

# 土与结构界面接触问题研究进展评述\*

李立云<sup>†</sup> 杜修力 李亮

北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

**摘 要** 针对土与结构相互作用研究中的土 - 结构界面接触问题, 本文从界面接触力学特性及界面接触模拟两个方面的研究展开评述. 分析了接触面 (带) 的力学特性和变形分布规律方面的试验方法和取得的成果, 讨论了现有试验方法的不足; 随后, 对土 - 结构界面接触行为的两类模拟方法 - 接触面单元方法和接触力学方法进行了讨论; 最后提出了今后工作的重点.

**关键词** 土 - 结构相互作用, 界面接触问题, 试验技术, 本构关系, 数值模拟方法

## 1 引言

中国是一个强地震多发的国家, 北京等许多大城市都位于强地震区, 随着社会经济的发展, 这些大城市中已建并将继续兴建许多重大建筑物; 地下空间在这些城市建设中的应用和发展越来越普遍, 地铁等地下结构的建设方兴未艾, 在这些大城市生命线工程中的作用愈来愈显著. 如何确保强地震发生时构筑物的安全是设计工程师首先要考虑的问题. 因而, 研究土与结构的动力相互作用显得愈加重要, 这已成为土木工程和地震工程界的一个研究热点.

土与结构动力相互作用本质上是指振动在结构介质与地球介质间传播产生的波动效应. 地球介质通常被视为半无限体, 因此, 存在结构介质与地球介质间能量传递关系的土 - 结构动力相互作用这一波动体系是一个能量开放系统. 分析土与结构动力相互作用的方法包括解析法、子结构法、集总参数法、整体分析法以及杂交法等. 随着经济建设和科学技术水平的提高, 土 - 结构体系强地震动力灾变全过程分析逐步为人们所重视, 通过土 - 结构体系强地震动力灾变的全过程分析, 可以加深对体系动力灾变机理的认识, 进而建立基于真实工作性态的结构设计理论和分析方法. 为了真实地模拟强烈动力作用环境下土 - 结构系统

的响应, 整体分析方法将成为今后工程抗震研究的方向. 其中, 土 - 结构接触属于不同介质的接触问题, 对土 - 结构系统处于强非线性阶段的反应具有较大的影响, 是目前土与结构相互作用问题分析中亟待解决的一个关键环节.

土与结构接触界面处的力学特性表现有别于土体和结构的力学特性. 近年来, 国内外对土与结构的接触问题进行了广泛而深入的工作, 主要集中在接触力学特性的研究及其模拟两个方面. 本文通过对这两方面研究的分析, 为今后工作重点提出了建议.

## 2 界面接触力学特性研究

土与结构界面接触力学特性是问题研究的关键, 国内外工作多通过对单剪仪、直剪仪和共振柱等仪器进行改装后开展, 且主要集中在土与结构接触界面层的力学特性、变形分布规律、破坏机理及其影响因素等方面.

### 2.1 力学特性和变形分布规律

接触面 (带) 的力学特性和变形分布规律是接触研究的一个基本问题. 俞培基等<sup>[1,2]</sup> 通过共振柱试验, 研究了刚性粗糙接触面对一种细砾动剪模量的影响, 发现在紧贴接触面的土体中存在着

收稿日期: 2008-04-28, 修回日期: 2008-10-30

\* 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2007CB714203)、国家自然科学基金项目 (90715035, 50808006)、广州大学减震控制与结构安全开放实验室开放基金和北京工业大学博士科研启动基金资助

<sup>†</sup> E-mail: lly@bjut.edu.cn

一层边界层, 其动剪模量远远大于土本身的价值 (如图 1 所示). 殷宗泽等 [3,4] 通过土与混凝土接触面性能研究的大型直剪试验, 直接检测了相对位移沿接触面的分布, 表明沿接触面其分布是不均匀的. 高俊合等 [5] 进行了土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究, 发现在土 - 混凝土剪切过程中, 既有沿接触面错动滑移破坏, 又有自身剪切变形; 张嘎等 [6] 通过大型土与结构接触面循环加载剪切仪试验, 得出粗粒土与结构接触面在循环剪切载荷作用下表现出明显的颗粒破碎及法向变形, 如图 2 所示.

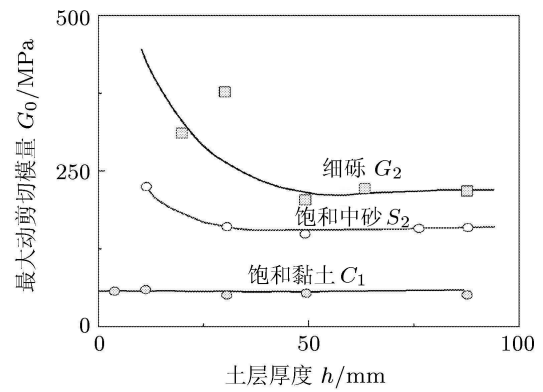


图 1 接触面对土层动剪切模量的影响 [2]

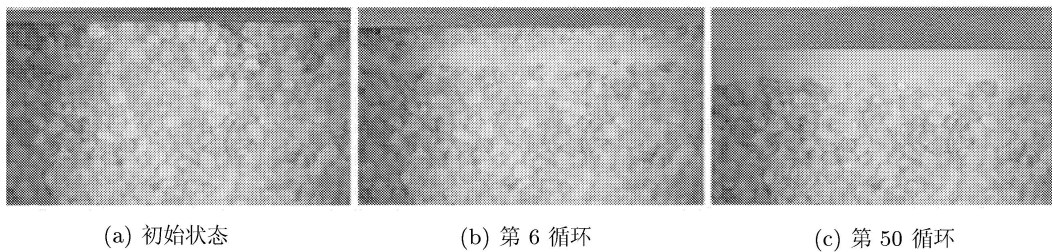


图 2 接触面及附近土体细观状态 [6]

### 2.2 影响因素

接触面的相对粗糙度对接触面 (带) 的力学特性具有较大的影响. 吴军帅等 [7] 利用改装的振动单剪仪进行了接触面的周期剪切试验, 发现接触面的相对糙度和接触面性质有一定的相关性, 如图 3 所示. 图中,  $M$  为接触面处相对位移与土体剪应变之间的比例系数.  $R_{max}$  为试件的表面粗糙度,  $d_{50}$  为土的平均粒径, 两者比值为接触面的相对粗糙度.

