

土与结构相互作用力学 特性研究

夏红春 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

土与结构相互作用力学特性研究

夏红春 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

土体与结构物的相互作用问题,是土力学、结构力学及计算力学等多学科交叉性研究课题,也是当代力学领域众多理论与技术热点的前沿性研究课题,长期以来一直受到国内外学者的高度重视与广泛研究。本书通过物理实验、数值模拟及理论分析等手段,对土与结构物相互作用的接触面及界面层的力学特性进行了较为系统研究。结果表明:在高应力条件下,界面层内土体存在“弱化效应”,破坏在界面层内发生,而在低应力条件下,接触面处的抗剪强度低于界面层中土体强度,界面层存在“强化效应”,破坏发生在接触面处,分别建立了不同应力条件下土—结构物接触面本构模型。

本书可作为力学、材料、交通及土木等专业的大学本科和研究生,以及相关的工程技术和实验研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土与结构相互作用力学特性研究/夏红春著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2016.11

ISBN 978-7-5646-3349-3

I. ①土… II. ①夏… III. ①岩土动力学—研究

IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288765 号

书 名 土与结构相互作用力学特性研究

著 者 夏红春

责任编辑 于世连

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 225 千字

版次印次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价 50.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

土是自然历史的产物。所有的建(构)筑物,均坐落在地球表面的地层上。除少数直接坐落在岩层上外,大部分坐落在土层上。无论在建(构)筑物的建造期间,还是在其使用过程中,均不可避免地与土接触,两者之间必然发生相互作用。因此,土与结构的相互作用问题是岩土工程中普遍存在的力学问题,长期以来一直受到国内外学者的高度重视,并对其进行了广泛研究。

对土与结构相互作用问题的研究一般采用三种方法:物理试验、数值仿真以及理论分析。物理试验可分为原位试验(有时也称现场试验)与室内试验。原位试验可以减少试验前对岩土体的扰动,避免了由于扰动对试验结果的影响,试验结果更接近工程实践的实际情况。但原位试验需要大量的人力、物力和财力。而且原位试验对应的试验条件(如边界条件)比较复杂,从而给理论分析计算带来了困难,许多情况下不得不进行某些理想化的假设才能进行计算分析。而室内试验可以根据研究的目的进行各种理想条件下的控制试验,从而较为全面地分析各因素对试验结果的影响,在一定程度上反而更能满足理论分析计算的要求。因此,原位试验和室内试验具有各自的特点与优势,不能相互取代。为了较系统地研究法向应力、剪切速度、结构面粗糙度以及土性等因素对土与结构相互作用的影响,本书主要进行室内试验,同时利用 20 世纪 70 年代发展起来的二维离散元程序 PFC^{2D} 对物理试验结果做进一步的分析与验证,以期揭示宏观表象的内在机理。借用岩石统计损伤本构模型的思想 and 早期的非局部理论建立了相对低应力条件下基于强度随机分布特性的土-结构接触面统计损伤本构模型以及基于应变梯度塑性理论的土-结构接触面本构模型。基于高应力条件下土-结构接触面的剪切应力-剪切位移相互关系的物理与数值仿真试验结果,建立了双曲线型非线性弹性本构模型。

书中的某些观点和方法,仅是作者的一孔之见,因此不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正,不胜感谢!

感谢所有参考文献的作者,正是因为有了他们前期丰富翔实的成果,才使本人的研究向前走了微小的一步!感谢中国矿业大学的周国庆教授多年来对作者生活上的关心与帮助、科研上的点拨与鞭策以及为人之道的启迪与教诲!

周教授的言传身教将是作者一生收藏的最珍贵的精神财富!

特别感谢家人多年来对作者学业与工作的支持与付出! 作者还要对国家自然科学基金委和中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室表示衷心的感谢,正是他们的资助使本书得以成稿,特此鸣谢! 另外,丁胜男女士和董崇先生分别对书中的文字以及图表做了大量工作,于世连编辑认真细致地校核了书稿,再此一并致谢!

作 者

2016 年夏于徐州美的城

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究现状	4
第 2 章 试验系统与试验方法	26
2.1 引言	26
2.2 试验系统	27
2.3 试验材料的选取	31
2.4 结构面的选取及粗糙度的确定	32
2.5 法向应力的选取	38
2.6 剪切速率的选择	38
2.7 试验方法	39
2.8 本章小结	40
第 3 章 土-结构接触面剪切力学特性的试验研究	42
3.1 试验结果的基本分析	42
3.2 土-结构接触面剪切力学特性的影响因素分析	48
3.3 试样微观结构变化结果的基本分析	56
3.4 土-结构接触面强度发挥机理分析	59
3.5 本章小结	69
第 4 章 土-结构界面层效应的试验研究	71
4.1 试验方法	71
4.2 结构面周围土体剪切力学特性试验结果的基本分析	71
4.3 土-结构界面层效应分析	87
4.4 本章小结	89
第 5 章 土-结构相互作用的数值试验研究	90
5.1 离散单元法的基本原理	90
5.2 数值试验的实现	93
5.3 试验结果初步分析	96
5.4 砂-结构接触面力学特性的机理分析	98
5.5 本章小结	101

