

液化后土体的流态化特性研究进展

黄 雨^{1,2}, 毛无卫^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 中国科学院 地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要: 简述近年来对液化后土体流体性质的认识过程, 分析液化后土体的流态化现象及其发生机制, 重点介绍目前常用于液化变形分析的宾汉姆模型和假塑性模型的相关研究成果. 指出应结合工程实践, 开展针对液化土体的流体动力学特征的研究, 修正相关流体模型; 提出在液化变形研究中, 未来发展应该考虑建立基于固-液-气多相流理论的综合分析模型.

关键词: 液化; 流态化; 流体力学; 非牛顿流体; 本构模型

中图分类号: P 642.27

文献标识码: A

State of Art of Fluidization Behavior of Post-liquefied Soils

HUANG Yu^{1,2}, MAO Wuwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The paper presents a review of the research developments of fluidization behavior of post-liquefied soils and a discussion on the phenomenon and mechanism of fluidization. Then, two constitutive models adopted in liquefaction analysis, the pseudo-plastic and the Bingham models, are introduced. Also, a further study is made on hydrodynamical characteristics of liquefied soils to modify the fluid models on the basis of the engineering practice. Finally, a solid-liquid-air multi-phase flow model is proposed to be developed in a future unified analysis of liquefied soils.

Key words: liquefaction; fluidization; hydrodynamics; non-Newtonian fluid; constitutive model

土体液化是一种常见的地质灾害, 砂土地震液化更是几乎出现在每一次的大地震中. 20 世纪以来的几次大地震, 如 1964 年日本新泻地震里氏震级 ($M = 7.5$), 美国阿拉斯加地震(里氏震级 $M = 8.3$), 1975 年我国海城地震里氏震级 ($M = 7.3$), 1976 年唐山地震里氏震级 ($M = 7.8$), 以及 2008 年的汶川大地震里氏震级 ($M = 8.0$) 等, 液化问题较为严重, 造成大量的损失.

“流态化”(fluidization)一词较早用于化工领域, 指通过流体与固体间的相互作用, 使固体颗粒悬浮在流体中或随流体一起流动^[1], 从而完成物质或能量的输送与交换. 液化后土体的流态化, 是在一定条件下, 土体从弹塑性体(或粘弹塑性体)的破坏开始, 转化为特定流体形式的运动的过程^[2].

液化引发的土体破坏变形是导致工程结构破坏的主要原因之一. 但是, 早期的液化研究更多关注的是液化发生条件和影响因素等, 针对液化变形研究也大多局限在液化的初始阶段, 而对于液化后土体所呈现的“液体”状态的相关特性还缺少研究. 根据土地地震液化时剪应变的发展水平, 整个液化过程可依次分为初始状态、部分液化状态、初期液化状态、完全液化状态以及流动状态^[3], 如图 1 所示. 可见, 随着剪应变的发展, 液化后砂土呈现出流态化运动特征, 这种情况下, 其运动、变形的性质与黏性流体相似, 而不能再视其为固态. 因此, 基于流体力学理论, 从流动破坏角度分析液化后变形是今后液化问题的重要研究方向, 即液化土体可用流体作为研究模型. 这一研究方向主要面临以下问题: ①液化后土体流态化发生的机制; ②液化后土体具有类似于哪种流体的性质; ③液化后土体的流体动力学特征. 开展针对这些方面问题的研究, 有助于进一步认识

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室开放课题; 国家自然科学基金(40802070, 41072202)

第一作者: 黄 雨(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土地震工程与计算岩土力学. E-mail: yhuang@tongji.edu.cn

