

水利工程土与结构界面力学特性研究综述

许增光,李梦平,曹 成

(西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:通过对土与结构界面力学试验设备、关键影响因素、数值模拟方法及本构模型研究进展的系统梳理,分析了当前试验设备的工程适用性与技术局限,阐明了多因素作用下界面力学特性的响应规律,总结了现有数值模拟中的关键技术及其理论限制,归纳了常用本构模型的适用范围与边界条件。面向工程实际需求和技术发展趋势,未来研究应聚焦研发集成应力、渗流、温度多场耦合功能的智能化试验系统,揭示长期复杂环境与多场耦合作用下界面力学性能的时变规律,完善基于薄层单元理论的数值模拟方法体系,构建融合机器学习算法与多源工程数据的智能本构模型,提升复杂工况下界面力学行为预测的准确性与适应性。

关键词:界面;力学特性;试验设备;影响因素;数值模拟;本构模型

中图分类号:TU431;TV31 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)05-0056-14

Review of mechanical properties of soil-structure interfaces in hydraulic engineering//XU Zengguang, LI Mengping, CAO Cheng (*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: Through a systematic review of research progress on mechanical test equipment for soil-structure interfaces, key influencing factors, numerical simulation methods, and constitutive models, the engineering applicability and technical limitations of current test equipment were analyzed, the response laws of interface mechanical properties under the influence of multiple factors were clarified, the key technologies and theoretical limitations in existing numerical simulations were summarized, and the applicable ranges and boundary conditions of commonly used constitutive models were classified. In light of the actual engineering needs and technological development trends, future research should focus on developing intelligent testing systems with integrated stress-seepage-temperature multi-field coupling functions, revealing the time-varying laws of interface mechanical properties under long-term complex environments and multi-field coupling, improving the numerical simulation method system based on the thin-layer element theory, and constructing intelligent constitutive models integrating machine learning algorithms and multi-source engineering data to enhance the accuracy and adaptability of interface mechanical behavior prediction under complex conditions.

Key words: interface; mechanical properties; test equipment; influencing factors; numerical simulation; constitutive models

土与结构界面是指土体与结构物相互作用的接触区域。在剪切荷载作用下,由于结构物表面的粗糙性,靠近结构物的土颗粒会发生滑动、滚动甚至破碎行为,从而形成与周围土体力学特性显著不同的薄层剪切带^[1-4]。研究表明,该剪切带的形成及其厚度受多个因素控制,主要包括土壤类型、颗粒尺寸、结构物表面粗糙度、法向应力及剪切路径等^[4-8]。就厚度特征而言,大量试验数据表明,剪切带厚度通常为土颗粒平均粒径(D_{50})的5~10倍^[9-11]。例如:胡黎明等^[12]在砂土与钢板界面剪切试验中测得的剪切带厚度约为 D_{50} 的5倍;张嘎等^[13]采用土颗粒位

移图像测量方法发现粗粒土与粗糙钢板界面的剪切带厚度约为 D_{50} 的5~6倍;De Gennaro等^[14]在砂土与结构界面剪切试验中观察到,在平行于结构面的区域形成了厚度约为 $10D_{50}$ 的剪切带。

土与结构界面的力学特性对工程稳定性具有直接影响。在水利工程中,此类界面广泛存在,例如面板坝的面板与垫层之间、土石坝心墙土料与防渗墙之间、穿坝涵管与坝体土料之间、岸坡基岩与土体之间等。界面承担着土与结构物之间的荷载传递及变形协调功能^[9,15]。然而,由于土体与结构物材料性质的差异,在荷载传递过程中,二者强度和变形难以

协调,导致界面区域易出现应力集中现象,从而引发局部变形、开裂甚至滑动分离等问题,对工程运行造成不利影响^[16-18]。例如,新疆八一水库^[19]、山西曲亭水库^[20]以及美国 Teton 大坝^[21]均因界面区域破坏而造成了严重损失。因此,深入研究土与结构界面的力学特性是保障工程安全运行的关键基础,具有重要的理论价值和现实意义。

自 20 世纪中期以来,国内外学者通过试验研究、理论分析与数值模拟等多种研究手段,在界面力学试验设备研发、影响因素分析、本构模型构建以及数值计算方法等方面取得了显著进展。本文基于现有研究成果,从试验设备、关键影响因素、理论模型和数值模拟技术 4 个方面,系统梳理了土与结构界面力学特性研究的最新进展,旨在为深化土与结构相互作用机理研究提供理论参考和技术指导。

1 界面试验设备

在土与结构界面剪切试验研究中,直剪仪、单剪仪、扭剪仪、环剪仪、共振柱仪以及三轴仪等多种设备已被广泛应用于相关研究。从发展历程来看,直剪试验作为最早用于界面力学行为研究的试验方法,为后续单剪、扭剪和环剪等试验技术的发展奠定了基础。

1.1 直剪仪

直剪仪凭借其操作简便、直观性强且易于改造的特点,成为研究土与结构界面剪切力学特性的主要试验设备。根据结构形式差异,直剪仪可分为盒式直剪仪和同心杆式直剪仪两种类型,其中盒式直剪仪因其结构优势在工程实践中应用最为广泛。该设备通过将土样固定于上盒、结构物置于下盒,保持上盒固定并对下盒施加横向剪应力,同时测量其相对位移,从而建立剪应力与剪切位移之间的关系曲线。

自 1961 年 Potyondy^[22]首次将盒式直剪仪用于土与结构界面剪切特性的研究以来,该类设备经历了持续的改进与完善。针对常规直剪仪存在的尺寸效应问题,Desai 等^[23]研发了尺寸为 31 cm×31 cm(上盒)和 41 cm×41 cm(下盒)的大尺寸双自由度循环直剪仪(CYMDOF),为界面力学特性研究提供了新的试验手段。该设备采用橡胶套对剪切盒进行密封处理,不仅有效解决了剪切过程中土样从界面缝隙中漏失的问题,还避免了人为限定剪切面位置所带来的误差。随着研究需求的不断提高,直剪仪在测量技术、加载条件及温度控制等方面取得了显著进展。殷宗泽等^[24-25]通过添设微型“潜望镜”,实现了对剪切过程中界面不同位置相对位移的精确测

量。胡黎明等^[12]引入数字照相技术,实现了对剪切过程中土体颗粒位移的全程记录,在直剪仪观测手段方面实现了重要突破。李登华等^[26]结合粒子图像测速技术,研制出可从细观角度观测接触区土颗粒变形状态的新型土与结构界面试验仪。李邵军等^[27]研发了可视化大型直剪试验系统,并结合高清摄像设备实现了界面剪切带变形的可视化与定量分析。在设备功能拓展方面,张建民等^[28-29]研发的 80 t 三维多功能土工试验机(3DMAS),支持大尺寸试样及多种复杂加载路径,实现了对界面三维变形特性的高精度自动化测量;王永洪等^[30]研制的大型横刚度桩土界面直剪仪有效解决了剪切过程中界面面积难以保持恒定的难题;赵联桢等^[31]研制的大型多功能冻土与结构界面循环直剪仪 DDJ-1,实现了在-20~0℃低温环境下界面力学特性的精确测试。

尽管直剪仪在界面力学研究中具有不可替代的优势,但其仍存在以下技术局限:①尺寸效应显著,小尺寸试样测量误差较大,而大尺寸试样又面临加载系统标准化程度低、剪切破坏判据不统一等技术挑战;②上盒刚性约束导致剪切面应力分布不均,难以准确表征应力状态;③试验过程中难以有效区分土体内剪切位移与界面滑移位移两种变形机制。这些局限在一定程度上制约了试验结果的可靠性,需要在后续研究加以解决。

1.2 单剪仪

单剪仪采用叠环替代传统直剪仪的上盒装置,在剪切过程中叠环之间可发生相对错动,有效解决了界面破坏位置被人为限定的问题。与直剪仪相比,单剪仪具有以下显著优势:①能够有效区分土体自身变形与界面滑移变形;②可改善土样应力状态,更接近实际工程条件。基于上述优势,单剪仪已成为研究土与结构界面力学特性的重要试验设备。