第 6 章 土-结构接触面与界面层力学特性的理论研究..... 103

6.1 土-结构界面层效应的时、空演化规律..... 103

6.2 土-结构接触面本构模型研究 104

6.3 本章小结 122

参考文献..... 125

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

土体与结构物的相互作用问题,是一个涉及土力学、结构力学、地震工程学、计算力学及计算机技术等众多学科的交叉性研究课题,也是一个涉及非线性、大变形、接触面、局部不连续等当代力学领域众多理论与技术热点的前沿性研究课题,同时也是一个与水利、建筑、市政、军事、电力以及交通等众多产业部门的工程建设质量和安全性密切相关的实用性研究课题。因而,长期以来这个课题一直受到国内外相关单位和学者的高度重视和广泛研究。

由于土体和结构物之间接触面两边材料的变形及强度特性相差悬殊,变形模量较大的结构物表面对结构面附近土体造成约束而使其力学特性发生变化,使其发生既不同于土体又不同于结构材料的力学响应。因此,正确描述荷载作用下土与结构接触面的力学特性,是合理评价实际工程中大量存在的与土体相接触的结构的受力和变形性态的核心问题之一,在土与结构相互作用分析理论中占有重要地位。

21 世纪是智能绿色建筑、高速交通、太空遨游等各学科高新技术融会贯通的土木工程新时代。人口增加、土地减少,要保持经济的可持续发展,向海洋及地下要资源、向高空及地下索空间都是当今世界的热点,为此,将不可避免地涉及结构与土体的相互作用问题,主要体现在以下几个方面。

(1) 交通工程

随着国民经济的快速发展,城市人口增加,交通量猛增,各大城市纷纷着手进行地下铁道的建设。据统计,仅我国就已有 40 余个城市已经或计划修建地铁轨道。另外,在公路、铁路穿越山岭时广泛采用隧道,截至 2013 年底,我国已有公路隧道 11 359 座,总长 9 606 km。进入新世纪以来,公路隧道年均增长率高达 20%,且有逐年增速加快的趋势。伴随着大规模铁路建设,截至 2013 年底,我国已有运营铁路隧道 11074 座,总长 8 939 km;在建铁路隧道 4 206 座,长度 7 795 km;已纳入规划的铁路隧道 4 600 座,总长约 1.06 万 km。围绕大型水利枢纽工程,我国已建成的各类水工隧道总长超过 1 万 km,在建及纳入规划的水工隧道总长超过 3 000 km。

(2) 军事工程

现代高技术战争对地下防护工程提出了更高的要求。地下防护工程主要的特点是“深”。早在 20 世纪 50 年代开始的冷战时期,美国在科罗拉多州斯普林市西南的夏延山构筑了深达 600~700 m 的北美防空司令部地下指挥中心,而苏联则相应地构建了一个庞大

而复杂的莫斯科地下指挥中心。20 世纪 90 年代以后随着钻地核武器和精确制导武器的发展,美国、俄罗斯对深地下防护工程的建设提出了更高的要求,计划筹建防护层厚度达 1 000~2 000 m 的超坚固地下指挥中心。

(3) 高空及地下空间的开发与利用

随着经济的快速发展和人口的急剧增长,城市用地更加紧张,交通更加拥挤。这就迫使房屋建筑和道路交通向高空和地下发展,高层建筑几乎成了现代化城市的象征,如美国芝加哥高达 443 m 的 Sears 大厦、马来西亚高 450 m 的吉隆坡双塔楼以及我国高达 632 m 的上海中心大厦等。人类在提高地面建筑高度以增加生存空间的同时,也将研究重点放在了开发地下空间。地下空间不仅是人防的重要组成部分,而且可以用作许多物品的地下贮存库,如地下贮粮、贮油以及贮气等。地下空间的利用不仅能节省大量的地表空间,更重要的是它的经济性和有效性。例如,20 世纪 80 年代末期挪威筹建一个发电量为 160 万 kW 的气体燃料电站,其天然气输送管道及大型贮气库均位于海平面以下 1 000 余米深。

(4) 基础工程

随着城市建设、市政改造以及交通旅游事业等的发展,桩基成为高层建筑、公路桥梁、港口码头等工程建设中的主要基础型式,用桩数量逐年增加。据统计,目前我国年用桩量就高达百万根以上,从而使桩型与成桩技术得到了丰富与发展。尤其是最近 20 多年来,海洋石油的开发,促成了大型石油平台的建造;海上巨型桥梁和深水码头的建设以及高层建筑的发展,均使桩基的直径与深度往更大、更深的方向发展。目前国内高层建筑中应用的灌注桩直径已达 2.5 m 以上,桩长超过 90 m;桥梁灌注桩直径达 4 m 以上,桩长超过 100 m。欧美及日本的钢管桩长度已达 100 m 以上,直径超过了 2.5 m。我国上海金茂大厦钢管桩尖深度达地面以下 80 余米。