土体液化后流态化现象的本质,进而在土体地震液化的防灾减灾等研究领域提供更有价值的理论依据。

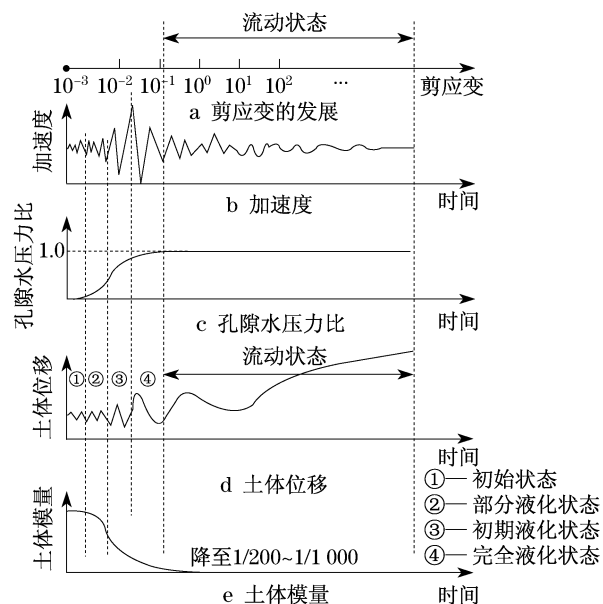


图 1 地震土体液化发展过程^[3]

Fig.1 Processes of seismic soil liquefaction^[3]

1 流态化及发生机制

1992 年, Sasaki 等利用振动台试验研究液化变形问题时发现, 液化砂土具有非常类似于流体的性质^[4]. 此后, 针对土体大变形流动问题, 国际上许多学者通过各自的试验, 研究液化土体的流体性质. 如 Kawakami 的牵引球试验、Miyajima 的沉球试验、Hamada 的倾斜液化试验等, 分别采用不同的试验方法, 根据流体动力学中的公式得出液化土体的动力黏度^[5]. 1999 年, Towhata 等在拖管试验中, 通过测定施加在圆柱物体上的阻力获得黏性流体的表观黏度, 并发现当砂土完全液化后, 拖拽力与拖管的运动速度关联性很大, 进一步证实了液化土体的流体性质^[6]. Hwang 等在研究液化地表流对桩基影响时, 通过沉球及托管试验, 发现液化砂土黏度随剪应变率升高而降低, 在数值分析中将液化砂土的黏性作为一个重要参数进行分析^[7]. 液化砂土的这种表观黏度随剪应变率的增大而减小的特征称为“剪切稀化”. 此外, Hadush 等在总结了几组由不同测量方法获得的黏度与剪应变率关系后, 同样发现液化砂土的这种特性^[8]. 国内研究人员如陈育民等也由试验得出过类似结果^[9]. 可见, 随着对液化问题研究的深入, 液化后土体的流体性质已逐步得到认可, 研究者

开始从流动变形的角度来解释一些液化现象.

2003 年的日本 Tokachi-oki 地震中, 距北海道东南海岸较远的 Kitami 市 Tanno 地区, 在一处宽 35 m、长 150 m 的农田内土体沉降, 下游地区的河道长达 1 km 范围被喷出的下层土所填充. 经场地勘测及试验研究后证实, 该现象缘于下部液化土层沿平缓坡面向下流动, 并最终从上覆土层薄弱处喷出后沿河流向下游流动^[10] (图 2). 同年 7 月发生在日本北部地区的 Nishisaruta 地震滑坡中, 斜坡由于上部液化而丧失抗剪强度, 之后沿坡面向下运动^[11]. 1989 年发生在塔吉克斯坦 Kushanbe 郊区的 5.5 级地震中, 液化后的土体在近乎平坦的地面上流动, 带走大量泥土, 在 Okuli 滑坡中, 泥石流流过了大约 2 km 的距离^[12].

上述现象表明, 由液化诱发的地面变形, 即使在轻微倾斜的地面都可能发生. 变形通常是由下层饱和土体液化引起的抗剪强度降低而产生, 一旦发生, 则影响范围往往较大, 带有区域性特征.