Uesugi 等^[10]首次采用矩形截面单剪仪对砂土与钢板界面的力学特性进行了较为详细的研究。张冬霖等^[32]通过在单剪仪不同叠环位置布设百分表,实现了对剪切过程中剪切错动带演化规律的定量观测。与直剪仪类似,单剪仪的发展也经历了尺寸、加载方式及量测技术等方面的逐步改进。高俊合等^[33]将单剪仪叠环尺寸扩大至 44.5 cm×44.5 cm,显著降低了尺寸效应对试验结果的影响。郭佳奇等^[34]基于 RMT-150B 试验机改装研制出高应力单剪仪,实现了在高法向应力(最大垂直荷载达 1000 kN)与高剪切荷载(最大达 500 kN)条件下的界面剪切试验。河海大学研发的 DHJ-30 大型单剪仪具备数据自动采集与处理功能,可实现荷载、位移等参数的自动采集存储及切向推力的自动控制^[35]。

冯大阔等^[36]依托 80t 大型三维界面试验机,将原土体容器更改为叠环式单剪型容器,并引入非接触图像测量技术实时监测叠环变位,实现了循环剪切路径下界面力学特性的全面测量。

单剪仪虽然改善了直剪仪的部分缺陷,并成为界面力学试验中广泛使用的装置,但仍存在以下技术局限:①在剪切过程中,叠环对界面的约束作用仍会导致应力集中现象,使剪应力与剪应变分布呈现非均匀特征;②受设备结构限制,单剪仪所能提供的最大法向应力较低,难以满足高法向应力条件下的试验需求。这些技术瓶颈在一定程度上制约了单剪仪在复杂应力条件下的应用效果。

1.3 其他类型设备

针对直剪仪和单剪仪在应力、应变分布不均匀等方面存在的技术局限^[37],学者们尝试采用其他试验设备(如扭剪仪、环剪仪、三轴仪及共振柱仪等)开展界面力学特性研究。例如:Yoshimi 等^[38]采用叠环式扭剪仪研究了砂土与钢材界面的剪切特性;杨有莲等^[39]和朱俊高等^[40]开展了相同试验条件下的环剪与单剪对比试验,结果表明环剪仪更适用于界面的剪切特性试验,而单剪仪则适用于低应力水平条件下的试验;王湛等^[41]研制了最大竖向应力达 800 kPa 的高围压大型界面环剪仪,为研究深层土体高围压条件下的界面剪切特性提供了新的试验手段;林楠等^[42]研发了轴力、扭矩和内外围压都可以独立自动控制的气动式四向控制空心圆柱扭剪仪,实现了在应力主轴旋转条件下界面土体力学特性的深入研究;雷红军等^[43]通过改装三轴仪对黏性土与结构界面进行了大剪切变形试验,发现界面最大剪应力与正应力之间具有良好的线性关系;俞培基等^[44]利用共振柱仪开展了土体在粗糙与光滑界面上的剪切试验;张嘎等^[45]研制的 TH-20t 多功能大型粗粒土与结构界面循环加载剪切仪,实现了常压力、常位移和常刚度 3 种边界条件的精确控制,推动了界面力学测试技术的创新发展。然而,由于试样制备复杂或测量难度较大等原因,这些设备未能像直剪仪和单剪仪那样获得广泛应用。

当前,试验设备的发展呈现以下趋势:①设备的大型化与三维化,如大尺寸剪切仪和真三轴界面试验系统,能够更真实地模拟实际工程中的受力状态;②加载方式的多样化与精准化,涵盖高应力幅值和多向动态荷载的精准控制能力;③测试技术的数字化与智能化,借助数字图像处理等技术,实现了从宏观力学响应到细观颗粒运动的跨尺度观测。上述技术进步为深入揭示界面剪切带演化机制、颗粒破碎行为及界面破坏机理提供了有力的技术支撑。

2 界面力学特性影响因素

2.1 土的物理特性

土的物理特性是控制土与结构界面力学行为的关键因素,主要包括土体类型、密度、含水率及粒径级配等。

在土体类型方面,早期研究主要集中于砂土^[12,23-24,46-49]和黏土^[50-52]两类典型土体,其中对砂土与结构界面的研究尤为深入。随着工程建设向复杂地质环境区域延伸以及环境与工程相互作用问题的凸显,具有显著区域特性的特殊土体(如黄土^[53-54]、红黏土^[55]、冻土^[31,56]、膨胀土^[57]等)也逐渐成为界面力学研究的重要对象。

土体密度对界面力学特性具有显著影响。对于砂土与结构界面,随着土体密度的增加,界面内摩擦角显著提高^[23],抗剪强度相应增强^[47,58],剪应力与应变关系多呈现由应变软化向应变硬化转变的特征^[59]。对于黏土与结构界面,土体密度的增大可促使界面黏聚力与内摩擦角同步提升,从而增强其抗剪强度^[58]。

含水率作为另一关键物理参数,其对黏土等具有显著水敏特性的土体与结构界面力学性能的影响尤为显著。随着含水率的升高,界面抗剪强度与内摩擦角通常呈下降趋势,黏聚力则表现出先升后降的变化特征,其峰值通常出现在土体塑性状态含水率附近^[47,58,60]。此外,含水率上升还会促使界面变形行为由弹塑性向软化型演化^[61-62]。

除上述主要影响因素外,土的粒径级配对界面力学行为也具有一定影响。级配良好的土体通常表现出更优异的界面抗剪性能^[63-64]。

2.2 结构物性质

在土与结构界面力学特性研究中,结构物的材料属性及其表面粗糙度是两个核心影响因素。现有研究主要聚焦于混凝土板^[50,56,65]和钢板^[10,41,66]两类典型结构物材料,同时也有学者对岩石板^[23]、水泥板^[67]、冰体^[68]等其他结构物材料的界面行为进行了探索性研究。结构物表面粗糙度是界面力学行为的核心控制参数^[7],大量试验数据表明,界面抗剪强度与表面粗糙度之间存在良好的正相关性^[7,51],但这一关系受到临界粗糙度^[55,69]的制约,当粗糙度超过临界值时,界面抗剪强度增长趋于停滞,甚至可能出现弱化现象^[70]。不同粗糙度水平还会导致界面破坏模式发生转变,主要包括滑移破坏和剪切带破坏两种形式^[71]。当粗糙度低于临界粗糙度时,界面通常表现为滑移破坏;而当粗糙度高于临界粗糙度时,破坏时界面会形成剪切带,并伴随应

变软化与剪胀现象^[12,72]。基于结构物表面形貌特征,现有研究将粗糙度划分为随机型与规则型两大类^[73],其量化表征方法主要包括归一化粗糙度^[10]和平均粗糙度^[9]两类。具体表征手段包括定性描述法^[12]、峰谷距法^[45,74]、凹槽法^[55,75]、灌砂法^[7,76-77]、粗糙度测定仪法^[78]以及分形法^[79]等。其中,灌砂法因其简单易行的特点,在工程实践中得到了较为广泛的应用^[80]。

2.3 应力条件

土与结构界面力学特性显著受外部荷载条件的影响,影响因素主要包括法向应力^[36,81]、剪切路径(单调剪切^[82]、循环剪切^[83-84])及剪切速率^[85-86]等。

法向应力对界面力学特性具有明显的调控作用。刘蓓^[87]与汪优等^[88]的研究表明,法向应力对界面破坏模式的影响存在临界阈值效应,在临界法向应力前后,界面表现出两种不同的剪切破坏形式。

根据剪切加载方式的不同,剪切路径可分为单调剪切和循环剪切两种基本模式。在单调剪切条件下,界面抗剪强度随法向应力的增大而提高^[51,89-90],其变化规律符合摩尔-库仑强度准则^[36,51]。在循环剪切条件下,不同类型土体与结构界面的力学响应表现出显著差异。对于砂土与结构界面,其抗剪强度随循环次数的增加逐渐降低,最终趋于稳定残余强度,剪应力与应变关系呈现典型的软化特征,且该软化过程的速率和比例基本不受法向应力变化的影响^[15]。对于黏土与结构界面,循环剪切作用会导致界面剪应力峰值随循环次数的增加而逐渐衰减,衰减速率呈现先快后慢的趋势,最终趋于稳定;此外,法向应力对循环剪切下的界面强度退化具有显著影响,表现为法向应力越大,抗剪强度的衰减幅度越明显^[83]。

