

⑦
35-39

砂土液化及液化后分析综述

魏迎奇 刘汉龙[✓] 余湘娟

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

TU 435

摘要 综述近 30 年来国内外有关砂土液化及液化后分析方法的主要科研成果,叙述由 Seed 等人发展起来的砂土液化分析的总应力法和由 Martin 等人发展起来的有效应力法,对各种方法的优缺点进行比较,并认为今后在液化的判别方法、液化时固相与液相转换机理、骨架与水相互作用、液化时的大位移与大变形问题、土体液化后特性及液化后土体破坏机理和破坏过程、震后再固结体应变变化规律、不规则荷载下砂土的液化特性及影响孔压变化的地震波序的主要控制参数等各方面问题有待于进一步研究。

关键词 砂土 地震 液化 孔压 土力学

变形, 应力

砂土液化的研究,因观点和应用目的的不同,其定义曾有过多种不同的解释^[1-4],同时,在评价工程是否安全的问题上,也难以用土体液化与否作为衡量标准,因为液化的定义和液化后可能导致的变形或地基破坏移动并不相干^[4]。因此,进行砂土液化后的应力及变形分析对评价工程的安全以及液化的危害性同样有着实际意义。

影响砂土液化的因素很多,在液化分析方法中,大多只能反映影响砂土液化的部分因素,而总应力法和有效应力有限元分析法对这些因素考虑的较全面。因此,本文概述了砂土液化的总应力法和有效应力法在近年来的发展和改进情况,对各种方法进行了述评,对今后的研究方向提出了一些建议。

1 砂土液化分析现状

1.1 砂土液化的总应力法

Seed-Idriss 简化法是一维总应力法,它定义砂土液化强度比 F 为地震时砂土的平均动切应力强度与引起液化所需的动切应力强

度之比,则当 $F \leq 1$ 时,砂土液化。日本岩崎敏男在 Seed-Idriss 简化法基础上提出液化安全系数 F_L 的概念,其定义为土的动强度 R 与地震外力 L 之比。当 $F_L \geq 1.0$ 时,不液化,当 $1.0 > F_L > 0.6$ 时,部分液化, $F_L \leq 0.6$, 完全液化。张克绪提出用八面体动剪切强度验算液化范围,定义八面体剪切强度比 η_d 为试样液化时的八面体切应力与八面体正应力之比,由动三轴试验确定。定义动八面体切应力比 η_{df} 为动八面体切应力与静八面体正应力之比,当 $\eta_d \leq \eta_{df}$ 时,表示该单元液化,反之不液化。Seed-Lee-Idriss 法是二维总应力法,该法用有限元法计算设计地震时土单元水平面上的等价地震切应力幅值,用往返荷载液化试验确定产生液化要求作用于破坏面上的往返切应力幅值,当地震切应力幅值大于往返切应力幅值时,砂土液化。张克绪指出,如果将土单元最大往返剪切作用面上实际承受的应力条件与液化所要求的该面上的应力条件相比较来判别土单元液化可能更合适,并给出了液化判别式^[5,6]。

第一作者简介:魏迎奇,男,博士,从事土的动力性质研究。

Mejia 和 Seed^[7]在 1981 年提出液化分析的三维总应力法,计算采用频率域的方法进行,他们考虑了土的动力非线性,分析比较了坝址峡谷的几何形状及单元划分对动力反应的影响。此外,还讨论了二维和三维分析的适用范围。但在对美国 Oroville 大坝的计算中,只计算了坝体的加速度和动应力,并未涉及孔压、液化和软化等方面,其计算取得了合理的结果。

1.2 砂土液化的有效应力法

在饱和砂土的振动过程中,孔压的发展变化不仅具有平均量的单调增长性,而且具有瞬态量的波动变化性。目前,大多数计算方法只能考虑振动过程中单调增长的残余孔压的变化规律,因此探讨振动荷载下饱和砂土瞬态孔压的变化规律,更具广泛意义。同时,在液化评价标准的选择上也因计算方法的不同而有所不同。常用的判别标准有:①应力标准;②应变标准;③有效应力路径法判别标准等。

孔压的应力模式是将振动中的残余孔压同所施加的应力联系起来的一种方法,以 Seed 法和石桥法最具代表性^[8,9]。后来,各国学者在不同试验基础上,提出了很多考虑初始切应力以及孔压的产生消散或扩散作用的二维分析方法,1981 年徐志英等^[10]将 Biot 固结方程引入到地震孔隙水压力消散和扩散过程中,提出了一种适用于土坝和地基动力分析的非线性二维有效应力分析法,该法采用等参数有限元法计算地震期和地震结束后孔压增长、消散和扩散、液化发生、发展以及残余孔压随时间变化。通过对辽宁石门土坝计算分析,得到合理的结果。1984 年周健,徐志英等^[11]提出了孔压的三维有效应力分析方法。通过对铜陵尾矿坝实际计算,结果合理。石原法是用有效应力路径确定残余孔压,他根据饱和砂土静剪切试验结果和土的塑性屈服条件提出了一个确定在往返荷载下孔压升高的方法,当应力路径达到破坏包线时,认为砂土液化。

