

天津 Z2 线工程软土场地震陷分析*

李家飞¹, 梁建文², 巴振宁², 张久麒², 朱昱瞳², 张 萍²

(1. 天津滨海新区轨道交通投资发展有限公司, 天津 300459; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 天津 Z2 线轨道交通工程地处滨海软土地区。基于《软土地区岩土工程勘察规程》中简化的分层总和法, 采用一维土层非线性地震响应分析程序 EERA 替代 Seed 经验公式计算土层的动应力, 同时采用修正的软土残余应变势简化计算公式, 开展了天津 Z2 线全部 98 个钻孔的软土震陷计算。结果表明, 地表震陷主要源自较浅土层, 地表深度 20 m 以下的震陷可不考虑; 隧道由地下线过渡到高架线的上升段震陷较大, 应考虑采取防控措施; 场地震陷主要由淤泥质土层产生, 占地表震陷的 70%~80% 以上。研究对于类似工程具有一定参考价值。

关键词: 震陷; 软土场地; 自由场; 软化模量法

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0116-09

Seismic Settlement Analysis of Soft Soils of Tianjin Z2 Line

LI Jiafei¹, LIANG Jianwen², BA Zhenning², ZHANG Jiuqi², ZHU Yutong², ZHANG Ping²

(1. Tianjin Binhai New Area Construction & Investment Group Co. Ltd., Tianjin 300459, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The Tianjin Z2 line project is located in the soft soil area, with large risk of seismic settlement. Based on the simplified layer-wise summation method by specification for geotechnical investigation in soft clay area (JGJ 83-2011), this paper calculated seismic settlement of 98 boreholes along the Tianjin Z2 line. During calculation the one-dimensional soil layer nonlinear seismic response analysis program EERA was utilized to calculate the dynamic stress of soil, instead of the empirical formula proposed by Seed, and the recently modified simplified formula of residual strain potential in soft soil was employed. The results showed that, the seismic settlement can be ignored in small earthquakes; seismic settlement below the surface depth of 15m may not be considered in the moderate and major earthquakes. The seismic settlement is large in the rising section of the tunnel from the underground line to the elevated line, and prevention and control measures should therefore be taken. The seismic settlement is mainly caused by the mucky soil layer. The research is valuable for the seismic design of similar projects.

Keywords: seismic settlement; soft soil site; free field; softening modulus method

* 收稿日期: 2019-02-15; 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 天津市建设系统科学技术项目发展计划(2016-17)资助

作者简介: 李家飞(1994-), 男, 本科。主要从事轨道交通工程建设。Email: 836891645@qq.com

通讯作者: 梁建文(1965-), 男, 教授, 博士。主要从事地震工程研究。Email: liang@tju.edu.cn

引言

软土在地震等动荷载作用下强度会降低,产生震陷现象,软土震陷问题一直是工程关注的问题之一。1976年唐山地震中,天津市塘沽地区软土地基上多个建筑物出现严重震陷,震陷量达到10~30 cm,部分建筑物产生了明显的倾斜^[1-2]。

近年来,国内外学者在软土震陷问题方面取得了许多有意义的成果。H. B. Seed等^[3]发现土样在受动荷载作用下会发生一定程度的附加变形,并首先提出残余应变势的概念来描述这种附加变形;L. K. Lee^[4]研究了动三轴试验中的残余变形,给出了在循环动应力作用下的残余应变经验公式;石兆吉等^[5]通过对大量土动三轴试验数据的归纳分析,提出了简化的残余应变经验公式,该公式被广泛用于工程分析;石兆吉等^[1-2]运用残余应变经验公式,采用软化模量法计算了塘沽新港地区震陷,震陷计算值与实测值比较相近;周健等^[6]运用Biot动力固结方程和通过动三轴试验结果归纳的上海软土残余应变公式,计算了上海软土地区隧道震陷值;孟上九等^[7]采用了不规则荷载下的土的残余应变模型及土体软化模量模型,实现了对建筑物不均匀震陷的时程分析;I. Shahrour等^[8]采用基于边界面的弹塑性本构模型计算了软土隧道震陷值,该本构模型考虑了等向硬化和运动硬化;毕丽思等^[9]基于《软土地区岩土工程勘察规程》^[10]中软土厚度对软土震陷的影响条例,对广州城区软土震陷进行了初步预测。

天津滨海软土主要以淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土为主,属典型软土。在地震激励下,强度极易降低,产生震陷。

天津滨海轨道交通Z2线一期工程线路全长约39.1 km,其中地下盾构线16.0 km,分为滨海机场站—高新路站段和海平路站—塘汉路站段。Z2线工程沿线场地广泛分布着淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土等软土层,层厚0.5~12.5 m,震陷风险大。

本文基于《软土地区岩土工程勘察规程》^[10]中简化的分层总和法,采用一维土层非线性地震响应分析程序EERA计算土层的动应力,同时采用修正的软土残余应变势简化计算公式,开展Z2线工程全部98个钻孔的震陷分析,为Z2线隧道抗震设计提供参考。

