

刘芳, 陈宇坤, 何颖, 等. 天津滨海吹填场地震陷评价方法及应用研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 45–49. [Liu Fang, Chen Yukun, He Ying, et al. Evaluation Method and Application of Seismic Settlement on Dredger Fill Ground in Tianjin Binhai Area [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 45–49.]

天津滨海吹填场地震陷评价方法及应用研究^{*}

刘芳¹, 陈宇坤¹, 何颖², 吕丽君², 高武平¹, 付占岭¹

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 天津城建大学, 天津 300384)

摘要: 震陷是导致地基失效的主要震害形式之一, 选取天津滨海三个典型吹填场地, 开展循环荷载下吹填土震陷特性研究, 建立吹填软土震陷量计算模型; 依据分层总和法提出了吹填场地震陷评价方法, 并给出震陷等级划分标准, 进行了吹填场地软土震陷评价方法研究。利用提出的评价方法, 对天津滨海吹填场地进行了 50 年超越概率 10% 和 2% 地震影响下的震陷评价和分区。研究结果可为场地地基处理、土地规划和防灾减灾对策提供依据。

关键词: 滨海软土, 吹填土, 震陷评价。

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2016)01–0045–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2016.01.010

围海造陆是当今沿海国家及城市开发获取土地资源的重要措施, “天津滨海新区”被纳入国家总体战略后, 加大了通过围海吹填造陆获取土地资源的力度, 2010 年累计填海面积 312.78 km², 到 2020 年, 滨海新区的总填海面积为 425.94 km²。天津滨海吹填造陆的吹填物质有别于我国其他沿海地区吹填土, 该土具有压缩性强、含水量大、颗粒细、灵敏度高、强度低等特性, 属典型软土, 在地震作用下极易引发地基失效, 从而对工程建筑物产生十分不利的影响^[1]。

1978 年唐山 7.8 级地震期间, 天津沿海地区普遍出现了严重的震陷现象, 很多场地产生了 10~30 cm 的震陷^[2–3], 有些甚至造成了构筑物的倾覆和倒塌。天津滨海地区吹填土为新近人工填土, 较塘沽地区的软土更易发生震陷破坏, 在本地区Ⅶ~Ⅷ度地震烈度作用下, 存在发生较严重震陷的条件和可能, 因此需要对吹填场地震陷给予合理判别, 给出震陷量及震陷危害程度, 为场地地基处理、土地利用提供依据。地震作用和震陷机理的复杂性、影响因素的多样性使得土体震陷研究起始较晚, 国内外及现有相关规范对于软土震陷的成因、影响因素和评判方法只给出了定性的、概略性的说明与判定, 对于震陷量计算, 震陷分级评价均未加以确切规定^[4–5], 因此以典

型的天津滨海吹填土为研究对象, 通过实验研究软土震陷特性及判别方法, 这对于探索解决上述问题具有重要的实践意义。

本文在对天津滨海吹填土进行循环荷载下动应变实验研究基础上, 提出吹填土震陷值计算公式, 给出了吹填场地震陷的判别方法及评价标准, 绘制出天津滨海吹填区域震陷分区图, 为天津吹填造陆地区国土资源利用、土地规划、重大工程建设和综合防灾提供科学依据。

1 吹填土震陷特性实验

1.1 震陷实验简介

实验采用美国 GCTS 公司的空心圆柱扭剪仪, 仪器采用先进的伺服加载系统实现力和位移的静态和动态加载。轴向加载可达到 50 kN, 围压可达到 2 MPa, 反压可达到 2 MPa, 轴向位移最大至 100 mm, 径向位移最大至 75 mm, 频率最大为 20 Hz。

实验采用的试样取自天津滨海旅游区、南港工业区和临港工业区三个围海造陆场地的吹填土, 其取土深度在 1~5 m 之间, 其基本物理力学参数如表 1 所示。

^{*} 收稿日期: 2015–07–08 修回日期: 2015–09–06

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH13002)

作者简介: 刘芳(1974–), 女, 天津人, 高级工程师, 主要从事地震灾害防御工作。E-mail: jiliufang@qq.com

表 1 土样基本物理力学指标

地区	$\omega/\%$	$\rho_d/$ (g/cm^3)	G_s	$S_r/\%$	e	$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	$I_p/\%$	I_L	$a_{1-2}/$ MPa^{-1}	$E_{s1-2}/$ MPa	土类名称
滨海旅游区	39.8	1.30	2.74	99.0	1.097	39.2	22.5	16.7	1.036	0.8	2.78	淤泥质粉质粘土
南港工业区	40.0	1.29	2.73	97.2	1.123	38.0	22.5	15.5	1.129	0.902	2.40	淤泥质粉质粘土
临港工业区	45.6	1.11	2.73	95.0	1.304	44.7	29.7	15.0	1.06	0.977	2.14	淤泥质粉质粘土