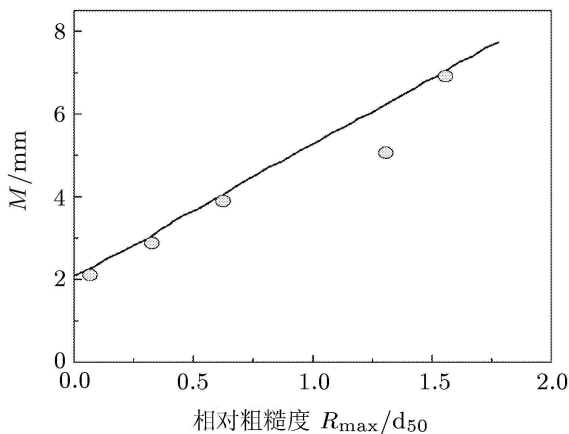


图 3 相对粗糙度对接触面性质的影响 [7]

胡黎明等 [8,9] 利用改进的直剪仪进行了粗粒土与结构物的接触面剪切试验, 通过定义临界相

对粗糙度的概念, 分析了相对粗糙度对土与结构物接触面力学性质和变形机理的影响: 当相对粗糙度小于临界粗糙度时, 沿土与结构物接触表面产生滑动破坏, 为理想弹塑性模型, 剪切强度为土与结构物接触摩擦强度; 当相对粗糙度大于临界粗糙度时, 在接触面附近产生应变局部化, 形成剪切带, 并伴有应变软化和剪胀现象, 剪切强度包括滑动分量和剪胀分量. 张嘎等 [10] 通过试验发现: 接触面剪切时表现出明显的相对法向位移, 其变化趋势与法向应力有关; 接触面 (带) 变形可分解为土与结构胶结面上的滑移以及结构面附近的土在结构面约束下的剪切变形; 结构面粗糙度、土的力学特性和法向应力等因素对接触面的力学特性具有重要影响. 史春乐等 [11] 利用常规直剪仪, 对粉煤灰桩 - 土接触面的特性进行了试验研究, 发现接触面强度决定于构成接触面的两种材料, 并且粉煤灰桩料的龄期、配比、干密度对接触面强度均有影响; 许宏发等 [12] 在土 - 结构剪切摩擦试验分析的基础上, 对桩 - 土接触面摩擦参数的取值问题进行了研究.

此外, 吴梦喜等 [13] 对人工制备的钙质砂与光滑钢板接触面进行了一系列的单调和循环剪切试验, 发现: 钙质砂与光滑接触面基本满足摩擦接触关系; 在等体积情况下, 钙质砂的剪缩性会显著降低剪切过程中界面的正应力, 从而降低界面剪切强度; 在循环剪切作用下界面摩擦系数会降低; 界

面的湿摩擦系数低于摩擦系数. 卢廷浩等<sup>[14]</sup>利用改进的直剪仪研究了土与结构接触界面的力学性能, 发现:

(1) 随着含水率的增大, 土体内部的黏聚力逐渐减小, 而土与结构的黏聚力均先增大后减小, 有一峰值;

(2) 当含水率相同时, 黏土与砖接触界面的摩擦角最大, 其次为黏土和混凝土接触界面的摩擦角, 黏土自身的内摩擦角最小; 黏土内部摩擦角随含水率增加减小缓慢, 而黏土与混凝土和黏土与砖接触界面的摩擦角随含水率增加急剧降低;

(3) 抗剪强度随含水率的增大而减小.

胡黎明等<sup>[15]</sup>进行了粗粒料与结构物接触面

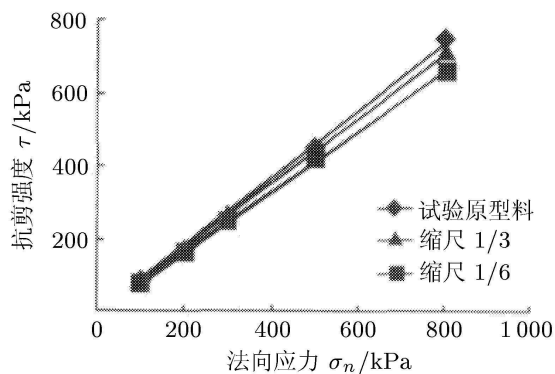


图 4 缩尺试验接触面抗剪强度<sup>[15]</sup>

### 2.3 国外研究概况

在国外, Potyondy<sup>[16]</sup>早在 1961 年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<sup>[17]</sup>利用直剪试验研究了土与混凝土接触面的力学特性. Yoshini 等<sup>[18]</sup>为研究土与金属表面之间的摩擦特性, 研制了一个环状的扭剪装置. Desai 等<sup>[19]</sup>进行了土-结构接触界面力学特性的循环试验研究. Franklin<sup>[20]</sup>研制了可用于研究岩石节理性能的直接剪切仪. Paikowsky 等<sup>[21]</sup>研制了对偶接触面仪进行土沿结构表面自由摩擦试验研究. Fakharian 等<sup>[22,23]</sup>研制了可进行接触界面三维单调和循环加载的试验仪器, 并用其进行了相应的试验研究. Shahrour<sup>[24]</sup>通过改装后的直剪箱进行了光滑接触面和粗糙接触面情况下松砂和密实砂的单调剪切和循环剪切试验, 得出了接触面行为的一些重要结论:

(1) 常压力下的循环剪切将导致密砂软化和松砂的硬化;

(2) 对应于每一应力循环, 接触面表现为由压

力学特性的试验研究, 探讨了试样缩尺和粒径缩尺对接触面力学特性的影响, 认为:

(1) 同一尺寸试样, 粒径缩尺效应对粗粒料与混凝土接触面强度的影响不可以忽略 (如图 4 所示);

(2) 试样缩尺对接触面切向变形特性的影响不大, 而粒径缩尺的影响则不可忽略;

(3) 当  $D/d_{\max}$  (接触面最大尺寸/土料最大粒径尺寸) 大于一定值时, 试样缩尺对接触面法向变形的影响不大, 而粒径缩尺的影响则需重视, 图 5 表示法向应力分别为 800 kPa 和 200 kPa 时不同粒径缩尺下切向相对位移-法向位移关系曲线.

