# SPH方法在岩土工程中的研究应用进展

黄 雨[1,2]，郝 亮[1]，野々山 栄人[1,3]

(1. 同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092；
3. 岐阜大学社会基盤工学科，日本 岐阜 501-1193)

**摘 要**：光滑质点流体动力学（简称SPH）是一种纯Lagrangian、无网格的流体动力学计算方法，已经广泛应用于与工程相关的许多学科的计算分析研究中。鉴于岩土工程中的SPH方法的研究应用是一个比较新的研究方向，首先简述了SPH方法在岩土工程应用的基础，重点讲述了目前SPH方法在岩土工程相关学科中的应用，最后针对地震液化问题，提出未来可以将SPH方法运用到地震液化前后变形特征的统一分析中，以及借鉴爆炸和冲击科学中SPH-FEM耦合方法进行地震液化中结构物破坏机理的研究。

**关键词**：SPH方法；岩土工程；数值分析；应用研究。

**中图分类号**：TD853 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)02－0256－07

**作者简介**：黄 雨(1973－ )，男，江苏南京人，博士，副教授，主要从事岩土地震工程与计算岩土力学的教学和研究工作。E-mail: yhuang@mail.tongji.edu.cn。

## The state of the art of SPH method applied in geotechnical engineering

HUANG Yu[1,2]，HAO Liang[1]，NONOYAMA Hideto[1,3]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of the Education, P. R. China, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil Engineering, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan)

**Abstract**: SPH (smoothed particle hydrodynamics) method, a pure Lagrangian, meshless hydrodynamics method, has been widely applied in numerical simulations in many engineering fields. Since SPH method was a newly emerged method for the applications in the geotechnical engineering fields, the basic concept was firstly introduced concerning the researches in geotechnical engineering. Then the emphases were put on the numerical simulations in the fields relative to geotechnical engineering with SPH method. Moreover, as far as the researches on seismic liquefaction were concerned, it was proposed that the deformation characteristics in the pre-and post-liquefaction process should be generally analyzed in the frame of SPH method, and the mechanism of structure failures in liquefaction should be considered with coupled SPH-FEM methods which were verified in explosion and impact science.

**Key words**: SPH method; geotechnical engineering; numerical simulation; application research

## 0 引 言

近几十年来，随着电子计算机性能的提高，数值模拟计算分析发展进入黄金时期，各种数值方法层出不穷，所涉及的领域几乎涵盖了目前所有的工程学科。SPH法最早由Lucy和Gingold等在1977年提出并将其用于解决天体物理学中三维流体自引力的问题[1]。在SPH方法中，任何计算区域内的系统状态均是由一系列可以承载不同性质材料特征的质点所描述，并使用控制守恒方程式约束这些质点的运动。正因为如此，SPH方法可以有效处理具有大变形特征系统的动力响应问题，并在与FEM等方法耦合使用中，在同一个数值模拟分析过程中发挥各自的优势，完成了许多有意义的研究[2]。

SPH方法的应用范围广阔，目前在国内外的研究成果多集中于以下领域：天体物理学[3-5]、爆炸与高速冲击科学[6-8]、采矿工程[9]、流体动力学[10-14]等。SPH方法在应用方面虽然取得骄人成绩，但其本质上存在两个缺憾：①边界上容易出现质点覆盖不足；②在处理自由表面问题时表现出对张量描述的不稳定性[15]。因此，为了完善研究中所遇到的边界表述和张量的稳定性问题，各种改进的SPH方法应运而生，修正光滑

**基金项目**：教育部留学回国人员科研启动基金资助项目（教外司留[2006]331号）；上海市重点学科建设项目（B308）

**收稿日期**：2007－01－29

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流体动力学（CSPH）方法[16]、规则光滑流体动力学（RSPH）方法[17]、离散光滑流体动力学（DSPH）方法[2]、自适应光滑流体动力学（ASPH）方法[2]等，并广泛应用于各种研究分析中。

最近几年，SPH 方法在岩土工程相关学科中的应用刚刚开始，鉴于其强大的动力非线性分析能力，有必要简单介绍一下 SPH 分析方法的核心思想。

## 1　SPH 方法的基础[2, 18-21]

SPH 方法的核心实为一种插值。在 SPH 中任一宏观变量（如密度、压力、温度等）$A(r)$能方便地借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到，其形式为

