

文章编号: 1000-7598 (2013) 01-0040-07

土结构强度模型研究

卫振海^{1,2}, 王梦恕¹, 张顶立¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 后勤指挥学院 后方专业勤务系, 北京 100858)

摘 要: 长期以来, 很多学者在土的强度问题方面做了大量的研究工作, 也取得了不少成果。但土的结构性对强度的影响一直是这一问题的难点。以土的颗粒连接为基本点, 建立了土结构强度模型, 并对其进行分析, 发现土体的强度直接与颗粒之间的连接强度和连接的分布形态有关。将统计域上形成的应力强度曲线族, 当作宏观分析的土体性能的代表点考察时, 可以自然地得到多个曲面构成的屈服面。通过对简化的土结构形态例子的分析, 当各方向的连接为均匀分布时, 可以得到各向同性的应力强度模型。分析表明, 当考虑到统计域的空间特性时, 宏观应力在统计域上不同的局部坐标位置, 会出现应力梯度对强度产生影响的现象, 这是过去的经典理论中所无法解释的。由此可知, 土体结构强度模型是一种分析具有结构性土体的新的、有效的方法。

关 键 词: 颗粒结构; 模型; 强度理论

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Study of strength model of soil structure

WEI Zhen-hai^{1,2}, WANG Meng-shu¹, ZHANG Ding-li¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Rear Professional Service, Logistics Command Academy, Beijing 100858, China)

Abstract: Many scholars have performed a large amount of researches on soil strength with considerable achievements. But the influence of soil structure on its strength has always been the difficult point. A soil structure strength model is established based on soil particle connection. From the analysis of this soil structure model established, it is found that the strength of soil mass is directly associated with the connection strength among particles and the distribution pattern of connections. When the stress-strength curve family in statistical domains is used to macroscopically analyze the soil mass properties, the yield surface composed of several curved surfaces can be gained. The analysis of examples of simplified soil structure morphology indicates that an isotropic stress-strength model can be obtained when the connection in each direction is evenly distributed. In addition, when the spatial characteristics of statistical domains are considered, for different local coordinates of macroscopic stress in the statistical domain, the stress gradient may influence the soil strength. This is exactly what the classical theories can not explain. Therefore, the strength model of soil structure being established is a kind of new and effective analysis method for structural soil.

Key words: particle structure; model; strength theory

1 引 言

许多学者都进行过土的强度方面的研究, 并取得了不少有益的成果^[1-5]。土的强度的确定, 目前解决的思路主要有两个方面: 一是通过试验来获得岩土材料的强度。但由于岩土材料的复杂性, 很难找到其规律, 只能从工程现场测定相应的参数; 二是理论与试验相结合。主要是借用弹塑性力学中的强度理论与试验相结合, 在一定的假定条件下, 得到具有一定规律性的强度参数。但由于弹塑性理论本身的假定条件与岩土材料的差距较大, 往往得到的结果并不理想。

所以, 到目前为止, 岩土材料的强度问题仍然没有很好地解决, 其根本原因是岩土材料具有很强的结构性。Chang 等^[6]、Yin 等^[7-8]从微观角度分析了岩土的特性, 包括强度问题, 但由于影响土体结构性的因素很多, 如颗粒的级配、连接性能、组构关系等, 使问题变得非常复杂。虽然取得了一些研究进展, 但要真正解决这一问题还需要长期的努力。岩土材料可以看作是由大量的颗粒按照一定的结构组成, 本文以此为出发点, 来分析岩土材料的强度问题, 通过颗粒结构模型来对岩土材料的强度问题作一初步的探索。

