

震后饱和砂土的液化及边坡稳定问题述评

余湘娟¹, 房震¹, 严蕴¹, 郑绍军², 楼添良³

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 杭金衢高速公路萧山指挥部, 浙江 杭州 322100;
3. 浙江省路桥集团公司, 浙江 杭州 322100)

摘要 阐述稳态变形及稳态强度的基本概念, 提出用稳态强度进行震后砂土液化及边坡稳定性分析的思路和方法, 即首先根据现场试验资料确定砂土的孔隙比或相对密实度, 然后基于室内稳态强度线确定现场稳态强度曲线, 最后根据震后驱动剪应力与对应的现场稳态强度的大小对比情况判别震后液化及稳定。另外, 基于前人的研究成果给出了详细的计算流程图。

关键词 震后; 饱和砂土; 稳态强度; 稳定性; 液化

中图分类号 :TU435 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)01-0072-04

地震发生时与震后边坡的稳定和变形是一个非常复杂的问题, 而地震导致的液化问题又是其中一个更复杂的过程。人们已经发现, 地震导致的灾害性破坏往往是在震后发生的, 如 Gu 等^[1]通过对 1939 年 Ojika 地震中发生破坏的坝体进行分析, 认为绝大多数坝体的破坏都是在震后几个小时内发生的。因此, 地震液化判别也应相应地从震时液化判别延伸到震后液化判别。由此也就产生一个问题:为什么在地震持续时间内没有发生剧烈的破坏呢? 目前对此问题已有了较一致的认识, 即应变软化导致的渐进破坏理论。它认为, 在地震荷载的作用过程中, 土体局部刚度的降低导致抗剪强度下降, 而局部强度下降就会导致应力重新分布, 从而导致进一步的液化或周围土体的屈服。在应力重分布之后的液化区范围要比初始液化区大得多, 其在震后的静力作用下发生流动破坏。因此, 震后的破坏(液化区扩大后)更为严重。在传统的极限平衡稳定分析中没有考虑到这个渐进的过程, 因此在稳定分析中使用的强度也存在着很大的危险性。自 1985 年 Poulos 等^[2]首次提出用稳态线进行液化评价后, 用稳态强度进行地震稳定性分析和变形分析已经被人们广泛承认并得到广泛应用, 如 1992 年 Castro 与 Seed 发表的文章中就运用稳态强度分析了 Lower San Fernando 坝滑移^[3]。本文的主要目的在于使震后砂土液化判别及边坡稳定性分析更为系统化, 提出了用稳态强度理论进行震后分析的思路和方法, 并给出了流程图。

1 稳态强度理论

稳态强度是砂土液化研究中的重要课题。目前人们已普遍接受 Poulos^[2]的观点, 即稳态强度就是土体在稳态变形条件下可以动用的强度。稳态变形条件是指土体在常体积、常法向有效应力、常剪应力和常应变速率下的持续变形状态。土体只有在所有颗粒定向达到统计稳态条件及所有颗粒骨架达到破碎之后, 才能达到稳态变形。由于紧密砂土在不排水条件下体积会发生膨胀, 因此它在地震作用过程中强度反而会增大, 所以震后液化及稳定性分析都是针对松砂而言。

1.1 流动结构

Casagrande^[4]认为砂土的流动结构仅在流动时出现, 并提出了在固结不排水三轴试验中采用轴向“死荷增量”的加荷方法, 这样就出现了流动现象。图 1 中 A、B、C 3 条线都是三轴固结不排水剪的试验结果, D 线是固结排水试验的成果。Casagrande 认为 A 线出现了流动结构, C 线虽然开始有“液化”现象, 但随着轴向应变的增加继而表现了剪胀的性质, B 线称为“有限液化”。Casagrande 通过研究发现“流动结构”同时存在于不等压固结和循环加载中, 同时对同一剪前孔隙比和有效围压有一个共同的残余强度(稳态强度)。根据以上试验成