$$\langle A(r)\rangle=\int_D A(r)W(r-r',h)\mathrm{d}r' \quad , \tag{1}$$

式中，$D$ 为整个求解区域，$W$ 是插值核，它具有两个特性：

$$\int_D W(r-r',h)\mathrm{d}r'=1 \quad , \tag{2}$$

$$\lim_{h\to 0}W(r-r',h)=\delta(r-r') \quad 。 \tag{3}$$

其中，$h$ 是核宽度的一种度量，可假定它取为定常数。显然，式（2）是一个归一化条件，而式（3）实际上是考虑 $W$ 在 $r'=r$ 处的取值情况，它是一个强尖峰函数。在$|r-r'|>h$，它为零；而当 $h\to 0$ 时，它是一个 $\delta$ (Delta)函数，即有 $\lim_{h\to 0}\langle A(r)\rangle=A(r)$。通常称〈$A(r)$〉为 $A(r)$的一个核估计，它等价于围绕场 $A(r)$带有一个光滑器或过滤器函数 $W(r-r', h)$去产生一个估计，把其中的局部统计涨落全部过滤。

如果核函数 $W$ 是 $n$ 次可微的，则由式（1）可知〈$A(r)$〉同样是 $n$ 次可微。假设有密度为$\rho(r)$的流体在流动，设想将流体剖分为 $N$ 个小体积元，分别具有质量为 $m_1$，$m_2$，$m_3$，…，$m_\mathrm{N}$，质量的中心位置为 $r_1$，$r_2$，$r_3$，…$r_N$，则利用式（4）实现用一个解析函数〈$A(r)$〉来逼近任一场函数 $A(r)$：

$$\langle A(r)\rangle=\sum_{j=1}^{N}m_j\frac{A_j}{\rho_j}W(r-r_j,h) \quad 。 \tag{4}$$

由此可见，这种插值积分的导数能够通过普通求导得到，无需用有限差分，也不需要网格，这正是 SPH 方法的关键点。

在流体计算中，SPH 方法中所使用的用以离散计算区域且具有有限大小的体积元称为点，由于其本身含有质量等信息量，故称之为质点。在式（1）中令 $A(r)\equiv\rho(r)$，则由式（4）可得：

$$\langle\rho(r)\rangle=\sum_{j=1}^{N}m_jW(r-r_j,h) \quad , \tag{5}$$

这表明，连续密度场是可以通过一组质点的质量，经过核光滑化所得。这也是 SPH 方法取名为“光滑质点”的原因。

### 1.1　流体动力学控制方程的 SPH 形式

SPH 形式下的流体动力学方程组，本质是将 Euler 描述形式的流体动力学方程组转化为 Lagrangian 描述形式。以流体动力学中基本的 Navier-Stokes 方程为例，其所对应的质量守恒方程，动量守恒方程以及能量守恒方程微分型描述形式如下：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla(\rho\boldsymbol{V})=0 \quad , \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho\boldsymbol{V})}{\partial t}+\nabla(\rho\boldsymbol{V}\boldsymbol{V})=\rho F+\nabla\vec{\boldsymbol{\tau}}^{*} \quad , \tag{7}$$

$$\frac{\partial\rho E}{\partial t}+\nabla(\rho E\boldsymbol{V})=\rho F\boldsymbol{V}-\nabla q+\nabla(\vec{\boldsymbol{\tau}}^{*}\boldsymbol{V}) \quad , \tag{8}$$

其中

$$\vec{\boldsymbol{\tau}}^{*}=-p\vec{\boldsymbol{I}}+\vec{\boldsymbol{\tau}} \quad , \tag{9}$$

式中，$\nabla$ 为散度，$\rho$为密度，$\boldsymbol{V}$ 为流体运动的速度矢量，$F$ 代表外力，$E$ 为总能，$q$ 为热通量，$p$ 为压力，$\vec{\boldsymbol{\tau}}$ 为黏性应力张量，$\vec{\boldsymbol{I}}$ 为单位张量。

通过一系列的转化，SPH 格式下的 Navier-Stokes 公式的形式如下。

（1）质量守恒方程

$$\rho_i=\sum_{j=1}^{N}m_jW_{ij} \quad , \tag{10}$$

$$\rho_i=\frac{\sum_{j=1}^{N}m_jW_{ij}}{\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{m_j}{\rho_j}\right)W_{ij}} \quad , \tag{11}$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt}=-\rho_i\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\boldsymbol{v}_j^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \quad , \tag{12}$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt}=\rho_i\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\boldsymbol{v}_j^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \quad , \tag{13}$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt}=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\boldsymbol{v}_j^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \quad 。 \tag{14}$$

（2）动量守恒方程

$$\frac{D\boldsymbol{v}_i^{\alpha}}{Dt}=\sum_{j=1}^{N}m_j\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}+\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i\rho_j}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \quad , \tag{15}$$

$$\frac{D\boldsymbol{v}_i^{\alpha}}{Dt}=\sum_{j=1}^{N}m_j\left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2}+\frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2}\right)\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \quad 。 \tag{16}$$

