

文章编号: 1000-7598-(2005) 12-1949-04

真空预压中真空度与孔隙水压力的关系分析

张功新^{1,2}, 莫海鸿¹, 董志良², 赵建国³

(1. 华南理工大学 土木工程系, 广州 510640; 2. 广州四航工程技术研究院, 广州 510230; 3. 建材广州地质工程勘察院, 广州 510403)

摘 要: 真空度与孔隙水压力是两个不同的概念, 在土体中某点真空表测试的真空度与测点处的孔压差并不相同, 但它们有着内在的联系。根据气体状态方程和平衡方程, 推导出在某点真空表反映的真空度值与孔压计反映的孔压差的理论关系式。测点在地下水位以上时, 两者的测试结果是一致的; 测点在地下水位以下时, 真空度小于孔压差, 两者可按公式进行换算。测试结果表明: 现场实测结果与理论计算结果基本吻合, 证实了理论推导的正确性, 也说明了真空表内真空度与孔隙水压力的关系。

关 键 词: 真空表; 孔压计; 真空预压; 真空度; 孔隙水压力

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Analysis of relationship between vacuity and pore-water pressure in vacuum preloading

ZHANG Gong-xin^{1,2}, MO Hai-hong¹, DONG Zhi-liang², ZHAO Jian-guo³

(1. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, Guangzhou 510230, China; 3. Guangzhou Geotechnical Investigation Institute of Building Material, Guangzhou 510403, China)

Abstract: Vacuity and pore-water pressure are two different conceptions, the vacuity measured by vacuum meter in the soft soil is different from the difference of pore-water pressure measured by piezometer; but there is an immanent relation between them. The theoretical formula about vacuity in vacuum tube and pore-water pressure at the observation point was obtained in this paper by using equation of gas state and equilibrium equation. When the observation point is above the groundwater surface, the vacuity is the same as the difference of pore-water pressure. When the observation point is under the groundwater surface, the vacuity is less than the difference of pore-water pressure, but they can be calculated each other by using the theoretical formula. The test results explain the relations between the vacuity and the pore-water pressure and show that the theoretical formula is correct.

Key words: vacuum meter; piezometer; vacuum preloading; vacuity; pore-water pressure

1 引 言

现场真空度的量测是真空预压加固软基监测的重要内容, 可为工程设计、加固效果分析以及真空预压机理研究提供重要基础资料。在工程实践中, 经常采用真空度探头和孔隙水压力计两种仪器测量真空度和负压^[1~6], 但对这两种仪器的测试结果及其分析存在一些认识上的误解, 导致不同工程报道的测试和分析结果存在较大的甚至是定性上的差异。真空度与孔隙水压力是两个不同的概念, 前者描述气体状态, 后者描述液体状态, 在土体中某点真空表测试的真空度与测点处的孔隙水压力差并不

相同。文献[1]对真空度与负压概念进行了澄清, 并定性地分析了两种测试手段对结果的影响及其相互关系, 但没有进行定量分析, 认为真空度测点布置在地下水位以上时, 真空表读数反映的是该处的孔隙水压力; 而对地下水位以下的真空度测点, 真空表读数无意义, 不能反映测点处的孔隙水压力值。事实上两者有着内在的联系, 文献[2]从理论上推导出了根据真空表读数计算真实真空度的理论关系式, 但没有考虑土体的压缩。本文在考虑土体的压缩的基础上, 根据气体状态方程和平衡方程, 推导出在某点真空表反映的真空度值与孔压计反映的孔隙水压力差值的理论关系式, 并对此进行了详细的

收稿日期: 2004-12-24

修改稿收到日期: 2005-05-24

资助项目: 广东省交通厅资助项目 (No. 2002-05); 广州四航工程技术研究院资助项目 (No. 岩 S2004004)

作者简介: 张功新, 男, 1970 年生, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事地下结构与岩土工程方面的研究。E-mail: zhanggongxin@126.com

分析与讨论, 现场实测结果与理论计算结果基本吻合, 证实了本文理论推导的正确性, 也说明了真空表测试的真空度与真空探头处孔隙水压力的区别与联系。

2 理论公式

为简化推导, 根据实际情况, 假定真空管内气体的温度及其截面面积在整个抽真空过程中保持不变, 并忽略真空管内水蒸气和孔隙水渗流的影响。真空表读数与孔压计读数的关系示意图如图 1 所示。图中 l_0 为真空管露出地面的长度; h_w 为初始水位距离地面的距离; h_0 为真空探头距离地面的初始深度; Δh 为抽真空后真空管内水位下降值; P_{w0} 为初始状态时真空探头处的孔隙水压力; P_{w1} 为抽真空后某状态时真空探头处的孔隙水压力; ΔS 为从初始状态至抽真空后某状态时地面至真空探头间的土层压缩量。

