

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.08.020

非饱和砂土有效应力增量的试验研究

李 纯, 赵富丽, 修占国, 王秋鸿

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了解土层有效应力增量对地基沉降的贡献程度,进行了非饱和砂土在不同轴向荷载和围压作用下的饱和试验、静载试验和莫尔-库伦应力分析,得到了砾砂土和圆砾土在饱和状态下的天然重度、黏聚力及内摩擦角等主要物理力学指标,利用这些指标计算得到有效应力增量值及其沉降贡献量。试验结果表明:与砾砂相比较,圆砾土的饱和度更易达到100%,其饱和重度较砾砂大,孔隙率和含水量却较砾砂小。对于饱和砂土,由有效应力法计算出来的主应力值大于由总应力法计算出来的主应力值,所得内摩擦角和黏聚力比用总应力法得出的结果更加合理。另外,有效应力增量对基底沉降的贡献不可忽略。

关 键 词: 有效应力增量;附加应力;减饱和效应;超孔隙水压力;沉降

中图分类号: TU 740 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)08-1158-05

Testing Investigation on Effective Stress Increment of Unsaturated Sandy Soils

LI Chun, ZHAO Fu-li, XIU Zhan-guo, WANG Qiu-hong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Chun, E-mail: lichun@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to investigate the vertical deformation contributed by effective stress increment of soils overlying foundation base, the saturation test of unsaturated sandy soil and the static load test were conducted with different axial loads and cell pressures, and work of calculation and analysis based on Mohr-Coulomb's method was finished. The main physical and mechanical indexes of gravelly sand and gravel, such as natural gravity, cohesion and angle of internal friction etc., were obtained under condition of saturation. Effective stress increment and its vertical deformation were obtained by using the indexes. The results indicate that degree of saturation of gravel is more easily to reach 100% compared with gravelly sand, and saturated unit weight of gravel is larger, but porosity and water content of gravel are smaller than that of gravelly sand. As to saturated sandy soil, the principal stress computed by effective stress method is usually larger than that by total stress method, thus angle of internal friction and cohesion obtained by effective stress method are more reasonable. In addition, vertical deformation contributed by effective stress increment can not be ignored.

Key words: effective stress increment; additional stress; desaturation effect; excess pore pressure; settlement

经典土力学理论所得出的规律和工程应用方法主要适用于饱和土^[1-2]。在过去半个多世纪,饱和土理论和试验方法得到了飞速发展,各种本构理论、固结理论等相继被提出,其中部分理论已逐渐发展成熟,并在工程领域中得到广泛应用,特别是采用有效应力作为描述饱和土性状特征的唯一状态变量时,在解决涉及饱和土的许多岩土工程问题中,已经取得了很大成功,有效应力概念已被普遍应用于饱和砂土、粉土和黏性土等的研究^[3]。然而,土可以是饱和的,也可以是非饱和的,受试验条件的限制,非饱和土的力学性状尚不为人们所熟悉,其理论研究虽然取得一定进展,但

远未成熟,这使得非饱和土理论在工程中的应用受到了较大限制^[4]. 近年来,许多学者开始重视非饱和土的研究,非饱和土力学成为岩土工程领域一个新的研究方向^[5]. 目前,非饱和土体积变化理论和模量量测方法均取得一定的成果,比如,在总应力为常量的情况下,这些成果已被应用于计算非饱和土的体积变化问题^[6-9]. 然而,实际工程中总应力为常量的情形并不多见,土的饱和度往往发生变化,使得相应土层产生有效应力增量,有效应力增量与基底附加应力作用在地基上,共同产生地基沉降^[9]. 研究表明,非饱和土层产生的有效应力增量对地基沉降的贡献往往很可观,如果忽略该部分的变形,可能会给建(构)筑物的安全使用带来严重隐患^[10]. 为了探讨非饱和土有效应力增量对地基沉降的贡献程度,本文以深基坑降水影响基坑周边及基底上覆土层的饱和程度造成相应土层产生有效应力增量为例,假定降水后地下稳定水位位于基底标高附近,对基底上覆部分砂土开展实验室饱和及静载试验,得到饱和和砂土天然重度等物理力学指标和相应的有效应力增量值,进而得到该增量对地基沉降的贡献量.

