

福州闽江防洪堤地震液化综合评价

刘建震

(中铁二十四局集团福建公司, 福建 福州 350000)

摘要: 该文通过静力触探、标准贯入和剪切波速测试等原位技术结合室内动三轴试验对福州市闽江下游防洪堤某典型断面土体进行液化判别, 并将试验判别结果与动力有限元计算结果进行对比分析。结果表明, 当发生 度地震时, 该防洪堤堤基以下 10 m 范围内的土层容易发生液化破坏。

关键词: 液化; 标贯试验; 动三轴试验; 静力触探; 有限元; 防洪堤

中图分类号: TV871 **文献标识码:** B **文章编号:** 1002 - 3011(2010)01 - 0046 - 04

1 引言

新中国成立以来, 我国堤防工程大都采用砌石堤或土堤结构, 建筑物级别不高, 一般没有进行抗震设防, 对地基土及建筑物结构的要求也不高^[1]。随着城市化进程不断加快, 城市防洪工程的重要性越显突出。为确保人民生命财产安全, 防洪堤的防洪标准不断提高, 有的已达百年一遇, 对地震多发区的重点工程也进行了抗震设防。因为地震液化会直接影响到城市防洪工程设施的整体稳定和安全, 准确判别分析具体工程的地震液化问题、有针对性地提出有效处理措施成为科研及工程技术人员普遍关心的问题^[2]。

本文以福州市闽江下游防洪堤某典型断面为例, 从原位及室内试验和动力有限元分析等两个方面综合判别地基液化问题。

2 地震液化试验判别方法及结果

判别防洪堤及地基土层的液化势是评价场地动力特性的一项重要内容。地震时土层的液化势判别可分为以下两类:

第一类是基于以往宏观地震经验的液化判别法, 是一种经验判别方法。该类方法主要是将标贯试验 (SPT) 测得的标贯击数 $N_{63.5}$ 、静力触探试验 (CPT) 测得的锥尖阻力 q_c 及波速试验测得的剪切波速与以往地震时发生液化的资料进行对比。

第二类是基于室内试验的抗液化剪应力判别法 (简化 Seed 法)。

本次试验在该防洪堤堤顶钻孔取样, 依据 3 种工程场地原位试验及室内动三轴试验判别该防洪堤及堤基的饱和砂土在地震作用下的液化情况, 通过对比试验判别结果与动力有

限元计算结果, 综合判别该防洪堤的地震液化可能性。

2.1 标准贯入法 [SPT]

标准贯入试验是动力触探的一种, 以标定的锤击力将标准尺寸的贯入器打入钻孔孔底的土中, 根据打入土中的贯入阻抗判别土层的变化和土的工程性质。其中贯入阻抗以贯入器贯入土中 30 cm 的锤击数 $N_{63.5}$ (标准贯入击数) 来表示。

根据《岩土工程勘察规范》(GB50021 - 2001) 规定^[4]: 当初步判别认为需进一步进行液化判别时, 应采用标准贯入试验法判别地面下 15 m 深度范围内的液化; 当采用桩基或埋深大于 5 m 的深基础时, 尚应判别 15 ~ 20 m 范围内土的液化情况。当饱和砂土或粉土地基满足 $N_{63.5} < N_{cr}$ 时, 可判别土层为液化土层。

规范规定, 在地面下 15 m 深度范围的土层, N_{cr} 采用 (1) 式计算, 在地面下 15 ~ 20 m 深度范围的土层, N_{cr} 采用 (2) 式计算。根据相关工程经验, 本堤防工程深度超过 20 m 的土层液化现象较少发生, 故本文主要考察的范围为地面下 15 m 范围内。

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1 (d_s - d_w)] \sqrt{\frac{F}{c}} \quad (1)$$

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1d_s) \sqrt{\frac{F}{c}} \quad (2)$$

