

文章编号:0559-9350(2010)09-1061-08

地基砂土液化判别方法探讨

杨玉生, 刘小生, 刘启旺, 陈 宁

(中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 本文以我国《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287-2008)中的标准贯入锤击数液化判别法为基础, 以该法进行应力修正的方法为依据, 提出了采用附加应力等效埋深来考虑有限面积基础建筑物附加应力随深度扩散影响的液化判别新思路, 以工程设计中参数取值常用平均值和小值平均值来考虑标贯击数和黏粒含量的离散性, 同时借用有限元网格离散求解思路确定砂层可能液化的区域。以宁朗水电站闸坝工程为例进行了案例分析, 结果表明: 在地震设防烈度 VII 度时, 闸基下中细砂层近震时不发生液化, 远震时在闸基 4 个角点下的局部小区域内发生液化。

关键词: 液化判别; 标准贯入锤击数法; 附加应力影响; 离散性

中图分类号: TU441

文献标识码: A

1 研究背景

1964 年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震发生了大量砂土液化而导致的严重震害, 引起了工程界的普遍重视。1971 年 Seed^[1] 提出判别砂土液化的简化方法, 随后国外众多研究者围绕该法开展了大量研究, 使该法得到不断改进和完善, 成为北美和世界上许多地区进行砂性土液化判别的标准方法。美国国家地震工程研究中心(NCEER)曾组织专家组全面总结了砂土液化判别的研究进展^[2-3], R. B.Seed 等^[4-5] 在土的地震液化的最新研究进展报告中, 全面总结了砂土液化评价的研究进展。K.O. Cetin 等^[6] 对国内外应用广泛的基于标准贯入试验的液化判别方法(包括确定性方法和基于可靠度理论的概率方法)进行了全面的总结, 反映了该领域的技术水平。我国对液化可能性判别的研究几乎和国外同步进行, 特别是根据历次震害调查获得的经验判别方法为我国多部抗震规范所采用。该方法主要以标贯击数 N 、剪切波速 V_s 和锥尖阻力 q_c 等作为基本判据, 建立了多个形式不一的液化判别式。涉及经验法、概率法等多种方法, 但这些方法的可靠性评价问题没有很好地解决^[7]。

建筑物基础对地基砂土液化的影响, 很早就引起了人们的注意。一些研究者采用宏观研究^[8]、模型试验(包括振动台模型试验和离心模型试验)和数值分析^[9-18] 等研究方法, 对建筑物基础影响下地基孔隙水压力分布和液化势分区进行了研究。相关的研究大都给出了较为一致的结论, 即建筑物基础对基础下方孔隙水压力的发展起约束作用, 基础边缘附近孔隙水压力最大; 基础下方地基较难液化, 基础边缘附近(尤其是基础角点附近)区域为液化的敏感区。这些研究成果是评价考虑建筑物基础影响的砂土液化判别方法合理性的重要参考资料。在考虑建筑物基础影响的地基液化判别方法方面, 门福录等^[19-20] 利用 Seed 简化分析法和锥体模型理论, 提出了一种简化总应力分析方法, 陈文化、景立平等^[21-22] 进一步发展了这种方法; 王健和陈文化^[23-24] 通过将基础下方和基础边缘的地震剪应

收稿日期: 2009-02-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会和二滩公司雅砻江联合基金项目(50639060); 水利部“948”项目(200929)

作者简介: 杨玉生(1980-), 男, 河南方城人, 博士生, 主要从事土石坝与地基抗震研究。E-mail: yangysh@iwhr.com

通讯作者: 刘小生(1962-), 男, 江西信丰人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土动力学、土石坝与地基抗震理论和试验研究。E-mail: yangysh@iwhr.com

力与自由场地的地震剪应力比较,从而修正自由场地的临界标贯击数,进而结合自由场地实测标贯击数对建筑物影响下的地基液化进行判别,该法与现有规范方法结合紧密,可操作性强;柯安(中国台湾)^[25]对考虑建筑物影响的地基液化判别方法也进行了有益的探索。

