

真空预压法地下水位分析及其测试方法

高志义^{1, 2, 3}, 侯晋芳^{1, 2, 3}, 梁爱华^{1, 2, 3}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;

3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222)

摘要: 建议以静水压力为零的线定义为地下水位线; 分析了地下水位测试中的 6 个影响因素; 提出了地下水位降低与升高的必要与充分条件; 通过对真空预压机理与力系的分析, 地下水位变化的必要与充分条件检验, 膜下双管式测试仪现场实测地下水位结果, 加固后土体仍为饱和土的事实和实测资料并无降水预压迹象, 5 个方面证明真空预压时地下水位是不变的; 还提出一种棒式真空预压地下水位测试仪。它消除了膜下双管法局部真空度与实际不符及内管漏气对测试的影响。可真实地测出地下水位。

关键词: 地下水位; 监测; 测试仪器; 真空预压

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0684-05

作者简介: 高志义(1939-), 男, 河南开封人, 教授级高级工程师, 主要从事土力学与地基基础方面的试验研究与设计工作。E-mail: ctjgzy@163.com。

Analysis and test method for groundwater level by vacuum preloading

GAO Zhi-yi^{1, 2, 3}, HOU Jin-fang^{1, 2, 3}, LIANG Ai-hua^{1, 2, 3}

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of the

Ministry of Communication, Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China)

Abstract: It is suggested that the zero hydrostatic pressure level (or plane) should be defined as the groundwater level (or plane). Six factors for the groundwater measurement are analyzed. At the same time, the necessary and sufficient conditions for the decrease and increase of groundwater level are also shown. By analyzing the vacuum preloading mechanism and system of forces, necessary and sufficient conditions for change of groundwater level and field test results of groundwater level, the fact of the soils that are still saturated after improvement, and field data indicate that there are no lowering of the groundwater and preloading. It is illuminated that the groundwater level does not owing to ground improvement by vacuum preloading. A new type of rod instrument is put forward to measure the groundwater level. It is a direct method to measure the groundwater level, which eliminates the effects of incorrect vacuum degree and internal tube leaking as measured by means of the double pipe method. So this new instrument is reliable to measure the groundwater level.

Key words: groundwater level; monitoring; measurement instrument; vacuum preloading

0 引言

真空预压加固地基时地下水位是下降^[1-3]、不变^[4-6]或上升, 一直是真空预压研究热点之一。也是争论最大, 分歧最多的问题之一。这是由于它的重要性、复杂性和不统一性所造成的。

所谓重要性, 因为它关系到真空预压的加固效果。若水位下降, 则为真空预压与降水预压的双重加固效果; 若水位上升, 则为上述两者之差的效果; 若水位不变, 则仅为真空预压加固效果。这也直接影响到对真空预压机理的认识。

所谓复杂性, 因对真空预压机理的认识不同, 可得到不同结果; 存在欠固结土、沉降等本文提出的 6

项地下水位测试影响因素, 均影响地下水位测试结果。

所谓不统一性, 如地下水位测试方法和手段的不统一, 地下水位定义的不统一, 地质条件的不统一, 机理认识的不统一等。各种不统一拿到一个平台上分析, 必然得到一个不统一的结果。

