

盾构隧道软土震陷有限元分析

李 蔓¹ 梁建文² 巴振宁² 朱昱瞳² 张久麒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, 天津 300350)

摘要: 软土地区震陷是造成工程结构震害的原因之一, 其计算问题一直是目前国内外十分关注的问题。为了研究地铁隧道在软土地区中的震陷计算问题, 以天津 Z2 线地铁隧道一期工程为例, 结合地质勘察报告和地震安全评价性报告, 采用《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011) 推荐的有限元分析计算方法并结合软化模量理论, 进行地铁隧道软土震陷的分析计算, 将计算结果与自由场情况下的计算结果进行对比分析。结果表明, 地铁隧道位置处的震陷值大于相同位置处自由场情况下的震陷值, 但二者数值相差不大, 隧道的震陷值在一定程度上可以通过自由场的震陷值来进行估算; 隧道震陷处理措施的范围可限制在隧道中心轴线左右两个隧道直径范围内。研究以期对于软土地区盾构隧道震陷问题具有一定参考价值。

关键词: 地铁隧道; 软土; 震陷; 有限元分析

中图分类号: U231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)S1-0240-08

Finite element analysis of seismic settlement of shield tunnel in soft soil

Li Man¹ Liang Jianwen² Ba Zhenning² Zhu Yutong² Zhang Jiuqi² Zhang Ping²

(1. Tianjin Binhai New Area Construction & Investment Group Co., Ltd., Tianjin 300459, China;

2. Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The seismic settlement in soft soil area is one of the main causes of earthquake damage, and its computational problem has always been a matter of great concern at home and abroad. In order to study the calculation of the seismic settlement of the subway tunnel in the soft soil area, taking the first phase project of the Tianjin Z2 subway tunnel as an example, combined with the geological survey report and the seismic safety evaluation report, the finite element analysis calculation method recommended by the “Geotechnical Investigation Procedures in Soft Soil Areas” (JGJ 83-2011) and the soft modulus theory is used to analyze and calculate the seismic settlement in soft soil area of the subway tunnel. The calculation results are compared with those of free field. The results show that the seismic settlement value at the location of the subway tunnel is larger than that under the free field at the same position, but there is little difference between the two values. The seismic settlement value of the tunnel can be estimated by the seismic settlement value of the free field. The scope of the tunnel seismic treatment can be limited to the diameter of the two tunnels around the central axis of the tunnel. The research has certain reference value for the similar subway tunnel projects in soft area.

Keywords: metro tunnel; soft soil; seismic settlement; analysis of finite element

E-mail: 279147619@qq.com

引 言

软土大多分布在沿海地区, 具有高压缩性、低

强度、低透水性, 且极易发生蠕变和扰动等特点, 工程性质差, 在地震力作用下极易丧失强度, 造成震陷的现象。

历次震陷显示, 软土震陷是造成地震破坏的主要原因之一。1976 年唐山大地震造成地基为软黏土的天津新港望海楼建筑群震陷, 附加沉降 38cm, 倾斜达 3%^[1]。1940 年埃尔森特罗地震中, 筑造在墨西哥北部运河边上一段高达 2m 多的河堤全部沉入

基金项目: 天津市建设系统科学技术项目 (2016-17)

作者简介: 李蔓, 硕士

通讯作者: 梁建文, 博士, 教授

收稿日期: 2019-03-13

下卧的软弱地基里面，公路桥引道斜坡的侧面填方也全遭破坏^[2]。1960 年智利地震、1985 年墨西哥地震等国内外大地震均出现了严重的软土震陷现象。

随着震害现象的调查分析，软土震陷问题逐渐引起人们的关注。国内外学者通过采用动三轴试验、离心振动台试验等方法对软土震陷问题开展了一系列的研究。Seed 等^[3]发现固结土样在动荷载作用下产生附加变形，在动荷载频率及作用时间一定时，主要受固结应力大小、动应力大小及动应力循环次数影响，并提出了残余应变势的概念。Lee^[4]对循环荷载下三轴试样的残余变形做了比较系统的试验研究，建立了循环作用周次与残余应变的经验公式，并应用到工程实际中。郁寿松等^[5]对 Lee^[4]的方法进行简化，得到较少参数的残余应变公式，并将此公式应用在工程实际中。石兆吉等^[6]采用软化模型，对塘沽新港地区进行了软土震陷计算。郁寿松等^[7]通过动三轴试验，得出动应力、初始剪应力、振动次数和土的类型 4 个因素是致使土壤震陷的主要原因，并提出了残余应变的经验表达式。孟上九^[8]和袁晓铭^[9-10]对软土的不均匀震陷进行研究，探明了建筑物不均匀震陷的发生机制与影响因素，提出了建筑物不均匀震陷简化分析方法。

