

饱和砂土液化研究新进展*

鲁晓兵 谈庆明 王淑云 张金来

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘要 首先对 20 世纪 90 年代以前有关饱和砂土液化的研究工作进行了简要回顾, 然后重点对近期液化的离心机实验研究、液化引起的地面大位移及对结构物的破坏等进行了综述. 同时也对液化的判别方法、粉砂液化、静态液化等进行了评述. 认为今后的研究重点是液化引起的地面大位移及对结构物的破坏等, 其中涉及到结构与土的耦合问题、流变体(液化区域内的砂土)和固体(未液化区域的砂土)耦合及演变的问题, 需要多学科(岩土力学、数值分析、流体力学、结构力学等)的研究人员共同研究. 其中, 液化前后的土体本构关系是需要研究的核心内容. 今后需利用离心机实验、现场原位实验开展工作, 并进行相关实验技术研究工作.

关键词 饱和砂土, 液化, 爆炸, 地震

1 引言

在外荷载作用下, 饱和砂土地基可能从原来的固态转化为液态即液化, 从而导致堤坝的破坏或地基的失稳, 造成灾害. 当然, 也可以利用砂土液化来加固密实地基, 世界上许多国家均采用这种方法取得了较好的经济效益. 故弄清砂土液化的产生条件及其后效主要有以下两方面的意义: 可以预测某砂土地基在一定条件下是否可能液化、是否需要采取预防措施; 在什么条件下可以利用液化现象加固密实地基, 既能提高效率, 又能节约经费, 如用强夯、爆炸法处理砂土地基. 下面对 20 世纪 90 年代以来饱和砂土液化的实验研究、理论分析和数值模拟几方面的历史与现状进行回顾, 希望能对这方面有兴趣的人员有所帮助.

2 研究简述

在 20 世纪 60 年代、70 年代几次大的地震如日本的新潟大地震、美国的阿拉斯加大地震、中国的唐山大地震中^[1], 均因液化导致堤防和其它建筑

物大规模破坏, 因此, 液化问题引起了人们的普遍关注. 早期的液化研究目标主要是为了得到液化条件, 以预报液化的产生. 室内实验仪器主要为单剪和三轴剪切仪. 为了防止和减轻液化灾害的产生, 人们重点在液化的产生条件、预报方法及防护措施等方面进行了大量的实验和分析, 并从这些研究中得到了一系列的成果.

振动液化方面的开创性的工作应归功于我国的学者如黄文熙、汪文韶^[2]等. 黄文熙^[3]认为圆筒振动液化实验不符合砂坡和砂基中的应力条件, 他在 1959 年倡议用动三轴仪来进行, 这项倡议不久即为国内外重视和采纳, 并用于液化研究. 谢定义^[4]、王锤琦^[5]、张克绪、谢君裴^[6]、徐志英^[7]、栾茂田^[8]、吴世明等^[9]对砂土、粉土和粉煤灰等的液化问题作了大量的研究, 探索了剪切荷载下孔隙压力的变化规律、砂土的本构特性和液化的发展过程等. 他们为液化研究作出了重要的贡献. 汪文韶^[10]、沈珠江等^[11]对液化研究, 尤其是国内的液化研究做过较详细的总结. Seed, Finn 等^[12,13], Dealba 等^[14], Ishihara 等^[15]在液化研究方面也作了重要的工作. 他们从 60 年代初开始进行了大量的实验. 提

收稿日期: 2002-11-25, 修回日期: 2003-06-20

* 中国科学院与中国海洋石油总公司联合重大项目“中国海洋石油开发若干重大科学技术问题研究”(KJ CX2-SW-L03-01)及国家自然科学基金(10202024)资助项目

出了应用广泛的西特简化判别法^[13]。Seed^[16]、Finn等^[17]对欧美国家从60年代初到80年代初的振动荷载作用下饱和砂土的液化工作作了总结。Iwasaki^[18]对日本在砂土液化研究方面的成果进行了总结,给出了从1909年到1978年间发生在日本的大地震的液化灾害的较详细的现场资料,总结了砂土地基和岸坡液化的振动台实验结果。

Biot^[19]在1965年给出了固液两相介质中波传播的较完善的控制方程。该理论既给出了固液两相介质中波传播的较完整的描述,也为饱和砂土液化的研究打下了基础。因为方程中的液固耦合质量密度难以测定,所以在应用上受到一定的限制。虽然后来一些学者根据不同的理论如混合物理论建立了控制方程^[20,21],但是这些方程并没有给出比Biot方程更多的内容。

Finn等^[22,23]在70年代提出了有效应力动力分析方法,并针对地震液化,分析了一维垂向传播的剪切问题,得到了这种条件下的液化发展过程等。我国学者沈珠江将该方法推广到三维情形^[24]。之后,各国学者开始用有效应力方法分析了一些情况下如坝体在地震荷载下的液化动力响应等问题^[25~28]。有效应力方法是利用有效应力原理,将有效应力和孔隙水压分别作为独立量进行讨论,这样可以清楚地看到砂土液化的过程。该模型不能描述孔隙水压的波动上升过程。人们在有效应力分析方法的基础上取得了一系列的关于液化发展和各因素影响的结果^[29,30]。

理论模型中最难的是砂土的动力本构模型。在这方面,人们倾注了大量的力量,提出了众多的本构,沈珠江^[11]、张建民等^[31]曾对此作过总结。但是到目前为止,还没有一个能得到普遍接受的本构模型。

不断发展的饱和砂土液化的理论模型可以考虑越来越多的因素,与实际情况越来越接近,但是在复杂的边界和本构关系条件下,难以得到解析解答,需要数值模拟。近些年来,计算机技术的发展为数值模拟提供了物质条件。这些因素促进了饱和砂土液化数值模拟研究的发展。

刘汉龙^[32]、赵成刚^[33]、陈少林等^[34]对土体动力本构模型、动力分析方法等进行了综述。介绍了这方面动力分析方法的数值模拟的进展,包括各种数值模型、人工边界等。