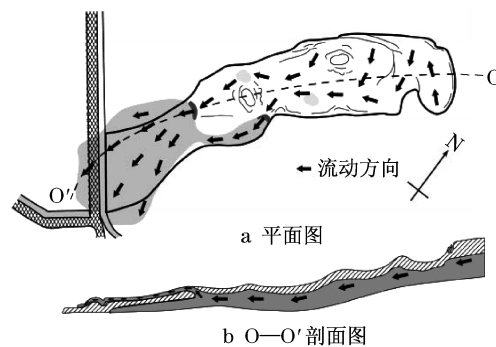


图 2 流态化及沉陷发展过程^[10]

Fig.2 Process of fluidization and subsidence^[10]

土体液化流动的观点可以很好地解释一些滑坡及泥石流的发生原因, 不少研究人员也试图通过试验来验证这一理论.

Okura 等通过变坡度的斜坡模型试验, 研究了暴雨条件下的滑坡流态化问题. 将滑坡流态化过程分成三个阶段: 松散砂层的密实, 饱和层产生超孔压, 快速剪切破坏^[13].

Wang 等在研究长距离滑坡机制时发现, 滑坡在运动过程中剪切带中颗粒被压碎, 引起体积缩小, 导致不排水条件下积累超孔压, 因此, 滑坡体在整个运动过程中都表现出很高的流动性^[14].

此外, Yoshimine 等从渗透性角度研究土层性质对场地液化后流动特征的影响, 发现流动变形的速率主要由土层的渗透性控制^[15]. González 等在研究桩基在侧向扩展中的响应时也得出相似结论, 认为

土壤渗透性是基础在侧向扩展响应中重要的一个因素,在粉砂层中,桩体弯矩和侧向变形要大于纯砂层,原因是有更小的渗透系数^[16]。

可见,液化后土体的流态化受多因素控制,在整个土体的快速流动中,滑动区基本处于不排水状态,这有利于超孔压的保持,并使长距离流动变得可能。

2 流态化分析模型

2.1 分析方法

流体与固体的最大差别,在于处于静止状态的流体不具备抵抗剪切应力的能力,任何微小的剪切力都会引发任意大的变形。但是,当流体处于运动状态,变形速率增大,往往会表现出一定的抗剪能力。这种特性称为流体的黏性^[17]。因此,在流体力学中,反映流体变形速率的应变率以及流体剪切应力与剪应变率的关系,是理论与试验研究中关注的重点。剪应变率由试验数据计算得出,公式如下^[9]:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

式中, t 为试验中与应变对应的流动时间; i 为试验数据采集先后的编号。

流体分牛顿流体和非牛顿流体。自1687年牛顿根据其平板试验,提出著名的牛顿黏性定律以来,流体理论已有很大的发展。牛顿黏性定律虽只适用于剪切流动这种最简单的运动形式,但其描述流体的方法对整个流体本构方程研究具有深远影响。牛顿流体的剪应力—剪应变率呈简单线性关系

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力; η 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; $\dot{\gamma}$ 为剪应变率。效仿牛顿流体的黏度表示方法,将非牛顿流体剪应力与剪应变率的比值称为表观黏度。但其并非常数,而是随剪应变率而变化。对于液化后的砂土而言,黏度还同砂土液化前的密实度存在较大的关联性。Hwang等通过比较分析大量前人的试验结果发现,液化后砂土的黏度随相对密实度的增大而变大,基本在 $10 \sim 10\,000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 之间变化^[7](图3中阴影部分)。非牛顿流体的种类较多,图4列出了几种非牛顿流体及牛顿流体的流动曲线。

将黏度作为重点,是流体力学的研究特点之一。流体力学中所有流体运动特性可通过下式描述:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma}^n + \tau_y \quad (3)$$

