settlement curves at A14 section

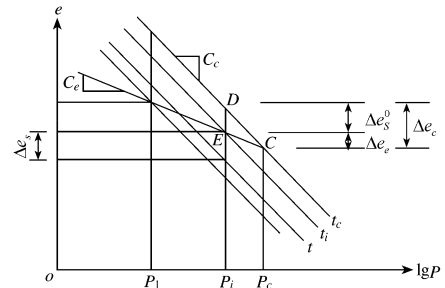


图3 超载预压工况的次压缩量计算

Fig.3 Surcharge preloading delayed compression calculation

到预压第 845 天时孔压监测表明加固深度内超静孔隙水压力已消散完毕, 固结度应等于 1. 因属等载预压, 所以 $\Phi = 1$. 利用式 (8), (9) 及图 4(a), 推得 A14 路段的 $\beta = 5.2083$, 本时段实测平均沉降速率为每月 8.25 mm, 工后主固结沉降量为 43.0 mm, 用沉降曲线推求的剩余沉降量 (指数法) 为 42.7 mm. 可见, 计算结果与用实测沉降曲线推求的基本一致 (见图 4(b)). 按照式 (10) 和 (11), 计算 A14 路段的工后次压缩量为 62.6 mm, 则 A14 路段总的工后沉降量为 $43.0 + 62.6 = 105.6$ mm.

3.2 超载预压工况

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路工程 B3 路段是有效超载预压的一般路段, 其工后沉降控制标准是 300 mm^[10]. B3 路段在中止抽真空后, 软土层在 17.5 ~ 29.5 m 深度还有 0.86 ~ 13.8 kPa 的正超静孔压存在, 说明该段在超载情况下尚未完成主固结 (见图 5).

固结度的计算以超静孔压面积与附加应力面积比来估算. B3 路段软土在停抽时正超静孔压面积为 126.1 mkPa, 而该深度范围内附加应力面积为 888.4 mkPa, 二者比值为 0.142, 相当于 14.2% 未完成主固结, 可看成超载荷载下的固结度达到 85.8%. 而 $\Phi = [1 - C_e \lg(P_b/P_a) / C_c \lg(P_b/P_0)] = 1 - C_e / C_c (\lg(P_b/P_a) / \lg(P_b/P_0)) \approx 0.98$, 其中, $C_e / C_c = 0.064$; $\lg(P_b/P_a) / \lg(P_b/P_0) = 0.26 \sim 0.28$; 按式 (5) 计算的工后主固结沉降为 427.4 mm. 计算结果表明 B3 路段的工后沉降量较大, 不能满足规范要求, 此时终止抽真空为时尚早. 再按沉降速率计算工后主固结沉降. 沉降速率随时间的变化规律见图 6. 用式 (9) 计算的 B3 路段的工后主固结沉降为 429.6 mm, 与用沉降曲线以指数法推求的结果相近. 计算得 B3 路段的工后次压缩量极小, 可忽略不计. 因此, B3 路段超载预压后的工后主固结沉降量为 430 mm.

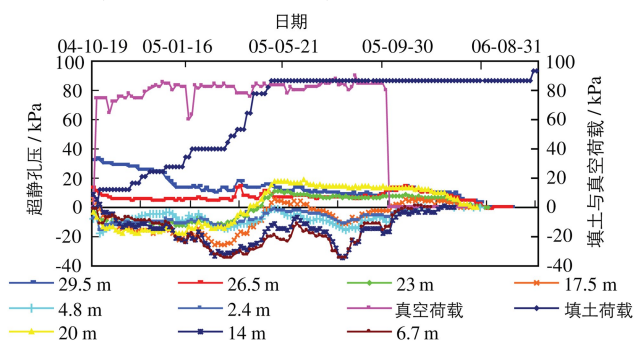


图 5 B3 路段真空联合堆载预压超静孔隙水压力变化曲线
Fig. 5 B3 section vacuum combined with surcharge preloading excessive pore water pressure curve

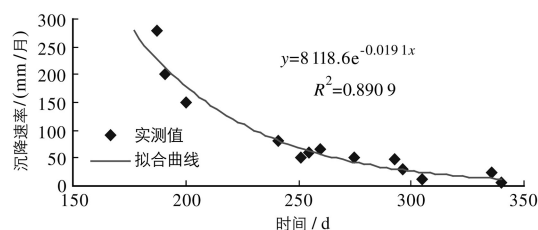


图 6 B3 路段在超载预压时段沉降速率的变化
Fig. 6 B3 section settlement rate change during surcharge preloading period

3.3 推算结果与实测值比较

上述计算表明, 等载预压 A14 段的次压缩量约占总工后沉降量的 60%, 而超载预压的工后次压缩量几乎被超载预压提前消除了, 可见超载预压有利于减小总工后沉降量. 同时, 在超载预压期间尽可能地加长预压期, 是减小总工后沉降量的主要途径.

