

DOI: 10.11779/CJGE202103001

# 土-界面-结构体系计算模型研究进展

孔宪京<sup>1,2</sup>, 刘京茂<sup>1,2</sup>, 邹德高<sup>1,2</sup>, 宋永臣<sup>1,2,3</sup>, 陈楷<sup>1,2</sup>, 屈永倩<sup>1,2</sup>, 龚瑾<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工程抗震研究所水利工程学院, 辽宁 大连 116024;  
3. 大连理工大学能源动力学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 土与结构的相互作用是水利和土木工程的一个关键共性问题, 其分析是揭示工程中结构损伤破坏机理的重要环节。将土-界面-结构作为一个体系进行整体分析是精细研究土-结构相互作用的基础, 但在大型工程应用时面临着一系列难题, 包括: 土-结构接触边界约束, 土-结构接触力学特性, 以及土-界面-结构体系建模和分析等。本文对这些问题的相关研究进行了综述和总结, 并对今后的主要发展方向提出了建议。

**关键词:** 土-结构相互作用; 接触面; 弹塑性; 跨尺度; 比例边界有限元

**中图分类号:** TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)03-0397-09

**作者简介:** 孔宪京(1952—), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要从事高土石坝抗震和岩土地震工程方面的研究工作。E-mail: kongxj@dlut.edu.cn。

## State-of-the-art: computational model for soil-interface-structure system

KONG Xian-jing<sup>1,2</sup>, LIU Jing-mao<sup>1,2</sup>, ZOU De-gao<sup>1,2</sup>, SONG Yong-chen<sup>1,2,3</sup>, CHEN Kai<sup>1,2</sup>, QU Yong-qian<sup>1,2</sup>, GONG Jin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The interaction between soil and structure is a common problem in geotechnical engineering, which plays a key role in assessing the damage behavior of structure. The computational model for soil-interface-structure system is the foundation of the detailed study of the interaction between soil and structure, but it has to solve a series of problems, including soil-structure contact constraint and contact judgment, soil-structure mechanical behavior and constitutive model, and grid model for soil-interface-structure system, etc. The progress of the computational model for soil-interface-structure system is summarized, and a suggestion of its main developing trend is put forward.

**Key words:** soil-structure interaction; interface; elastic-plasticity; cross scale; scaled boundary finite element

## 0 引言

土与结构的相互作用问题是土木和水利等大型工程的一个关键共性问题, 例如, 大坝中的防渗体与堆石体或地基之间的相互作用、桩基与地基之间的相互作用等。土与结构由于存在明显的刚度差异, 导致两种介质之间接触界面(带)的力学特性与远离界面的土体明显不同。实际工程在外力作用下, 土与结构两者之间变形差异会导致接触界面(带)出现剪切应变集中、应变软化、法向张开—闭合等, 这些现象会导致土与结构间的接触力传递机制复杂, 进而显著影响静、动荷载条件下结构的响应<sup>[1-2]</sup>。因此, 土与结构的相互作用分析是揭示工程中结构损伤破坏机理的重要环节, 将土与结构作为一个整体进行分析才能更为合理地模拟结构的破坏, 但在大型工程分析时将面临

着一系列难题: ①土与结构间接触几何形状复杂; ②土与结构间的接触力学特性复杂; ③土与结构间尺度跨越大, 计算网格精细剖分难。以上3个难题依次涉及到接触边界约束模拟的问题、接触力学行为模拟(本构模型)的问题以及土与结构间单元跨尺度分析的问题。本文对这些问题的相关研究依次进行了综述和总结, 在此基础上介绍了土-界面-结构体系研究的进展及工程应用情况, 最后对今后的主要发展方向进行了展望。

## 1 土-结构间接触约束模拟

目前在分析土与结构间接触问题时, 主要有两种

思路: ①将接触问题转化为力和位移边界的约束问题进行分析, 称为接触边界约束方法。代表性方法有拉格朗日乘子法<sup>[3-4]</sup>、罚函数法<sup>[3-4]</sup>、增广(或改进)的拉格朗日乘子法<sup>[5]</sup>、直接约束法<sup>[6]</sup>等。②将接触问题等效为特殊单元及其力学特性问题进行分析, 称为接触界面单元方法。代表性的方法有 Goodman 单元和薄层单元等。接触边界约束方法主要用于刚-刚的接触分析, 在土-结构接触问题中无法反映界面区域的剪缩、剪胀法向变形, 以及滑动前的剪切变形特性。本文主要介绍接触界面单元方法的相关研究。

接触界面单元实现方法与实体单元相近。在非线性有限元静、动力计算时, 通过反复迭代接触面(或界面)两侧节点变形, 进而计算接触单元应力, 并同时判断力和位移是否满足接触边界条件, 直至满足接触要求。该过程与非线性有限元求解过程是一致的, 因此很方便植入有限元程序中。但为了模拟接触区域的特性, 需要采用特殊的单元和合理的本构模型。下面根据计算网格中单元的剖分厚度在总刚中是否有作用来分类, 简单介绍接触界面单元的研究情况。

### 1.1 Goodman 单元

Goodman 等<sup>[7]</sup>最早提出了目前被广泛应用的二维四节点界面单元, 也就是两条平行直线组成的单元, 该单元最早是用于模拟岩石节理问题。由于该单元假定界面应变等于界面相对位移除以界面厚度, 同时将弹塑性矩阵除以界面厚度, 最终得到的界面刚度中的界面厚度会被消去, 所以表现为单元的“无厚度”。详细见下面刚度矩阵  $\mathbf{K}$  推导的过程, 对于实体单元和界面单元都有

