

DOI: 10.11779/CJGE201508017

粒间应力、土骨架应力和有效应力

邵龙潭^{1, 2}, 郭晓霞^{1, 2}, 郑国锋^{1, 2}

(1. 工业装备结构分析国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 有效应力的概念和有效应力原理对于土力学具有奠基性的意义。但对于诸如“有效应力是虚拟的应力还是真实应力”, “有效应力方程是否需要修正”等问题在土力学界一直存有争议, 尚没有形成共识。在明确有效应力就是不包含孔隙流体压强作用的土骨架应力的基础上, 由土颗粒间力的平衡分析和土骨架单元体的平衡分析得到有效应力与总应力以及孔隙流体压强关系的表达式。对于饱和土, 这一表达式就是Terzaghi的有效应力方程。表明Terzaghi的有效应力是真实的物理量, 具有明确的物理意义, Terzaghi的有效应力方程不需要做任何修正。文中阐明了有效应力、粒间应力和土骨架应力的物理意义及其相互关系。说明在分离考虑孔隙流体压强作用的情况下, 有效应力、粒间应力和土骨架应力三者可以是一致的, 即不包含孔隙水压强作用的粒间应力和土骨架应力就是有效应力。土骨架应力可以分成孔隙流体压强产生的土骨架应力和有效应力两部分, 两者都对土体的变形和强度有贡献, 但是作用效果不同。在孔隙流体压强作用对土体的变形和强度的贡献可以忽略的条件下, 有效应力决定土的变形和强度。

关键词: 粒间应力; 土骨架应力; 有效应力; 孔隙流体压强; 有效应力方程

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)08-1478-06

作者简介: 邵龙潭(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土和孔隙介质力学基本理论研究、土工结构稳定分析、土工试验测试技术与仪器研发等方面的教学和科研。E-mail: shaolt@dlut.edu.cn。

Intergranular stress, soil skeleton stress and effective stress

SHAO Long-tan^{1, 2}, GUO Xiao-xia^{1, 2}, ZHENG Guo-feng^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The concept and principle of effective stress are significant to the development of soil mechanics. However, some problems such as “Is the effective stress the virtual or real stress?” and “Whether Terzaghi’s effective stress equation needs to be modified or not?” have long been considered to be controversial issues, and there is no consensus up to now. According to the definition that the effective stress is the skeleton stress due to all the external forces excluding pore water pressure, the relationship among the total stress, skeleton stress and pore water pressure can be obtained through the equilibrium analysis of intergranular force and free body of the soil skeleton. Then it may be seen that the expression of the relationship is the Terzaghi’s effective stress equation for saturated soils. It indicates that the Terzaghi’s effective stress is a real physical quantity and has a definite physical meaning. The Terzaghi’s effective stress equation is valid with no necessity to be modified. Moreover, the physical meaning and mutual relations of effective stress, intergranular stress and skeleton stress are clarified in this paper. It indicates that considering the effects of pore water pressure separately, the intergranular stress and the skeleton stress are the same as the effective stress. On the other hand, the skeleton stress can be divided into two components: one is that due to pore fluid pressure and the other is effective stress. They both contribute to the strength and deformation of a soil but play different roles. When the effect of the skeleton stress due to pore fluid pressure on the strength and deformation of a soil can be neglected, changes in the volume and shear strength of a soil are due exclusively to the ones in the effective stress.

Key words: intergranular stress; soil skeleton stress; effective stress; pore fluid pressure; effective stress equation

0 引言

Terzaghi 提出的有效应力原理奠定了现代土力学的基础^[1]。“在土体剖面上任何一点的应力可根据作用在这点上的总主应力 σ_1 , σ_2 , σ_3 来计算, 如果土中

的孔隙是在应力 u 下被水充满, 那么总主应力由两部分组成, 一部分是 u , 以各方向相等的强度作用于水

和固体, 这一部分称作中和应力(或称孔隙水压强); 另一部分为总应力 σ 和中和应力之差, 即 $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$, $\sigma'_2 = \sigma_2 - u$, $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$, 它只在土的固相中发生作用。总主应力的这一部分称为有效主应力。改变中和应力实际上并不产生体积变化, 中和应力与所在应力条件下土体的破坏无关。多孔材料(如砂、黏土和混凝土)对 u 的反应似乎是不可压缩的, 好像内摩擦等于零。改变应力所能测得的结果, 诸如压缩变形和剪切阻力的变化, 仅仅是由有效应力 σ'_1 , σ'_2 和 σ'_3 的变化引起的”。Jennings 等^[2]、Bishop 等^[3]将之总结为有效应力原理, 要点为: ①土体体积和剪切强度的变化完全取决于有效应力的变化; ②土体有效应力等于总应力与孔隙水压力之差。