表 2 吹填土震陷实验方案

围压 σ_3/kPa	频率 f/Hz	固结比 K_c	静偏应力/ kPa	动应力(双峰值)
50, 75, 100	1	1	0	σ_{d1} 、 σ_{d2} 、 σ_{d3}
50	0.5, 1, 2, 5	1	0	σ_d
50	1	1	0, 6, 12	σ_d

震陷(残余应变)的定义是指动荷载卸除土体产生的不可恢复的变形量,在动三轴实验中则表现为动应力作用前后试件的高度差与动应力作用前试件高度之比,亦即动应力卸除后土试件的不可恢复应变,定义为残余应变^[6]。本实验近似取 $\sigma_d=0$ 时对应的应变为残余应变 ε_d 。

为准确反映场地的实际条件,需要对包括土性条件、初始受力条件、实际振动荷载、排水条件等方面进行模拟。据取土深度和滨海地区吹填土在静力作用下的屈服强度,确定采用固结压力分别为 50 kPa、75 kPa、100 kPa。本实验中按照 Seed 提出的转化方法^[7],即将实际地震应力峰值的 0.65 倍作为等幅应力幅值,等幅荷载的循环次数依地震烈度大小而定。由基本地震加速度值换算为相对应的动应力幅值 σ_{d1} 、 σ_{d2} 、 σ_{d3} 。动荷载采用正弦波模拟,动应力比用 $R_f(R_f=\frac{\tau_d}{\sigma_3}=\frac{\sigma_d}{2\sigma_3})$ 表示^[8],取值范围为 0.1~0.37。三个场地的卓越周期在 1 s 左右,动荷载加载频率设定为 1 Hz;地震荷载频率分布范围广以及地震荷载的脉冲效应,实验考虑了频率及静偏应力对残余应变的影响,振动频率选取 0.5 Hz、1 Hz、2 Hz 和 5 Hz 模拟不同频率的地震荷载,涵盖了天津地区的地震波卓越频段。静偏应力取 6 Hz 和 12 Hz 考虑地震荷载的脉冲效应。

在地震荷载下饱和软粘土几乎不排水,因此实验采用固结不排水剪切实验模拟,具体实验方案如表 2 所示。

1.2 实验结果及分析

通过天津滨海吹填土震陷实验研究,分别探讨了围压、动应力比、振动频率、静偏应力对原状土动应变的影响。实验结果分别示于图 1~图 3。

(1)图 1 为不同循环应力比的土样残余应变曲线,图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)分别表示 50 kPa、75 kPa 和 100 kPa 的围压条件。图 1 中显示,残余应变随振动次数的增加而逐渐增大,动应力越大,土样所发生的残余应变就越大,土体围压增大动变形减小。相同固结条件和围压作用下,

