

文章编号: 1000-7598-(2006) 05-0745-04

真空-堆载联合预压的地基沉降简化计算方法

刘汉龙, 彭 劼, 陈永辉

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 研究了负压作用下的地基沉降简化计算方法, 负压作用下的地基沉降计算应考虑其受力特点的影响, 实际工程观测表明, 现有规范对真空预压地基的沉降估算修正系数过大。通过理论推导, 建立了真空预压及真空-堆载联合预压作用下地基沉降修正系数公式。分析结果表明, 一般真空预压工程修正系数 m_s 取值范围可在 0.55~1.20 之间, 真空-堆载联合预压的分层总和法计算修正系数可取 0.70~1.30。

关 键 词: 真空预压法; 真空-堆载联合预压法; 分层总和法; 沉降修正系数

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Simplified method of ground settlement under vacuum combined surcharge preloading

LIU Han-long, PENG Jie, CHEN Yong-hui

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Simplified method of ground settlement under negative pressure is studied, which the deformation mechanism under vacuum preloading is considered. Observation of settlement for vacuum preloading engineering shows that the practical settlement is smaller than the predicted one based on the National Code of China. The settlement correction factors for vacuum preloading and vacuum combined surcharging preloading are established based on theoretical derivation. It is concluded that the scope of ground settlement correction factor m_s may be 0.55 to 1.20 for vacuum preload engineering; and 0.70 to 1.30 for vacuum combined surcharge preloading with layer wise summation method.

Key words: vacuum preloading; vacuum combined surcharge preloading; layer wise summation method; settlement correction factor

1 引 言

近年来, 真空-堆载联合预压法在我国高速公路、码头、机场等工程建设中得到了广泛应用, 并取得了许多成功的经验。但对其沉降计算方法仍需进行深入研究。在工程应用中, 分层总和法是最常用的沉降估算方法, 即土层在荷载作用下, 求出各个分层的一维压缩量, 求和后乘以综合修正系数 m_s 。虽然该方法存在着诸多缺点, 但由于该方法简便易行, 得到工程界的普遍使用, 再加上多年的实践, 设计人员对修正系数的取值、误差的大小逐步积累了经验, 使得这种方法的计算结果在精度上可以满足工程要求。所以, 一般采用该方法作为设计

计算的依据。目前常用的真空预压沉降计算方法, 是把真空预压荷载直接视为堆载作用在地基上, 并采用与堆载预压不同的修正系数。如堆载预压一般取修正系数为 $m_s = 1.1 \sim 1.4$, 而真空预压取 $m_s = 1.05 \sim 1.2$ ^[1], 真空-堆载联合预压修正系数要大一些。 m_s 的影响因素主要有: 侧向变形、瞬时沉降、次固结沉降, 在一般的高速公路软土地基中, 侧向变形影响是最主要的影响因素。实际工程表明, 采用以上沉降修正系数进行真空和真空-堆载联合预压沉降计算值偏大^[2~4]。本文首先从理论上论述了真空预压及堆载预压之间变形量计算的差异, 然后结合现场试验实测资料, 对分层总和法在真空预压及真空-堆载联合预压中的应用进行了探讨。

收稿日期: 2004-09-02

修改稿收到日期: 2004-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50379010)。

作者简介: 刘汉龙, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 从事土动力学及地基基础工程等工作。E-mail: hliu@mailsvr. hhu.edu.cn

2 真空预压下地基沉降修正系数

真空预压作用效果与各向等压比较接近, 而堆载预压是竖向作用大于水平向的作用^[5,6]。为了研究各向等压情况与 K_0 情况下的压缩量之间的差异, 本文求解了下述弹性力学问题, 如图 1、图 2 所示。在等向应力作用下, 竖向与横向应变相等, 其应变分别为

$$\varepsilon_{z1} = \frac{1}{E}(\sigma_z - 2\mu\sigma_z) = \frac{1}{E}(1-2\mu)\sigma_z \quad (1)$$