孔压的应变模式是将孔压与排水时的体应变联系起来建立孔压增长的基本方程,主要有汪闻韶法和 Martin 法。1987 年何广讷等基于能量分析建立了体变与孔压的关系,鉴于砂土的非线性振动反应和多因素影响,而采用内时理论将本构关系表达为单一的内缓变量的函数。通过对唐山、海城及美国圣费尔南多等 8 个地震液化实例分析,结果合理^[12]。1980 年, Finn 等用内时理论描述各种砂土在周期荷载下的孔压与体变的关系。对于取自美国和日本 6 种砂样,得到良好验证。

孔压的能量模式是将孔压与振动过程中消耗的能量联系起来。曹亚林等认为,孔压的升高主要产生于土体颗粒间的相互运动和重新排列,即孔压升高和土粒重新排列过程中所耗损的能量密切相关,这种关系与初始应力状态有关。用该法与 Seed 法和 Finn 法计算结果比较,得到了良好的一致性。

孔压的瞬态模式由谢定义等^[13,14]在 1987 年提出。他们指出,在动荷作用于一定土性状态试样的过程中,表征土所受应力状态的有效应力点,将从它的静应力状态点开始,以一定的路径在应力空间中由破坏边界面所限定的范围内连续移动,在每一个瞬间,这种移动的趋向取决于当时的应力应变的发展水平和作用动荷变化的特性。对于具体的土性条件,作用应力的变化可以反映出增荷剪缩、增荷剪胀、卸荷回弹或反向剪缩等不同特性,它们分别在应力空间内占据相应的空间特性域。由于应力经过各不同特性域时,孔压具有显著不同的发展特性,因此,当有效应力点以特定选择的顺序和持续时间通过相应的特性域时,即引起由所过特性域的孔压发展特性所决定的孔压增长和积累,规定了孔压发展的规律。为求得具体的孔压值,将孔压按其原因为应力孔压、结构孔压和传递孔压等三种类型,则任一瞬态确定的孔压为三者之和。

建立于规则荷载下特定室内试验基础上的孔压计算方法,对不规则地震荷载作用来

说,其适应性和实用性都难尽人意。石桥在计算不规则加荷下的孔压时引进了等效循环概念,导出不规则加载下孔压上升的方程^[9]。张建民、谢定义将均匀循环荷载下孔压的变化状态分为A型、B型、C型三种型态,并指出不规则动荷作用下,孔压的发展速率和变化规律,主要取决于地震荷载的大波幅值及其在时间域上排列的顺序。因此,可根据大波幅值在整个地震时程线上处于前部、中部和后部,分别用A、B和C型三种孔压增长过程线来模拟^[15]。

2 砂土液化后分析现状

国内外许多地震震害调查结果表明,由于液化而引起的地基或建筑物破坏通常发生在地震结束后几分钟甚至几天以后,因此在动力分析中,仅仅进行液化分析还不能够揭示地震作用全过程的机理。场所在液化及液化后的反应极为复杂,其中牵涉到从固相到液相及从液相到固相的转变、土骨架与水相互作用的问题、大位移与大变形以及非连续介质等,故进行砂土液化后分析非常必要。

顾宝和^[16]1970年曾系统研究过液化的渗流规律和喷冒机理,指出由于地震作用首先发生振动液化,震后由于孔隙水的自下而上的渗流而产生渗透液化,液化渗流运动的特点是:渗流水来自震后砂土增密排出的孔隙水,在平原区,渗流以地表为排泄基准面,在不同深度的水平面上,流速、流量和水力梯度不同,在液化层底,其值均为零,到地表时达到最大。当水力梯度超过临界值时,砂粒浮在水中,发生渗透液化,砂才有可能冒出地面。随着孔压的消散,流速、流量和水力梯度逐渐减小直至消失。

张克绪等认为,饱和砂土在地震时孔压升高,从地震停止后进入消散阶段,总的趋势是随时间的增加孔压降低,但由于孔压的重分布,在土体中某些部位的孔压反而会升高,其抗剪强度为 $\tau = c' + \sigma(1 - a_n) \tan \varphi'$,式中 a_n 为地震引起的孔压升高比。

加拿大Gu等人^[17]通过室内试验研究了可液化材料达到峰值强度后应变软化和孔压增长的特性,建立了一种液化后渐进破坏分析方法。通过对美国圣弗南多坝的数值计算,得出了与观测成果一致的结论。

