

某库区移民场地条件变化后的砂土液化研究

吕庆强¹, 蔡伟²

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610031; 2. 浙江华东建设工程有限公司, 杭州 310030)

摘要: 砂土液化研究多聚焦于饱和土体, 但常因工程建设导致场地条件变化导致原处于非饱和状态的无黏性土或少黏性土达到饱和状态, 在地震作用下可能发生砂土液化。以金沙江某移民场地为典型案例, 采用颗粒分析和标准贯入锤击数法, 研究水库蓄水或场地垫高等工况变化条件下, 饱和少黏性土和无黏性土的液化判别。分析和计算得出含粉土砂存在砂土液化情况及砂土液化范围, 进而提出了解决砂土液化的措施建议。场地条件变化后的砂土液化研究对类似工程设计和建设具有一定参考价值。

关键词: 砂土液化; 颗粒分析; 标准贯入; 液化等级

中图分类号: P642; TU435 **文献标识码:** A

STUDY ON SANDY SOIL LIQUEFACTION AFTER THE CHANGE OF RESETTLEMENT SITE CONDITIONS IN A RESERVOIR AREA

LU Qing-qiang¹, CAI Wei²

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Zhejiang Huadong construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: The study of sand liquefaction mostly focuses on saturated soils, but often changes in site conditions due to engineering construction lead to saturation of non-cohesive soils or less cohesive soils originally in unsaturated state, and sand liquefaction may occur under seismic action. A typical case of a migration site in Jinsha River is used to study the liquefaction discrimination of less cohesive soils and cohesionless soils under the changing conditions of reservoir storage or site pad height by using particle analysis and standard penetration hammering number method. The liquefaction of sandy soil containing silt and the extent of sandy soil liquefaction are analyzed and calculated, and then the proposed measures to solve the sandy soil liquefaction are proposed. The study of sandy soil liquefaction after changing site conditions is of reference value for the design and construction of similar projects.

Key words: sand liquefaction; particle analysis; standard penetration; liquefaction grade

1 前言

土颗粒间孔隙水具有抵抗土壤形成更密实、更稳定组合和排列的自然趋势。当外界扰动时, 超静

孔隙水压力上升, 进而可能解除土颗粒间的接触使得土体强度大幅降低。因此, 文献中一般把土壤液化描述为地震引起的孔隙水压力增长及随之发生的颗粒土软化现象^[1]。目前, 学术界针对砂土液化进

行了大量研究^[2],如,利用已有的液化灾害数据对液化机理和预测模型进行研究^[3-6];利用数值模拟软件和改进的液化本构模型对砂土液化灾害进行模拟研究^[7-9];利用土动力学试验对液化评价方法和土动力学参数进行研究^[10-12]。

目前砂土液化的研究主要集中于无黏性土或少黏性土处于饱和状态进行砂土液化研究,而针对尚未达到饱和状态,但是在水库蓄水后,无黏性土或少黏性土达到饱和状态及对场地进行垫高等地质条件发生变化的情况下的砂土液化研究较少。因此,对水库蓄水后,地质条件发生变化的场地进行砂土液化研究具有重要的参考价值。

某电站移民场地位于金沙江左岸,地面高程790~825 m,位于水库正常蓄水位以下。拟对该场地进行垫高至高程826 m。由于该处大面积分布金沙江冲积含粉土砂,水库蓄水后将达到饱和状态,在地震作用下可能发生砂土液化,影响该地区建筑物及人民生命财产安全,对该场地进行液化研究极其重要。