式中, η_0 , n 和 τ_y 为材料参数,随着所选择流体类型的不同而不同。当 $n=1$ 且 $\tau_y=0$,式(3)即代表牛顿流的运动特征, η_0 为牛顿流所采用的黏度系数;当 $n=1$ 且 $\tau_y>0$ 时,为宾汉姆流体运动表达形式, η_0 为屈服后的粘度系数;当 $\tau_y=0$, $n>1$,为膨胀流; $n<1$ 时,为假塑性流。

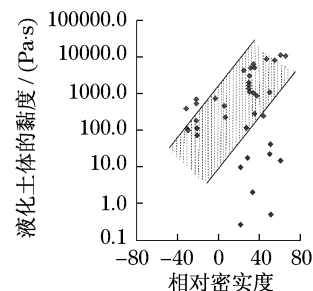


图3 不同试验获得的黏度对比^[7]

Fig.3 Comparison of test results with viscosity values^[7]

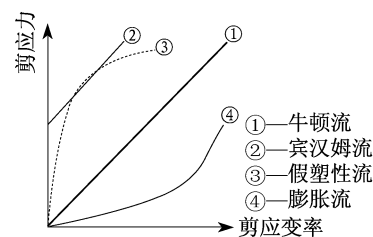


图4 流体模型的剪应力—剪应变率关系

Fig.4 Shear stress-strain relationship of fluid model

2.2 本构模型

建立适用于土体液化后变形分析的本构模型是土体液化研究的核心问题之一。长久以来,针对土体大变形问题,已经有众多的本构模型^[18],主要有:基于弹性理论的弹性模型;引入塑性力学概念,基于塑性增量理论所建立的弹塑性模型;由在传统塑性力学理论上发展起来的广义塑性理论所建立的模型;还有基于非连续性假设,将介质看作由大量基本相同的单个颗粒所组成,根据微观结构理论建立的散粒体模型^[19],等等。这些模型都较成功地运用在各种数值计算中,在一定条件下,对于描述砂土的应力应变响应特征有一定的适用性。然而,上述模型的应用大都局限在固体力学框架之下,在解决由砂土液化引起的大变形时,基于小应变理论的固体力学方法,显然很难适用于研究液化后的土体性质。鉴于此,对于土体液化问题,采用流体动力学的思路来研究其流动特性,就非常急需而且必要。

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是以理论流体力学为基础,以计算机为工具,

通过建立控制方程(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)并结合数值计算方法,定量地描述各种流场的数值解.近年来研究中所揭示的液化土体黏度和剪应变之间的关系表明,液化土体实质上是一种非牛顿流,并且具有剪切稀化特征.目前常用于液化大变形分析的有宾汉姆流体、假塑性流体等.

宾汉姆流体(Bingham fluid)也叫粘塑性流体,泥浆、污水和一些颗粒悬浮液都属于这类流体,主要流动特征为存在屈服应力,只有当外界施加的应力超过屈服应力才会发生流动.假塑性流体(pseudoplastic fluid)流动的主要特征为流动较慢时,剪切粘度趋于常数,而随剪切速率增大,粘度逐渐减小——剪切变稀.绝大多数的高分子液体都属假塑性流体.

Uzuoka 等在这方面的尝试最早^[20].他们注意到,除了黏性性质外,液化砂土在流动破坏前常常表现出具有残余抗剪强度,故 Bingham 模型适合用于描述大变形条件下液化砂土的流变学特征.引入等效黏度概念描述 Bingham 流体的剪应力—剪应变率关系,较好地模拟了侧向扩展激发后以及液化流动阶段的土体特性,并且具有通过三维分析方法,模拟液化层同结构物之间相互作用的潜力.类似的方法还被 Sawada 等用于模拟与地表流相关的液化大变形中,其在三次伪质点方法(cubic interpolated pseudo-particle, CIP)中同样采用了 Bingham 流体作为本构模型,在引入摩尔破坏准则和等效黏度后,该模型实际上只需 2 个参数^[21].Montassar 等参照将液化土体视作 Bingham 材料的做法,结合最小势能原理,建立了一种模拟液化土体流动破坏和扩展的综合数值方法^[22].该法对研究对象的几何构型和负荷条件均无特殊限制,具有很强的实用性.

