

土与结构接触面力学特性研究现状与展望

周爱兆, 卢廷浩, 刘 尧

(河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:总结国内外土与结构接触面力学特性研究的现状, 系统介绍接触面力学特性研究领域在试验模拟、本构模型以及计算方法方面的进展, 分析不同试验仪器的特点, 讨论现有接触面模型及计算方法的应用条件和存在的问题, 指出: 土与结构接触面复杂应力状态及高应力状态下特性研究、剪胀(剪缩)测试及颗粒破碎机理研究、特殊土与结构接触面的力学特性研究以及接触面动力特性研究等是今后研究的主要方向。

关键词: 接触面; 试验研究; 本构模型; 接触面单元

中图分类号: TU431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2007)05-0524-05

土与结构接触面的力学特性研究是解决土与结构物相互作用问题的前提。20 世纪 60 年代以来, 有关研究者就开始了土与结构接触面力学行为的探索工作, 在试验研究、理论研究和计算方法等方面都取得了一定的进展。然而, 在荷载作用下, 土与结构接触面发生既不同于土、又不同于结构材料的力学响应, 涉及非线性、大变形、局部不连续等力学前沿问题, 使得接触面研究具有极大的难度。随着近年来大型工业与民用建筑建设的兴起以及西部开发的进行, 出现了越来越多的土与结构物相互作用的问题。仅以水电建设中坝体工程为例, 如土石坝中存在着心墙土料-反滤料、防渗墙-地基覆盖层、基岩-坝体土石料以及混凝土面板-垫层料等不同材料间的相互作用问题, 这些问题对坝体的防渗、应力变形有着重要影响。

本文介绍了接触面力学特性试验研究、本构模型、计算方法等方面国内外的研究进展, 分析了研究中存在的问题, 并对今后研究的方向进行了展望。

1 土与结构接触面力学特性研究现状

目前土与结构接触面特性的相关研究一直遵循着常规的研究思路, 即通过相关的试验研究, 得到应力-应变关系曲线, 根据这些曲线建立相关的本构模型, 并将其应用到实际工程中。

1.1 接触面力学特性试验研究

目前研究接触面力学特性的常用试验主要是直剪试验和单剪试验。直剪试验是通过将直剪仪的下盒填充结构材料或者直接换成结构面材料, 施加水平剪应力, 来量测上下盒相对位移, 建立剪切应力应变关系, 反映接触面的力学特征的。早在 1961 年, Potyondy^[1]就利用应力控制式和应变控制式直剪仪研究了多种土料与结构物材料接触面的力学特性。Clough 等^[2]利用直剪试验研究土与混凝土接触面的力学特性, 认为接触面剪应力与相对剪切位移为双曲线关系。

由于常规直剪仪试验尺寸偏小, 试验结果受尺寸效应影响显著, 诸多学者开始研制大尺寸直剪仪。Desai 等^[3]研制了大尺寸多自由度剪切仪(CYMOF), 上下盒的尺寸分别为 31 cm × 31 cm、41 cm × 41 cm, 并用其对接触面的静力和动力特性进行试验研究。殷宗泽等^[4]进行了土与混凝土接触面的大尺寸试样直剪试验, 上盒尺寸为 45 cm × 45 cm, 通过埋设在混凝土试样中的微型“潜望镜”装置直接观察相对位移沿接触面的分布, 试验中发现接触面的剪切破坏是一个由边缘向内部、远部发展的过程。胡黎昕^[5]利用改进的直剪仪对砂土和结构接触面进行了试验, 研究了不同接触面相对粗糙度对接触面物理力学行为的影响, 并通过数字照相技术记录了接触面附近土颗粒的位移情况, 分析了接触面破坏机理。王伟^[6]通过多种接触面改进直剪试验, 研究接触