（3）能量守恒方程

$$\frac{De_i}{Dt}=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}m_j\frac{p_i+p_j}{p_ip_j}\boldsymbol{v}_{ij}^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}}+\frac{\mu_i}{2\rho_i}\varepsilon_i^{\alpha\beta}\varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad , \tag{17}$$

$$\frac{De_i}{Dt}=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}m_j\left(\frac{p_i}{p_i^2}+\frac{p_j}{p_j^2}\right)\boldsymbol{v}_{ij}^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}}+\frac{\mu_i}{2\rho_i}\varepsilon_i^{\alpha\beta}\varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad 。 \tag{18}$$

式中，$\alpha$，$\beta$ 为所求解问题的维数，$\mu$ 为动力黏性系

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数，$i$ 为计算区域内某点的记号，$\boldsymbol{v}$ 为流动速度矢量，$e$ 为某点的总能，$\varepsilon$ 为动剪切速率。

当然，流体动力学中其它的描述流体运动的方程式，如 Euler 方程、Burger 方程等，同样可以通过类似的变换得到对应的 SPH 格式。这样就可以按照 SPH 方法的求解特性，对所描述问题进行计算研究分析。

### 1.2 固体力学控制方程的 SPH 形式

Liu 等在文献[2]中指出，由于 SPH 方法在处理一些大变形问题上所表现出来的相对于其他方法的优势，目前其所涉及的内容已不仅仅是当初的流体动力学范围，而是着眼于各种学科，如今的 SPH 方法已经从所谓的“Hydrodynamics”逐步完善走向更广义的“Mechanics”。

刚黏塑性材料的 Levy-Mises 本构方程形式为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=\frac{3}{2}\frac{\bar{\dot{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}}\boldsymbol{\sigma}'_{ij} \quad , \tag{19}$$

式中，$\boldsymbol{\sigma}'_{ij}=\sigma_{ij}-\frac{\sigma_{kk}}{3}\delta_{ij}$ 是偏差应力张量，$\delta_{ij}$ 是 Kronecker 记号。$\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\dot{\varepsilon}}$ 分别为符合 Von Mises 屈服准则条件下的等效应力和等效应变速率。

流动法则认为，各向同性材料塑性变形物体具有开放的边界域$\Omega\subset R^3$，在$\Omega\subset R^3$具有充分平滑边界 $S$，在边界 $S_{\mathrm{u}}$ 上，速度 $\bar{u}_i\,(i,j=1,2,3)$是给定的，其余边界 $S_{\mathrm{t}}$ 上外力 $t_i$ 是给定的。变形速度 $u_i$ 和应力张量 $\boldsymbol{\sigma}_{ij}\,(i,j=1,2,3)$关系应该满足下列 3 个方程：

$$\sigma_{ij,j}+b_i=\rho\ddot{u}_i\ （动态平衡）\ , \tag{20a}$$

$$\sigma_{ij,j}+b_i=0\quad （静态平衡）\ , \tag{20b}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)=\frac{1}{2}\left(u_{i,j}+u_{j,i}\right)$$

$$=\frac{1}{2}\left[\left(\nabla u\right)_{ij}+\left(\nabla u\right)_{ij}^{T}\right] \ ; \tag{21}$$

以及两个边界条件：

$$u=\bar{u}\qquad (在\ S_{\mathrm{u}}\ 上)\ , \tag{22}$$

$$\sigma_{ij}n_j=t_i\qquad (在\ S_{\mathrm{t}}\ 上)\ 。 \tag{23}$$

通过基于黏塑性材料总能耗的最小化方法，实现上述方程在 SPH 方法中使用的格式为

$$D\Pi_0(\delta u)=\sum_{a=1}^{N}\sum_{b\in M_{\mathrm{a}}}V_{\mathrm{b}}V_{\mathrm{a}}\sigma_{\mathrm{b}}\nabla W_{\mathrm{a}}(x_{\mathrm{b}})\delta u_{\mathrm{a}}-$$

$$\sum_{a=1}^{N}\sum_{b\in M_{\mathrm{a}}}V_{\mathrm{b}}V_{\mathrm{a}}W_{\mathrm{a}}(x_{\mathrm{b}})b_{\mathrm{b}}\delta u_{\mathrm{a}} \tag{24}$$

式中，$V$ 为与节点 $a$ 或 $b$ 有关的体积，$b_{\mathrm{b}}$ 为节点 $b$ 处的体积力，$u$ 为耗能 $W$ 为某节点处的核函数，$\sigma_{\mathrm{b}}$ 为节点 $b$ 处应力，$M_{\mathrm{a}}$ 为以节点 $x_{\mathrm{a}}$ 为中心 $2h$ 范围内的节点。