假塑性流体多见于高分子材料科学、食品科学等研究中,较少用于液化后分析的相关研究. S. Hadush 等根据液化砂土的黏度系数同剪应变率之间的非线性特征,使用假塑性流模型,分析不同液化层厚度和地表形态的斜坡,采用双曲线方程来拟合剪应力—剪应变率关系

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} / (1 + \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_r) \quad (4)$$

式中: η_0 为初始粘滞系数; $\dot{\gamma}_r$ 为参考剪应变率(reference shear strain rate).模型验证了液化流动速度同液化层厚度之间的关系,指出流体的粘性特征在液化诱发侧向扩展的研究中具有重要意义.另外,在使用 Bingham 模型分析时,也取得同样结果^[8].

将液化土体视为黏性流更加符合工程实际,这类分析方法在模拟液化大变形及土—结构物相互作用方面更有优势.目前的研究还只能说是处于起步阶段,所涉及的边界条件大多较为简单,模型也大多进行了大量的简化和假设.实际岩土工程中比较复杂的边界条件及结构问题的研究,还有待深化.

3 流态化研究新方法的展望

CFD 方法在模拟液化后土体的各种物理性状以及运动构型方面已经获得的较大的成功.但值得注意的是,迄今为止的这些研究中,所采用的都是传统的 CFD 方法,由于对控制方程采用的是欧拉描述,无法追踪自由液面上粒子的运动,故虽可以计算液化土体的变形、流动性质,但难以精确描述流体自由表面及变形边界和运动物质交界面的运动,特别是在分析固定点场变量的时间历程时遭遇瓶颈.此外,这是一种网格化方法,不仅网格划分耗时巨大,且不易处理非规则形状的流动问题.因此,亟待在现有 CFD 最新研究成果的基础上,继续探索更先进的计算方法.实际上,在如何改进液化土体的研究方法方面,已有个别国外学者认识到网格化方法的缺陷,并开始尝试无网格方法模拟液化后土体的流动特性.

光滑粒子流体动力学方法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)是近年来发展较快的一种新型无网格计算方法^[23],具有自适应性、粒子性质和纯拉格朗日性质.鉴于 SPH 强大的动力非线性分析能力,笔者曾对其在岩土工程相关学科中的研究应用情况进行了总结^[24].SPH 形式下的流体动力学方程组,其基本思想是将空间连续的流体离散成一系列的粒子,各个粒子上承载各种物理量,包括质量和速度等,通过求解粒子组的动力学方程和跟踪每个粒子的运动轨道,求得整个系统的力学行为.与传统的数值分析方法(如流体体积法、有限差分法、有限元法等,见表 1)相比,SPH 在研究土体流动大变形问题时能有效克服前述的诸多局限.

SPH 的核心问题包括函数的光滑近似逼近和质点近似逼近^[25],即宏观变量的函数用积分形式表示,而参考质点的运动信息由影响半径内临近质点的运动特征求和平均近似代替,影响区域的半径——光滑长度则人为确定,视具体问题的精度而定.对于不可压缩流体,其控制方程包括连续方程、

动量守恒方程和能量守恒方程.通过光滑近似逼近和质点近似逼近,可得到控制方程在 SPH 框架下的表达式.具体如下:

连续方程

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \quad (5)$$

动量守恒方程

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma_i^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (6)$$

能量守恒方程

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \epsilon_i^{\alpha\beta} \epsilon_j^{\alpha\beta} \quad (7)$$

式中: i, j 为质点编号; α 为参考质点; β 为邻近质点; t 为时间; W 为光滑核函数; m 为质量; ρ 为密度; x 为质点位置坐标; v 为速度; e 为内能; σ 为应力张量; p 为压力; μ 为动力黏滞系数; ϵ 为剪应变.