2 基本地质条件

研究区位于金沙江溜姑镇处,为营盘山与鲁南山间喇叭状凹槽内,场内地面高程约810~825 m,地势南高北低,地形坡度 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,有较多民房分布,小型冲沟较发育,见图1。场区覆盖层深厚,主要为第四系冲积含粉土砂,冲洪积粉土质砾、碎石混合土等。含粉土砂,灰色,其中砾石粒径一般2~5 mm,少量1~5 cm,含量20%~40%,下部含砾较高,砂为中粗砂,含量50%~60%,粉土含量5%~10%,砾石呈棱角状、次棱角状或片状,成分以千枚岩为主,少量变质砂岩,结构中密-密实,表部稍密,现场开挖坎壁近直立,可见层理,倾角 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 。该层主要分布于研究区冲沟两岸,一般厚20~40 m,局部冲沟底厚3~10 m,底高程746.40~812.00 m。

根据区域地质资料和现场勘探揭示,研究区主

要发育小江断裂分支断层F12-1,断层产状为 $N25^{\circ}\sim 36^{\circ}W, SW\angle 70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,断层破碎带宽140~160 m,由碎粉岩、碎裂岩、角砾岩和糜棱岩和少量断层泥组成,为左旋走滑逆冲断裂。小江断裂为区域活动性断裂,从场区凹槽处通过,场地基本地震动峰值加速度为0.20 g,地震基本烈度为Ⅷ度,区域构造稳定性差。



图1 研究区地貌

3 场地条件变化的砂土液化问题

场地条件变化前,研究区地下水埋藏较深,含粉土砂处于非饱和状态,场地不存在砂土液化问题。但水库蓄水后,场地地下水位会抬升至高程约825 m,场地分布的含粉土砂会达到饱和状态,加之场地地震烈度为Ⅷ度,故场地条件变化后可能存在砂土液化问题。

3.1 基于土颗粒判定

根据颗分试验成果(表1),场地分布的含粉土砂中粒径小于5 mm的颗粒含量的质量百分率为91.4%,大于30%,且其中粒径小于0.005 mm的颗粒含量质量百分率为0.7%,小于18%,场地地震动峰值加速度为0.20 g,存在砂土液化的可能^[13,14]。根据颗相对密度试验成果,场地分布的含粉土砂相对密度为58%~75%,平均为65%,小于液化临界相对密度75%,故场地分布的含粉土砂层为可能液化土^[13]。

表1 颗分试验成果统计表

统计项	颗粒组成									
	卵(碎)石		砾石			砂粒		粉粒		粘粒
粒径/mm	>200	200~60	60~20	20~5	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
最大值/%	0.0	9.9	6.0	23.0	42.8	51.6	27.4	20.9	16.8	4.1
最小值/%	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	19.5	4.2	2.0	2.3	0.0
平均值/%	0.0	0.3	0.8	7.7	23.1	37.9	13.5	8.8	7.3	0.7

3.2 基于标准贯入锤击数法判断

依据标准贯入锤击数可对砂土液化发生的可能性进行判别^[13,15],因此,实际生产建设中广泛采用。

当饱和土标准贯入试验贯入点的标准贯入锤击数($N_{63.5}$)小于液化判别标准贯入锤击数临界值(N_{cr})时,应判为液化土,反之,则为非液化土。

在地面下 20 m 深度范围内,液化判别标准贯入锤击数临界值可按式(1)计算:

$$N_{\sigma} = N_0 [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3\%/\rho_c} \quad (1)$$

式中, N_{σ} 为液化判别标准贯入锤击数临界值; N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值,在设计地震动加速度为 0.10 g、0.15 g、0.20 g、0.30 g、0.40 g 时分别取 7、10、12、16、19; d_s 为标准贯入试验贯入点深度(m); d_w 为地下水埋深(m); ρ_c 为土的黏粒含量百分率(%),当小于 3 或为砂土时,应采用 3。