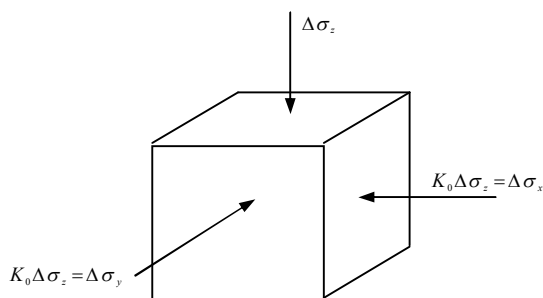


图 1 K_0 状态下的受力情况
Fig.1 Stress status of K_0

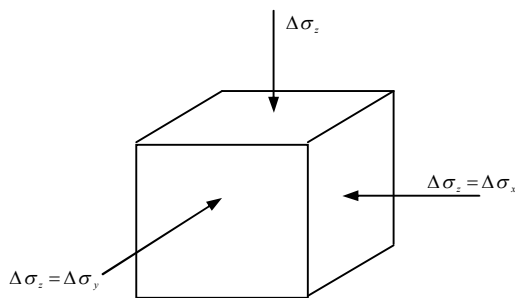


图 2 真空预压荷载作用下的受力情况
Fig.2 Stress status under vacuum preloading

在 K_0 情况下的竖向应变为

$$\varepsilon_{z2} = \frac{1}{E}(\sigma_z - 2K_0\mu\sigma_z) = \frac{1}{E}(1-2K_0\mu)\sigma_z \quad (2)$$

式中 K_0 为静止侧压力系数, $K_0 = \frac{\mu}{1-\mu}$; μ 为泊松比; ε_{z1} 为各向等压下的应变; ε_{z2} 为 K_0 状态下的应变。

则在各向等压和 K_0 情况下的竖向应变比值为

$$\varepsilon_{z1}/\varepsilon_{z2} = \frac{1-2\mu}{1-2K_0\mu} \quad (3)$$

如果地基土体的泊松比 $\mu=0.35$, K_0 取为 0.6, 可以计算出来, $\varepsilon_{z1}/\varepsilon_{z2}=0.52$, 即真空预压情况下的应变为堆载预压情况下的 0.52 倍。一般情况下, 如果将 μ 的取值范围定为 0.2~0.35, K_0 的取值范

围定为 0.6~0.85, 则上述两种情况的竖向变形比范围在 0.51~0.85 之间。

根据观测, 真空荷载一般对砂井区域范围加固效果明显, 砂井以下区域作用较小, 因此, 采用分层总和法计算时, 压缩层厚度可以取至砂井区域。这一点与堆载预压有较大的区别, 堆载预压的计算深度不是根据砂井深度来确定, 而是根据应力比来决定的。

上述模型虽然不能完全反映实际情况下真空预压与堆载预压之间的沉降差异, 但是也说明了在相同的竖向附加应力情况下, 真空预压的沉降计算与堆载预压相比, 应该注意最终修正系数的取值。

在堆载情况下, 沉降采用分层总和法计算, 一般采用修正系数 $m_s = 1.1 \sim 1.4$, 根据上述分析结果, 真空预压荷载作用与堆载作用的应变比在 0.51~0.85 之间, 通过简单推导, 可以得到在真空预压作用下的 $m_s = 0.56 \sim 1.19$ 。(后文用 $m_{s \text{ 堆载}}$ 表示堆载预压下的修正系数, $m_{s \text{ 堆载}} = 1.1 \sim 1.4$)

3 真空-堆载联合预压下地基沉降修正系数

现考虑真空-堆载联合预压的情况, 假设真空荷载为 σ_{z1} , 堆载荷载为 σ_{z2} , 由于真空-堆载联合预压法下的沉降计算, 是先求出在竖向总荷载 $\sigma_{z1} + \sigma_{z2}$ 下的沉降, 再乘以修正系数。因此首先考虑堆载荷载为 $\sigma_{z1} + \sigma_{z2}$, 水平向总荷载为 $K_0(\sigma_{z1} + \sigma_{z2})$ 的情况, 在此受力情况下的竖向应变为

$$\varepsilon_{z3} = \frac{\sigma_{z1}}{E} [1 - 2K_0\mu + l(1 - 2K_0\mu)] \quad (4)$$

式中 l 为堆载荷载与真空荷载的比值, 即 $l = \frac{\sigma_{z2}}{\sigma_{z1}}$; ε_{z3} 为将总荷载都考虑为堆载情况下的应变。

考虑到实际上真空预压荷载与堆载预压作用特点的不同, 则其竖向总荷载为 $\sigma_{z1} + \sigma_{z2}$, 水平向总荷载为 $\sigma_{z1} + K_0\sigma_{z2}$, 真空-堆载联合预压情况下的竖向应变则为

$$\varepsilon_{z4} = \frac{\sigma_{z1}}{E}(1-2\mu) + \frac{\sigma_{z2}}{E}(1-2K_0\mu) = \frac{\sigma_{z1}}{E} [(1-2\mu) + l(1-2K_0\mu)] \quad (5)$$