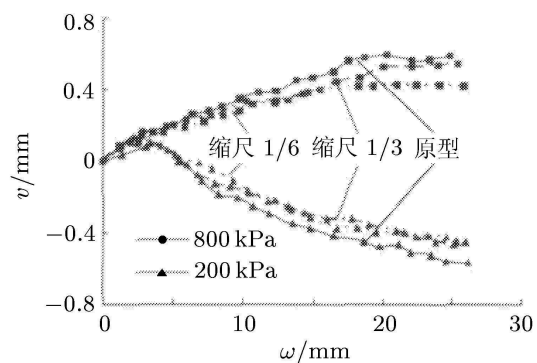


图 5 接触面相对位移 ( $\omega$ ) 与法向位移 ( $v$ ) 关系<sup>[15]</sup>

缩到膨胀;

(3) 零法向位移下的循环剪切导致法向应力的减小和循环剪应力的下降.

Gennaro 等<sup>[25]</sup>对接触面试验结果进行了分析, 如图 6 所示, 并基于摩尔-库仑破坏准则, 提出了一个描述接触面变形行为的弹塑性本构关系模型.

Rao 等<sup>[26]</sup>研究了粗糙度对接触面强度的影响, 随着粗糙度的增大, 接触面的剪切强度也随之增大. Tuncer 等<sup>[27]</sup>通过试验研究了土颗粒大小和结构表面粗糙度对土与结构界面剪切性能的影响, 如图 7 所示, 图中, P20-R30 表示美国的筛分粒度, 数值表示相应的粒径. Tvergaard<sup>[28]</sup>研究了塑性对接触面刚性及残余应力的影响, 以分析接触面的破坏. Desai 等<sup>[29]</sup>进行了饱和土与结构动力相互作用接触界面性能试验研究, 基于扰动状态概念 (disturbed state concept, DSC), 提出了一个能描述动力作用下界面处液化反应和应力变形关系的本构方程. Noriyuki 等<sup>[30]</sup>利用环状剪切仪研究了砂与钢接触问题的影响因素.

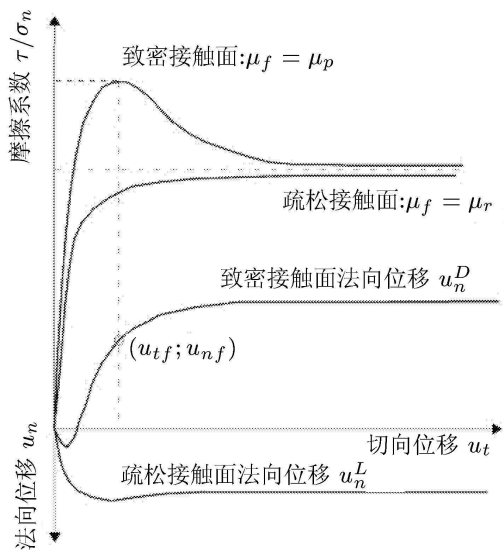
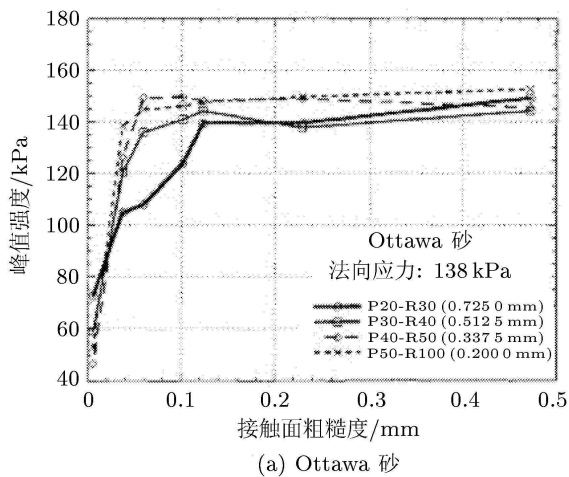
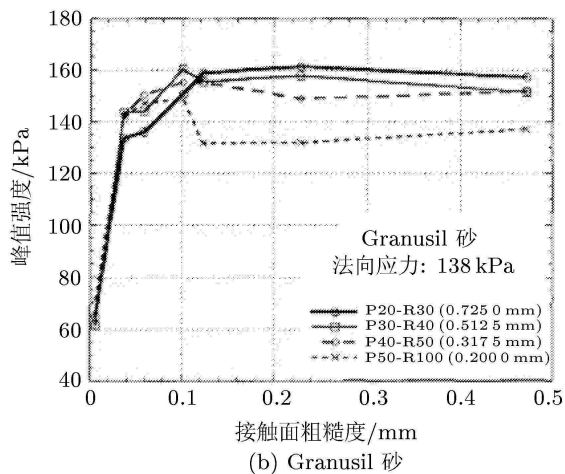


图 6 接触面典型力学反应 [25]



(a) Ottawa 砂



(b) Granusil 砂

图 7 峰值强度和接触面粗糙度的关系 [27]

### 3 土与结构界面接触问题的模拟

土与结构界面接触问题研究的目的在于对其

特性的合理模拟, 从而数值仿真土 - 结构体系的破坏过程. 土与结构界面接触问题的模拟方法主要有接触面单元法和接触力学分析方法. 接触面单元法通过在土与结构接触面上设置接触面单元来实现, 其关键是接触面单元的选取及本构关系的选用; 接触力学分析方法是将其间的相互作用处理为不同物体间的相互作用问题, 处理方法有 Lagrange 乘子法、罚函数方法、线性补偿方法、动接触力法、冲量模型、动接触模型和初始位移法等.

#### 3.1 接触面单元方法

自 Goodman 等 [31] 提出零厚度单元, 及 Desai [32] 引入嵌入控制方法提出薄层单元后, 多年来, 人们对接触面单元法进行了广泛而深入地研究, 主要工作仍然集中于接触面单元型式的完善和本构关系的选取.