天津滨海地区广泛分布着软土土层，震陷风险较大。本文在前人的理论上结合工程实际，通过采用软化模量理论，并且结合 ABAQUS 有限元分析软件，进行天津 Z2 线地铁隧道的软土震陷计算分析。

1 地铁隧道的软土震陷估算

《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)^[11]推荐“有限元分析计算方法”作为软土震陷量专门计算方法，本文基于软化模量理论并结合有限元分析进行分析计算。

1.1 计算原理

软化模量法^[6]基本思路是：振动作用的主要效果是使土壤变软，其模量降低，因而产生震陷值。

设振动前的土体模量为 E_i ，由地震作用相应的拟割线模量定义为 $E_d = \sigma_d / \varepsilon_d$ ，其中 σ_d 为动应力， ε_d 为残余应变，则软化后土体的模量可写成：

$$E_{id} = \frac{1}{\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_d}}$$

式中： E_{id} 为软化后单元土的模量； E_i 为单元土的初始模量； E_d 为地震相应的拟割线模量； σ_d 为单元土中的动应力； ε_d 为地震相应的残余应变。

软化模量法的物理模型如图 1 所示，静变形主要由 A 弹簧承担，而 B 弹簧模量随振动不断减小，动荷载下变形转为 B 弹簧承担。

根据上述基本概念，震陷分析的计算过程包括两次静力有限单元计算，第一次为震前模量 E_i ，第二次采用震后的软化模量 E_{id} ，分别进行两次静力有限元法计算求得位移之差即为待求的震陷量，在计算拟割线模量过程中需要进行动力有限元分析，进而确定土体的动应力。

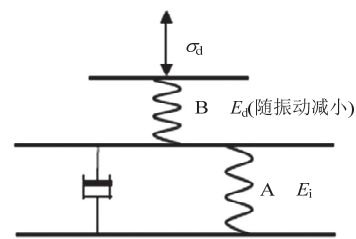


图 1 软化模型示意图

Fig.1 Softening model diagram

1.2 有限元模型的建立

本文利用 ABAQUS 有限元软件并根据工程钻孔剖面及计算参数建立土-地铁隧道结构分析模型，其中，地铁隧道模型的管片衬砌外径 6.6m，内径 5.9m，每环衬砌共 6 块管片，包括 1 块封顶块、2 块邻接块及 3 块标准块，每两块管片由两个斜螺栓接连形成整体管环结构。

衬砌模型、螺栓模型及横断面土体模型的网格划分情况如图 2~4 所示。

土体和衬砌均采用平面应变单元模拟，螺栓采用梁单元进行模拟，并将其以嵌入的方式完成和混凝土衬砌管片的连接；土体和衬砌的法向接触采用硬接触，切向采用罚函数摩擦接触。土体模型底部和左右边界采用粘弹性边界，其可以等效为按边界节点连续分布的并联的弹簧-阻尼器系统，阻尼器吸



图 2 衬砌模型及网格图

Fig.2 Lining model and grid drawing

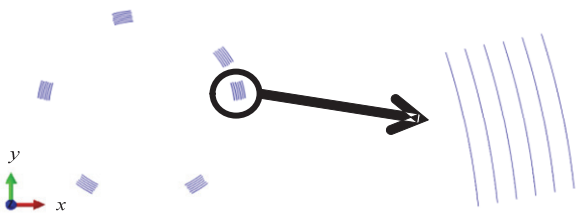


图 3 螺栓模型及网格图

Fig.3 Bolt model and grid diagram

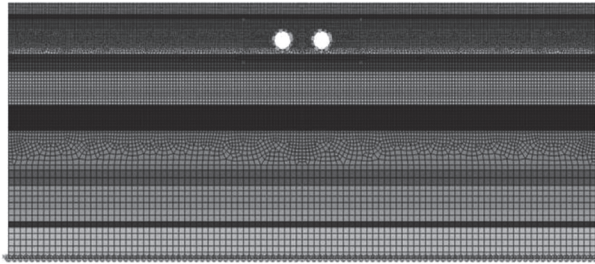


图 4 土体模型的网格划分及粘弹性边界

Fig.4 Meshing of soil models and viscous-spring boundary

收边界处散射波能量，弹簧模拟远域土的弹性恢复能力，近视满足无穷远辐射条件；土体非线性采用等价线性方法考虑。

粘弹性边界采用 ABAQUS 中 Spring/Dashpots 进行施加。具体实现过程：采用一维土层地震响应程序 EERA^[12]，输入各土层及基岩参数，在基岩面处输入地震动，求得模型各边界结点处对应介质的等效剪切模量、等效 P 波和 S 波波速，以及自由场应力、速度和位移，进而求得弹簧刚度和阻尼系数，以及等效荷载，在模型边界施加粘弹性边界及等效节点力。