数值分析的主要困难在于当某点液化后,控制方程会由双曲型成为椭圆型或椭圆-双曲型,液化

和未液化区域受不同类型的方程控制;液化后必须用大变形理论进行分析^[35];同时,液化区与未液化区的边界区分及边界条件等的确定,也直接影响模拟结果。为了能使计算进行下去,人们不得不做一些假设,如液化后的砂土一直保持液化状态,液化区内的孔压限制条件等。数值分析的工作发展较晚,对各种数值格式的选择、精度分析以及有限元法中对边界条件的处理,如非反射边界、透射边界等问题的分析,还有待于更深入的研究。数值方法显然有很大的优越性,人们可以借助这个工具快速而经济地分析各种情况下的饱和砂土液化问题。

3 液化的概念和准则判别

目前,液化的定义有多种。美国岩土工程学会土动力学学会1978年在经过广泛地讨论后,给出液化定义为:任何物质转化为液体的过程。就无黏性土而言,这种由固态到液态的转化,是孔压增加,有效应力减小的结果^[36]。该定义在土工工程界有广泛的影响。另外还有实际液化和循环液化等定义。实际液化是指在外荷载作用下,松散饱和砂土的强度极大地降低,累积孔隙水压力达到围压,从而导致土体破坏。循环液化是指在外荷载作用下,具有膨胀趋势的较密实的砂样中孔隙水压力在每一循环中瞬时达到围压的结果^[37]。

对饱和砂土的液化可作如下的描述^[38]:饱和砂土的液化是在固定静载之外的外载作用下,抵抗有效应力的能力(即砂土的强度)下降甚至丧失的一种过程。饱和砂土的有效应力能力来自砂粒间的结构,其值不仅取决于初始状态,还取决于偏应变和体应变的历史。由于体应变等于从单元流出或流入单元的液体量,所以在饱和砂土的动力学过程中,应力-应变历程与液体的渗流是紧密耦合的,而且液体以压力的形式承担着部分外载。在运动过程中,荷载在液体与砂之间的分配随时间发生着变化。液体承担液压的能力十分大,砂抵抗偏应力的能力却非但十分有限,而且随着应力和应变带来的损伤,这个能力不断下降,于是在一定条件下出现了这样的情况,即荷载向液体转移,其表现为有效应力下降,水压增加,直到砂土的强度全部丧失,这就是液化。

例如,对于多数砂来说,由于剪应力导致砂粒间结构的破坏,为使其能保持承担偏应力的能力,其体积必须变小(即所谓剪缩现象),这时如果不能及时把足够的水排出以缩出体积,就会出现液化。

又如向饱和砂中注入水,把体积撑大,有效应力也会减小,水压增加,出现液化.当外载变化停止后,出现过液化的地层将在现在的状态下最终达到平衡,于是地层中出现或大或小的“永久”变形,表现为沉降、排水、滑坡.

近年来,为了提高液化判别的精度,使其与实际场地的情况更接近,人们提出了多种测试方法,如锥体沉贯实验 (cone penetration tests, CPT) 方法等.在 1996 年和 1998 年^[39,40],美国土木工程协会主办了两届关于土液化阻力评估的专题讨论会.针对 Seed 等人提出的判别土体液化的简化方法,结合 1985 年~1996 年的这方面的工作, Youd 等 20 几位专家力图得到对简化方法的修正和补充的一致意见.主要讨论了以下方面的问题:基于标准沉贯实验 (standard penetration test, SPT) 的准则;基于锥体沉贯实验 (CPT) 的准则;基于剪切波速测量的准则;关于碎石体的 Becker 沉贯实验的应用;尺度因子量级;对于有超重压力和坡形地面的修正因子;地震输入的幅值和尖峰加速度值等.陈国兴等^[41]将我国抗震规范中的液化判别方法与基于 Seed 简化法的美国 NCEER 法进行了对比,认为我国现有规范中判别方法有缺陷,并提出了修改意见. Finn 等^[42]对地震作用下水平地面饱和砂和粉土液化势的工程应用现状进行了分析,给出了最近基于不同沉贯实验和现场剪切波速的液化评估表及实际应用的具体方法.

目前应用较多的方法是将地震传入土中的应力与土的液化阻力进行对比.由地震传入土中的应力一般根据 Seed 简化法^[13].它是基于地震引起的地层加速度、应力条件等得到的.现场测定砂土的液化阻力的方法有: SPT, 静力触探实验 (static cone penetration test, SCPT) 等,这些方法都是间接的方法,即建立经验的液化阻力与土特性的相关关系.有人提出了直接法,即振动触探法 (vibrating piezocone penetrometer test, VCP)^[43].当振动时,测量探头周围的孔隙水压情况,从而判别饱和砂土的液化阻力.

Stark^[44], Robertson 等^[45]研究了用 CPT 方法评估液化势的问题.基于 180 个液化和非液化场地的用 CPT 方法处理的情况,建立了 CPT 端阻与砂性土的液化势之间的关系.结果表明中、细颗粒在液化阻力中具有重要作用. Ashour 等^[46]建立了一种方法,即通过排水三轴实验结果得到不排水条件下的响应及液化发展的评估方法.它建立的公式是液化势与围压、相对密度、不均匀系数、颗粒圆度等

的函数.它是一种应用简单的工程经验方法. 栾茂田等^[47]结合 Terzaghi 固结方程,分析了分层砂土中振动导致的孔隙压力增长过程,并由此讨论了饱和砂土的液化势.

CPT 方法的优点是直接的,它比实验室测量得到的参数更接近于实际情况,虽然费用高,但是基于现场测量的触探法值得深入研究,以得到更准确的液化势与沉贯阻力等因素之间的相关关系.

4 离心机实验研究

在液化研究的早期,人们利用循环三轴仪、循环单剪仪等进行小土样的实验,分析液化的发展.但这些实验不能揭示液化发展中真实问题的演化机制.如果要得到液化整体的空间效果,如液化区的扩展,则必须有新的设备,这促进了离心机的使用^[48,49].