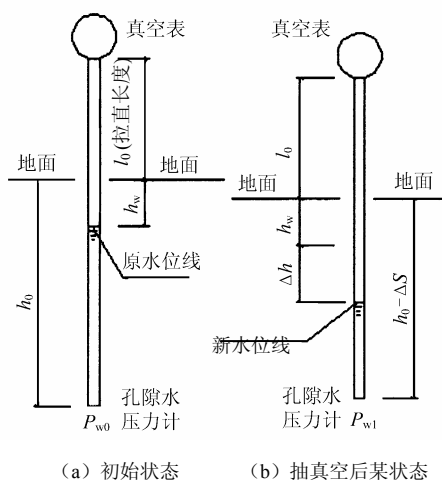


图 1 真空表读数与孔压计读数关系示意图

Fig.1 Illustration of the relationship between the vacuity and pore-water pressure

根据气体状态方程有:

$$P_0 V_0 = P_1 V_1 \quad (1)$$

式中 P_0 为一个标准大气压; P_1 为抽真空后真空管内气体压强; V_0 为真空管内空气在初始状态时的体积; V_1 为真空管内空气在抽真空后某状态时的体积。

$$\text{而} \quad V_0 = (l_0 + h_w)A \quad (2)$$

式中 A 为真空管的横截面积。

$$V_1 = (l_0 + h_w + \Delta h)A \quad (3)$$

$$\text{令} \quad L_0 = l_0 + h_w \quad (4)$$

将式(2)~(4)代入式(1), 得

$$P_1 = \frac{L_0}{L_0 + \Delta h} P_0 \quad (5)$$

根据式(5)得

$$\Delta h = \frac{P_0 - P_1}{P_1} L_0 \quad (6)$$

根据平衡方程有:

$$P_{w0} = \gamma_w (h_0 - h_w) \quad (7)$$

$$P_{w1} = P_1 - P_0 + \gamma_w (h_0 - \Delta S - h_w - \Delta h) \quad (8)$$

$$\text{令} \quad P_a = P_0 - P_1, \quad P_w = P_{w0} - P_{w1} \quad (9)$$

式中 γ_w 为水的重度; P_a 为真空表反映的真空探头处的真空度读数 (为正数, 与正常读数习惯一致); P_w 为孔隙水压力计反映的真空探头处的孔隙水压力差 (对正常固结土而言, 此即为测点处的负压值, 在真空预压状态下为正数, 与 P_a 对应)。将式(7)、式(8)代入式(9)有:

$$P_w = P_a + \gamma_w (\Delta h + \Delta S) \quad (10)$$

将式(6)代入式(10), 并化简有:

$$P_w = P_a + \gamma_w \left(\frac{P_a}{P_0 - P_a} L_0 + \Delta S \right) \quad (11)$$

式(11)即为用真空表读数表达的测点处孔隙水压力差的关系式。

变换式(11)可得

$$P_a^2 - (P_w - \gamma_w \Delta S + P_0 + \gamma_w L_0) P_a + (P_w - \gamma_w \Delta S) P_0 = 0 \quad (12)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \left[P_w - \gamma_w \Delta S + P_0 + \gamma_w L_0 - \sqrt{(P_w - \gamma_w \Delta S + P_0 + \gamma_w L_0)^2 - 4(P_w - \gamma_w \Delta S) P_0} \right] \quad (13)$$

式(13)即为用测点处孔隙水压力差 P_w 表达的真空表读数 P_a 的关系式。

现在对两者关系进行讨论:

(1) 上述关系式是基于真空探头埋设在地下水位以下, 并在整个测试过程均保持在地下水以下的前提下得出的。根据式 (11) 可知, 其右边第 2 项是由于真空管内水的存在引起的, 若真空探头和孔隙水压力计埋设在地下水位以上, 即真空管内无水时, 其值应为零, 因此可得到 $P_w = P_a$, 此时真空表读数即为真实的真空度, 事实上根据测点处流体压力平衡方程也有 $P_w = P_a$, 此时 P_w 实际上是孔隙水压力计周围的气体压力差, 亦即孔隙水压力计相当于真空表装置, 这个结论与文献[1]的实测结果一致。