果, Casagrande 定义了流动结构, 即当饱和砂土液化并发生实际流动滑移时, 它会与静力状态下的结构不同, 流动中的每一颗粒都相对于周围的颗粒不断地滚动, 在流动结束后, 颗粒将会重新排列并还原到静力结构, 但此时的结构会比流动前紧密些。

1.2 稳态变形

所谓稳态变形即指常体积、常竖向应力、常有效应力、常剪应力和常速度条件下的变形。这种稳态仅在所有的土颗粒达到了统计上的稳定状态条件才会存在, 即所有土颗粒破碎。饱和松砂的不排水剪切、粘土的排水剪切以及饱和软粘土的不排水剪切都可以得到稳态变形曲线。稳态变形并非静止的条件, 它只会在剪切过程中发生。通常在较大的应变(10% ~ 20%)时, 初始结构的影响才会完全消失, 才能得到稳态的流动结构和稳态变形。稳态变形应当是持续较长的一段变形, 而不是短暂的变形阶段。如图 2 所示。

1.3 稳态强度

在砂土的不排水剪切试验中可以得到偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与轴向应变 ϵ 之间的关系曲线, 如图 2。所谓稳态强度就是在稳态变形条件下的抗剪强度, 它只是孔隙比的函数。

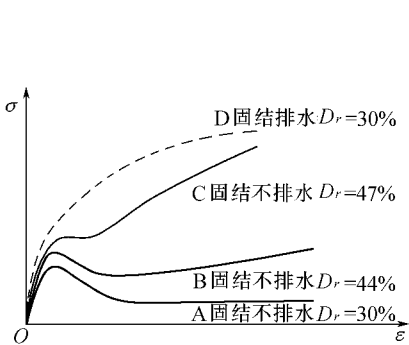


图 1 固结不排水三轴剪切试验中的不同性状

Fig.1 Different curves of undrained triaxial consolidation tests

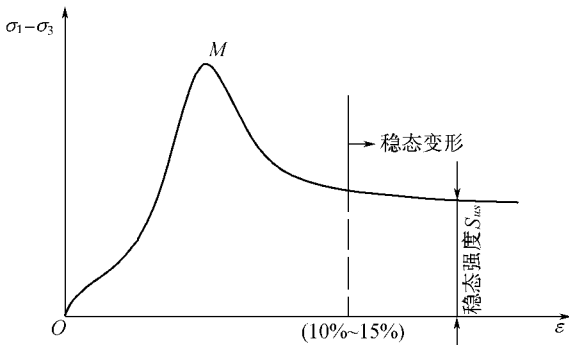


图 2 松砂应力应变曲线

Fig.2 Stress ~ strain curve of loose sand

2 利用稳态强度进行震后分析

Poulos 等^[2]提出了用稳态强度和稳态线判别震后砂土液化的问题, 并给出了判别的 5 个步骤。当然, 这一方法是建立在两个假设的基础之上的, 即(a)砂土的稳态强度完全地发挥(b)发生液化的土体不能抵抗任何变形。

利用稳态强度进行震后分析的过程可以概括如下:

- a. 确定现场砂土的孔隙比或相对密实度。根据规范或经验确定临界孔隙比或密实度, 判别砂土是松砂还是紧砂及液化的可能性。若是松砂则需进一步分析。
- b. 确定现场砂土的稳态强度。稳态强度的确定可以根据室内试验或现场的孔隙比、标准贯入试验或静力触探试验^[3 5]。室内利用不排水应力控制式试验确定重塑饱和砂土的稳态强度和稳态线。由于土样在取出和制样过程中的扰动及固结影响, 必须对该稳态强度进行修正, 见图 3。图中 AB 是室内不排水试验所得稳态线, CD 曲线是推得的现场稳态线。这里假设现场稳态强度曲线是与室内稳态强度曲线平行的。e_L 为室内经过取样、压实和固结以后土体的孔隙比; e_f 为现场孔隙比(S_{us})_f 和(S_{us})_L 分别对应于 e_f 和 e_L 的稳态强度(S_{us})_f 根据室内试验得到(S_{us})_L 为待定土体现场的稳态强度。现场根据标贯击数所得的稳态强度同样需要修正, 详见参考文献 3 [5]。
- c. 计算由静荷载引起的驱动剪应力, 将其与现场稳态强度进行比较并计算安全度。驱动剪应力是指保持土体静态平衡所需的剪应力。如果驱动剪应力大于稳态强度, 就会发生震后的液化现象而可能导致失稳破坏; 反之, 则会产生一定的永久变形。