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{B}$  为应变-位移矩阵转换矩阵, 与单元的厚度大小有关,  $\mathbf{D}$  为应力与应变之间的弹塑性矩阵, 与单元的厚度大小无关,  $V$  为体积。

对于 Goodman 单元, 由于体积微元  $dV = t d\xi$  (对于二维单元),  $\mathbf{B} = \mathbf{N}/t$ , 则可得

$$\mathbf{K} = \frac{1}{t} \int_{-l/2}^{l/2} \mathbf{N}^T \mathbf{D} \mathbf{N} d\xi, \quad (2)$$

式中,  $t$  为单元的厚度,  $l$  为其长度,  $\mathbf{N}$  为界面相对位移与节点位移之间的转换矩阵, 与单元的厚度大小无关。

若  $\mathbf{D} = t\mathbf{k}$ , 可得 Goodman 单元的刚度阵表达式

$$\mathbf{K} = \int_{-l/2}^{l/2} \mathbf{N}^T \mathbf{k} \mathbf{N} d\xi. \quad (3)$$

在计算的时候, 由于矩阵  $\mathbf{k}$  是根据试验测定的相对位移-应力之间关系确定的, 因此式(3)是与计算网格中单元厚度无关的, 即无论 Goodman 单元厚度多大, 都不会影响 Goodman 单元刚度阵的数值。依据

Goodman 单元的思想还可以构造点界面单元、二维六节点曲线界面单元、三维八节点界面单元等。

Goodman 单元早期应用于岩石节理分析时, 为了防止两侧节点的嵌入, 通常假定法向刚度很大, 这一方面会导致法向刚度取值具有任意性, 另一方面法向刚度很大可能会导致刚度矩阵病态引发数值求解不稳定。针对 Goodman 单元数值不稳定的问题, 雷晓燕等<sup>[8]</sup>研究发现采用 Newton-Cotes 积分相比 Gauss 积分会消除接触面应力震荡现象。Day 等<sup>[9]</sup>研究认为, 积分方法仅是积分点位置和权重的不同, 并不是导致应力波动的根本原因, 界面区域单元应力梯度大(或单元剖分不够精细)是导致刚度矩阵病态数值求解不稳定(应力波动)的本质原因, 而非接触界面单元的特性引起的, 并且减小靠近接触面区域的单元尺寸或采用更高精度的单元可以提高数值的稳定性。

目前由于 Goodman 单元简单易于实现, 并且联合界面本构模型, 该单元可用于模拟土-结构接触区域的滑移、张开、闭合等, 在工程中得到了广泛应用。

### 1.2 薄层单元

薄层单元本质上与实体单元并没有差异, 不同之处在于薄层单元的厚度要足够小。当薄层单元足够小时, 单元的应力和应变可以近似表达, 此时可等效于 Goodman 单元, 其刚度矩阵可以近似等效为式(2)。采用薄层单元计算时, 式(2)中矩阵  $\mathbf{D}$  根据试验测定的应变-应力关系确定, 因此薄层单元的刚度矩阵  $\mathbf{K}$  与计算网格中单元厚度  $t$  的大小有关。

早期采用实体单元模拟接触区域的较大变形时, 一般是通过降低接触区域土体的模量来实现。例如, Griffiths<sup>[10]</sup>采用八节点四边形单元来模拟接触黏结和摩擦滑动行为, 同时比较了不同刚度和单元长宽比, 研究表明, 该单元的性能良好, 但长宽比较大时需要更严格的迭代收敛精度。Zienkiewicz<sup>[11]</sup>采用二维六节点等参单元(一边三个节点, 厚度方向上没有设立节点)可以模拟接触面的弯曲。Wilson<sup>[12]</sup>将相对位移作为独立参数形成刚度矩阵构建了二维八节点薄层单元(厚度方向中心设一个节点)。相比 Zienkiewicz<sup>[11]</sup>提出的单元, Wilson<sup>[12]</sup>对于描述接触面法向应力和位移梯度变化较大时会更准确。依据 Wilson 相同的思想, Pande 等<sup>[13]</sup>构建了八节点抛物线三维等参薄层单元。Wilson 最初采用相对位移的思想构建薄层单元的主要目的是增加计算的准确性, 但 Pande 等<sup>[13]</sup>研究发现, 是否采用相对位移作为独立参数构建刚度矩阵, 计算结果差异并不大。Desai 等<sup>[1, 14]</sup>对“有厚度”薄层单元进行了详细的研究, 其采用与土体不同的剪切模量来描述接触面的剪切滑移变形, 并且法向刚度取值考虑

了土体特性、粗糙度等影响, 计算表明, 单元长宽比为 0.01~0.1 时能满足精度要求。

综上, 薄层单元在应用时问题之一在于其单元厚度如何确定, 其取值与单元长度  $l$  是有关的, 并非真实条件下土与结构间接触面的厚度  $h$  (其约为 5~20 倍的平均粒径), 也就是说虽然薄层单元的厚度具有一定的物理意义, 但并不完全真实。只有当  $t=h$  时, 薄层单元的厚度物理意义才能明确, 并且此时可近似等效于 Goodman 单元。