剪切速率通过不同机制影响不同类型土与结构界面的力学行为。对于砂土与结构界面,提高剪切速率会导致界面抗剪强度下降,且颗粒粒径越小,剪切速率的影响越不显著,其内在机理在于剪切速率的变化影响了颗粒在剪切过程中的平移、翻滚及破碎等运动行为^[91]。对于黏土与结构界面,剪切速率主要通过调控超孔隙水压力的的大小进而影响界面的抗剪强度^[85]。具体表现为,剪切速率的提高会促进界面超孔隙水压力的累积,从而导致界面抗剪强度相应降低^[92]。

2.4 其他边界条件

随着工程建设环境复杂性的提升,温度效应^[93](特别是冻融作用^[94-95])以及干湿循环^[96]等环境因素已成为界面力学研究中不可忽视的关键边界条件。研究表明,低温冻结下的温度效应对界面抗剪

强度的影响主要通过冰胶结力作用改变内聚力实现^[56,97]。冻融作用对界面力学特性的影响受土体初始含水率和试验温度的共同调控:在低初始含水率及较高试验温度条件下,冻融作用会使界面抗剪强度小幅提升;而在高含水率及低温工况下,界面抗剪强度会随着冻融次数的增加显著下降^[98-99]。干湿循环会导致界面抗剪强度逐渐降低,总体呈先陡后缓的非均匀劣化趋势,其主要原因在于干湿交替作用引起结构物表面粗糙度衰减及土体与结构物间贴合程度的削弱^[100]。

然而,实际界面的力学行为受环境因素、土体物理特性、结构物表面性质以及外部应力状态等多因素的共同调控与耦合作用,其响应机制呈现较高的复杂性。近年来,多因素耦合效应已成为土与结构界面研究领域的核心热点与关键难点,尤其在环境边界条件与力学因素的交互作用方面,已进行了大量探索。以冻融循环与法向应力的耦合作用为例,在低法向应力条件下,界面通常表现为脆性破坏,而随着法向应力的增大,破坏模式逐渐由脆性向塑性转变^[101]。另一方面,在热循环作用下,界面的力学行为显著受应力状态与应力历史的影响,研究表明,热诱导的界面应变硬化现象在高法向应力条件下更为明显^[102]。此外,干湿循环作用下界面性能的劣化与结构物表面粗糙度的衰减之间存在显著的协同效应。干湿循环不仅引发了土体黏聚力下降与界面土颗粒流失,而且加剧了结构物表面的氧化及腐蚀进程,进而导致其表面粗糙度进一步降低,多过程的耦合作用共同促使了界面抗剪性能的显著劣化^[100]。

综上所述,深入揭示多因素耦合作用机制是精准预测界面长期力学性能的关键。尽管当前研究已在一定程度上阐明了单一或若干因素对界面力学特性的影响规律,但关于复杂耦合工况(如热-水-力-化学多场耦合)、长期环境作用下界面的时变特性以及微观-宏观力学行为之间的关联机制仍需深入探索。

3 界面数值模拟方法

在土与结构界面力学问题的数值模拟研究中,界面数值分析方法主要分为接触力学分析法和接触界面单元法两大类^[37,103]。接触力学分析法通过适当处理接触边界上的约束问题,将原本的约束优化问题转化为无约束优化问题进行求解。常见的无约束优化方法包括罚函数法^[104]、拉格朗日乘法^[105]以及增广的拉格朗日乘法^[106]等。接触界面单元法作为当前土与结构界面模拟的主流方法,其核心思想是通过在界面上设置过渡单元来模拟土体与结

构物之间相互作用的力学行为。该方法的核心在于界面本构关系的合理选择及界面单元类型的恰当选取^[107]。根据单元厚度特征,接触界面单元可分为无厚度单元和有厚度薄层单元。

3.1 无厚度单元

无厚度界面单元是一类忽略界面厚度而仅考虑其几何长度特性的特殊单元,其中最具代表性的是4节点8自由度的Goodman单元^[108]。该单元通过引入位移不连续假设,能够有效模拟界面两侧介质的相对滑移与张开行为。然而,该单元在实际应用中存在若干关键技术难题:由于单元的无厚度特性,在受压状态下易导致界面两侧实体单元发生相互嵌入现象。为缓解这一问题,常规做法是在单元受压时将法向刚度设为较大值,而在受拉时将其设为较小值。但这种取值方式具有较强的主观性和随意性,法向位移的微小偏差可能导致法向应力计算结果出现显著误差^[32,109]。此外,若法向刚度取值过大,还可能会导致刚度矩阵病态,造成数值求解不稳定、收敛困难等问题^[110]。针对上述问题,学界提出了多种改进策略。在数值算法优化方面,Day等^[111]建议通过减小界面附近单元尺寸或采用更高精度单元来提升数值稳定性。在单元构造改进方面,李守德等^[112]提出在单元法向加设刚连杆,有效解决了单元间相互嵌入的问题;李同录等^[113]通过将4节点8自由度Goodman单元概化为4节点6自由度的无嵌入摩擦单元,通过仅保留切向刚度并重构总刚度矩阵,从算法层面规避了嵌入问题。

Goodman单元概念简明、形式简洁,能较好地反映界面切向应力和变形的发展,因此在工程实践中得到了广泛应用。当忽略法向应力、剪应力与法向位移及切向位移之间的交叉耦合作用,并假定材料的错动严格沿界面发生,且仅关注切向变形行为(如滑移与开裂)时,采用Goodman单元通常可获得较为理想的分析结果。例如,何江达等^[114]在沙湾水电站厂房基坑开挖工程中,将Goodman单元应用于围堰堰体与防渗墙之间的界面模拟,成功实现了防渗墙水平应力与变形的准确预测。该案例表明,Goodman单元尤其适用于界面以剪切错动为主、力学行为相对简单的工程问题。

然而,Goodman单元在理论上也存在明显局限:仅能模拟滑移和开裂两种接触状态,无法反映界面的黏结、破碎及非线性闭合等更复杂的力学行为。这些局限促使研究者们不断开发更先进的界面单元模型,以更好地满足工程实际中的复杂界面力学分析需求。

3.2 有厚度薄层单元

有厚度界面单元以Desai等^[115]提出的薄层单元(Desai薄层单元)为代表,其核心理论假设是将界面区视为具有特殊材料属性、厚度极薄的实体单元。该理论要求单元几何参数满足 $0.01 < t/B < 0.1$ 的约束条件(t 为薄层界面单元厚度, B 为单元长度)。由于具备一定的厚度,薄层单元能够有效避免无厚度单元常见的嵌入问题,可模拟界面的黏结、滑移、张开和闭合等多种接触状态。此外,薄层单元的概念与试验中观测到存在剪切错动带^[32]的现象较为一致,因此在模拟土与结构物相互作用时,采用有厚度的薄层单元比无厚度单元更具合理性^[116]。例如,殷宗泽等^[24]在对小浪底土坝中一道混凝土防渗墙的应力与变形分析中,分别采用Goodman单元和薄层单元进行了数值计算,对比发现采用薄层单元的计算结果更符合实际。该案例说明,在剪切错动可能不严格局限于界面且涉及复杂接触行为的水利工程结构中,薄层单元展现出更强的适用性与分析优势。

但Desai薄层单元仍存在若干局限:薄层单元厚度取值依赖经验判断;模型中引入的弹性剪切模量、弹性模量和泊松比3个独立参数,其取值标准尚未在理论上得到明确界定;模型未考虑法向与切向变形之间的耦合效应,难以准确反映薄层单元的实际应力与应变特性。因此,许多学者在Desai薄层单元的基础上提出了更符合实际接触特性的有厚度单元。例如,邵炜等^[117]借鉴Desai薄层单元的思想,提出了一种能较好模拟夹层静力与动力特性的非线性薄层单元;苗雨等^[118-119]通过在Desai薄层单元中引入瑞利阻尼项,成功模拟了地震荷载下桩土界面黏结、滑移、张开和闭合的强非线性接触行为。