(2) 当真空管内有水时, 根据式 (11) 可知, $P_w > P_a$, 即真空表反映的读数小于孔隙水压力计反映的孔隙水压力差。

(3) 当根据式(6)计算 $\Delta h \geq h_0 - \Delta S - h_w$ 时, 此时真空管内已没有水, 这有两种情况: 一种情况是抽真空后地下水位下降至真空探头以下, 此时孔隙水压力计所测的是真空压力, 即有 $P_{w1} = -P_a$, 这种情况多出现在真空探头埋设在较浅处, 当 P_{w0} 很小时, 则有 $P_w \approx P_a$; 第二种情况就是真空探头仍在地下水位以下, 但真空管内没有水, 真空管内的气体必将随着孔隙水压力的消散而被排出, 直至 $\Delta h = h_0 - \Delta S - h_w$, 此时真空管内的真空压力与真空探头处孔隙水压力形成平衡, 根据真空探头处的平衡方程 (8) 也有 $P_{w1} = -P_a$, 即真空管内的真空度与真空探头处的孔隙水压力值相等。

(4) 式 (10) 反映了土体压缩对根据真空表读数计算测点处的孔隙水压力差 (消散值) 的影响, 当测点埋设较浅时, 土体压缩量往往很小, 其对计算孔压差影响不大; 但当测点埋设较深时, 此时土体压缩量往往较大, 其对计算孔压差的影响就不能忽略。如土体压缩达到 1 m 时, 计算的孔压差就要相差 10 kPa。因此, 当土体压缩性大, 测点较深时, 土体的压缩是不能忽略的。

(5) 本文的推导是在假定真空管截面在整个抽真空过程中不变而得到的。事实上, 当真空探头埋设较深时, 土体压缩较大, 常规真空塑料软管极易弯折, 导致真空管内水位不能正常下降甚至上升 (截面变小), 此时真空管内的真空度将会很低甚至为零, 文献[2]中就出现这种情况, 但其对此未加以分析对待, 简单的认为当真空表读数为零时无法进行换算, 即无法得到真实的真空度 (实际上是指测点

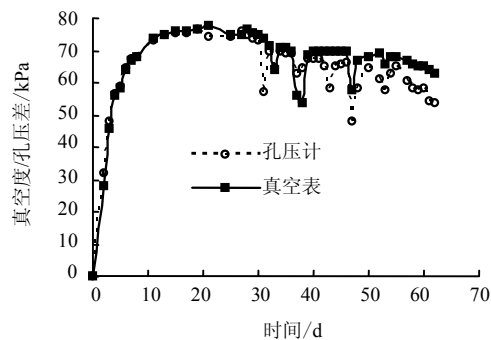
处孔隙水压力差)。

综上所述可知, 真空度与孔隙水压力既有区别又有联系, 当测点位于地下水位以上时, 真空管内真空度与测点处的孔隙水压力差相等, 与文献[1]结论一致; 当测点位于地下水位以下时, 则真空管内真空度小于测点处的孔隙水压力差, 若真空管抗折强度较高, 在土体压缩时保持弯曲而不折叠即截面积不变, 则两者可按本文公式进行换算。

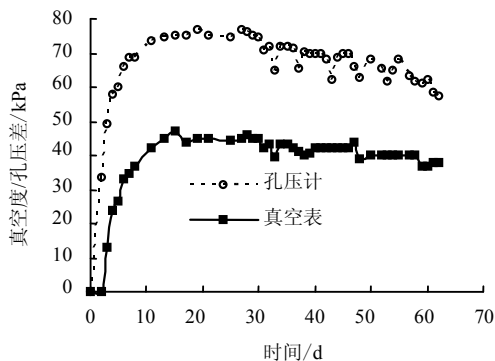
3 理论计算与实测结果对比分析

为了对孔压计和真空表的测试结果进行对比分析, 笔者在广州南沙龙穴岛上某真空预压软基处理工地的竖向塑料排水板内, 分别在距离膜下 0.5、3 m 处各埋设一个孔压计和真空表。孔压计与真空表实测结果对比分析曲线见图 2(a)、图 2(b)。从图中可看出, 在 0.5 m 处, 真空表与孔压计的测试结果基本一致; 在 3 m 处, 孔压计与真空表的测试结果相差甚远。这主要是因为 0.5 m 处, 真空管内实际上是没有水的, 与本文讨论第一点一致。需要说明的是, 竖向塑料排水板内的水位从总体上来讲是要上升的, 否则真空泵无法将地下孔隙水抽出, 也就是说在 0.3~0.5 m 处 (视滤管埋深) 真空管内可能会有水, 但从真空泵的透明管可看出, 真空泵抽水实际上是脉冲式的, 地下水位是一个波动值, 因此真空管内即使偶尔有水, 也会因地下水随脉冲回落时排出, 随即将里面的空气不断带走, 如地下水位不回落, 随着真空探头处的孔隙水压力的不断降低, 真空管内的真空度不断降低, 也会导致 $\Delta h \geq h_0 - \Delta S - h_w$, 此时将与本文讨论第 3 点一致。因此, 测试膜下真空度, 除了真空表以外, 还可采用孔压计 (但要考虑孔压计在纯真空下的工作稳定性), 两者的测试结果基本一致。而在 3 m 处, 真空管内有水 (前面已说过, 竖向排水板内的水位是上升的, 而且一般情况下滤管埋深控制在 0.3~0.5 m 处, 事实上经验算此时 $\Delta h < h_0 - \Delta S - h_w$, 因此两者的测试结果相差较大, 孔压计测试结果比真空表的测试结果大, 这与本文讨论第 2 点一致。