国内外有关液化判别的研究,呈现出如下特点:(1)后期发生的地震现场实测资料不断丰富了原有资料库,促进了已有方法的验证、改进和完善;(2)土体抗液化强度的确定方法,由最初单一依靠室内试验确定,发展到依靠室内试验和多种原位测试方法确定(包括标准贯入试验、圆锥贯入试验、波速试验、重型贯入试验和扁铲侧胀试验等);(3)由对自由的水平场地进行液化判别,发展到对倾斜的场地和建筑物基础影响下的地基进行液化判别,以及对土石坝坝体土体进行液化判别;(4)由确定性方法液化判别向可靠度概率液化判别发展;(5)随着计算机技术的发展,重要工程越来越多的倚重于反应分析法进行液化判别,并对可能液化的地基(坝体)进行液化危害性分析。这些特点反映了土的液化评价方法从提出经不断改进而逐步完善的过程。但是,现有的经验液化判别方法基本上都是针对自由场地的,仅有少数研究者对考虑建筑物基础影响的液化判别方法进行了探索,所获得的研究成果还没有被广泛接受和应用;基于可靠度理论的概率方法目前还处于发展阶段,在实际工程中应用的还很少^[3]。

液化判别的标准贯入锤击数法在我国应用十分广泛,但是该法存在如下不足:(1)不能考虑具有有限面积基础建筑物引起地基附加应力的影响;(2)该法是对标贯试验点液化的逐点判别,由于标贯击数受多种因素影响,黏粒含量的测定也存在离散性,导致判别结果有时离散性较大;(3)该法难以明确给出砂层的可能液化区域。本文以我国《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287-2008)^[26]中的标准贯入锤击数液化判别法为基础,以该法进行应力修正的方法为依据,提出采用附加应力等效埋深来考虑有限面积基础建筑物附加应力随深度扩散影响的液化判别新思路,以工程设计中参数取值常用的平均值和小值平均值来考虑标贯击数和黏粒含量的离散性,同时借用有限元网格离散求解思路确定砂层可能液化的区域,并以宁朗水电站闸坝工程为例进行案例分析。

2 考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别思路

2.1 考虑附加应力随深度而扩散影响的方法 文献[26]规定,当标准贯入试验点深度和地下水位在试验地面以下的深度,不同于工程正常运用时,实测标准贯入锤击数应按照式(1)进行校正,并应以校正后的锤击数作为判别依据。

$$N_{63.5} = N'_{63.5} \left(\frac{d_s + 0.9d_w + 0.7}{d'_s + 0.9d'_w + 0.7} \right) \quad (1)$$

式中: $N'_{63.5}$ 为实测标准贯入锤击数; d_s 为工程正常运用时,标准贯入点在当时地面以下的深度(m); d_w 为工程正常运用时,地下水位在当时地面以下的深度(m),当地面淹没于水面下时, d_w 取0; d'_s 为标准贯入试验时,标准贯入点在当时地面以下的深度(m); d'_w 为标准贯入试验时,地下水位在当当地面以下的深度(m),若当时地面淹没于水面以下时, d'_w 取0。

式(1)对实测标准贯入锤击数的修正,主要是考虑了工程建设中进行了大面积填方或挖方(上部无建筑物的情况)时,由于地面标高或地下水位的变化而导致原标贯试验点有效应力发生变化时的情况。但是,当填方或挖方面积有限时,尤其是当上部建筑物基础为有限面积时,由于有限面积荷载在土层中的应力传递具有显著的扩散效应,简单地套用式(1)来进行地基砂层液化判别,会放大有限面积荷载对地基应力状态改变的影响,导致判别结果偏于不安全。

本文采用半无限空间弹性体表面作用某种形式荷载时相应的弹性理论,解答公式求解具有有限面积基础的上部建筑物产生的附加应力,并将此附加应力换算为等效填方埋深,以此等效填方埋深来考虑附加应力对地基液化的影响,即把等效于附加应力的土层填方厚度放在式(1)的 d_s 项中一并考虑。式(1)实际上是在地基应力状态不同于标贯试验时,对标贯击数所做的修正。