其实在 Terzaghi 的叙述中, 还有一点也很重要, 就是土体中一点的应力一般是通过总应力来计算的。用总应力计算土体的应力表明把土体混合体(土骨架、孔隙水和孔隙气)整体作为研究对象。这是一种比较简单也比较容易接受的分析方法。但是将土体混合体作为分析对象得到土体的总应力并不能有效地分析土的强度。原因是总应力并非控制土体强度和变形的应力, 正像 Terzaghi 指出的, 总应力的改变并不一定引起土体的体积和强度变化。因此只有引入有效应力的概念和有效应力方程才能够通过总应力得到有效应力, 进而分析和确定土的变形和强度。Terzaghi 之后的研究者, 绝大多数都是这样做的, 如 Biot^[4]和 Zienkiewicz 等^[5]。这也是为什么 Terzaghi 的有效应力方程对土力学研究非常重要的原因。

有效应力原理一直是土力学研究人员关注的重点, 也一直是一个争论的话题。争论的焦点通常有两个: ①有效应力是虚拟的物理量还是真实的物理量; ②有效应力方程是否需要修正。事实上, 有许多研究者提出过多种修正公式^[6]。最早明确指出 Terzaghi 的有效应力方程需要修正并且给出修正公式的是 Skempton, 他在论文“Effective stress in soils, concrete and rocks”^[7]中, 首先用粒间力的概念解释了有效应力, 并且给出了考虑粒间接触面积的有效应力修正公式, 接着他又从有效应力就是控制土体强度和变形的应力的观点出发, 通过土、岩石和混凝土 3 种材料的试验结果分析分别给出了与强度和变形相关的饱和土的有效应力方程的修正公式。

沈珠江院士认为, Skempton 在其论文中所推导的两相介质的有效应力公式已经是完满的了, 没有必要继续争论有效应力的概念和有效应力方程是否需要修正的问题。Skempton 的研究已充分表明, 有效应力应通过强度或变形等效的原则计算, 像离心力一样, 它是一个虚拟的物理量, 并不是客观存在的一个物理量^[8]。

除了认为有效应力是粒间应力及有效应力是控制土的强度和变形的虚拟应力的观点以外, 许多土力学学者也接受有效应力就是土骨架应力的观点。

在连续介质力学中, 土骨架应力定义为所有外力引起的土骨架内力在土体整体面积上的平均; 混合物理论和孔隙介质力学中一般定义为所有外力引起的土骨架内力在土骨架面积上的平均。二者的区别仅仅在于土骨架内力是在土骨架面积上平均还是在土体总面积上平均。

与以上观点都不同, 邵龙潭^[9-10]直接以土骨架为研究对象, 通过分别取土骨架和孔隙流体为脱离体, 得到各自的平衡方程, 进而得到 Terzaghi 的有效应力表达式。由此说明 Terzaghi 的有效应力就是不包含孔隙流体压强作用的其他所有外力作用产生的土骨架应力。这有两方面的含义: 有效应力就是土骨架应力; 但是它并不是所有外力产生的土骨架应力。有效应力是真实的物理量, Terzaghi 的有效应力方程不需要修正。在孔隙流体压强作用对土骨架强度和体积变化的影响可以忽略的条件下, 土的强度和变形完全由有效应力决定。

有效应力即不包含孔隙流体压强的所有其他外力产生的土骨架应力。以此定义为基础, 本文将进一步阐明无论是粒间应力还是土骨架应力, 在分离考虑孔隙流体压强作用时都会变成有效应力, 并且也可以由粒间应力和土骨架应力的定义直接得到非饱和土的有效应力方程。

1 粒间应力与有效应力

Terzaghi 的有效应力方程只适用于饱和土。但即便对于饱和土, 许多研究者也并不认为 Terzaghi 的有效应力方程是精确成立的。他们认为土体骨架的受力很复杂, Terzaghi 的有效应力方程只有对饱和土的一些特定情况才有非常好的近似。在其他情况下, 有效应力方程是需要修正的。