## 2 土-结构间接触本构模型

与刚-刚接触不同 (主要基于库仑摩擦模型), 土-结构间接触特性更复杂。土-结构接触问题的分析精度很大程度上取决于界面区域的力学特性模拟。试验表明, 与土体相似, 土-结构接触带区域的变形也表现为应力路径相关性、加载硬化/软化、剪胀/剪缩、蠕变等特性<sup>[15-18]</sup>。从本质上讲, 土-结构界面的这些特性是土体变形引起的, 应当属于土体单元和本构模拟的范畴。从这一点来看, 接触约束方法模拟界面约束似乎更合理<sup>[19]</sup>。但实际上由于界面区域土体的变形受到结构形状约束和表面粗糙度等因素的影响, 该区域土体的特性与远离界面的土体特性 (包括压缩和剪切) 差异很大, 采用接触约束方法很难反映界面区域土体的力学特性。例如, 界面区域土体的法向变形机制与远离界面土体的体变机制存在一定的差异, 并且大多数的研究表明接触面法向的剪胀变形和法向应力变化及摩擦角会低于土体的, 当结构面粗糙度增加后接触面的摩擦角开始接近或等于土体的<sup>[20-22]</sup>; 此外, Desai 等<sup>[23]</sup>试验表明接触区域的液化要比周围土体更容易。因此, 接触区域的力学特性需要进行特殊研究, 其中清华大学在粗粒土与结构接触面试验研究方面做了大量的工作<sup>[22, 24-25]</sup>。

接触区域的变形包括该区域的连续土体变形和非连续错动两种变形机制, 目前的研究一般在宏观上将两者不进行区分均统称为接触界面变形, 并且假定接触区域应变是没有梯度变化的。目前的接触面本构模型大都是研究接触界面变形与应力之间关系。包括非线性弹性模型<sup>[26-27]</sup>、传统弹塑性模型<sup>[28-31]</sup>、损伤本构模型<sup>[32]</sup>、扰动本构模型<sup>[33]</sup>及状态相关的弹塑性本构模型<sup>[34-35]</sup>。以上模型仅适用于单调加载条件, 对卸载和再加载过程没有给出描述。一些反映循环荷载条件下的接触面也相继提出包括非线性弹性模型<sup>[16, 36]</sup>, 理想弹塑性模型<sup>[37]</sup>及弹塑性本构模型<sup>[25, 38-40]</sup>, 这些模型大都可以反映土-结构接触的基本特性。但是目前先进界面本构模型主要针对二维条件<sup>[41]</sup>, 且工程应用研

究还是较少。

## 3 土-界面-结构体系跨尺度计算方法

上述方法和模型在应用时需对土-界面-结构体系整体进行网格离散, 但大型工程常常面临土体尺寸和结构尺寸相差百倍、千倍的情况, 使得局部小尺度结构破坏和整体响应的高效分析工作面临极大的挑战。若采用全局一致细尺度网格方案, 为了满足局部小尺度结构破坏的分析要求, 迫使整体结构必须进行精细剖分, 进而导致土-结构分析体系单元量剧增、计算成本急剧攀升, 难以开展大规模非线性分析。跨尺度分析是兼顾结构局部小尺度破坏和整体宏观响应的高效分析方法和有效途径之一, 但其面临的最大困难是不同尺寸单元在交界面处的节点衔接处理, 针对不同的处理形式, 目前常用的方法主要有子模型法、多节点约束法和单元直接过渡法。

### 3.1 子模型方法

子模型方法又称切割位移边界法, 其主要思想是分别建立结构宏观尺度模型和局部细节模型, 然后将宏观尺度模型上计算所得的截断边界力学物理量施加于子模型, 最终获得问题域数值解。这种方法具有鲜明的“二次分析”特点, 且没有考虑子模型和整体模型之间的相互作用问题。由于岩土工程弹塑性分析中需要进行迭代计算, 如果采用“二次分析”, 易产生大量的计算误差累积<sup>[42]</sup>。

### 3.2 多节点约束法

多节点约束方法主要用于解决梁单元、壳单元、实体单元之间的相互连接问题, 因此该方法在建筑结构和桥梁工程中应用较多<sup>[43]</sup>。该方法通过在不同单元交界面寻找单元自由度间的内在联系, 根据位移、应力、功等平衡条件, 建立和求解多点约束方程, 从而实现衔接面的平稳过渡和协调。不同学者的研究差异在于如何确定和改进优化不同单元交界面的约束方程。有研究表明, 当结构进入塑性时, 不同平衡条件下约束方法的计算结果差异较大, 会造成分析结果失真<sup>[44]</sup>。岩土工程中涉及到的均是强非线性问题, 多点约束方法在岩土工程的应用合理性有待进一步探讨。并且当梁单元和壳单元用来模拟结构时, 采用该方法很难对土-结构接触区域的复杂接触特性 (如剪胀、剪缩等) 进行精细模拟。

### 3.3 单元直接过渡法

(1) 基于常规规则形状单元的逐级网格过渡法  
有限单元法是仿真计算应用最广的数值方法, 其计算单元主要为四边形/六面体及其退化的简单形状 (三角形/四面体等), 限制了单元形状构造和空间节

点分布。该方法需通过较繁琐的、半自动的人机交互操作,才能实现较为粗糙和缓慢的疏密网格过渡。并且疏密网格过渡时单元尺寸跨越较为缓慢,剖分单元数量大,且会生成形状不规则、精度不高的单元。采用该方法难以高效、高质地建立跨尺度精细分析模型。