合理选取界面单元的厚度是薄层单元应用中的关键挑战之一:若厚度过小,可能导致刚度矩阵病态,从而引发数值误差;若厚度过大,则难以反映界面的剪切破坏特征,造成物理意义上的偏差^[24]。目前,单元厚度的取值主要依据以下方法:采用Desai等^[115]、殷宗泽等^[24]学者提出的经验范围(如 $0.01 < t/B < 0.1$)进行选取;基于室内试验^[7]或数值模拟^[6]对剪切带厚度进行直接观测,将所得结果作为厚度取值的物理依据。

由于薄层剪切带厚度受土体颗粒级配、最大粒径、密度和结构物表面粗糙度等多种因素的影响^[120],当前尚未形成普适的厚度选取标准。在实际应用中,建议采用经验范围、试验观测与数值模拟相结合的综合方法,以提升厚度取值的科学性与可靠性。未来研究有必要深入开展基于土体粒径、结

构物表面粗糙度及应力条件等因素的厚度定量化研究,以建立更为科学、系统的确定准则。

综上所述,在水利工程界面力学行为模拟中,界面单元的选择应综合考虑界面行为的复杂程度、计算精度要求以及参数可获得性等因素。为更清晰地对比两类界面单元在水利工程中的适用性,现将其主要特点、适用场景及选择依据总结于表 1。

4 界面本构模型

界面本构模型是指用于表征界面应力与位移响应特性的数学模型,当前主要用于描述剪应力与剪切位移之间的内在关联规律。作为土与结构物相互作用力学行为研究的理论基础,本构模型的准确构建与合理应用直接影响数值模拟的可靠性。目前,学者们已提出了多种界面本构模型,主要可归纳为非线性弹性模型、塑性模型和损伤模型 3 类,其中塑性模型又可进一步划分为理想弹塑性模型、弹塑性模型和刚塑性模型^[121]。

非线性弹性模型以 Clough 等^[46]提出的双曲线模型为代表,该模型可与无厚度或有厚度界面单元相结合,用于描述砂土与混凝土界面剪应力与剪切位移之间的非线性弹性响应特征。张冬霖等^[32]构建了一种能够反映剪切错动带应力变形特性的非线性弹性模型,并以应力水平 (S) 作为判据:当 $S < 0.99$ 时采用双曲线模型;当 $S \geq 0.99$ 时转为塑性流动模型。栾茂田等^[122]提出了一种适用于桩土界面的非线性弹性-理想塑性模型,能够同时反映弹性剪切变形、塑性滑移变形以及法向和切向之间的变形耦合。

在弹塑性模型方面,Boulon 等^[123]提出的模型

适用于单调和循环荷载条件,能够描述砂土与结构界面的应变硬化、软化及剪胀特性;陈慧远^[124]针对陡倾土与结构界面建立了考虑弹塑性变形的无厚度界面模型;D’ Aguiar 等^[4]提出了三维弹塑性模型,用于模拟复杂应力状态下桩土界面的收缩与剪胀行为;Saber 等^[125-126]进一步构建了双面塑性及三维弹塑性模型,引入了相变、应力路径依赖性、循环累积变形和颗粒破碎等多重机制,显著提升了对砾石土、砂土与结构界面在循环荷载下响应行为的预测能力。在刚塑性模型方面,以殷宗泽等^[24]提出的模型为代表,结合薄层单元可模拟单调荷载作用下土与混凝土界面的滑动与拉裂破坏行为。

近年来,损伤模型的发展较为迅速。例如:胡黎明等^[72]和张嘎等^[127]分别提出了适用于砂土与钢板界面以及粗粒土与混凝土界面的弹塑性损伤模型,结合有厚度单元可模拟应变软化、剪胀及变形耦合等现象;杨林德等^[128]和夏红春等^[129]基于统计损伤理论,分别构建了适用于砂土与钢板界面的应变软化模型以及考虑低法向应力下软化行为的 Weibull 分布模型;李赛等^[130]和李怀鑫等^[131]对统计损伤模型进行了改进,分别实现了对桩土界面刚度非线性变化以及不同粗糙度条件下黏土与结构界面硬化及软化行为的准确描述。

此外,部分模型还考虑了时间效应和黏塑性变形机制,如钱家欢^[132]和安关峰等^[133]分别提出的弹黏塑性模型及其三维扩展形式,能够反映土与结构界面的时变变形特性。

总体来看,土与结构界面本构模型的研究取得了显著进展。在研究条件方面,已从单调加载扩展至循环加载,研究对象涵盖了砂土、黏土、粗粒土以

表 1 无厚度 Goodman 单元和有厚度 Desai 薄层单元选取依据对比

对比维度	无厚度 Goodman 单元	有厚度 Desai 薄层单元
核心理论	假定界面由无数微观弹簧连接,忽略其物理厚度,仅保留几何长度属性	将界面区视为具有特殊材料属性、厚度极薄的实体单元
应力-位移关系式	$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_n \\ \omega_s \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} tK_{nn} & tK_{ns} \\ tK_{sn} & tK_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_n \\ e_s \end{bmatrix}$
关键参数	法向劲度系数 K_n 、切向劲度系数 K_s	单元厚度 t 、法向劲度系数 K_{nn} 、切向劲度系数 K_{ss}
模拟行为	滑移与开裂两种基本状态	黏结、滑移、张开和闭合等多种复杂状态
主要优势	概念简明、参数少;在简单剪切主导问题中应用简便有效	从根本上避免嵌入问题;有效模拟剪切破坏带;更能真实地反映接触行为
主要局限	材料错动严格沿界面发生;忽略法向与切向耦合效应;需处理嵌入问题,法向刚度取值随意;无法模拟黏结、闭合等复杂行为	单元厚度 t 取值依赖经验;厚度取值不当易引起数值病态或物理意义失真
适用工程场景	界面力学行为相对简单的工程问题,如以剪切滑移为主的桩土界面;常规坝基接触问题分析	界面力学行为相对复杂的工程问题,如存在明显剪切错动带的坝体与防渗墙界面;地震荷载下需模拟开合、黏结等强非线性接触行为
选择依据	界面简单力学行为的初步分析;以剪切滑移为主导的界面行为;工程规模大,对计算效率要求高	需精确模拟界面的复杂非线性行为;物理试验表明界面附近存在剪切带;复杂条件下计算精度高于计算效率
案例参考	沙湾水电站基坑围堰与防渗墙界面分析(何江达等 ^[114])	小浪底土坝防渗墙分析(殷宗泽等 ^[24])

注: σ_n 为法向应力; τ 为剪应力; ω_n 、 e_n 均为法向相对位移; ω_s 、 e_s 均为切向相对位移; K_{ns} 、 K_{sn} 为法向和切向间的耦合系数。

及冻土等多种土体类型,并逐步引入了颗粒破碎^[17]、动力作用^[134]等复杂因素。模型维度实现了从二维简化分析到三维精细化模拟的过渡,本构理论也由传统的非线性弹性与弹塑性模型逐步发展出更为先进的损伤力学模型、循环本构模型以及多因素耦合模型。与此同时,以数据驱动为特征的智能本构模型研究已初现端倪。部分学者通过机器学习方法构建应力-应变响应预测模型^[135],或基于ABAQUS、FLAC^{3D}等数值计算平台开展二次开发及子程序嵌入^[125,130],显著提升了复杂界面力学行为的计算效率与模拟精度,为真正实现具备自主学习与推理能力的智能模拟奠定了重要基础。尽管当前研究已取得丰硕成果,但现有模型在常规与极端复杂工况下的适用性、精准度及可靠性方面仍面临显著挑战。未来研究应进一步致力于提升本构理论的普适性、深化多场耦合机制的描述能力、发展可靠高效的智能化模拟方法,以推动界面本构模型在重大水利工程中的广泛应用。

5 总结与展望

土与结构界面力学特性研究经过数十年的发展,已在试验方法、理论模型和数值模拟等方面取得了系统性成果:在试验方法方面,由传统的直剪、单剪逐步发展为可模拟复杂应力状态的大型化、三维化及智能化设备,观测手段也从宏观力学测量拓展至细观尺度颗粒运动分析;在理论模型方面,从简单的弹性、弹塑性模型向考虑损伤演化、循环荷载响应以及多场耦合作用的复杂本构模型演进;在数值模拟方面,薄层单元法的应用显著提升了对界面复杂力学行为的模拟能力。研究成果为深入理解土与结构的相互作用机理提供了坚实的理论基础和技术支撑。