收稿日期: 2011-10-07

第一作者简介: 卫振海, 男, 1957 年生, 硕士, 教授, 主要从事岩土工程和结构工程方面的研究工作。E-mail: wzhai@vip.sina.com

2 土颗粒结构模型

2.1 基本假定

为简化土体的复杂性，对岩土材料的结构模型做如下假定：

(1) 土体是由大量颗粒组成的，颗粒本身的强度是无限大的，也就是认为，土体在受荷过程中不考虑颗粒本身的破裂；

(2) 颗粒间的相互作用是通过颗粒间的接触而形成，且两颗粒间只有一个接触点（或面）；

(3) 颗粒组合体的结构发生变化，即认为颗粒间的连接达到破坏强度；

(4) 在宏观上，将一定空间范围内（统计域）的颗粒组合体的平均特征作为该宏观点特性的代表值。

从以上假定可以看到，这一模型将土体简化为由凸形态的颗粒相互接触组成的结构体，土体的破坏特征是颗粒间的连接发生破坏，导致颗粒间组成的结构发生变化。在宏观上土体塑性变形就是颗粒构成的结构发生了变化。在进行宏观分析时，是以统计理论为基础，对一定范围内的颗粒结构体的力学或其他特征进行统计，作为宏观点的代表值，将颗粒土体的强度问题，转化为统计区域上的强度问题。

2.2 颗粒间的连接强度

在颗粒土体结构模型中，土体的宏观强度（统计区域的强度）直接受到颗粒间连接强度和颗粒间连接分布的影响，而颗粒间的连接强度又是宏观强度（统计域的强度）的基础。根据文献[9-11]，可以将颗粒间的连接简化为固定连接方式，简化后的作用力如图1所示。主要有拉压力（径向作用力） F 、剪切力（切向作用力） Q 和弯扭力 M 。连接的强度主要由这3个参数控制。3种力的参数可以形成以下3种控制模式。

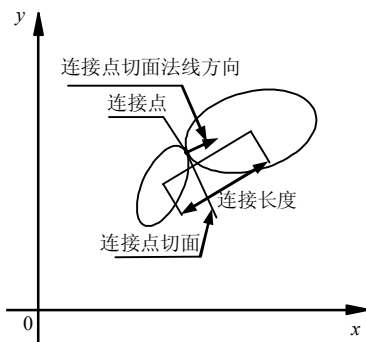


图1 颗粒连接

Fig.1 Particle connection

(1) 3个力的参数为独立控制模式，即 F 、 Q 、 M 的强度分量之间相互没有影响。在力的坐标关系中形成一个立方体。因此，可称之为立方体关系：

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \pm f_{xs}, Q_x = \pm q_{xs}, M_x = \pm m_{xs} \\ F_y &= \pm f_{ys}, Q_y = \pm q_{ys}, M_y = \pm m_{ys} \\ F_z &= \pm f_{zs}, Q_z = \pm q_{zs}, M_z = \pm m_{zs} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： f_{xs} 、 f_{ys} 、 f_{zs} 、 q_{xs} 、 q_{ys} 、 q_{zs} 、 m_{xs} 、 m_{ys} 、 m_{zs} 分别为颗粒连接拉压、剪切和弯扭在各方向上的破坏能力分量。

形成的立方体关系在整体坐标系中，可以相对于原点对称，也可以是不对称关系，也可以与坐标轴形成一定的角度。

(2) F 、 Q 、 M 3个力中，可能其中的任意两个力之间存在一定的关系，即有

$$\left. \begin{aligned} U(F, Q) &= 0 \\ V(Q, M) &= 0 \\ W(F, M) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在某些情况下，颗粒间的破坏不仅仅受到一种力的作用而破坏，可能是由两种的力共同作用所决定。如颗粒间的摩擦破坏，就由切向力和正压力所决定。

(3) 颗粒间的破坏由 F 、 Q 、 M 共同作用所控制，即

$$G(F, Q, M) = 0 \quad (3)$$

以上3种情况实际上可以形成7种强度控制模式，也可以认为是7种屈服模式：①拉压控制模式，即 F_s 控制模式；②剪切控制模式，即 Q_s 控制模式；③弯扭控制模式，即 M_s 控制模式；④压剪控制模式，即 $F_s + Q_s$ 控制模式；⑤剪扭控制模式，即 $Q_s + M_s$ 控制模式；⑥压扭控制模式，即 $F_s + M_s$ 控制模式；⑦压剪扭联合控制模式，即 $F_s + Q_s + M_s$ 控制模式。