1 有效应力增量的数学描述

图 1 为基底有效应力增量的分析模型. 选择 M_1, M_2, M_3 和 M_4 作为 4 个特征点; M_1 表示建筑物室外自然地面, M_2 和 M_3 分别表示降水前后地下水稳定水位; M_4 位于基底以下 h_3 深度处. 降水前,土层 M_1M_2 为非饱和土,天然重度为 γ_1 ; 降水后,该土层的天然重度变为 γ_2 . 对于 M_2M_3 土层,降水后由饱和状态变为非饱和状态,即土体由饱和重度 γ_{1sat} 变为非饱和重度 γ_{10} . 对于 M_3M_4 土层,降水前后一直呈饱和状态,土体的重度始终为 γ_{1sat} . 土层 M_1M_3 有效应力增量可表示为

$$\Delta\sigma'=(\gamma_2-\gamma_1)h_1+(\gamma_{10}-\gamma_1')h_2. \tag{1}$$

式中: h_1 为基底原上覆非饱和土层厚度, $(\gamma_2-\gamma_1)h_1<0$; γ_1' 为降水范围内原饱和土的浮重度, h_2 为基坑降水深度, $(\gamma_{10}-\gamma_1')h_2$ 还可表示为

$$(\gamma_{10}-\gamma_1')h_2=[\gamma_{10}-(\gamma_{1sat}-\gamma_w)]h_2. \tag{2}$$

由式(1)和式(2)可知,若 $(\gamma_{10}-\gamma_1')h_2<0$, 则 $\Delta\sigma'<0$, 即地基中各特征点的有效应力递减, 地基将产生回弹变形; 若 $\Delta\sigma'>0$, 表明地基中各特征点的有效应力值递增, 地基将产生相应的压缩变形; 若 $\Delta\sigma'=0$, 地基沉降只与建筑物荷载在基底平面产生的附加应力有关.

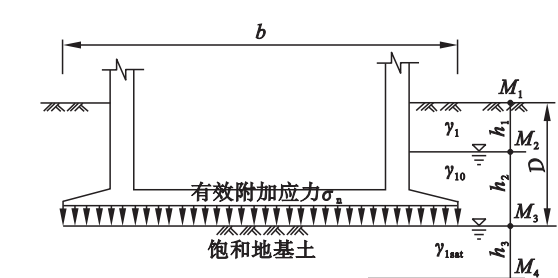


图 1 基底有效应力增量的分析模型
Fig. 1 Analytical model of effective stress increment acting on foundation soil

2 试验研究

2.1 试验方法

受减饱和效应影响,土层的主要物理力学参数发生变化,其力学性能也因此改变;全过程了解这些参数的变化非常不易,但是,若仔细分析式(1)和式(2),便可以找到一条试验捷径. 重度 γ 为上述各参数的函数,如果直接测试到上覆各土层降水前后的天然重度,同样能达到试验目的. 计算有效应力增量时,对于非饱和土层,只需测得 γ_1 和 γ_2 即可;对于降水范围内的土层,测得饱和重度 γ_{1sat} 和降水稳定后该土层的天然重度 γ_{10} 即可. 非饱和土的天然重度与各参数的关系式为

$$\gamma=\frac{G_s+\left\{(1-S_r)\frac{1}{\left\{\ln\left[e+\left(\frac{u_a-u_w}{a}\right)^n\right]\right\}^m}+S_r\right\}e}{1+e}\rho_w\cdot g \tag{3}$$

式中: a, n 和 m 为优化参数,参数 a 直接与空气进气值相关,参数 n 控制着土水特征曲线的斜率,参数 m 与残余含水率的值相关; e 表示孔隙比; (u_a-u_w) 表示基质吸力; S_r 为剩余饱和度; G_s 为土粒相对密度; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度.