面的抗剪强度参数随接触面类型和土体含水率的变化规律,指出接触面的力学行为与结构的亲水性密切相关。

单剪试验将土样装在叠环内,剪切过程中,土样沿叠环面可以产生一定的错动变形,接触面破坏位置不固定,且接触面面积不变,避免了直剪试验中存在人为限定接触面破坏位置、接触面面积在剪切过程中逐渐减小等缺陷。Uesugi 等^[7-9]用单剪仪对砂与钢板接触面的力学性能进行了较为深入的研究。Fakharian 等^[10-11]利用接触面三维试验设备(CCDSSI)进行了砂和钢板的接触面力学特性研究。卢廷浩等^[12-13]进行了较为详尽的土与不同结构接触面特性的试验,观察了接触面的错动位移和剪切位移。王伟^[6]通过改进单剪仪进行正反向剪切试验,研究不同含水率与正向剪切比对接触面反向抗剪强度的影响规律。上述试验所用的仪器尺寸均较小,有相当的尺寸效应。高俊合等^[14]进行了土与混凝土接触面特性的大型单剪试验(方形土样尺寸 44.5 cm × 44.5 cm),从试验结果分析得到剪切破坏带及其厚度。张嘎等^[15-17]研制了大型土与结构接触面循环加载剪切仪(TH-20t CSASSI),接触面尺寸 50 cm × 36 cm,并用其进行了大量的粗粒土与结构接触面的静动力学特性研究,探讨了接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律。

直剪试验和单剪试验均存在剪切过程中剪应力和剪应变分布不均匀等局限,因此有学者采用扭剪试验以保证接触面的应力应变分布比较均匀,应力条件较为明确且剪切面积不变。但是扭剪试验试样制作复杂,接触面变形不易量测,该方法并未能推广应用。

观察国内外接触面力学特性近 50 a 的试验研究进展,可以发现诸多学者将目光集中在仪器设备和测试技术的改进方面。目前试验仪器已基本锁定在直剪仪和单剪仪,而且设备向大型化、综合化、自动化方向发展,试验设备功能完善,加载及数据采集基本实现自动化。另一个显著特点就是电子图像采集技术逐渐成为测试的一部分,如清华大学的 TH-20t CSASSI、国外的 C3DSSI 等都配有图像采集设备。有关学者从以往单一的宏观角度研究剪切过程中的应力位移关系,转向从细观角度观测受载过程中结构面附近土颗粒的运动和物态演化,分析接触面的变形机理。

1.2 接触面本构模型

接触面本构模型是接触面研究中最基础、最重要的内容,正确建立并合理应用接触面本构模型,对有效模拟土与结构相互作用具有重要意义。目前人们根据大量试验提出了不同的本构模型,主要有双曲线模型、弹塑性模型、刚塑性模型、损伤模型、3 参数模型等。

早在 20 世纪 70 年代,Clough 等^[2]根据直剪试验结果,认为 τ - ω 关系呈双曲线关系。该模型由于参数易确定,直到现在还应用广泛。张冬霖等^[12]根据单剪试验结果,考虑接触面上的黏聚力,推得薄层单元的切向劲度,对双曲线模型进行了改进。Brandt^[18]经过深入的室内试验和现场研究,提出 1 个简化模型描述接触面切向应力和变形,用 2 条折线描述 (τ/σ) - ω 曲线。陈慧远^[19]认为,当剪切应力小于摩擦力时, τ - ω 为线弹性关系;当剪切应力大于或等于摩擦力时,接触面进入摩擦滑移阶段, τ - ω 为塑性关系。钱家欢^[20]认为,接触面的相对位移与应力的关系是黏弹塑性。殷宗泽等^[4]认为,接触面的破坏是一个由边缘向内部逐渐发展的过程,提出了接触面错动变形的刚塑性模型。接触面土体的变形可分为两部分:一部分是土体的基本变形,不管滑动与否都是存在的,与其他土体单元一样;另一部分是破坏变形,包括滑动破坏与拉裂破坏。卢廷浩等^[13]在单剪试验的基础上,考虑法向和切向变形的耦合影响,建立了接触面二维、三维本构模型,并应用到某高面板坝的三维计算中,得到了较为合理的结果。王伟^[6]从数学特征方程的角度,证明了传统 2 参数双曲线模型的理论缺陷,基于宏观热力学原理,在能量耗散假定的基础上,从微分的角度建立了接触面应力应变关系的控制微分方程,推导出接触面应力应变关系的 3 参数模型,结合接触面试验数据,从数学原理和试验结果上证明了新模型的广泛适用性。