以上7种模式，针对不同的材料会有所不同。在颗粒模型中，对于颗粒之间的接触面强度，由于接触面的方向性，在一般情况下，在不同的方向上将表现出各向异性。当为统计强度时，由于连接面分布可能为各个方向分布基本相同，宏观上的强度表现可能为各向同性。

(1) 各向同性相关关系，即

$$F^2 + Q^2 + M^2 = R_s^2 \quad (4)$$

(2) 具有方向性的椭圆关系，有

$$\left(\frac{F}{k_f} \right)^2 + \left(\frac{Q}{k_q} \right)^2 + \left(\frac{M}{k_m} \right)^2 = R_s^2 \quad (5)$$

式中: k_f 、 k_q 、 k_m 分别为方向系数。

(3) 摩擦关系, 即

$$Q = kF \quad (6)$$

式中: k 为摩擦系数。

2.3 颗粒连接的应力强度

前面讨论的颗粒间的连接能力, 是以颗粒间连接的最大破坏力来描述的, 而在宏观分析中, 都是以强度 (应力) 来描述的。为了使微观上的描述与宏观上相一致, 应将颗粒连接能力以应力方式来描述。应力强度是指材料单位面积上所能承受的应力的大小, 也就是说, 要将颗粒连接的强度用应力强度来描述, 还必须考虑连接面的几何尺寸。

在颗粒相互连接构成的体系中, 颗粒之间的连接的几何形态和尺寸都是十分复杂的, 为了能较简单地将连接能力转换为应力表达方式, 可以将颗粒之间的连接简化为点 (线或面), 在所考察的统计区域上就可以得到由颗粒连接的点 (线或面), 构成的一个分布 (如图 2)。图中的每个点 (线或面), 代表了颗粒间的一个连接, 为了能更形象地表达连接的有关参数, 还可引入连接法线方向, 形成一个更为全面表达连接分布及方向分布的连接分布图。

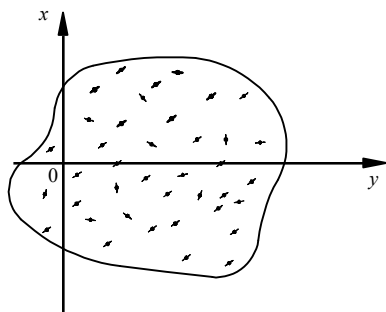


图 2 颗粒连接点分布

Fig.2 Distribution of particle connection point

要将各连接上的力, 转换为应力或应力强度, 应考虑各个连接点 (线或面) 的影响区域。这里可以引入计算几何中的 Voronoi 域的概念和方法, 根据各连接点 (线或面) 的分布计算出各个点 (线或面) 的 Voronoi 域, 以此近似作为连接点 (线或面) 的影响区域^[12-15]。

图 3 是一个连接点 Voronoi 域, 设

$$r_i = r_i(\alpha) \quad (7)$$

式中: r_i 、 α 分别为 Voronoi 域的矢径和相应角度。

显然, 通过原点, 法线方向为 α 的 Voronoi 域

截面为

$$b_i = r_i \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) + r_i \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