式中 ε_{z4} 为将总荷载中的真空荷载考虑为等向作用情况下的应变。

则在此种情况下, 真空-堆载联合预压和堆载预压的竖向应变比值为

$$\varepsilon_{z4}/\varepsilon_{z3} = \frac{1-2\mu+l(1-2K_0\mu)}{1-2K_0\mu+l(1-2K_0\mu)} \quad (6)$$

考虑 μ 的取值范围为 0.2~0.35, K_0 的取值范围为 0.6~0.85。一般真空预压设计荷载为 80 kPa, 考虑到堆载填土高度一般范围在 1.0~7.0 m, 则可运算出 l 的取值范围为 0.25~1.75。综合上述因素, 可以得出, $\varepsilon_{z4}/\varepsilon_{z3}$ 的范围为 0.64~0.93。堆载荷载越大, $\varepsilon_{z4}/\varepsilon_{z3}$ 的比值越接近 1.0。采用分层总和法计算时, 真空-堆载联合预压作用下的修正系数 $m_s = m_{s\text{堆载}} \times (0.64 \sim 0.93) = 0.70 \sim 1.30$ 。 $m_{s\text{堆载}}$ 为堆载预压下的修正系数, $m_{s\text{堆载}} = 1.1 \sim 1.4$ 。

4 工程实例验证

杭一金一衢高速公路萧山段 k32+281.0~k32+417.5, 该路段地基的地质条件为: 第 1 层为填土, 厚 0.6 m, 在进行真空-堆载预压处理前被挖除; 第 2 层为黏土, 厚 2.0 m; 第 3 层为淤泥质黏土, 厚 10.4 m; 第 4 层为淤泥质亚黏土, 厚 8.6 m; 第 5 层为亚黏土, 厚 1.6 m; 第 6 层为砾砂, 未钻穿。在预压施工前, 按照三角形排列、间距 1.2 m 打入 22 m 长的塑料排水板^[7]。

4.1 真空预压情况下的沉降量

本工程的荷载施加情况如图 3 所示。从图中可以看出, 真空荷载开始作用后, 并没有立刻施加堆载荷载, 因此, 有机会分别对真空荷载作用下以及真空-堆载联合作用下的地基变形量进行测试, 并应用本文方法进行计算分析。

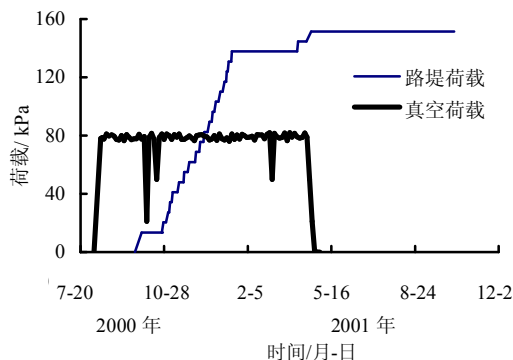


图3 荷载施加曲线
Fig.3 Loading curve

根据测得的各个时期的孔压数据可以计算出各个时刻地基中的有效附加应力情况, 从 2000 年 8 月 1 日抽真空, 至同年 9 月 20 日, 其孔压降低量如图 4 所示。由于在真空预压时地基的总应力不变, 因此地基中的竖向附加应力增量即为孔压的降低量, 如图 5 所示。由此时的竖向附加应力, 用 e -lg P 法对沉降进行了计算。计算的各个时期的沉降值及相应的实测值如表 1 所示。

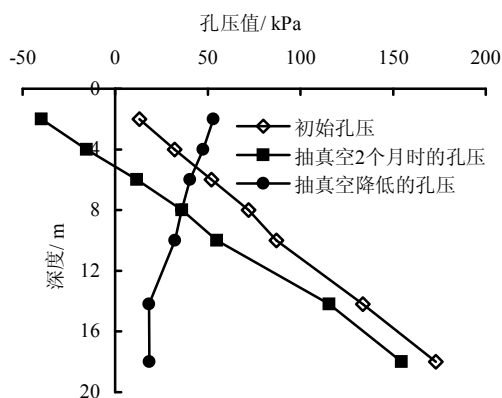


图4 抽真空 50 d 的孔压情况
Fig.4 Pore water pressure after 50 d vacuum preloading

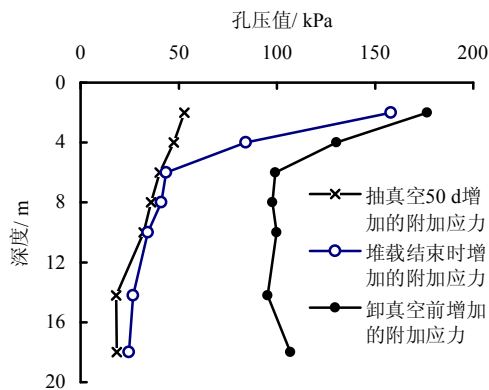


图5 各个时期的附加应力增加情况
Fig.5 Extra-stress of various period

表1 真空预压阶段的沉降计算值和实测值
Table 1 Calculated and measured data of vacuum preloading period