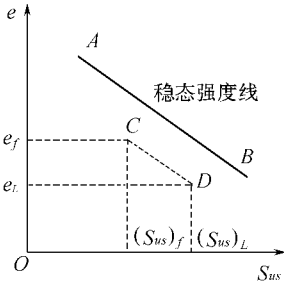


图 3 根据现场孔隙比(e) 确定稳态强度(S_{us})示意图

Fig.3 Determination of steady state strength according to in-situ void ratio

d. 对(c)中的第 1 种情况进行震后稳定性分析,第 2 种情况只需进行震后变形分析.
以上过程可以总结为图 4 所示的流程图.

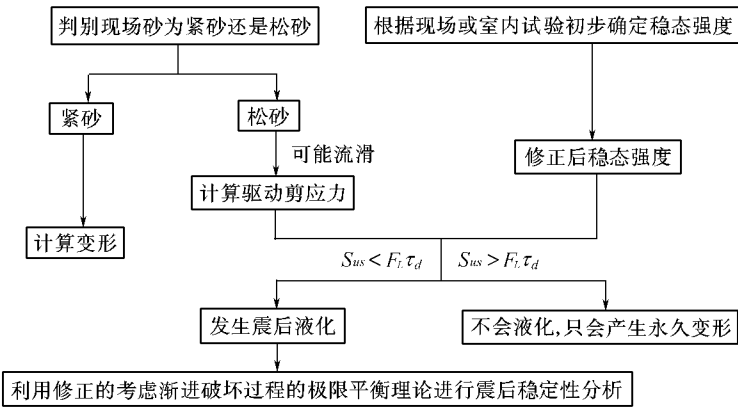


图 4 震后砂土液化及变形分析流程图

Fig.4 Flow chart for analysis of liquefaction and deformation of saturated sand after an earthquake

在地震作用过程中,土粒骨架的破坏会导致局部刚度削弱和抗剪强度下降,使土体中产生应力重分布,从而导致周围土体液化或屈服.由于震后的液化区范围往往比初始液化区的范围更大,所以震后的灾害总是更严重.为了能够反映这样的渐进破坏过程,在进行稳定性分析的时候就不能采用原有的极限平衡法.早在 1971 年 Bishop^[6]就曾针对渐进破坏对稳定分析方法的选择发表过论文.1978 年 Law^[7]提出了边坡渐进破坏极限平衡稳定性分析法,此法仍将边坡划分为垂直的土条,首先通过推求局部安全系数判定局部破坏,如果发生局部破坏则强度就会下降产生土条间应力重分布,从而导致进一步的破坏,则最终稳定性应当通过最终安全系数来判定.Yamagami 和 Jiang^[8]提出了非垂直土条的极限平衡方法,简化了软化型应力应变曲线,利用极限平衡方程和摩尔库仑强度包线推求了局部安全系数.Li^[9]提出了松弛 Maxwell 模型并把它用于极限平衡分析中.虽然这些稳定性分析方法都考虑了渐进破坏过程,但仍存在一些问题需要进一步推敲.如 Li 提出的方法中,虽然用松弛的 Maxwell 模型可以描绘应力的松弛,但不能反映松弛的变形,而且该方法中的土条间作用力函数很难确定.