因此, 得到相应的法线方向为 α 的截面的应力强度的表达式为

$$\sigma_i^s = \frac{R_i^s}{b_i} \quad (9)$$

对于扭转下的偶应力强度, 为力偶除以 Voronoi 域面积 A_i , 即

$$m_i^s = \frac{M_i^s}{A_i} \quad (10)$$

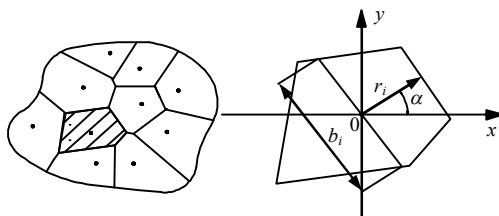


图 3 连接点的 Voronoi 域

Fig.3 Voronoi field of connection point

从表达式中可以看到, 当 Voronoi 域为不规则形状时, 各个不同方向上的 Voronoi 域截面会有所不同, 因此, 计算得到的应力强度不仅仅会受到连接点力大小变化的影响, 而且还受到 Voronoi 域形状的影响。即使连接力大小相同, 由于 Voronoi 域形状的影响, 也会使应力或应力强度出现各向异性。而 Voronoi 域形态的变化受到连接点 (线或面) 分布的影响, 也就是说, 受到颗粒构成结构变化的影响。所以, Voronoi 域的形态实际上反映了颗粒组合结构形态的变化, 可以通过 Voronoi 域的变化来体现系统结构性的影响。

3 统计域上的结构强度

在宏观上, 可以将统计域看作一个点, 统计域上的统计特征和相应的力学统计参数代表了宏观上这一点的相应的力学参数。但在微观上, 统计域是一个区域, 是一个包含了许多颗粒连接点的区域。统计域上的强度是统计域上各个微观连接点特性及这些连接结构分布特性的统计结果的反映。

3.1 统计域强度的表达

作为宏观代表点的统计域, 其中包含着许多颗粒间的连接, 这些连接的能力可能各不相同。当以

应力强度来表达各个连接点(线或面)的强度时,土体结构的不同,连接点(线或面)的分布变化也很不相同,相应的 Voronoi 域大小、形态也不同,从而代表各个连接点(线或面)的应力强度也必然不同。各个连接点的能力反映了颗粒间的连接特性,或相互作用关系的能力,是与颗粒特性有关的。连接的分布特征反映的是颗粒组成的组构特征。从宏观意义上讲,我们更关心的是统计域上反映出来的整体应力强度。而整体的应力强度是由统计中的颗粒连接强度和颗粒连接的分布特征所决定的。

根据统计域上连接的强度及其分布,可以求出每个连接点(线或面)的应力强度,这个应力强度可以绘制成曲线(应力强度曲线)。将这些曲线绘制在同一个坐标系中,可以得到如图4所示的应力强度曲线族。分析这个应力强度曲线族,可以有如下3种考虑。

(1) 平均应力强度 以每个连接的 Voronoi 域大小为权重因子,可以得到统计域平均应力强度:

$$\bar{\sigma}^s = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \sigma_i^s v_i \quad (11)$$

式中: $\bar{\sigma}^s$ 为统计域的平均应力强度; v_i 、 σ_i^s 为第 i 个统计域的区域大小和相应的应力强度; V 为整个统计域的大小。式(11)表明,在整个统计域上,是以应力强度的平均值作为统计域的应力强度。

(2) 最大包络强度可用下式表示:

$$\sigma_{\max}^s = \text{Max}[\sigma_i^s]_{i=1}^n \quad (12)$$

就是在所有连接的应力强度中,取最大值。从图上看,就是应力强度曲线族最外的包络线(面)。从宏观上讲,这个强度是指整个统计区域都进入了屈服或破坏阶段。

(3) 最小包络强度表达式为

$$\sigma_{\min}^s = \text{Min}[\sigma_i^s]_{i=1}^n \quad (13)$$

在所有连接的应力强度中,选择最小的应力强度值作为统计域的应力强度。从图4上看,就是曲线族的最内侧的包络线(面)。从宏观上讲,统计域中任一点进入屈服或破坏状态,就可以认为统计域进入了屈服或破坏状态。

比较以上3种应力强度参数可以发现,最大包络强度值所包含的区域最大,它将整个的曲线族全部包括在其中;最小包络强度值所包含的区域最小,它所包含的区域是所有强度曲线包含的公共区域;

而平均强度介于最大强度和最小强度之间。在宏观上,统计域是作为一点来进行观察的,并不能反映出以上强度特征的区别,但可以通过微观的分析与宏观现象的结合来观察这一特征。