(5) 资源开采

随着经济的高速发展,人们对于资源的需求量也越来越大,煤炭和石油作为主要能源在我国的经济建设中发挥了重要作用。而采油平台以及煤炭开采的主要通道(井筒)的稳定及安全性长期以来一直是广大科技工作者研究的重点。

煤炭是我国的第一能源,是国民经济发展的动力。由于大多煤系地层上覆盖有深厚的冲积表土层,故矿井多采用立井开拓方式。井筒,作为矿工工作以及煤炭运输的主要通道,其安全及稳定性在煤矿生产中无疑具有重要地位。但是自 20 世纪 80 年代以来,我国华东地区的淮北、大屯、徐州、淮南以及兖州等矿区在深厚表土层中用冻结法和钻井法施工的立井井筒,先后有数十个发生井壁横向破裂灾害,严重影响了矿井的正常生产,甚至引发安全事故,造成巨大的经济损失。

对于井壁破裂的机理,岩土工程界、采矿界以及相关领域的专家学者提出了不同的假说,归纳起来主要有:竖直附加力说、施工质量说、构造运动说、地震说,以及渗流变形说等。另外,还有许多学者对造成井壁破裂的因素提出了其他观点,如竖井三因素综合破坏机理、表土与基岩交界处井筒的纵向弯曲机理以及水平力与竖向力的共同作用机理等。

尽管对井壁破裂机理提出了各种假说,但竖直附加力说得到了大多数专家及学者的认可,而且井壁破坏性态的试验研究结果以及淮北、徐州等矿区大量原型实测数据都证实了井壁竖直附加力的存在及其对井壁破坏的重要影响。

竖直附加力说认为:特殊地层含水层水位因采矿或非采矿活动而下降,含水层的有效应

力增大,产生固结压缩,引起上覆土体下沉。土体在下沉过程中,由于接触摩擦对井壁产生向下的竖直附加力,原井筒井壁设计时未认识也未考虑此力,混凝土井壁不能承受巨大的竖直附加力而破坏,附加力是导致众多井筒井壁发生破裂的主要原因。崔广心、周国庆、杨维好、虞咸祥等为了揭示井壁的破坏机理,采用室内大型模拟试验台,模拟研究深厚表土层与井壁(结构物)之间的相互作用,提出了著名的“竖直附加力理论”。该理论指出,井壁不只承受水平地压,还要承受自重荷载(含井筒内装备自重)和竖直附加力,井壁受力不是静态的二维(平面应变)问题,而是动态的三维空间问题。另外,黄定华、苏立凡等对井壁破裂机理也都提出了自己的观点。

迄今为止,对井壁竖直附加力的研究结果要点可归纳如下:

(1) 特殊地层含水层疏排水必然引起井壁受竖直附加力;附加力随着含水层水位的下降而增长,并且与土层性质有关;附加力是导致深厚表土层中立井井壁破裂的主要原因。

(2) 含水层疏排水固结压缩量的大小是决定附加力大小的主要因素。附加力与含水层的固结压应变成正比,即与水压降成正比。

(3) 附加力沿井深呈非线性的递增关系,越靠近下部含水层与上覆土层的交接面,附加力的总值就越大。

(4) 附加力与疏排水层的厚度成正变关系,在其他条件不变的情况下,疏排水层越厚则附加力越大。

(5) 附加力的大小与井筒穿过的土层性质有关,随土层中黏土颗粒含量的增加而减小。

(6) 附加力的增长率与含水层疏排水速率密切相关,疏排水速率越大,附加力的增长速率就越大。

由于疏排水导致含水层压缩是产生附加力的根源,因此,注浆加固含水层法是解决井壁破裂问题的比较根本、积极的措施,在破裂井壁的治理中得到了广泛应用。现在,以水泥为主要注浆材料的注浆技术已广泛应用于建筑基础、交通、水利工程以及矿山建设工程中。例如,使用压密注浆法(即在软土地层中适当位置布设多个注浆孔(管),并有计划地注进大量的髙粘度浆液(或快速凝胶的浆液))使整个地表压密或抬起,或采用高喷注浆法使上面的建筑物加固或抬升等。作为一种地基处理和加固的手段,国内外学者对注浆技术进行了大量的研究,取得了丰硕的成果。周国庆通过理论分析、数值计算和模型试验对特殊地层含水层注浆加固法减小井壁竖直附加力的机理、含水层加固后井壁附加力及其折减率的数值及变化规律进行了深入研究,获得了在土性、井深、含水层疏水降压过程及含水层加固参数等诸多因素中影响井壁附加力折减率的关键因素;给出了井壁附加力折减率的确定原则和计算方法;提出了含水层“最佳加固距”及含水层注浆加固“抑制、缓释双重效应”概念。由此可以看出,尽管对井壁的破裂机理及防治方法进行了大量的研究并已经取得了一定程度的共识,但对于土层(尤其是深部土层)压缩沉降及注浆抬升过程中土层和结构物接触面间的相互作用机理以及影响因素等尚缺乏深入、系统的研究。

