

人工吹填土液化判别及地基处理方法分析

王浩^{1*}, 周宸², 聂淑贞¹

¹中兵勘察设计研究院有限公司, 北京

²北京中兵岩工程有限公司, 北京

Email: 13810023633@163.com

收稿日期: 2020年8月26日; 录用日期: 2020年9月9日; 发布日期: 2020年9月16日

摘要

为了有效利用沿海土地资源,我国广大沿海地区开展了吹填造陆。由此产生的人工吹填土作为建设工程地基的一部分,其性质也是近年来工程研究热点之一。本文分析了影响人工吹填土工程性质的四方面因素,对比分析了我国现行规范中采用标准贯入试验锤击数和静力触探测试数据的液化判别方法间的区别和适用性,得到了人工吹填土地主要液化土层和面积地基处理的分析方法。本文还根据曹妃甸滦南工业园地区工程实例中相关勘察、测试和地基处理数据计算得到的液化判别结果,分析了不同地基土体的液化性质,提供了针对人工吹填土地基处理的建议。

关键词

人工吹填土, 液化判别, 标准贯入试验, 静力触探

The Analysis of Liquefaction Discrimination and Foundation Treatment for Manual Dredger Fill

Hao Wang^{1*}, Chen Zhou², Shuzhen Nie¹

¹China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co. Ltd., Beijing

²Beijing Zhongbing Geotechnical Engineering Co. Ltd., Beijing

Email: 13810023633@163.com

Received: Aug. 26th, 2020; accepted: Sep. 9th, 2020; published: Sep. 16th, 2020

Abstract

In order to effectively utilize coastal land resources, landfilling and land-laying techniques have

*第一作者。

文章引用: 王浩, 周宸, 聂淑贞. 人工吹填土液化判别及地基处理方法分析[J]. 土木工程, 2020, 9(9): 893-900.

DOI: 10.12677/hjce.2020.99094

been widely applied in coastal areas. As part of the foundation of a construction project, the resulting artificial dredger fill becomes one of the hot spots of engineering research topics in recent years. This paper analyzes the four factors that affect engineering properties of the artificial dredger fill, and compares the difference and applicability between SPT and CPT methodologies that currently used to determine soil liquefiability. The method of dealing with liquefiable soil layers and foundation treatment in artificial dredger fill site is provided. This paper also analyzes the liquefaction properties of different foundation soils based on liquefiability results from soil investigation and test results, as well as the foundation treatment data in the project of Caofeidian Industrial Park area. Recommendations for the treatment of artificial dredger fill are provided in this paper.

Keywords

Manual Dredger Fill, Liquefaction Discrimination, SPT, CPT

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

吹填造陆作为解决土地稀缺和有效利用沿海丰富滩涂资源的有效途径, 在我国沿海经济发达地区广泛开展。由此产生的吹填土由于沉积物和沉积环境, 以及距离吹填口远近的不同, 吹填土的成分、含砂量和工程性质也各不相同。

人工吹填土没有经过地基处理, 大都为可液化土层。而地震液化是导致地基失稳, 建筑物上部结构破坏的直接原因之一, 因此, 为了保证场地稳定, 人工吹填土地需要根据地基液化程度和设计条件, 选择适合的地基处理方法消除地基液化。如何准确的评价人工吹填土的液化势和液化程度, 为地基处理提供可靠数据, 是岩土工程中重要的研究课题。

本文通过分析人工吹填土的成分构成和性质, 讨论现行规范中主要地基液化判别方法的差异, 采用原位测试成果细化地基土层液化程度, 结合工程实例提出人工吹填土地消除地基液化的建议。