在高坝建设及复杂地质环境对工程安全提出更高要求的背景下,土与结构界面力学特性的研究仍需在以下几个方面实现重点突破:①发展高精度、多尺度的室内试验技术与设备,融合透明土、粒子图像测速等可视化观测技术,从宏观-微观层面系统揭示界面在复杂应力状态及大剪切变形下的力学行为与演化机制;②研制可模拟应力-渗流-温度多场耦合环境的界面力学试验系统,揭示长期复杂环境条件下界面力学行为的演变规律,建立考虑多场耦合效应的界面力学性能演化模型;③系统开展基于土体粒径、结构物表面粗糙度及应力条件等多参数的界面厚度量化研究,完善薄层单元理论框架下的高精度数值模拟方法;④在传统本构理论中引入机器学习算法,发展具有参数智能反演和自适应能力的

本构模型,提升模型在不同工程场景中的适用性及长期力学行为预测的可靠性。通过上述方向的持续探索,有望推动土与结构界面力学特性研究向深入化、精细化、智能化方向发展,为重大水利工程的设计优化与长期安全评估提供坚实的理论支撑与技术保障。

参考文献:

[1] PANG Li, JIANG Chong, DING Xin, et al. A parameter calibration method in two-surface elastoplastic model for sand-structure interface under monotonic shear loading [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134: 104115.

[2] HOSSEINALI M, TOUFIGH V. A plasticity-based constitutive model for the behavior of soil-structure interfaces under cyclic loading [J]. Transportation Geotechnics, 2018, 14: 41-51.

[3] DHADSE G D, RAMTEKKAR G, BHATT G. A succinct review on soil structure interface thickness [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30 (6) : 3969-3976.

[4] D' AGUIAR S C, MODARESSI-FARAHMAND-RAZAVI A, DOS SANTOS J A, et al. Elastoplastic constitutive modelling of soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38 (4) : 430-447.

[5] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (1) : 21-25. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 21-25. (in Chinese))

[6] XU Jin, LIU Jiaying, SHI Xiusong, et al. DEM investigation of the effect of coarse content and size ratio on the local shear behavior at gap-graded soil-structure interface [J]. Powder Technology, 2024, 433: 119281.

[7] PAN Jingjing, WANG Boxin, WANG Qing, et al. Effects of roughness on the shear zone of clay-concrete interface [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 169: 109229.

[8] RUI Shengjie, WANG Lizhong, GUO Zhen, et al. Cyclic behavior of interface shear between carbonate sand and steel [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(1): 189-209.

[9] SABERI M, ANNAN C D, KONRAD J M. On the mechanics and modeling of interfaces between granular soils and structural materials [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(4): 1562-1579.

[10] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 139-149.

[11] MARTINEZ A, FROST J D, HEBELER G L. Experimental study of shear zones formed at sand/steel interfaces in

- axial and torsional axisymmetric tests [J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(4): 409-426.
- [12] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431-435. (HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435. (in Chinese))
- [13] 张嘎,张建民,梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 903-907. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, LIANG Dongfang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 903-907. (in Chinese))
- [14] DE GENNARO V, PANDE G N, LERAT P. Stability problems in soil-structure interfaces: experimental observations and numerical study[J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2(2): 175-203.
- [15] 蔡正银,范开放,朱洵. 考虑循环软化的非线性界面本构模型研究[J/OL]. 岩土工程学报, 1-11. (2025-05-20) [2025-06-29]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250520.1014.002>. (CAI Zhengyin, FAN Kaifang, ZHU Xun. Research on nonlinear constitutive model of interface considering cyclic softening [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1-11. (2025-05-20) [2025-06-29]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250520.1014.002>. (in Chinese))
- [16] 王艳丽,饶锡保,潘家军,等. 砂砾石垫层料与混凝土面板接触面特性的大型单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1538-1544. (WANG Yanli, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. Mechanical behaviors of interface between sand-gravel cushion material and concrete face slab by large-scale simple shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1538-1544. (in Chinese))
- [17] LI Tongda, QIAN Yu, LIANG Fayun, et al. A constitutive model for the gravelly soil-structure interface considering particle breakage and fabric change [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105908.
- [18] 韩华强,陈生水. 高土石坝中接触问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 89-94. (HAN Huaqiang, CHEN Shengshui. Research progress on the contact problems of high earth-rock dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(2): 89-94. (in Chinese))
- [19] 刘杰. 八一水库溃坝原因分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(3): 161-166. (LIU Jie. Analysis of dam break of Bayi Reservoir [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(3): 161-166. (in Chinese))
- [20] 郝锋平. 曲亭水库水毁修复设计洪水计算[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn <http://jour.hhu.edu.cn>
- 与工程技术, 2016(3): 22-23. (HAO Fengping. The flood calculation in the design of Quting Reservoir water damage restoration [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2016(3): 22-23. (in Chinese))
- [21] SHERARD J L. Lessons from the Teton Dam failure [J]. Engineering Geology, 1987, 24(1/4): 239-256.
- [22] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials [J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [23] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793-815.
- [24] 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. (YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 14-22. (in Chinese))
- [25] YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. A study of deformation in the interface between soil and concrete [J]. Computers and Geotechnics, 1995, 17(1): 75-92.
- [26] 李登华,酆能惠. 土与结构接触面试验仪的研制与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(3): 390-393. (LI Denghua, LI Nenghui. Development and application of test apparatus for soil-structure interface [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(3): 390-393. (in Chinese))
- [27] 李邵军,孟凡震,陈静,等. 土与结构相互作用的可视化剪切试验装置研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 180-188. (LI Shaojun, MENG Fanzhen, CHEN Jing, et al. Development of shear test device with interface visualization for soil-structure interaction and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 180-188. (in Chinese))
- [28] 张建民,侯文峻,张嘎,等. 大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 889-894. (ZHANG Jianmin, HOU Wenjun, ZHANG Ga, et al. Development and application of 3D soil-structure interface test apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 889-894. (in Chinese))
- [29] 冯大阔,张建民. 应力幅值比对土-结构接触面非共轴特性影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3047-3058. (FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Role of stress amplitude ratio in the non-coaxial behavior of the interface between gravel and structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3047-3058. (in Chinese))
- [30] 王永洪,张明义,刘俊伟,等. 一种大型桩土界面直剪试验装置的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊1): 3714-3721. (WANG Yonghong, ZHANG

- Mingyi, LIU Junwei, et al. Development and application of a large-scale shear test apparatus of pile-soil interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3714-3721. (in Chinese))
- [31] 赵联桢, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 707-713. (ZHAO Lianzhen, YANG Ping, WANG Haibo. Development and application of large-scale multi-functional frozen soil-structure interface cycle-shearing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 707-713. (in Chinese))
- [32] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 62-66. (ZHANG Dongji, LU Tinghao. Establishment and application of a interface model between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 62-66. (in Chinese))
- [33] 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. (GAO Junhe, YU Haixue, ZHAO Weibing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 42-46. (in Chinese))
- [34] 郭佳奇, 刘希亮, 苏承东. 高应力下砂土与结构界面单剪试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 120-126. (GUO Jiaqi, LIU Xiliang, SU Chengdong. Simple shear test of interface between sand and structure under high stress [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(4): 120-126. (in Chinese))
- [35] 周爱兆, 卢廷浩, 吴世龙. 土与结构接触面等应力增量比路径单剪试验力学特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 32-35. (ZHOU Aizhao, LU Tinghao, WU Shilong. Mechanical characteristics of the soil-structure interface in response to simple shear tests under constant stress increment ratio paths [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 32-35. (in Chinese))
- [36] 冯大阔, 张建民. 法向应力对接触面循环单剪力学特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 18-26. (FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Effect of normal stress on cyclic simple-shear behavior of gravel-structure interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 18-26. (in Chinese))
- [37] 周爱兆, 卢廷浩, 刘尧. 土与结构接触面力学特性研究现状与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 524-528. (ZHOU Aizhao, LU Tinghao, LIU Yao. Current research and prospect of mechanical behaviors of soil-structure interfaces [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(5): 524-528. (in Chinese))
- [38] YOSHIMI Y, KISHIDA T. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces [J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, 4(4): 145-152.
- [39] 杨有莲, 朱俊高, 余挺, 等. 土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3256-3260. (YANG Youliang, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Experimental study of mechanical behaviour of soil-structure interface by ring shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3256-3260. (in Chinese))
- [40] 朱俊高, SHAKIR R R, 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692-696. (ZHU Jungao, SHAKIR R R, YANG Youlian, et al. Comparison of behaviors of soil-concrete interface from ring-shear and simple shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692-696. (in Chinese))
- [41] 王湛, 陈立鹏, 桑登峰, 等. 基于大型高围压界面环剪仪的钢管桩-砂土界面剪切试验研究[J]. 水运工程, 2018(1): 184-188. (WANG Zhan, CHEN Lipeng, SANG Dengfeng, et al. Steel-sand interface shear tests based on high confining pressure torsional shear device [J]. Port & Waterway Engineering, 2018(1): 184-188. (in Chinese))
- [42] 林楠, 叶冠林, 王建华. 气动式四向控制空心圆柱扭剪仪的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1642-1651. (LIN Nan, YE Guanlin, WANG Jianhua. Development and application of pneumatic hollow cylinder apparatus with four-direction dynamic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1642-1651. (in Chinese))
- [43] 雷红军, 刘中阁, 于玉贞, 等. 黏土-结构接触面大剪切变形后渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1040-1044. (LEI Hongjun, LIU Zhongge, YU Yuzhen, et al. Experimental study of seepage characteristics of clayey soil-structure interface under large shear deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1040-1044. (in Chinese))
- [44] 俞培基, 秦蔚琴. 在共振柱仪上研究接触面的动力变形特性[J]. 水利学报, 1995, 27(1): 81-85. (YU Peiji, QIN Weiqin. Cyclic deformation behavior of interface studied on resonant column test device [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 27(1): 81-85. (in Chinese))
- [45] 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): 149-153. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 149-153. (in Chinese))
- [46] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(12): 1657-1673.