离心机实验有一般模型实验不可替代的优点:不仅能模拟原型,而且能考察新现象、进行参数研究、验证理论和数值方法等.在一般模型实验中,由于土的强度与应力状态有关,如砂土的强度

$$\tau_s = \sigma \tan \varphi = \rho g h \tan \varphi$$

τ_s 为某深度砂土的强度, σ 为砂土的垂向有效应力, φ 为内摩擦角, ρ, g, h 分别为固相的浮容重,重力加速度和土深.当几何尺度缩小 N 倍时,要满足相似率,必须使重力加速度增加 N 倍,这个要求在小模型实验中无法实现,在离心机实验中却很容易实现.离心机实验可以模拟大尺度结构和大波浪^[50]、大地震、高围压^[51]等条件.因此,离心机实验被越来越多地应用于岩土工程研究中.

在离心机模拟液化的实验中,人们模拟较多的动载是地震载荷和波浪载荷,这两种载荷的幅值和频率有较大区别,一般不能用同一种加载装置.针对这两种载荷,人们设计了相应的加载装置.

最早在离心机中开展波浪作用研究的是剑桥大学,他们是在鼓式离心机中实现的.后来,西澳大学和日本京都大学也在离心机中安装了造波装置,西澳大学是在鼓式离心机中造波,日本京都大学是在鼓式和梁式离心机中造波.京都大学^[50,52]离心机中的波浪特性为:频率为 11 Hz,流体深 90 cm,采用设缝板消波,消波效果为 86%.目前,离心机在造波时只能在最大 50g 条件下运行.南京水利水电科学研究院^[53]曾对渤海海底软黏土在波浪作用下的力

学性状进行了离心机试验,模拟软黏土在 7.4m 波长,周期为 10.2s 的波浪作用下的响应.他们是用水压来模拟波浪力,而不是直接造波.

实际地震是难以预测的,记录地震现场的液化数据既困难,又耗时、耗人力和物力.而如果能在离心机上进行地震模拟实验,就可以人为控制条件而且可以比从现场更容易地得到较多的数据.鉴于此,世界上已建成了多个在离心机中安装有振动台的装置以模拟地震载荷^[54,55].与其他类型的模型实验一样,离心机模拟液化的实验也有许多因素影响其实验的精确性,如模型箱引起的边界条件、渗透性的相似、施加的重力加速度的水平等^[56,57].

到目前为止,人们利用离心机实验,开展了多方面的液化研究,如均匀水平地层、分层地层、坡地、堤防、坝、海洋结构所在的砂土地基的液化等等.下面列举几个实验例子.

Sassa 等^[58]利用离心机中的波浪槽研究了驻波和行波导致的海床液化问题.结果表明,存在一个循环应力率的临界值,低于该值时,液化不会发生.行波的临界值较驻波的低得多.

Fiegel 等^[59]利用离心机实验研究了分层土的液化机理.分层土是上面由粉砂、下面由细砂构成.结果发现,在两层土的交界面处将有一水层或非常松的区域出现;在粉砂的薄处有砂沸现象,提供细砂中超孔隙水的排出通道.

Miyamoto 等^[60]通过离心机实验分析了饱和砂土液化后孔隙沿深度的变化.结果表明,液化后砂土的密度沿深度发生明显的变化.液化区域内的砂土的密实发生在外载停止后,液化区以下砂土的密实发生在外载作用期间.在液化与未液化区界面邻近区域密度变化最大. Mourad 等^[61]利用离心机对粉砂的液化机理进行了实验研究. Madabhushi 等^[62]对有塔结构的饱和砂土地基在动载下的响应进行了离心机模拟.研究发现,当塔-砂土体系的自然频率大于地震频率时,有效应力将减小,砂土地基的刚度和自然频率都将降低;当自然频率等于或低于地震频率时,孔隙压力的增加不会引起自然频率的任何变化. Taboada 等^[63]用柔性模型箱进行了饱和砂土的液化及液化后侧向变形的研究.结果表明,侧向变形只与液化厚度和坡角有关,与载荷幅值和频率无关.沿坡下滑过程中,砂土有明显的剪胀特性,引起砂土强度的增加,以及孔隙压力的下降.

离心机实验也有一些特殊的困难,如动载下模型箱边壁效应的消除、渗透性相似的满足、造波浪

时边壁反射波的消除,尤其是水中有结构物时,结构物造成的波的反射几乎无法消除,必须结合理论或数值方法对反射波的影响进行评估.

近年来,在模拟动载荷时,模型箱的边壁存在波的反射等问题.为了消除边壁效应,有人采用柔性模型箱,可以部分消除边壁的反射,如堆环模型箱(stack ring container)、等效剪切梁、柔性剪切梁等^[64,65]. Fiegel 等^[66]进行了 4 种不同模型箱的实验对比.这 4 种模型箱是铰链-平板式模型箱、筛式模型箱、等效剪切梁式模型箱、刚性箱.结果表明,采用柔性结构模型箱(前 3 种)的实验结果类似,只存在数值上的差别;采用刚性结构模型箱的响应中,由于边壁的反射,会含较多的高频成分.

为了满足渗透的相似性,人们常用硅油等代替水进行实验研究,但存在改变土特性的问题^[61],而且由于硅油等只能一定程度地降低渗透系数,当离心加速度大时,很难使渗透性完全符合相似率的要求. Madabhushi 等^[67]在离心机动力模拟中用硅油替代水.结果表明,孔隙流体的阻尼的灵敏度比黏性的灵敏度小得多,阻尼略有减小.

5 液化后大变形

液化是否会导致结构如道桥、房屋等破坏,取决于是否会出现大位移,否则,结构物不产生破坏,液化也就不会对人类带来危害.实际上,液化大变形是大量存在的,如 1983 年和 1995 年发生在日本的日本海地震和阪神地震中,液化导致的地面大变形对所在地区的房屋和地下生命线工程造成了严重的破坏^[68~70].因此,从工程抗震防灾的角度来看,液化后大变形的研究更有必要,因为液化并不是总能预防的.