Desai 等^[21]首次将损伤力学的基本理论应用于接触面本构关系,为接触面研究提供了新的思路。胡黎明^[5]根据土与结构物接触面直剪试验结果,建立了粗糙接触面损伤力学本构模型,该模型能够反映接触面剪切变形过程中的应变软化和剪胀现象。张嘎等^[15-17]根据大量的粗粒土与结构接触面静动力学试验观测结果,总结归纳了粗粒土与结构接触面静动力学特性的 5 条基本规律,并在此基础上,建立了一个粗粒土与结构接触面弹塑性损伤模型,可以统一地描述单调和循环荷载作用下接触面的响应。

1.3 接触面计算方法

接触面计算方法目前主要有接触面单元法和接触力学分析方法 2 种。接触面单元法即在土与结构接触

面上设置接触面单元.随着有限元方法的不断发展,该方法得到大家的普遍接受,现已成为接触面数值模拟方法的主流.接触面单元法的关键是接触面单元的选取及本构关系的选用.

接触面单元主要有两节点单元、无厚度单元、有厚度薄层单元和接触摩擦单元几类.两节点接触面单元由2个节点连接而成,用2个弹簧模拟单元的切向和法向刚度矩阵.该模型简单,能够粗略反映接触面上的错动变形,但单元的劲度系数都是假定的,没有任何试验或理论依据,故其只能定性分析接触面位移的发展趋势,没能得到广泛的应用.无厚度单元以4结点 Goodman 单元为代表,能够模拟接触面的滑移和张裂,概念明确,应用方便.但法向刚度是人为选取的,带有一定的随意性,另外不能反映接触面切向和法向耦合特征.有厚度接触面单元以 Desai 等^[21]提出的薄层单元为代表,其可以模拟黏接、滑移、脱开和愈合等各种接触状态.单元剪切刚度由试验确定,而法向刚度则由薄层单元及其相邻的实体单元的性质确定.目前薄层单元得到大家的广泛认可,诸多学者对薄层单元厚度的选取进行了大量研究,但没有统一的标准,有限元计算中一般根据试验测得的接触面厚度和单元划分来确定.接触摩擦单元用位移压缩和接触应力压缩模拟接触面的滑动、张开和闭合过程,避免了接触面单元中劲度系数的选取,只需选用 c 、 φ 2 个参数,但没有考虑接触面上法向应力的影响,其约束位移和容许剪应力大小需要人为给定.

虽然接触面本构模型种类繁多,但在接触面数值模拟中应用得较多的还是理想刚塑性模型和 Clough-Duncan 非线性弹性模型,主要原因是模型简单,参数易确定.弹塑性模型发展较多,但未有大家普遍认可的实用简单模型.接触面损伤模型近几年刚发展起来,已经在一些大型工程中应用,但仍然集中在少数科研单位和高校使用,需要进一步推广.

接触力学分析方法是將变形特性相差较大的不同材料当成不同的物体,将其间的相互作用问题处理为不同物体间的相互作用问题.该方法通过物体几何关系的准确描述来判别物体的接触关系,摆脱了连续介质力学所采用的用单元位移和应变来描述物体几何特性的基本模式,因此该方法在处理位移不连续现象时具有很大的优越性.目前这一方法已引起广大学者的重视,在一些工程中得到应用.