#### (2) 基于多边形/多面体单元的网格过渡法

多边形/多面体单元不限制形状构造和节点空间位置分布,放松了对单元离散的限制,故该方法可为疏密网格交界面衔接提供便捷高效的选择。这类方法的最大难点是构造节点丰富的单元类型。目前构造这类单元的方法主要有以下两大类。

a) 传统多边形/多面体有限单元: 将交界面的非协调节点直接作为多边形/多面体单元节点。根据不同的构造思想,可分为3类: ①多胞单元<sup>[45]</sup>, 将求解域剖分为胞体组合, 基于最小余能原理, 推导构造有限单元格式进行求解。该单元几何特征与实物较为相似, 故在颗粒增强复合材料仿真领域, 拥有独到的优势。②基于位移插值的多边形单元<sup>[46]</sup>, 主要采用有理函数插值多边形节点, 包括 Wachspress 提出通过几何投影构造单元形函数及相关改进算法, 以及基于自然邻点插值的 Laplace 方法。③基于重心坐标的多边形单元<sup>[47]</sup>, 该方法思路简单, 但相关表达式较难显式描述。上述方法理论相对成熟, 主要应用于固体力学分析、简单结构断裂过程模拟及计算流体动力学分析等<sup>[48]</sup>。相较于等参单元, 多边形/多面体单元的形函数构造较为复杂, 数值积分较为繁琐复杂, 甚至需要特殊的积分技巧, 尤其三维构造计算繁琐耗时, 故该方法发展推广过程较为缓慢<sup>[48]</sup>, 目前主要用于简单结构理论机理分析研究。

b) 其他方法: 通过不同的技术处理疏密网格衔接处的非对称节点, 使其满足边界变形、应力协调条件。王勖成等<sup>[49]</sup>通过修改插值函数法和引入虚拟节点法, 构造了5节点二维平面单元。强天弛等<sup>[50]</sup>、钟红等<sup>[51]</sup>通过虚拟节点和凝聚自由度技术, 实现了一种非对称节点单元的求解方法。但上述方法仍有一定的应用条件, 如主从自由度方法中, 计算效果与从自由度数的选择相关性大。此外, 模型前处理过程较为繁琐耗时、需大量人机交互、易出错, 较难实现自动生成分析模型, 目前仍未见到此类方法在岩土工程大规模精细分析中的应用。

## 4 土-界面-结构体系研究的几点进展及工程应用

鉴于以上土-界面-结构体系精细分析存在的问题, 大连理工大学工程抗震研究所对以上3项内容

均分别进行了发展和改进, 主要取得了以下进展。

### 4.1 土-结构间非点对点接触模拟

前文所述的接触单元只能满足节点-节点一一对应的情况。但岩土工程中土-结构间的尺度差异一般都比较大, 建立非对称节点的界面单元是实现土-结构间网格尺寸高效跨越的一种途径。Qu 等<sup>[52]</sup>、Gong 等<sup>[53-55]</sup>开展了两方面的研究: 一是通过在接触面单元两侧设置虚拟节点和凝聚自由度方法, 构造了两侧非对称节点接触界面单元, 计算结果表明, 该方法在保证计算精度的基础上, 显著降低网格离散的数量、提高计算效率。二是采用背景网格, 借助径向点插值函数计算高斯点相对位移, 建立了非点对点的无网格界面模拟方法, 实现了界面两侧节点自由分布, 该方法可直接连接尺寸不同的网格, 为土-结构间相互作用跨尺度分析提供了界面模拟技术(图1)。

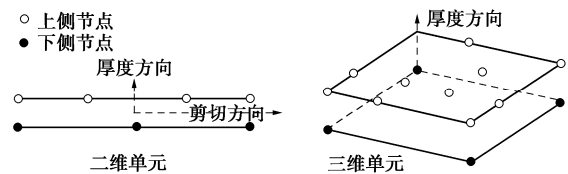


图1 非对称节点接触面单元

Fig. 1 Asymmetric node interface element

### 4.2 反映颗粒破碎的三维广义塑性接触面模型

为了解决接触面弹塑性模型三维实用化的问题, 笔者等引入广义塑性理论开展了三维接触面本构模型研究。广义塑性理论由于其理论框架简单、易实现, 在收敛性和稳定性方面有独特的优势, 为接触面弹塑性模型的应用提供了理论框架基础。在该理论框架下, 将颗粒破碎引入到临界状态理论中, 建立了反映颗粒破碎的状态参数与塑性模量、峰值强度、相位变换应力比之间的关系, 然后基于边界理论的思想描述单调和循环荷载下接触面的塑性模量、加载方向和流动方向, 最终提出了考虑颗粒破碎的三维土与结构界面弹塑性本构模型。模型可以用一套参数较好地反映三维单调和循环荷载下土与结构界面的法向(剪胀、剪缩、卸载体缩)和切向(硬化和软化)变形特性<sup>[56-57]</sup>。在界面模型研究的基础上, 结合发展的砂土和粗粒土广义塑性本构模型和混凝土塑性损伤模型<sup>[37, 58-62]</sup>, 建立了三维土与结构(包括土、界面、混凝土)全弹塑性-损伤静、动力分析模型, 实现了土-界面-结构体系的损伤过程及渐进破坏模拟, 为土与结构相互作用问题的研究提供了实用、有效的计算方法。

