

一种土与结构接触面模型的建立及其应用

Establishment and application of a interface model between soil and structure

张冬霖

浙江大学岩土工程研究所, 杭州, 310027)

卢廷浩

河海大学岩土工程研究所, 南京, 210098)

文 摘 在进行了一系列接触面单剪试验的基础上, 分析和探讨了接触面剪切破坏和变形的机理, 提出了错动位移、剪切位移以及接触面“剪切错动带”的概念。在此基础上, 建立了一种新的接触面模型, 并给出了确定模型参数的方法。有限元计算结果表明, 该模型能够较合理地反映接触面上剪应力的传递及相对位移的发展, 它比常规接触面模型有较明显的改进。

关键词 接触面, 计算模型, 单剪试验, 剪切变形。

中图法分类号 TU 411.7

作者简介 张冬霖, 男, 1973年生, 硕士, 现在浙江大学攻读博士学位。主要从事土与结构相互作用、基坑支护等方面的研究。

Zhang Donglin

Lu Tinghao

Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098)

Abstract In this paper, based on a series of simple shear tests, the shear failure and deformation character at interface are analyzed and investigated. The idea of sliding deformation and shear deformation at interface is distinguished, and the sliding zone at interface is defined. A new interface model is established in this paper. Furthermore, the method of determining parameters of this model is proposed. Calculated results show that the new model can reflect shear stress and relative deformation at interface reasonably. It is superior to the conventional interface models.

Key words interface, calculation model, simple shear test, shear deformation.

1 前 言

在土木工程中, 常常会遇到土体与结构的相互作用问题, 例如土体与基础、桩与土体、土体与挡土结构、土体与防渗墙的相互作用等。而接触面的研究则是土与结构相互作用的主要课题之一。分析土体与结构的相互作用时, 除了根据土体与结构的特性, 分别采用不同的应力-应变关系外, 对于土体与结构间的接触面, 必须给以特殊的注意。

在接触问题中, 结构的材料性能与周围土层性质相差较大, 在一定的受力条件下有可能在其接触面上产生错动滑移或开裂。因此, 为了充分反映接触面的受力及变形特性, 应采用一种接触面特有的本构关系。

长期以来, 许多中外学者进行了接触面方面的研究, 并提出了多种接触面模型。如 Clough 和 Duncan 等人所提出的 $\tau - \omega_s$ 双曲线模型^[1], 目前仍得到最广泛的应用; 其它还有 Brandt 简化的 $\tau - \omega_s$ 模型^[2]; 陈慧远的弹塑性模型^[3]; 钱家欢的粘弹塑性模型^[4]等。这些模型具有一个共同的特点, 就是切向变形都是依据直剪试验的 $\tau - \omega_s$ 关系曲线。而殷宗泽等人根据他们的接触面大尺寸直剪试验结果, 提出 $\tau - \omega_s$ 曲线实际上是特定尺寸的试样剪切破坏过程逐步发展的宏观反映, 但它决不表示接触面剪切变形的本构关系^[5]。

本文在前人的研究基础上, 摒弃 $\tau - \omega_s$ 关系曲线, 发展和建立一种更加趋于合理的接触面模型; 并可运用较简单的试验手段来获得该模型的参数。应用该模型, 编制有限元程序, 通过对实例的有限元计算验证了该模型。说明可将其应用于工程实践, 有较好的实用和推广价值。

2 接触面变形特性的试验研究

在直剪试验中, 由于人为地固定了剪破面的位置, 因此剪破恰恰发生在两种材料的界面上。但事实上, 接触面的破坏未必仅仅发生在这个界面上, 它必然会带动周围一定的土体而形成一个“剪切错动带”, 如图 1(a)所示。这个“剪切错动带”内土体的应力、变形性质明显不同于周围的土体, 它代表的正是接触面的特性。只不过当接触面的性质不同时, 所带动的这个“剪切错动带”的厚度会有所变化。当接触面比较光滑时, 这个错动带的厚度可能很小, 但也未必等于 0。因此, 我们研究接触面不能仅局限于接触的界面上, 而应该研究这个“剪切错动带”的特性。即应把接触面看作是一个“剪切错动带”, 而不仅仅是一个“面”。