附加应力等效埋深的确定,关键在于确定地基中任意点的附加应力值和土层密度的代表值。土层密度代表值取各钻孔原状样天然密度的加权平均值。这里所说的加权平均,包含两次计算,首先按照原状样分层和取样深度,对处于同一土层的试样密度加权平均;其次将层内加权平均获得的各分层代表密度,按照各分层典型厚度再次加权平均。各分层典型厚度取各钻孔揭示的分层厚度的平均值。

需要指出的是,由于规范法的适用深度为20m以内,利用式(1)通过等效填方埋深来考虑附加应力的影响时,其应用的深度范围也不宜超过20m。

2.2 标贯击数和黏粒含量的离散性考虑 式(1)实际上是在地基应力状态不同于标贯试验时,对标贯击数所做的修正。因此,可以式(1)为依据,将各钻孔不同深度试验点的标贯击数按照同一深度进行归一,获得归一到同一深度的标贯锤击数,并在同一深度下求取归一后标贯锤击数的平均值和小值平均值。如果砂层较厚或者不同深度处砂层性质差异较大,则可以进行多个深度的归一,并计算各深度处归一后标贯锤击数的平均值和小值平均值。黏粒含量的典型值可以取各钻孔砂层黏粒含量的平均值或小值平均值。需要注意的是,为获得有代表性的场地土层信息,应该结合工程具体情况系统布置钻孔。平均值和小值平均值是工程设计中参数取值的常用方法,具有一定的概率含义,但目前尚难以给出其对应的液化概率保证率,这是需要进一步研究的问题。

2.3 确定液化区域的方法 标准贯入锤击数法的液化判别是针对标贯试验点的逐点判别,只能依靠钻孔布置和标贯试验点在土层中的空间分布情况,对可能液化的区域做出估计,难以明确给出砂层的可能液化区域。有限单元法通过对研究对象的网格离散,以有限的节点和单元来描述研究对象,以网格节点和单元的某种待求信息作为未知量进行求解。为明确获得砂层的可能液化区域,本文借用有限元网格离散求解思路,即以节点和单元对地基砂层进行空间离散,以离散后节点附近的区域为液化判别的研究对象,综合所有节点的液化判别结果,即可获得砂层的液化区域。

3 考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别步骤

考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别,其步骤与文献[26]相似。只是土层上部有建筑物(构筑物)时,对 $N_{63.5}$ 进行了考虑有限面积荷载作用下地基应力状态改变的修正,即计算公式中 d_s 采用考虑附加应力等效埋深的值(即归一深度与附加应力等效埋深之和),且标贯击数采用经过深度归一的标贯击数的平均值或小值平均值;对临界标贯击数 N_{cr} 的计算,采用黏粒含量的平均值或小值平均值。计算中选用平均值还是小值平均值,有赖于对标贯试验资料和室内土工试验资料的综合判断,也可以同时进行,以对比不同取值对地基砂层液化可能性判别结果、以及可能液化区域的影响,这有助于更为准确地了解地基砂层液化可能性判别结果的安全裕度,在此基础上给出砂层液化判别的最终结论。

其步骤可以归纳如下:(1)依据钻孔揭示覆盖层分层厚度和室内试验资料,通过对密度按厚度加权平均确定等效埋深换算时的土层密度代表值;(2)依据钻孔平面布置和揭示的覆盖层分层厚度,对砂层做适当简化,并网格离散求解各节点附加应力,结合(1)所得的土层密度代表值,计算附加应力等效埋深;(3)将标贯试验击数依据式(1)归一到同一深度,并计算归一后标贯击数的平均值和小值平均值;(4)依据室内试验资料,计算各钻孔试验点黏粒含量的平均值和小值平均值;(5)根据标贯试验资料和室内试验资料,综合判断液化判别计算时标贯击数和黏粒含量的取值,即取平均值或小值平均值,或者分别取平均值和小值平均值;(6)依据文献[26]规定流程,判别网格节点局部区域的液化可能性,并实现可液化区域的图形显示和范围界定,给出地基砂层液化可能性及液化区域分布情况的最终结论。