2. 人工吹填土的成分构成和性质

海积软土或人工吹填土具有高含水率、高压缩性的物理力学性质, 此外, 根据所含成分大都有机质和黏粒含量较高。彭涛[1]等从吹填淤泥的沉积特征、物质组成、孔隙特征、微观结构、渗透特征、固结特征及物理力学性质等方面对吹填淤泥的工程地质特征进行了系统的研究。刘莹[2]等研究了连云港和青岛两个地区吹填土在成分特征、物理化学性质和基本物理性质方面的差别, 分析得出产生差别的原因是吹填环境中泥砂来源以及吹填时的水力条件。杨爱武[3]等研究了天津滨海新区吹填泥浆静水沉降过程中泥水分界面、含水量、孔隙比变化及其沉积后的相关特性, 以及其微观结构特征。宿晓萍[4]等研究了渤海湾地区四个区域吹填土的粒度成分、矿物成分和物理化学性质。宋晶[5]等对天津滨海新区吹填泥浆静水沉降过程中泥水分界面、含水量、孔隙比变化及其沉积后的相关特性进行了探讨, 并对其微观结构特征进行了研究。甘宏彬[6]等研究了含砂量对于人工吹填土抗液化强度的影响, 给出了不同含砂量下吹填土 Finn 孔压模型参数。张艳羨[7]等研究了黄河三角洲饱和粉质土液化性能, 给出了重塑黄河三角洲饱和粉质土的动孔压计算模型及相关参数取值。

综合分析, 人工吹填土的性质可从以下四个方面入手。1) 人工吹填土的厚度和形成时间; 2) 人工吹

填土土体的颗粒组成；3) 人工吹填土的矿物成分；4) 人工吹填土的化学成分。

人工吹填土的厚度决定了土体自重和地基处理采用的方法。人工吹填土的形成时间对土体的固结程度影响较大。

《土的工程分类标准》(GB/T50145-2007)根据粒径范围将土的粒组分为十级。室内颗分试验表明,人工吹填土的粒组主要为砂粒、粉粒和黏粒,并根据不均匀系数和曲率系数判定土颗粒级配特征。黏粒含量是地基液化判别的重要因素之一,土颗粒级配特征对土的物理力学性质有较大影响。

由于,目前的液化判别方法主要适用于石英质砂土和粉土,因此,人工吹填土中原生矿物石英、云母及其他暗色矿物含量对于液化判别有较大影响。而次生矿物中黏土矿物,特别是伊利石亲水性强、压缩性高,透水性差、抗剪强度低,其含量多少将影响到人工吹填土的力学性质。

土体的易溶盐含量将影响到土体结构的胶结作用,进而影响土体的力学性质。

3. 液化判别方法

目前,采用较多的液化判别方法主要分为两大类。一类是经验分析法,这是以历次地震实地发生现场的砂土液化调查资料为依据建立的液化判别方法,如国标采用的标准贯入试验法。另一类是试验分析法,这是以砂土液化试验和土地震反应分析结果为依据建立的液化判别方法,如国际上采用较多的 Seed 简化法。

张继红[8]等根据上海地区 11 项工程中的取土试验和双桥静力触探测试数据,研究了上海地区薄层黏性土(或黏质粉土)夹层对液化判别的影响,提出了完全依据双桥静力触探试验的地基液化判别方法。戴洪军[9]等根据标准贯入试验、静力触探试验和便携式动力触探试验的测试数据,采用了标准贯入试验法、静力触探试验法、Robertson 法、Lepetit 法等多种计算方法进行了砂土的液化判别。丁树云[10]等有用模糊数学的方法构造了粉土液化的模糊识别模式,预测粉土的液化势。蔡国军[11]等利用静探触探(CPT)和孔压静力触探(CPTU)测试数据,采用我国规范判别法和 Seed 简化法进行了液化判别分析,并进行了对比验算。张焜[12]等对目前现有的砂土液化判别方法进行了评述和分析,指出了现有液化判别方法存在的问题,针对这些问题进行讨论。

我国规范中的液化判别方法属于经验分析法,在地震发生后出现喷水、冒砂的液化场地进行原位测试和试验,对比分析试验数据,采用概率方法进行液化判别。这种方法给出了判别条件和边界,具有较强的实用性和针对性。目前,液化判别采用的原位测试数据主要是标准贯入试验锤击数和静力触探得到的比贯入阻力和锥尖阻力。

其中,《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) (2016 年版) [13]采用标准贯入试验锤击数进行液化判别(以下简称“国标抗震规范法”),具体公式如下:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c}$$

N_{cr} —液化判别标准贯入锤击数临界值;

N_0 —液化判别标准贯入锤击数基准值;

d_s —饱和土标准贯入点深度;

d_w —地下水位;

p_c —黏粒含量百分率;