对于任意$\delta_{\mathrm{u}}$，令 $\mathrm{D}\Pi_0(\delta_{\mathrm{u}})=0$，得到下列线形系统方程：

$$T_{\mathrm{a}}=F_{\mathrm{a}}\ , \tag{25a}$$

$$\sum_{b\in M_{\mathrm{a}}}V_{\mathrm{b}}V_{\mathrm{a}}\sigma_{\mathrm{b}}\nabla W_{\mathrm{a}}(x_{\mathrm{b}})=\sum_{b\in M_{\mathrm{a}}}V_{\mathrm{b}}V_{\mathrm{a}}W_{\mathrm{a}}(x_{\mathrm{b}})b_{\mathrm{b}}\ , \tag{25b}$$

式中，$T_{\mathrm{a}}$ 为内力，$F_{\mathrm{a}}$ 为外力。

文献[21]同时说明，采用另一种方法——再生核函数近似方法所得到的最终格式与上述结果相同。相应的增量形式可依据文献[2]所提出的推导方法得到，篇幅所限，在此不再赘述。

固体力学的 SPH 方法中同样易出现张量不稳定性这种数值问题，即当求解处于张应力状态下的质点运动时，数值解会表现出不稳定的现象。

针对张量不稳定的问题，目前主要使用三次样条光滑函数辅之以无单元的 Galerkin 法进行处理，并取得一定的进展。尽管 Randles 和 Libersky 于 2000 年指出，材料强度问题中张量不稳定性的研究通常滞后于固体连续模型研究的发展速度，故在固体连续模型的 SPH 形式中，总会出现这类问题，但这并不妨碍 SPH 方法在各个领域广泛应用。

## 2 相关研究进展

正是由于在 SPH 方法框架中，可以导入符合各种材料性质的本构方程，才使得 SPH 方法具有广泛的用途，目前已发表的文献也充分证实了 SPH 方法在岩土工程方向上发展的潜力是不可限量的。

因为 SPH 方法在流体动力学方面的成功应用，目前，在岩土工程相关学科的数值模拟研究中，有很多学者所做的工作都是与流体动力学有关。

溃坝问题（图 1）是国内外研究者比较关注的一个课题，成果涉及到此类问题的各个方面，具体如下：①固壁边界和自由表面流动的处理方法[22-23]；②不同分界面混合流的溃坝二维模拟分析[24]；③自由表面牛顿流与非牛顿流溃坝流动的异同[25]；④流体飞溅、融合等复杂自由表面现象的模拟[26]；⑤实际溃坝事件的三维评估[27]。

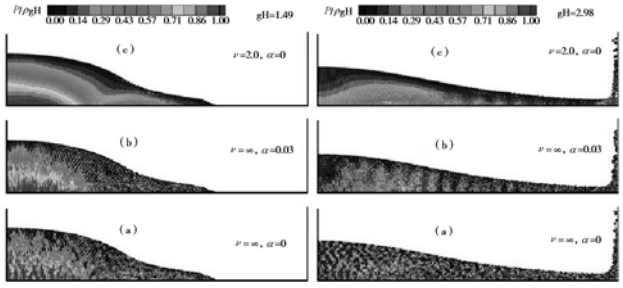

图 1 由溃坝引起的自由表面流动[25]

Fig. 1 Free-surface flow generated by the break of a dam[25]

SPH 在溃坝问题上的成功应用，将海岸科学中流固耦合问题（图 2）的解决提上了日程。Lo 等采用 SPH

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和 LES 耦合的方法对近海岸单波运动机理进行了初步研究，结果显示，数值模拟的单波剖面与试验数据以及解析解结果几乎完全一致[28]；此后不久，Shao 等分析了规则及不规则波浪冲越近海构筑物的运动过程，研究成果与相应试验中的观测结果惊人地相似[29]。Mutsuda 等将 SPH 方法应用于沿海岸波浪与结构物相互作用的研究中，并在数值模拟中实现了波浪与刚性、弹性建筑物相互作用中建筑物产生的运动、变形情况，试验结果证实了 SPH 方法的有效性和精确性[30]。Gómez-Gesteira 等把目光聚焦于波浪冲越坝体时的形状和幅度的 SPH 数值模拟，结果与试验数据吻合的相关性极高[31]。

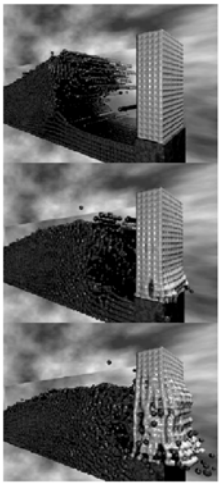

图 2 碎浪与弹性挡墙之间的相互作用[30]