##### 3.1.1 接触面单元型式

###### (1) 薄层连接单元 [33]

赵振东等 [33] 假定基础与地基的接触面是一个弹塑性薄层面, 由弹塑性材料构成的薄层连接单元, 如图 8 所示, 图中  $r, s$  为局部坐标系. 对其进行模拟, 构成接触面的薄层材料既不同于结构材料, 也不同于远离接触面的地基材料. 沿层面方向设定为连接单元的长度方向, 它仅能发生沿层面的剪破裂和垂直层面间的张破裂. 该连接单元由 4 或 6 节点组成, 与 Goodman 节理单元不同在于它是具有物质属性的一种几何面, 并且也是一种位移间断面. 该单元能够被用来模拟基础和地基间的滑移和脱离现象.

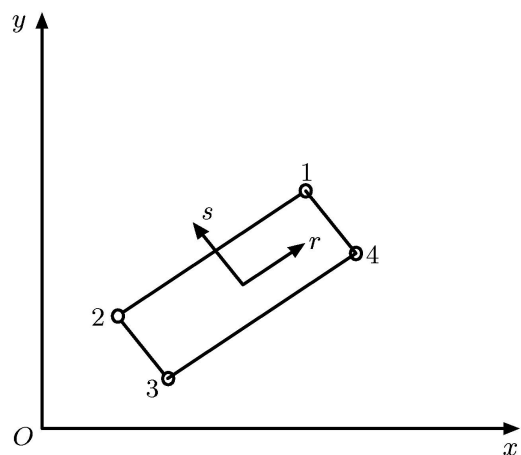


图 8 薄层连接单元 [31]

在该单元中, 假定  $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  分别为沿薄层的延长方向和垂直于薄层面方向的局部坐标系中位移  $U_l$  的两个分量, 则其与总体坐标系中的位移  $U_g$  的两个分量  $u$  和  $v$  之间满足如下关系

$$U_l = CU_g \quad (1)$$

式中

$$U_l = [\bar{u} \ \bar{v}]^T \quad U_g = [u \ v]^T$$

$C$  为转换矩阵

$$C = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

其中  $\theta$  为层面延长方向与总体坐标  $x$  轴间的夹角. 以  $U_l^+$  和  $U_l^-$  表示薄层上侧和下侧的局部坐标系中的位移, 对于 4 节点情况, 局部坐标系中的位移间断表示如下

$$\langle U_l \rangle \equiv U_l^+ - U_l^- = BU_g \quad (2)$$

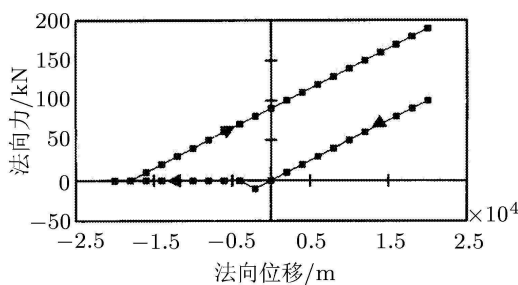
式中,  $B = C[h_1 I \ h_2 I \ -h_2 I \ -h_1 I]$ ,  $I$  为单位矩阵,  $U_g = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4]^T$ ,  $h_i (i = 1, 2)$  为自然坐标系  $r$  中的坐标和位移的形函数

$$h_1 = \frac{1}{2}(1+r) \quad h_2 = \frac{1}{2}(1-r)$$

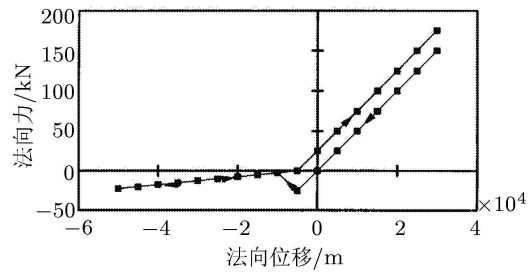
(2) 其他接触面单元

迄今为止, Goodman 单元和 Desai 薄层单元仍是应用最为广泛的两种连接单元. 邵炜等 [34,35] 通过分析研究 Goodman 单元与 Desai 提出的薄层单元, 综合二者的优点, 在有厚度的 Goodman 单元模型基础上, 借鉴 Desai 构筑接触面单元的思想, 在单元数值模型中, 引入了控制嵌入的方法.

CRISP90 界面单元 [36] 采用 8 节点界面单元, 沿单元长边方向采取线性应变变化, 沿窄边保持常应变. 在计算过程中, 当法向应力为拉应力时, 通过减小法向刚度以减小法向模量. 为了能使其更适于描述土 - 结构接触界面性质, Ng 等 [37] 对该界面单元进行了改进, 以消除接触面闭合时存在的“不重合”问题, 如图 9 所示.



(a) CRISP90 界面单元



(b) 改进后的 CRISP90 界面单元

图 9 CRISP90 界面单元及其改进单元得到的结果 [34]

Badie 等 [38~40] 基于 Vlasov 理论, 发展了一个三结点闭合形式的二序列弹性地基接触面单元. 并用此单元成功分析了弹性地基上的剪力墙反应. 对其进行发展, 他们又提出了一个三结点弯曲等参数土界面单元. Coutinho 等 [41] 讨论了界面单元的力学机理, 提出了一个简单的运动协调的界面单元, 避免了切向节点力施加时的运动不协调问题, 如图 10 所示. 图中  $C_1 \sim C_4$  为弹簧刚度系数,  $u$  和  $v$  为  $x$  和  $y$  方向节点位移;  $h$  和  $l$  为单元厚度和宽度.