表 1 为标贯试验的相关数据及液化判别情况。从表 1 可以看出, 地面以下 10 m 深度范围内大部分土层均存在不同程度的液化现象。

2.2 剪切波速法 [SWVT]

本次测试采用的是表面波法^[5], 测试所用的仪器为重庆奔腾仪器厂生产的 WZG - 24A 工程地震仪。与跨孔法及单孔法相比, 剪切波速法不需要钻孔, 工期短, 费用低, 测试技术简单易行, 信号受环境干扰和地下水等因素影响较小, 且液化判别的精度可满足工程要求。

收稿日期: 2010 - 03 - 12

表1 标贯试验地震液化判别结果

土层名称	土层深度 (m)	标贯击数 (次)	临界标贯击数 (次)	液化判别
堤身中砂	3	12	8.2	不液化
	4.9	12	9.8	
	7	13	11.4	
地基中砂	9.1	13	13.08	液化
	12	15	15.4	
	14	17	17	
	17	17	5.6	
	20	18	3.2	

根据《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073—2000)以及《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287—99)中规定的方法对所选断面进行液化判别:对于可能发生液化的土层,当实测剪切波速 v_s 小于(3)式计算所得的临界剪切波速 v_{scr} 时,判别为液化土层。

$$v_{scr} = v_{s0} (d_s - 0.0133d_s^2)^{0.5} [1.0 - 0.185(d_w/d_s)] (3/c)^{0.5} \quad (3)$$

本工程典型断面剪切波速试验判别成果见表2。从表2可以看出,防洪堤堤身中砂不会发生液化,地基以下0.5~4.5 m处的饱和中砂会发生液化。

表2 剪切波速试验地震液化判别结果

土层名称	土层深度 (m)	实测剪切波速 (m/s)	液化临界剪切波速 (m/s)	液化判别
堤身中砂	3	163	107	不液化
	5	168	136	
	7	171	178	
	9.1	180	193	
地基中砂	12	211	219	液化
	14	310	212	
	17	325	229	
	20.4	314	243	

2.3 静力触探法 [CPT]

在原位试验中,一般认为静力触探试验(CPT)测得的锥尖阻力能更好地反映场土的特性。静力触探法由于测试简便、贯入连续、人为干扰因素小和结果离散性小等优点而被土工界广泛采用。本次试验通过对比实测锥尖阻力与锥尖阻力临界值进行液化判别。当实测锥尖阻力 q_c 小于锥尖阻力临界值 q_{scr} 时,判别为液化土层。锥尖阻力临界值 q_{scr} 的计算公式如(4)式所示。

$$q_{scr} = q_{c0} w u p \quad (4)$$

式中: q_{c0} 为地下水深度为2 m、上覆非液化土层厚2 m时,液化判别锥尖阻力基准值;
 w 为地下水位埋深修正系数;
 p 为与静力触探摩擦比有关的修正系数;

u 为上覆非液化土层厚度修正系数。

本工程典型断面静探试验结果见表3。从表3可以看出,地面以下1.5~7 m处的饱和中砂会发生液化。

表3 静力触探试验地震液化判别结果

土层名称	触探深度 (m)	锥尖阻力 q_c (MPa)	侧壁摩擦阻力 f_s (kPa)	锥尖阻力临界值 q_{scr} (MPa)	液化判别
堤身中砂	0.5	6.67	19.5	4.73	不液化
	4.5	10.33	64.5	4.78	
	8.5	6.48	20.5	6.55	
	12.5	5.17	22.2	6.63	
	16.5	7.26	28.1	6.72	
地基中砂	20.5	6.93	26.9	6.77	液化
	24.5	7.49	30.7	7.12	
	28.5	8.81	56.9	7.74	
	30.5	8.72	75.3	7.78	
	30.5	8.72	75.3	7.78	