综上所述, 地下水位变化看似简单的问题, 却是一个复杂的、不统一的、重要的问题。应全面分析, 统一认识后, 才可能得到统一的结论。

1 地下水位线的定义

地下水位线现有 3 种定义方法: ①孔隙水压力为

零的线(面); ②饱和土与非饱和土的分界线(面);
③静水压力为零的线(面), 上述 3 种线(面)得出 3 种地下水位线(面), 如图 1 所示。

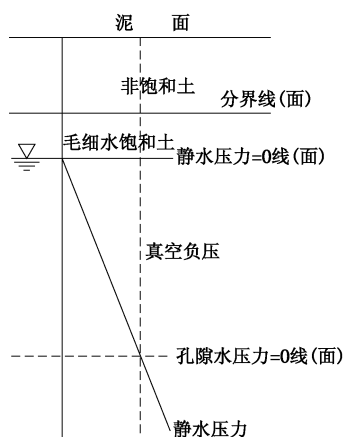


图 1 地下水位线

Fig. 1 Groundwater level

众所周知, 孔隙水压力包括静水压力和超静孔隙水压力两部分。静水压力是重力的反映, 它对土体会产生浮力作用, 决定着水位线; 超静孔隙水压力则是外荷载的反映, 只反映了荷载的固结消散情况, 并且为时间的函数, 它不会对土体的浮力产生作用。两者是互相独立、互不影响的。如, 堆载预压时瞬时施加 50 kPa 荷载, 首先在地基中产生附加应力, 并迅速转化为 50 kPa 超静孔隙水压力。与此同时, 孔隙水压力马上提高 50 kPa。假如孔隙水压力为零定义为地下水位线, 那么地下水位会迅速抬高 5 m。显然这不符合实际。此时静水压力并没有变化, 水位也没有变化。只是随着孔隙水的排出, 超静孔隙水压力逐渐消散, 仅超静孔隙水压力一直在变化。从而看出, 孔隙水压力为零定义为地下水位线是不符合实际情况的。

由于土体孔隙的毛细作用, 在静水压力为零的线以上会形成毛细水区, 如图 1 所示。在土体中极细的毛细孔中毛细水可以上升到较高, 而较粗的毛细孔中毛细水上升高度很低。因此只有在毛细孔较粗的上升高度内, 整个毛细水才能形成饱和土区域, 故毛细水饱和区的高度也不会太高; 因毛细水压力不会对土体产生浮力作用, 也不会改变土体的重度, 即毛细水饱和土区不是重力水, 故不能决定地下水位线。所以, 饱和土与非饱和土的分界面也不能作为地下水位线^[7]。

上述分析说明, 孔隙水上可能有静水压力、超静孔隙水压力、毛细水压力 3 种不同力系的作用; 显然, 若要讨论固结问题, 应将超静孔隙水压力单独分出来; 若要讨论地下水位问题, 应将静水压力单独分出来等。这样问题才能讨论清楚。所以, 静水压力为零的线(面)才是真实地下水位线。

2 对地下水位测试的影响因素

(1) 欠固结地基土的影响: 如图 2, 欠固结土层初始孔隙水压力线和初始地下静水压力线是不一致的, 计算中应消除, 因为它并非真空预压降低的水位线。

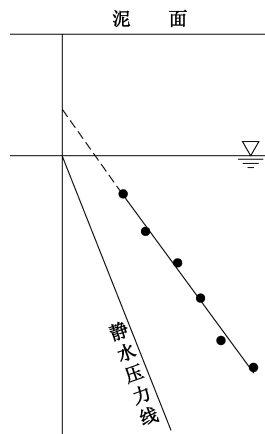


图 2 欠固结地基土加固前实测孔压线

Fig. 2 Curves of pore water pressure of underconsolidated soils before improvement

(2) 地基加固沉降的影响: 如泥面下 2 m 处为初始地下水位线, 假设地基总沉降 1.8 m, 0~2 m 沉降 0.3 m。若地下水位不变时, 则地下水位标高也应随之下降 1.5 m。测试中应即时消除固结沉降的影响。

(3) 测试方法的影响: 原水位测管口封闭其内作用着真空压力, 采用敞口测试法, 当敞口瞬间大气压力迅速作用在孔隙水上, 地下水位必将迅速降低。这时水位管实际上相当于测压管, 测试出地下水位必然下降, 但这并非真实地下水位线。此内容将在 3.1 节中进一步讨论。

(4) 高压水冲法成孔对水位测试的测试影响: 水位测管埋设时需要成孔, 有时下几根套管后就用高压水冲法成孔, 人为地增大土体初始孔压, 需很长时间才能消散。应全部采用套管法成孔, 以消除其影响。