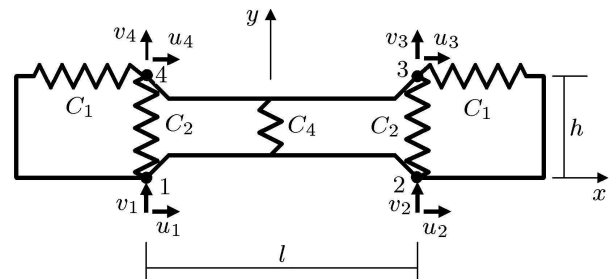


图 10 5 弹簧界面单元 [38]

3.1.2 接触面的本构关系

本构关系的合理选择在接触面性能模拟中具有关键作用, 现有本构关系模型不外乎弹性模型、弹塑性模型和损伤模型. 目前国内外应用较多的是 Clough 等 [42] 提出的双曲线模型. 但土体是松散介质, 在剪力作用下产生变形, 剪应力沿接触面的分布不均匀, 殷宗泽等 [3,4] 分析了土与混凝土接触面上的剪切变形特性, 认为对于有厚度接触面单元内的接触面及其附近的土体来说, 变形可以分为两部分: 一是土体的基本变形; 二是破坏变形, 包括滑动破坏和拉裂破坏. 土体基本变形采用一般的土体模型描述, 如弹性非线性模型或弹塑性模型等; 而破坏变形采用刚塑性模型描述, 如式 (3) 所示.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_t'' \\ \Delta \varepsilon_n'' \\ \Delta \gamma_{tn}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/E'' & 0 \\ 0 & 0 & 1/G'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_t \\ \Delta \sigma_n \\ \Delta \tau_{tn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $E''$  和  $G''$  为拉剪模量和滑动模量;  $\Delta \sigma_t$ 、 $\Delta \sigma_n$  和  $\Delta \tau_{tn}$  分别为切向应力、法向应力和剪应力;  $\Delta \varepsilon_t''$ 、 $\Delta \varepsilon_n''$  和  $\Delta \gamma_{tn}''$  分别为对应的切向应变、法向应变和剪应变。

张冬霖等<sup>[43]</sup>在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,忽略切向和法向的耦合作用,建立了与式(3)类似的接触面模型。后来,卢廷浩等<sup>[44]</sup>对此模型进行修正,提出了接触面薄层单元耦合的本构关系模型。高俊合等<sup>[5]</sup>沿用 Desai 的薄层单元概念,提出了接触面剪切滑移薄层单元的概念,并推导了本构方程。杜成斌和任青文<sup>[45]</sup>同时考虑了已被大量实验验证的接触面法向和切向的非线性特性,法向采用考虑法向变形的双曲线模型,切向采用考虑应变硬化的双曲线模型,避免了 Goodman 单元等只考虑缝面变形及法向、切向参数取值的任意性,计算结果常使法向应力出现波动和过量嵌入等缺点。武亚军等<sup>[46~48]</sup>将双曲线模型与刚塑性模型相结合,提出了非线性弹性-理想塑性本构关系模型。基于接触面的宏、微观物理特征,孙吉主等<sup>[49]</sup>建立了单调加载条件下钙质砂与结构接触面的弹塑性增量本构关系,后来,根据砂与混凝土接触面循环剪切试验成果,建立了适于动力问题分析的接触面的边界面塑性模型<sup>[50]</sup>,以反映法向应力和相对密度对接触面动力特性的影响,模型利用损伤模型来修正土体的密实度。Jesús 等<sup>[51]</sup>提出了一个相对简单的 4 参数扩展双曲线模型来模拟土-结构相互分析中的界面的力学行为。Shahrour 等<sup>[24]</sup>根据光滑接触面和粗糙接触面情况下松砂和密实砂的单调剪切和循环剪切试验提出了描述接触面性质的本构模型。Gennarot 等<sup>[25]</sup>接触面试验结果,依据 Mohr-Coulomb 破坏准则,发展了一个描述其性质的弹塑性本构关系模型,它包含偏量强化和软化、压缩和膨胀状态的转换以及最终状态。Desai 等<sup>[29,52,53]</sup>基于 DSC 概念提出了相应的本构关系模型来模拟接触面力学行为特性。

损伤力学在土木工程中的应用是研究的一

个发展方向。基于损伤力学基本原理,胡黎明等<sup>[54~56]</sup>建立了一种接触面本构关系模型。该模型认为某一状态接触面由无损伤状态和临界状态组合而成,损伤演化过程为无损伤状态向临界状态的逐渐转化过程。无损伤状态接触面遵从剪应力-相对剪切位移的双曲线关系,采用弹塑性本构模型描述;临界状态接触面用理想塑性模型描述;土与结构接触面剪切应变是造成损伤的直接原因,随着接触面剪切应变的增大,土体逐渐产生损伤,由无损伤状态向临界状态演化。演化规律服从关系式

$$\tilde{D} = 1 - \exp(-a |\varepsilon_s^p|^b) \quad (4)$$

式中,  $\tilde{D}$  为损伤状态变量;  $\varepsilon_s^p$  为接触面塑性剪切应变;  $a$ 、 $b$  为与粗糙度有关的参数。

由损伤力学基本原理,接触面实际应力或应变  $S$  可表示为

$$S = (1 - \tilde{D})S^i + \tilde{D}S^c$$

式中,上标  $i$  和  $c$  分别表示无损伤状态和损伤状态。

### 3.2 接触力学方法

接触力学方法是在土与结构的接触处依据力的平衡条件,采用 Lagrange 乘子法、罚函数方法等不同的处理方法进行分析。现有大型有限元软件如 Ansys 和 Abaqus 多采用接触单元(而不是接触面单元)利用不同的接触算法来进行接触分析。

在方法研究方面,雷晓燕等<sup>[57~60]</sup>利用接触摩擦单元的理论提出了一新接触摩擦单元,模拟两物体间的摩擦滑动、张开和闭合过程。在该单元中,直接选取节点接触应力作为未知量,同时采用 6 节点等参元模拟接触面复杂的几何形状,接触单元的几何和静力约束作为补充方程包含在刚度方程中。Musharraf 等<sup>[61]</sup>基于 Lagrange 乘子算法发展了一个接触单元。Ju 等<sup>[62]</sup>基于罚函数方法发展了一个三维接触单元来解决有限元分析中的接触摩擦问题。Cora 等<sup>[63]</sup>利用罚函数方法与弹簧接触单元相结合来描述接触边界条件。李振明<sup>[64]</sup>、刘晓青等<sup>[65]</sup>尝试用子结构界面法(实质也是接触力学方法)求解接触问题,利用该方法求解接触面应力是取接触体为分开的两个子结构,按两个子结构形成刚度矩阵,建立平衡方程并凝聚至接触面,根据接触情况叠加形成整体刚度矩阵求解。叠加时,对未开裂、未滑移的连续接触点对各方向自

由度均保持一致;对滑移的接触点保持法向自由度一致,切向自由度相对独立;对开裂的接触点对各方向自由度均相对独立.该方法最大限度地降低了方程求解的阶数.