1 计算原理

1.1 计算方法

首先确定计算剖面,根据Z2线勘察报告和安评报告确定基本计算参数。计算土的自重应力 σ_z 和侧向自重应力 σ_x :

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \quad (1)$$

$$\sigma_x = K_0 \cdot \sigma_z \quad (2)$$

式中, σ_z 为第 n 层土竖向自重应力; i 为土层编号; γ_i 为第 i 层土容重; h_i 为第 i 层土厚度; σ_x 为第 n 层土水平向自重应力; K_0 为侧压系数。

确定土的震前静弹性模量,采用邓肯模量作为土的震前静模量:

$$E_s = k_s (\sigma_3)^{n_s} \left[1 - \frac{(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)R_f}{2C \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right] \quad (3)$$

式中, E_s 为土的邓肯模量; φ 为土的内摩擦角; C 为土的黏聚力; σ_1 为土的最大静主应力; σ_3 为土的最小静主应力; k_s 、 n_s 、 R_f 为试验参数。

在基岩面输入地震安评波,进行土层一维地震响应分析,求出各土层动剪应力值。土体非线性采用等价线性方法考虑。

利用等幅荷载下土的残余应变模型给出不同分层的残余应变势 ϵ_p ^[1,11]:

$$\epsilon_p (\%) = 10 \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3 \cdot C_5} \right)^{\frac{1}{S_5}} \left(\frac{N}{10} \right)^{-\frac{S_1}{S_5}} \quad (4)$$

式中, σ_d 为动应力幅值; N 为动应力循环次数; $C_5 = C_6 + S_6(K_c - 1)$; $S_5 = C_7 + S_7(K_c - 1)$, K_c 为固结比; C_6 、 S_6 、 C_7 、 S_7 和 S_1 为震陷参数。

选取软化模量法模拟土体在动荷载时模量的降低过程。软化模量为^[7]:

$$E_n = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_d}} \quad (5)$$

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_p} \quad (6)$$

式中, E_n 为软化后的模量; E_0 为土静弹性模量; E_d 为土动弹性模量。

竖向应变 ϵ_z 为:

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z(1 - \mu^2) - \mu(1 + \mu)\sigma_x] \quad (7)$$

土体静初始模量 E_0 软化后变为 E_n ,在静力条件下,震后的每层竖向应变为:

$$\Delta \epsilon_z = \left[\frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_0} \right] \left[\sigma_z (1 - \mu^2) - \mu (1 + \mu) \sigma_x \right] \quad (8)$$

采用分层总和法,可得:

$$\Delta S_j = \Delta \epsilon_{zj} h_j \quad (9)$$

$$S_T = \sum_{j=1}^n \Delta S_j \quad (10)$$

式中, ΔS_j 为对应第 j 层的震陷; S_T 为土层总震陷; n 为计算土层的分层总数。

1.2 确定标定系数

由于计算方法中有许多假定以及试验误差导致土性参数取值不准确,震陷计算结果和实测结果存在一定的差别,石兆吉等^[1]提出通过标定系数来消除这种差别。具体取一系列标定系数,分别得到震陷计算值,将震陷计算值与实测值进行对比,确定标定系数^[1] α 为:

$$\alpha = \frac{\sigma_d}{\sigma_{1d}} \quad (11)$$

式中, σ_d 为最大动应力; σ_{1d} 为最大动主应力。

石兆吉等^[1]指出,唐山地震时天津塘沽新港场地自然地面的震陷值约为 8 cm。

Z2 线工程与天津新港地区均位于天津滨海新区,位置相近且场地条件类似。Z2 线工程沿线的震陷计算中的标定系数可以用唐山地震中新港地区实际震陷来确定。

本文采用天津塘沽新港地区实际土层剖面(表 1),取不同标定系数计算自由场震陷,将计算结果

与实际震陷数据进行对比,确定标定系数。

表 1 天津新港土层剖面

土层编号	土类	埋深/m
1	亚黏土	0~3
2	淤泥	3~6
3	淤泥质土	6~10
4	淤泥	10~50

邓肯参数采用谢君斐等^[12]给出的各类土邓肯参数典型值。震陷参数采用石兆吉等^[5]和张久麒等^[11]给出的震陷参数推荐值。

本文采用天津波计算塘沽地区震陷,如图 1 所示。先对天津波进行地震波反演,采用天津新港土层等价线性参数(表 2),求得埋深 50 m 处的加速度时程,然后进行一维土层地震响应正演分析。