2.4 室内动三轴试验法

通过动三轴试验研究福州防洪堤饱和砂土在振动力作用下的应变变化过程,对饱和砂土液化情况进行深入研究^[6]。室内动三轴试验所用土样由工程场地现场钻孔取样,试验干密度控制为平均值 1.57 g/cm^3 ,相对密度为0.55,试验所用仪器为英国产GDS三轴试验仪。根据原位试验判断可知,堤身中砂不会发生液化,故本次试验主要针对堤基饱和砂土,固结压力分别取100 kPa、150 kPa、200 kPa,固结比取1、1.5、2三种情况。

在等幅正弦荷载作用下,试样应变逐渐产生并且逐渐放大。各组试验均为各向等压固结,因而试样的应变发展比较对称。随着应变增加,孔压逐渐增加,开始阶段增长较为迅速,随后增长速率减缓。当达到初始液化标准后,孔压已经发展到接近围压水平。本次试验在试样达到初始液化标准后即停止动荷载的施加,试验记录随之停止。

根据试验所得数据绘出堤基饱和砂土抗液化强度曲线,即动应力比 $d/2\sigma_0$ 与动荷载循环周数 N 的关系曲线,如图1所示。

由图1,根据Seed^[7]建议的方法对堤基饱和砂土进行液化判别,地基以下2~8.6 m处的土层会发生液化。判别结果见表4。

表4 室内动三轴试验地震液化判别结果

土层名称	取土深度 (m)	抗液化剪应力 (kPa)	地震荷载等效平均剪应力 (kPa)	液化判别
堤身中砂	-	-	-	不液化
	7	6.31	7.46	
	9.6	8.697	9.79	
地基中砂	13.6	12.8	12.9	液化
	17.6	17.322	15.43	
	21.6	22.263	17.4	
	25.6	27.623	18.79	

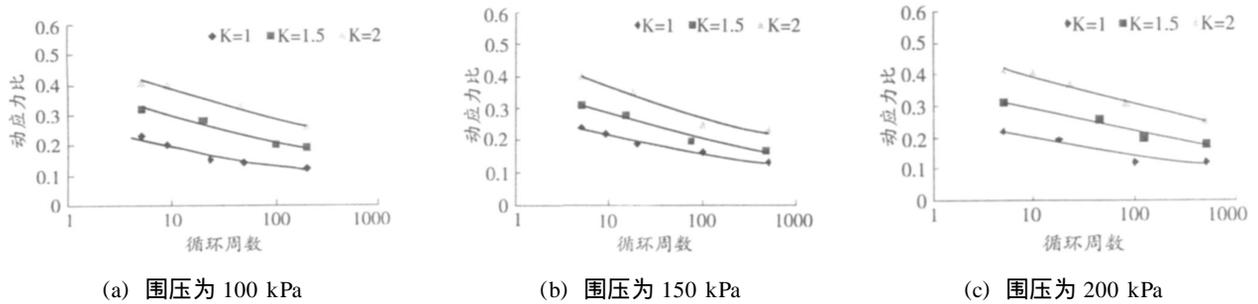


图1 地基饱和砂土抗液化强度曲线

通过对以上试验数据对比分析可知，室内动三轴液化试验与工程场地原位试验的判别结果基本吻合。原位试验判断为不液化，而室内动三轴试验判别为液化的土层，为安全计，综合判别为液化土层。这是由于在取样和土样运输过程中扰动、失水等原因对土样动力特性影响较大，造成室内动三轴液化试验所得到的结论偏于保守。

3 非线性动力有限元分析

3.1 有限元分析模型

基于土与结构动力相互作用理论^[8]，本文采用非线性动力有限元程序结合粘弹性人工边界对福州市防洪堤进行了计算，采用 GID 软件对计算结果进行后处理。通过将有限元计算结果与原位及室内试验结果对比分析，综合评价防洪堤在度地震作用下的液化可能性。

计算工况采用正常潮水位与地震荷载组合的情况。图2为典型断面的三维有限元分析模型，堤顶高程 12.03 m，地面线高程 7.05 m，堤顶宽 5 m。大部分堤身、地基均采用三维八结点六面体等参单元离散，少部分堤身用六结点五面体单元过渡。计算模型网格结点总数为 1 500 个，单元总数为 698 个，时间步距取为 0.02 s。