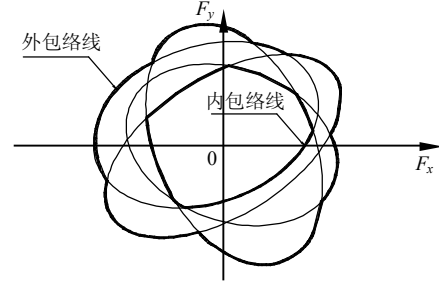


图4 统计域上连接强度曲线
Fig.4 Strength curves on statistics field

3.2 简单结构强度分析算例

根据以上思路,对具有简单结构的材料强度进行分析。

(1) 为简单起见,设统计域中各颗粒间连接的破坏能力相等,按独立的立方体分布模式分析。

根据独立分布模式,除了由于各个连接的角度会有所变化外,其他参数均相同。角度为 β_i 的第 i 个连接的边线方程(平面问题)为

$$\sigma_x \cos \beta_i + \sigma_y \sin \beta_i - \sigma^s = 0 \quad (14)$$

式中: σ^s 为颗粒连接的应力强度。

这时在以 β_i 为法线的截面上,其应力大小应和这一方向上颗粒连接强度相同,即有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_R &= \sigma_x \sin^2 \beta_i + \sigma_y \cos^2 \beta_i + 2\tau_{xy} \sin \beta_i \cos \beta_i \\ \sigma_Q &= (\sigma_x - \sigma_y) \sin \beta_i \cos \beta_i + \tau_{xy} (\cos^2 \beta_i - \sin^2 \beta_i) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$; σ_R 为颗粒间连接的径向(截面法向)连接强度; σ_Q 为颗粒连接的切向连接强度。

根据颗粒连接的角度 β_i 的变化,可以得到整个统计域中的所有连接强度曲线。由于假定所有的连接强度都相等,所以由上述方程形成的曲线实际上是由一系列的直线所围成的区域。这些直线所围成的包络线就是统计域的强度曲线。

进一步假定所有的颗粒连接在方向上均匀分布,并无限接近于连续分布。将式(15)中的角度消去,得

$$\frac{1}{4}(\sigma_x + \sigma_y)^2 - \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 - \tau_{xy}^2 = \sigma_R^2 \quad (16)$$

写为应力不变量的形式:

$$I_2 - \sigma_R I_1 = -(\sigma_R^2 + \sigma_Q^2) \quad (17)$$

式中: $I_1 = \sigma_x + \sigma_y$, $I_2 = \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2$ 。

通过分析可以发现,这是一个与经典弹塑性理论中的 Mises 准则非常接近的强度曲线。也就是说由颗粒连接强度模型,当颗粒无限小并只考虑连接的剪切强度时,可以退化到近似经典强度理论。而颗粒连接强度模型是一个更一般和更具普遍意义的强度模型。