2.1 接触面错动位移和剪切位移

如图 1 所示, 接触面相对位移

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (1)$$

其中 δ_1 为接触面错动所产生的位移; δ_2 为接触面“剪切错动带”内剪切变形所产生的位移。

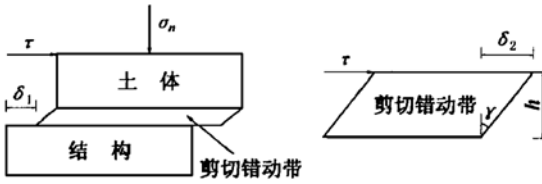


图1 接触面剪切错动带
Fig.1 The sliding zone at interface

若通过试验,在不同的剪应力 τ 下,能分别测得 δ_1, δ_2 ,就可较好地模拟接触面的变形。

鉴于此,本文利用单剪试验进行接触面的研究。由于单剪仪利用一系列光滑、厚度很薄的钢环代替了直剪仪的上盒,这就使最后剪破面的位置不再固定。在剪切过程中,单剪试验通过这一系列钢环之间的相互错动,体现了试样本身的剪切变形,从而区分了接触面的错动变形 δ_1 和剪切变形 δ_2 。

如图1(b)所示,通过单剪试验,在不同的剪应力 τ 下可以测得 δ_2, h ,则由剪应变

$$\gamma = \frac{\delta_2}{h} \quad (2)$$

就能建立 $\tau - \gamma$ 关系曲线。这种 $\tau - \gamma$ 关系较好地体现了接触面“剪切错动带”的剪切变形特征。

根据学者 Kishida 利用单剪仪对砂土与钢块接触面变形的研究结果^[6],可以看到,当剪应力 τ 小于接触面的抗剪强度 τ_f 时,由接触面错动产生的位移 δ_1 非常之小,它远小于剪切变形产生的位移 δ_2 。这用常规直剪试验是无法得到的,但与殷宗泽等人的大尺寸直剪试验结果较为一致:对于接触面界面上的一点来说,当 $\tau < \tau_f$ 时,该点无相对位移。

因此,研究接触面的变形特性时,在剪应力 τ 达到接触面的抗剪强度 τ_f 以前,可以近似地认为接触面相对位移 $\delta \approx \delta_2$ 。也就是说,在接触面未剪破前,我们只需找出“剪切错动带”内剪应力与剪应变之间的关系 ($\tau - \gamma$ 关系)。

2.2 接触面变形特性的单剪试验

试验装置如图2所示。笔者共进行了三组试验,即土-混凝土接触面,土-硬塑料接触面,砂-土工布接触面。试样装在一组叠起的光滑圆环中,圆环内径为7.27cm。本试验共使用了13只圆环,每只圆环厚度为2.03mm,因此试样高度为2.64cm。

本仪器共使用了3只百分表,分别安装在下盒、第一个圆环及A点,分别量测水平位移 δ_c (下盒)、 δ_b 及

δ_a ,如图2所示。

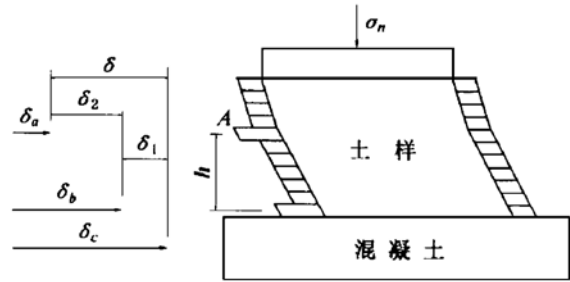


图2 接触面单剪试验装置示意图

Fig.2 Schematic of simple shear apparatus

在剪切过程中,开始时整个试样保持着较一致的剪应变,试样均匀地错动。但当切向应力较大时,试样明显出现一个拐点A,将试样分为一个大剪应变区 and 一个小剪应变区两部分,如图3所示。我们认为,其中的大剪应变区就是所谓的接触面“剪切错动带”,它是由于接触面和土体之间具有一定的咬合力,从而带动周围一定的土体而形成的。它与周围土体(小剪应变区)的变形特性明显不同,所体现的正是接触面的特性。其厚度 h 主要取决于接触面的粗糙程度,两侧的材料性质等体现接触面性质的因素。