### 3.3 其他方法

除上述两类方法外,有些学者也尝试采用其它的方法来处理接触问题.

施景勋等<sup>[66]</sup>在研究均质地基中桩土之间力传递问题时把其当作两个不同介质相互接触的平面应变问题来研究,用边界元法来描述桩土之间力传递的全过程.蒲军平等<sup>[67]</sup>也曾用边界元法来解决接触界面的移动接触问题.利用边界元法进行接触问题的研究还有文献<sup>[68~71]</sup>.

刘海笑等<sup>[72]</sup>在结构地震反应分析中的接触

面问题的处理中,通过建立一定的关于不同结点自由度之间的线性方程,并将此作为控制方程包含进动力有限元分析形成的矩阵方程中.

## 4 土与结构界面接触问题研究的分析

前述可见,针对土与结构的界面接触问题的研究多集中于接触力学性能试验和数值模拟两个方面.然而,土与结构接触问题还有大量的工作需要深入开展,分析如下:

(1) 在土与结构接触力学特性的试验仪器方面,国内外研究者们开展了大量的工作,并且取得了丰富的研究成果,如表 1 所示.

由表 1 可以看出,接触面力学特性的试验研

表 1 土与结构接触性能试验仪器一览表

试验仪器	适用条件	试验技术	存在不足
扭转型共振柱仪 <sup>[2]</sup>	小应变 (剪应变范围 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ )	接触产生于试样座与土试样之间,施加扭矩.	试样截面尺寸小,试验变形小.
位移式直接剪切仪 <sup>[14]</sup>	适用于细粒土,剪切位移小于 6 mm.	下盒直接被结构物代替,施加水平剪力.	试样截面尺寸较小,试验中土样不能侧向变形,不能考虑动力影响,存在剪应力和剪应变分布不均匀.
振动单剪仪 <sup>[7]</sup>	适用于细粒土与结构接触问题.	底座用混凝土块代替,施加水平正弦激振力.	试样截面尺寸较小,剪应力和剪应变分布不均匀.
大型单剪仪 <sup>[5]</sup>	适用于黏土、粉土和砂土与结构的接触问题.	下部为混凝土试块,法向载荷装置由两组平行的杠杆、万向头组成;水平剪力测量系统由千斤顶、传感器组成;土样盒为宽 25 mm、厚 4 mm 的叠层方框盒.	法向压力施加于土体,造成控制接触面法向边界条件的困难和测量法向应力的误差.
环状剪切装置 <sup>[30]</sup>	可进行大变形试验.	利用加载板给土样施加法向载荷,通过扭转施加水平剪力.	试样截面较小.
TH-20t 大型土与结构接触面循环加载剪切仪 <sup>[6]</sup>	可进行粗粒土与结构接触大变形试验.	最大载荷 200 kN;最大切向位移 10 cm,最大法向位移 5 cm;测量精度 0.1%;最大加载频率 0.1 Hz;数字照相记录.	限制了试验土体的侧向变形.
DHJ600 型叠环式单剪仪 <sup>[73]</sup>	进行混凝土面板和砾石垫层料接触力学特性试验.	尺寸 600 mm×600 mm×300 mm,上盒由 10 层钢板叠环组成;最大出力 1000 kN,允许剪切位移 120 mm.	不能进行往返动力试验.
直接剪切装置 <sup>[74]</sup>	可进行大变形试验.	土样尺寸: 101.6 mm×63.4 mm×25.4 mm,采用数字照相技术记录及粒子影像速度测量分析.	限制了试验土体的侧向变形,不能进行动力试验.
循环多自由度装置 <sup>[29]</sup>	可排水和不排水试验、位移控制和应力控制下的静力、拟静力和循环载荷作用试验.	可考虑土样的侧向变形及土壤液化.水平向可施加频率为 0.38 Hz,幅值 5.0 mm 的正弦载荷.	未采用数字图相记录技术.

究已逐渐集中在仪器设备和测试技术的改进方面, 试验设备逐步向大型化、综合化和自动化方向发展, 基本实现了加载和数据的自动采集, 数字图像采集技术也逐渐被引入到试验之中; 然而, 直剪仪和单剪仪仍是当今试验中应用最多的仪器, 大多研究是在对这两种仪器改造的基础上展开的, 但改进后的仪器还存在有一定的局限性, 需要继续完善试验技术以合理模拟土 - 结构接触的真实状态, 这方面的研究将是今后工作发展的一个方向。

(2) 从以往试验研究的内容看, 多数试验只考虑静力作用下的土与结构接触性能。但在土与结构界面的动力接触中, 随加载速率的增大, 界面接触的力学性能表现会有所不同, 即表现出所谓的率相关特性, 现今国内外对此问题的研究非常少, 亟待开展此方面的工作。同时, 循环载荷作用下考虑多相性质的土 - 结构接触界面力学特性的研究还很少, 需要加强研究力度。

(3) 接触问题研究的范围主要还是集中在土与结构相互作用的影响因素方面, 土与结构接触面动力作用下的力学作用机理尚不完全清楚, 需要进一步研究接触面动力特性; 同时, 接触面破坏是一个渐进的破坏过程, 对其进行合理模拟也是今后的工作重点。

(4) 在土与结构界面接触力学性能的数值模拟方面, 国内外研究者一般基于以下两种不同的思路开展此方面的工作。一是采用接触面单元法, 对试验结果进行分析后, 采用两种方法模拟接触面力学特性: 1) 采用拟合的方式提出经验模型; 2) 基于弹塑性理论或者损伤模型理论, 对已有模型进行修正, 进而提出相应的土与结构接触界面力学性能的本构关系模型。二是根据接触处力的平衡条件, 利用不同的接触算法进行接触分析。

接触面单元法由于其概念为人们所熟悉, 应用非常广泛。考虑到土与结构动力相互作用问题的复杂性, 为准确地模拟接触力学特性, 需要建立考虑率相关特性的接触面本构关系; 而大多本构关系均建立在静力试验基础之上, 没有考虑接触性能的率相关特性, 亟待加强率相关接触面本构关系研究。同时, 接触面单元类型尚存在不足 (例如: 两节点单元的劲度系数没有任何试验或理论依据; 无厚度单元的法向刚度人为选取, 带有一定随意性, 不能反映接触面切向和法向的耦合特征; 有厚度薄层单元的厚度选取不容易等等), 需要开展进一步的完善工作。