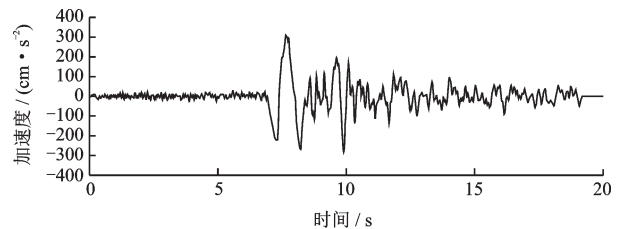


图 1 天津波

Fig. 1 Tianjin wave

表 2 天津新港土层模量比、阻尼比与剪应变关系

土类	层底埋深/m	参数	剪应变							
			5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}
亚黏土	3	G/G_{max}	0.997	0.994	0.969	0.940	0.760	0.612	0.240	0.136
		λ	0.008	0.010	0.011 3	0.017 5	0.062 5	0.092 5	0.175	0.180
淤泥	6	G/G_{max}	0.997	0.994	0.972	0.946	0.777	0.635	0.258	0.148
		λ	0.006	0.008	0.010	0.017 5	0.080	0.092 5	0.183	0.225
淤泥质土	10	G/G_{max}	0.997	0.994	0.969	0.939	0.755	0.606	0.235	0.133
		λ	0.010	0.013	0.015	0.022 5	0.062 5	0.090	0.205	0.260
淤泥	50	G/G_{max}	0.997	0.994	0.970	0.942	0.763	0.617	0.244	0.139
		λ	0.008	0.010	0.0126	0.020	0.060	0.090	0.215	0.270

计算各个土层的最大动主应力。选用不同的标定系数计算震陷值,见表 3。由表 3 可以看出,当

标定系数为 0.753 时,计算震陷值为 8.09 cm,与实际震陷结果基本一致,所以标定系数取 0.753。

表3 天津新港地表震陷值

Table 3 Surface seismic settlement of Tianjin Xingang

标定系数	地表震陷值/cm
0.6	2.10
0.7	5.24
0.753	8.09
0.8	11.60
0.9	23.40

2 计算参数

2.1 土层剖面参数及力学参数

Z2线工程地下盾构线共98个钻孔,各钻孔土层参数均取自于Z2线勘察报告和地震安评报告,震陷参数和邓肯参数取值方法与1.2节一致。由于篇幅所限,这里只给出钻孔Z2Q3CZ16具体参数,见表4~7。

表4 钻孔Z2Q3CZ16土层剖面情况

Table 4 Soil profile of borehole Z2Q3CZ16

序号	土类	厚度/ m	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
1	素填土	1.0	104	1 850	0.44
2	粉质黏土	0.7	108	1 850	0.44
3	淤泥质黏土	1.0	107	1 840	0.44
4	淤泥质黏土	1.8	112	1 825	0.44
5	淤泥质黏土	1.0	116	1 900	0.43
6	淤泥质黏土	3.0	118	1 800	0.45
7	粉质黏土	7.0	161	1 960	0.42
8	粉砂	0.9	196	1 960	0.42
9	粉质黏土	2.6	208	2 080	0.39
10	粉砂	2.0	229	2 050	0.40
11	粉土	2.0	228	1 950	0.42
12	粉质黏土	1.5	212	1 970	0.42
13	黏土	3.0	223	1 870	0.44
14	粉质黏土	3.7	240	2 020	0.41
15	粉土	3.0	244	2 010	0.41
16	粉质黏土	9.4	336	2 040	0.40
17	粉质黏土	2.1	361	1 990	0.41
18	粉细砂	9.4	368	1 990	0.41
19	粉质黏土	2.4	365	2 060	0.40
20	粉土	5.7	426	2 100	0.39
21	粉细砂	8.1	483	1 780	0.45
22	黏土	3.7	500	2 035	0.41

表5 钻孔Z2Q3CZ16震陷参数

Table 5 Settlement parameter of borehole Z2Q3CZ16

序号	土类	S ₁	C ₆	S ₆	C ₇	S ₇
1	素填土	-0.14	0.84	0.69	0.15	0
2	粉质黏土	-0.185	0.386	0.367	0.141	0
3	淤泥质黏土	-0.188	0.376	0.356	0.14	0
4	淤泥质黏土	-0.17	0.43	0.39	0.146	0
5	淤泥质黏土	-0.158	0.47	0.41	0.152	0
6	淤泥质黏土	-0.155	0.48	0.425	0.155	0
7	粉质黏土	-0.14	0.89	0.72	0.16	0
8	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
9	粉质黏土	-0.13	1.116	0.84	0.22	0
10	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
11	粉土	-0.15	1	0.75	0.16	0
12	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
13	黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
14	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
15	粉土	-0.15	1	0.75	0.16	0
16	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
17	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
18	粉细砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
19	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
20	粉土	-0.15	1	0.75	0.16	0
21	粉细砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
22	黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0

表6 钻孔Z2Q3CZ16邓肯参数

Table 6 Duncan parameter of borehole Z2Q3CZ16

序号	土类	k _s /kPa	n _s	φ/(°)	C/kPa	R _f
1	素填土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
2	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
3	淤泥质黏土	1 237	0.465	12	20	0.678
4	淤泥质黏土	1 237	0.465	12	20	0.678
5	淤泥质黏土	1 237	0.465	12	20	0.678
6	淤泥质黏土	1 237	0.465	12	20	0.678
7	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
8	粉砂	9 600	0.6	40	0	0.85
9	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
10	粉砂	9 600	0.6	40	0	0.85
11	粉土	3 500	0.6	33	22	0.693
12	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
13	黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
14	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
15	粉土	3 500	0.6	33	22	0.693
16	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
17	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
18	粉细砂	9 600	0.6	40	0	0.85
19	粉质黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664
20	粉土	3 500	0.6	33	22	0.693
21	粉细砂	9 600	0.6	40	0	0.85
22	黏土	1 500	0.5	23.85	50	0.664