1.1.2 研究意义

深入研究土和结构物的相互作用尤其是深部土一结构接触面的力学特性,对于交通运输、建筑工程、资源开采乃至国防设施等稳定性的设计、预测、预报以及预防,无疑具有非常重要的意义。

1.2 研究现状

1.2.1 土-结构接触面力学特性的理论研究

土-结构接触面力学特性的研究,主要包含两个方面:一是接触面的本构关系,主要是指接触面上相互作用力或应力的法向与切向分量和接触面上相对位移的法向与切向分量之间的相互关系,目前一般着重讨论剪应力 τ 与相对剪切位移 Δs 之间的关系;二是指接触面单元,它是有限元计算中用以模拟接触面力学特性的一种特殊单元。

具有代表性的接触面应力应变关系主要有以下几种:

(1) 双曲线模型

1971年,Clough和Duncan等在盒式直剪仪上研究了砂与光滑混凝土接触面的剪应力一位移关系,提出平均剪应力 τ 与切向位移 Δs 之间关系的双曲线模式,如图 1-1(a)所示,即有:

$$\tau = \frac{\Delta s}{a + b \cdot \Delta s} \quad (1-1)$$

式中 a, b ——反映接触面性质的参数。

将式(1-1)进行变换,可得:

$$\frac{\Delta s}{\tau} = a + b \cdot \Delta s \quad (1-2)$$

式中 a, b ——直线的截距和斜率,如图 1-1(b)所示。

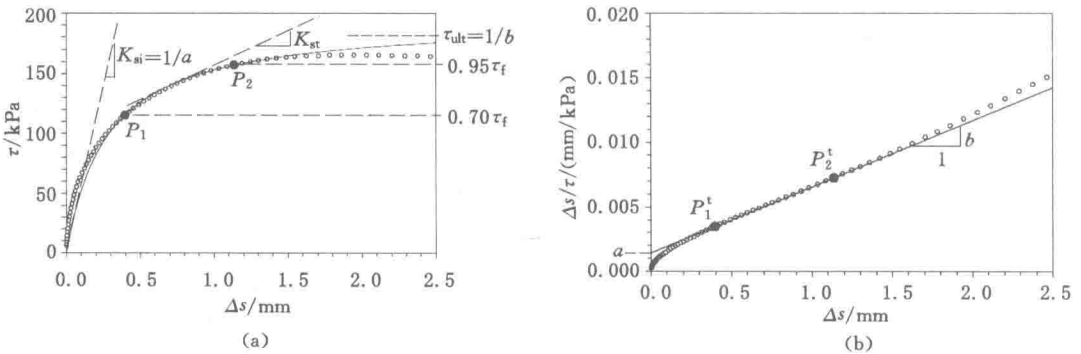


图 1-1 Clough 和 Duncan 双曲线模型

当剪切位移很小时,由式(1-1)可得初始剪切模量 K_{si} :

$$K_{si} = \left(\frac{\tau}{\Delta s} \right)_{\Delta s \rightarrow 0} = \frac{1}{a} \quad (1-3)$$

式中, a 即为初始剪切模量的倒数。

而当剪切位移很大时,由式(1-1)可得剪切应力的极限值 τ_{ult} :

$$\tau_{ult} = (\tau_{ult})_{\Delta s \rightarrow \infty} = \frac{1}{b} \quad (1-4)$$

由此可以看出 b 为极限剪切应力的倒数。

Duncan 和 Chang 发现,当剪切应变值很小或者很大时,图 1-1(b)所表示的剪切应力均偏离直线,而在(0.70~0.95) τ_f (τ_f 为破坏时的剪切应力)时[分别对应图 1-1(a)双曲线上的 P_1 和 P_2 点及图 1-1(b)直线上的 P'_1 和 P'_2 点],试验数据和双曲线吻合较好。

Duncan-Chang 模型的一个主要优点是双曲线参数 a 、 b 具有明确的物理意义,但是极限剪应力 τ_{ult} 往往大于接触面的实际破坏强度 τ_f ,为了解决这个问题,Duncan 和 Chang 定义了破坏比 R_f :

$$R_f = \frac{\tau_f}{\tau_{ult}} \quad (1-5)$$

Duncan 和 Chang 建议接触面初始刚度可以按下式计算:

$$K_{si} = KP_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n \quad (1-6)$$

式中 K, n ——试验常数;

P_a ——大气压力;