### 4.3 非线性比例边界多边形/多面体单元(NSBPFEM)

针对复杂岩土结构高质量精细网格生成难、分析方法求解效率有待优化的问题, 笔者等采用多边形/多面体网格直接过渡的思想, 发展了一套高效的跨尺

度分析方法, 为大型土-结构体系的精细分析提供了技术手段。

首先采用计算机信息学科的四分树和八分树网格离散技术, 对复杂几何体进行高效的跨尺度精细网格离散, 实现操作简便、低人力成本、易修改再建的模型前处理, 使得复杂工程结构跨尺度精细网格生成/再生成过程在很短时间即可完成, 并且生成网格中约60%以上为高质量正方形、正方体单元, 较好地解决了大型复杂工程结构跨尺度、精细化、高质量网格高效生成的问题。

针对交界面处的多边形/多面体单元, 基于比例边界有限单元法(SBFEM)<sup>[63]</sup>发展高性能数值算法进行求解。该方法具有数据结构简单、降低计算维度、易于程序实现和修改、高精度半解析等多重优势, 已被学者广泛应用于无限域、固体力学、裂纹扩展、液体晃动等领域的弹性问题研究<sup>[63-69]</sup>。为解决该方法难应用于岩土工程非线性分析的问题, 笔者等<sup>[70-75]</sup>进行了下述改进:

(1) 基于比例边界有限元理论(SBFEM), 提出了多边形平均值形函数直接插值复杂多面体环向边界的方法, 通过假定径向插值函数, 建立弹性平衡方程获得半解析的刚度矩阵, 构造了高精度、形状灵活的多面体 SBFEM (图2), 克服了传统 SBFEM 需二次处理边界的不足(将多边形拆分为三角形和四边形), 使得计算机图形学八分树网格离散技术可直接用于工程结构分析, 实现了大型工程的跨尺度精细化建模和分析。

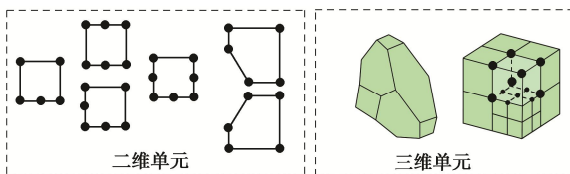


图2 多边形/多面体实体单元

Fig. 2 Schematic diagram of polygon/polyhedron element

(2) 基于边界线/界面高斯积分和常刚度矩阵的弹性解计算多边形/多面体形函数, 避免了传统 SBFEM 刚度变化时频繁特征值分解导致低效率问题, 提出多边形和多面体域内分块积分计算弹塑性矩阵和应力, 建立了高效和实用的 SBFEM 非线性计算方法, 克服了传统 SBFEM 局限于弹性分析的难题, 实现了大型复杂土工构筑物的非线性精细化分析。

#### 4.4 工程应用

将以上3项进展集成到大型岩土工程高性能分析软件系统 GEODYNA, 建立了考虑防渗体-堆石-接触面-无限地基相互作用的全体系精细模型, 采用

该软件系统, 开展了多个土石坝工程的静、动力分析, 取得了较好的效果, 验证了软件和分析方法的高效性和稳定性。此外, 该方法具有良好的通用性, 已拓展用于核电工程、建筑结构、地下结构等复杂结构的损伤演化研究, 使得重大工程三维渐进破坏规律和机制的研究成为可能<sup>[73-84]</sup>。

## 5 结 语

合理考虑土与结构间的相互作用对揭示大型工程中结构损伤破坏机理是十分重要的, 将土-结构作为一个体系进行整体分析是精细研究土-结构相互作用的基础, 必须协同解决土-结构接触界面约束模拟、土-结构间接触材料特性精准模拟, 以及土与结构体系高效建模及分析方法等难题。针对这些问题, 大连理工大学工程抗震研究所发展了土-界面-结构全弹性-损伤本构模型, 并基于比例边界有限元理论和无网格法开发了跨尺度实体和界面单元, 实现了土-结构相互作用精细化模拟。鉴于目前土与结构相互作用分析研究现状和中国“三深”、“三极”的发展战略需求, 建议今后的发展方向: ①继续深入开展土-结构体系跨尺度计算模型及计算理论研究; ②重点关注长期服役、深水环境等复杂条件下土-结构接触力学特性及本构模型研究; ③融合离散元、比例边界有限元、有限元、无网格等多种数值分析方法, 开展土-结构相互作用大变形和非连续机理研究。

#### 参考文献:

- [1] SHARMA K G, DESAI C S. Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, **118**(12): 2442 - 2462.
- [2] KONG X, LIU J, ZOU D. Numerical simulation of the separation between concrete face slabs and cushion layer of Zippingpu dam during the Wenchuan earthquake[J]. Science China Technological Sciences, 2016, **59**(4): 531 - 539.
- [3] 孔祥安, 江晓禹, 金雪松. 固体接触力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. (KONG Xiang-an, JIANG Xiao-yu, JIN Xue-song. Solid Contact Mechanics[M]. Beijing: China Railway Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (WANG Xu-cheng. Finite Element Method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [5] JIANG L, ROGERS R J. Combined Lagrangian multiplier and penalty function finite element technique for elastic impact analysis[J]. Computers & Structures, 1988, **30**(6): 1219 - 1229.