2.2 试验设备及土样制备

试验仪器由实验室 STX-50 气压式三轴测试仪器 GCTS (geotechnical consulting testing system) 系统来完成,该系统包括土周期加荷三轴仪和数据采集系统两个部分. 试验对象为地基上覆粉质黏土、砾砂和圆砾,分别考察基坑降水前后这三种土天然重度的变化情况. 基坑降水前,粉质黏土和地下水稳定水位之上的砾砂属非饱和土,其主要物理力学参数由工程勘察土工试验报告提供. 稳定水位之下的砾砂和圆砾属饱和砂类土,但是,很难取到原状土样,这就使得其试样的制备和试验过程变得复杂起来. 为了解决这一问题,试验室采取取样方法.

使用专用取砂器对非饱和砾砂和圆砾进行现场钻孔取样. 取样时, 尽量避免扰动土样. 在进行饱和试验之前, 先测量其含水量 w 和湿密度 ρ , 然后尽快将土样封存并送入试验室进行配样, 确保所制备的土样的含水量和密度等参数与原状土尽可能一致, 最后进行土试样的饱和试验和静三轴试验. 试验完成后, 立即量测饱和土的质量, 目的是得到饱和重度 γ_{sat} 以及其他物理力学参数.

砂土的饱和及静载试验分 5 组, 其中砾砂试样 3 组, 圆砾试样 2 组. 试样圆砾 II 在静载试验过程中因激振器故障, 该试验被终止. 砂土试样呈圆柱形, 直径 70 mm, 高 140 mm, 径高比 0.5. 5 组非饱和土样的主要物理力学参数配样结果见表 1.

表 1 降水后地基上覆砾砂和圆砾土的配样结果
Table 1 Testing results of gravelly sand and gravel above the foundation after dewatering

土样	$w/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G_s	e	$S_r/\%$	$n/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
砾砂 I	6.90	1.828	1.71	2.62	0.532 2	33.97	34.73	17.93
砾砂 II	7.00	1.819	1.70	2.62	0.541 2	33.89	35.12	17.84
砾砂 III	6.59	1.812	1.70	2.62	0.541 2	31.90	35.12	17.77
圆砾 I	7.09	1.917	1.79	2.63	0.469 2	39.74	31.94	18.80
圆砾 II	7.06	1.895	1.77	2.63	0.485 9	38.21	32.70	18.58

注: ρ 和 ρ_d 分别为土样的天然密度和干密度.

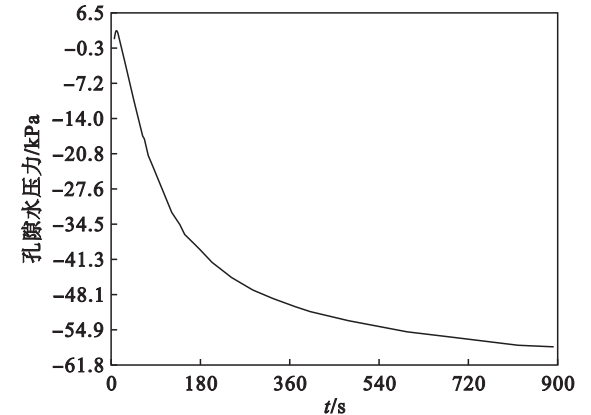


图 2 孔隙水压力 - 时间关系曲线

Fig. 2 Curve of pore water pressure vs. time

表 2 砾砂土的饱和试验结果
Table 2 Saturated testing result of gravelly sand soil

试样	轴向荷载/N	围压/kPa	孔隙水压力/kPa	偏应力/kPa	剩余饱和度 S_r
砾砂 I	39	100	90	4.965	0.93
砾砂 II	39	100	90	5.049	0.96
砾砂 III	39	100	90	4.965	0.96
圆砾 I	39	100	90	4.965	0.87
圆砾 II	39	100	90	4.960	0.94