σ_n ——法向应力。

通过不同法向应力条件下的试验结果,可以求得每一法向应力条件下的双曲线参数 a 以及初始刚度 K_{si} ,然后通过式(1-6)求得 n 及 K 值。

如果不考虑接触面上的黏聚力,接触面的破坏强度 τ_f 可以表示为:

$$\tau_f = \sigma_n \cdot \tan \delta \quad (1-7)$$

式中, δ 为接触面摩擦角,可以通过不同法向应力条件下的接触面剪切试验得到。

将式(1-5)、式(1-6)及式(1-7)代入式(1-1)可以得到如下双曲线表达式:

$$\tau = \frac{\Delta s}{\frac{1}{KP_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n} + \frac{R_f \cdot \Delta s}{\sigma_n \cdot \tan \delta}} \quad (1-8)$$

式中各符号的意义同前。

在增量计算中,通过对式(1-8)进行微分可以得到任意点的切线刚度,其公式为:

$$K_{st} = KP_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n \cdot \left(1 - \frac{R_f \cdot \tau}{\sigma_n \cdot \tan \delta} \right)^2 \quad (1-9)$$

定义应力水平 SL 为:

$$SL = \frac{\tau}{\sigma_n \cdot \tan \delta} \quad (1-10)$$

则切线刚度 K_{st} 可以用下式表示:

$$K_{st} = KP_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n (1 - R_f \cdot SL)^2 \quad (1-11)$$

Duncan-Chang 双曲线模型的优点主要是:① 接触面上的非线性剪切应力一位移关系可以通过式(1-8)和式(1-11)很好地描述出来;② 该方法在土-结构接触面的计算中很容易实现。

吴军帅等利用改装的振动单剪仪进行的接触面的周期剪切试验表明,接触面上的双曲线模型也适用于循环应力作用情况,并建立了接触面的剪切劲度与土的剪切模量之间的关系式。同济大学对粉土-混凝土和淤泥质黏土-混凝土接触面进行了直剪试验,试验表明, $\tau - \Delta s$ 关系可用双曲线模拟。

由于双曲线模型的参数可通过常规直剪试验较简便地确定,长期以来该本构模型得到了广泛的应用。

(2) Brandt 和陈慧远的弹塑性模型

Brandt 根据室内试验及一座挡土墙的实测资料,提出接触面剪应力—位移关系可简化成两条直线,即:

$$\begin{cases} (\tau/\sigma) = w_s \tan \varphi_i & w_s < w_{s0} \\ (\tau/\sigma) = (\tau/\sigma)_0 + (w_s - w_{s0}) \tan \varphi_l & w_s \geq w_{s0} \end{cases} \quad (1-12)$$

式中的符号意义见图 1-2。

陈慧远于 1985 年提出接触面上剪应力与剪切位移可简化成如下的弹塑性曲线关系,如图 1-3 所示:

$$\begin{cases} \tau = k_s w_s & \tau < f \sigma_n \\ w_s \geq \tau/k_s & \tau \geq f \sigma_n \end{cases} \quad (1-13)$$

式中 f ——土料与墙面的摩擦系数;

σ_n ——接触面上的法向应力;

k_s ——剪切模量;

w_s ——剪切位移。

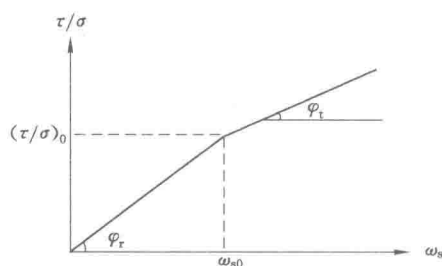


图 1-2 Brandt 弹塑性模型

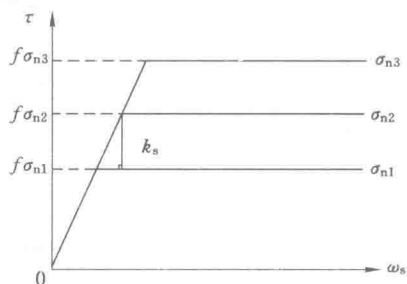


图 1-3 陈慧远弹塑性模型

陈慧远对于接触面应力位移关系的非线性以及土料应力应变的非线性问题提出了双重迭代求解方法,能较客观地反映接触面特性,但该模型认为破坏前接触面上的应力—应变关系服从弹性性质,且没有考虑单元的厚度。

(3) 修正的 R—O 模型

Desai 提出,在循环荷载作用下,土与混凝土接触面的剪应力—位移关系可用修正的 Ramberg-Osgood 模式表示。骨干曲线的关系式为:

$$u_r = u_y \left(\frac{\tau}{\delta K_i u_y} \right) \left(1 + \alpha \cdot \left| \frac{\tau}{\delta K_i u_y} \right|^{R-1} \right) \quad (1-14)$$

卸荷与再加荷曲线的关系式为:

$$u_r \pm u_i = u_y \left(\frac{\tau - \tau_i}{\delta K_i u_y} \right) \cdot \left(1 + \frac{2\alpha}{2^R} \left| \frac{\tau - \tau_i}{\delta K_i u_y} \right|^{R-1} \right) \quad (1-15)$$