(2) 考虑颗粒连接的径向强度与切向强度相关的情况(如摩擦型连接)。

将式(16)进行改造,设 x 、 y 方向正好为主应力方向,有

$$p^2 - q^2 = \sigma_R p - (\sigma_R^2 + \sigma_Q^2) \quad (18)$$

式中: p 、 q 分别为平均主应力和广义剪应力。

又有

$$\sigma_Q = k \sigma_R \quad (19)$$

将式(19)代入式(18),得

$$p^2 - q^2 = \sigma_R p - \sigma_R^2 (1 + k^2) \quad (20)$$

这就是由颗粒连接的径向强度和剪切强度相关时的强度模型。显然与经典的摩尔-库仑理论不同,但如绘制成曲线,可以发现两者还是很接近的(如图5所示)。

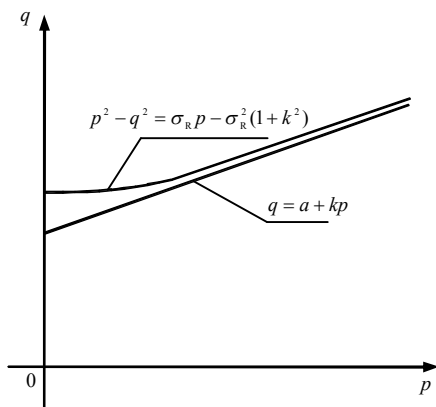


图5 与摩尔-库仑理论比较
Fig.5 Comparing with Mohr-Coulomb theory

3.3 统计域强度参数的宏观解释

统计域上的强度与弹塑性理论中的强度的概念是有一定的区别的。弹塑性理论中的强度是指一点的强度,而统计域上强度是一个区域上的统计特性

的反映。弹塑性理论将研究的对象完全理想化,认为材料是无限可分的,因此,具有点强度的概念。而实际的材料不可能无限可分,只能在不同的尺度上反映出其相应的特性。所以在颗粒这个尺度层面上,采用统计域的强度概念更为合理,并具有实用价值。在统计域的强度概念中,从最大包络强度到最小包络强度之间是有一定过渡区域的,这个过渡区域的宽度和连接点的强度分布有关,也与连接点的空间分布形态有关,即与连接点的 Voronoi 域形态有关,这反映土体的结构特性。一般地讲,连接强度差别越大, Voronoi 域形态越不均匀,过渡带就越宽,反之则越窄。如果将各个连接的应力强度完全理想化,即各个连接的应力强度完全一致,这时最大包络强度与最小包络强度之间的区域就完全消失,这时的强度曲线就退化为弹塑性材料的屈服或破坏曲线(过渡带宽度的定量分析将另文讨论)。也就是说,统计域强度是一条有厚度的屈服面,而经典理论的屈服面是没有厚度或厚度为0的曲面。

在弹塑性理论中,有学者依据试验结果,提出多屈服面理论,根据材料颗粒结构理论,考虑材料的结构性后,可以发现,多屈服面可以自然而然地导出。也就是说,多屈服面现象是由于材料的结构性造成的非连续性、非均匀性而产生的强度曲线的多样化而出现的必然现象。

3.4 应力梯度和强度

在经典弹塑性理论中,因为考虑的是点的强度,因此应力梯度与应力强度是无关的,应力强度仅仅是材料的独立特性。但实际上,理论上的点的概念是不存在的,对于实际材料而言,即使尺度非常小,材料仍然具有一定的结构性,且这种结构性,仍然有一定尺度,那么从理论上讲,这个区域上各部分的空间位置会有所不同,如果应力梯度变化较大时,各个不同空间位置的应力变化的影响就不能忽略。

设在统计域中,任一连接的局部坐标位置为 (ξ_i, η_i) ,则这点的应力可近似表示为

$$\sigma_i = \sigma_0 + \frac{\partial \sigma_0}{\partial x} \xi_i + \frac{\partial \sigma_0}{\partial y} \eta_i \leq \sigma_i^s \quad (21)$$

式中: σ_i 为第 i 个连接的应力; σ_0 为统计域上的名义应力 $\sigma_0 = \sigma_0(x, y)$; σ_i^s 为第 i 个连接的应力强度。

令

$$\Delta \sigma_i^s = \frac{\partial \sigma_0}{\partial x} \xi_i + \frac{\partial \sigma_0}{\partial y} \eta_i \quad (22)$$

可得

$$\sigma_0 \leq \sigma_i^s - \Delta\sigma_i^s \quad (23)$$

又令

$$\sigma_i^{st} = \sigma_i^s - \Delta\sigma_i^s \quad (24)$$

得

$$\sigma_0 \leq \sigma_i^{st} \quad (25)$$

由此可以看到, σ_i^{st} 是与 (x, y) 处的应力梯度 $\frac{\partial\sigma_0}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial\sigma_0}{\partial y}$ 和统计域上连接所在位置有关。实际上, 如果采用最小包络强度, 就是要在所有的 σ_i^{st} 中找到最小值, 作为 σ_0 , 也就是统计域的应力强度。下面分析 σ_i^{st} 的情况, 有

$$\sigma_i^{st} = \sigma_i^s - \Delta\sigma_i^s \quad (26)$$

如果 $\Delta\sigma_i^s$ 是常量, 在整个统计域上, 则相当于将 σ_i^s 在应力强度坐标中作一个平动 (见图 6), 形成一个新的屈服面。如果 $\Delta\sigma_i^s$ 是一个变量将引起屈服面的位置和形状的变化 (这点类似于经典弹塑性理论中随动强化和同向强化, 不同之处, 在于这里是由应力梯度引起的, 而经典理论中, 强化是应变引起的), 可以将这一变化称为应力梯度强化。