在土力学领域, 比较普遍的观点是认为 Terzaghi 的有效应力实际上是土骨架颗粒之间作用的粒间应力。几乎在所有的土力学教科书中都是用粒间受力分析来解释有效应力, 并且说明 Terzaghi 的有效应力方程其实只是在粒间接触面积很小、其影响可以忽略条件下的近似表达式。这里引述 Skempton 在“Effective stress in soils, concrete and rocks”^[7]论文中的推导。如图 1 所示, 在垂直于接触面法向方向的力的平衡要求:

$$P = P_s + (A - A_s)u_w, \quad (1)$$

式中, P 为垂直于接触面的面力的合力, P_s 为颗粒接触面上总的粒间力, A_s 和 A 分别为接触面积和平行于

接触面的横截面积, u_w 为孔隙水压强。

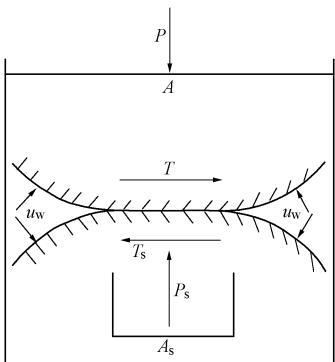


图 1 两接触颗粒间的粒间应力^[5]

Fig. 1 Contact force between particles^[5]

再引述土力学教材^[11-12]中的说明, 如图 2 所示。

沿 $a-a$ 截面取隔离体, 假定该截面是沿着土颗粒间的接触面截取的。考虑竖直方向土体的平衡条件有

$$\sigma_t A = \sigma_s A_s + (A - A_s) u_w , \quad (2)$$

式中, σ_t 为总应力, σ_s 为土颗粒间接触面上作用的法向应力, A_s 为各土颗粒间接触面积之和, A 为 $a-a$ 截面总面积。

由式(1)、(2)可以得到相同的有效应力修正方程的公式:

$$\sigma' = \sigma_t - (1 - a_c) u_w , \quad (3)$$

式中, σ' 为有效应力, a_c 为接触面积比, $a_c = A_s / A$ 。

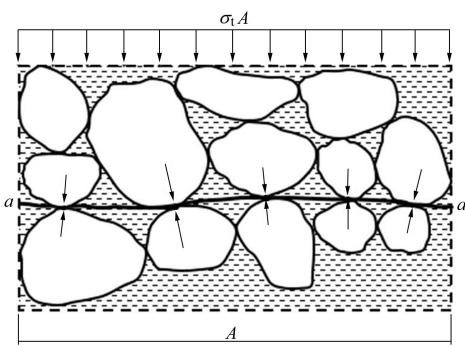


图 2 有效应力原理示意图^[12]

Fig. 2 Schematic diagram of effective stress principle

下面将说明, 如果在粒间应力中去除孔隙水压强产生的粒间应力, 那么就可以由上面的方程(1)和方程(2)直接得到太沙基的有效应力方程^[9]。

在上面引述的两种粒间应力的推导过程中, 粒间作用力 P_s 中均包含有孔隙水压强作用在颗粒接触面上所产生的力, 其大小为 $u_w A_s$, 如果将该力从粒间作用力中分离出来, 式(1)、(2)可以分别改写为

$$P = (P_s - u_w A_s) + u_w A = P'_s + u_w A , \quad (4)$$

$$\sigma_t A = (\sigma_s A_s - u_w A_s) + u_w A = P'_s + u_w A , \quad (5)$$

式中, P'_s 为不包含孔隙水压强作用的颗粒接触面上的作用力。

由式(4)、(5)显然可以得到 Terzaghi 的有效应力方程:

$$\sigma = \sigma_t - u_w , \quad (6)$$

式中, $\sigma = P'_s / A$ 。这说明有效应力就是不包含孔隙水压强作用的其他外力产生的粒间应力。

事实上, 如果分离考虑孔隙水压强的作用, 并不一定需要取过颗粒接触点的波状曲面导出粒间应力或者有效应力的表达式, 对于任一剖面, 式(5)都同样成立, 如图 3 所示。李广信^[13]也曾专门讨论有效应力与颗粒体内的应力, 并且基于图 3 导出了式(6)的结果。