- [47] 赵程,谢俊飞,王文东,等.粗砂与结构物接触面的剪切特性试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019,47(10):1406-1413. (ZHAO Cheng, XIE Junfei, WANG Wendong, et al. Experimental study on shear behavior of interface between coarse sand and structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019,47(10):1406-1413. (in Chinese))
- [48] 郭聚坤,雷胜友,王瑞,等.结构物-标准砂界面剪切机理试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(3):722-733. (GUO Jukun, LEI Shengyou, WANG Rui, et al. Study on interface shear mechanism between structures and standard sand [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (3): 722-733. (in Chinese))
- [49] ZHANG Shixun, LIU Feiyu, YING Mengjie, et al. Experimental and DEM analysis for the shear characteristics of interface between sand and irregular concrete under dynamic normal loading [J]. Computers and Geotechnics,2024,173:106514.
- [50] 刘方成,尚守平,王海东.粉质黏土-混凝土接触面特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1720-1728. (LIU Fangcheng, SHANG Shouping, WANG Haidong. Study of shear properties of silty clay-concrete interface by simple shear tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (8):1720-1728. (in Chinese))
- [51] 龚辉,赵春风,陶帼雄,等.应力历史对黏土-混凝土界面剪切特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1712-1719. (GONG Hui, ZHAO Chunfeng, TAO Guoxiong, et al. Research on effect of stress history on shear behavior of interface between clay and concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8):1712-1719. (in Chinese))
- [52] HE Zhijun, MO Haiqiang, SIGA A, et al. Research on the parameters of nonlinear hyperbolic model for clay-geogrid interfaces based on large scale direct shear tests [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 18:39-45.
- [53] 张磊,刘慧,王铁行.固结与不固结条件下黄土-混凝土接触面剪切试验[J]. 岩土力学,2018,39(增刊2):238-244. (ZHANG Lei, LIU Hui, WANG Tiehang. Shear tests on loess-concrete interface under consolidation and unconsolidation conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup2):238-244. (in Chinese))
- [54] 高登辉,邢义川,郭敏霞,等.非饱和和重塑黄土-混凝土接触面修正双曲线模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(1):156-164. (GAO Denghui, XING Yichuan, GUO Minxia, et al. Modified hyperbola model of interface between unsaturated remolded loess and concrete [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1):156-164. (in Chinese))
- [55] 陈俊桦,张家生,李键.接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(5):1682-1688. (CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Jian. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5):1682-1688. (in Chinese))
- [56] 谢一鸣,陈拓,王建州,等.冻结黏土-混凝土界面动力剪切特性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(9):2637-2646. (XIE Yiming, CHEN Tuo, WANG Jianzhou, et al. Study on dynamic shear characteristics of frozen clay-concrete interface [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (9): 2637-2646. (in Chinese))
- [57] 张致远,钱建固,王成.非饱和膨胀土-桩界面大型剪切试验与本构模拟[J]. 岩土工程学报,2022,44(增刊2):207-210. (ZHANG Zhiyuan, QIAN Jiangu, WANG Cheng. Large-scale shear tests and constitutive modeling of unsaturated expansive soil-pile interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (Sup2): 207-210. (in Chinese))
- [58] 李建华,祝方才,廖新贵.土与结构物的接触特性研究[J]. 湖南工业大学学报,2009,23(3):1-4. (LI Jianhua, ZHU Fangcai, LIAO Xingui. Study on contact characteristics between soil and structure [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23 (3): 1-4. (in Chinese))
- [59] 庄丽,宫全美.减围压平面应变压缩试验条件下丰浦砂中剪切带特性研究[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):201-208. (ZHUANG Li, GONG Quanmei. Shear band characteristics of Toyoura sand in plane strain compression with decreasing confining pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup1):201-208. (in Chinese))
- [60] 卢廷浩,王伟,王晓妮.土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(1):82-85. (LU Tinghao, WANG Wei, WANG Xiaoni. Experimental study on soil-structure contact surface behavior by improved direct shear tests [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006, 22 (1):82-85. (in Chinese))
- [61] 王伟,张芳,孙斌祥.土-结构接触面剪切试验与应力-位移模型[J]. 煤炭学报,2011,36(9):1469-1473. (WANG Wei, ZHANG Fang, SUN Binxiang. Tested and modeled shear stress-displacement behavior of soil-structure interface [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9):1469-1473. (in Chinese))
- [62] 王永洪,张明义,白晓宇,等.不同含水率状态下黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(1):118-123. (WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, et al. Laboratory experimental study on shear behavior of clayey soil-concrete interface under different moisture conditions [J].

- Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 118-123. (in Chinese))
- [63] 张大伟,钱振豪,冯恣,等. 双向循环荷载下橡胶砾石-土工格栅界面剪切特性[J]. 振动与冲击, 2025, 44(2): 199-209. (ZHANG Dawei, QIAN Zhenhao, FENG Min, et al. Shear characteristics of rubber gravel geogrid interface under bidirectional cyclic loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(2): 199-209. (in Chinese))
- [64] 王军,施静,刘飞禹,等. 砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 109-117. (WANG Jun, SHI Jing, LIU Feiyu, et al. Effect of particle gradation on static and dynamic direct shear properties of geogrid-sand interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 109-117. (in Chinese))
- [65] 王伯昕,刘佳奇,王清,等. 冻融循环条件下粉质黏土-混凝土界面细观损伤及宏观剪切性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊1): 3792-3800. (WANG Boxin, LIU Jiaqi, WANG Qing, et al. Study of meso-damage and macroscopic shear performance of silty clay-concrete interface under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Sup1): 3792-3800. (in Chinese))
- [66] SU Lijun, ZHOU Wanhuan, CHEN Weibin, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J]. Measurement, 2018, 122: 339-346.
- [67] XIAO Shuxiong, ZHANG Yaguo, YANG Yun, et al. An elastoplastic model for unsaturated soil-structure interfaces considering different initial states, boundary conditions and suctions[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 167: 106123.
- [68] HUANG Wanjuan, MAO Xuesong, WU Qian, et al. Experimental study on shear characteristics of the silty clay soil-ice interface[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 19687.
- [69] 成浩,曾国东,周敏,等. 考虑粗糙度影响的黏土-混凝土接触面峰值剪切强度模型研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 168-177. (CHENG Hao, ZENG Guodong, ZHOU Min, et al. Peak shear strength model for clay-concrete interface considering roughness[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 168-177. (in Chinese))
- [70] 陈琛,冷伍明,杨奇,等. 考虑粗糙度和相对密实度下砂土-混凝土桩接触面力学特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 225-236. (CHEN Chen, LENG Wuming, YANG Qi, et al. Experimental study on mechanical properties of sand-concrete pile interface considering roughness and soil relative densities[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(11): 225-236. (in Chinese))
- [71] TSUBAKIHARA Y, KISHIDA H. Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(2): 1-13.
- [72] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 6-11. (HU Liming, PU Jialiu. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 6-11. (in Chinese))
- [73] 金子豪,杨奇,陈琛,等. 粗糙度对混凝土-砂土接触面力学特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 754-765. (JIN Zihao, YANG Qi, CHEN Chen, et al. Experimental study on effects of the roughness on mechanical behaviors of concrete-sand interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 754-765. (in Chinese))
- [74] WANG Youbao, ZHAO Chunfeng, WU Yue. Study on the effects of grouting and roughness on the shear behavior of cohesive soil-concrete interfaces[J]. Materials, 2020, 13(14): 3043.
- [75] 蒋中明,肖喆臻,袁振,等. 压剪条件下 FRP-混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(2): 24-30. (JIANG Zhongming, XIAO Zhezhen, YUAN Zhen, et al. Experimental study on bond behavior of FRP-concrete interface under compression and shear conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(2): 24-30. (in Chinese))
- [76] 陈俊桦,张家生,李键. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 22-30. (CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Jian. Experimental research on mechanical characteristics of cohesive soil-structure interface by considering its roughness[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(4): 22-30. (in Chinese))
- [77] 张雷,黄飞亚,张英豪,等. 水性环氧砂浆与混凝土界面剪切性能试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 39-43. (ZHANG Lei, HUANG Feiya, ZHANG Yinghao, et al. Experimental study on shear performance of waterborne epoxy mortar and concrete interface[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 39-43. (in Chinese))
- [78] 汪优,李奕金,谭伟,等. 考虑结构表层粗糙度的混凝土桩-黏土界面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2502-2509. (WANG You, LI Yijin, TAN Wei, et al. Experimental study on shear properties of concrete pile-clay interface considering surface roughness of structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2502-2509. (in Chinese))
- [79] 陆勇,周国庆,夏红春,等. 中、高压下粗粒土-结构接触面特性受结构面形貌尺度影响的试验研究[J]. 岩土力

- 学, 2013, 34 (12): 3491-3499. (LU Yong, ZHOU Guoqing, XIA Hongchun, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3491-3499. (in Chinese))
- [80] 蒋雅君,陶双江.隧道工程喷射混凝土衬砌基面粗糙度的面积扩大系数评定方法[J].铁道学报,2010,32 (3): 95-99. (JIANG Yajun, TAO Shuangjiang. Area-expanding coefficient evaluation method for roughness of shotcrete lining surfaces in tunnel engineering[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32 (3): 95-99. (in Chinese))
- [81] ZHANG Kun, YAN Jianglin, MU Yanhu, et al. Global and local shear behavior of the frozen soil-concrete interface: effects of temperature, water content, normal stress, and shear rate[J]. Buildings, 2024, 14(10): 3319.
- [82] 刘尧,卢廷浩.粗粒土大型单剪颗粒破碎试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(2): 175-178. (LIU Yao, LU Tinghao. Large-scale simple shear tests of particle breakage of coarse-grained soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(2): 175-178. (in Chinese))
- [83] 杨俊超,夏元友,崔飞龙,等.循环荷载作用下粉质黏土-混凝土界面强度预测研究[J].岩土工程学报,2024,46 (增刊 2): 194-199. (YANG Junchao, XIA Yuanyou, CUI Feilong, et al. Prediction of strength of silty clay-concrete interface under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 (Sup2): 194-199. (in Chinese))
- [84] ZHANG Shixun, LIU Feiyu, ZENG Weixiang, et al. Macro and mesoscopic shear behavior of interface between sand and concrete with different *JRC* under cyclic load [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(9): 6091-6116.
- [85] 王永洪,张明义,白晓宇,等.剪切速率对黏性土-混凝土界面抗剪强度影响的试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1): 48-54. (WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, et al. Experimental research on effect of shear rate on shear strength of clayey soil-concrete interface [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 48-54. (in Chinese))
- [86] ZHENG Zheng, HESHAM E N M, YANG Qing, et al. Shearing rate effects on mechanical characteristics of deep-sea soil-structure interface [J]. Acta Geotechnica, 2025, 20(6): 2625-2640.
- [87] 刘蓓.红黏土与混凝土结构接触面力学特性的试验研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [88] 汪优,任加琳,李赛,等.土-结构接触面剪切全过程本构关系研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(3): 144-152. (WANG You, REN Jialin, LI Sai, et al. Study on shear constitutive relation of soil-structure interface in whole process [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48 (3): 144-152. (in Chinese))
- [89] XIAO Yang, CUI Hao, SHI Jinquan, et al. Shear response of calcareous sand-steel snake skin-inspired interfaces [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(3): 1517-1527.
- [90] 曹苏南,李春红,陈远兵,等.循环荷载作用下砂土-结构物仿生界面剪切特性研究[J].岩土力学,2025,46 (3): 821-832. (CAO Sunan, LI Chunhong, CHEN Yuanbing, et al. Shear characteristics of biomimetic sand-structure interface under cyclic loading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46 (3): 821-832. (in Chinese))
- [91] 李天降,陈雪峰,陈伟超,等.砂土与混凝土顶管界面摩擦特性试验研究[J].地质科技通报,2021,40(6): 178-184. (LI Tianjiang, CHEN Xuefeng, CHENG Weichao, et al. Experimental study on interface frictional property between sand and concrete pipe jacking [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40 (6): 178-184. (in Chinese))
- [92] 王永洪,张明义,刘俊伟,等.超孔隙水压力对低塑性黏性土桩土界面抗剪强度的影响[J].岩土力学,2018,39 (3): 831-838. (WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Junwei, et al. Influence of excess pore water pressure on shear strength of pile-soil interface in clayey soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (3): 831-838. (in Chinese))
- [93] 岳娟,盛金昌,王惠民,等.岩石-混凝土界面抗剪强度劣化研究进展[J].水利水电科技进展,2022,42(5): 15-21. (YUE Juan, SHENG Jinchang, WANG Huimin, et al. Research progress on shear strength deterioration of rock-concrete interface [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 15-21. (in Chinese))
- [94] PAN Jingjing, WANG Boxin, WANG Qing, et al. Deformation characteristics of the shear band of silty clay-concrete interface under the influence of freeze-thaw [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 206: 103750.
- [95] 张显扬,王建群,王同奎.西藏的水土流失特点及水土保持工作[J].水利水电科技进展,2005,25(4): 45-48. (ZHANG Xianyang, WANG Jianqun, WANG Tongkui. Water and soil loss in Tibet and measures for conservation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(4): 45-48. (in Chinese))
- [96] 梁越,储昊,曾超.干湿循环作用下钢-土界面剪切特性试验[J].水利水电科技进展,2016,36(1): 49-52. (LIANG Yue, CHU Hao, ZENG Chao. Experimental study on shear characteristics at steel-soil interface with drying-wetting cycles [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 49-52. (in Chinese))
- [97] WANG Tianliang, WANG Haihang, HU Tianfei, et al. Experimental study on the mechanical properties of soil-