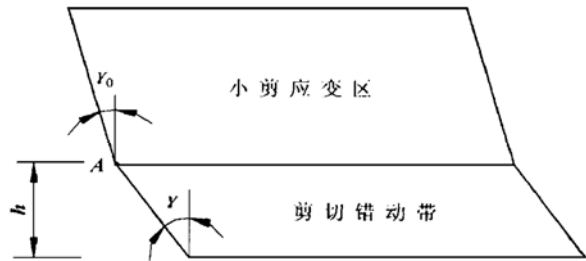


图3 试样变形状态示意图

Fig.3 Deformation of sample

为了确定这个“剪切错动带”的厚度 h ,对于每组不同的接触面材料,可先进行一组预试验,以确定点A的位置,并在此处安放百分表。

2.3 “剪切错动带”内的 $\tau - \gamma$ 关系曲线

如图2所示,“剪切错动带”内的剪应变

$$\gamma = \frac{\delta_b - \delta_a}{h} \quad (3)$$

在某一个恒定的法向应力 σ_n 下,根据每级剪应力 τ 作用下所产生的剪应变 γ ,点绘出 $\frac{\gamma}{\tau} - \gamma$ 关系曲线,如图

4所示。可以看出 $\frac{\gamma}{\tau} - \gamma$ 之间有很好的直线关系

$$\frac{\gamma}{\tau} = a + b\gamma \quad (4)$$

上式可以写成

$$\tau = \frac{\gamma}{a + b\gamma} \quad (5)$$

也就是说,“剪切错动带”内剪应力 τ 与剪应变 γ

之间有很好的双曲线关系。在不同的法向应力 σ_n 下, 根据其中的两组试验数据: 土 - 混凝土接触面和砂 - 土工布接触面, 绘出的 $\tau - \gamma$ 关系曲线, 如图 5 所示。可以看出, 它们之间都成较好的双曲线关系。

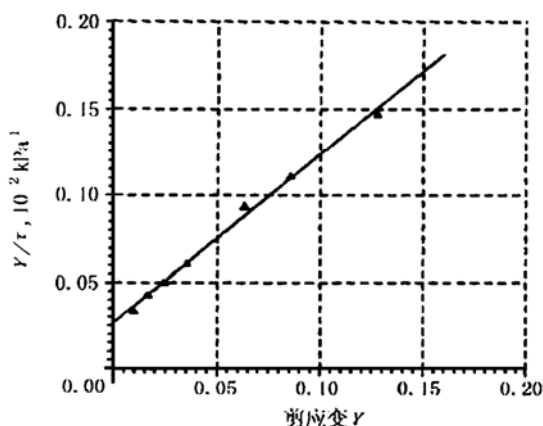
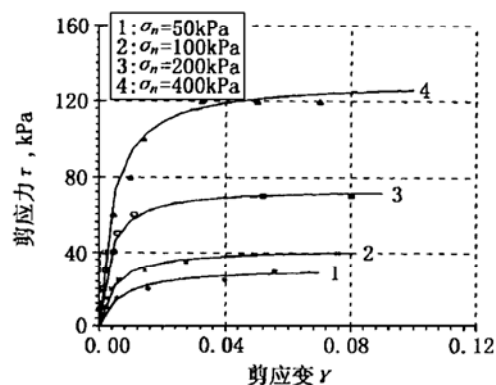
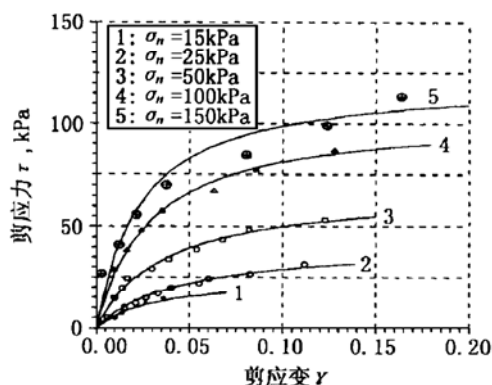


图 4 $\frac{\gamma}{\tau} - \gamma$ 关系曲线 (砂 - 土工布接触面, $\sigma_n = 100\text{kPa}$)

Fig.4 Relationship of $\frac{\gamma}{\tau} - \gamma$ (sand - geotextile interface)



a) 土 - 混凝土接触面



b) 砂 - 土工布接触面

图 5 接触面 $\tau - \gamma$ 关系的试验曲线

Fig.5 Relationship of $\tau - \gamma$ in the simple shear test

2.4 “剪切错动带”厚度 h 与薄层单元厚度 t

在进行有限元计算时, 由于本文提出了接触面代表的是一个“剪切错动带”, 而不仅仅是一个面。因此, 为了体现这个“剪切错动带”的变形特性, 接触面单元宜采用有厚度的薄层单元。

在确定薄层单元的厚度 t 时, 上述试验得到的“剪切错动带”的厚度 h , 为其提供了一种有效的参考。该厚度 h 有较明确的物理意义, 体现了接触面的变形特性, 取之作为薄单元的厚度是合理的。