式中 u_y ——参考相对位移;

u_i ——应力转向点(τ_i)处的相对位移;

K_i ——初始剪切强度;

R, α ——反映接触面性质的参数;

δ ——循环指数, 定义为:

$$\delta = (K_t)_N / (K_t)_1 = (K_{ds})_N / (K_{ds})_1 = N^r \quad (1-16)$$

此处假定, 第 N 次和第 1 次循环的初始刚度之比等于其相应的割线刚度之比。

(4) 殷宗泽的刚塑性模型

殷宗泽认为 Clough 的双曲线模型是建立在直剪试验基础上的, 量测的相对位移 Δs 实际上是上下盒的相对错动, 是否能代表土样内部的变形是值得讨论的。对于两种刚性材料的接触, 如钢与混凝土, 或岩石与岩石, 剪切盒的位移与试件内部各点的位移是同步的, 即盒子的位移代表了试件的位移。但土是一种松散介质, 可以压缩和膨胀。因此剪切过程中盒子的位移和土体内部各点的位移并不同步。

为此, 殷宗泽等研制了一种带有“潜望镜”装置的特殊大尺寸直剪仪, 对剪切过程中土体内部的变形情况进行了直接观测。其发现, 土与混凝土接触面上的相对位移并不与上下剪切盒的错动同步, 接触面的破坏是一个由边缘向内部逐步发展的过程。由此提出了接触面错动变形的刚塑性模型。他认为接触面的土体变形可分为两部分: 一是与滑动破坏不相关联的土体基本变形, 以 $\{\Delta\epsilon\}^*$ 表示, 不管滑动发生与否都是存在的, 它与其他土体变形的单元一样; 二是破坏变形, 包括滑动破坏和拉裂破坏, 以 $\{\Delta\epsilon\}^*$ 表示。该模型很好地反映了接触面变形机理, 参数少且易于确定, 便于应用, 但不能反映接触面在达到抗剪强度前的应力应变关系的非线性、加工硬化和应变软化等特点, 也不能反映接触面的剪胀特性。

另外, 张冬霖、卢廷浩等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, 他们建立了接触面上法向刚度与切向刚度相耦合的非线性本构模型, 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。关安峰、高大钊推导了接触面三维黏弹塑性本构关系, 并将其与三维实体单元黏弹塑性本构关系耦合。栾茂田、武亚军将非线性弹性理论与弹塑性理论相结合, 提出了一种非线性弹性—理想塑性模型, 并推导建立了这种接触面单元的应力—应变关系和弹塑性系数矩阵。

Boulon 根据不同应力路径的土—结构接触面的力学特性, 提出用插值的方法建立了增量非线性接触面本构关系, 用于计算分析桩与桩侧土体的相互作用; Tejuchman 基于 Coss-erat 连续介质理论建立了土的本构模型, 用颗粒的平均粒径作为特征长度, 并考虑颗粒本身的转动力偶, 可以模拟等向硬化、软化和剪胀, 他认为剪切区厚度与有限元网格的粗细无关, 不需要专门的接触面单元来模拟接触面的力学特性; Frantziskonis 等和 Desai 提出了损伤状态的概念, 假定在力学、热、环境等作用下引起了材料微结构的扰动, 初始的原状材料由于扰动逐渐经过一个有意识的微结构的自我调节过程最后到完全损伤状态, 某一应力应变状态下的材料由两部分组成, 一部分为无损伤的原始材料, 符合弹塑性本构关系, 另一部分为损伤后的应力释放单元, 它遵循屈服强度为零的刚塑性本构关系, 即只能承受静水压力而不能承受剪应力, 并根据这一概念发展了接触面损伤本构模型; 胡黎明、张嘎基于类似的概念分别建立了描述粗糙砂土与结构接触面力学特性的损伤力学模型以及粗粒土与结构接触面弹塑性损伤本构模型。

接触面本构模型提出了很多种,但应用最为广泛的是 Clough 和 Duncan 提出的非线性弹性模型。其他的本构模型形式较为复杂,应用不便。

迄今为止,尚无一种接触面本构模型可以同时反映土与结构接触面的加工硬化和应变软化以及剪胀(剪缩)等特性。

1.2.2 土-结构接触面力学特性的数值模拟研究

目前研究土-结构相互作用的研究方法主要是采用整体数值分析法,该法能够综合考虑土体的非线性及多相系的瞬态问题。分析中的一个关键环节就是两者相互作用接触面上的接触问题,主要是在土-结构接触面上构造各种不同形式的接触面单元来模拟两者相互作用的力学行为。接触面单元最先由 Goodman、Taylor 和 Brekke 提出用于岩石裂隙的有限元计算中,该方法很快被 Clough 和 Duncan 用于挡土墙的土-结构接触面分析中。接触面单元的采用是对以往接触面处理方法的重大改进,在此之前的接触面处理都将接触面假定为两种比较极端的表面:要么完全粗糙,土和结构之间不发生滑动;要么土和结构之间绝对光滑,没有剪切应力。

