

非饱和黄土中的吸力与有效应力

李靖 党进谦

(西北农业大学水建学院, 陕西杨陵 712100)

刘祖典

(西安理工大学水电学院, 西安 710048)

摘 要 用压力板法和回归分析法研究了基质吸力对非饱和黄土强度性质的影响。结果表明, 非饱和黄土的基质吸力与饱和度在双对数坐标上呈直线关系; 起始基质吸力与液限、塑性指数及粘粒含量呈线性规律变化, 有效应力影响系数与其起始基质吸力呈线性关系, 且随粘粒含量的增大而增大。

关键词 非饱和黄土, 基质吸力, 有效应力, 起始基质吸力

中图分类号 TU411.2, TU411.3

非饱和土中的孔隙水压力均为负值^[1], 称为孔隙水吸力, 它可增加土颗粒间的摩阻力, 增大土的有效应力, 使非饱和土的工程性质向强性转化^[2]。Terzaghi 有效应力原理在饱和土中的成功应用, 使饱和土工程性质的研究取得了可喜的成就。为此, 30 多年来, 人们对非饱和土进行相应的研究, 提出多种有效应力经验式, 并应用于非饱和土工程性质的研究中, 取得了一定的成果。非饱和土的有效应力原理目前还没有统一的表达式, 现有各式中吸力的概念并不相同。本文从吸力的基本概念出发, 对常用的有效应力公式进行总结, 试图找出非饱和土有效应力原理的统一表达式。通过对非饱和黄土的试验研究, 寻求吸力和有效应力影响系数的变化规律及其影响因素。

1 非饱和土中的吸力

水在土中的流动速度很小, 其动能可忽略不计^[3], 故势能就成为土中水的主要能量。土中水承受着不同的力, 如土粒对水的吸引力、溶解盐离子的作用力、重力及外部气体的压力等^[4]。因此土中水的总势能为不同因子所产生的势能分量之和, 即

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o + \psi_g + \psi_a \quad (1)$$

式中, ψ_t 为总势能压力; ψ_m 为基质压力; ψ_o 为渗析吸力; ψ_g 为重力势能压力; ψ_a 为空气压力。

在非饱和土中, 土粒对水产生的吸引力及溶解盐离子对水的作用力均低于大气压力^[1], 这两部分作用力之和与大气压力的差

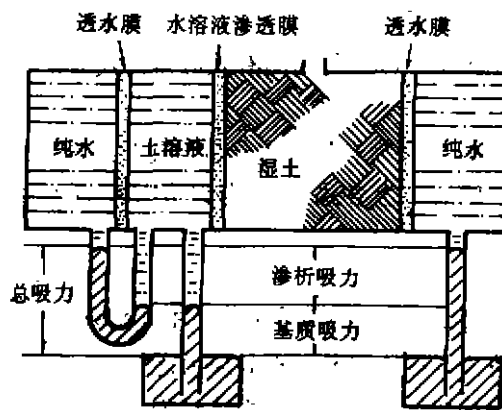


图1 吸力概念示意图

收稿日期 1996-12-11

课题来源 水利部水利水电科学基金资助项目

作者简介 李靖, 男, 1945年生, 教授, 博士, 博士生导师

值即为非饱和土中的吸力,土粒对水的作用力称为基质吸力,溶解盐离子对水的作用力称为渗析吸力。由此可知,若以大气压力为基准,非饱和土中的吸力为基质吸力与渗析吸力之和,Hiller^[3]清楚地表明了这一概念(图 1)。基质吸力与渗析吸力均可通过试验测定,基质吸力是土中的水势低于外部大气压力的量表压力;渗析吸力是纯水相对于含可溶盐水溶液的量表压力。

由于土中不存在半透膜,则溶解盐离子对土中水产生的渗析吸力很小,可忽略不计^[4]。因此,非饱和土中水的吸力就是基质吸力,基质吸力通过压力板法量测。

2 非饱和土中的有效应力

Terzaghi 有效应力原理表明饱和土中的有效应力为总应力与孔隙水压力之差,此时的孔隙水压力为正值。非饱和土中的孔隙水压力为负值,其负值为非饱和土中的吸力,吸力的存在增加了土颗粒间的抗滑阻力,则非饱和土中的有效应力可用总应力与吸力两部分表示。实际上,土的有效应力并不随吸力的增大而成比例地增大,因此,人们想到对吸力进行折减,用与 Terzaghi 有效应力原理相似的关系式表达非饱和土中的有效应力。如 Bishop^[6]有效应力公式为:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

式中, σ' , σ , u_a 和 u_w 分别为有效应力、总应力、孔隙气压力和孔隙水压力; χ 为经验系数,其值在 0~1 之间,它与土类、饱和度等因素有关; $S=u_a-u_w$ 即为吸力。