参数	抽真空 30 d	抽真空 40 d	抽真空 50 d
分层总和法计算沉降值/cm	68.24	76.82	108.12
实测沉降值/cm	28.61	35.10	41.13
m_s	0.42	0.46	0.38

注: 沉降计算所用的竖向有效应力按照原位有效应力与孔压测量值的差值确定。

从表 1 中可以看出, 抽真空阶段的沉降计算值远大于沉降实测值, 所取的 m_s 值在 0.4 左右, 与本研究结果是很接近的。本研究结果及实测数据都说明, 真空预压沉降计算的修正系数 m_s 应重新评估其取值范围。此外, 还有一个问题, 即在真空预压时, 实际是处于各向等压之下, 而计算所取的参数均为侧限压缩下的压缩性指标, 这也会造成误差。因此, 在计算真空预压下的沉降时, 可考虑采用各向等压固结试验确定其压缩性指标。

4.2 真空-堆载联合预压情况下的沉降量

本工程中, 真空预压 2 个月左右, 开始施加堆荷载, 真空-堆载联合预压的沉降计算及实测值如表 2 所示。从表中可以看出, 根据实测的附加应力推求得到的沉降值与实测值比较吻合, m_s 值在 0.89~1.1 之间, 与本文计算方法预测的结果也是吻合的。

表 2 真空-堆载联合预压阶段的沉降计算值和实测值
Table 2 Calculated and measured data of vacuum combined surcharge preloading period

参数	抽真空 50 d	堆载结束	卸真空前	总沉降
分层总和法计算沉降值/cm	108.12	155.66	227.55	279.07
实测沉降值/cm	41.13	167.49	226.94	247.08
m_s	0.38	1.08	1.00	0.89

5 结 论

本文研究了真空和堆载作用下地基沉降与受力的不同之处, 堆载预压是 K_0 固结状态, 真空预压是各向等压状态, 负压条件下地基沉降计算与堆载预压有本质的不同。实际工程观测表明, 现有规范对真空预压地基的沉降估算修正系数过大。通过理论推导, 建立了真空预压及真空-堆载联合预压作用下地基沉降修正系数公式, 分析结果表明, 一般真空预压工程 m_s 取值范围在 0.55~1.20 之间, 真空-堆载联合预压的分层总和法计算修正系数可取 0.70~1.30。进一步研究还可根据以往的真空预压及真空-堆载联合预压的工程实测沉降, 研究出地区性的取值规律, 使本文方法具有更好的实用性。

参 考 文 献

- [1] JGJ79-91, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 彭劫. 真空-堆载联合预压法加固机理与计算理论研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [3] 刘汉龙, 彭劫, 陈永辉, 等. 真空-堆载联合预压处理高速公路软基三维有限元计算[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 247—252.
LIU Han-long, PENG Jie, CHEN Yong-hui, et al. Analysis of 3-D Biot consolidation FEM of expressway's soft foundation improved by vacuum combined surcharge preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 247—252.
- [4] 吴跃东, 余湘娟, 殷宗泽. 负压条件下考虑土体损伤和流变的有限元分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 137—141.
WU Yue-dong, YU Xiang-juan, YIN Zong-ze. Analysis of soft foundation in considering rheologic behavior and damage under the negative pressure condition by FEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 137—141.
- [5] 刘珍娜. 真空排水预压法加固软土地基的沉降计算[J]. 福建建设科技, 1996, (2): 9—10.
- [6] 曹永琅, 丛建, 吴晓峰. 高速公路超软土地基的真空预压加固研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 771—775.
CAO Yong-lang, CONG Jian, WU Xiao-feng. Study on consolidation of supersoft ground of expressway with vacuum preloading method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 771—775.
- [7] 彭劫, 刘汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报, 2003, 31(5): 560—563.
PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Mechanism of foundation strengthening by vacuum surcharge preloading method[J]. **Journal of Hohai University**, 2003, 31(5): 560—563.