Fig. 2 Interaction between breaking wave and elastic wall[30]

SPH 在以上研究中的成功，促进了岩土工程相近学科中关于流固耦合问题在 SPH 数值模拟中的发展速度。Oger 等在 SPH 方法中模拟了风力作用下浮冰在水面上的运动状态，并通过引入黏塑性模型，考虑了浮冰的流变，数值分析结果与解析解相符[32]。Shen 耦合使用 SPH 和 FEM 进一步研究了在动力搬运作用下浮冰在河流中运动、堵塞等现象，并将结果用于解决如何减少 Mississippi-Missouri 河流交汇点浮冰堵塞的难题[33]。

下面介绍两例固体冲入流体后的运动、变形问题。Monaghan 等在文献[34]中介绍了刚体与水相互冲击的室内试验和数值模拟结果：当刚体以不同初速进入水体时，SPH 方法可描述水面不同响应下的涌动、溅水等运动，证实了 SPH 方法所模拟的刚块滑入水中后的水流运动的合理性。2006 年，Oger 等在 SPH 框架中引入了一种可估计流体对固体边界作用力大小的方法，用于获得流固耦合问题中自由运动物体的动力响应，并以不同楔形体滑入水体的试验结果证实了这种方法的适用性，他们指出需要更多的试验来证实这种方法的可行性，此外还应在 SPH 求解过程考虑空气的运动状态[35]。

当然，除在海岸、水利等研究方向之外，岩土工程的研究者一直都在考虑如何将岩土工程中具体问题的分析与 SPH 方法特点完美的结合在一起，多年来，诸多学者的努力为此方向的研究奠定了一定的基础。

早在 1995 年，Benz 等就通过在 SPH 框架内引入一个可以描述杆件断裂的模型，并采用此模型模拟分析了脆性杆在爆炸冲击荷载下裂缝的发育状况，在通过与室内试验结果的对比中，证实了 SPH 方法在此方面应用的可行性[36]。Bonet 等在弹性柱变形的数值模拟中证实了 SPH 方法在此类问题上的可行性[37]。

近年来，SPH 方法开始涉及到关于计算土力学的研究。Morris 等使用 SPH 方法模拟计算了水流通过土中复杂孔隙介质的时间，尽管有些模拟结果并不是十分理想，但他们指出，在土颗粒含量高的孔隙中，模拟结果与试验结果还是有着较高的一致性[38]。Bui 等于 2005 年发表了关于 SPH 方法在土－水相互作用中的应用研究成果，他们所使用的数值模型不仅可以考虑土的弹塑性，而且还能反映土中孔隙水的变化情况，并以干土和饱和土在水冲刷过程为原型，进行了模拟计算，结果说明此 SPH 模型可应用于计算土力学数值模拟中[39]。之后，他们采用该方法完成了干土崩塌过程的数值模拟，结果证实了此模型在处理土力学问题上的适用性，并进一步指出此模型具备处理大变形的能力[40]。

最近，岩土、地质工程研究者们在 SPH 应用的研究中取得了比较引人注目的成绩。日本学者 Maeda 等发表了一系列关于土体中固－液两相和固－液－气三相相互作用的 SPH 数值模拟研究分析[41-43]，在他们所提出的 SPH 模型中重现了土体中的渗流过程（图 3）、土质边坡的崩塌、土质大坝的渗流破坏以及土体渗流过程中气泡产生、发展、消散的过程等，这些实例的成功模拟，说明 SPH 方法已经真正的融入了岩土工程，并为今后计算岩土力学向更深层次的研究提供了不可多得的基础。

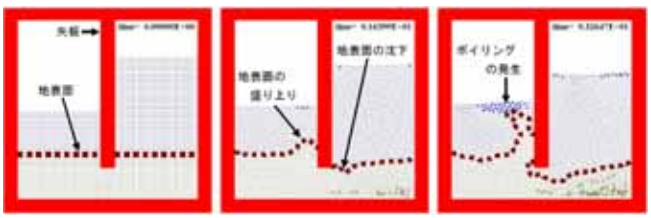


图 3 土体中固－液两相渗流过程模拟[42]

Fig. 3 Seepage in soil with solid-liquid interaction [42]