表 7 钻孔 Z2Q3CZ16 土层模量比、阻尼比与剪应变关系

Table 7 Relationship between modulus ratio, damping ratio and shear strain of soil in borehole Z2Q3CZ16

土类	层底埋深/m	参数	剪应变							
			5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}
淤泥质黏土	5	G/G_{max}	0.999 4	0.997 1	0.994 3	0.972	0.945 6	0.776 6	0.634 8	0.257 9
		λ	0.022 5	0.035 5	0.043 1	0.067 6	0.081 6	0.121 7	0.139 9	0.171
粉质黏土	21.8	G/G_{max}	0.996 8	0.993 7	0.969 2	0.940 3	0.759	0.611 6	0.239 5	0.136
		λ	0.027 1	0.033 9	0.056 7	0.070 3	0.110 6	0.129 2	0.160 6	0.167 4
粉砂	27	G/G_{max}	0.996 4	0.992 9	0.965 4	0.933 1	0.736	0.582 3	0.218	0.122 4
		λ	0.040 7	0.047 9	0.069 5	0.081 2	0.112 3	0.125 1	0.145 1	0.149 1
粉土	30.8	G/G_{max}	0.996 3	0.992 6	0.964	0.930 5	0.728 1	0.572 5	0.211 2	0.118 1
		λ	0.020 6	0.026 4	0.046 5	0.058 8	0.095 7	0.112 6	0.140 1	0.145 8
粉质黏土	35.7	G/G_{max}	0.997	0.994	0.970 6	0.942 9	0.767 6	0.622 9	0.248 3	0.141 7
		λ	0.025 9	0.032 2	0.053 3	0.065 8	0.102 7	0.119 7	0.14 9	0.155 4
粉质黏土	45.7	G/G_{max}	0.996 5	0.992 9	0.965 7	0.933 7	0.738	0.584 8	0.219 8	0.123 4
		λ	0.026 9	0.033 3	0.054 4	0.066 7	0.102 1	0.117 8	0.143 2	0.148 5
粉砂	45.8	G/G_{max}	0.996	0.992	0.961 1	0.925 1	0.711 8	0.552 6	0.198 1	0.109 9
		λ	0.019 4	0.025 3	0.046 4	0.059 7	0.100 2	0.118 7	0.148 6	0.154 7
粉质黏土	62.7	G/G_{max}	0.997 5	0.995 1	0.975 8	0.952 7	0.801 3	0.668 5	0.287 4	0.167 8
		λ	0.020 4	0.025 8	0.044 3	0.055 6	0.090 7	0.109 7	0.14	0.147 6
粉砂	76.7	G/G_{max}	0.996 9	0.993 8	0.969 9	0.941 6	0.763 3	0.617 3	0.243 9	0.138 9
		λ	0.020 4	0.025 9	0.045	0.056 7	0.092 3	0.109 1	0.138 3	0.144 7

2.2 输入地震动

天津 Z2 线工程场地安评基岩地震动时程曲线

如图 2 所示。滨海机场站—高新路站段位于安评 I 区，海平路站—塘汉路站段跨越安评 II 区和 III 区。

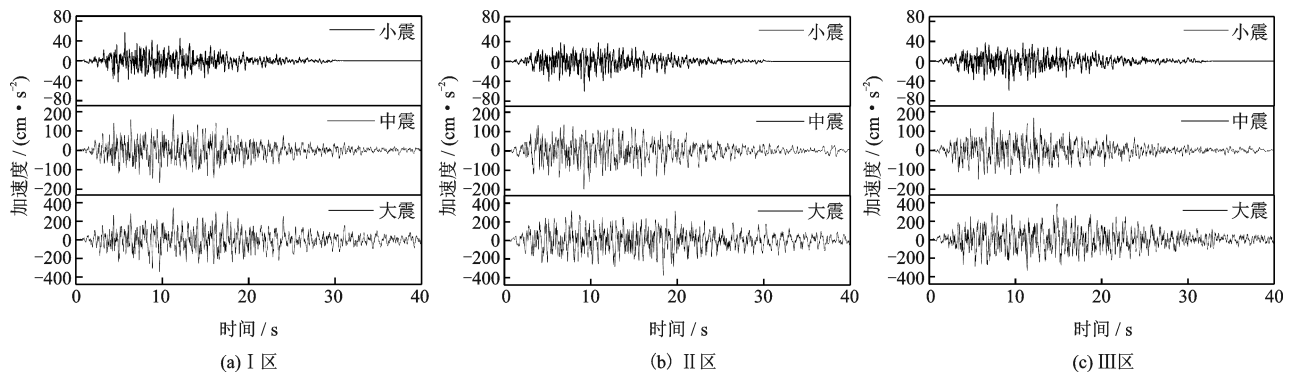


图 2 基岩地震动时程曲线
Fig.2 Bedrock earthquake motion

3 计算结果及分析

3.1 各钻孔地表震陷柱状图

滨海机场站—高新路站段和海平路站—宁海路站段在小震、中震和大震下的地表震陷如图3~4所示。滨海机场站—高新路站段在大震时地表震陷最大值为48.44 cm(钻孔Z2Q3CZ16),中震时地表震陷最大值为0.82 cm;海平路站—宁海路站段在大震时地表震陷最大值为16.51 cm(钻孔Z2Q7CZ07),中震时地表震陷最大值为0.39 cm;小震时二者地表震陷很小。由于两个钻孔土质相对更软,而且软土埋深更浅,使得这两个钻孔震陷较大。