- p>structure interface under frozen conditions using an improved roughness algorithm[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 62-68.
- [98] 何鹏飞, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对冻土-混凝土界面冻结强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 299-307. (HE Pengfei, MA Wei, MU Yanhu, et al. Experiment study on effects of freeze-thaw cycles on adfreezing strength at frozen soil-concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 299-307. (in Chinese))
- [99] WANG Boxin, LIU Jiaqi, WANG Qing, et al. Influence of freeze-thaw cycles on the shear performance of silty clay-concrete interface [J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 219: 104120.
- [100] 黄小芸, 邓华锋, 李建林, 等. 干湿循环作用下土-岩接触面剪切力学特性劣化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 416-425. (HUANG Xiaoyun, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Experimental study on the deterioration law of shear mechanical properties of soil-rock interface under dry-wet cycle action[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 416-425. (in Chinese))
- [101] WANG Lijie, CHOU Yaling. Experimental study on direct shear mechanical behavior of unsaturated loess-steel interface considering freeze-thaw cycles [J]. Indian Geotechnical Journal, 2023, 53(3): 523-537.
- [102] YAZDANI S, HELWANY S, OLGUN G. Influence of temperature on soil-pile interface shear strength [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2019, 18: 69-78.
- [103] 张丙印, 温彦锋, 朱本珍, 等. 土工构筑物和边坡工程发展综述: 作用机理与数值模拟方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(8): 1-15. (ZHANG Bingyin, WEN Yanfeng, ZHU Benzhen, et al. Action mechanism and numerical simulation methods of soil structures and slope engineering: the state-of-the-art [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8): 1-15. (in Chinese))
- [104] ODEN J T, KIKUCHI N. Finite element methods for constrained problems in elasticity [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1982, 18(5): 701-725.
- [105] CHAUDHARY A B, BATHE K J. A solution method for static and dynamic analysis of three-dimensional contact problems with friction [J]. Computers & Structures, 1986, 24(6): 855-873.
- [106] 王水林, 邓建辉, 葛修润. 改进的拉氏乘子法在接触摩擦问题中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 64-67. (WANG Shuilin, DENG Jianhui, GE Xiurun. Application of augmented Lagrangian method in frictional contact problem [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 64-67. (in Chinese))
- [107] 张建民, 张嘎. 土与结构接触面力学特性研究进展 [C]//中国力学学会学术大会'2005 论文摘要集(上). 北京: 中国力学学会, 2005: 1.
- [108] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(3): 637-659.
- [109] XUE Xinhua, YANG Xingguo, LIU Enlong. Application of the modified Goodman model in soil nailing [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(1): 41-48.
- [110] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 土-界面-结构体系计算模型研究进展[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 397-405. (KONG Xianjing, LIU Jingmao, ZOU Degao, et al. State-of-the-art: computational model for soil-interface-structure system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 397-405. (in Chinese))
- [111] DAY R A, POTTS D M. Zero thickness interface elements: numerical stability and application [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1994, 18(10): 689-708.
- [112] 李守德, 俞洪良. Goodman 接触面单元的修正与探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2628-2631. (LI Shoude, YU Hongliang. Modification of Goodman interface element [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2628-2631. (in Chinese))
- [113] 李同录, 王海涛, 袁思凡, 等. 一种土与结构相互作用的无嵌入摩擦单元及其应用[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 245-254. (LI Tonglu, WANG Haitao, YUAN Sifan, et al. Non-overlapping friction element for soil-structure interaction and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 245-254. (in Chinese))
- [114] 何江达, 谢红强, 王启智, 等. 不同介质接触面单元切向刚度系数的敏感性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(2): 6-11. (HE Jiangda, XIE Hongqiang, WANG Qizhi, et al. Sensitivity analysis of tangential stiffness coefficient for contact surface element of different medium [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(2): 6-11. (in Chinese))
- [115] DESAI C S, ZAMAN M M, LIGHTNER J G, et al. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 19-43.
- [116] 武亚军, 栾茂田, 杨敏. 土与结构间一种新的接触单元模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 432-435. (WU Yajun, LUAN Maotian, YANG Min. New contact element of interface between soil and structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),

- 2005,33(4):432-435. (in Chinese))
- [117] 邵炜,金峰,王光纶. 用于接触面模拟的非线性薄层单元[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(2):34-38. (SHAO Wei,JIN Feng,WANG Guanglun. Nonlinear thin-layer element for modeling interface[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology),1999,39(2):34-38. (in Chinese))
- [118] 苗雨,李威,郑俊杰,等. 改进的薄层单元在桩-土动力相互作用中的应用[J]. 岩土力学,2015,36(11):3223-3228. (MIAO Yu,LI Wei,ZHENG Junjie, et al. Application of modified thin layer element to the analysis of dynamic pile-soil interaction [J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(11):3223-3228. (in Chinese))
- [119] MIAO Yu, YAO Erlei, LUO Hui, et al. Seismic behavior of soil-pile-structure interaction with a modified Desai thin-layer interface element[J]. Advances in Mechanical Engineering,2016,8(12).
- [120] 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. (LU Tinghao,BAO Fubo. A coupled constitutive model for interface thin-layer element[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000(2):71-75. (in Chinese))
- [121] 侯文峻. 土与结构接触面三维静动力变形规律与本构模型研究[D]. 北京:清华大学,2008.
- [122] 栾茂田,武亚军. 土与结构间接接触面的非线性弹性-理想塑性模型及其应用[J]. 岩土力学,2004,25(4):507-513. (LUAN Maotian, WU Yajun. A nonlinear elasto-perfectly plastic model of interface element for soil-structure interaction and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (4): 507-513. (in Chinese))
- [123] BOULON M, NOVA R. Modelling of soil-structure interface behaviour a comparison between elastoplastic and rate type laws [J]. Computers and Geotechnics, 1990,9(1/2):21-46.
- [124] 陈慧远. 摩擦接触单元及其分析方法[J]. 水利学报,1985(4):44-50. (CHEN Huiyuan. Frictional contact element and its analysis method[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1985(4):44-50. (in Chinese))
- [125] SABERI M, ANNAN C D, KONRAD J M. Implementation of a soil-structure interface constitutive model for application in geo-structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,116:714-731.
- [126] SABERI M, ANNAN C D, KONRAD J M. Three-dimensional constitutive model for cyclic behavior of soil-structure interfaces [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2020,134:106162.
- [127] 张嘎,张建民. 土与结构接触面弹塑性损伤模型用于单桩与地基相互作用分析[J]. 工程力学,2006,23(2):72-77. (ZHANG Ga,ZHANG Jianmin. Elastoplastic damage model of soil-structure interface in single pile-soil interaction analysis [J]. Engineering Mechanics, 2006,23(2):72-77. (in Chinese))
- [128] 杨林德,刘齐建. 土-结构物接触面统计损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(1):79-82. (YANG Linde,LIU Qijian. Research on statistical damage model for soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,2(1):79-82. (in Chinese))
- [129] 夏红春,周国庆,商翔宇. 基于 Weibull 分布的土-结构接触面统计损伤软化本构模型[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(6):734-737. (XIA Hongchun, ZHOU Guoqing, SHANG Xiangyu. Statistical damage softening constitutive model of soil-structure interface based on Weibull random distribution [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36 (6): 734-737. (in Chinese))
- [130] 李赛,汪优,秦志浩,等. 基于统计损伤本构模型的改进桩-土接触面模型研究[J]. 岩土力学,2016,37(7):1947-1955. (LI Sai, WANG You, QIN Zhihao, et al. An improved constitutive model for pile-soil interface based on a statistical damage constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(7):1947-1955. (in Chinese))
- [131] 李怀鑫,晏长根,石玉玲,等. 基于损伤耦合演化过程的黏土-结构物界面统计损伤本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(6):2260-2272. (LI Huaixin, YAN Changgen, SHI Yuling, et al. A statistical damage constitutive model for clay-concrete interface based on damage coupling evolution process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024,55(6):2260-2272. (in Chinese))
- [132] 钱家欢. 接触面剪切流变特性试验研究[G]//岩土与土工建筑物共同作用研究成果汇编. 南京:河海大学,1990:228-234.
- [133] 安关峰,高大钊. 接触面弹黏塑性本构关系研究[J]. 土木工程学报,2001,34(1):88-91. (AN Guanfeng, GAO Dazhao. Research on elastic-visco-plastic constitution of interfaces [J]. China Civil Engineering Journal,2001,34(1):88-91. (in Chinese))
- [134] JIANG Haibo,ZHOU Shunhua, GUO Peijun. Constitutive modelling of a dry sand-structure interface under high-frequency vibration with a constant normal load [J]. Computers and Geotechnics,2024,175:106686.
- [135] 周攀,李镜培,李盼盼,等. 基于界面本构模型的砂土中单桩荷载-沉降响应预测方法[J]. 岩土力学,2024,45(6):1686-1698. (ZHOU Pan, LI Jingpei, LI Panpan, et al. Prediction method for load-settlement response of a single pile in sand based on an interface constitutive model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (6): 1686-1698. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-29 编辑:俞云利)