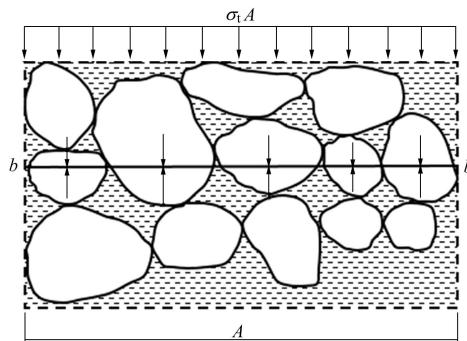


图 3 水平面上的粒间应力

Fig. 3 Intergranular stress on any cross section

2 土骨架应力与有效应力

土的强度和变形就是土骨架的强度和变形。土骨架的强度和变形当然由土骨架应力决定。因此, 许多学者相信有效应力就是土骨架应力。

在连续介质力学和孔隙介质力学(混合物理论)中, 土骨架应力定义与有效应力略有不同。连续介质力学中的应力定义以 Cauchy 应力原理及基本守恒定理为依据。陈正汉^[14]总结为以下 4 点: ①物质点在所有方向截面(其方矢为 n)上的应力矢量的全体 $\{t\}$ 构成该点的应力状态(不计应力偶)。②应力张量 σ 是应力状态的体现者和刻划者, 其间的联系是 $t(n) = \sigma \cdot n$ 。③应力张量不能随意给出, 动量守恒定律和动量矩守恒定律是定义它的依据。在不计体力偶时, 应力张量必须满足动量守恒方程。换言之, 应力状态变量只能从平衡方程中提取。④应力状态可用不同的应力张量刻划。而在孔隙介质力学中, Carroll^[15]曾提出平均应力定理, 即应力的定义为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{v} \int_v \sigma_{ij} dv = \frac{1}{v} \left[\int_{\partial v} t_i X_j dA + \int_v \rho b_j X_i dv \right] , \quad (7)$$

式中, v 为土体所占体积, ∂v 为 v 的边界, $\bar{\sigma}_{ij}$ 为平均应力, σ_{ij} 为一点的应力, t_i 为面力分量, b_j 为体力分量, X_i 为坐标值。

其实, 简单地说, 如果土体一点作用于某一方向的微元平面上土骨架总的面力为 P , 其在平均法向和切向上的分量分别为 N 和 T , 微元总的面积为 A , 土骨架面积为 A_s , $A_s = (1-n)A$, 那么按照 Cauchy 应力定义, 土骨架应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma^c &= \frac{N}{A}, \\ \tau^c &= \frac{T}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

按照 Carroll 应力定理, 土骨架应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma^s &= \frac{N}{(1-n)A}, \\ \tau^s &= \frac{T}{(1-n)A}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

可见两者的物理意义没有不同, 差别仅仅在于内力在土体面积上平均还是在土骨架的面积上平均。

下面将说明, 如果在上面的土骨架应力定义式(8)中去除孔隙水压强作用产生的内力, 那么由此得到的新的土骨架应力, 即不包含孔隙水压强作用的土骨架应力就是有效应力。

仔细分析可以发现, 在上面土骨架应力的定义式(8)和(9)中, 面力的法向分量 N 中均包含有孔隙水压强作用于土骨架产生的法向内力 N_w (孔隙水压强的作用不产生剪切力), 并且 $N_w = u_w(1-n)A$ 。分离考虑孔隙水压强的作用, 并且定义去除孔隙水压强作用产生的内力的土骨架应力为有效应力, 则有效应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{N - N_w}{A}, \\ \tau &= \frac{T}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

按照上述定义, 剪应力之间没有任何差别, 而正应力, 即式(10)的有效应力与式(8)、(9)的土骨架应力之间有以下关系:

$$\sigma^c = \sigma + (1-n)u_w, \quad (11)$$

$$\sigma^s = \frac{\sigma}{1-n} + u_w. \quad (12)$$

按照式(8)的土骨架应力的定义, 可以推导得到土骨架应力表示的饱和土体平衡方程为

$$\sigma_{ij,j}^c + n u_{w,i} + \rho_{sat} g_i = 0. \quad (13)$$

将式(11)带入式(13), 有

$$\sigma_{ij,j} + u_{w,i} + \rho_{sat} g_i = 0. \quad (14)$$

很明显, 将式(14)与总应力平衡方程比较, 可以得到 Terzaghi 的有效应力方程。

同样地, 按照 Carroll 平均应力定理给出的土骨架应力的定义, 即式(9), 也可以得到饱和土体的平衡方程^[12]:

$$(1-n)\sigma_{ij,j}^s + n u_{w,i} + \rho_{sat} g_i = 0. \quad (15)$$

将式(12)代入式(15), 也可以得到式(14), 同样可以得到 Terzaghi 的有效应力方程。

这再一次说明 Terzaghi 的有效应力就是不包含孔隙水压强作用的所有其他外力产生的土骨架应力。

那么为什么要把孔隙水压强分离出去考虑呢? 主要原因是均匀的孔隙水压强的作用产生且仅仅产生土骨架(颗粒)的正应力。它对土骨架的作用只会引起骨架颗粒的体积变形并且只有在颗粒接触面上对土的抗剪强度有贡献^[16]。说明如下:

土骨架应力包括两部分: ①不包含孔隙水压强的其它所有外力作用产生的土骨架应力; ②孔隙水压强作用产生的土骨架应力, 分别称之为外力土骨架应力和孔压土骨架应力(外力土骨架应力即有效应力)。二者均对土体的抗剪强度和体积变形有影响, 但其作用效果不同。

如果不能忽略孔隙水压强作用对骨架的强度的影响, 那么土体的抗剪强度, 亦即土骨架的抗剪强度应该包括两部分。一部分是不包含孔隙水压强的其他外力作用产生的土骨架应力 I 对应的土骨架抗剪强度, 用公式表示为

$$\tau_{fl} = c' + (\sigma_t - u_w) \tan \phi'. \quad (16)$$

另一部分是孔隙水压强作用产生的土骨架颗粒接触面应力对土骨架抗剪强度的贡献:

$$\tau_{f2} = a_c \cdot u_w \tan \psi. \quad (17)$$

总的抗剪强度等于 $\tau_{fl} + \tau_{f2}$, 即

$$\begin{aligned} \tau_f &= c' + (\sigma_t - u_w) \tan \phi' + a_c \cdot u_w \tan \psi \\ &= c' + \left[\sigma_t - \left(1 - \frac{a_c \cdot u_w}{\tan \phi'} \right) u_w \right] \tan \phi', \end{aligned} \quad (18)$$

式中, a_c 是骨架颗粒间的接触面积系数, $\tan \psi$ 是土颗粒间接触面的抗剪强度参数, c' 和 ϕ' 是土体的黏聚力和内摩擦角。

同样地, 如果不能忽略孔隙水压强作用引起的骨架的体积变形, 那么土体的体积变化也要包括两部分。一部分是外力土骨架应力引起的土骨架体积变化, 另一部分是孔压土骨架应力引起的土骨架体积变化。用公式表示为

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta V}{V} &= C(\Delta \sigma_t - \Delta u_w) + C_s \Delta u_w \\ &= C \left[\Delta \sigma_t - \left(1 - \frac{C_s}{C} \right) \Delta u_w \right], \end{aligned} \quad (19)$$

式中, C 是土体的体积压缩系数, C_s 是土颗粒的体积压缩系数。

当忽略孔隙水压强作用产生的土骨架应力对土骨架抗剪强度和体积变形的影响时, 式(18)、(19)可

以写为

$$\tau_f = c' + (\sigma_t - u_w) \tan \varphi' , \quad (20)$$

$$-\frac{\Delta V}{V} = C(\Delta \sigma_t - \Delta u_w) . \quad (21)$$

因此，在孔隙流体压强作用对土骨架强度和体积变化的影响可以忽略的条件下，土的强度和变形完全由有效应力决定。

由此再次说明，有效应力就是土骨架应力，但不是连续介质力学中原来定义的土骨架应力；也不是混合物理论或者孔隙介质力学中定义的土骨架应力。它们之间的区别主要在于是否分离考虑孔隙流体压强的作用。

至此已经能够充分了解：只要明确 Terzaghi 有效应力的物理意义，那么无论是由粒间应力还是由土骨架应力都可以得到有效应力的表达式。

在以上土骨架应力与有效应力的讨论中，通过平衡方程得到 Terzaghi 的有效应力。事实上，也可以通过土骨架单元体的内力平衡分析直接得到有效应力的表达式。

在这里只讨论水平方向的正应力。如同在讨论粒间应力时所取的水平截面的应力分析一样，取如图 4 所示的饱和土体单元体，如果在剖开的垂直平面上，水平方向总的内力为 N ，则土体总应力