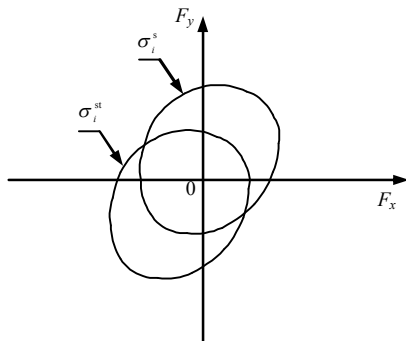


图6 应力梯度引起的强度变化

Fig.6 Strength changes with stress gradient

根据 (x, y) 点的应力梯度和局部坐标位置 (ξ_i, η_i) , 将统计域中所有连接的强度 σ_i^s 求出其换算强度 σ_i^{st} , 并找到其最小包络强度曲线和最大强度包络曲线。一般情况下, 由于 $\Delta\sigma_i^s$ 的存在, 会使原有外包络面更向外, 内包络应力强度面更向内。也就是说, 应力梯度的存在减小了统计域的最小包络强度, 加大了最大包络强度, 使两个包络强度曲线间的过渡区域更宽, 在宏观上表现出来的是出现了一种应力软化现象。

将式 (21) 在整个统计域上求平均:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \left(\sigma_0 + \frac{\partial\sigma_0}{\partial x} \xi_i + \frac{\partial\sigma_0}{\partial y} \eta_i \right) v_i = \sigma_0 + \frac{\partial\sigma_0}{\partial x} \sum_{i=1}^n \xi_i v_i + \frac{\partial\sigma_0}{\partial y} \sum_{i=1}^n \eta_i v_i \quad (27)$$

当统计域对称时, 有 $\sum_{i=1}^n \xi_i v_i = 0$ 和 $\sum_{i=1}^n \eta_i v_i = 0$,

可得 $\bar{\sigma}_0 = \sigma_0$

除了应力梯度对强度有影响外, 各个连接在统计域中的局部坐标相对位置也有影响, 也就是与连接的分布有关, 而连接的分布与统计域的结构形态有关。也就是说, 颗粒体系的结构形态和应力梯度同时对强度有影响。

另外, 从宏观上看由于各点 (x, y) 的应力强度不同, 导致 σ_0 的大小会随 (x, y) 而发生变化, 由此产生的应力梯度是随 (x, y) 在空间的分布不同而不同, 也就是说, 在一定的条件下, 应力强度与该点的应力状态有关, 这一点是具有结构性材料的另一个重要特征。

4 结 论

(1) 土体的强度是直接 with 颗粒之间的连接强度和连接的分布形态有关。

(2) 在统计域上形成的应力强度曲线族, 当在宏观上作为一点考察时, 自然而然地会得到多屈服面的结论, 从理论上解决了多屈服面的问题。

(3) 从分析中可知, 应力梯度对强度会产生影响, 这是过去的经典理论中所无法解释的, 但在实际中确实存在这一现象, 这里从理论上得到了解释。

(4) 颗粒连接点的分布形态, 特别是一些特殊类型的结构 (如分形结构) 对系统的强度有着关键性的影响。

以上几点从颗粒结构模型的分析中得到的结论, 是过去的经典理论无法得到的, 这些结论和分析的方法, 解决了由颗粒组成的系统长期存在的一些问题, 提出了解决颗粒系统问题的一个新思路。另外, 颗粒系统的强度问题, 是一个十分复杂的问题, 本文只是通过建立颗粒结构模型进行了初步的分析, 有些问题还需要在理论和试验上进一步的深入研究。