Finn^[71]重点分析了残余强度和液化后大位移的分析方法.他对实验中应力路径、制样和有效围压等对残余强度的影响进行了分析,并对用大变形分析方法分析液化后位移进行了较详细的讨论.

刘惠珊等^[72]主要在现场调查的基础上,总结了在中、日、美等国家 20 世纪发生的严重的液化引起地面大位移的灾害,并分析了大变形估算的几种方法. Shamoto、张建民在这方面也做了深入的工作^[73~78].对地震液化后地基侧向变形的实际现象的观测、物理机制的分析、液化后本构模型的研究、实用预测方法及对桩基础的影响等方面开展了研究.针对 1964 年日本新潟地震和 1995 年阪神

地震的调查资料进行了分析,认为可液化地基中桩基础的设计不仅要考虑上部结构振动的影响,而且要考虑地基的侧向变形;提出了用于描述液化后不排水条件下的本构关系及预测方法. Arulanandan 等^[79]对液化后水平地面的大变形进行了数值模拟,并且与1995年发生在Kobe地震中Port Island的现场数据进行了对比.结果表明,通过数值方法模拟液化后水平地面的大变形是可行的,输入的参数是孔隙率、土侧压力系数、渗透率、本构参数等.其中的关键是本构模型及参数必须符合实际情况,否则不能得到准确的结果.大量的室内实验表明^[80~82],砂土液化后受到单调载荷时,均呈现剪胀性,应力-应变关系与超孔隙水压力水平、砂的密度、围压等有关.陈文化^[83]通过对地震液化的震害调查,总结了液化流滑的震害特征和规律,初步分析了液化引起流滑发生的条件、规模、剧烈程度、坡体运动规律和流滑产生的破坏形式等. Yasuda 等^[84]利用振动台进行了液化导致的地面永久位移的机理研究,探索了地面坡度、液化层厚度等因素对永久位移的影响,并提出了一个简化的位移估算方法.

人们先后提出了多种关于液化后地面大位移的计算方法^[85~89],这些方法一般是基于现场调查或较多假设条件下的经验估算公式或数值分析方法,由于没能很好地将液化后的砂土特性考虑进去,使得计算结果往往与实际有较大误差. Chiru D M 等^[90]用神经网络方法为工具计算了液化导致的水平位移,将砂层厚度、地震载荷参数、平均粒径、细颗粒含量等作为影响因素.结果表明,该方法是一种有效的工具,但是需要有较多的实测数据用于建模.高玉峰、刘汉龙等^[91~93]对地震液化引起的地面大位移的研究现状进行了简单的总结,主要包括液化后的土体特征和动力本构模型、液化后地面大位移的计算方法(经验法、简化法、数值方法)等.认为该问题还需要围绕现场调查、室内实验和数值计算等方面开展更深入的工作.他们还进行了砂土地震液化后大变形特性的三轴实验研究,根据实验结果提出了一个描述砂土液化后应力-应变关系的双曲线型模型.

当砂土液化后,有可能产生水层.水层可以为坡体提供滑移面,影响砂土地基的残余强度.针对该现象,人们开展了相关的研究^[94~99].由实验和理论研究发现:当砂土沿深度有细砂层存在、或当液化后,由于渗流导致细砂聚集于砂土中某处,就可能产生较稳定的水层;如果液化后砂土没有重新

固结产生有效应力,就不会有稳定的水层.但是对于水层的消散和砂土的固结过程、以及二维条件下或坡面上水层的产生、分布及对土坡滑动的影响,还需要做进一步的分析.

从这方面的研究现状看,现场调查的工作多数是在液化较长时间后开展的,较少有液化的实时资料,这样,有些现象不能被揭示出来;室内实验多数是考察小单元的应力-应变关系,然后由孔压或体积变形与侧向变形等的关系分析宏观现象,缺乏大尺度的模拟实验.因此,今后的工作需要在现场调查方面开展更细致的工作,得到如液化深度、孔隙压力、变形等的实时资料;开展大尺度的或离心机实验等,以积累大量且有价值的资料,然后总结出液化后大变形的物理机制、反映液化后砂土变形特性的本构关系和适用的地面大变形的计算方法等.

6 粉砂液化

近年来,人们在实践中逐渐认识到实际情况中有大量的粉砂、砾砂地基,且细颗粒砂对液化发展有重要的影响,从而开展了对这方面的研究.

Yamamuro 等^[100]对高粉质砂进行了排水和不排水三轴压缩实验、不排水循环三轴剪切实验、以及排水和不排水稳定性实验等.实验材料为含40%粉土的Nevada砂.结果表明,尽管高粉质砂和低粉质砂的响应有一些相似,但高粉质砂的体积收缩性更强.由单向不排水实验得到了一些与低粉质砂相反的结论,如静态液化在低围压下发生,而高围压下有更大的剪胀体变趋势.对同一初始密度,用稳态概念分析则可以得到唯一的稳态线.他们的工作丰富了人们关于粉质砂液化的知识,但还有许多有争议的地方,如粉砂含量对液化势的影响. Polito 等^[101]用循环三轴实验研究了砂中非塑性细颗粒土(粉土)对液化阻力的影响,粉土的含量从0%~100%.结果表明,如果粉土被包围在砂土骨架中(粉土含量少),该土的液化阻力由土的相对密度决定且与粉土含量无关;如果砂颗粒被包围在粉土中(粉土含量多),液化阻力也由相对密度控制,但是在相同的密度条件下,液化阻力较前一种情况低,且与砂的含量和类型无关.还需要做的进一步的工作是在液化判别方法上,如Seed简化法中如何考虑粉土含量的影响.他们的结论还只是实验室的初步研究结论,要用于现场分析,还有许多的工作要做,如地震液化过程中砂土微结构究竟发生了什么变化等. Thevanayagam

等^[102~104]的研究表明,粉砂与纯砂(clean sand)的物理特性有较大的差别,主要是由于微结构的改变引起的,这种改变在粉土含量超过一定值时,才会发生作用.在低围压下,当孔隙率相同时,粉土含量的增加使土的强度增加;在高围压下,当孔隙率相同时,粉土含量的增加使土的强度降低.