4 工程应用

按照前文所述考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别思路，结合宁朗水电站工程，对水电站闸址覆盖层中细砂层进行液化判别，从而详细说明考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别方法。按照规范方法对标贯试验点液化可能性给出的逐点判别结果，包括以下几种情况：(1)天然场地条件下，按照规范方法对标贯试验点进行逐点液化判别；(2)天然场地条件下，考虑标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别；(3)工程运用期正常挡水情况下，考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别。由于缺乏钻孔与闸室相对位置坐标资料，工程运用期正常挡水情况下，不能够对标贯试验点液化可能性进行逐点判别。

4.1 闸址覆盖层基本情况^[27-30] 闸址区抗震设计烈度为基本烈度Ⅶ度，第四系松散堆积物主要为河床冲积层及分布于两岸谷坡坡脚的崩坡积物，河床覆盖层厚度一般为35~47.75m，自上而下分为3层，其中第2层为中细砂层(IQ4)，系堰塞河湖相沉积层，为褐黄色-灰色中细砂，局部夹粉土，底部或顶部含少量砾石，结构较松散，具有中等透水性，承载力和压缩模量均较低。该层分布较稳定，整个闸址区河床部位均有分布。其分布特点是左岸薄，右岸厚。

4.2 中细砂层标贯击数和黏粒含量的离散性 结合标贯资料和钻孔分层情况，采用式(1)将标贯试验击数进行归一，归一深度分别取为15.1、13.7和16.1m，其中15.1m为各试验点深度平均值，13.7和16.1m分别为钻孔揭示的砂层最深顶板埋深和最浅底板埋深，此处归一深度的选取保证了各钻孔在归一深度处都有砂层分布。归一前后的地下水埋深相同，即取为1m。砂层标贯击数和黏粒含量的平均值和小值平均值计算见表1

表1 标贯击数和黏粒含量的平均值与小值平均值

钻孔	试验点编号	试验位置	实际锤击数	归一后锤击数（击）			黏粒含量
		/m	(击)	15.1m	13.7m	16.1m	/%
ZK101	①	12.30	8.00	9.60	8.80	10.20	12.63
		16.70	7.00	6.40	5.90	6.80	
ZK104	①	13.65	8.00	8.80	8.00	9.30	17.37
ZK109		17.44	6.00	5.30	4.80	5.60	
ZK110		17.65	10.00	8.70	7.90	9.20	12.12
ZK111	①	12.05	6.00	7.30	6.70	7.80	
ZK112		15.25	23.00	22.80	20.90	24.20	4.70
钻孔 114	ZK1YZ4	13.61	13.00	14.30	13.70	15.10	8.40
		15.07	10.50	10.50	9.60	11.10	5.30
	ZK1YZ6	15.55	10.00	9.70	8.90	10.30	3.70
	ZK1YZ7	16.97	14.00	12.60	11.50	13.30	8.80
		②	16.90				
	平均值		15.10	10.50	10.50	9.70	11.20
小值平均值			7.90	8.00	7.60	8.80	5.28

注：①未提供黏粒含量数值；②该试验点发生坍孔，不做统计。

4.3 中细砂层的标准贯入锤击数法液化判别

4.3.1 天然场地条件下中细砂层标贯试验点液化判别 按照文献[26]的规定方法，对建闸前天然场地条件下各试验点进行逐点液化判别。结果表明，近震时，发生液化的试验点占试验点总数的42%；远震时，发生液化的试验点占试验点总数的50%。但是，不同钻孔揭示的深度相近处的液化判别结果离散性很大，难以对砂层液化的深度和区域做出准确判断。

4.3.2 天然场地条件下考虑标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别 表2给出了考虑标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别结果。由表2可见：近震时，若标贯锤击数取平均值、黏粒含量取小值平均

值，中细砂层在 15m 深度范围内均发生液化，从各钻孔砂层埋深和砂层厚度来看，这相当于整个砂层有 40% 以上发生液化；远震时，中细砂层在整个深度分布范围内均发生液化。锤击数取小值平均值时，中细砂层在近震和远震时均发生液化。