参 考 文 献

- [1] 杨书燕, 刘春原. 高液限黏土微结构分析与强度机理的研究[J]. 河北工业大学学报, 2002, 31(5): 116—118.
YANG Shu-yan, LIU Chun-yuan. Microstructural

- analysis and strength study about highly plastic clay[J]. **Journal of Hebei University of Technology**, 2002, 31(5): 116—118.
- [2] 周翠英, 牟春梅. 软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1136—1141.
ZHOU Cui-ying, MOU Chun-mei. Relationship between micro-structural characters of fracture surface and strength of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(10): 1136—1141.
- [3] 田江永, 王正中, 杨春光. 统一强度理论在弹塑性本构模型中的应用[J]. 人民黄河, 2006, 28(5): 63—64.
TIAN Jiang-yong, WANG Zhen-zhong, YANG Chun-guang. The applying of the unified intensity theory in the elasticity and plastic constitutive model[J]. **Yellow River**, 2006, 28(5): 63—64.
- [4] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 2—10.
YU Mao-hong. Unified strength theory for geomaterials and its applications[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(2): 2—10.
- [5] 徐志斌, 高峰. 张性断层构造预测的岩石分形统计强度理论[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(8): 65—67.
XU Zhi-bin, GAO Feng. Rock fractal statistical strength theory using the prediction of tensile fault[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2004, 26(8): 65—67.
- [6] CHANG C S, HICHER P Y. An elasto-plastic model for granular materials with microstructural consideration[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2005, 42(14): 4258—4277.
- [7] YIN ZHENYU, CHANG CHING S, HICHER PIERREYVES, et al. Micromechanical analysis of kinematic hardening in natural clay[J]. **International Journal of Plasticity**, 2009, 25(8): 1413—1435.
- [8] YIN ZHENYU, CHANG CHING S, HICHER PIERREYVES. Micromechanical modeling for effect of inherent anisotropy on cyclic behaviour of sand[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2010, 47(5): 1933—1951.
- [9] 张洪武. 弹性接触颗粒状周期性结构材料力学分析的均匀化方法(I)——局部 RVE 分析[J]. 复合材料学报, 2001, 18(4): 94—97.
ZHANG Hong-wu. Homogenization method for the analysis of assemblage of elastic contact grains, part one: Local RVE analysis[J]. **Acta Materiae Compositae Sinica**, 2001, 18(4): 94—97.
- [10] 秦庆华, 杨庆生. 非均匀材料多场耦合行为的宏观理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 谢先海, 廖道训. 均匀化方法中等效弹性模量的计算[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(4): 44—46.
XIE Xian-hai, LIAO Dao-xun. Computation method of equivalent elastic tensor in homogenization method[J]. **Journal of Huazhong University of Science & Technology**, 2001, 29(4): 44—46.
- [12] 钱波, 张李超, 黄树槐. 基于平面多边形 Voronoi 图的算法与快速成形应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 125—128.
QIAN Bo, ZHANG Li-chao, HUANG Shu-huai. Voronoi diagrams algorithm based on polygon and in the rapid prototyping applications[J]. **Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)**, 2008, 36(1): 125—128.
- [13] 杨永清, 冯钧, 王志坚. 基于 Voronoi 图的复杂对象空间方位关系的推理计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 414—417.
YANG Yong-qing, FENG Jun, WANG Zhi-jian. Reasoning and calculation of spatial direction relationship between complex object based on Voronoi diagram[J]. **Journal of Hohai University (Natural Science Edition)**, 2008, 36(3): 414—417.
- [14] 陈静静, 闰浩文. 应用一级邻近点生成加权 Voronoi 图的思想[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2008, 22(1): 85—88.
CHEN Jing-jing, YAN Hao-wen. Thought of drawing weighted diagram with 1-order neighbor[J]. **Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition)**, 2008, 22(1): 85—88.
- [15] 严燕儿, 冯学智. Voronoi 图与空间关系分析[硕士学位论文 D]. 南京: 南京大学, 2000.