β —调整系数。

《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001) (2009 年版) [14]根据唐山地震不同烈度区的试验资料,采用静力触探中的比贯入阻力和锥尖阻力,对饱和砂土和饱和粉土进行液化判别(以下简称“国标勘察规范法”),具体公式如下:

$$p_{scr} = p_{s0} \cdot \alpha_w \cdot \alpha_u \cdot \alpha_p;$$

$$q_{ccr} = q_{c0} \cdot \alpha_w \cdot \alpha_u \cdot \alpha_p;$$

$$\alpha_w = 1 - 0.065(d_w - 2);$$

$$\alpha_u = 1 - 0.05(d_u - 2);$$

p_{scr} 、 q_{ccr} —分别为饱和土静力触探液化比贯入阻力临界值及锥尖阻力临界值;

p_{s0} 、 q_{c0} —分别为饱和土静力触探液化比贯入阻力基准值及锥尖阻力基准值;

α_w —地下水位埋深修正系数;

α_u —上覆非液化土层厚度修正系数;

d_w —地下水位深度;

d_u —上覆非液化土层厚度;

α_p —与静力触探摩阻比有关的土性修正系数。

上海市工程建设规范《岩土工程勘察规范》(DGJ 08-73-2012) [15]和建筑抗震设计规程(DGJ 08-9-2013) [16]根据上海地区地貌特点以及场地类别(大部地区属于国标抗震规范所划分的IV类场地),分别采用标准贯入试验和静力触探测试数据进行液化判别。其中,采用标准贯入试验锤击数进行液化判别时的公式与国标抗震规范法一致。采用静力触探测试数据进行液化判别时(以下简称“上海勘察规范法”),具体公式如下:

$$p_{scr} = p_{s0} \left[1 - 0.06d_s + \frac{(d_s - d_w)}{a + b(d_s - d_w)} \right] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad q_{ccr} = q_{c0} \left[1 - 0.06d_s + \frac{(d_s - d_w)}{a + b(d_s - d_w)} \right] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}}$$

p_{scr} 、 q_{ccr} —分别为饱和土静力触探液化比贯入阻力临界值及锥尖阻力临界值;

p_{s0} 、 q_{c0} —分别为饱和土静力触探液化比贯入阻力基准值及锥尖阻力基准值;

d_s —静力触探试验点深度;

d_w —地下水位深度;

ρ_c —黏粒含量百分率;

a、b—系数。

对比三种液化判别方法,可以发现:

1) 三种液化判别方法均考虑了地下水位和土体黏粒含量的影响,但采用静力触探测试数据的两种方法在黏粒含量方面关注点不同,国标勘察规范法采用修正系数,对石英质砂土的液化判别准确度较高,而上海勘察规范法采用的是实测黏粒含量,更加接近实际情况。

2) 国标勘察规范法中的静力触探比贯入阻力及锥尖阻力标准值是根据工程场地区域地震动峰值加速度值确定的;而上海勘察规范法的比贯入及锥尖阻力标准值和系数是根据上海地区试验统计结果综合确定的,更加适合上海地区工程使用。

3) 地基液化等级中液化指数均采用国标抗震规范法计算得出,具体公式如下:

$$I_{le} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cri}} \right) d_i W_i \quad I_{le} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{p_{si}}{p_{scri}} \right) d_i W_i \quad I_{le} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{q_{ci}}{q_{ccri}} \right) d_i W_i$$

I_{le} —液化指数;

n —判别深度范围内每一个钻孔标准贯入或静力触探试验点的总数;

N_i 、 N_{cri} —分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值;

p_{si} 、 p_{scri} —分别为 i 点静探触探比贯入阻力的实测值和临界值;

q_{ci} 、 q_{ccri} —分别为 i 点静探触探锥尖阻力的实测值和临界值;

d_i — i 点所代表的土层厚度;

W_i — i 地层单位厚度的层位影响权函数值。

4) 国标勘察规范法的液化指数计算精度为 0.1 m (静力触探测试数据采样精度), 国标抗震规范法计算精度为 1.0~1.5 m (标准贯入试验点的竖向间距为 1.0~1.5 m, 通常采用 1.0 m), 上海勘察规范法的液化指数计算精度为 1.0 m (实测比贯入阻力或实测锥尖阻力可按静力触探测试孔中每米厚度的平均值采用)。

人工吹填土地需要先行开展大面积的地基处理, 以初步加固土体、消除主要地基土层液化, 再根据建筑设计条件, 采用适合地基基础方案。因此, 地方经验欠缺的地区, 应先根据国标抗震规范法初步判别地基液化程度, 再结合静力触探成果采用国标勘察规范法或当地经验方法, 细化不同地基土层的液化程度, 查明主要液化土层, 提出有针对性的地基处理方案。