$$\sigma_t = \frac{N}{A} , \quad (22)$$

式中， A 为土体剖面总面积。

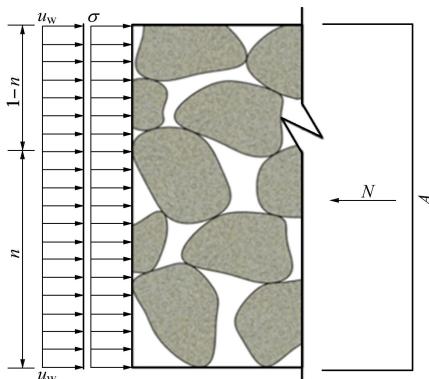


图 4 饱和土单元体水平方向受力分析

Fig. 4 Horizontal force analysis of a saturated soil element

设水平方向有效应力正应力为 σ ，孔隙水压强为 u_w ，则孔隙水压强作用产生的土骨架内力为 $u_w(1-n)A$ ，而孔隙水所承受的水压力为 $u_w n A$ 。因此土体单元水平方向的内力平衡条件为

$$N = \sigma A + u_w(1-n)A + n u_w A . \quad (23)$$

于是有

$$\sigma_t = \sigma + u_w , \quad (24)$$

即 Terzaghi 的有效应力方程。

同样也可以导出非饱和土的有效应力表达式（其意义是不包含孔隙流体压强作用的所有其他外力产生的土骨架应力）。详见参考文献[16]。

3 结语

有效应力的定义为不包含孔隙流体压强的所有其他外力作用产生的土骨架应力。土体的强度和变形实质是土骨架的强度和变形，它当然由土骨架应力决定。当孔隙流体压强的作用对土体的强度和变形的贡献可以忽略时，土体的强度和变形完全由有效应力决定。

按照有效应力的定义，由粒间力的平衡分析和土骨架受力的平衡分析均可以得到有效应力的表达式，对于饱和土，这一有效应力表达式就是 Terzaghi 的有效应力方程。这再次说明，有效应力就是不包含孔隙流体压强作用的土骨架应力，Terzaghi 的有效应力方程不需要修正。对于饱和土或其他水饱和孔隙介质，当孔隙水压强的作用对强度和变形的影响不能忽略时，其强度和变形包括有效应力和孔隙水压强两方面的贡献，公式已由 Skempton 给出，与本文给出的公式一致。

参考文献：

- [1] TERZAGHI K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear[C]// Proceedings for the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Cambridge, MA). Cambridge, 1936, 1, 54 – 56.
- [2] JENNINGS J E B. BURLAND J B. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils[J]. Géotechnique, 1962, 12(2): 125 – 144.
- [3] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Géotechnique, 1963, 13(3): 177 – 197.
- [4] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155 – 164.
- [5] ZIENKIEWICZ O C, SHIOMI T. Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 71 – 96.
- [6] LADE P V, BOER R DE. The concept of effective stress for soil concrete and rock[J]. Géotechnique, 1997, 47(1): 61 – 78.
- [7] SKEMPTON A W. Effective stress in soils, concrete and rocks,

- pore pressure and suction in soils[C]// Conf organized by the British National Society of Int Society of soil Mech and Foundation Eng. London, 1961: 4 - 25.
- [8] 沈珠江. 关于固结理论和有效应力的讨论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 118 - 119. (SHEN Zhu-jiang. Discussion on consolidation theory and effective stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 118 - 119. (in Chinese))
- [9] 邵龙潭. 饱和土的土骨架应力方程[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1833 - 1837. (SHAO Long-tan. Skeleton stress equation for saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1833 - 1837. (in Chinese))
- [10] 邵龙潭. 孔隙介质力学分析方法及其在土力学中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 1996. (SHAO Long-tan. Fundamental theory of porous material mechanics and its application in soil mechanics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1996. (in Chinese))
- [11] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2004. (ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, WANG Yun-xia. Fundamental of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [13] 李广信. 关于有效应力原理的几个问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 315 - 320. (LI Guang-xin. Some problems about principle of effective stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 315 - 320. (in Chinese))
- [14] 陈正汉, 秦冰. 非饱和土的应力状态变量研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 1 - 11. (CHEN Zheng-han, QIN Bing. On stress state variables of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [15] CARROLL M M. Mechanical response of fluid-saturated porous materials[C]// Proc 15th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. New York: North-Holland, 1980: 251 - 261.
- [16] 邵龙潭, 郭晓霞. 有效应力新解[M]. 北京: 水利水电出版社, 2014. (SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia. New explanation of the effective stress[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2014. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)