(5) 水位测管内局部真空度与实际不符的影响。

(6) 水位测管内某处漏气的影响: 某处漏气等同于敞口式测试, 等于人为地降低地下水位。

3 地下水位变化的条件

3.1 地下水位降低条件的分析

研究地下水位降低的条件, 也是研究降水范围内土体由饱和和二相土体变为非饱和和三相土体的条件, 即研究气体能够进入排出水后的孔隙中的条件。对于正常固结地基, 它可在以下两种情况下才出现饱和土体

向非饱和土体的转化。

(1) 土体孔隙上无新的应力增量情况

如,井点降水过程中,重点讨论降水范围内土层变化情况。因井点降水是一个缓慢的过程,在开始极短的 Δt 时间内,水位降低了 Δh 的增量高度。在 Δh 范围内土体中的水被排出的同时, Δh 范围内土体的孔隙上并没有新的应力增量,仍保持原来的孔隙。所以,紧靠其上具有一定应力的空气可无阻挡地进入该孔隙中,则 Δh 范围内的饱和土体即可变为非饱和土体。这时,进入饱和土体孔隙内的气体应力增量等于饱和土体孔隙上有效应力增量为0。诚然,其上有充足的空气是其充分条件。如此不断地循环,降水范围内饱和土即可全部变为非饱和土。从而得知:当土体孔隙中的水被排出时,在孔隙上无新的应力增量条件下,即孔隙上无压缩应力增加时,孔隙的大小不变,则其上的气体即可进入排出水的孔隙中,从而变为非饱和土。

(2) 土体孔隙上存在新应力增量的情况

真空预压时随着孔压不断降低,土体中三向相等的有效应力增量 $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$ 也不断增加,孔隙水逐渐排出,孔隙也随即缩小。这几个步骤是一个连环过程,其时间差 Δt 趋近于0。因此,在三向应力增量 $\Delta\sigma_1$ 作用下孔隙也随即缩小,因此时旁边的气体应力增量 $\Delta\sigma_1$,故不可能进入刚排出水的孔隙内。况且,旁边也无大量气体存在。所以,此时土体含水率逐渐下降、饱和度不变,即地下水位也不变。

只有旁边气体压力增量 $>\Delta\sigma_1$ 时,则旁的气体才有可能进入该孔隙内。如,真空预压中敞口管测试地下水位情况下,地下水位是降低的。当打开地下水位测管的上盖时,这时测管内涌进大量的大气压力 p_a ,因 $p_a > \Delta\sigma_1$,所以气体可以强制性地进入刚排出水的孔隙内。诚然,大量空气涌入是其充分条件。这一过程迅速地向下发展,非饱和土区也慢慢在扩大,从而使地下水位迅速下降。

3.2 地下水位降低与升高的条件

以上两种情况分析,可得到地下水位降低的条件:

必要条件:进入饱和土孔隙内的气体应力增量 $>$ 饱和土孔隙上有效应力增量,或两增量均为零。

充分条件:饱和土孔隙旁必须有充分气体。

3.1节(2)中真空预压情况,不满足3.2节水位降低的必要条件,故水位不变。敞口管测试地下水位时,满足3.2节的条件中前者情况,即一般情况,则水位下降;3.1节(1)井点降水情况,满足3.2节中水位降低的必要条件中增量为零的情况,即其中的特例,则水位下降。

同理,可得到地下水位升高的条件:

必要条件:进入非饱和土体孔隙内的孔隙水压力增量 $>$ 非饱和土体孔隙上有效应力增量,或两增量均为零。

充分条件:非饱和土孔隙旁必须有充分孔隙水。

4 真空预压时地下水位是不变的

正常固结土,消除第2节中6项影响因素后,真空预压地下水位是不变的。从以下5个方面可看出:

(1)真空预压机理与力系分析表明地下水位不变
静水压力和超静孔隙水压力为两种不同性质的水压力,两者互相独立,互不影响。两者的数量应分别计算出,并分别进行研究,这样问题才能讨论清楚。