但值得提出的是, 并不能简单地以“剪切错动带”的厚度 h 作为薄层单元的厚度 t 。因为, 若薄层单元的宽度 B 取值较大, 取单元厚度 $t = h$ 又较小时, 会造成单元刚度矩阵的变异, 从而在数学上带来较大的误差。因此, 虽然“剪切错动带”厚度 h 有明确的物理意义, 也仅能以此作为一种参考。可根据 Desai 提出的薄层单元厚度: $\frac{t}{B} = 0.01 - 0.1$ 的范围内取值^[7]。在此范围内, 可尽量选取适当的单元宽度 B , 使薄层单元的厚度 t 趋近于“剪切错动带”的厚度 h 。从而使其物理意义明确, 也不会造成太大的计算误差。

3 一种新接触面模型的建立

根据以上的试验研究, 将接触面的整个变形过程描述为: 当应力水平较低时, 接触面上的相对位移主要由“剪切错动带”内剪切变形引起; 而当应力水平趋近于 1.0 时, 接触面错动位移将占主导地位, 接触面产生塑性流动, 变形无限发展致使破坏。据此, 提出了一种新的接触面模型。

3.1 模型的提出

忽略切向和法向的耦合作用, 接触面上的应力应变关系式可写成

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_n \\ \Delta \gamma_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_n \\ \Delta \tau_m \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中 脚标 t 表示接触面切线方向, n 表示法线方向。

当应力水平 $S < 0.99$ (即 $\tau < 0.99\tau_f$) 时, 上式中 G_0 可由单剪试验的 $\tau - \gamma$ 关系曲线确定, 以反映剪切变形引起的接触面相对位移。由于接触面“剪切错动带”内 $\tau - \gamma$ 曲线呈很好的双曲线关系, 可在 $\tau - \gamma$ 双曲线模型的基础上推导出剪切模量 G_0 的计算公式。

当应力水平 $S \geq 0.99$ (即 $\tau \geq 0.99\tau_f$) 时, 接触面错动变形上升为主导地位。可令 G_0 为一很小的值, 如令 $G_0 = 5\text{kPa}$, 以模拟其变形无限发展。

综上所述, 剪切模量 G_0 的确定: 当 $S < 0.99$ 时, 采用 $\tau - \gamma$ 双曲线模型; 当 $S \geq 0.99$ 时, 采用塑性流动模型。

3.2 剪切模量 G_0

根据 $\tau - \gamma$ 双曲线模型, 可以推导出剪切模量 G_0 的计算公式。由

$$G_0 = \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \quad (7)$$

利用式 4), 5), 得

$$G_0 = \frac{1}{a} (1 - b\tau)^2 \quad (8)$$

式中 参数 a 表示 $\tau - \gamma$ 曲线初始斜率的倒数, 即 $a = 1/G_i$ 。试验表明, G_i 随法向应力 σ_n 变化。如果在双对数纸上点绘 $\lg(G_i/p_a)$ 和 $\lg(\sigma_n/p_a)$ 的关系, 则近似地为一曲线^[8]。直线的截距为 k , 斜率为 n 。于是有

$$G_i = kp_a \left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right)^n \quad (9)$$

由式 4) 可见, 当 $\gamma \rightarrow \infty$ 时, $b = 1/\tau_{\gamma \rightarrow \infty} = 1/\tau_u$ 。这里用 τ_u 表示当 $\gamma \rightarrow \infty$ 时 τ 的值, 也就是 τ 的渐近值。实际上, γ 不可能趋向无穷大, 在达到一定值后试样就破坏了, 这时的破坏剪应力为 τ_f , 它总是小于 τ_u 。令 $R_f = \tau_f/\tau_u$, R_f 即破坏比。

将 a, b 及 R_f 代入式 8), 得

$$G_0 = (1 - R_f \frac{\tau}{\tau_f})^2 G_i \quad (10)$$

式中 τ/τ_f 即应力水平 S 。又破坏剪应力为

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (11)$$

代入式 10), 可推得薄层单元的剪切模量为

$$G_0 = (1 - R_f \frac{\tau}{c + \sigma_n \tan \varphi})^2 kp_a \left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right)^n \quad (12)$$