4. 不同液化判别方法结果对比分析

4.1. 曹妃甸地区人工吹填土性质

滦南工业园位于河北唐山曹妃甸地区, 区域内人工吹填土形成时间较短, 一般小于 5 年, 人工吹填土层揭示厚度一般在 10.0 m 以内。

人工吹填土层的成分主要为粉土、砂土、黏性土和淤泥, 其中, 以粉土和砂土为主。颗分试验结果显示, 人工吹填土的粒径主要集中在 0.075~0.25 mm 的砂粒和 0.05~0.075 的粉料区间, 黏粒含量较少。以粉砂为主要成分的人工吹填土的不均匀系数为 7.35, 曲率系数为 2.33, 以粉土为主要成分的人工吹填土的不均匀系数为 10.31, 曲率系数为 1.78, 级配良好。

杨爱武等(2014)和宿晓萍等(2014)通过黏土矿物 X 射线衍射分析测试, 得到人工吹填土的矿物成分中原生矿物以石英为主, 次生矿物中黏土矿物以伊料石为主, 而伊利石亲水性强、压缩性高, 透水性差、抗剪强度低, 影响人工吹填土的力学性质。

在标准贯入试验锤击数方面, 以粉砂为主要成分的人工吹填土最小值为 2 击, 最大值为 9 击, 标准值为 5 击; 以粉土为主要成分的人工吹填土最小值为 3 击, 最大值为 8 击, 标准值为 5 击。

不同主要成分的人工吹填土层的静力触探原位测试结果参见表 1, 可以看出, 锥尖阻力和侧阻力结果基本一致, 且低于人工吹填土层下部的沉积土层。

4.2. 液化判别分析

本地区自然地面下 20 m 米, 主要地层为人工吹填土①层, 粉土 - 粉质黏土②层、粉砂③层、粉砂④层、粉质黏土 - 粉土⑤层。

为保证测试结果的相关性, 静力触探测试孔均布置在液化判别用标准贯入孔周边 2 m 范围内。根据上述三种液化判别方法计算得到, 除了国标勘察规范法在个别深度的静探测试数据有异常外, 对于同一区域、相同深度的土体的液化判别结果基本一致。

4.3. 液化指数分析

由于场地占地面积较大, 且建筑物类型不一, 因此, 液化判别将工程场地分为 8 个区域。表 2 为同一场地, 不同区域采用上述三种液化判别方法, 在 20 m 深度内计算得到液化指数 I_{le} 。从中可以看出, 对于自然地面下 20 m 内土体液化指数 I_{le} , 采用静力触探测试数据为主要判别依据的国标勘察规范法和上海勘察规范法的计算结果基本一致, 与国标抗震规范法的计算结果有差别, 分析原因主要是国标抗震规范法采用的黏粒含量的影响。由于人工吹填土成分复杂, 大间距取样(取样间距为 1 m)无法完全代表该厚度地层的成分构成, 如遇到黏粒含量较大的粉土层, 则液化指数将明显减小。上海勘察规范法虽也采用黏

粒含量参数,但其对计算结果影响较小,还是以静力触探测试数据为主。

表 2 中后半部分是自然地面下 20 m 内去除人工吹填土①层的土体液化指数 I_{le} ,从中可以看出,在去除人工吹填土①层后,整体液化指数明显减少,也验证了人工吹填土①层是主要的液化土层,而第四系海相沉积土层也表现出一定的液化特性。

表 3 为不同区域的各地层根据三种液化判别方法计算得到的液化指数占整体液化指数比例。从中可以看出,采用静力触探测试数据为主要判别依据的国标勘察规范法和上海勘察规范法计算得到的各土层液化指数基本一致,与国标抗震规范法的计算结果对比,人工吹填土部分基本一致,第四系海相沉积土有差异。人工吹填土部分液化指数占比达到一般为 0.41~0.96,平均为 0.62~0.66,但场地内不同区域也存在一定差异。

综合上析,可以得出:1) 人工吹填土层的主要成分为粉土和细砂;2) 人工吹填土①层是主要液化土层,粉土-粉质黏土②层和粉砂③层的液化程度较高。如针对人工吹填土①层、粉土-粉质黏土②层和粉砂③层进行地基处理,可消除地基土近 90%的液化,还可在场地表层形成硬壳层,便于后续建筑和道路管线施工。