真空预压始终都是降低作用在孔隙水上的大气压力 p_a ,并全部转化为有效应力,而全部有效应力均为土体的压缩应力,从而使土体固结。在这一过程中,并未有其它力使静水压力降低,故地下水位也不会改变;再者,真空预压降低的最大范围小于等于 p_a ;如若真空预压降低地下水位,则降低的最大范围应远大于 p_a 。这一结论实际并不能出现,故静水压力不会降低;另外,真空预压区的孔压一直降低,并使影响区的孔压也一直降低。而大气压力始终未能进入加固区,故无气体供给也无其它力使静水压力降低。上述3个方面都未能找到使地下水位降低的应力,故地下水位也不会下降。

(2)真空预压时地下水位上升与下降的条件不成立,故地下水位不变

上节中已经分析过真空预压时地下水位下降的必要和充分条件都不成立,故地下水位也不变;同理,上升的必要和充分条件也不成立。从而证明,真空预压时地下水位是不变的。

(3) 实测真空预压时地下水位线的验证

张敏等^[8]的真空预压水位测量装置,用带孔外管埋在膜下,内管通过膜并密封,上端口与大气连通,可测量地下水;但外管上端2m与土体不连通,会导致管内外的真空度不一致。内管大气压远大于内外管间的压力,而内管底盖为外涂密封胶密封,故易漏气。

利用该测量装置进行现场测试^[9],结果如图3中标有“新”字的上面3条水位线;图中标有“常”字的下面一条曲线为敞口管测试结果。上面3条水位线中有2条始终不变,另一条开始阶段下降后基本不变或略有上升。该测量装置测出的真空预压地下水位,基本上可判断为地下水位是不变的。

(4) 真空预压前后土体的饱和度并未降低

地基加固后若地下水位是下降的,则下降这部分土体将变为非饱和土;若地下水位不变的话,则土体

仍为饱和土。如, 某地黏土真空预压后土性的室内试验结果, 如表 1 所示^[10]。真空预压后含水率下降, 但饱和度仍为 100%的饱和土。从而说明, 真空预压时地下水位是不变的; 另外, 有学者利用含水率的降低量推算地下水位的降低量, 在逻辑关系上值得商榷。

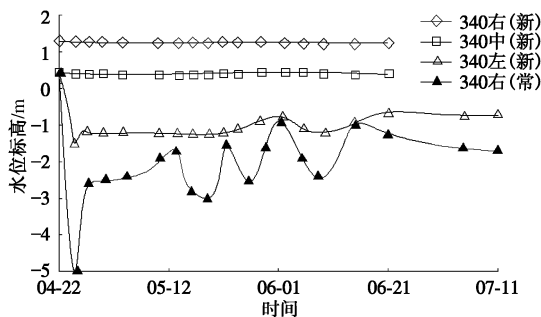


图 3 真空预压 E6 区两种方法测试结果对比曲线
Fig. 3 Comparison of groundwater level in zone two E6 by methods

表 1 室内抽真空排水预压前后试样物理指标变化表
(萧山黏土, 比重 2.74)

Table 1 Change of physical indices after laboratory vacuum preloading drainage								
试样 编号	含水率/%		湿密度 /(g·cm ⁻³)		孔隙比		饱和度/%	
	抽真 空前	抽真 空后	抽真 空前	抽真 空后	抽真 空前	抽真 空后	抽真 空前	抽真 空后
1	59.77	41.45	1.71	1.85	1.56	1.10	100	100
2	59.64	41.64	1.73	1.85	1.53	1.10	100	100
3	54.25	39.63	1.77	1.91	1.39	1.00	100	100
4	54.81	42.74	1.75	1.88	1.43	1.08	100	100
5	52.05	39.96	1.73	1.89	1.41	1.03	100	100
6	55.39	40.13	1.71	1.86	1.49	1.06	100	100
7	48.36	40.81	1.76	1.90	1.31	1.03	100	100
8	46.61	37.44	1.75	1.89	1.30	0.99	100	100
9	46.44	36.23	1.79	1.88	1.24	0.99	100	100