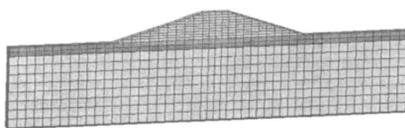
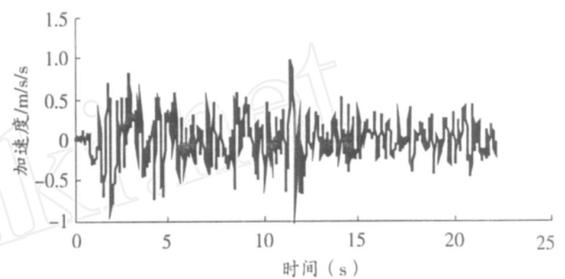


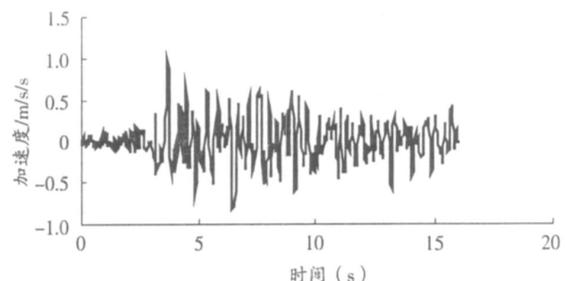
图2 计算模型及有限元网格

该防洪堤的建筑物场地类别为类，根据《中国地震烈度区划图》(1990年)，福州地区地震基本烈度为度。输入地震动选用 El-Centro 波和 Taft 波，并将其峰值加速度等比例调整为 0.1 g，地震作用时间分别取为 22 s 和 16 s (如图 3)。

有限元模型地基边界的处理采用三维一致粘弹性人工边界等效单元^[9]，即在已建立的三维有限元模型上沿界面法向向外延伸一层厚度相等的实体单元，并将该层单元的外侧边界固定。



(a) 调整后的 EL-Centro 地震波加速度时程



(b) 调整后的 Taft 地震波加速度时程

图3 输入地震波加速度时程

静力计算采用邓肯 E-B 模型，限于篇幅，材料静力参数及静力计算结果本文暂不列出；动力计算采用 Hardin-Drnevich 模型^[10]，各参数见表 5。

表5 Hardin-Drnevich 模型材料动力参数

材料	初始动剪切模量系数 K_{2max}	参考应变 r	最大阻尼比 max	初始动剪切模量指数 n
堤身砂	559	0.001	0.08	0.68
地基中砂	525	0.001	0.09	0.71

3.2 计算结果分析

由本文非线性动力有限元程序计算得出的液化区域分布见图 4。由图 4 可以看出，该防洪堤在地震作用下，液化区域主要发生在 10 m 以内的浅层地基土中，内外侧脚及堤身正下方的土层液化现象比较严重。

4 结论

本文采用标准贯入、静力触探和剪切波速法等以原位测

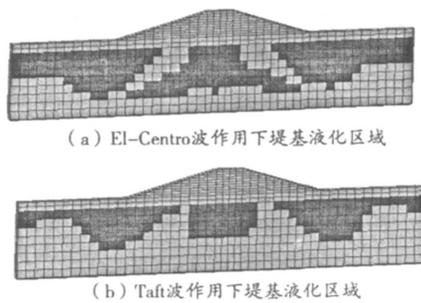


图4 不同地震动作下典型断面
液化区域分布图

试技术为基础的经验液化判别方法结合室内动三轴试验、非线性有限元分析等试验、数值方法,对福州市闽江下游防洪堤某典型断面进行了地震液化判别,主要结论如下:

(1) 从原位试验和室内动三轴试验的分析结果可以看出,地震作用引起的液化破坏主要发生在地面下1~10 m深度范围内的饱和砂土层中。

(2) 由有限元计算结果可知,防洪堤两侧坡脚和堤身下方的浅层地基土层液化现象较严重。

(3) 通过对比有限元计算结果与原位试验、室内动三轴试验的判别结果,验证了本文非线性动力有限元程序对判断土体地震液化的实用性和可靠性。

参考文献

[1]徐长节,蔡袁强.杭州钱塘江防洪堤抗震分析[J].