接触力学分析方法通过物体几何关系的描述来判别物体的接触关系, 在处理位移不连续现象时具有很大的优越性。由于土体与结构材料性能的巨大差异, 如何加强理论和数值计算方面的研究, 是土 - 结构界面接触问题研究中的一个关键环节。

## 5 结 语

通过对土与结构接触界面问题的研究现状分析, 可以看出, 土与结构界面接触性能尚需开展系统深入地研究。因而, 土与结构接触界面问题将成为土木工程和地震工程界的一个研究热点。首先需要完善试验技术, 研制能合理模拟土 - 结构接触真实状态的试验装置, 在此基础上进行相应的土 - 结构接触性能试验, 揭示土与结构接触面的力学特性及破坏机理, 进而探求相应的数值模拟方法, 为结构抗震的合理分析奠定基础, 从而对中国的经济建设和社会发展具有积极意义和巨大的促进作用。

## 参 考 文 献

- 1 俞培基, 秦蔚琴. 粗糙接触面上土的动剪模量. 水利学报, 1992, 23(11): 37~42
- 2 俞培基, 秦蔚琴. 在共振柱仪上研究接触面的动力变形特性. 水利学报, 1995, 26(1): 81~85
- 3 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. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14~22
- 4 Yin Z Z, Zhu H, Xu G H. A Study of deformation in the interface between soil and concrete. *Computers and Geotechnics*, 1995, 17: 75~92
- 5 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. 土木工程学报, 2000, 33(4): 42~46
- 6 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. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149~153
- 7 吴军帅, 姜朴. 土与混凝土接触面的动力剪切特性. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 61~66
- 8 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431~435
- 9 Hu L M, Pu J L. Testing and modeling of soil-structure interface. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(8): 851~860
- 10 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. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21~25
- 11 史春乐, 夏辉明. 粉煤灰桩 - 土接触面特性的试验研究. 西部探矿工程, 2002, 7(1): 23~25
- 12 许宏发, 吴华杰, 郭少平等. 桩土接触面单元参数分析. 探矿工程, 2002, 5: 10~12
- 13 吴梦喜, 楼志刚. 钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究. 岩土力学, 2003, 24(3): 369~371
- 14 卢廷浩, 王伟, 王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪试验研究. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2006, 22(1): 82~85, 99

- 15 胡黎明, 马杰, 张丙印等. 粗粒料与结构物接触面力学特性缩尺效应. 清华大学学报 (自然科学版), 2007, 47(3): 327~330
- 16 Potyondy G. Skin friction between various soils and construction materials. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339~353
- 17 Clough G W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1971, 97(12): 1657~1673
- 18 Yoshini Y, Kishida T. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soils and metal surfaces. *Geotech Test J*, 1981, 4(4): 145~152
- 19 Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces. *J Geotech Eng*, 1985, 111(6): 793~815
- 20 Franklin J A. A direct shear machine for testing rock joints. *Geotech Test J*, 1985, 8(1): 25~29
- 21 Paikowsky S G, Player C M, Connors P I. A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces. *Geotech Test J*, 1985, 18(2): 168~193
- 22 Fakharian K, Evgin E. An automated apparatus for three dimensional monotonic and cyclic testing of interfaces. *Geotech Test J*, 1999, 19(1): 22~31
- 23 Fakharian K, Evgin E. Elasto-plastic modeling of stress path development behaviours of interfaces. *Int J Numer Analyt Meth Geomech*, 2000, 24(2): 183~199
- 24 Shahrour I, Rezaie F. An Elastoplastic Constitutive Relation for the Soil-Structure Interface Under Cyclic Loading. *Computers and Geotechnics*, 1997, 21(1): 21~39
- 25 Gennaro V De, Frank R. Elasto-plastic analysis of the interface behaviour between granular media and structure. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29: 547~572
- 26 Rao G A, Raghu Prasad B K. Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32: 253~257
- 27 Viggo T. Influence of plasticity on interface toughness in a layered solid with residual stresses. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40: 5769~5779
- 28 Tuncer B, Edil M G I, Peter J B, et al. Soil-structure interface shear transfer behavior. *Geomechanics, ASCE*, 2005, 528~543
- 29 Chandra S D, Shashank K P, David C. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5(4): 286~294
- 30 Noriyuki Y, Hidetoshi O. Sand-steel interface friction related to soil crushability. *Geomechanics*, 2003, 627~641
- 31 Goodman R F, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, 1968, 94(3): 637~660
- 32 Desai C S, Zaman M M. Thin layer element for interfaces and joints. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8(1): 19~43
- 33 赵振东, 蔡永恩. 模拟基础与地基接触面的弹塑性薄层连接元法. 地震工程与工程振动, 1990, 10(3): 97~107
- 34 邵炜, 金峰, 王光纶. 用于接触面模拟的非线性薄层单元. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39(2): 34~38
- 35 金峰, 邵炜, 张立翔等. 模拟软弱夹层动力特性的薄层单元及其工程应用. 工程力学, 2002, 19 (2): 36~40
- 36 Britto A M, Gunn M J. CRISP90, User's and Programmer's Guide, Vol. 1. Cambridge University, 1990
- 37 Ng P C F, Pyrah I C, Anderson W F. Assessment of three interface elements and modification of the interface element in CRISP90. *Computers and Geotechnics*, 1997, 21(4): 315~339
- 38 Badie S S, Salmon D C. A quadratic order elastic foundation finite element. *Computers & Structures*, 1996, 58(3): 435~443
- 39 Badie S S, Salmon D C, Beshara A W. Analysis of shear wall structures on elastic foundations. *Computers & Structures*, 1997, 65 (2): 213~224
- 40 Badie S S, Salmon D C. Three-Noded curved isoparametric soil interface element. *Computers & Structures*, 1997, 65(2): 205~212
- 41 Coutinho A L G A, Martins M A D, Sydenstricker R M, et al. Simple zero thickness kinematically consistent interface elements. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30: 347~374
- 42 Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior. *Journ Soil Mech & Found Div ASCE*, 1971, 97(SM12): 1657~1674
- 43 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 62~66
- 44 卢廷浩, 鲍伏波. 接触面薄层单元耦合本构模型. 水利学报, 2000, 30(2): 71~75
- 45 杜成斌, 任青文. 用于接触面模拟的三维非线性接触单元. 东南大学学报 (自然科学版), 2001, 31(4): 92~96
- 46 武亚军, 栾茂田, 杨敏. 土与结构间一种新的接触单元模型. 同济大学学报 (自然科学版), 2003, 33(4): 432~435
- 47 武亚军, 栾茂田, 杨敏. 土与结构间一种新接触单元的数值解. 同济大学学报 (自然科学版), 2003, 33(5): 600~614
- 48 栾茂田, 武亚军. 土与结构间接触面的非线性弹性-理想塑性模型及其应用. 岩土力学, 2004, 25(4): 507~513
- 49 孙吉主, 王勇. 钙质砂与结构接触面的本构模型研究. 力学季刊, 2006, 27(3): 476~480
- 50 孙吉主, 施戈亮. 循环载荷作用下接触面的边界面模型研究. 岩土力学, 2007, 28(2): 311~314
- 51 Jesús E G, George M F, Robert M E. Extended hyperbolic model for sand-to-concrete interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(11): 993~1000
- 52 Desai C S, Ma Y. Modeling of joints and interfaces using the disturbed state concept. *Int J Numer Analyt Meth Geomech*, 1992, 16(9): 623~653
- 53 Shashank K P, Chandra S D F. DSC model for soil and interface including liquefaction and prediction of centrifuge test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(2): 214~222
- 54 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面损伤本构模型. 岩土力学, 2001, 23(1): 6~11
- 55 胡黎明, 濮家骊. 损伤模型接触面单元在有限元计算分析中的应用. 土木工程学报, 2002, 35(3): 73~76, 86
- 56 Hu L M, Pu J L. Application of damage model for soil-structure interface. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30: 165~183
- 57 雷晓燕, Swoboda G, 杜庆华. 接触摩擦单元的理论及其应用. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 23~32
- 58 雷晓燕. 大位移接触摩擦单元在工程设计中的应用. 华东交通大学学报, 1994, 11 (1): 1~10
- 59 雷晓燕. 不同材料交界面上接触应力的有限元分析. 应用力学学报, 1995, 12 (3): 116~120