7 静态液化

静态液化的概念是人们在讨论静力滑坡灾害的过程中提出的.最早 Castro^[105], Casagrande^[106], Kramer 等^[107]提出了静态液化的概念并分析了液化产生的条件.尤其在90年代以来,静态液化引起了人们的重视.多种本构模型被提出来模拟各向同性不排水条件下砂土的静态液化:标准的或非相关流弹塑性模型^[108~110];非线性增量本构模型^[111].Lade 等^[112~114]讨论了松散细砂构成的坡体的静态失稳和液化问题.进行了系列的完全饱和及部分饱和的细砂的三轴实验,采用排水和不排水条件,研究稳定和不稳定区域.主要是从应力-应变关系的角度,从非相关流的观点,讨论砂土的稳定性.他们分析了浅水面下的斜坡和完全饱和的陡峭坡两个例子,按照传统的分析方法,这两个坡是稳定的,但按照他们的分析方法,则是不稳定的.另外他们也研究了非塑性粉砂对砂土静态液化的影响.用重塑的 Nevada 砂和 Ottawa 砂进行不排水三轴压缩实验,其中粉砂的成分从小到大变化(20%,50%,100%).结果表明,非塑性粉砂有增加砂土静态液化势的作用.

Yamamuro 等^[115]进行了非常松的砂土的静态液化问题的实验研究.用 Nevada 砂和 Ottawa 砂在4个不同的相对密度12%,22%,31%,42%下进行排水和不排水三轴压缩实验.结果表明,随着围压的增加,砂土剪胀的趋势增加,液化阻力也增加. Prisco 等^[116]对水平向无限扩展的、均匀固结的饱和松砂层在部分排水条件下的响应进行了数值模拟.结果表明,只有边界上的变形率足够大或渗透性足够小时,液化才会发生.

影响静态液化的主要因素有:砂土的初始孔隙率、加载模式、初始偏应力状态、粉土的含量等. Doanh 等^[117]的实验表明,砂土是各向同性固结还是各向异性固结,对其稳定性的影响明显.静态液化一般在非常松且围压低的饱和砂中产生.围压越高,静态液化越不易发生.在一定范围内,砂中细颗粒含量(如粉土、淤泥)的增加,会导致静态液

化发生的可能性^[118].

按静态液化分析方法,可以发现按原有方法判别的稳定的区域实际上是不稳定的.当液化发生时,坡体抗剪强度大大降低,很容易发生滑动或流动,形成滑坡或泥石流灾害.因此,准确的预报液化可以避免潜在的灾害.

8 结 语

本文对人们在饱和砂土液化近期的研究进展作了回顾,包括饱和砂土液化的离心机实验、液化后的大位移、粉砂液化、静力液化等,重点是前两方面的进展.今后的研究重点是液化引起的地面大位移及对结构物的破坏等,其中涉及到结构与土的耦合问题、流变体(液化区域内的砂土)和固体(未液化区域的砂土)耦合及演变的问题,需要多学科(岩土力学、数值分析、流体力学、结构力学等)的研究人员共同研究.其中液化前后的土体本构关系是需要研究的核心内容.数值模拟应成为有力的工具,这方面应大力发展土的本构,高效的数值方法等.应充分利用离心机等设备开展实验,以便尽可能得到与原型一致的结论.在这方面应加强动载下模型箱边壁效应的消除、渗透性相似的满足、造波浪时边壁反射波的消除等问题的研究,以提高实验结果的精度.在原位实验如 CPT 等方面,尤其是直接法(即 VCP 法)也应加强研究,从而得到液化势与沉贯阻力的更准确的相关关系.

参 考 文 献

- 1 刘恢先.唐山大地震震害(一),(四).北京:地震出版社,1986. 339~393
- 2 汪闻韶.饱和砂土振动孔隙水压力试验研究.水利学报,1962, 2: 36~47
- 3 黄文熙.水工建设中的结构力学与岩土力学问题.北京:水利电力出版社,1984. 252~256
- 4 谢定义,巫志辉.不规则动荷脉冲波对砂土液化特性的影响.岩土工程学报,1987,9(4): 1~12
- 5 王鍾琦.地震液化的宏观研究.岩土工程学报,1995,4(3): 1~10
- 6 张克绪,谢君裴.土动力学.北京:地震出版社,1989
- 7 徐志英,沈珠江.土坝地震孔隙水压力产生、扩散和消散的有限单元法动力分析.华东水利学院学报,1981,9(4): 1~16
- 8 栾茂田,邵宇,林皋.土体地震反应非线性分析方法比较研究.见:栾茂田编.第五届全国土动力学学术会议文集.大连:大连理工大学出版社,1998. 203~208
- 9 吴世明,徐攸在.土动力学现状与发展.岩土工程学报,1998, 20(3): 125~131
- 10 汪闻韶.土的动力强度和液化特性.北京:中国水利电力出版社,