表2 建闸前考虑标贯击数和黏粒含量离散性的液化判别

归一深度 /m	归一后锤击数		黏粒含量 小值平均值 /%	液化判别 临界锤击数		液化判别结果			
						锤击数取平均值		锤击数取小值平均值	
	平均值	小值平均值		近震	远震	近震	远震	近震	远震
13.7	9.7	7.6	5.28	9.8	13.1	液化	液化	液化	液化
15.1	10.5	8.0	5.28	10.4	13.9	液化（临界）	液化	液化	液化
16.1	11.2	8.8	5.28	10.4	13.9	不液化	液化	液化	液化

4.3.3 考虑附加应力影响及标贯击数和黏粒含量离散性的地基砂层液化判别 闸室平面图见图 1。建闸后，闸基底板底面高程为 1 830.5m^[28]，相当于建闸后的地表高程。由于与原地表高程不一致，且闸室下岩土层应力状态发生变化，需要对标贯试验击数进行考虑深度变化和应力状态变化的修正。

根据钻孔揭示的砂层分布资料，进行砂层液化判别时，可将闸室下砂层分布区域简化为顶板高程为 1 827.0m，底板高程为 1 813.8m 的长方体区域。其中，高程 1 827.0m 处为钻孔揭示砂层的最浅顶板高程，高程 1 813.8m 为钻孔揭示砂层的最深底板高程，因此，如此简化不会导致实际地层中砂层分布范围的减小，不会低估可能发生液化的区域。

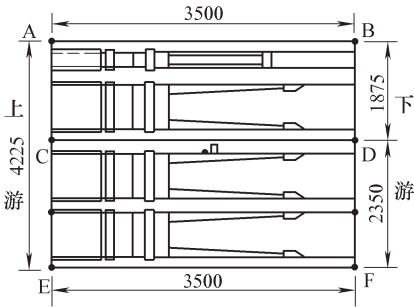


图1 闸室平面

正常挡水情况下，闸基基底应力在 C 点处最小(242kPa)。因此，在进行建闸后的闸室下砂层液化判别时，取 C 点处的基底应力来代表整个闸室的基底应力。为直观显示闸基下砂层的液化分布区域，借用有限元网格离散求解思路，将经过边界简化的中细砂层进行网格离散，按照 J.Boussinesq 关于半无限空间弹性体表面作用矩形面积均布荷载的弹性理论解答公式计算各节点的附加应力，进而对各节点的液化可能性进行判别，并采用式(2)定义液化可能性指标：

$$LIQFTP = N_{cr} / N_{63.5} \tag{2}$$

式中：LIQFTP 为判别液化可能性的指标，当 LIQFTP < 1 时，代表不发生液化，当 LIQFTP ≥ 1 时，代表发生液化；N_{63.5} 为建闸后某坐标点的标贯试验击数，其值通过经归一化的标贯击数经深度修正和附加应力修正获得；N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值，采用黏粒含量的平均值或小值平均值由下式计算

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3\% / \rho_c} \tag{3}$$

式中：N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值；N₀ 为液化判别标准贯入锤击数基准值；ρ_c 为土的黏粒含量质量百分率(%)。

图 2 为标贯锤击数取归一深度为 13.7m 处的平均值，而黏粒含量取小值平均值时，在地震设防烈度 7 度时，闸室下中细砂层在近震和远震时可能液化区域的分布云图。由图 2 可见，闸基下砂层在近震时不发生液化，远震时在闸基 4 个角点下的局部小区域内发生液化；液化的区域在闸基下 15m 深度附近最大，但相对于闸基面积，其比例很小。图 3 和图 4 分别给出了近震和远震时砂层边界断面的液化指标等值线图，通过这些断面，能够清晰的了解砂层内部可能液化区域的分布情况。