更值得一提的是，日本的部分学者应用 SPH 方法

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对土体大变形的研究。在 Naili 等的研究成果中[44]，他们使用 SPH 方法对地震液化中土－上部结构的相互作用进行了数值模拟分析，模型中分别使用 Bingham 流体和 Lennart-Jones 势能以描述液化土体和固体颗粒。结果证实上述模型可以较好地重现液化后的土体外部构型，但同时发现，液化土体在绕流经过桩基的过程中，对于其流动速度和剪应变速率的计算效果并不理想，未来的工作应包括进一步加强对土－结构边界面上液化土体与结构相互作用的研究。除此之外，Bui 等完成了他们之前所提出的使用 SPH 对固－液两相耦合的土体大变形研究，数值模型中，假设固相物质为弹塑性材料，液相物质为微可压缩的黏性流体，使用 Mohr-Coulomb 破坏准则确定塑性流动范围，实现了土体崩塌和高压水对土体冲蚀过程的模拟计算，虽然未能有相应的试验可以证实计算的准确性，但通过定性观察，结果符合实际情况[45]。

上述 SPH 方法在岩土工程相关学科中的研究应用成果，丰富了岩土工程相关学科中应用的研究方法，而 SPH 方法的诸多优点也将使其在岩土工程学科中的应用加速推广。

## 3 结论与建议

综上所述，SPH 方法是一种纯拉格朗日、无网格的动力学方法，其强大的功能使它不仅适用于流体动力学问题的处理，还有效地解决了大量的关于固体力学的问题。针对笔者所从事的计算岩土力学方向，围绕 SPH 方法及其在地震液化方向上的应用，很多方面的问题还有待进一步深入探讨和研究。

（1）SPH 方法本身的研究。正如文献[15]所述，SPH 方法本身与生俱来就有两方面的缺陷，许多学者专家在这方面做出很多尝试和努力[15,46-48]，但是这些成果所解决的边界条件或张量稳定，都是针对某一方向上的问题。对于岩土力学中所研究的土体材料，它本身是一种复杂的材料，目前还鲜见从固体力学角度出发的 SPH 方法进行土体材料变形性质的研究，如何考虑在 SPH 框架中实现实际工程中水－土两相相互作用、水－土－气三相相互作用以及在此研究基础上实现它们与结构物的相互作用，将是今后计算岩土力学耦合 SPH 方法研究的重点之一。

（2）土层地震液化的研究。目前进行土层地震液化研究的学者，除使用弹塑性力学分析以外，基本上都在将液化土体视作黏性 Bingham 流体进行研究，而且大多数研究都未把土体在液化前的小应变状态和液化后的大变形性状统一在同一方法中。SPH 方法在弹塑性材料和流体材料上的成功应用，证实其具备将上述两个环节统一在一个数值分析过程的能力，可以尝试在 SPH 方法框架中将地震液化进行统一研究。

（3）地震液化地基中结构物的破坏机理研究。现在日本学者所完成的研究成果[44-45]，已经具备完成此方面研究的基础，他们在数值分析中所遇到的两相分界面相互作用的问题，笔者认为可以借鉴爆炸和冲击科学中所使用的 SPH 和 FEM 耦合方法[8,49]予以解决，例如在液化土体与桩基相互作用过程中，可以将液化土体视作 Bingham 流体在 SPH 框架下求解，桩的变形、破坏则可以使用 FEM 进行离散，这样还可以发挥 FEM 在材料弹塑性变形应用中的优势。另外，还应该加大模拟试验的研究力度用以验证数值计算结果的正确性。

## 参考文献：

[1] 刘 鹏, 刘 更, 刘天祥, 等. 光滑粒子动力学方法及其应用[J]. 机械科学与技术, 2005, **24**(9): 1126－1130. (LIU P, LIU G, LIU T X, et al. On smoothed particle hydrodynamics method and its application[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, **24**(9): 1126－1130. (in Chinese))

[2] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics—a meshfree particle method[M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2003.

[3] MONOGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. Annual review of astronomy and astrophysics, 1992, **30**: 543－574.

[4] MONAGHAN J J, LATTANZIO J C. A refined particle method for astrophysical problems[J]. Astronomy and Astrophysics, 1985, **149**(1): 135－143.

[5] CURIR A, MAZZEI P. SPH simulations of galaxy evolution including chemo-photometric predictions[J]. New Astronomy, 1999, **4**(1): 1－20.

[6] SEKINE H, ITO R, SHINTATE K. A single energy-based parameter to assess protection capability of debris shields[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, **34**(5): 958－972.

[7] MICHEL Y, CHEVALIER J M, DURIN C, et al. Hypervelocity impacts on thin brittle targets: experimental data and SPH simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, **33**(1/12): 441－451.