存在一个临界循环动应力比,当动应力比大于或等于临界循环动应力值时,土体动应变迅速增加达到破坏状态^[9]。根据实验可得,吹填土的临界

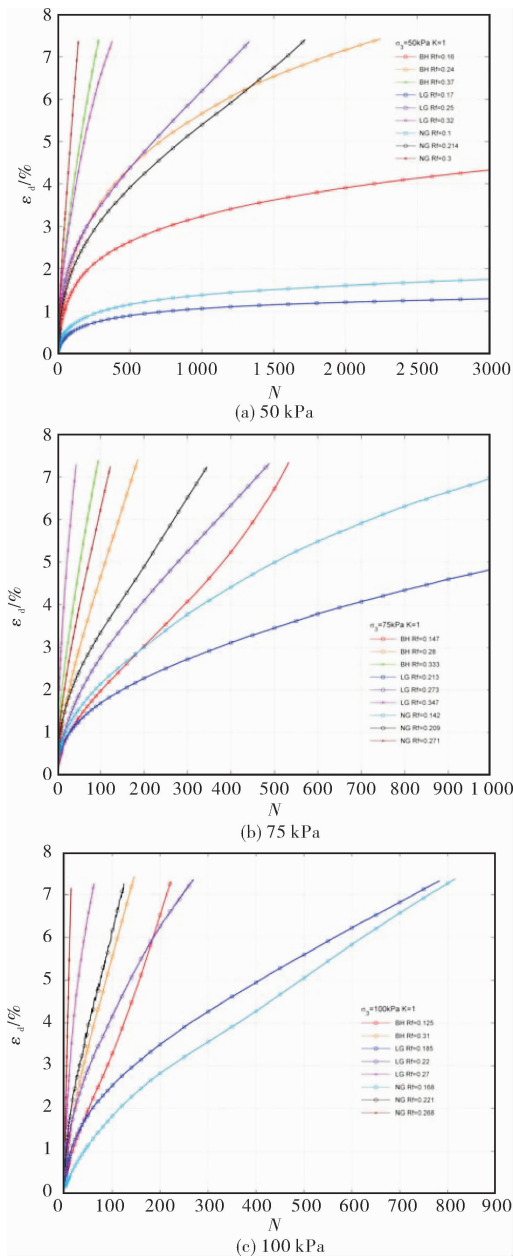


图 1 不同循环应力比的残余应变曲线

循环动应力比在 0.17 左右。当动应力比小于临界动应力比时,吹填土动变形属于稳定型发展,试样不会达到破坏状态;当大于临界循环应力比时,动变形属于破坏型,变形在较小的振次下急剧增加。通过临界循环应力比可估算出产生震陷的最小地震加速度值,临界循环应力比 0.17 对应的最大地震加速度值约为 0.13 g。当地震峰值加速度小于 0.13 g 时,可不考虑震陷影响,以此作为震陷初步判别的条件。

(2)图 2 为不同振动频率作用下试样的残余应变曲线图。图 2 中显示,随着频率的增加,相同振次下土样的残余变形逐渐减小。当频率为 0.2 Hz 时应变增长很快,在很小的振次下就会破坏。当频率大于 0.5 Hz 时在初始阶段应变增长较快,之后出现转折点,应变继续增加,但是增加的幅度变缓。当振动频率为 5 Hz 时,应变曲线振动初期,变形增长比较快,但很快就趋于稳定。这说明频率越小,土样变形增大越快。由此可以推断,当天津滨海吹填场地遭遇地震时,长周期地震波比短周期的地震波更易造成震陷。

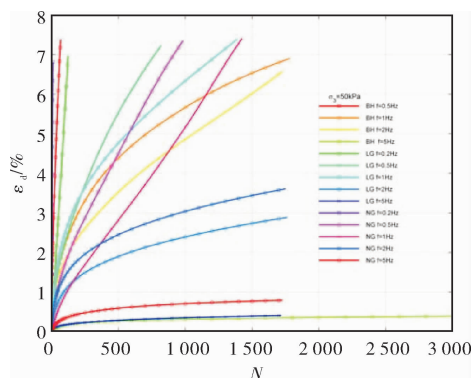


图 2 不同频率的残余应变曲线

(3)图 3 为不同静偏应力作用下的残余应变曲线图。由图 3 可知,在静偏应力作用下吹填土的残余应变的发展速率比静偏应力为零时快。随着静偏应力的增加,残余应变逐渐增大,变化速率加快,而且残余应变达到应变稳定的时间变长。这表明地震荷载的不规则性促使了残余应变加速累积,应考虑地震荷载不规则性对震陷的影响。

2 吹填土震陷公式建立

对实验数据进行整理,在一系列不同条件下的 $\varepsilon_d - N$ 曲线中,取同一围压、固结比和频率条件下不同 ε_d 下的 $\sigma_d - N$ 曲线,从上找出应变为 1%、2%、3%、4%、5% 的点,可以发现当应变选定时,将点绘制在横坐标为振次 N ,纵坐标为循环应力比 $\sigma_d/2\sigma_3$ 的双对数坐标时呈直线状。一系列应变值在双对数坐标上接近平行的直线簇。

直线方程可表示为:

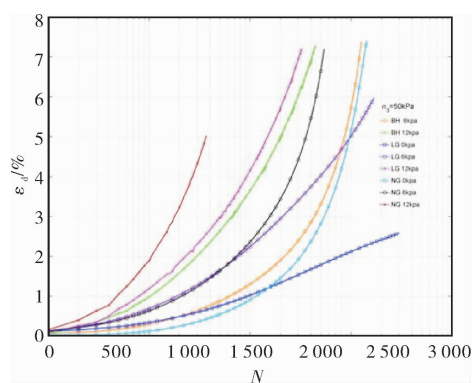


图 3 不同偏应力下的残余应变曲线

$$\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} = C_1 \left(\frac{N}{10} \right)^{S_1} \quad (1)$$