- 1997
- 11 沈珠江. 理论土力学. 北京: 中国水利电力出版社, 1999. 9~80
 - 12 Finn W D L, Lee K W, Martin G R. An effective stress model for liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977, 103(6): 517~533
 - 13 Seed H B, Idriss I M. A simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential. *J of Geot Eng Div, ASCE*, 1971, 97(2): 201~255
 - 14 DeAlba P, Seed H B, Chan C K. Sand liquefaction in large-scale simple shear tests. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1976, 102(9): 909~928
 - 15 Ishihara K, Iwamoto S 等. 各向不等压固结砂的液化. 见: 郁寿松译, 石兆吉校. 砂土振动液化译文集, (三). 华东水利学院, 1977. 82~86
 - 16 Seed H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1979, 105(2): 201~255
 - 17 Finn W D L. Liquefaction potential: developments since 1976. In: Seed, ed. Proc International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St Louis, Missouri 1981. 655~681
 - 18 Iwasaki T. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1986, 5(1): 2~68
 - 19 Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I: low frequency range, II: high frequency range. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 168~191
 - 20 李向维, 李相约. 饱和孔隙介质的耦合波动问题. 应用数学和力学, 1989, 10(4): 309~714.
 - 21 Zienkiewicz O C. Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized biot formulation and its numerical solution. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8: 71~96
 - 22 Finn W D L, Lee K W, Martin G R. An effective stress model for liquefaction. *ASCE J Geotech Engrg Div*, 1977, 103: 517~533
 - 23 Finn W D, Byrne P M, Martin G R. Seismic response and liquefaction of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1976, 102(8): 841~857.
 - 24 沈珠江. 砂土动力液化变形的有效应力分析方法. 水利水运科学研究, 1982, 4: 22~32
 - 25 Liou C P, Streeter V. The numerical model of liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings ASCE*, 1977, 103(4): 589~606
 - 26 Prevost J H. Wave propagation in fluid-saturated porous media: an efficient finite element procedure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1985, 4(4): 183~197
 - 27 Troncoso J H. Critical state of tailing silty sands for earthquake loadings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1986, 5(3): 248~252
 - 28 Yiagos A N, Prevost J H. Two-phase elasto-plastic seismic response of earth dams: applications. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 1991, 10(7): 371~381
 - 29 Zienkiewicz O C, Chang C T. Effective stress dynamic modelling for soil structures including drainage and liquefaction. In: Zienkiewicz, ed. International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading. Swansea, Balkema, Rotterdam, 1980. 551~554
 - 30 周健, 徐志英. 土(尾矿)坝的三维有效应力动力反应分析. 地震工程与工程振动, 1984, 4(3): 60~70
 - 31 张建民, 谢定义. 饱和砂土本构理论研究进展. 力学进展, 1994, 24(2): 187~204
 - 32 刘汉龙, 余湘娟. 土动力学与岩土地震工程研究进展. 河海大学学报, 1999, 27(1): 6~15
 - 33 赵成刚, 杜修力, 崔杰. 固体、流体多相孔隙介质中的波动理论及其数值模拟的进展. 力学进展, 1998, 28(1): 83~92
 - 34 陈少林, 廖振鹏. 两相介质动力学问题的研究进展. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 1~8
 - 35 鲁晓兵, 谈庆明, 余善柄, 郑哲敏. 垂向荷载作用下饱和砂土的液化分析. 力学学报, 2001, 5: 612~620
 - 36 谢定义, 土动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
 - 37 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土的液化与稳态强度. 土木工程学报, 2001, 34(3): 90~96
 - 38 鲁晓兵. 垂向荷载作用下饱和砂土的液化分析: [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999. 12
 - 39 Youd T L, Idriss I M, Andrus R D, et al. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 nceer and 1998 nceer/nsf workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J Geotech And Geoenviron Engrg, ASCE*, 2001, 127(10): 817~833
 - 40 Youd T L, Idriss I M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 nceer and 1998 nceer/nsf workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J Geotech And Geoenviron Engrg, ASCE*, 2001, 127(4): 297~313
 - 41 陈国兴, 胡庆兴, 刘雪珠. 关于砂土液化判别的若干意见. 地震工程与工程震动, 2002, 22(1): 141~151
 - 42 Finn W D L. State of the art for the evaluation of seismic liquefaction potential. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29(5): 329~341.
 - 43 Bonita J A, Mitchell K, Brandon T L. In-situ liquefaction evaluation using a vibrating penetrometer. In: Pak R Y S, Yamamura J, eds. Soil Dyna And Liquefaction 2000. American Society of Civil Engineering, 2000. 191~205
 - 44 Stark T D, Olson S M. Liquefaction resistance using cpt and field case histories. *J Geotech Engrg*, 1995, 121(12): 856~869
 - 45 Robertson P K, Wride C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *J Can Geotech*, 1998, 35: 442~459
 - 46 Ashour M, Norris G. Liquefaction and undrained response evaluation of sands from drained formulation. *J Geotech And Geoenviron Engrg*, 1998, 8(125): 649~658