式中 p_a 为大气压力; c, φ 为接触面的凝聚力和摩擦角; R_f 为破坏比; k, n 为参数。

可以发现, 式 12) 给出的接触面剪切模量的计算公式与 Goodman 提出的切向刚度公式形式相似, 但剪切模量包含了薄层单元的厚度 t 。通过前述的试验原理可知, 式 12) 中参数 k, n 体现了接触面“剪切错动带”内的变形特点, 是根据 $\tau - \gamma$ 关系曲线得出的, 它们与 Goodman 提出的参数具有不同的物理意义。另外, 由单剪试验所得到的参数 c, φ, R_f 与常规直剪试验得出的也有所不同。

4 算 例

采用本文所提出的接触面模型, 笔者编制了有限元程序。为了检验该模型的合理性, 对基础与地基相互作用问题进行了平面有限元计算。同时还对采用 Goodman 单元、殷宗泽等人提出的接触面模型, 进行了比较计算、分析。

有限元计算网格示意图, 如图 6 所示。基础底面下设有一排接触面单元。基础顶面作用有竖向荷载 $q = 100 \text{ kN/m}^2$, 基础侧面的水平荷载逐级递增, 每级 $\Delta p = 10 \text{ kN/m}^2$ 。

假定地基土为均匀的线弹性体, 弹性模量 $E = 15000 \text{ kN/m}^2$, 泊松比 $\nu = 0.22$; 并且在计算过程中不考虑土体本身的自重。

水平力 $p = 10 \text{ kN/m}^2$ 时, 采用本文提出的接触面模型, 计算所得接触面上的剪应力分布如表 1 所示。表中的理论解为接触面单元形心处剪应力的弹性力学解; 表中的 x 表示至基础左端点 A 的距离。由表 1 可见, 采用本文提出的模型, 较好地反映了接触面上的剪应力分布。

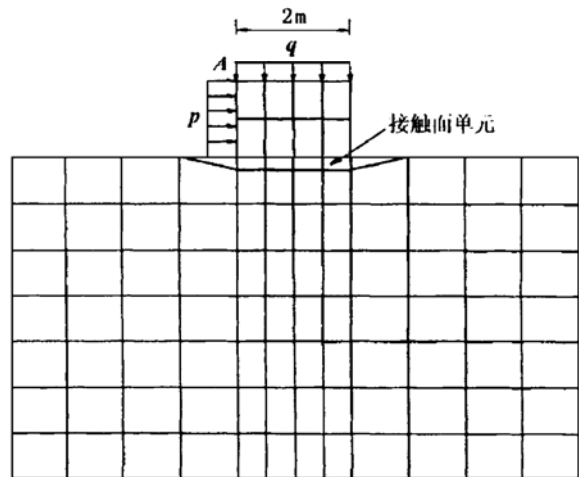


图 6 有限元计算网格示意图

Fig. 6 Finite element mesh

表 1 接触面上剪应力计算结果比较 (kN/m²)

Table 1 Comparison of shear stress at interface (kN/m²)

位置 (m)	$x = 0.25$	$x = 0.75$	$x = 1.25$	$x = 1.75$
理论解	8.97	9.64	9.68	9.59
有限元	8.16	10.59	10.23	9.36

分别采用几种接触面模型, 所得沿接触面方向相对位移的计算结果如图 7 所示, 图中横坐标方向沿基础底面, 坐标原点为基础左端点, 2.0m 处即为基础右端点。图中曲线 1 为采用 Goodman 单元的计算结果; 曲线 2 是采用本文所提出的接触面模型; 曲线 3 是采用殷宗泽等人提出的有厚度接触面模型^[5]。

由图 7 可见, 采用本文所提出的接触面模型, 计算出的相对位移小于采用 Goodman 单元的计算结果。这是由于采用 Goodman 单元进行计算时, 其计算参数是根据 $\tau - \omega_s$ 曲线确定的, 而其中的 ω_s 实际上包括接触面上的错动位移和试样本身的压缩两部分。当应力水平 S 小于 1 时, 试样本身的压缩占主导部分, 这种压缩体现的是试样边缘部分的总压缩量, 它一般比较大, 因此计算出的相对位移偏大。采用殷宗泽等人提出的模型, 当应力水平较低时, 接触面单元实质上作为普通实体单元处理, 计算出的相对位移仅仅是普通小厚度单元上下两节点计算位移值之差, 因此得到的结果往往偏小且计算误差较大。采用本文所提出的模型, 在较低应力水平下, 反映了“剪切错动带”的剪切变形, 计算曲线 2 介于曲线 1, 3 之间是较为合理的。