砾砂 I 和砾砂 II 的 B 值基本相等, 但饱和度并不一致, 表明 B 值不能作为衡量饱和程度指标, S_r 才是衡量土饱和程度的物理指标. 从表 3 可

2.3 试验结果及分析

2.3.1 砂土饱和及静载试验结果

砾砂 I 的剩余饱和度 $S_r = 93\%$, 试样达到饱和状态. 在整个加载过程中, 围压虽有波动, 但总体上稳定. 加载初期, 轴向应变率较小, 但体积增长较快, 孔隙水压力同时也有较小增长趋势. 随着荷载的增大和时间的延长, 偏应力的增长趋势减缓, 但轴向应变增大, 孔隙水压力负向增大, 由压应力变为拉应力. 偏应力达到峰值后, 轴向应变急剧增大, 表明土样处于剪胀破坏状态. 当围压 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 时, 砾砂 I 的饱和试验结果见表 2, 时间与孔隙水压力关系曲线见图 2.

对于砾砂 II, 共进行了两次饱和试验和一次静载试验. 第一次饱和试验中, 测得 $S_r = 90.51\%$, 虽然试样也达到了饱和状态, 但剩余饱和度相对较低, 影响试验精度. 继续抽气 1 h 后, 保持围压为 100 kPa, 再次对砾砂 II 试样进行饱和试验, 结果发现, 单位围压增量 B 值得到提高, 剩余饱和度 S_r 也达到 96%.

在静载试验加载初期, 砾砂 II 的轴向应变率、体积变化率、孔隙水压力以及偏应力等均呈现出与砾砂 I 相类似的变化特征. 偏应力达到峰值后, 土样出现剪胀破坏.

以看出, 偏应力达到 504.8 kPa (第一主应力 $\sigma_1 = 580 \text{ kPa}$) 时, 轴向位移达到 20.83 mm, 轴向应变达到 14.88%. 围压等于 -75 kPa, 表明试样此时

处于侧向受拉状态,这与图 2 所示的试验结果是一致的. 围压 $\sigma_3 = 100$ kPa 时,砾砂Ⅱ的饱和试验结果见表 2;围压 $\sigma_3 = 75$ kPa 时,砾砂Ⅱ饱和和砾砂土静三轴试验结果见表 3.

对砾砂Ⅲ除了做饱和、静三轴试验外,还增加了不排水固结试验,目的是了解饱和砂土地基承受有效附加应力作用下不排水时的固结情况. 从表 4 列出的固结试验结果可知,轴向位移只有 0.01 mm,表明砂土在饱和情况下土颗粒和水的变形均很小,因此,饱和砂土地基土屈服前处于弹性工作状态. 围压 $\sigma_3 = 100$ kPa 时,砾砂Ⅲ的饱和试验结果见表 2;围压 $\sigma_3 = 75$ kPa 时,饱和砾砂Ⅲ

的静三轴试验结果见表 3. 圆砾Ⅰ在 B 值相对较小的情况下仍能达到饱和状态. 由表 2 和表 3 可以看出,当轴向荷载与围压的比值相同时,饱和圆砾与饱和砾砂土产生的孔隙水压力、偏应力、剩余饱和度和轴向应变以及轴向位移等参数的试验结果基本一致,表明饱和圆砾与饱和砾砂土具有基本相同的变形性状. 圆砾Ⅱ在静载试验过程中因激振器出现故障,试验终止. 相比较而言,砾砂土存在较小的黏聚力,而圆砾土的黏聚力 $c = 0$;另外,圆砾和砾砂的试验规律相近,但圆砾土的物理力学特征更明显. 图 3 为圆砾Ⅰ的静载试验曲线.

表 3 饱和砾砂土的三轴试验结果
Table 3 Triaxial testing result of saturated gravelly sand soil

试样	轴向荷载/N	轴向位移/mm	围压/kPa	孔隙水压力/kPa	偏应力/kPa	轴向应变/%
砾砂Ⅱ	2 297	20. 83	75	- 75	504. 8	14. 88
砾砂Ⅲ	1 862	20. 94	75	- 55	408. 215	14. 954
圆砾Ⅰ	1 567	19. 78	50	- 59	347. 485	14. 129

表 4 砾砂Ⅲ的固结不排水试验结果
Table 4 Consolidated undrained triaxial test result of saturated gravelly sand Ⅲ