式中: S_1 是直线簇的斜率, C_1 是 N 等于 10 次产生某一 ε_d 值时的动应力 σ_d 值。

以 C_1/σ_3 作为纵坐标, ε_d 作为横坐标,绘制 $C_1/\sigma_3 - \varepsilon_d$ 曲线,在双对数坐标上是一簇直线,直线方程表示为:

$$C_1 = C_2 \varepsilon_d^{S_2} \quad (2)$$

把式(1)、式(2)合并得到估算残余应变 ε_d 的经验表达式如下:

$$\varepsilon_d = \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \cdot \frac{1}{C_2} \right)^{\frac{1}{S_2}} \cdot \left(\frac{N}{10} \right)^{-\frac{S_1}{S_2}} \% \quad (3)$$

式中: C_2 、 S_1 和 S_2 是土壤的震陷参数,由实验确定。

按式(3)计算得到初始应变较大,不符合实际。应变曲线在双对数坐标系中,以 $N = 10$ 为界呈现为折线,因此拟合直线分为两段, $N > 10$ 时为公式(3), $N < 10$ 时为以 $(1, \varepsilon_1)$ 和 $(10, \varepsilon_{10})$ 两点所确定的直线。 ε_1 可取平均初始应变,本文中依据实验数据取为 0.006%; ε_{10} 为循环振动次数 $N = 10$ 对应的土体应变。

由实验数据采用上述处理方法可分别得到天津滨海新区吹填土三个场地土的震陷参数,见表 3。

表 3 吹填场地震陷实验参数

场地名称	C_2	S_1	S_2
滨海旅游区	0.339 4	-0.361 5	0.599 9
临港工业区	0.355 1	-0.574 7	0.832 6
南港工业区	0.247 9	-0.227 3	0.318 4

为了便于估算天津滨海新区吹填土在不同地震烈度下场地的震陷量,用上述三个不同场地的震陷公式求取不同地震烈度下的残余应变曲线,进行平均处理,最终建立天津吹填场地的综合震陷公式。

$$\varepsilon_d = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \cdot \frac{1}{0.2847} \right)^{2.617} \cdot \left(\frac{N}{10} \right)^{0.6888}, & (N \geq 10); \\ \varepsilon_{10} \cdot \left(\frac{N}{10} \right)^{\lg \frac{\varepsilon_{10}}{\varepsilon_1}}, & (N < 10)。 \end{cases} \quad (4)$$

3 吹填场地震陷评价方法

由震陷公式(4)可知, 只需确定各土层的循环应力比 $\sigma_d/2\sigma_3$ 和等效循环振次 N 即可求得各土层动应变 ε_{di} 。本文引入 Seed 和 Idriss^[7] 估算地震剪应力和等效循环振次的方法确定上述参数。利用分层总和法将各土层震陷值累计求和, 结果即为吹填场地的震陷量, 具体步骤如下所示。

(1) 根据工程勘察资料确定各软土层的分布, 设 h_i 为第 i 分层厚度, 分层总数为 n 。

(2) 确定各土层循环应力比 R_f , 首先需要确定地震引起的剪应力 τ_d 。当地面最大加速度为 α_{\max} 时, 土柱底部单元所受的最大地震剪应力可用下式计算^[7]:

$$\tau_{di} = 0.65\gamma_i h_i \gamma_{di} \frac{\alpha_{\max}}{g} \quad (5)$$

其中 γ_{di} 按下式确定^[10]:

$$\gamma_{di} = 1.0 - 0.00765z, \quad (z \leq 9.15 \text{ m}); \quad (6)$$

$$\gamma_{di} = 1.174 - 0.267z, \quad (9.15 < z < 23 \text{ m}); \quad (7)$$

$$R_f = \frac{\tau_d}{\sigma_3} = \frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \quad (8)$$

σ_3 为固结应力, 表示为:

$$\sigma_3 = \gamma' h \quad (9)$$

将式(5)和式(9)代入式(8)中, 得到循环应力比 R_f 计算公式:

$$R_f = \frac{\sigma_d}{2\sigma_3} = 0.65 \cdot \gamma_{di} \cdot \frac{\gamma_i h_i}{\gamma' h_i} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad (10)$$