Jennings^[7]给出的有效应力公式为:

$$\sigma' = \sigma + \beta u_w \quad (3)$$

式中, β 是由试验测定的统计参数,其意义为非饱和土中某一截面处的孔隙水所具有的面积。

Aitchison^[8]得到的有效应力公式为:

$$\sigma' = \sigma + \alpha u_w \quad (4)$$

式中, α 定义为有效应力分量与孔隙水压力之比。

综合以上各式可知,若以大气压力为基准,即 $u_a=0$,则(2)~(4)式中的系数有如下关系:

$$\chi = \alpha = \beta \quad (5)$$

而且非饱和土中的吸力(S)等于孔隙水压力(u_w)。由此可见,非饱和土中的有效应力等于总应力与吸力引起的有效应力之和,况且吸力中只有一部分可引起有效应力。为此本文给出非饱和土的有效应力表达式为:

$$\sigma' = \sigma + \eta S \quad (6)$$

式中, S 为吸力; η 为统计参数,定义为有效应力影响系数,反映了非饱和土中的吸力转化为有效应力的程度; ηS 为能有效地增强土体强度和抗变形能力的那一部分吸力,定义为有效吸力。

由上述分析可知,对于非饱和土,当其总应力不变时,其有效应力主要取决于土的基质吸力和有效应力影响系数。

3 非饱和黄土中的吸力与强度

3.1 试验研究

3.1.1 土样的基本物理性质 试验测定得到各土样的基本物理性质见表1。

表1 各土样的基本物理性质

黄土土样	ω (g/kg)	ρ (g/cm ³)	G_s	e	ω_L (g/kg)	ω_p (g/kg)	I_p	<0.002 mm 颗粒含量 (%)
1	62.5	1.52	2.68	0.87	220.0	199.0	2.1	2.0
2	83.3	1.42	2.68	1.04	289.0	231.0	5.8	11.0
3	78.1	1.32	2.70	1.21	300.0	184.0	11.6	20.0
4	172.0	1.63	2.73	0.96	384.0	215.0	16.9	30.4

3.1.2 吸力的量测 用压力板法测定非饱和黄土的基质吸力,分6个压力水平进行。其值分别是25,50,80,100,300和500 kPa,分别量测2次,取其算术平均值。

3.2 结果分析

各土样基质吸力的量测结果见图2。由图2可知,非饱和黄土的基质吸力随饱和度呈幂函数关系变化,其关系曲线可用下列函数关系模拟:

$$S = S_0(S_r)^{-\lambda} \quad (7)$$

式中, S 为基质吸力,kPa; S_0 为饱和度等于1时土的基质吸力,称为起始基质吸力,kPa; S_r 为饱和度; λ 为试验参数,无量纲。

将(7)式按直线变化可得:

$$\log S = \log S_0 - \lambda \log S_r \quad (8)$$

将吸力的量测结果绘于双对数坐标系中(图3),则各土样的基质吸力与饱和度之间呈线性关系。这样,试验参数 S_0 与 λ 便可由数学图式确定。 S_0 是饱和度 $S_r=1$ 时log-log图中的截距, λ 是其直线的斜率。各土样的试验参数 S_0 和 λ 见表2。

表2 各土样基质吸力试验参数

黄土土样	S_0 (kPa)	λ	r^2
1	1.150	3.08	0.947
2	1.766	3.69	0.973
3	2.985	4.04	0.993
4	5.952	4.89	0.984

由表1,2中数值可知,非饱和黄土的起始基质吸力与 λ 均随液限、塑性指数和粘粒含量的增大而增大。通过线性回归分析,非饱和黄土的试验参数 S_0 和 λ 与其物理性质指标间的关系式列于表3。分析表明,试验参数 S_0 和 λ 与非饱和黄土的液限(ω_L)、塑性指数(I_p)和含粘量(cc)具较好的相关关系。