Table 1. Test result statistics of manual dredger fill CPT

表 1. 人工吹填土层的静力触探测试结果统计表

地层	以粉砂为主的人工吹填土			以粉土为主的人工吹填土		
	项目	锥尖阻力 q_c (MPa)	侧阻力 f_s (kPa)	摩阻比 R_f	锥尖阻力 q_c (MPa)	侧阻力 f_s (kPa)
最大值	4.75	36.93	1.88	3.93	36.93	3.89
最小值	0.69	10.09	0.29	0.83	10.77	0.44
平均值	2.85	19.95	0.75	2.27	20.57	1.01
变异系数	0.35	0.35	0.34	0.32	0.33	0.56
标准差	1.00	6.97	0.26	0.74	6.88	0.57
标准值	2.70	18.94	0.71	2.10	18.91	0.88
统计个数	138	138	138	51	51	51

Table 2. Liquefaction index I_{le} calculated by different methods

表 2. 采用不同方法计算得到的液化指数 I_{le}

分区	自然地面下 20 m 内土体液化指数 I_{le}			自然地面下 20 m 内去除人工吹填土①层的土体液化指数 I_{le}		
	国标勘察规范法	上海勘察规范法	国标抗震规范法	国标勘察规范法	上海勘察规范法	国标抗震规范法
1	39.89	43.83	5.70	30.24	31.19	4.10
2	42.29	35.49	24.66	25.14	18.38	13.91
3	30.39	37.30	26.62	7.02	11.09	3.03
4	41.87	37.80	55.79	5.70	5.91	2.25
5	26.32	25.09	2.14	1.35	3.09	1.06
6	27.35	25.64	7.58	10.85	9.52	3.18
7	25.21	26.85	59.90	8.89	7.90	19.32
8	15.87	17.34	6.95	13.96	16.81	6.95
9	10.30	1.71	7.15	3.38	0.44	2.69

注: $0 < I_{le} \leq 6$ 轻微液化, $6 < I_{le} \leq 18$ 为中等液化, $I_{le} > 18$ 为严重液化。

Table 3. Proportion of different formation liquefaction indices (The full value is 1)
表 3. 不同地层液化指数占比(全值为 1)

地层编号	人工吹填土①层 液化指数 I_{le}			粉土 - 粉质黏土②层 液化指数 I_{le}			粉砂③层 液化指数 I_{le}			粉砂④层 液化指数 I_{le}			粉质黏土 - 粉土⑤层 液化指数 I_{le}		
	国标 勘察 规范法	上海 勘察 规范法	国标 抗震 规范法	国标 勘察 规范法	上海 勘察 规范法	国标 抗震 规范法	国标 勘察 规范法	上海 勘察 规范法	国标 抗震 规范法	国标 勘察 规范法	上海 勘察 规范法	国标 抗震 规范法	国标 勘察 规范法	上海 勘察 规范法	国标 抗震 规范法
分区 1	0.24	0.29	0.28	0.09	0.04		0.58	0.57	0.69	0.09	0.10	0.02			
分区 2	0.41	0.48	0.44				0.55	0.45	0.32	0.04	0.06	0.25			
分区 3	0.77	0.70	0.89				0.19	0.26	0.11	0.04	0.04				
分区 4	0.86	0.84	0.96				0.05	0.09	0.03	0.08	0.06	0.01			
分区 5	0.95	0.88	0.50				0.01	0.08	0.02	0.04	0.04	0.47			
分区 6	0.60	0.63	0.58	0.14	0.20	0.16	0.03	0.04	0.13	0.13	0.10	0.12	0.10	0.03	
分区 7	0.65	0.71	0.68	0.10	0.11	0.23	0.07	0.09	0.07	0.01	0.01	0.02	0.17	0.07	
分区 8	0.67	0.74	0.62	0.07	0.13	0.38	0.24	0.12		0.02			0.00	0.00	
最大值	0.95	0.88	0.96	0.14	0.20	0.38	0.58	0.57	0.69	0.13	0.10	0.47	0.17	0.07	0.00
最小值	0.24	0.29	0.28	0.07	0.04	0.16	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
平均值	0.64	0.66	0.62	0.10	0.12	0.26	0.22	0.21	0.20	0.06	0.06	0.15	0.09	0.03	/