水电工程常需要预先对工程运行时的坝基(地基)进行液化判别,若工程正常运行时标准贯入试验贯入点深度和地下水位与进行标准贯入试验时的贯入点深度和地下水位均不同,需对实测标准贯入击数($N'_{63.5}$)进行校正,并按式(2)校正后的标准贯入击数($N_{63.5}$)作为复判依据^[13]。

$$N_{63.5} = N'_{63.5} \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_v} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式中, $N'_{63.5}$ 为实测标准贯入锤击数; σ_v 为工程正常运行时标准贯入点有效上覆垂直应力(kPa); σ'_v 为进行标准贯入试验时标准贯入点有效上覆垂直应力(kPa)。 σ_v 和 σ'_v 取值均不应小于 35 kPa,且不大于 300 kPa。

根据《建筑抗震设计规范》^[14],水电站蓄水后,对存在液化砂土层的地基,可按式(3)计算每个钻孔的液化指数,并划分地基的液化等级。

$$I_E = \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{N_i}{N_{\sigma i}} \right] d_i W_i \quad (3)$$

式中, I_E 为液化指数; n 为在判别深度范围内,每一个钻孔标准贯入试验点的总数; N 为在判别深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数; N_i 、 $N_{\sigma i}$ 分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值,当实测值大于临界值时应取临界值,当只需要判别 15 m 范围以内的液化时,15 m 以内的实测值可按临界值采用; d_i 为 i 点所代表的土层厚度(m),可采用与该标准贯入试验点相邻的上、下两标准贯入试验点深度差的一半,但上界不高于地下水位深度,下届不深于液化深度; W_i 为 i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值(单位为 m^{-1})。当该层中点深度不大于 5 m 时,应采用 10;等于 20 m 时,应采用 0 值;5~20 m 时,应按线性内插法取值。

勘察期间场地地下水位埋藏较深,一般大于 25 m,场区分布的含粉土砂多处于非饱和状态,但工程正常运用时(水库蓄水后),地下水位埋深约 1.0 m,含粉土砂会达到饱和状态,且场地会垫高至高程 826 m,故需对实测标准贯入击数进行校正,并按校正后的标准贯入击数作为复判依据。从计算结果来看,场地分布的含粉土砂,在水电站蓄水后,护坡堤脚及场地北东侧填筑厚度较薄处分布的含粉土砂均存在液化问题,且液化范围多位于填筑厚度小于 10 m 的范围,液化等级为中等,计算结果见表 2,液化范围见图 2。

4 结论

(1) 某库区移民场地在水库蓄水池前,场地分布的含粉土砂处于非饱和状态,不存在砂土液化

表 2 钻孔试验点液化判别表(蓄水后)

钻孔编号	正常运行时		实测锤击数 $N'_{63.5}$	修正后的标准 贯入锤击数 $N_{63.5}$	临界值 N_{σ}	判别	液化指数 I_E	液化等级
	贯入点深度	地下水位						
	d_s/m	d_w/m						
ZK1	4.35	1.0	14	13.59	13.87	液化	11.60	中等
	8.85	1.0	22	17.83	20.71	液化		
	12.35	1.0	28	21.53	24.21	液化		
	16.35	1.0	32	23.80	27.25	液化		
ZK2	6.35	1.0	12	13.54	13.87	液化	7.84	中等
	9.05	1.0	18	17.11	18.42	液化		
	12.05	1.0	22	19.07	22.03	液化		
	14.95	1.0	28	23.04	24.72	液化		
	17.85	1.0	33	26.22	26.91	液化		
	20.85	1.0	38	29.44	28.83	不液化		
ZK3	5.35	1.0	15	13.21	13.87	液化	8.48	中等
	7.95	1.0	22	17.48	18.28	液化		
	10.45	1.0	26	19.73	21.39	液化		
	12.95	1.0	30	22.17	23.86	液化		
	15.55	1.0	33	23.94	25.98	液化		
	18.85	1.0	35	25.00	28.22	液化		
	21.75	1.0	43	30.43	29.90	不液化		