表1 各种数值计算方法对比

Tab.1 Comparison of different numerical methods

传统方法	网格法 (连续介质理论)	无网格法/质点法 (离散介质理论)
拉格朗日方法	ALE, SPH, FEM 等	SPH, DEM, DDA 等
欧拉方法	ALE, FDM, FVM 等	

注: ALE(arbitrary Lagrange-Euler method), 任意拉格朗日-欧拉方法; FEM(finite element method), 有限单元法; DEM(discrete element method), 离散单元法; DDA(discontinuous deformation analysis method), 非连续变形分析方法; FDM(finite difference method), 有限差分法; FVM(finite volume method), 有限体积法.

Naili 等在使用 SPH 方法研究液化方面开展了富有成效的工作, 其将液化土体视作 Bingham 流体在 SPH 框架下求解, 研究了地震液化中土-结构的相互作用, 对液化土体外部构型的模拟也达到了满意的结果^[26]. SPH 方法在土体流动大变形的应用中, 如何有效解决流-固耦合问题是个关键, 也是个难点. 在这方面, Bui 和 Oger 等进行了大量开创性的研究工作, 为今后应用 SPH 方法进一步研究土体液化流动提供了宝贵的经验^[27-28]. 从近几年的研究成果看, SPH 方法克服了传统计算方法对网格的依赖性, 而且容易导入描述各种材料属性的本构方程, 体现不同材料的变形特性. 未来发展若能进一步考虑复杂外力的作用, 以及土体内部固-液-气三相相互作用的影响, 或是实现 SPH 方法和 FEM 方法的耦合, 将进一步促进该方法在液化土体流态化运动中

的应用.

4 结语

液化后土体的流态化问题, 处于固体力学理论和流体力学理论的交叉点. 将液化砂土视为粘性流体进行研究分析是一种全新的思路. 目前国内外对这方面的研究主要集中在土体流态化形成的机理上, 而对于液化后土体的流体动力学特性的研究则相对缺乏, 在本构模型方面也尚处于初步探索阶段. 鉴于当前的研究水平, 笔者认为今后研究的重点方向有以下几点:

(1) 液化后土体的流态化机制. 其核心问题是相应土体在降雨或是外部动荷载作用下诱发流态化的力学过程, 以及影响这一过程发展的各控制因素, 需综合考虑土体性质、外部形态、荷载特征等多种因素下的土体响应.

(2) 针对液化土体流态化特征, 结合工程实践开展相关液化土体的流体动力学特征研究, 获取流态化条件下土体流动的速度、范围、冲击力等方面的数据, 进而指导抗震防灾研究.

(3) 目前液化土体的流体模型研究相对滞后, 液化后砂土具有的剪切稀化特征已经被很多试验所证实. 但是, 常用于液化分析的宾汉姆流和假塑性流两类模型尚不能涵盖液化土体的全部运动特征, 需进一步通过试验并结合计算流体力学理论, 修正上述模型. 在数值方法方面, 应重视加强无网格化方法(如 SPH 方法)的应用.

(4) 土体在液化流动过程中, 当超孔隙水压消散, 液化土体又将恢复固体特征. 目前的研究中, 针对不同阶段的分析通常都是采用不同的理论模型, 较为繁琐. 可以考虑以流体动力学结合弹塑性力学的方法, 将这两个阶段的变形分析进行耦合, 针对不同岩土材料的不同变形阶段, 建立统一的数值模型, 发展基于固-液-气多相流理论的数值计算方法.