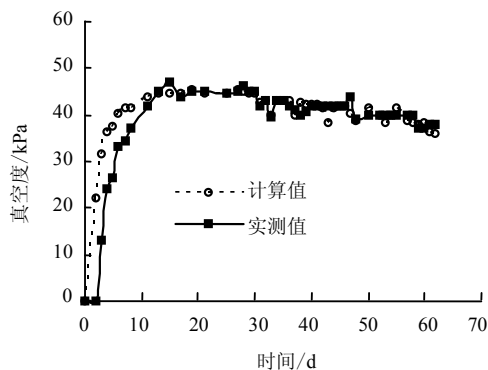
图 2(c)、图(d)为用本文公式 (11) 和式 (13) 的计算结果与实测结果的对比曲线。从图中可看出, 在 3 m 处, 在开始阶段, 真空度较低时真空度计算结果偏大 (相对应孔压计计算结果偏小, 下同), 当真空度趋于稳定时, 计算结果和实测结果基本一致, 说明本文公式推导的正确性。



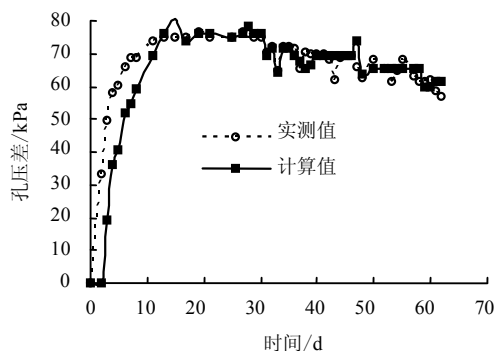
(a) 膜下 0.5 m 处真空表与孔压计实测结果对比曲线



(b) 膜下 3 m 处真空表与孔压计实测结果对比曲线



(c) 膜下 3 m 处真空管内真空度实测与计算结果对比曲线



(d) 膜下 3 m 处孔压差实测与计算结果对比曲线

图 2 孔压计与真空表测试结果对比分析图

Fig.2 The Curves of comparison analysis of the test results by using vacuum meter and piezometer

4 结 论

(1) 真空度和孔隙水压力虽然两个不同的概念,但两者在数值上存在内在联系。当真空度测点埋设在地下水位以上时,孔压计和真空表的测试结果基本一致;当真空度测点埋设在地下水位以下时,真空表反映的真空度比孔压计测试的孔隙水压力差小,若真空管抗折强度较高,在土体压缩时保持弯而不折即截面面积不变,则两者可按本文公式进行换算。

(2) 用本文理论公式计算的真空管内真空度和测点处孔隙水压力与实测结果基本一致,证实了本文关于真空管内真空度与真空探头处的孔隙水压力的理论关系式的正确性,也说明了真空度与孔隙水压力的区别与联系。

参 考 文 献

- [1] 岑仰润, 俞建霖, 龚晓南. 真空排水预压工程中真空度的现场测试与分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 603—605.
CEN Yang-run, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Field test and analysis of vacuum pressure in vacuum drainage preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24 (4): 603—605.
- [2] 王业荣, 夏旭阳. 一种地基中真空度的测定方法[J]. 水运工程, 2003, (8): 15—17.
WANG Ye-rong, XIA Xu-yang. A method for determining the degree of vacuum in ground[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2003, (8): 15—17.
- [3] 姜炎编著. 真空预压法加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [4] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [5] 孙企达, 陈建中. 真空测量与仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [6] 姜炎. 负压条件下软土地基的孔隙水压力[J]. 水利学报, 1988, (9): 48—52.
LOU Yan. Pore water pressure in soft soil ground under the negative pressure condition[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1988, (9): 48—52.