图 5 给出了当标贯锤击数和黏粒含量均取小值平均值时，闸室下中细砂层在近震和远震时液化区

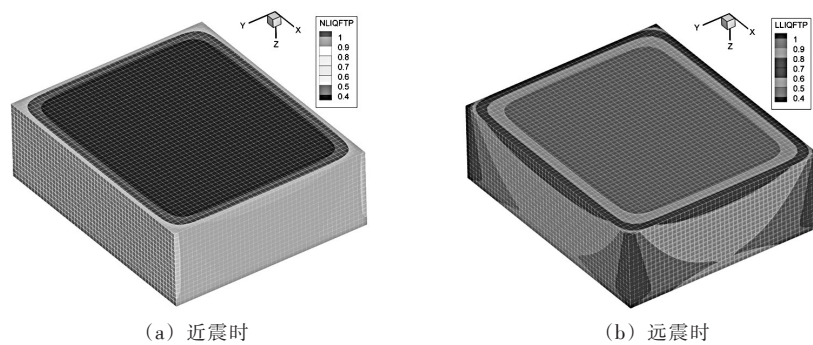


图2 闸基下中细砂层可能液化区域分布云图 ($N_{63.5}=9.7$, $\rho_e=5.28\%$)

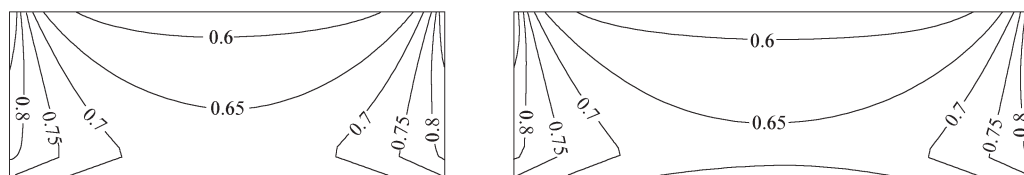


图3 近震时闸基下不同剖面液化指标等值线 ($N_{63.5}=9.7$, $\rho_e=5.28\%$)

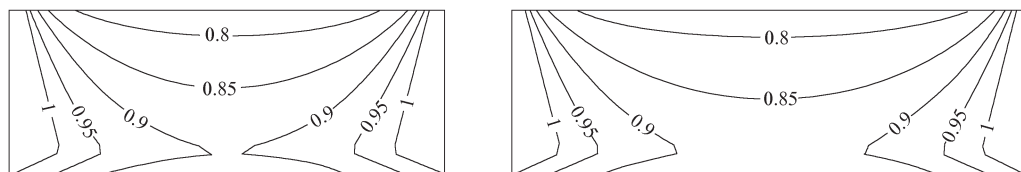


图4 远震时闸基下不同剖面液化指标等值线 ($N_{63.5}=9.7$, $\rho_e=5.28\%$)

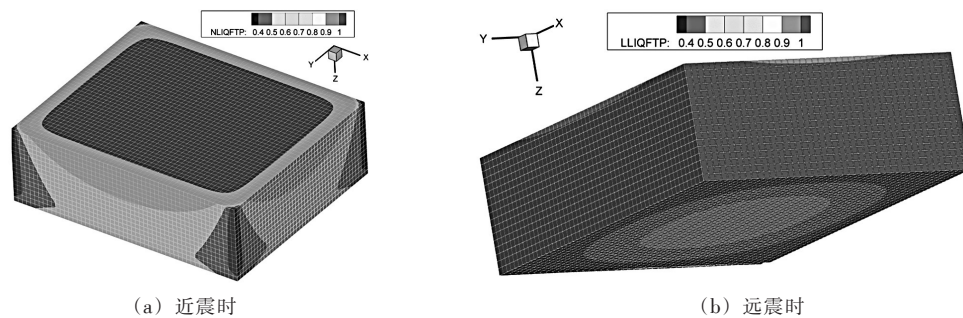


图5 闸基下中细砂层可能液化区域分布云图 ($N_{63.5}=7.6$, $\rho_e=5.28\%$)

域分布云图。由图5可见，近震时，闸基下中细砂层在闸基4个角点下的局部区域内发生液化，液化区域随深度的增加而扩大，在闸基下15m深度附近达到最大，其后液化范围又有所减小；远震时，闸基4条边线附近下沿深度分布范围内的砂层均发生液化，在15m深度处液化区域达到最大，约占闸基面积的40%。