(5) 真空预压监测资料并无降水预压的迹象
实践是检验真理的唯一标准。如若真空预压兼有降水预压的作用, 则监测资料中必有所反映。如深层位移在地下水位以下土层, 未能看出有向外挤出迹象。
再者, 潮差带真空预压密封膜, 涨潮时在水下, 退潮时露出水面。空气很少能进入膜下土层中, 基本没有地下水位下降所需的大量气体。陆上与潮差带真空预压相比, 两者的监测结果基本一致, 加固效果相当。这也从侧面说明, 真空预压地下水位是不变的。
以上 5 个方面, 从理论和实践上均证明真空预压时地下水位是不变的。

5 真空预压地下水位测试仪

5.1 构造

如图 4 所示, 选用带钢丝的 PVC 蛇形管, 上端露出泥面 0.6 m, 下端用环氧树脂密封牢。蛇形管每隔 5

cm 在凹槽处打一个 $\Phi 2.5\text{ mm}$ 小孔, 将一根 $\Phi 1\text{ mm}$ 单丝铜塑料导线沿凹槽绕一周(其中有 4 cm 长露出铜丝)。在 $\Phi 2.5\text{ mm}$ 孔眼处将各根导线穿入管内, 并引至(导线应松弛)管上端口以外 0.5 m。 $\Phi 2.5\text{ mm}$ 孔眼与导线的缝隙用环氧树脂封牢。用宽 1 cm 土工布绕一周将铜丝导线包紧包牢, 以保护铜导线。所有导线全部露出上端口 0.5 m 后, 向蛇形管内灌密封材料硅胶至最上端 $\Phi 2.5\text{ mm}$ 孔眼以上 0.5 m。硅胶面以上最少留有 1.5 m 高的灌水量(防止硅胶固化)。将蛇形管平放在地面上, 最上端 1.5 m 临时垂直向固定在墙上, 向管内灌满水。蛇形管上盖中间为一导线出孔, 两侧为两个带丝扣的出水孔。盖上蛇形管上盖, 用环氧树脂将孔和盖与蛇形管交界处封牢。环氧凝固后将 2 个螺帽并加橡皮垫圈, 拧紧两个出水孔。将蛇形管从墙上取下存放备用。

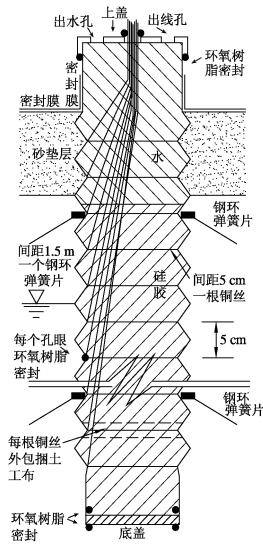


图 4 真空预压水位测试仪结构示意图
Fig. 4 Schematic drawing of measurement instrument for groundwater level by vacuum preloading

5.2 埋设

竖向排水通道打设后, 全部用套管成孔(禁用高压水冲)。蛇形管上每隔 1.5 m 固定牢 1 个分层沉降用的钢环, 并将钢环上 3 个弹簧片向下捆紧。然后将地下水位测试仪沉放在钻孔内设计位置后, 将每个弹簧片打开, 弹簧片弹入孔壁的土体内, 蛇形管即可随土体的沉降而沉降。试抽气前将两个排水孔的螺栓帽拧去, 地基压缩时蛇形管随之压缩, 管内水随之排出。

5.3 测试

用水位接收仪连结相邻 2 条导线, 通者表明有地下水, 不通者表明无地下水。通与不通的分界线, 即为地下水位线。若采用多头波段开关更方便。不用测孔口标高, 测量精度 5 cm。

5.4 本测试仪器优越性

(1) 本测试仪上端与密封膜密封, 即便密封处稍有漏气, 略对膜下真空度有影响, 但对地下水测试无影响。故克服了双管式测量仪的内管漏气时, 与敞口管测试同样的效果和缺点; 同时消除了外管上端 2 m 真空度与实际不符的影响。故能真实可靠地测出地下水位。虽有 5 cm 误差, 但并不影响它对水位上升、下降、不变的明确地判断。