试样	轴向荷载/N	轴向位移/mm	围压/kPa	孔隙水压力/kPa	偏应力/kPa	体积应变/%
砾砂Ⅲ	42	0. 01	110	90	5. 189	0. 189

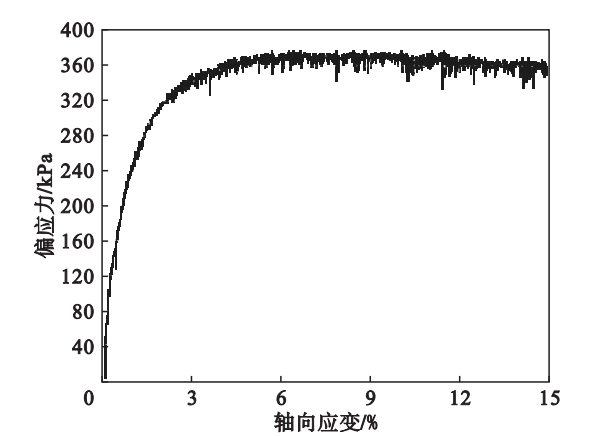


图 3 偏应力-轴向应变关系曲线

Fig. 3 Curve of deviator stress vs. axial strain

与砾砂相比较,圆砾土的饱和度更易达到 100%,其饱和重度较砾砂大,孔隙比和含水量

却较砾砂小,表明圆砾土较砾砂密实. 饱和砂土的主要物理力学参数试验结果见表 5.

2. 3. 2 饱和砂土的三轴莫尔-库伦应力分析

用总应力法和有效应力法计算分析同一种砂土试样,得出的主应力值不完全相同,表明地基中同一层砾砂土也具有较明显的离散特性,但总的来看,由有效应力法计算出来的主应力值大于由总应力法计算出来的主应力值.

图 4 为两种情形下砂土的极限平衡状态,其中,情形 1 是在砾砂Ⅰ、砾砂Ⅱ、砾砂Ⅲ和圆砾Ⅰ等 4 种砂土样的莫尔应力圆上寻找共同剪切面,分别用总应力法和有效应力法求出这 4 种土样的抗剪强度指标;情形 2 是在砾砂Ⅰ、砾砂Ⅱ和砾砂Ⅲ等 3 种砂土样的莫尔应力圆上寻找共同剪切面,并分别用总应力法和有效应力法求出这 4 种

表 5 饱和砂土主要物理力学参数的试验结果
Table 5 Testing results of saturated sandy soil above the foundation

试样	$w/\%$	$\rho_{\text{sat}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G_s	e	$S_r/\%$	$n/\%$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
砾砂Ⅰ	17. 29	2. 091	2. 62	0. 484 9	93. 42	34. 73	20. 51
砾砂Ⅱ	18. 40	2. 057	2. 62	0. 532 6	90. 51	34. 75	20. 17
砾砂Ⅲ	19. 02	2. 067	2. 62	0. 518 3	96. 15	34. 14	20. 27
圆砾Ⅰ	17. 19	2. 144	2. 63	0. 424 8	100	29. 81	21. 03

注:取 $g = 9. 807 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

土样的抗剪强度指标. 表 6 为砂土莫尔 – 库伦应力分析结果,可以看出,两种情形下得出的内摩擦角 φ 大小相近,但黏聚力 c 值却相差甚远. 由总应力法得出的黏聚力过大,而由有效应力法得出的

内聚力符合工程实际,因此,采用有效应力法分析砂土应力问题更加合理. 砾砂和圆砾土的 c 值可取为 0,但粗砂、细砂和粉砂的 c 值可观,不能简单地取为 0.