2 目前研究中存在的主要问题

纵观目前国内外关于土与结构接触面力学特性的研究状况,可以发现主要存在以下几个问题:

a. 研究范围主要集中在土与结构相互作用的影响因素方面,对接触面剪切破坏机理的认识还主要停留在宏观方面,对接触面剪切变化过程的细观认识不够.接触面剪切破坏伴随颗粒的滑移、转动、破碎、错位等,是多种行为耦合作用的结果.虽然目前学者开始利用数字照相技术从微观角度研究破坏机理,但取得的成果还不能完全说明接触面破坏的力学机理.

b. 目前试验模拟的应力状态偏低,应力路径比较单一,试验结果能否应用到高应力状态,以及复杂应力路径条件下接触面的力学特性还有待进一步研究.

c. 试验研究中主要采用的材料还是砂、黏土、粗粒料等,国内尚未见有关特殊土与结构接触面研究文献,如膨胀土、黄土、冻土等与混凝土接触面的力学特性研究等.

d. 反映土与结构相互作用的本构模型虽然种类繁多,但还没有真正得到大家广泛认同的模型.工程应用中,绝大多数情况下,还是根据设计者的经验和习惯选取模型,模拟的结果能否正确反映土与结构的相互作用还有待论证.

3 今后研究的发展方向

3.1 进一步对接触面力学特性影响因素进行研究

土与结构接触面的力学特性和土与结构材料的特性以及所处环境密切相关.如土体颗粒本身的物理力学性质,包括土体颗粒的地质成因、矿物成分、尺寸、形状、表面粗糙度、颗粒级配、孔隙比等,结构材料表面的粗糙度、湿度等,所处环境包括含水率、应力路径等.纵观已有文献资料,有些因素的影响机理基本清楚,而有的则需要进一步通过大量试验进行研究.

3.2 开展复杂应力状态及高应力状态试验仪器的研制与应用

实际工程中,土与结构的相互作用是个复杂的过程,接触面的剪应力应变关系和体变特性均与应力路径有关,进行复杂应力路径的试验研究十分必要.目前这方面的文献资料相对较少,今后应加强这方面的研究.

另一方面,随着高层建筑和大型水库的建设,研究高应力状态下土与结构相互作用将是一个必然的趋势。

3.3 接触面剪切过程中剪胀(剪缩)及颗粒破碎机理研究

土与结构接触面在剪切过程中表现出明显的体积变化,接触面剪胀特性对土体与结构物静动力相互作用分析,尤其是结构的受力变形结果有重要影响。因此对接触面剪胀特性的机理研究不论是接触面力学特性的理论研究还是工程应用方面都具有重要意义。这一点目前已引起广大学者的关注。由于问题的复杂性,在今后很长一段时间内还将是研究热点。

3.4 接触面剪切过程的微观(细观)试验研究

接触面剪切过程是一个相当复杂的过程,伴随颗粒的转动、滑移、破碎,颗粒的应力轴、主轴偏转等,单从宏观的角度研究其机理远远不够,必须将宏观方法与微观方法相结合。加强接触面力学特性的细观研究,可以借助岩土细观数字视频观测仪、电子显微镜、声发射仪以及CT等手段。

3.5 加强特殊土与结构接触面力学特性研究

随着西部开发、西气东输、南水北调等大型项目的开展,工程中常会面临许多特殊性质土,如湿陷性黄土、膨胀土、冻土等,这些土在特殊环境下与结构的相互作用特性研究,对相关工程的设计具有很好的指导意义。

3.6 土与结构接触面动力特性及其本构关系研究

土与结构动力相互作用问题极其复杂,然而实际工程中经常碰到诸如波浪荷载、地震荷载作用下的土与结构相互作用问题,这就迫切要求开展有关土与结构接触面动力特性及其本构关系研究。目前土与结构接触面动力作用下的力学作用机理还不完全清楚,需要进一步深入研究。

3.7 接触面本构模型的研究和应用推广

经过半个世纪的发展,土与结构接触面本构模型的研究取得了一定进展,但还不能满足现代工程建设的要求,如与工程实际相近的复杂应力状态下的本构模型缺乏,现有模型的许多假设条件与实际工况不符,影响了计算精度,今后的研究中应进一步对此加以改进,结合实际工程发展各类工程实用模型。另一个方面,现有的大型商业有限元软件中关于接触面模拟方面是个薄弱环节,缺乏相应的模型和接触面单元,今后的研究应加强商业软件二次开发,将研究成果广泛应用到工程计算中。