式中: γ_{di} 为各层剪应力折减系数; a_{\max} 为地震引起的地表最大加速度; γ_i 、 γ'_i 分别为第 i 层土的容重、有效容重; h_i 为第 i 层土的厚度; g 为重力加速度。

(3) 确定等效循环次数 N 。seed 根据强震记录的计算得出了不同震级对应的等效循环次数^[7], 见表4。

表4 不同地震震级 对应的等效循环次数

震级 M	5.5 - 6.0	6.5	7	7.5	8
等效循环振次 N	5	8	12	20	30

根据我国 1900 年以来的 152 次地震资料, 求得震级与烈度关系公式^[11]:

$$M = 0.66I_0 + 0.98. \quad (11)$$

从中可以得到地震动峰值为 0.10 g(7 度)、0.15 g(7.5 度)、0.20 g(8 度)、0.30 g(8.5 度)和 0.40 g(9 度)时对应的等效振次分别为 5、5、8、10 和 12。

(4) 由式(4) 求出各土层应变值 ε_{di} , 利用公式:

$$S = \sum_i^n \varepsilon_{di} h_i \quad (12)$$

求得吹填场地总震陷量 S 。

(5) 依据震陷量大小提出吹填软土震陷等级划分标准。目前有关抗震规范还没有建立完备的震

陷评价体系, 本文结合吹填软土动力特性及规范^[4-5]的相关规定, 提出了吹填软土震陷等级划分标准, 见表5。

表5 天津滨海吹填软土震陷等级划分标准

震陷等级	震陷量 S/cm	评价
I	$0 \leq S < 3$	不震陷
II	$3 \leq S < 8$	轻微
III	$8 \leq S < 20$	中等
IV	$20 \leq S < 30$	严重
V	≥ 30	破坏

4 天津滨海吹填场地震陷分区

天津滨海吹填区域广泛分布着软土层, 主要以吹填土、淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土组成, 厚度在 8 ~ 15 m 之间^[12], 本文利用上述震陷量计算方法及评判标准对天津滨海吹填场地进行震陷评价, 评价范围北至天津滨海旅游区, 南至南港工业区的吹填区域。

依据地震危险性分析结果, 评价区域按 50 年超越概率 10% 的地震峰值加速度值可分为 0.1 g、0.15 g 和 0.2 g 三个区, 按 50 年超越概率 2% 的地震峰值加速度值可分为 0.2 g、0.3 g 和 0.4 g 三个区。分别对 10% (中震) 和 2% (大震) 两种概率水平下的震陷量进行计算。

结果显示, 中震影响下的震陷值在 0.36 ~ 7.26 cm 之间, 其中 0.1 g、0.15 g、0.2 g 区域内震陷值分别在 0.36 ~ 0.69 cm, 0.96 ~ 1.7 cm, 4.2 ~ 7.26 cm 之间, 依据表 5 全区可划分为轻微震陷区和不震陷区, 滨海旅游区北部为轻微破坏区, 其余地区为不震陷区, 见图 4(a)。

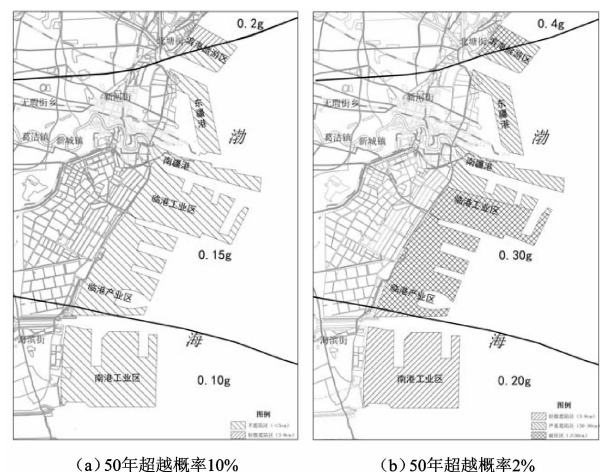


图4 不同超越概率震陷分区图

大震影响下的震陷值在 4.2 ~ 81.7 cm 之间, 其中 0.2 g、0.3 g、0.4 g 区域内震陷值分别在 4.2 ~ 7.26 cm, 21.1 ~ 38.2 cm, 46.9 ~ 81.7 cm 之间, 依据表 5 可划分为轻微震陷区、严重震陷区和破坏区, 破坏区分布在临港工业区南部、临港产