根据接触面单元的厚度选择,接触面单元可以分为:无厚度接触面单元和具有一定厚度的薄层单元。

Goodman、Taylor 和 Brekke 提出的接触面单元经常被称为“无厚度接触面单元”,它是 4 节点无厚度单元,如图 1-4 所示。

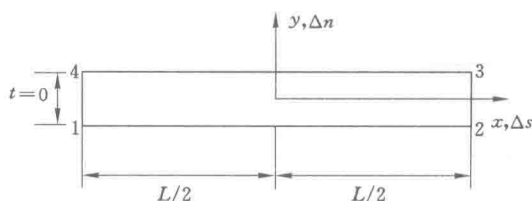


图 1-4 Goodman 接触面单元示意图

Goodman 接触面单元的主要思想可归纳为两点:一是无厚度的单元模型;二是特殊形式的单元应变定义以及与之相应的单元应力-应变本构假设。首先,为了模拟接触面上的位移不连续性,Goodman 等在 4 节点矩形单元的基础上去掉单元沿接触面法向的厚度值,使单元退化为两段接触的线元,单元的数值模型实质上即是两对“点号双编”的点偶;同时,单元的位移模式也降阶为仅沿接触面切向分别在上下接触线元上的插值形式。其次,与上述数值模型相适应,接触面单元的应变场,根据两段线元之间可能的相对变位,直观地定义成上下接触面间的位移差,即将单元的本构关系定义为:

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{Bmatrix} \quad (1-17)$$

式中, $\tau(\sigma)$ 分别为单元的切向(法向)的应力分量; $\Delta u(\Delta v)$ 为接触面间的切向(法向)位移差; k_s, k_n 分别为接触面元的切向和法向刚度系数,其中 k_n 的取值有很大的经验成分,并且在接触迭代求解中根据分离和嵌入的状态还有很大的人为任意性,而 k_s 则由两接触面间的直剪试验确定。

显然,Goodman 接触面元是对接触面接触行为的最简单、最直接的描述,因此其物理意

义明确、概念简单。但它不足之处是,接触迭代求解过程中数值病态问题严重、收敛困难,这与 k_n 的取值方法有关,因为首先 k_n 的初始取值就没有明确的物理依据,其次在非线性迭代分析过程中一旦出现接触面的相互嵌入时就要赋一个大值,而当接触面出现相互分离时又要赋一个小值。此外由于无厚度 Goodman 接触面单元数值模型本身实质上就是有限元网格中一类点号双编的接触点偶,且该单元的“应变场”即是这些接触点偶的相对位移场,只能模拟开裂和滑移两种接触状态,无法模拟接触面的闭合状态。

Desai 等认为接触面的力学特性由邻近接触面的一条狭窄的土带所控制,该土带和周围材料的性质不同,由此提出了薄层单元的概念。

接触面单元数值模型的核心问题之一就是单元内部位移场的描述或者说位移形函数的构造,因为它从根本上反映了接触面上的位移约束条件。如果认为无厚度接触面单元充分考虑了两相介质接触面间的位移不连续性,而薄层接触面单元则通过接触点偶(即接触面单元的节点)的位移来插值构造单元内部的位移场,认为两相介质接触面间的位移有某种连续性,甚至它的位移模式与其他的连续体单元没有任何区别,Desai 薄层接触面元数值模型实质上就是一般的连续体(等参数)单元,但它的应力应变向量定义却做了一些特殊处理。在一般的连续体单元数值模型基础上,要求单元的几何性状满足 $0.01 < t/B < 0.1$ (t 为薄层接触面元的厚度, B 则为单元长度),并且定义单元应变—位移几何关系为:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_n \quad \epsilon_s\}^T = \left\{ \frac{v}{t} \quad \frac{u}{t} \right\}^T \quad (1-18)$$

式中, ϵ_n, ϵ_s 分别为接触面单元内部法向和切向应变, v 和 u 分别为单元内部位移场沿接触面单元法向和切向的位移分量。增量形式的应力—应变关系定义为:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nt} & 0 \\ 0 & k_{st} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_n \\ d\epsilon_s \end{Bmatrix} \quad (1-19)$$

式中, $d\sigma_n$ 和 $d\tau_s$ 分别为接触面单元内部法向和切向应力, k_{nt} 和 k_{st} 分别为单元法向和切向的刚度系数。Desai 等关于切向刚度系数 k_{st} 的确定研究得较多,而对于法向刚度 k_{nt} 的确定仅做过一些讨论,认为与薄层接触面元材料的弹性模量 E 以及泊松比 ν 有关。