表 6 砂土的莫尔 – 库伦应力分析结果
Table 6 Triaxial Mohr-Coulomb stress analysis results of sandy soils

试样	情形 1				情形 2			
	总应力法		有效应力法		总应力法		有效应力法	
	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
砾砂、圆砾	42.870	31.66	40.030	0	39.350	42.91	38.650	0.778

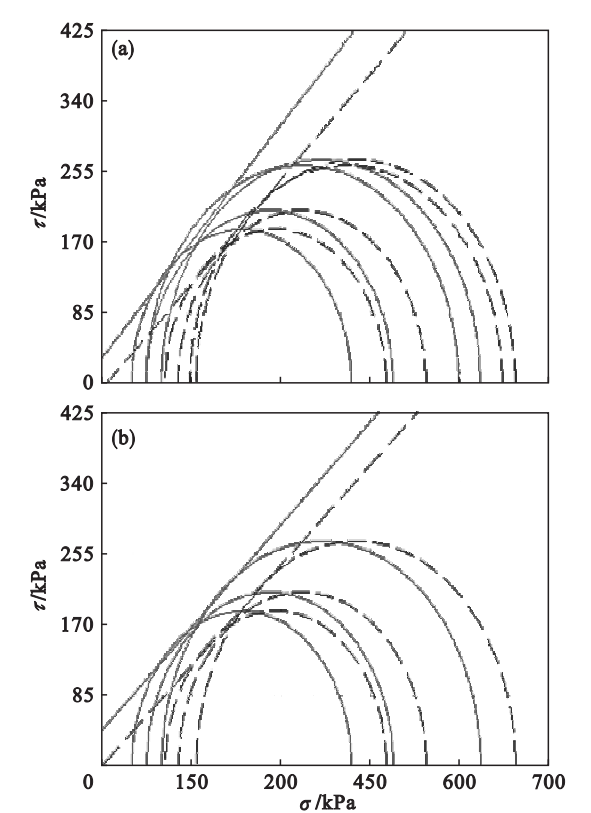


图 4 砂土的极限平衡状态

Fig. 4 Limit equilibrium states of sandy soil

(a)—情形 1; (b)—情形 2.

3 结 论

- 1) 基坑降水使得基底上覆土层的物理力学参数发生变化,并产生有效应力增量,降水深度越大,有效应力增量值越大,有效应力增量对基底沉降的贡献越不可忽略.
- 2) 对于饱和砾砂和饱和圆砾土,由有效应力法计算出来的主应力值大于由总应力法计算出来的主应力值,所得内摩擦角 φ 值和黏聚力 c 值要比用总应力法得出的结果更加合理.
- 3) 试验和测试结果表明,基底平面上附加应力呈不规则空间曲面分布,而因降水造成基底上

覆土层产生的有效应力增量在基底平面上呈均布状态,稳定水位之下的土层不产生有效应力增量.

参考文献:

[1] Lu N, William J L. Unsaturated soil mechanics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004: 1 – 10.

[2] 中华人民共和国建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 5007—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
(Ministry of Construction P. R. China. Code for design of building foundation: GB 5007—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.)

[3] Sorbino G, Nicotera M V. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides [J]. *Engineering Geology*, 2013, 165: 105 – 132.

[4] Zhou C, Ng C W. A new and simple stress-dependent water retention model for unsaturated soil [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 62: 216 – 222.

[5] Dye H B, Houston S L, Welfert B D. Influence of unsaturated soil properties uncertainty on moisture flow modeling [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29: 161 – 169.

[6] Herrada M A. Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515: 10 – 15.

[7] 郑刚, 魏少伟. 坑内降水基坑底不同位置土体变形性状的室内试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33 (2): 247 – 252.
(Zheng Gang, Wei Shao-wei. Experimental studies on influence of pit dewatering on soil deformation at different locations below excavation base [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33 (2): 247 – 252.)

[8] Buscarera G, Nova R. Modeling instabilities in triaxial testing on unsaturated soil specimens [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35: 179 – 200.

[9] 李纯, 朱浮声, 张学元. 层状砂土地基静力变形性状测试 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33 (7): 1038 – 1042.
(Li Chun, Zhu Fu-sheng, Zhang Xue-yuan. Testing for deformation properties of layered sandy foundation soil with static additional load [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33 (7): 1038 – 1042.)

[10] Das B M. Shallow foundations: bearing capacity and settlement [M]. [S. l.]: CRC Press, 1999: 254 – 265.