3 结论与展望

从 20 世纪 60 年代后期到现在,饱和砂土液化的研究已有 30 多年的历史,这期间,对砂土液化的机理和液化的判别研究都取得了巨大的进展,但仍有很多问题需要进一步研究.虽然本文论述的是震后砂土的液化及稳定问题,但这也必然会牵涉到震时的有关问题.笔者认为有待进一步研究的内容主要有以下几个方面:

- a. 应加强地震对土体强度削弱研究,建立震时土体强度与时间的关系模式.由于震后静止条件土体强度未必已降到稳态强度,因此,在实际的液化判别中存在一定的安全储备,当然,这也会带来一定的浪费.
- b. 土体颗粒级配对稳态强度的影响.
- c. 加大对地震后的液化现场的研究,要进行细致的勘察和理论分析,并对现有的方法进行验证.
- d. 震后边坡稳定性分析方法.

参考文献:

[1] GU W H, MORGESTERN N R, ROBERTSON P K. Progressive failure of lower San Fernando Dam[J]. J Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(2): 333—347.
[2] POULOS S J, GONZALO Castro, JOHN W. Liquefaction evaluation procedure[J]. J Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1985, 111(GT6): 772—792.
[3] SEED H B. Design problem in soil liquefaction[J]. J Geotechnical Division, ASCE, 1987, 113(GT8): 827—845.
[4] CASAGRANDE A. Liquefaction and cycle deformation of sands—a critical review[A]. In: BUENOS Aires. Pro of the Fifth Pan America Con on Soil Mechanics and Foundation Engineering Division[C]. Argentina: ASCE, 1975. 5: 79—133.

[5] KONRAD J-M. In situ sand state from CPT :evaluation of a unified approach at two CANLEX sites[J]. Canadian Geotechnical Journal , 1997 ,34(1) :120—130.

[6] BISHOP A W. The influence of progressive failure on the choice of the method of stability analysis[J]. Geotechnique ,1971 ,21(2) :168—172.

[7] LAW K T ,Lumb P. A limit equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slops[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1978 ,15 : 113—122.

[8] YAMAGAMI Takuo ,JIANG Jing-cai ,KHAN Younus Ahmed. Progressive failure analysis based on a method of non-vertical slices[A]. In : YAMAGAMI Takuo ,JIANG Jing-cai eds. Slop Stability Engineering[C]. Balkerdam :Rotterdam ,1999. 299—304.

[9] LI K S. Evolution model of progressive failure of landslid[J]. J Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,2001(1) :98—99.

Earthquake-induced liquefaction of saturated sand and slope stability analysis

YU Xiang-juan¹ FANG Zhen¹ , YAN Yun¹ , ZHEN Shao-jun² , LOU Tian-liang³
(1. Research Institute of Geotechnical Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Xiaoshan Office of Hangjinqi Expressway Construction , Hangzhou 322100 , China ;
3. Road and Bridge Group Ltd. of Zhejiang Province , Hangzhou 322100 , China)

Abstract : The concepts of the steady-state deformation and steady-state strength were expounded , and a method was proposed for analysis of the earthquake-induced liquefaction of saturated sand and the slope stability based on the steady-state strength . In this method , the void ratio and relative compactness of sand were determined by the field test data first ; then the field curve of steady-state strength was deduced based on the curve obtained in laboratory tests ; finally conclusions on sand liquefaction and slope stability were drawn after a comparison of the driving shear stress with the field steady-state strength after earthquakes . Furthermore , a detailed flow chart for calculation was developed by reference to previous research results .

Key words : post-earthquake ; saturated sand ; steady-state strength ; stability ; liquefaction

欢迎订阅 全国水利系统优秀科技期刊 江苏省优秀期刊 欢迎投稿



水利水电科技进展

新颖 实用 快捷

双月刊 A4 开本 彩色封面 64 页 2003 年全年定价 30.00 元 全国各地邮局均可订阅

国际标准刊号: ISSN 1006—7647	编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号
国内统一刊号: CN 32—1439/ TV	联系电话: (025)3786335
国外发行代号: DK 32003	电子信箱: jz@hhu. edu. cn
(中国出版对外贸易总公司)	银行账号: 南京工行宁海路分理处
国内邮发代号: 28—244	4301011409001024513

(也可直接汇款至编辑部订阅 ,
另加 6.00 元邮寄费)