- 60 Lei X Y. Contact friction analysis with a simple interface element. *Comput Methods Appl Engrg*, 2001, 190: 1955~1965
- 61 Musharraf Z, Arumugam A. Contact-element model for dynamic analysis of jointed concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 1995, 121(5): 425~433
- 62 Ju S H, Rowlands R E. A three-dimensional frictional contact element whose stiffness matrix is symmetric. *Journal of Applied Mechanics*, 1999, 66: 460~467
- 63 Cora E M, Rau'l G. Laying modeling of submarine pipelines using contact elements into a corotational formulation. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2003, 125: 145~152
- 64 李振明. 子结构界面法求解岩土工程的接触问题. 岩土工程技术, 1997, 2: 29~32
- 65 刘晓春, 李同春. 拱坝坝体与基础接触面应力求解的新方法. 水电站设计, 1995, 11(1): 15~21
- 66 施景勋, 叶国琛. 匀质地基中桩土间力传递的边界元模拟. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 64~72
- 67 蒲军平, 姚振汉. 应用边界元法解决接触界面附近有空洞的 2 维移动接触问题. 清华大学学报 (自然科学版), 2001, 41(2): 88~91
- 68 Feng Y D, Wang Y S, Zhang Z M. Time domain BEM analysis of dynamic response of a cylinder embedded in soil with frictional slip at the interface. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23: 303~311
- 69 Gun H. Boundary element analysis of 3-D elasto-plastic contact problems with friction. *Computers and Structures*, 2004, 82: 555~566
- 70 LEE S S. Boundary element analysis of the stress singularity at the interface corner of viscoelastic adhesive layers. *Int J Solids Structures*, 1998, 35(13): 1385~1394
- 71 Kikuo K, Hirotsugu I, Toshikazu S. Boundary element analysis of thermoelastic contact problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 1995, 15: 329~337
- 72 刘海笑, 周锡初. 结构地震反应分析中接触面问题的处理. 天津大学学报, 2000, 33(1): 41~43
- 73 周小文, 龚壁卫, 丁红顺等. 砾石垫层 - 混凝土接触面力学特性单剪试验研究. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 876~880
- 74 Zachary J, Westgate, Jason T, et al. Evolution of sand-structure interface response during monotonic shear using particle image velocimetry. *Geo Congress*, 20060226-0301 Atlanta, GA (US), 2006, 1~6

## REVIEW ON MECHANICAL PERFORMANCE OF SOIL-STRUCTURE CONTACT\*

LI Liyun<sup>†</sup>    DU Xiuli    LI Liang

The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology),  
Ministry of Education, Beijing 100124, China

**Abstract** In the fields of civil engineering and earthquake engineering, soil and structure dynamic interaction is a research hotspot. It is very important to properly simulate the mechanical performance of soil-structure interface in the numerical analyses of soil and structure dynamic interaction. In this paper, some conclusions are drawn by analyzing the research status in this field. First, technical devices need to be developed and test technologies be improved so that the real mechanical state of Soil-Structure contact could be perfectly revealed. And then, the study on mechanical performances and failure mechanism could be deepened with the help of newly developed test technologies and new test results of Soil-Structure interfaces, in which emphasis should be laid on the rate-dependent mechanical characteristics. Finally, improvement of numerical simulation methods highlighted by the achievements mentioned above is now desirable and feasible. To sum up, all the three steps together form one of the future trends in the research of Soil-Structure dynamic contact.

**Keywords** soil and structure dynamic interaction, contact problem of soil-structure interface, test technology, constitutive relation, numerical simulation method

\* The project supported by the National Basic Research Program of China (2007CB714203), the National Natural Science Foundation of China (90715035, 50808006), the Laboratory of Seismic Control and Structural Safety of Guangzhou University and the Ph.D. Foundation of Beijing University of Technology

<sup>†</sup> E-mail: lly@bjut.edu.cn