- 47 栾茂田, 钱令希. 饱和砂层中振动导致的孔压耗散的简化评估方法. 大连理工大学报, 1995, 35(2): 216~221
- 48 Sasaki Y, Taniguchi E. Large scale shaking table tests on the effectiveness of gravel drains for liquefiable sand deposits. In: Cakmak A S, Abdel-Ghaffar A M, Brebbia C A, eds. Soil Dynamics & Earthquake Engineering Conference. Southampton, Balkema, Rotterdam, 1982. 843~857
- 49 Igor K, Prevost J H. Dynamic effects in a saturated layered soil deposit: centrifuge modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1992, 11(8): 485~496
- 50 Sekiguchi H, Phillips R. Generation of water waves in a drum centrifuge. In: Ko, ed. Centrifuge 91. Balkema, Rotterdam, 1991. 343~350
- 51 Scott R S, Richard H L, Mary E H. The influence of high confining stress on the cyclic behaviour of saturated sand. In: Pak, Yamamura, eds. Soil Dynamics and Liquefaction 2000, ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. 35~58
- 52 Sekiguchi H, Kita K, Sassa S, Shimamura T. Generation of progressive fluid waves in a geo-centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, 1998, 21(2): 95~101.
- 53 闫澍旺, 邱长林, 孙宝仓, 章为民. 波浪作用下海底软粘土力学性状的离心模型试验研究. 水利学报, 1998, 9: 66~70
- 54 Zeng X. Several important issues related to liquefaction study using centrifuge. In: Lade, Yamamuro, eds. Physics and Mech, Soil Liquefaction. Balkema, Rotterdam, 1999. 283~293
- 55 Fujii N. Development of An Electromagnetic Centrifuge Earthquake Simulator. In: Ko, ed. Centrifuge 91. Balkma, Totterdam, 1991. 351~353
- 56 Ledbetter R H, Butler G D, Steedman R S. Investigations on the behaviour of liquefying soils. In: Lade, Yamamuro, eds. Physics and Mech Soil Liquefaction. Balkema, Rotterdam, 1999. 259~306
- 57 Ko H Y, Dewoolkar M M. Modelling liquefaction in centrifuge. In: Lade, Yamamuro, eds. Physics and Mech Soil Liquefaction 1999. Balkema, Rotterdam, 1999. 307~322
- 58 Sassa S, Sekiguchi H. Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge. *Geotech*, 1999, 49(5): 621~638
- 59 Fiegel G L, Kutter B L. Liquefaction mechanism for layered soils. *J Geotech, Engrg, ASCE*, 1994, 120(4): 737~755
- 60 Miyamoto J, Sassa S, Sekiguchi H. Wave-induced liquefaction and changes in void ratio profile with depth. In: Phillips, Guo, Popescu, eds. Physical modeling in geotechnics: ICPMG 02, Swets & Zeitinger Lisse, 2002. 259~264
- 61 Mourad Z, Ahmed W E, Zeng X W, Arulmoli K. Mechanism of liquefaction response in sand-silt dynamic centrifuge tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999, 18(1): 71~85
- 62 Madabhushi S P G, Schofield A N. Centrifuge modelling of tower structures on saturated sands subjected to earthquake perturbations. *Geotechnique*, 1993, 43(4): 555~565
- 63 Taboada U, Victor M, Dobry Ricardo. Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(12): 1195~1206
- 64 White R V, Lambe P C. Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation. *Geotechnical Testing Journal* 1986, 9: 61~71
- 65 Zeng X, Schofield A N. Design and Performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modeling. *Geotech*, 1996, 46(1): 83~102.
- 66 Fiegel G L, Hudson M, Idriss I M, et al. Effect of model containers on dynamic soil response. In: Leung C F, Lee F H, Tan T S, eds. Centrifuge 94. Balkema, Rotterdam, 1994. 145~150
- 67 Madabhushi S P G. Effect of pore fluid in dynamic centrifuge modelling. In: Leung C F, Lee F H, Tan T S, eds. Centrifuge 94. Balkema, Rotterdam, 1994. 127~132
- 68 山口. 晶敬, 白石. 修章, 近泽. 龙一等. 关西国际空港にわける兵庫県南部地震動の解析. 土と基礎, 1996, 44(2): 19~24
- 69 黄杰辉, 叶超雄. 日本阪神 - 淡路大震灾之探讨 - 土壤液化灾害. 科学月刊, 1995, 6(8): 681~684
- 70 田尻. 胜, 佐俣. 千载, 松田. 隆等. 兵庫県南部地震による地下鉄构造物の被害要因. 土と基礎, 1996, 44(3): 37~39
- 71 Finn W D L. Post-liquefaction flow deformation. In: Pak, Yamamura, eds. Soil Dynamics and Liquefaction 2000. ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. 108~122
- 72 刘惠珊, 徐凤萍, 李鹏程. 液化引起的地面大位移对工程的影响及研究现状. 工程抗震, 1997, 2: 21~26
- 73 张建民. 地震液化后地基侧向变形对桩基础的影响. 见: 张建民, 王建华编. 第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 万国学术出版社, 1999. 577~580
- 74 张建民. 地震液化后地基大变形的实用预测方法. 见: 张建民, 王建华编. 第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 万国学术出版社, 1999. 573~576
- 75 Shamoto Y, Zhang J M, Goto S. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand. *Soils and Foundations*, 1997, 37(2): 71~78
- 76 Shamoto Y, Zhang J M, Tokimatsu K. Methods for evaluating residual post-liquefaction ground settlement and horizontal displacement. *Hyogo-ken Nambu Earthquake*, 1998, 38(2): 69~84
- 77 Shamoto Y, Zhang J M. Evaluation of seismic settlement potential of saturated sandy ground based on concept of relative compression. *Hyogo-ken Nambu Earthquake*, 1998, 38(2): 57~68
- 78 Shamoto Y, Sato M, Zhang J M. Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits. *Soils and Found*, 1996, 36(1): 39~50.
- 79 Arulanandan K, Li X S, Sivathanan K. Numerical simulation of liquefaction-induced deformations. *J Geotech and Geoenviron Engrg*, 2000, 7(126): 657~666.
- 80 Vaid Y P, Thomas J. Liquefaction and postliquefaction behavior of sand. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1995, 121(2):