[8] 宋顺成, 才鸿年, 王富耻. 关于弹体冲击和贯穿混凝土的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2006, **26**(1): 1－6. (SONG S C, CAI H N, WANG F C. 3D-numerical simulations on impact and perforation of concrete targets by projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, **26**(1):1－6. (in Chinese))

[9] CLEARY P W, SINNOTT M, MORRISON R. Prediction of slurry transport in SAG mills using SPH fluid flow in a

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

dynamic DEM based porous media[J]. Minerals Engineering, 2006, **19**(15): 1517－1527.

[10] FANG J N, OWENS R G, TACHER L, et al. A numerical study of the SPH method for simulating transient viscoelastic free surface flows[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2006, **139**(1/2): 68－84.

[11] CLEARY P W, HA J, PRAKASH M, NGUYEN T. 3D SPH flow predictions and validation for high pressure die casting of automotive components[J]. Applied Mathematical Modelling, 2006, **30**(11): 1406－1427.

[12] TARTAKOVSKY A M, MEAKIN P. Pore scale modeling of immiscible and miscible fluid flows using smoothed particle hydrodynamics[J]. Advances in Water Resources, 2006, **29**(10): 1464－1478.

[13] XIONG H B, CHEN L H, LIN J Z. Smoothed particle hydrodynamics modeling of free surface flow[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, **18**(1): 443－445.

[14] OGER G, DORING M, ALESSANDRINI B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of Computational Physics, 2006, **213**(2): 803－822.

[15] CHEN J K, BERAUN J E. A generalized smoothed particle hydrodynamics method for nonlinear dynamic problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, **190**(1/2): 225－239.

[16] RODRIGUEZ-PAZ M, BONET J. A corrected smooth particle hydrodynamics formulation of the shallow-water equations[J]. Computers & Structures, 2005, **83**(17/18): 1396－1410.

[17] BØRVE S , OMANG M, TRULSEN J. Regularized smoothed particle hydrodynamics with improved multi-resolution handling[J]. Journal of Computational Physics, 2005, **208**(1): 345－367.

[18] 张　雄, 刘　岩. 无网格法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (ZHANG X, LIU Y. Meshless methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

[19] 张锁春. 光滑质点流体动力学(SPH)方法(综述)[J]. 计算物理, 1996, **13**(4): 385－397. (ZHANG S C. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) method(a review)[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1996, **13**(4): 385－397. (in Chinese))

[20] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (REN Y X, CHEN H X. Fundament of computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese) )

[21] 李长生, 熊尚武, RODRIGUES J, MARTINS P. 金属塑性加工过程无网格数值模拟方法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2004. (LI C S, XIONG S W, RODRIGUES J, MARTINS P. Mesh-free methods in metal forming processes[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2004. (in Chinese))

[22] RANDLES P W, LIBERSKY L D. Normalized SPH with stress points[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, **48**(10): 1445－1462.

[23] 汤文辉, 毛益明. SPH 数据模拟中固壁边界的一种处理方法[J]. 国防科技大学学报, 2001, **23**(6): 54－57. (TANG W H, MAO Y M. A method of processing rigid boundary condition in SPH simulation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, **23**(6): 54－57. (in Chinese))

[24] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2003, **191**(2): 448－475.

[25] SHAO S D, LO E Y M. Incompressible SPH method for simulating newtonian and non-newtonian flows with a free surface[J]. Advances in Water Resources, 2003, **26**(7): 787－800.

[26] 李梅娥, 周进雄. 不可压流体自由表面流动的 SPH 数值模拟[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(3): 5－9. (LI M E, ZHOU J X. Modeling free surface flow of incompressible fluid using SPH[J]. Chinese Journal of Mechanical Enginneering, 2004, **40**(3): 5－9. (in Chinese))

[27] ROUBTSOVA V, KAHAWITA R. The SPH technique applied to free surface flows[J]. Computers & Fluids, 2006, **35**(10): 1359－1371.

[28] LO E Y M, SHAO S D. Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method[J]. Applied Ocean Research, 2002, **24**(5): 275－286.

[29] SHAO S D, JI C M, GRAHAM D I, et al. Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model[J]. Coastal Engineering, 2006, **53**(9): 723－735.

[30] 陸田秀実, 土井康明. SPH 法による砕波と沿岸構造物の相互作用に関する数値解析(日文)[C]// 第 19 回数値流体力学シンポジウム. 東京, 2005, **12**: 1－7. (MUTSUDA H, DOI Y. Numerical simulation of interaction between wave breaking and coastal structure using SPH[C]// The Proceedings of 19th Conference on Numerical Simulation of Fluid Mechanics. Tokyo, 2005, **12**: 1－7. (in Japanese))

[31] GÓMEZ-GESTEIRA M, CERQUEIRO D, CRESPO C, et al. Green water overtopping analyzed with a SPH model[J]. Ocean Engineering, 2005, **32**(2): 223－238.