从砂层钻孔试验数据和标贯试验资料可见，液化判别时归一深度取13.7m、标准贯入击数取平均值、黏粒含量取小值平均值，对于判别闸基下中细砂层的液化应该是偏于安全的。因此，根据13.7m深度处，标贯击数取平均值，黏粒含量取小值平均值时闸基下中细砂层的可能液化区域云图和等值线图，参照其它几种组合的可能液化区域云图和等值线图^[30]，并考虑到液化判别时未计入左右挡水坝段对闸基砂层的影响，对闸基下中细砂层的液化情况可做如下判别：建闸后正常挡水情况下，在地震设防烈度Ⅶ度时，闸基下中细砂层近震时不发生液化；远震时在闸基4个角点下的局部小区域内发生液化，在15m深度处液化区域最大，占闸基面积的4%。

5 结语

本文以我国文献[26]中的标准贯入锤击数液化判别方法为基础,提出了考虑有限面积基础建筑物附加应力影响与标贯击数和黏粒含量离散性,以及给出砂层可能液化区域的液化判别新思路:(1)以半无限空间弹性体表面作用某种形式荷载的弹性理论拟求解判别点的附加应力,并以等效填方埋深来考虑附加应力的影响;(2)以工程设计中参数取值常用的平均值和小值平均值来考虑土工试验参数的离散性;(3)借用有限元网格离散求解思路,对网格所有节点附近的区域进行液化判别,以给出砂层的可能液化区域。

采用等效填方埋深来考虑有限面积基础建筑物附加应力的影响,是以规范中的应力修正公式为依据的,实际上依然是规范法的延续,在规范法适用的20m深度范围内,该法应该是合理的;采用小值平均值或平均值对土工试验参数进行整理,是工程设计中参数取值的常用方法,但本文尚难以给出对应于平均值或小值平均值的概率保证率。因为液化判别的可靠度是十分复杂的问题,涉及土工试验参数的可靠性,又与液化标准的确定有关,这是值得进一步研究的问题。另外,是否能够将本文所讨论方法引入Seed简化法(基于现场标贯试验确定抗液化强度),对其作出适用于非自由场地的拓展,也值得进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] Seed H B, Idriss I M . Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential[J] . Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1971, 97(9): 297-313 .
- [2] NCEER . Technical Report NO . NCEER-97-0022 . National Center for Earthquake Engineering Research[M] . University of Buffalo, Buffalo, New York, 1997 .
- [3] Youd T L, Idriss I M, Andrus, et al . Liquefaction resistance of soils: summary report[J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(4): 297-313 .
- [4] Seed R B, Cetin K O, Moss R E, et al . Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation[C]//Proceedings of Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics . San Diego, California, 2001: 1-45 .
- [5] Seed R B, Cetin K O, Moss R E, et al . Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework [C]//26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar . Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California, 2003: 1-71 .
- [6] Cetin K O, Seed R B, Kiureghian A D, et al . Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment .of seismic soil liquefaction potential, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering[J] . ASCE, 2004, (12):1313-1340 .
- [7] 石兆吉,王兰民 . 土壤动力特性·液化势及危害性评价[M] . 北京:地震出版社,1999 .
- [8] 王鍾琦 . 地震液化的宏观研究[J] . 岩土工程学报, 1982, 4(3): 1-10 .
- [9] 刘惠珊,乔太平 . 有基础作用时饱和砂层的液化特性[C]//地基与工业基础抗震 . 北京:地震出版社,1984 .
- [10] Ishihara K, Matsumoto K . Bearing capacity of saturated sand deposits during vibrations[C]//Proceedings of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1975 .
- [11] Whitman R V, Klapperich H . Model tests for earthquake simulation of geotechnical problems[J] . Soil Dynamics and Liquefaction, 1989, 2: 323-334 .
- [12] Finn W D, et al . Analysis of pore water pressure in seismic centrifuge tests[J] . Soil Dynamics and Liquefaction, 1987, 3: 71-85 .
- [13] Yoshiaki Y, Kohji T . Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes[J] . Soil and Foundations, 1977, 17(1): 23~28 .
- [14] Popescu R . Centrifuge validation of a numerical model for dynamic soil liquefaction[J] . Soil Dynamics and Earth-