参考文献:

- [1] 黎强, 邱宽嵘, 丁玉. 流态化原理及其应用[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1994.
LI Qiang, QIU Kuangrong, DING Yu. Theory and applications of fluidization [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1994.
- [2] 冯自立, 崔鹏, 何思明. 滑坡转化为泥石流机理研究综述[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 8.
FENG Zili, CUI Peng, HE Siming. Mechanism of conversion of

- landslides to debris flows[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(3): 8.
- [3] 吉見吉昭, 福武毅芳. 地盤液状化の物理と評価と対策技術[M]. 東京: 技報堂出版株式会社, 2005.
- [4] Sasaki Y, Towhata I, Tokida K L, et al. Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3): 79.
- [5] 黄雨, 郝亮. 基于 CFD 的地震液化研究新进展[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2231.
- HUANG Yu, HAO Liang. New development of seismic liquefaction research based on CFD [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2231.
- [6] Towhata I, Vargas-Monge W, Orense R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18: 347.
- [7] Hwang J I, Kim C Y, Chung C K, et al. Viscous fluid characteristics of liquefied soils and behavior of piles subjected to flow of liquefied soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26: 313.
- [8] Hadush S, Yashima A, Uzuoka R. Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27(3): 199.
- [9] 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土的流动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1139.
- CHEN Yumin, LIU Hanlong, ZHOU Yundong. Analysis on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1139.
- [10] Tsukamoto Y, Ishihara K, Kokusho T, et al. Fluidisation and subsidence of gently sloped farming fields reclaimed with volcanic soils during 2003 Tokachi-oki earthquake in Japan[C] // Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design. London: Taylor & Francis Group, 2009: 109 - 118.
- [11] Kazama M, Uzuoka R, Sento N, et al. Tsukidate failure compared with the other flow-type failure during 2003 earthquakes in Northern Japan[C] // Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design. London: Taylor & Francis Group, 2009: 185 - 200.
- [12] Ishihara. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in Tajik[C] // Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design. London: Taylor & Francis Group, 2009: 431 - 448.
- [13] Okura Y, Kitahara H, Ochiai H, et al. Landslide fluidization process by flume experiments[J]. Engineering Geology, 2002, 66(1-2): 65.
- [14] Wang F W, Sassa K, Wang G. Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan[J]. Engineering Geology, 2002, 63(1-2): 169.
- [15] Yoshimine M, Nishizaki H, Amano K, et al. Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006(26): 253.
- [16] González L, Lucas D, Abdoun T. Centrifuge modeling of pile foundations subjected to liquefaction-induced lateral spreading in silty sand[C] // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Missouri: Mira Digital Publishing, 2008: 04 - 02 - 0063.
- [17] 梁智权. 流体力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- LIANG Zhiquan. Hydromechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2002.
- [18] 李亮, 赵成刚. 饱和土体动力本构模型研究进展[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 138.
- LI Liang, ZHAO Chenggang. Advances on the research of dynamic constitutive models of saturated soils [J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(1): 138.
- [19] SHEN Zhujiang. A granular medium model for liquefaction analysis of sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 742.
- [20] Uzuoka R, Yashima A, Kawakami T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3-4): 243.
- [21] Sawada K, Moriguchi S, Yashima A, et al. Large deformation analysis in geomechanics using CIP method [J]. JSME International Journal, 2004, 47(4): 735.
- [22] Montassar S, de Buhan P. Minimum principle and related numerical scheme for simulating initial flow and subsequent propagation of liquefied ground[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29: 1065.
- [23] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics—a mesh free particle method [M]. London: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [24] 黄雨, 郝亮, 野々山栄人. SPH 方法在岩土工程中的研究应用进展[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 256.
- HUANG Yu, HAO Liang, Nonoyama Hideto. The state of the art of SPH method applied in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 256.
- [25] 黄雨, 郝亮, 谢攀, 等. 土体流动大变形的 SPH 数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1520.
- HUANG Yu, HAO Liang, XIE Pan, et al. Numerical simulation of large deformation of soil flow based on SPH method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1520.
- [26] 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: Japanese Geotechnical Society, 2005: 2257 - 2258.
- [27] 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.
- [28] 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.