(2) 棒状测试仪可随土体的固结沉降而沉降, 消除了固结沉降对测试的影响。

(3) 为直接测试地下水位方法, 消除了采用真空和孔压测头不稳定产生波动, 及耦合叠加的影响。

(4) 连接上波段开关, 可迅速测出结果, 也不需测量孔口标高。所以, 操作简单、快捷、方便。

6 结 论

(1) 应以静水压力为零的线(面), 定义为地下水位线(面)。

(2) 欠固结、固结沉降、高压水冲埋设仪器的钻孔、敞口管式水位监测法、监测水位管内真空度或压力与实际不符、测管某处漏气等, 为直接影响地下水位测试的 6 个因素。

(3) 提出了地下水位变化的必要与充分条件。

(4) 通过对真空预压机理与力系的分析、地下水位变化的必要与充分条件检验、膜下双管式测试仪现场实测地下水位结果、加固后土体仍为饱和土的事实、实测资料并无降水预压迹象, 5 个方面证明真空预压时地下水位是不变的。

(5) 本文提出一种棒式真空预压地下水位测试仪。它不受棒与密封膜处漏气对测试的影响。消除了膜下双管法局部真空度与实际不符及内管漏气对测试的影响。可真实地测出地下水位。操作简单快捷方便。

参考文献:

- [1] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压中地下水位测试技术探讨与改进[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1899 - 1903. (ZHANG Gong-xin, DONG Zhi-liang, MO Hai-hong, et al. Discussion and reform of groundwater level measuring technique in soft soil reinforced by vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1899 - 1903. (in Chinese))
- [2] 董志良. 堆载及真空预压法加固地基地下水位及测管水位高度的分析与计算[J]. 水运工程, 2001(8): 15 - 19. (DONG Zhi-liang. Analysis and calculation of the soil foundation's ground water level and measuring tube's water level under the situations of surcharge preloading and vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2001(8): 15 - 19. (in Chinese))
- [3] 周琦, 刘汉龙, 顾长存. 真空预压条件下地下水位和出水量现场测试研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3435 - 3440. (ZHOU Qi, LIU Han-long, GU Chang-cun. Field tests on groundwater level and yield of water under vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3435 - 3440. (in Chinese))
- [4] 辜清华, 李志勇, 何良德. 真空预压中地下水位变化的理论探讨[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2007, **20**(3): 102 - 105. (GU Qing-jua, LI Zhi-yong, HE Liang-de. Theoretical discussion on groundwater level change in vacuum preloading[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science), 2007, **20**(3): 102 - 105. (in Chinese))
- [5] 胡珩. 真空预压法加固机理和加固效果试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (HU Heng. Test research on consolidation mechanism and effect by vacuum preloading [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [6] 陈晓丹, 赵维炳, 周志勇. 真空预压法加固软基的特性和机理探讨[J]. 路基工程, 2005(3): 1 - 4. (CHEN Xiao-dan, ZHAO Wei-bing, ZHOU Zhi-yong. Investigate into feature and mechanism of soft soil stabilization by vacuum preloading[J]. Subgrade Engineering, 2005(3): 1 - 4. (in Chinese))
- [7] 明经平, 赵维炳. 真空预压中地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005(1): 1 - 6. (MING Jing-ping, ZHAO Wei-bing. Study on groundwater level in vacuum preloading [J]. Port & Waterway Engineering, 2005(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [8] 张敏, 李俊才, 王文, 等. 测量真空预压地下水位变化新方法[J]. 施工技术, 2009, **38**(6): 231 - 233. (ZHANG Min, LI Jun-cai, WANG Wen, et al. A new method to measure the change of groundwater level in vacuum preloading[J]. Construction Technology, 2009, **38**(6): 231 - 233. (in Chinese))
- [9] 朱燕, 余湘娟. 真空预压地下水位测试方法分析[J]. 水运工程, 2010(9): 113 - 116. (ZHU Yan, YU Xiang-juan. Measuring methods for groundwater level under vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(9): 113 - 116. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))