- quake Engineering, 1993, 12(2): 73–90.
- [15] Dobry . Centrifuge of shallow foundations on saturated sand during earthquakes [C]//Proceedings from 4th Japan-U . S workshop on earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasures for soil liquefaction . Honolulu, 1995:493–508 .
 - [16] Kawask . Dynamic centrifuge modeling of an isolated footing for transmission line tower[C]//Proceedings from the sixth Japan-US workshop on earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasure soil liquefaction . Kawask, 1996: 234–243 .
 - [17] 陈文化, 门福录, 景立平, 等 . 有建筑物存在的饱和砂土地基液化振动台模拟试验研究[J] . 地震工程与工程振动, 1998, 18(4): 54–60 .
 - [18] Men Fulu, Cui Jie . Seismic liquefaction of subsoils of buildings[C]//Proceedings of 3rd Euro . Conf . on Structural Dynamics . Florence, 1996: 1051–1058 .
 - [19] Men Fulu, Cui Jie . Influence of building existence on seismic liquefaction of subsoils[J] . Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, (26): 691–699 .
 - [20] 门福录, 崔杰, 陈文化, 等 . 建筑物饱和砂地震液化判别的简化分析方法[J] . 水利学报, 1998(5): 33–38 .
 - [21] 陈文化, 崔杰, 门福录, 等 . 建筑物非均质地基的地震液化有效应力判别法[J] . 水利学报, 2000(10): 36–43 .
 - [22] 景立平, 陈文化, 葛立臣 . 考虑非线性的建筑物地基地震液化简化分析方法[J] . 地震工程与工程振动, 2001, 2(21): 121–125 .
 - [23] 王健, 陈文华 . 广州地铁车站非自由场砂土层地震液化判别方法研究[C]//海峡两岸地工技术、岩土工程交流研讨会论文集 . 中国台北, 2004: 748–755 .
 - [24] 陈文化 . 地基归一化液化判别及临界击数推导[C]//第七届全国土动力学学术会议论文集 . 北京, 2006: 255–258 .
 - [25] 柯安 . 建筑物对地震引致回填土壤液化潜能影响之评估[D] . 台湾: 国立海洋大学, 2000 .
 - [26] GB 50287–99, 水利水电工程地质勘察规范[S] .
 - [27] 杨宏昆, 等 . 宁朗水电站可研工程地质报告[R] . 成都: 四川省清源工程咨询有限公司, 2008 .
 - [28] 杨宏昆, 等 . 宁朗水电站可研水工报告[R] . 成都: 四川省清源工程咨询有限公司, 2008 .
 - [29] 周荣军, 叶友清, 等 . 水洛河宁朗电站工程场地地震安全性评价报告[R] . 成都: 四川赛斯特科技有限责任公司, 2007 .
 - [30] 杨玉生, 刘小生, 等 . 宁朗水电站闸坝基础覆盖层砂土液化判别研究报告[R] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 2008 .

Study on the method for evaluating sand liquefaction potential

YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, CHEN Ning

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In this paper, a new idea adopting equivalent fill embedded depth of subsidiary stress was put forward to consider the influence of subsidiary stress caused by superstructure with a finite foundation. It was based on the SPT blow count method in *Code for Geological Investigation of Water Resources and Hydropower Engineering* (GB 50287–2008). Mean value method was used to consider the discreteness of the SPT blow count and clay content, and finite element method was used to determine the liquefaction area. A case study was introduced by evaluating the overburden liquefaction of the gate-dam structure in Ninglang Hydropower Station. The results showed that there was no liquefaction occurred in the sand layer under the gate-dam when suffering near earthquake, and only local areas at the corners of the structure were liquefied when suffering the far earthquake.

Keywords: sand liquefaction potential; standard penetration test(SPT); influence of subsidiary stress; discreteness

(责任编辑: 王成丽)