业区及滨海旅游区北部,南港工业区为轻微震陷区,其余地区为严重破坏区,见图4(b)。

据唐山地震现场调查资料,1976年唐山地震时自然地面的震陷值约为8 cm,在塘沽北塘糖果食品仓库,震后发现原与地面相平的桩头露出地表约12 cm^[3]。上述地区在1976年唐山地震时烈度为Ⅷ度,与本文地震峰值加速度0.2 g时的震陷值吻合,证明本文提出的震陷评价方法是合理的。

5 结论

通过一系列天津滨海吹填土循环荷载下的震陷实验,得到残余应变随动应力比、振动频率及静偏应力的变化规律,并推导出震陷计算公式。提出吹填场地震陷的判别方法和等级划分标准,对吹填场地进行了震陷区划,主要结论如下所示。

(1)震陷实验表明,残余应变随振动次数的增加而逐渐增大,动应力越大,土样所发生的残余应变就越大,土体围压增大动应变越小。随着频率的增加,相同振次下土样的残余变形逐渐减小。随着静偏应力的增加,残余应变也逐渐增大。

(2)利用三个典型吹填场地实验结果,建立吹填场地震陷公式。

$$\varepsilon_d = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \cdot \frac{1}{0.2847} \right)^{2.617} \cdot \left(\frac{N}{10} \right)^{0.6888}, & (N \geq 10); \\ \varepsilon_{10} \cdot \left(\frac{N}{10} \right)^{\frac{\varepsilon_{10}}{\varepsilon_1}}, & (N < 10)。 \end{cases}$$

(3)依据分层总和法的思路,计算出吹填场地总的震陷量,根据吹填软土震陷等级划分标准,对吹填场地震陷程度进行评价。

(4)对天津吹填场地进行震陷评价和分区,分区结果显示在50年超越概率10%地震影响时滨海旅游区北部为轻微破坏区,其余地区为不震陷区;

在50年超越概率2%地震影响时,破坏区分布在临港工业区南部、临港产业区及滨海旅游区北部,南港工业区为轻微震陷区,其余地区为严重破坏区。

(5)本文提出的评价方法参数确定简单方便快捷,剪操作性强。给出的滨海吹填造陆地区震陷分区结果,可为天津近海域和吹填造陆地区的土地规划、产业布局 and 综合防灾提供科学依据。

参考文献:

- [1] 杜冬菊,杨爱武,刘举,等.天津滨海吹填土[M].北京:科学技术出版社,2010:15-61.
- [2] 刘恢先.唐山大地震震害(一)[M].北京:地震出版社,1985:383-393.
- [3] 石兆吉,郁寿松.塘沽新港地区震陷计算分析[J].土木工程学报,1988,21(4):21-33.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:27-30.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ83-2011 软土地区岩土工程勘察规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011:23-28.
- [6] 郁寿松,石兆吉.土壤震陷试验研究[J].岩土工程学报,1989,11(7):35-44.
- [7] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [8] 黄全强.地震荷载作用下天津软土变形特性研究[D].天津:天津大学,2009:12-13.
- [9] Larew H G, Leonards G A. Repeated load strength criterion[J]. Proceeding of Highway Research Board, 1962, 41: 529-556.
- [10] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011:205-207.
- [11] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006:57.
- [12] 崔建军.天津吹填造陆场地工程地质勘察报告[R].天津:天津滨海工程勘察设计公司,2013:1-13.

Evaluation Method and Application of Seismic Settlement on Dredger Fill Ground in Tianjin Binhai Area

Liu Fang¹, Chen Yukun¹, He Ying², Lv Lijun², Gao Wuping¹ and Fu Zhanling¹

(1. Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China;

2. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Seismic settlement is one of the earthquake damage forms of foundation failure. Based on three sites in Tianjin Binhai area, we built a seismic settlement computation model of dredger fill ground and did a research on seismic settlement of dredger fill under cyclic loading. An evaluation method of seismic settlement in dredger fill ground is established based on layer summation method and the division standard of seismic settlement grade also proposed, and we also studied the evaluation method of seismic settlement in soft soil site. According to the method, we obtained the seismic settlement of dredger fill ground in Tianjin Binhai area under the earthquake intensity with a 10% and 2% exceeding probability in the future 50 years. The results can be used as a reference in foundation treatment, land planning and earthquake disaster reduction.

Key words: Binhai area soft soil; dredger fill; evaluation of seismic settlement