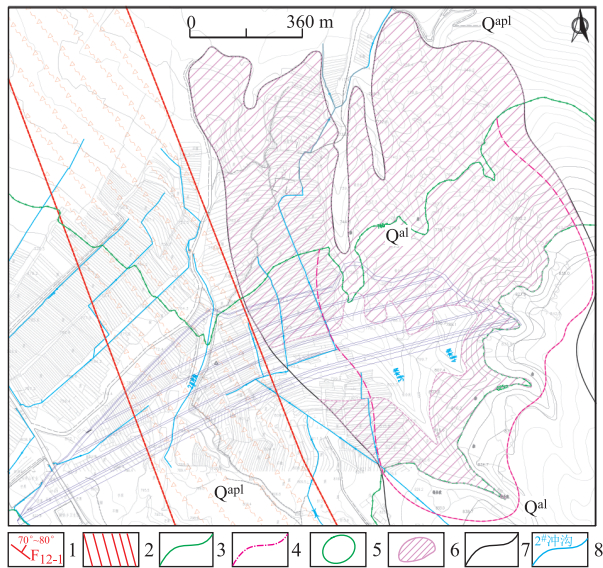


图2 砂土液化范围计算成果

问题。

(2) 场地垫高、水库蓄水后,地质条件发生变化,地下水位上升,场地分布的含粉土砂将处于饱和状态,存在液化问题,液化等级为中等。可采用桩基础、振冲、挤密碎石桩、增加上覆非液化土层的厚度等处理措施。

(3) 场地垫高后,将有助于减轻液化影响,甚至消除液化,这相对于地基液化处理措施中的增加上覆非液化土层的厚度。

参考文献

[1] 陈国兴,吴琪,孙苏豫,等. 土壤地震液化评价方法研究进展

[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(4):677-709+733.

[2] 柴少峰,王兰民,蒲小武,等. 第17届世界地震工程大会岩土地震工程相关领域研究进展综述[J]. 地震工程学报,2022,44(6):1332-1344.

[3] 李冰瑶. 基于剪切波速和支持向量机的砂土地震液化预测研究[D]. 吉林建筑大学,2020.

[4] XIE X L, YE B, ZHAO T, et al. DEM Investigation into the Effects of Liquefaction History-Induced Anisotropy on Sand Behaviors[J]. International Journal of Geomechanics,2023,23(3):1-18

[5] 姜礼涛,周爱红,袁颖,等. 基于NRS-ISSA-SVM的砂土液化判别模型[J]. 地震工程学报,2022,44(3):570-578.

[6] 袁近远,李天宁,王兰民,等. 砂土液化概率计算新方法[J]. 岩土工程学报,2022,44(03):541-549.

[7] GAO Z W, LU D C, HOU Y, LI X. Constitutive modelling of fabric effect on sand liquefaction[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2023,15(4):926-936

[8] 倪雪倩,叶斌. 砂土液化后液-固相变机理的单元试验与模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2023,51(1):16-22.

[9] 叶斌,宋思聪,倪雪倩. 制样方法对砂土液化力学性质影响的离散元模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(7):998-1008.

[10] 刘钢,郭文博,赵明志,等. 辽宁台安砂土液化特性动三轴试验研究[J]. 地震工程学报,2022,44(3):558-569.

[11] 王冰. 饱和砂土液化变形特性试验研究[D]. 北京工业大学,2021.

[12] ZHANG S Y, Gong W P, WU Q, et al. Experimental studies on dynamic and static properties of sand during repeated liquefaction events. [J]. Acta Geotechnica,2023,18(10):5231-5249.

[13] 中国电力企业联合会. 水力发电工程地质勘察规范(GB 50287-2016)[S]. 北京:中国计划出版社,2017.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(GB 50011-2010(2016版))[S]. 北京:中国建筑出版社,2010.

[15] 孔德科,曹虎麒,姜雄,等. 基于标贯击数砂土液化判别方法研究[J]. 工程勘察,2017,45(6):7-12.

作者简介: 吕庆强(1979—),男,辽宁营口人,大学本科,副高级工程师,从事公路、水运工程地质勘察。E-mail:14220203@qq.com