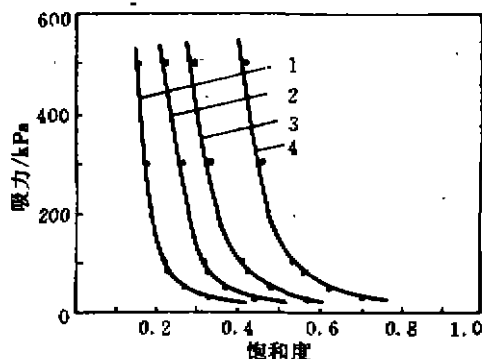


图2 基质吸力与饱和度关系曲线

1. 黄土 1; 2. 黄土 2; 3. 黄土 3; 4. 黄土 4

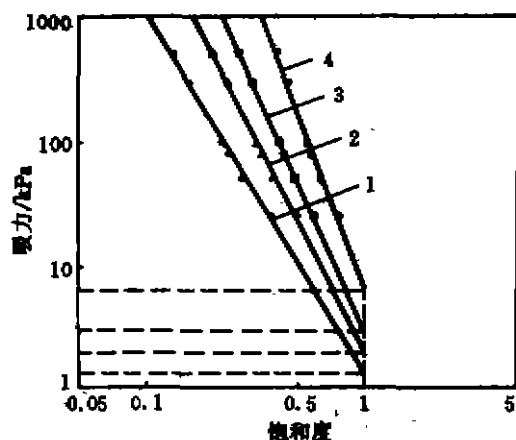


图3 基质吸力与饱和度关系曲线 log-log 图

1. 黄土 1; 2. 黄土 2; 3. 黄土 3; 4. 黄土 4

表3 S_0 和 λ 与物理性质指标间的相关关系

物性指标	相关关系	r^2
液 限	$S_0 = 20.05\omega_L - 6.014$	0.907
	$\lambda = 11.131\omega_L + 0.613$	0.984
塑性指数	$S_0 = 0.314I_p + 0.09$	0.926
	$\lambda = 0.114I_p + 2.895$	0.966
含 粘 量	$S_0 = 16.72cc + 0.303$	0.918
	$\lambda = 6.144cc + 2.959$	0.982

由表 1 的物理性质指标及图 2 的量测结果可知,非饱和黄土中基质吸力的大小主要取决于含水量的变化,而与其密实度关系不大。在同一饱和度下,随粘粒含量、液限和塑性指数的增大,非饱和黄土的基质吸力增大,由此可知表 3 所列关系式对非饱和黄土具有普遍性。

通过对非饱和黄土的三轴试验^[9]得到有效应力影响系数(η)与其初始基质吸力的回归曲线(图 4)。由图 4 知,非饱和黄土的有效应力影响系数随土的起始基质吸力的增大而逐渐减小,且符合线性规律,在同一起始基质吸力情况下,非饱和黄土的含粘量愈大,其有效应力影响系数愈大。

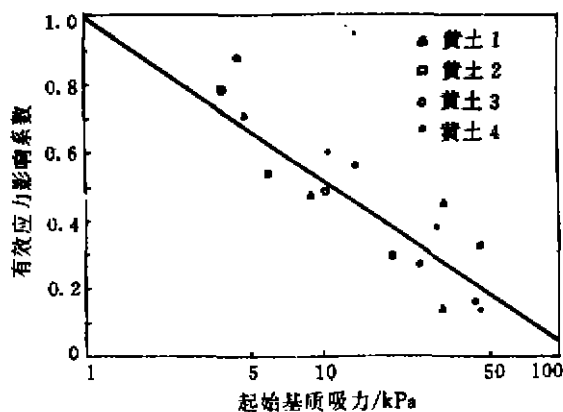


图4 有效应力影响系数与起始基质吸力关系曲线

在同一起始基质吸力情况下,非饱和黄土的含粘量愈大,其有效应力影响系数愈大。

4 结 论

- 1) 以大气压力为基准,非饱和土中的吸力就是基质吸力,其值等于孔隙水压力的绝对值。
- 2) 当总应力不变时,非饱和土的有效应力主要取决于基质吸力的大小和有效应力影响系数。
- 3) 非饱和黄土的基质吸力随饱和度的增大而减小,其变化过程可用 $S=S_0(S_r)^{-1}$ 式描述。
- 4) 非饱和黄土的起始基质吸力与其物理性质指标具有较好的相关关系。

参 考 文 献

- 1 黄文熙. 土的工程性质. 北京:水利电力出版社,1986
- 2 沈珠江. 广义吸力非饱和土的统一变形理论. 岩土工程学报,1996,18(2):1~9
- 3 冯国栋. 土力学. 北京:水利电力出版社,1986
- 4 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社,1988
- 5 Hiller D. Fundamentals of soil physics. New York:Academic Press,1980
- 6 Bishop A W. The measurement of pore pressure in the triaxial test, Proc. Conf. on pore pressure and suction in soils, London, Butterworths, 1960. 38~46
- 7 Jennings J E. A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils. Proc. Conf. on pore pressure and suction in soils, London, Butterworths, 1960. 26~30
- 8 Aitchison G D. Relationships of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils. Proc. Conf. on pore pressure and suction in soils, London, Butterworths, 1960. 47~52
- 9 Li Jing. Strength characteristics of unsaturated palouse loess, Ph. D. Dissertation, University of Idaho, 1989

The Suction and Effective Stress of Unsaturated Loess

Li Jing¹ Dang Jinqian¹ Liu Zudian²

(1 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

(2 College of Hydroelectricity, Xi'an Science and Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710048)

Abstract The effect of the matrix suction on the unsaturated loess strength is studied by means of pressure board and regressive analysis. The result illustrates a linear relationship between the matrix suction of unsaturated loess and the saturation degree in the double logarithmic coordinate. The first matrix suction is changed along with liquid limit, plasticity index and clay pellet content in a manner of linear regularity. The effective coefficient of effective stress has a linear relationship with the first matrix suction, and it increases with the increment of the clay pellet content.

Key words unsaturated loess, matrix suction, effective stress, first matrix suction