A14 和 B3 路段从卸载到通车 1 年间的实测的沉降量分别为 51 和 234 mm, 用指数曲线拟合法计算的相应值为 44.5 和 194.5 mm, 可见, 计算结果与实测值较为接近.

4 结 语

本文建议的推求工后主固结沉降量的两种方法均强调采用实测沉降资料, 推求中所涉及的参数也由实测数据来计算. 用沉降速率推求工后主固结沉降的表达式中的各量都应是同一时刻或与同一时段相对应的量, 否则就违背了推导过程中的条件或假定. 其次, 当用沉降速率推求工后主固结沉降量时, 取用的 β 值是一个时段 (如 Δt) 内的推求值, 应先求出该时段内各时刻的沉降速率再求平均值. 沉降曲线上两点之差的均值与曲线斜率之和的均值存在很大差别, 时段越长, 差别越大.

参 考 文 献:

- [1] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S]. (JGJ 79-2002, Technical code for ground treatment of buildings[S]. (in Chinese)).
- [2] 刘吉福, 陈新华. 应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 233-235. (LIU Ji-fu, CHEN Xin-hua. Application of rate of settlement to evaluate residual settlement of embankment on soft soil ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 233-235. (in Chinese))
- [3] 张长生, 张佰友, 刘国楠, 等. 应用沉降速率推算剩余沉降及卸荷时间[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 28-32. (ZHANG Chang-sheng, ZHANG Bo-you, LIU Guo-nan, et al. Application of settlement velocity to calculate residual settlement and unloading time[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(4): 28-32. (in Chinese))
- [4] 张长生, 刘国楠, 江辉煌. 剩余沉降及卸载时间的推算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 22-26. (ZHANG Chang-sheng, LIU Guo-nan, JIANG Hui-huang. Study on estimation of residual settlement and unloading time[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Suppl2): 22-26. (in Chinese))
- [5] 杨涛, 李国维. 公路软基超载预压卸荷时间确定的沉降速率法研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1942-1946. (YANG Tao, LI Guo-wei. Settlement rate method for determining the surcharge removal time for embankment on soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1942-1944. (in Chinese))
- [6] 谢东云, 杨曙明. 超载预压下软基工后沉降实用计算方法[J]. 南通工学院学报: 自然科学版, 2004(增刊): 179-180. (XIE Dong-yun, YANG Shu-ming. Calculation method of post-construction settlement on soft ground in over surcharge preloading[J]. Journal of Nantong Institute of Technology (Natural Science), 2004(Suppl): 179-180. (in Chinese))
- [7] 刘吉福, 莫海鸿. 对沉降速率法确定卸载时机的认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3065-3072. (LIU Ji-fu, MO Hai-hong. Understanding of determination of unloading time using settlement velocity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl1): 3065-3072. (in Chinese))
- [8] 张惠明, 徐玉胜, 曾巧玲. 深圳软土变形与工后沉降[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 509-514. (ZHANG Hui-ming, XU Yu-sheng, ZENG Qiao-ling. Deformation behavior of Shenzhen soft clay and post-construction settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 509-514. (in Chinese))
- [9] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521-526. (YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521-526. (in Chinese))
- [10] JTG D30-2004, 公路路基设计规范[S]. (JTG D30-2004, Specifications for design of highway subgrades[S]. (in Chinese))

Comprehensive determination method of preloading discontinued on soft foundation

LOU Yan

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: This paper puts forward a new calculation method of post-construction settlement for improving soft foundation by preloading. The author first clarifies the definition of preloading soft foundation by equivalent embankment weight load and over load, and the composition of post-construction settlement, and then derives the calculation formula on post-construction primary consolidation settlement from the basic principle of soil mechanics on compression and consolidation. Considering equivalent weight load, over load and degree of consolidation effects, the formula takes into account the impact of equivalent weight load and surcharge and consolidation on the post-construction primary consolidation settlement with coefficient (Φ) of preloading types and degree (U_t) of consolidation. The final settlement, the settlement rate and β values in the formula are obtained by settlement curves and settlement rate curves. Parameters in the formula need to satisfy the period corresponding guidelines. Finally, the formula is used to calculate two project examples with results agreeable to observed data.

Key words: preloading stabilization; post-construction settlement; over surcharge preloading; preloading discontinued; primary consolidation; comprehensive determination