- 163~173
- 81 Yasuda S, Yoshida N, Masuda T, et al. Stress-strain relationship of liquefaction sands. In: Ishihara, ed. *Earthquake Geotech Engrg*. Balkema, Rotterdam, 1995. 811~816
- 82 Kiku H, Yasuda S, Masuda T, et al. Torsional shear tests on the deformation character of sand before and after liquefaction. In: Proc 9th Japan Earthquake Engrg Sump, 1994. 871~876
- 83 陈文化. 地震液化流滑震害. *自然灾害学报*, 2001, 10(4): 88~93
- 84 Yasuda S, Nagase H, Kiku H, et al. The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 149~160.
- 85 Tokimatsu K, Seed H B. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking. *J Geotech Engrg Div, ASCE*, 1987, 113(8): 861~878
- 86 Ishihara K, Yoshimine M. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 173~188
- 87 Kuwano J, Ishihara K. Analysis of permanent deformation of earth dams due to earthquakes. *Soils and Foundations*, 1988, 28(1): 41~55
- 88 Towhata I, Sasaki Y, Tokida K, et al. Prediction of permanent displacement of liquefaction ground by means of minimum energy principle. *Soils and Foundations*, 1992, 32(3): 97~116
- 89 Orense P R, Towhata I. Three dimension analysis on lateral displacement of liquefied subsoil. *Soils and Foundations*, 1998, 38(4): 1~15
- 90 Chiru D M, Juang C H, Christopher R A, et al. Estimation of liquefaction-induced horizontal displacements using artificial neural networks. *Can Geotech J*, 2001, 38: 200~207.
- 91 高玉峰, 刘汉龙, 朱伟. 地震液化引起的地面大位移研究进展. *岩土力学*, 2000, 21(3): 294~298
- 92 周云东, 刘汉龙, 高玉峰等. 砂土地震液化后大位移室内实验研究探讨. *地震工程与工程震动*, 2002, 22(1): 152~157
- 93 刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性实验研究. *岩土工程学报*, 2002, 24(2): 142~146
- 94 Seed H B. Design problems in sand liquefaction. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1987, 113(8): 827~845
- 95 张均锋. 冲击载荷下饱和砂土渗流强化与结构破坏的实验研究: [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1988
- 96 Cheng C M, Tan Q M, Peng F J. On the mechanism of the formation of horizontal cracks in a vertical column of saturated sand. *Acta Mechanica Sinica*, 2000, 17(1): 1~9
- 97 Kokusho T, Watanabe K, Sawano T. Effect of water film on lateral flow failure of liquefied sand. *Soils and Foundations*, 2000, 40(1): 90~111
- 98 Kokusho T. Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *J Geotech and Geoenviron Engrg*, 1999, 10: 817~826.
- 99 Kokusho T, Kojima T. Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand. *J Geotech and Geoenviron, ASCE*, 2002, 128(2): 129~137
- 100 Yamamuro J A, Covert K M. MonoTonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content. *J Geotech and Geoenviron Engrg*, 2001, 127(4): 314~324
- 101 Polito C P, Martin II J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. *J Geotech and Geoenviron Engrg*, 2001, 5(127): 408~415
- 102 Thevanayagam S, Fiorillo M, Liang J. Effect of non-plastic fines on undrained cyclic strength of silty sands. In: Pak, Yamamura, eds. *Soil dynamics and liquefaction 2000*. ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. 77~91
- 103 Thevanayagam S. Effect of fines and confining stress on steady state strength of silty sands. *J Geotech Geoenviron Engrg ASCE*, 1998, 124(6): 479~491
- 104 Thevanayagam S, Mohan S. Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands. *Geotech*, 2000, 50(1): 1~23
- 105 Castro G. *Liquefaction of Sands*. Harvard Soil Mechanics Series. Cambridge: Harvard University, 1969
- 106 Casagrande. *Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands: a Critical Review*. Harvard Soil Mechanics Series. Cambridge: Harvard University, 1975
- 107 Kramer S L, Seed H B. Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1988, 114(4): 412~430
- 108 Sladen J A, Dholander R D, Krahn J. The liquefaction of sand, a collapse surface approach. *Canadian Geotech J*, 1985, 22(4): 546~578
- 109 Saitta A, Canou J, Dupla J C, et al. Application of a generalized elastoplastic model to simulation of sand behaviour. In: Pande and Pietruszczak, ed. *Numog (Int Symp Numer Models in Geomech) IV*. Swansea, Balkema, Rotterdam, 1992. 119~124
- 110 Matiotti R, Ibrahim E, Doanh T. Undrained behaviour of very loose RF sand in compression and extension tests. In: Pande Pietruszczak ed. *Numog (Int Symp Numer Models in Geomech) V*. Swansea, Balkema, Rotterdam, 1995. 119~124
- 111 Darve F. Stability and uniqueness in geomaterials constitutive modeling. In: Chambon R, ed. *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rock*, 1994. 43~55.
- 112 Lade P V. Initiation of static instability in the submarine nerlerk berm. *Can Geotech J*, 1993, 30: 895~904
- 113 Lade P V. Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1992, 118(1): 51~71
- 114 Lade P V, Yamamuro J A. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Can Geotech J*, 1997, 34: 918~928
- 115 Yamamuro J A, Lade P V. Static liquefaction of very loose sands. *J Can Geotech*, 1997, 34: 905~917

- 116 Prisco Claudio di, Imposimato Silvia. Static liquefaction of a saturated loose sand stratum. *Int J Solids and Structure*, 2002, 39: 3523~3541
- 117 Doanh T, Ibrahim E, Ph Dubujet, et al. Static liquefaction of very loose Hostun RF sand: experiments and modeling. In: Lade, Yamamuro, eds. *Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*. Balkema, Rotterdam, 1999. 17~28
- 118 Yamamuro J A, Covert K M, Lade P V. Static and cyclic liquefaction of silty sands. In: Lade, Yamamuro, eds. *Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*. Balkema, Rotterdam, 1999. 55~65

THE ADVANCES OF LIQUEFACTION RESEARCH ON SATURATED SOILS*

LU Xiaobing TAN Qinming WANG Shuyun ZHANG Jinlai

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 China

Abstract This paper reviews the advances of liquefaction researches on saturated soils since the 1990's, especially, the centrifuge experiments and the liquefaction-induced displacement. At the same time, the criterion of liquefaction, the effect of fine sands on the liquefaction, the static liquefaction are discussed. It is shown that the important problems include the liquefaction-induced large displacements and its damage to the structures. The coupling and evolution of the interaction between the sands and the structures, and the coupling of fluid(the liquefied area) and solids(the area having not liquefied) are the key problems. These problems concern multi-knowledge (includes soil mechanics, numerical simulation, fluid mechanics and structure mechanics).The constitutive relation before and after liquefaction is the key to study the liquefaction-induced large displacement. The centrifuge experiments and the in-situ experiments such as CPT are important tools in the study of liquefaction. The technology related with these two experiments should be studied.

Keywords saturated sand, liquefaction, blast, earthquake

* The project supported by the Combined Key Project of Chinese Academy and CNOOC Study on Some Key Sciences and Technical Problem in Chinese Ocean Oil Exploration (KJCX2-SW-L03-01) and the National Natural Science Foundation of China (10202024).