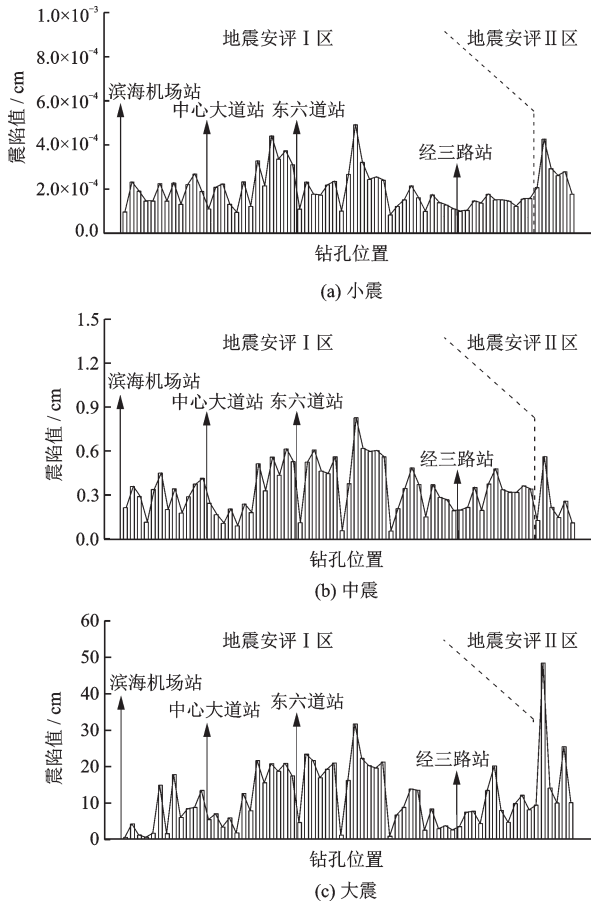


图3 滨海机场站—高新路站段地表震陷
Fig.3 Surface seismic settlement from Airport station to Gaoxinlu station

3.2 典型钻孔震陷曲线

由于篇幅所限,本文给出滨海机场站—高新路

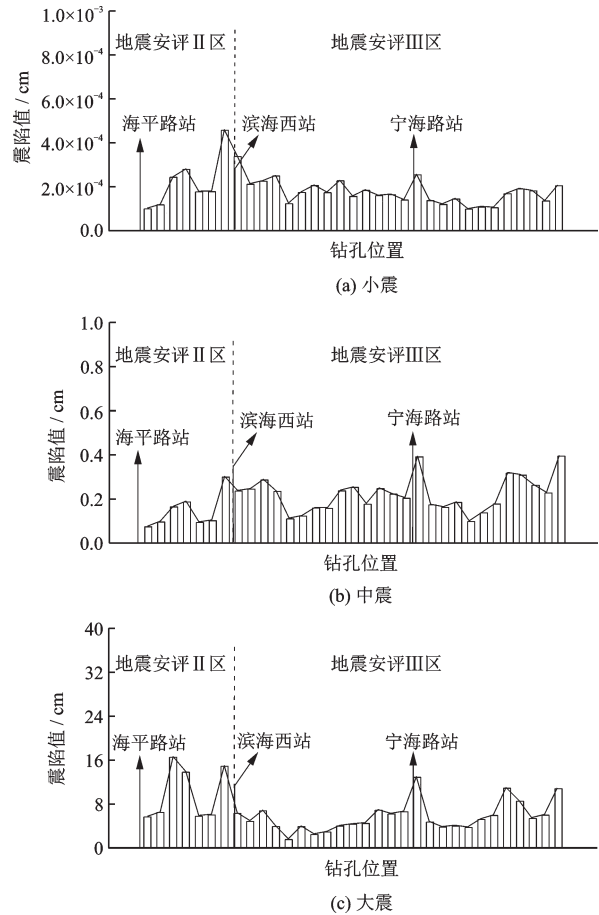


图4 海平路站—宁海路站段地表震陷
Fig.4 Surface seismic settlement from Haipinglu station to Ninghailu station

站段地表震陷最大的两个钻孔(钻孔Z2Q3CZ16和钻孔Z2Q2CZ07)的震陷时程曲线以及海平路站—宁海路站段地表震陷最大的两个钻孔(钻孔Z2Q7CZ07和钻孔Z2Q7CZ12)的震陷时程曲线,如图5所示。