- [6] 张丙印, 师瑞锋, 王 刚. 高面板堆石坝面板脱空问题的接触力学分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 361 - 364. (ZHANG Bing-yin, SHI Rui-feng, WANG Gang. Contact mechanics analysis of slab void problem of high concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 361 - 364. (in Chinese))
- [7] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, **94**: 637 - 660.
- [8] 雷晓燕, 王五全. 消除接触摩擦单元应力振荡的方法[J]. 华东交通大学学报, 1993, **10**(4): 1 - 8. (LEI Xiao-yan, WANG Wu-quan. Method for eliminating stress oscillation of contact friction element[J]. Journal of East China Jiaotong University, 1993, **10**(4): 1 - 8. (in Chinese))
- [9] DAY R A, POTTS D M. Zero thickness interface elements—numerical stability and application[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1994, **18**(10): 689 - 708.
- [10] GRIFFITHS D V. Numerical modelling of interfaces using conventional finite elements[C]// Proc 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, 1987, Nagoya: 837 - 844.
- [11] ZIENKIEWICZ O C. Analysis of nonlinear problem in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems[C]// Proc 2nd Int Congress on Rock Mechanics, 1970, Belgrade.
- [12] WILSON E L. Finite elements for foundations, joints and fluids[C]// Finite Elements in Geomechanics, Wiley and Sons, 1977, London.
- [13] PANDE G N, SHARMA K G. On joint/interface elements and associated problems of numerical ill - conditioning[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1979, **3**(3): 293 - 300.
- [14] 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.
- [15] YOSHIMI Y, KISHIDA T. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 1981, **4**(4): 145 - 152.
- [16] 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.
- [17] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(12): 1096 - 1105.
- [18] LIU H, MARTINEZ J. Creep behaviour of sand - geomembrane interfaces[J]. Geosynthetics International, 2014, **21**(1): 83 - 88.
- [19] SHENG D, WRIGGERS P, SLOAN S W. Application of frictional contact in geotechnical engineering[J]. International Journal of Geomechanics, 2007, **7**(3): 176 - 185.
- [20] TABUCANON J T, AIREY D W, POULOS H G. Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1995, **18**(3): 350 - 364.
- [21] PORCINO D, FIORAVANTE V, GHIONNA V N, et al. Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, **26**(3): 289 - 301.
- [22] ZHANG G A, ZHANG J. Monotonic and cyclic tests of interface between structure and gravelly soil[J]. Soils and Foundations, 2006, **46**(4): 505 - 518.
- [23] DESAI C S, PRADHAN S K, COHEN D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand - concrete interfaces using the disturbed state concept[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, **5**(4): 286 - 294.
- [24] ZHANG G, ZHANG J M. Constitutive rules of cyclic behavior of interface between structure and gravelly soil[J]. Mechanics of Materials, 2009, **41**(1): 48 - 59.
- [25] ZHANG G, ZHANG J. Unified modeling of monotonic and cyclic behavior of interface between structure and gravelly soil[J]. Soils and Foundations, 2008, **48**(2): 231 - 245.
- [26] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1971, **SM12**(12): 1657 - 1673.
- [27] 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): 65 - 69. (ZHANG Dong-ji, LU Ting-hao. Establishment and application of a soil structure interface model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(6): 65 - 69. (in Chinese))
- [28] 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 Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Deformation and mathematical simulation of interface between soil and structural materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))

- [29] FAKHARIAN K, EVGIN E. Elasto - plastic modelling of stress - path - dependent behaviour of interfaces[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, **24**(2): 183 - 199.
- [30] GHIONNA V N, MORTARA G. An elastoplastic model for sand - structure interface behaviour[J]. Géotechnique, 2002, **52**(1): 41 - 50.
- [31] 周爱兆, 卢廷浩. 基于广义位势理论的接触面弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1532 - 1536. (ZHOU Ai-zhao, LU Ting-hao. Elastoplastic constitutive model of contact surface based on generalized potential theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1532 - 1536. (in Chinese))
- [32] HU L, PU J L. Application of damage model for soil - structure interface[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(2): 165 - 183.
- [33] DESAI C S, MA Y. Modelling of joints and interfaces using the disturbed - state concept[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, **16**(9): 623 - 653.
- [34] LIU H, SONG E, LING H I. Constitutive modeling of soil-structure interface through the concept of critical state soil mechanics[J]. Mechanics Research Communications, 2006, **33**(4): 515 - 531.
- [35] LASHKARI A. A critical state model for saturated and unsaturated interfaces[J]. Scientia Iranica, 2012, **19**(5): 1147 - 1156.
- [36] 吴军帅, 姜 朴. 土与混凝土接触面的动力剪切特性[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(2): 61 - 66. (WU Jun-shuai, JIANG Pu. Dynamic shear behavior of soil concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(2): 61 - 66. (in Chinese))
- [37] ZOU D, XU B, KONG X, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **49**: 111 - 122.
- [38] SHAHROUR I, REZAIIE F. An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading[J]. Computers and Geotechnics, 1997, **21**(1): 21 - 39.
- [39] MORTARA G, BOULON M, GHIONNA V N. A 2 - D constitutive model for cyclic interface behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, **26**(11): 1071 - 1096.
- [40] LIU H, LING H I. Constitutive description of interface behavior including cyclic loading and particle breakage within the framework of critical state soil mechanics[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, **32**(12): 1495 - 1514.
- [41] SABERI M, ANNAN C, KONRAD J. Implementation of a soil-structure interface constitutive model for application in geo-structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **116**: 714 - 731.
- [42] 吴佰建, 李兆霞, 汤可可. 大型土木结构多尺度模拟与损伤分析——从材料多尺度力学到结构多尺度力学[J]. 力学进展, 2007, **37**(3): 321 - 336. (WU Bai-jian, LI-Zhao-xia, TANG Ke-ke. Multi scale simulation and damage analysis of large civil structures: from material multiscale mechanics to structural multiscale mechanics[J]. Mechanical Progress, 2007, **37**(3): 321 - 336. (in Chinese))
- [43] 陆新征, 林旭川, 叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, **25**(4): 76 - 80. (LU Xin-zheng, LIN Xu-chuan, YE Lie-ping. Multi scale finite element modeling method and its application[J]. Journal of Huazhong University of science and Technology, 2008, **25**(4): 76 - 80. (in Chinese))
- [44] 王开宇. 基于多点约束的多尺度建模方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. (WANG Kai-yu. Research on Multi-Scale Modeling Method Based on Multi-Point Constraint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese))
- [45] GHOSH S, LEE K, MOORTHY S. Two scale analysis of heterogeneous elastic-plastic materials with asymptotic homogenization and Voronoi cell finite element model[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, **132**(1): 63 - 116.
- [46] SUKUMAR N, TABARRAEI A. Conforming polygonal finite elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004(61): 2045 - 2066.
- [47] FLOATER M S, HORMANN K, KÓS G. A general construction of barycentric coordinates over convex polygons[J]. Advances in Computational Mathematics, 2006, **24**(1/2/3/4): 311 - 331.
- [48] BISHOP J E. A displacement - based finite element formulation for general polyhedra using harmonic shape functions[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2013, **97**(1): 1 - 31.
- [49] 王勖成, 王爱民. 有限元计算中疏密网格间过渡单元的