5. 针对液化土层的地基处理

根据工程场地地基土的性质,大面积地基处理方法采用强夯+地下水控制方法,以消除人工吹填土①层、粉土 - 粉质黏土②层和粉砂③层等主要液化土层的液化影响,并达到设计加固深度。

强夯点夯单击夯击能 2000~3000 kN·m,满夯夯击能为 800 kN·m。设计有效加固深度为 6.0 m,采用静力触探和标准贯入试验实测消除液化土层深度平均为 9.0 m,基本覆盖人工吹填土①层、粉土 - 粉质黏土②层和粉砂③层。

地基处理后,地基土体力学指标有明显提升,载荷试验得到地基承载力特征值均不小于 140 kPa,标准贯入锤击数也有明显提高,达到 10~35 击,平均 18 击,场地平地等效剪切波速值大于 150 m/s,为 III 类场地。地基处理后,根据标准贯入试验和静力触探试验成果,采用国标抗震规范法和国标勘察规范法,除个别区域深部砂土、粉土层液化导致强夯处理后液化指数较大外,其余大部区域在消除人工吹填土液化后,液化指数明显减小,液化程度多为轻微液化。基本达到了大面积地基处理的目的。

后续可在此基础上,再次对拟建场地进行液化分区,在不同液化等级的区域内,针对不同设防类别的建筑物选用地基抗液化措施和地基基础方案。

6. 结论

- 1) 分析了影响人工吹填土性质的四方面因素,分别是人工吹填土的厚度和形成时间;土体的颗粒组成;矿物成分和化学成分。
- 2) 分析了我国现行规范中,采用标准贯入试验或静力触探试验成果进行地基液化判别的三种方法间的区别和关注点,以及适用性。
- 3) 结合工程实例,分析了人工吹填土的物理力学性质,采用三种现行规范法对地基土进行了液化判

别, 对比分析了不同液化判别方法间的结果和液化指数的区别, 得到了不同地基土层的液化指数占比, 以及主要液化土层。

4) 拟建场地的大面积地基处理应主要针对人工吹填土层以及其他主要液化土层开展工作。地基处理后的检测结果证明, 对于此类软弱地层, 采用适合地基处理方法和地下水控制措施, 在实现设计加固深度的同时, 得到了较为理想的消除液化土层深度, 地基土的液化指数大幅度减小, 液化等级明显降低。这为后续的建筑抗震设计和地基基础方案选型奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 彭涛, 武威, 黄少康, 等. 吹填淤泥的工程地质特性研究[J]. 工程勘察, 1999(5): 1-5.
- [2] 刘莹, 王清, 肖树芳. 不同地区吹填土基本性质对比研究[J]. 岩土工程技术, 2003(4): 197-200.
- [3] 杨爱武, 杜东菊, 卢力强. 天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 84-87.
- [4] 宿晓萍, 宋晶, 潘明远. 对渤海地区吹填土基本性质的对比分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2014, 15(2): 82-85.
- [5] 宋晶, 汤连生, 王清, 等. 沿海地区典型吹填土物化特征的对比[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(6): 106-111.
- [6] 甘彬宏, 黄炫彰, 王勇, 等. 吹填土液化特性研究[J]. 湖北理工学院报, 2018, 234(3): 49-55.
- [7] 张艳羨, 程志良, 万丽丽, 等. 黄河三角洲饱和粉质土液化性能试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 451-458.
- [8] 张继红, 顾国荣. 双桥静力触探法判别上海薄夹层粘土地基液化研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1652-1656.
- [9] 戴洪军, 郭孔中, Damien L'excellent. 几种不同液化计算方法的对比分析[J]. 工程勘察, 2006(9): 44-49.
- [10] 丁树云, 毕庆涛, 叶洪东, 等. 模糊识别模式在粉土液化判别中的应用[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 522-525.
- [11] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于静力触探测试的国内外砂土液化判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1019-1027.
- [12] 张堰, 李平, 辜俊儒, 等. 砂土液化判别方法研究的若干进展[J]. 防灾科技学院学报, 2019, 21(1): 9-15.
- [13] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [14] GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] DGJ 08-37-2012 岩土工程勘察规范[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2012.
- [16] DGJ 08-9-2013 建筑抗震设计规程[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2013.