3.3 各钻孔隧道底部埋深处震陷柱状图

滨海机场站—高新路站段和海平路站—宁海路站段在小震、中震和大震下隧道底部埋深处震陷如图6~7所示。大震时,除隧道上升段外,隧道底部埋深处最大震陷值为0.578 cm,可以认为震陷的影响很小。

由图6可见,中震和大震时,滨海机场站—高新路站段右端两个钻孔隧道底部埋深处震陷明显大于其它钻孔隧道底部埋深处震陷。主要是由于两个钻孔位于隧道上升段,隧道底部埋深较浅,分别为4.41 m和1.16 m。由图7可见,大震时,海平路站—宁海路站段左端两个钻孔隧道底部埋深处震陷明显大于

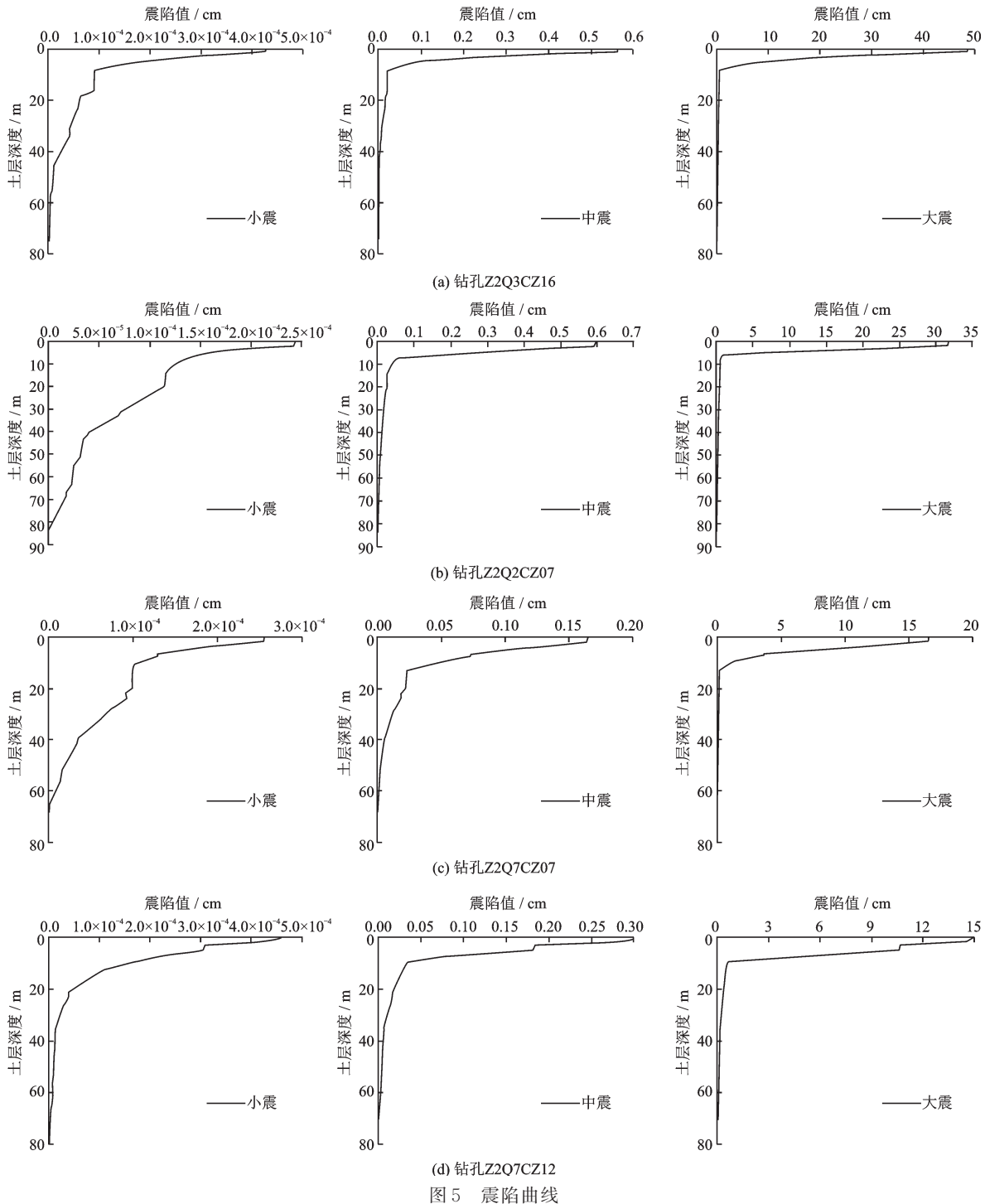


Fig.5 Seismic settlement curve

其它钻孔震陷。原因是两个钻孔位于隧道上升段，隧道底部埋深较浅。

3.4 不同深度的各钻孔自由场震陷

计算不同深度各钻孔自由场震陷平均值，见表8；同时计算各钻孔自由场不同埋深处震陷占地表震陷的比例，见表9。

由表8可见，滨海机场站—高新路站地下线65个钻孔，大震时，深度15 m和20 m处震陷平均值分别为0.23 cm和0.18 cm。海平路站—宁海路站地下线33个钻孔，大震时，深度15 m和20 m处震陷平均值分别为0.38 cm和0.34 cm。地表深度20 m以下的震陷很小，可不考虑。