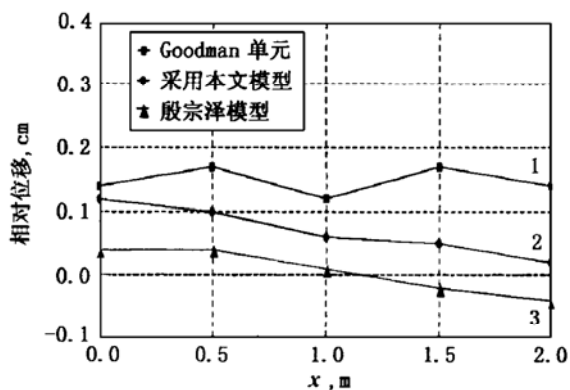


图7 接触面相对位移 较低应力水平)

Fig.7 Relative displacement at interface (low stress level)

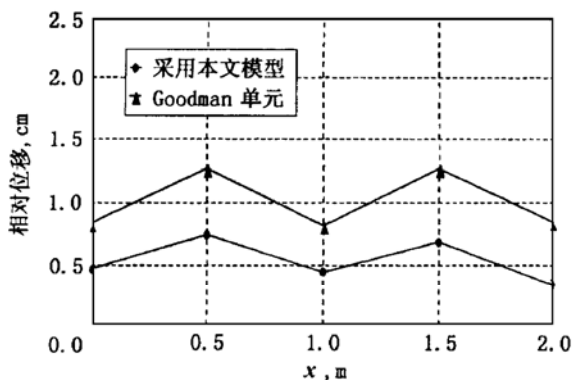


图8 接触面相对位移 高应力水平)

Fig.8 Relative displacement at interface (high stress level)

另外,由图7可见,采用 Goodman 单元计算出的相对位移沿接触面分布趋于均匀;而采用本文所提出的模型和殷宗泽等人提出的模型,计算出的相对位移明显靠基础左端较大,在基础右侧较小。这是由于水平力 p 作用在基础左侧面上,当应力水平较低时,它反映了剪应力从左到右传递,相对位移从大到小的渐变过程。当应力水平 S 接近 1 时,接触面错动变形上升至主导地位,采用本文所提出的模型,计算相对位移亦逐渐趋向于均匀,如图8所示。应力水平 S 接近 1 时,由于接触面剪切模量 G_0 取一任意小值,如 5.0kPa,

而相邻单元的剪切模量一般很大,致使形成的刚度矩阵性态不是很好,会带来一定的计算误差,从而导致计算出的接触面相对位移有一定程度上的波动。

总的来说,所提出的新的接触面模型,较好地反映了接触面上剪应力的分布和剪切变形的发展。

5 结 论

本文利用单剪试验来进行接触面变形特性的研究,进行了一系列的接触面单剪试验。根据接触面单剪试验的结果,提出了错动位移和剪切位移的概念。在分析接触面变形发展过程的基础上,提出了“剪切错动带”的概念。试验结果得出,“剪切错动带”内剪应力 τ 和剪应变 γ 之间有很好的双曲线关系。

在此基础上,提出了一种新的接触面模型:当应力水平 $S < 0.99$ 时,采用 $\tau - \gamma$ 双曲线模型;当 $S \geq 0.99$ 时,采用塑性流动模型。并确定了模型的参数,以用于有限元计算。算例表明本文所提出的模型是有效和实用的。

参 考 文 献

- 1 Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior. Journ Soil Mech & Found Engrg Div, ASCE, 1971, 97 (12): 1657 ~ 1674.
- 2 Brandt J R T. Behavior of soil - concrete interfaces. Canada: The University of Alberta, 1985.
- 3 陈慧远. 摩擦接触面单元及其分析方法. 水利学报, 1985, 4): 44 ~ 50.
- 4 钱家欢, 詹美礼. 接触面剪切流变特性实验及分析. 见: 岩土与水工建筑物相互作用研究成果汇编. 南京: 河海大学, 1990. 228 ~ 234.
- 5 殷宗泽, 朱 泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及数学模拟. 岩土工程学报, 1994, 16 (1): 14 ~ 22.
- 6 Kishida H, Uesugi M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. Geotechnique, 1987, 37 (1): 45 ~ 52.
- 7 Desai C S, et al. Thin layer element for interfaces and joints. Int Journ for Num & Anal Meth in Geomech, 1984, 8 (1): 19 ~ 43.
- 8 张冬霖. 接触面薄层单元的研究及其应用 [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 1997.