岩土力学,2006,27(1):67-72.

[2]林华国,贾兆宏,张立丽.砂土液化判别方法研究[J].岩土工程技术,2007,2(21):89-93.

[3]张运盛.吹填式砂堤在福州桔园洲防洪堤工程中的应用[J].水利科技,2006,(2):21-24.

[4]中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范(GB50021-2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

[5]石兆吉,郁寿松,丰万玲.土壤液化势的剪切波速判别法[J].岩土工程学报,1993,15(1):74-80.

[6]周海林,王星华.饱和砂土动三轴实验应力应变滞回环研究[J].岩土工程技术,2003,(6):337-342.

[7]Seed H B, Idriss I M. Simplified procedures for evaluation soil liquefaction potential [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1971, 97(9): 1-15.

[8]朱长安,高波,索然绪.高地震区公路隧道地震动力响应分析[J].岩土工程技术,2008,5(22):232-235.

[9]谷音,刘晶波,杜义欣.三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J].工程力学,2007,24(12):31-37.

[10]Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division Proceedings of ACSE, 1972, 98: 667-691.

作者简介:刘建震(1957-),男,福建福州人,工程师,从事水利水电工程建设工作。

《水利科技》征稿启事

《水利科技》是福建省水利厅、福建省水利学会主办,集实用性、技术性、政策性于一体的综合性科技刊物,得到省水利厅和新闻出版局的高度重视,先后入选中国期刊方阵和福建省优秀期刊。刊物以“服务、交流、推广、宣传”为宗旨,是广大水利水电、交通运输、环保地质等行业科技工作者了解水利水电科技发展动态和科技进步的理想读物,也是水利科技人员进行科技交流的主要刊物。

为更好体现《水利科技》“学术、指导、服务”三位一体,进一步突出学术性、注重指导性、体现服务性,围绕福建省水利中心工作,本刊竭诚欢迎广大水利工作者积极投稿,共同营造“开拓水利科技创新,促进海西经济建设”的良好学术交流氛围。投稿要求如下:

(1) 稿件内容:要求论点明确,数据可靠,文字简洁。文稿篇幅一般不超过6000字(含图表),并提供中文摘要(200字以内)、关键词(3-5个)、作者简介(包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、从事工作或研究方向)。基金项目或获奖成果的文章请注明。

(2) 图表要求:应尽量精简,所述内容不重复,表项名称数字准确,插图线条清晰、光滑、粗细适中、标注规整。

(3) 参考文献:仅限于作者亲自阅读、本文明确引用的书籍和论文,并按文内出现的先后顺序编号列于文后。通常包括编(著)者、书(题)名、刊名、刊年期或出版单位、出版年、出版地及起止页等。

(4) 投稿方式:为方便排版,提高效率,请通过Internet发E-mail至:slkj@pub3.fz.fj.cn。文章要求采用Word排版,所用符号及单位一律采用国家法定单位。文后请留联系电话号码及详细通讯地址,以便及时联系。

(5) 其他要求:来稿、图片文责自负;请勿一稿多投;本刊对稿件内容除论点外有权删改;稿件不论录用与否,一律不退,请自留底稿;若投稿后6个月内未接到稿件处理通知,作者可自行处理;稿件一经本刊录用,均视为作者同意将稿件上网,作者著作权使用费一次性付给,并赠当期刊物两份;若作者不同意将稿件登录互联网站,请投稿时予以注明,本刊将作适当处理。