[32] OGER L, SAVAGE S B. Smoothed particle hydrodynamics for cohesive grains[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, **180**(1/2): 169－183.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[33] SHEN H T, SU J S, LIU L W. SPH simulation of river ice dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2000, **165**(2): 752－770.

[34] MONAGHAN J J, KOS A, ISSA N. Fluid motion generated by impact[J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 2003, **129**(6): 250－259.

[35] OGER G, DORING M, ALESSANDRINI B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of Computational Physics, 2006, **213**(2): 803－822.

[36] BENZ W, ASPHAUG E. Simulations of brittle solids using smooth particle hydrodynamics[J]. Computer Physics Communications, 1995, **87**(1/2): 253－265.

[37] BONET J, KULASEGARAM S, RODRIGUEZ-PAZ M X, et al. Variational formulation for the smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation of fluid and solid problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, **193**(12/14): 1245－1256.

[38] MORRIS J P, ZHU Y, FOX P J. Parallel simulation of pore-scale flow through porous media[J]. Computers and Geotechnics, 1999, **25**(4): 227－246.

[39] BUI H H, SAKO K, FUKAGAWA R. Numerical simulation of soil-water interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method[C]// Proceedings of the 15th International Conference of the ISTVS. Japan: Hayama, 2005, **9**: 1－15.

[40] BUI H H, FUKAGAWA R. Smoothed particle hydrodynamics for soil mechanics[C]// The Proceedings of 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. London: Taylor & Francis Group, 2006: 275－281.

[41] 坂井 守, 前田 健一. 固・液・気相の相互作用を考慮した SPH 法による浸透破壊解析法の開発[C]// 第 38 回地盤工学研究発表会. 秋田, 2003: 1203－1204. (SAKAI M, MAEDA K. Seepage failure analysis by smoothed particle hydrodynamics method with interactions among solid-liquid-gas phases[C]// Proceedings of the 38th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Akita, 2003: 1203－1204 (in Japanese))

[42] 坂井 守, 溝口 洋一, 前田 健一. 固･液･気相の相互作用を考慮した SPH による浸透破壊解析法の開発[C]// 第 39 回地盤工学研究発表会. 新 潟, 2004: 1241－1242. (SAKAI M, MIZOGUCHI H, MAEDA K. Development of seepage failure analysis by smoothed particle hydrodynamics with interactions among solid-liquid-gas phases[C]// Proceedings of the 39th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Niigata, 2004: 1241－1242. (in Japanese) )

[43] 坂井 守, 坂井 宏隆, 前田 健一. 固・液・気三相相互作用を考慮した Smoothed Particle Hydrodynamics 法による地盤の浸透破壊解析[C]// 第 40 回地盤工学研究発表会. 函館, 2005: 945－946. (SAKAI M, SAKAI H, MAEDA K. Seepage failure analysis by Smoothed Particle Hydrodynamics with interactions among solid-liquid-gas phases[C]// Proceedings of the 40th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Hakodate, 2005: 945－946. (in Japanese))

[44] NAILI M, 松島亘志, 山田恭央. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of soil-structure problem due to liquefaction[C]// 第 40 回地盤工学研究発表会. 函館, 2005: 2257－2258. (NAILI M, MATSUSHIMA T, YAMADA Y. Smoothed particles hydrodynamics for numerical simulation of soil-structure problem due to liquefaction[C]// Proceedings of the 40th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Hakodate, 2005: 2257－2258. (in Japanese))

[45] ハ ホン ブイ, 酒匂 一成, 深川 良一. SPH 法を用いた地盤材料の大変形シミュレーション[C]// 第 55 回理論応用力学講演会. 京都, 2006. (BUI H H, SAKO K, Fukagawa R. Large deformation simulation of geomaterials using smoothed particle hydrodynamics (SPH)[C]// The Proceedings of The 55th National Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Kyoto, 2006. (in Japanese))

[46] SWEGLE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed particle hydrodynamics stability analysis[J]. Journal of Computational Physics, 1995, **116**(1): 123－134.

[47] GRAY J P, MONAGHAN J J, SWIFT R P. SPH elastic dynamics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, **190**(49-50): 6641－6662.

[48] MELEÁN Y, SIGALOTTI L D G, HASMY A. On the SPH tensile instability in forming viscous liquid drops[J]. Computer Physics Communications, 2004, **157**(3): 191－200.

[49] WANG Z Q, LU Y, HAO H, CHONG K. A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast[J]. Computers & Structures, 2005, **83**(4-5): 339－356.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net