K.L.Lee在1977年对饱和砂土的再固结体应变进行了试验研究,他根据试验结果指出,饱和砂试样的再固结体应变取决于孔压的大小,而与造成这种孔压的荷载特性无关。其主要影响因素是粒径、初始固结围压和密度,只有当孔压比大于0.6时才起明显影响。石兆吉^[18]在1989年也对砂土振后再固结体应变进行了研究,认为初始固结围压对再固结体应变也有着不可忽视的影响,固结压力比在 $K_c = 1 \sim 2$ 范围内对其影响并不大。

Vaid^[19,20]在不排水条件下试验研究了砂土液化及液化后的性状,认为估算地震产生变形所需的关键资料是砂土液化后的应力应变关系,特别是有效应力降低并接近于零时的应力应变关系。通过三轴试验,他给出了饱和砂土液化及液化后的变化规律,并进行了实例验证。

液化后分析的另一个主要内容是残余变形问题可参见文献^[21]。

3 各种方法述评

评定砂土液化的方法由于出发点不同,故各种方法的适用条件和优缺点及其结论并不相同。总的来说,总应力分析法因在整个分析过程中不考虑上升的孔压对土的弹性的影响,而无法描述液化的全过程。有效应力分析法弥补了它的缺陷。计算结果表明,用总应力法计算将导致砂土很快液化,用有效应力法预测会液化者,用总应力法预测也会液化,反之则不一定,这表明用总应力分析法计算的结果偏于安全。

Seed法中很多影响砂土液化的因素得到了考虑,是目前国内外广泛采用的方法,但由于假定土单元在 K_0 状态下固结,土单元水平面上的初始切应力为零及地震时土单元只

受水平切应力的作用等,而导致试样的破坏面与土单元的破坏面不一致。此外,在动力分析中,动剪切强度和动内摩擦角是用动三轴试验按一定的破坏标准决定的,有着颇大的任意性,且该参数只与坝体或地基的静应力有关,没有与动应力联系起来。张克绪用八面体动剪切强度验算液化范围,克服了Seed法中两者应力条件不一致的缺点。Seed-Lee-Idriss法是个平面应变问题,但同样作了在往返荷载下土的有效内摩擦角与静荷载下的相同以及判别液化时土单元的水平面为破坏面的假定。Mejia-Seed法合理的考虑了实际应力条件以及土的非线性等多种因素的影响,使得计算更合理。

孔压的应力模型是应用较广的一种模型,从一维分析发展到三维分析,从只考虑孔压的增长过程到考虑孔压的增长消散和扩散的综合过程,其明显的缺陷是无法解释偏差应力发生卸荷时引起孔压增长的重要现象,而这时孔压的变化又往往起着明显的作用。孔压的应变模型多是将孔压与体变联系起来,常见几种方法的关系式有着相似的表达形式,只是其中参数的确定不同。将内时理论用于应变模型中,提高了成果分析的规律性。孔压的应变模型可以解决应力模型中出现的矛盾,又可直接和动力分析中的应变幅值联系起来,是孔压研究的一个方向。将孔压与切应变联系起来进行分析,研究较少,试验表明,循环荷载下砂土的孔压与循环切应变有着更好的相关性,有必要进一步探讨。由于能量是一个标量,故可以用叠加原理去解决更为复杂荷载下的问题。孔压的瞬态模型考虑了孔压变化的波动性,揭示了孔压的内在机理,能确定出各瞬态孔压的增长和积累过程,但在应用上还有一定的难度。

谢定义等关于不规则荷载下的孔压模式考虑了不同的应力应变条件和动荷作用强度、部分排水条件、静动孔压耦合作用以及有起始静孔压场存在等不同实用情况下饱和砂土振动孔压的计算问题,分别建立了相应的

实用算法,有很好的实用价值。

液化后分析近几年有了较大的进展。顾宝和等综合评价了地震的液化效应,指出土的地震液化具有地基失效和隔震双重效应,并提出了评价方法。K. L. Lee和石兆吉试验研究砂土液化后的再固结体应变及其主要影响因素,但未见具体算法。Vaid认为估算液化后变形的关键资料是土液化后的应力应变关系,且认为液化后砂土不存在残余强度,对此,石原持反对观点^[22]。

总之,目前液化及液化后性状分析仍以循环荷载为主,对不规则动荷载虽有了一定的探讨但仍较少,同时由于地震荷载的随机性及不确定性,概率方法和模糊数学理论在分析中的应用也是今后研究的一个方向。

4 结 语

地震作用下砂土液化及液化后的性状是个很复杂的问题,尽管目前的研究取得一定的进展,但仍有很多值得研究的课题,比如合理准确的液化的判别方法,特别是适用于一些特殊结构(如地下隧道等)的液化判别方法;液化时固相与液相转换机理、骨架与水相互作用、液化时的大位移与大变形问题;土体液化后特性及液化后土体破坏机理和破坏过程、振后再固结体应变变化规律;不规则荷载下砂土的液化特性及影响孔压变化的地震波序的主要控制参数等。这些都有待于进一步研究。