由表9可知，震陷随埋深增加衰减明显，震陷主

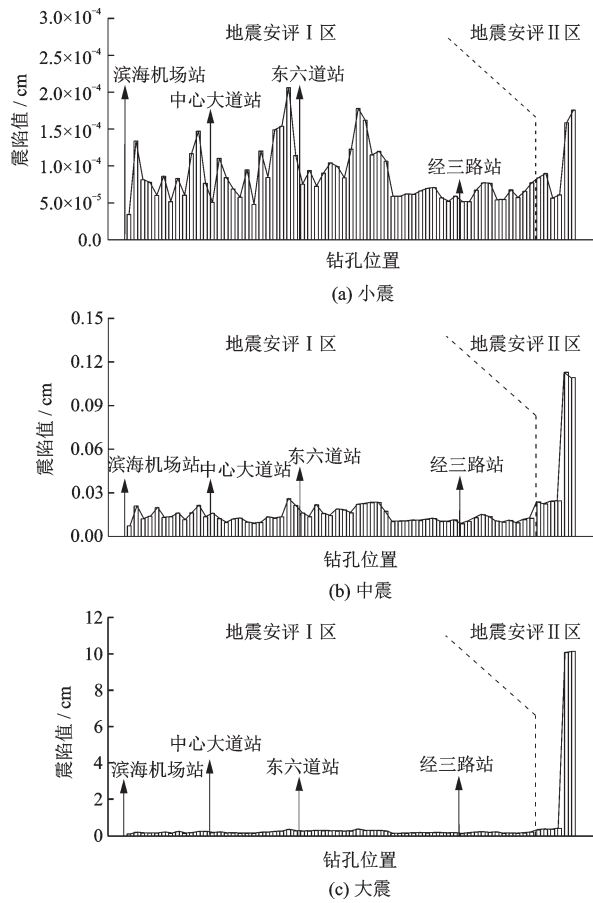


图6 滨海机场站-高新路站段隧道埋深处震陷
Fig.6 Seismic settlement at the bottom of tunnel in each borehole from Airport station to Gaoxinlu station

表8 天津Z2线震陷平均值

Table 8 Average value of seismic settlement in Tianjin Z2 line 单位: cm

埋深/ m	滨海机场站—高新路站		海平路站—宁海路站	
	大震	中震	大震	中震
0	11.713	0.334	6.823	0.219
5	4.396	0.126	4.291	0.139
10	0.416	0.023	1.107	0.055
15	0.226	0.017	0.383	0.024
20	0.181	0.014	0.335	0.020
25	0.144	0.012	0.294	0.017
30	0.107	0.009	0.242	0.013

要源自较浅土层。

3.5 不同土类震陷值

计算滨海机场站、高新路站、海平路站和宁海

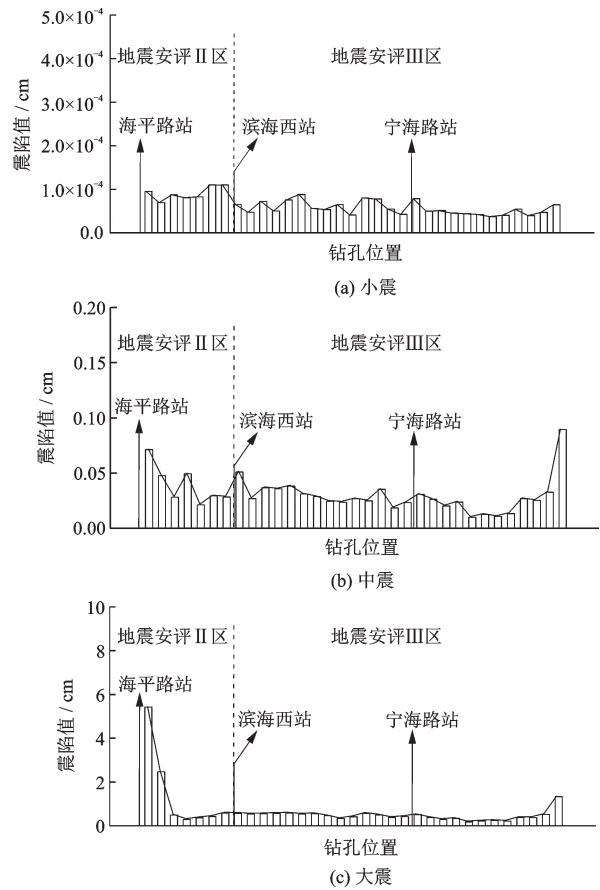


图7 海平路站-宁海路站段隧道埋深处震陷
Fig.7 Seismic settlement at the bottom of tunnel in each borehole from Haipinglu station to Ninghaihu station

表9 天津Z2线不同深度震陷占比

Table 9 Ratios of seismic settlement at different depths to the surface seismic settlement in Tianjin Z2 line 单位: %