- 构造[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, **39**(8): 101 - 104. (WANG Xu-cheng, WANG Ai-min. Construction of transition elements between dense grids in finite element calculation[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1999, **39**(8): 101 - 104. (in Chinese))
- [50] 强天驰, 寇晓东, 周维垣. 三维有限元网格加密界面协调方法及在大坝开裂分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(5): 562 - 566. (QIANG Tian-chi, KOU Xiao-dong, ZHOU wei-yuan. 3d finite element mesh densification interface coordination method and its application in dam cracking analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(5): 562 - 566. (in Chinese))
- [51] 钟红, 林皋, 胡志强. 有限元计算中疏密网格过渡方法研究[J]. 计算力学学报, 2007, **24**(6): 887 - 891. (ZHONG Hong, LIN Gao, HU Zhi-qiang. Study on transition method of dense mesh in finite element calculation[J]. Acta Computational Mechanics, 2007, **24**(6): 887 - 891. (in Chinese))
- [52] QU Y, ZOU D, KONG X, et al. A novel interface element with asymmetric nodes and its application on concrete-faced rockfill dam[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **85**: 103 - 116.
- [53] GONG J, ZOU D, KONG X, et al. An extended meshless method for 3D interface simulating soil-structure interaction with flexibly distributed nodes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **125**: 105688.
- [54] GONG J, ZOU D, KONG X, et al. A coupled meshless-SBFEM-FEM approach in simulating soil-structure interaction with cross-scale model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **136**: 106214.
- [55] GONG J, ZOU D, KONG X, et al. A non-matching nodes interface model with radial interpolation function for simulating 2d soil - structure interface behaviors[J]. International Journal of Computational Methods, 2020, **18**(1): 2050023.
- [56] LIU J, ZOU D, KONG X. A three-dimensional state-dependent model of soil - structure interface for monotonic and cyclic loadings[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **61**: 166 - 177.
- [57] LIU J, ZOU D, KONG X. A two-mechanism soil-structure interface model for three-dimensional cyclic loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, **44**(15): 1 - 28.
- [58] XU B, ZOU D, KONG X, et al. Dynamic damage evaluation on the slabs of the concrete faced rockfill dam with the plastic-damage model[J]. Computers & Geotechnics, 2015, **65**(65): 258 - 265.
- [59] LIU J, ZOU D, KONG X. Three-dimensional scaled memory model for gravelly soils subject to cyclic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, **144**(3): 4018001.
- [60] XU B, ZOU D, LIU H. Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2012, **43**: 143 - 154.
- [61] 孔宪京, 徐斌, 邹德高, 等. 混凝土面板坝面板动力损伤有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1594 - 1600. (KONG Xian-jing, XU Bin, ZOU De-gao, et al. Finite element analysis of dynamic damage of concrete face slab[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1594 - 1600. (in Chinese))
- [62] 孔宪京, 屈永倩, 邹德高, 等. 强震作用下面板堆石坝跨尺度面板开裂演化分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(6): 989 - 996. (KONG Xian-jing, QU Yong-qian, ZOU De-gao, et al. Cross-scale crack evolution analysis for face slab in concrete faced rockfill dams under strong earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(6): 989 - 996. (in Chinese))
- [63] SONG C. The Scaled Boundary Finite Element Method[M]. New York: John Wiley & Sons, 2018.
- [64] 刘钧玉, 林皋, 胡志强. 裂纹面荷载作用下多裂纹应力强度因子计算[J]. 工程力学, 2011, **28**(4): 7 - 12. (LIU Jun-yu, LIN Gao, HU Zhi-qiang. Calculation of stress intensity factor of multiple cracks under crack surface load[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(4): 7 - 12. ((in Chinese)))
- [65] 高毅超, 徐艳杰, 金峰, 等. 基于高阶双渐近透射边界的大坝-库水动力相互作用直接耦合分析模型[J]. 地球物理学报, 2013, **56**(12): 4189 - 4196. (GAO Yi-chao, XU Yan-jie, JIN Feng, et al. Direct coupling analysis model of dam reservoir hydrodynamic interaction based on high order double asymptotic transmission boundary[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, **56**(12): 4189 - 4196. (in Chinese))
- [66] 陈灯红, 杜成斌. 结构-地基动力相互作用的时域模型[J]. 岩土力学, 2014, **35**(4): 1164 - 1172. (CHEN Deng-hong, DU Cheng-bin. Time domain model of structure foundation dynamic interaction[J]. Geotechnical Mechanics, 2014, **35**(4): 1164 - 1172. (in Chinese))
- [67] LIN G, LIU J, LI J, et al. A scaled boundary finite element approach for sloshing analysis of liquid storage tanks[J].



- Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, **56**: 70 - 80.
- [68] LI P, LIU J, LIN G, et al. A combination of isogeometric technique and scaled boundary method for the solution of the steady-state heat transfer problems in arbitrary plane domain with Robin boundary[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, **82**: 43 - 56.
- [69] LIU J, ZHANG P, LIN G, et al. Solutions for the magneto-electro-elastic plate using the scaled boundary finite element method[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2016, **68**: 103 - 114.
- [70] XU H, ZOU D, KONG X, et al. Study on the effects of hydrodynamic pressure on the dynamic stresses in slabs of high CFRD based on the scaled boundary finite-element method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **88**: 223 - 236.
- [71] CHEN K, ZOU D, KONG X. A nonlinear approach for the three-dimensional polyhedron scaled boundary finite element method and its verification using Koyna gravity dam[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **96**: 1 - 12.
- [72] CHEN K, ZOU D, KONG X, et al. A novel nonlinear solution for the polygon scaled boundary finite element method and its application to geotechnical structures[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **82**: 201 - 210.
- [73] ZOU D, CHEN K, KONG X, et al. An enhanced octree polyhedral scaled boundary finite element method and its applications in structure analysis[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, **84**: 87 - 107.
- [74] CHEN K, ZOU D, KONG X, et al. An efficient nonlinear octree SBFEM and its application to complicated geotechnical structures[J]. Computers and Geotechnics, 2018, **96**: 226 - 245.
- [75] ZOU D, CHEN K, KONG X, et al. An approach integrating BIM, octree and FEM-SBFEM for highly efficient modeling and seismic damage analysis of building structures[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, **104**: 332 - 346.
- [76] CHEN K, ZOU D, KONG X, et al. Elasto-plastic fine-scale damage failure analysis of metro structures based on coupled SBFEM-FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **108**: 280 - 294.
- [77] CHEN K, ZOU D, KONG X, et al. Global concurrent cross-scale nonlinear analysis approach of complex CFRD systems considering dynamic impervious panel-rockfill material-foundation interactions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **114**: 51 - 68.
- [78] ZOU D, SUI Y, CHEN K, et al. A cross - scale refined damage evolution analysis of large commercial aircraft crashing into a nuclear power plant[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2019, **28**(16): e1668.
- [79] QU Y, ZOU D, KONG X, et al. A flexible various-scale approach for soil-structure interaction and its application in seismic damage analysis of the underground structure of nuclear power plants[J]. Science China Technological Sciences, 2018, **61**(7): 1092 - 1106.
- [80] 邹德高, 陈楷, 张仁怡, 等. 基于 SBFEM 的心墙坝基座跨尺度精细应力分析[J]. 人民长江, 2019, **50**(9): 168 - 174. (ZOU De-gao, CHEN Kai, ZHANG Ren-yi, et al. Cross scale fine stress analysis of core dam base based on SBFEM[J]. Yangtze River, 2019, **50**(9): 168 - 174. (in Chinese))
- [81] 邹德高, 隋翊, 陈楷, 等. 基于 Octree-SBFEM 跨尺度模型的大型商用飞机撞击核电厂的精细化损伤演化分析[J]. 核动力工程, 2019, **40**(5): 140 - 145. (ZOU De-gao, SUI Yi, CHEN Kai, et al. Refined damage evolution analysis of large commercial aircraft impacting nuclear power plant based on octree SBFEM cross scale model[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, **40**(5): 140 - 145. (in Chinese))
- [82] 邹德高, 陈楷, 刘锁, 等. 非线性比例边界有限元在面板坝分析中的应用[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, **41**(3): 11 - 18. (ZOU De-gao, CHEN Kai, LIU Suo, et al. Application of nonlinear scaled boundary polygon element method in analysis of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, **41**(3): 11 - 18. (in Chinese))
- [83] 孔宪京, 陈楷, 邹德高, 等. 一种高效的 FE-PSBFE 耦合方法及在岩土工程弹塑性分析中的应用[J]. 工程力学, 2018, **35**(6): 6 - 14. (KONG Xian-jing, CHEN Kai, ZOU De-gao, et al. An efficient FE-PSBFE coupled method and its application to the elasto-plastic analysis of geotechnical engineering structures[J]. Engineering Mechanics, 2018, **35**(6): 6 - 14. (in Chinese))
- [84] 陈楷, 邹德高, 孔宪京, 等. 多边形比例边界有限单元非线性化方法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, **51**(10): 1996 - 2004. (CHEN Kai, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. Nonlinear method and application of polygonal scaled boundary finite element[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, **51**(10): 1996 - 2004. (in Chinese))