参考文献

- 1 Casagrande A. Characteristics of cohesionless soil affecting the stability of earth fills, Journal of Boston Society of Civil Engineers, 1936
- 2 Seed H B. Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquake-state-of-the-art paper. Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering. ASCE National Convention, Philadelphia, 1976
- 3 Seed H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. JGED, 1979, 105: 201 ~ 255

- 4 The Committee on soil dynamics of the geotechnical engineering division, Definition of terms related to liquefaction. JGED, ASCE, 1978, 104(GT9):1197~1200
- 5 张克绪. 饱和非粘性土坝地震稳定性分析. 岩土工程学报, 1980, 2(3):1~9
- 6 张克绪. 饱和砂土的液化应力条件. 地震工程及工程振动, 1984, 4(1):99~109
- 7 Mejia L H, Seed H B. Three dimensional dynamic response analysis of earth dams. Report EERC-81-15, 1981, 44~129
- 8 Seed H B, et al. Pressure changes during soil liquefaction. Proc ASCE, 1976, 102(GT4)
- 9 石桥等. 孔隙水压力上升机理与土的液化. 见:《地基与基础译文集》编委会编. 地基基础译文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 1979
- 10 徐志英, 沈珠江. 土坝地震孔隙水压力产生、扩散和消散的有限元法动力分析. 华东水利学院学报, 1981, 9(4):1~16
- 11 周健, 徐志英. 土(尾矿)坝的三维有效应力动力反应分析. 地震工程和工程振动, 1984, 4(3):60~70
- 12 何广纳, 李万明. 振动能量下砂土的体变与孔隙水压力. 地震工程与工程振动, 1987, 7(2):89~99
- 13 谢定义, 张建民. 往返荷载下饱和砂土强度变形瞬态变化的机理. 土木工程学报, 1987, 20(3):57~70
- 14 谢定义, 张建民. 周期荷载下饱和砂土瞬态孔隙水压力的变化机理与计算模型. 土木工程学报, 1990, 23(2):51~60
- 15 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法. 水利学报, 1991(8):45~50
- 16 顾宝和, 张荣详, 石兆吉. 地震液化效应的综合评价. 工程地质学报, 1995, 3(3):1~9
- 17 Gu W H, Morgenstern N R, Robertson P K. Progressive failure of Lower San Fernando Dam. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(2):333~348
- 18 石兆吉, 丰万玲, 郁寿松. 饱和砂土震后再固结体应变的变化规律. 岩土工程学报, 1989, 11(13):55~61
- 19 Vaid Y P, Thomas J. Post-liquefaction behaviour of sand. XIII ICSMFE, New Delhi, India, 1994, 5
- 20 Vaid Y P, Member ASCE, Thomas J. Liquefaction and postliquefaction behavior of sand. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(2):163~173
- 21 刘汉龙. 土体地震永久变形分析述评. 水利水电科技进展, 1995, 14(4):22~28
- 22 Kenji, Ishihara. Evaluation of residual strength of sandy soils. XIII ICSMFE, New Delhi, India, 1994, 5

(收稿日期:1996-06-26 编辑:许宇鹏)

·简讯·

河海大学万名师生送科技下乡

今年暑假,河海大学万名师生积极响应水利部“关于开展十万水利科技人员技术下乡活动”的号召,利用暑假,走出校门,送科技文化下乡,送技术到水利建设第一线。

为开展好这项活动,河海大学拨出专款40万元。学校还专门成立了领导小组,组织了65支科技、文化服务小分队。这些小分队深入水利建设第一线,推广农村排水、节水灌溉、水土保持、水库和电站病险工程处理等技术;深入农村推广科技成果、科技知识,传播农村实用技术;深入企业,开发专题攻关、技术改造、产品开发、市场营销以及市场营销人员培训等活动。学校在抓好65个科技下乡为主的小分队的同时,还组织了许多科技、文化、水利建设、水利经济专题的社会调查、志愿者服务等活动。

河海大学暑期送科技下乡已初见成效。据不完全统计,他们在水利工程建设技术方面承接了渠道防渗新技术、新材料的应用,灌区管理自动化系统,水稻节水灌溉等项目的技术服务与研究。宣传水利科技成果100多项,培训水利技术骨干上千人。他们还提出农村水利工程建设、运行、管理工作合理化建议100多条,完成《沁河洪水痕迹的调查》、《连云港行业单位产值耗水量调查》、《水污染对盱眙县水利经济的影响》等水利科技成果、调查报告20多篇,举办电脑培训、法律知识咨询、营销讲座等10多次。

(本刊编辑部摘)