埋深/ m	滨海机场站—高新路站		海平路站—宁海路站	
	大震	中震	大震	中震
0	100	100	100	100
5	37.53	37.72	63.03	63.67
10	3.55	7.02	16.56	25.10
15	1.93	4.97	5.80	11.12
20	1.54	4.31	5.09	9.10
25	1.23	3.50	4.46	7.58
30	0.92	2.65	3.67	5.93

路站埋深30 m以内的不同土类震陷值,见表10~13。可见,淤泥质黏土层震陷占土层地表总震陷70%~80%以上,说明震陷主要由淤泥质黏土层产生。

表 10 滨海机场站不同土类震陷值

Table 10 Settlement for different soil at Airport station

土类	埋深/m	大震/cm	中震/cm
素填土	0~2.1	0.001 6	0.002 5
淤泥质黏土	2.1~5.7	0.482 9 (78.1%)	0.194 2 (90.8%)
粉质黏土	5.7~17.5	0.035 8	0.009 0
粉土	17.5~20.5	0.001 8	0.000 0
粉质黏土	20.5~27.6	0.043 9	0.003 5
粉土	27.6~30	0.001 3	0.000 0

表 11 高新路站不同土类震陷值

Table 11 Settlement for different soil at Gaixinlu station

土类	埋深/m	大震/cm	中震/cm
素填土	0~4.3	0.246 1	0.004 2
淤泥质黏土	4.3~9	9.389 9 (93.4%)	0.117 1 (85.3%)
粉质黏土	9~18.3	0.158 3	0.003 5
粉土	18.3~23	0.014 5	0.000 3
粉质黏土	23~30	0.069 5	0.007 6

表 12 海平路站不同土类震陷值

Table 12 Settlement for different soil at Haipinglu station

土类	埋深/m	大震/cm	中震/cm
素填土	0~1.8	0.031 9	0.000 8
淤泥质黏土	1.8~6.7	12.799 4 (77.7%)	0.091 1 (55.9%)
粉土	6.7~7.4	0.014 8	0.000 2
淤泥质黏土	7.4~13.1	3.460 5 (21.0%)	0.050 0 (30.6%)
粉土	13.1~16.8	0.008 2	0.000 5
粉质黏土	16.8~22	0.018 4	0.003 6
粉土	22~23.8	0.001 1	0.000 1
黏土	23.8~30	0.027 6	0.007 1

表 13 宁海路站不同土类震陷值

Table 13 Settlement for different soil at Ninghailu station

土类	埋深/m	大震/cm	中震/cm
杂填土	0~2.2	0.012 8	0.007 3
粉质黏土	2.2~5.1	0.264 6	0.015 8
粉砂	5.1~6.6	0.032 2	0.003 1
淤泥质黏土	6.6~13.8	2.078 5 (75.5%)	0.105 8 (70.2%)
粉质黏土	13.8~20.1	0.068 4	0.006 5
粉砂	20.1~23.2	0.027 4	0.001 7
黏土	23.2~30	0.107 0	0.005 2

4 结 论

基于《软土地区岩土工程勘察规程》^[10]中简化的分层总和法,采用一维土层非线性地震响应分析程序 EERA 替代 Seed 经验公式计算土层的动应力,同时采用修正的软土残余应变势简化计算公式,进行了天津 Z2 线全部 98 个钻孔的软土震陷计算,主要结论如下:

地表震陷主要源自较浅土层,地表深度 20 m 以下的震陷可不考虑。隧道由地下线过渡到高架线的上升段,震陷较大,应考虑采取防控措施。场地震陷主要由淤泥质黏土层产生,占地表震陷的 70%~80% 以上。

参考文献:

- [1] 石兆吉, 郁寿松, 翁鹿年. 塘沽新港地区震陷计算分析[J]. 土木工程学报, 1988, 21(4):26-36.
Shi Zh J, Yu Sh S, Weng L N. Seismic settlement evaluation for Tanggu newport area[J]. China Civil Engineering Journal, 1988, 21(4): 26-36. (in Chinese)
- [2] 石兆吉, 郁寿松. 软土震陷计算中若干问题的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(4): 92-97.
Shi Zh J, Yu Sh S. Discussion on some problems in seismic settlement evaluation of soft soil [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1989, 9(4): 92-97. (in Chinese)
- [3] Seed H B, Chan C K. Clay strength under earthquake loading conditions [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations, ASCE, 1966, 92:53-78.
- [4] Lee L K. Seismic permanent deformations in earth dams [R]. Mechanics and Structures Department, School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles, California, 1974.
- [5] 石兆吉, 郁寿松. 土壤震陷参数及试验方法[J]. 世界地震工程, 1992, 7(3):37-43.
Shi Zh J, Yu Sh S. The test method and parameter for seismic subsidence of soil[J]. World Earthquake Engineering, 1992, 7(3):37-43. (in Chinese)
- [6] 周 健, 胡晓燕. 上海软土地下建筑物抗震稳定分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(5): 492-497.
Zhou J, Hu X Y. Analysis of earthquake resistance of underground construction surrounded by soft soil in Shanghai[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1998, 26(5):492-497. (in Chinese) (下转第 138 页)