3.8 接触面模型、参数数据库的建立

现有的接触面本构模型繁多,可以通过大量的模型试验、现场观测对其进行验证,请相关专家客观地评价和论证其正确性与可靠性,分析其局限性以及实用范围,建立一个标准以便指导工程应用。随着信息科技的高速发展,建立接触面本构模型及参数数据库,加强模型研究中试验数据的组织管理与资源的共享利用,将方便设计工作者便捷、准确地选取参数,同时避免大量的重复试验,节约国家资源。

参考文献:

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339-353.
- [2] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [3] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling interfaces[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1985, 111(6): 793-815.
- [4] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 14-22.
- [5] 胡黎明. 土与结构物接触面力学特性研究和工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [6] 王伟. 基于能量耗散原理的土与结构接触面模型研究和应用[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [7] UESUGI M, KISHIDA H. Influential factors of friction between steel and sands[J]. *Soils and Foundations*, 1986, 26(2): 33-46.
- [8] KISHIDA H, UESUGI M. Test of interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. *Journal of Geotechnique*, 1987, 37(1): 45-52.
- [9] UESUGI M, KISHIDA H, TSUBAKIHARA Y. Behavior of sand particles in sand-steel interfaces[J]. *Soils and Foundations*, 1988, 28(1): 107-118.
- [10] FAKHARIAN K. Three-dimensional monotonic and cyclic behavior of sand-steel interfaces[D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.

[11] FAKHARIAN K ,EVGIN E. An automated apparatus for three-dimensional monotonic and cyclic testing of interfaces[J]. Geotechnical Testing Journal ,1996 ,19(1) 22-31.

[12] 张冬霖 ,卢廷浩 . 一种土与结构接触面模型的建立及应用 [J]. 岩土工程学报 ,1998 20(6) 62-66.

[13] 卢廷浩 ,鲍伏波 . 接触面薄层单元耦合本构模型 [J]. 水利学报 2000(2) 71-75.

[14] 高俊合 ,于海学 ,赵维炳 . 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟 [J]. 土木工程学报 2000 33(4) 42-46.

[15] 张嘎 . 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论研究 [D]. 北京 :清华大学 2002.

[16] 张嘎 ,张建民 . 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用 [J]. 岩土工程学报 2003 25(2) :149-154.

[17] 张嘎 ,张建民 . 粗粒土与结构接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律 [J]. 岩土力学 2005 26(5) 699-705.

[18] BRANDT J R T. Behavior of soil-concrete interfac[D]. Edmonton :University of Alberta ,1985.

[19] 陈慧远 . 摩擦接触面单元及其分析方法 [J]. 水利学报 ,1985(4) 44-50.

[20] 钱家欢 . 接触面剪切流变特性试验研究 [G]/ /安关峰 ,高大钊 . 岩土与水工建筑物共同作用研究成果汇编 . 南京 :河海大学 ,1990.

[21] DESAI C S ,ZAMAN M M. Thin layer element for interfaces[J]. Int Journ for Num & Analy Meth in Geomech ,1984 8(1) :19-43.

Current research and prospect of mechanical behaviors
of soil-structure interfaces

ZHOU Ai-zhao , LU Ting-hao , LIU Yao

(Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract Some advances in test simulation , constitutive model , and calculation method in mechanical behavior study of soil-structure interfaces at home and abroad were systematically summarized. The characteristics of different test apparatus were analyzed , and the application conditions of the current soil-structure models and the calculation methods as well as some related problems were discussed. It is pointed out that the studies on mechanical behaviors of soil-structure interfaces under complex stresses and high stresses , shear dilatancy (shear shrinkage) test methods and grain crushing mechanism , mechanical characteristics of special soil-structure interfaces , and dynamic behaviors of interfaces are the main directions of further research.

Key words interface ; test study ; constitutive model ; interface unit