Desai 等提出的薄层接触面单元虽然部分克服了无厚度 Goodman 接触面单元在接触变形方面模拟的不足(即不能模拟法向闭合变形),但对单元的网格性状却有一定的要求,接触面单元厚度为 $0.01B \sim 0.1B$ (B 指单元长度),另外在理论上也存在一些交待尚不清楚的地方,比如没有阐明为什么取剪切模量、弹性模量和泊松比为三个独立参数以及薄层接触面单元法向刚度系数的取值依据和迭代过程中相应模量的计算,没有测定和反映法向和切向变形的耦合影响,模型未能客观描述薄层单元的实际应力—应变特征等。

殷宗泽等在深入探讨接触面变形特性的基础上,否定了接触面上剪应力与相对错动位移间的双曲线渐变关系,提出了接触面单元的刚—塑性本构模型,把普通连续体单元的应变模式,根据接触面的力学行为特征进行了恰当分解。他们认为应变分为两部分:一是土体的基本应变 $\{\Delta\epsilon\}'$,它与其他土体单元一样,不管滑动与否都是存在的;二是接触面接触应变 $\{\Delta\epsilon\}''$,只有当剪应力达到抗剪强度,发生滑动或接触受拉产生张拉破坏时才存在。因此该单元应力—应变关系的增量形式为:

$$\Delta \epsilon = \begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_n \\ \Delta \epsilon_s \\ \Delta \epsilon_{sn} \end{Bmatrix} = \{\Delta \epsilon\}' + \{\Delta \epsilon\}'' = \begin{bmatrix} c'_{11} & c'_{12} & c'_{13} \\ c'_{21} & c'_{22} + \frac{1}{E''} & c'_{23} \\ c'_{31} & c'_{32} & c'_{33} + \frac{1}{G''} \end{bmatrix} \{\Delta \sigma\} \quad (1-20)$$

式中 $\Delta \epsilon_n, \Delta \epsilon_s$ ——单元的法向、切向正应变；

$\Delta \epsilon_{sn}$ ——剪应变。

参数 E'', G'' 分别用来反映接触面的变形。若接触面发生受拉或滑动,则 E'' 和 G'' 都被赋一小值。

殷宗泽等建议的有厚度接触面单元在单元的本构假设、应变场的定义方面已经与普通单元的定义模式统一起来,数值模拟的途径也相应地变得更加理性化,但单元的几何性状仍然是一个对数值稳定性影响较大的因素,没有从根本上克服模型本身的几何性态问题,同时选择合适的厚度却又是保证分析精度的关键,还存在一方面希望厚度尽可能的小,另一方面厚度太小又会使单元性态不好的矛盾。

高俊合等利用研制的大型单剪仪,对细粒土进行了土—混凝土接触面单剪试验研究。从试验结果分析得到剪切破坏带及其厚度。针对土体在剪切带内既有沿接触面的错动滑移薄变形,又有自身剪切变形的双重变形机制,提出了接触面剪切滑移薄层单元及其本构关系,给出了其参数的确定方法,并通过有限元数值模拟,证明了所提出接触面单元和本构关系的合理性。

别小勇利用红外断层热扫描成像系统(英文简称 TTM System)对冻土中桩土界面的红外辐射温度场的升温区域进行了系统研究。他发现:冻土桩基界面在受力过程中,受冻土自身固有的蠕变性和温度升高的影响,形成了一个围绕桩基的具有一定厚度的弱化夹层。作者据此现象首次提出了“界面层”的概念,并对界面层的特性进行了较为系统的研究,获得了界面层的几何参数和温度参数对桩基承载性能及其稳定性的影响,并建立了考虑桩土界面层的非线性有限元计算分析模型。

研究表明,当法向应力较小时,地下结构与土体两者相互作用直至剪切破坏的滑动面都是在土体一侧内发生的,滑动层的厚薄与土性及结构物表面的粗糙度有关。由此可见,地下结构与土体相互作用的接触面并非只限于两者的相互接触的接触面。对于服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的土体,当两者发生较强的相互作用时,破坏面将在土体一侧的有限范围内由于材料的屈服而产生,这点对于软黏土尤其如此,即使对于硬质黏土,破坏面可能也非绝对地等同于接触面。因此,在地下结构与土体相互作用接触面的数值模拟中采用薄层接触面元,如 Desai、殷宗泽以及高俊合等所建议的单元要比无厚度的 Goodman 单元合理。

对于相互作用问题的计算模型最初多采用有限元法进行研究。有限元法不仅适用于解线弹性、均匀介质,也适用于解分层介质、非线性、非均质、各向异性体。但对于无限延伸的物理问题以及应力梯度变化大、应力奇异等问题利用有限元法进行求解有困难,尤其是在处理岩土动力学方面,为满足无穷远处的辐射条件,必须引入人工边界,从而人为地增加了计算精度的不确定性。边界元法适用于解线弹性均匀介质的无限域、半无限域问题,其基本解自动满足边界条件。它选择无限域、半无限域的基本奇性解作为格林函数,所得解在整个区域内满足相应的微分方程,因而只需对区域的边界进行离散,降低了问题的维数,计算量大