1.3 地震动的输入

本文计算采用的地震波时程曲线是根据天津 Z2 线工程地震安评报告确定的基岩地震动，小震、中震、大震的基岩地震动时程曲线如图 5 所示。

1.4 材料参数的确定

在进行有限元模型建立和运用软化模量法计算地铁隧道的软土震陷过程中，需要确定地铁隧道衬砌和螺栓参数，以及根据地质勘察报告确定土体的剖面情况及计算参数。

1.4.1 衬砌和螺栓材料参数

地铁隧道的衬砌混凝土强度等级为 C50，混凝土材料在拉伸和压缩作用下的应力-应变关系曲线如图 6、图 7 所示，其中， E_0 表示混凝土材料在弹性阶段内的弹性模量， d_t 、 d_c 分别表示拉伸损伤和

压缩损伤， $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ 表示压缩等效塑性应变， $\tilde{\varepsilon}_c^{el}$ 表示压缩弹性应变， $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ 表示拉伸等效塑性应变， $\tilde{\varepsilon}_t^{el}$ 表示拉伸弹性应变。地铁隧道的管片间螺栓接头采用机械性能等级为 5.8 级的 M30，屈服强度 400MPa，抗拉强度 500MPa，螺栓材料采用双折线塑形强化本构模型，其应力-应变关系曲线如图 8 所示，其中，

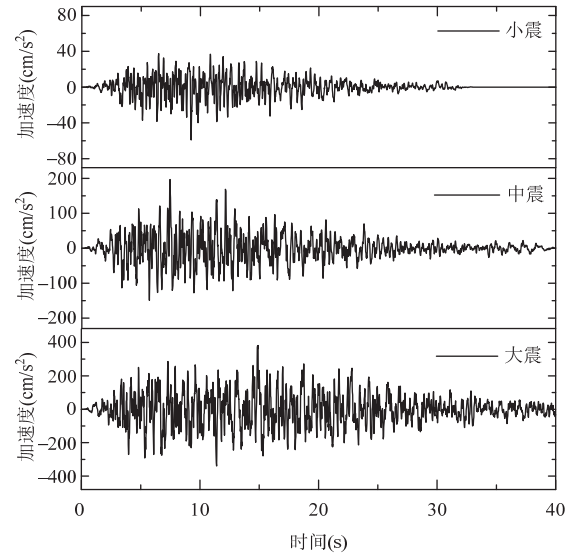


图 5 基岩地震动时程曲线

Fig.5 bedrock ground motion time history curve

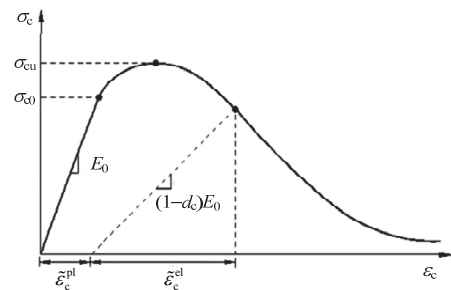


图 6 混凝土受压应力-应变关系曲线

Fig.6 Compressive stress-strain relationship curve of concrete

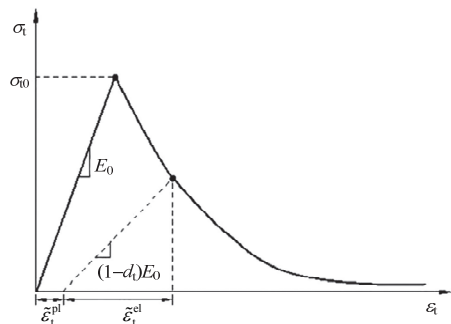


图 7 混凝土受拉应力-应变关系曲线

Fig.7 Tensile stress-strain relationship curve of concrete

σ_y 表示钢材的屈服应力, ε_y 表示钢材的屈服应变, 塑性加强段的弹性模量取为弹性阶段的 1/100; 混凝土及螺栓在弹性阶段的材料参数如表 1 所示。

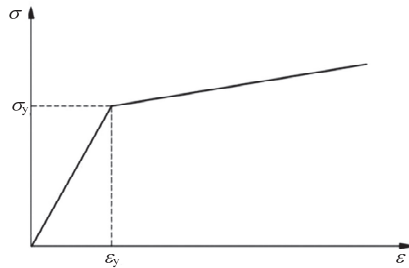


图 8 钢材受拉应力-应变关系曲线

Fig.8 Tensile stress-strain relationship curve of steel

表 1 混凝土及螺栓材料参数

Table 1 Concrete and bolt material parameters

材料	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比
C50 混凝土	2500	34.5	0.2
螺栓	7800	210	0.3

1.4.2 土层剖面情况

根据天津 Z2 线初勘报告和安评报告, 选择典型计算钻孔, 并根据钻孔确定土层剖面情况和力学参数, 土层断面情况如图 9 所示, 土层及其力学参数如表 2 所示, 土层非线性参数如表 3 所示。

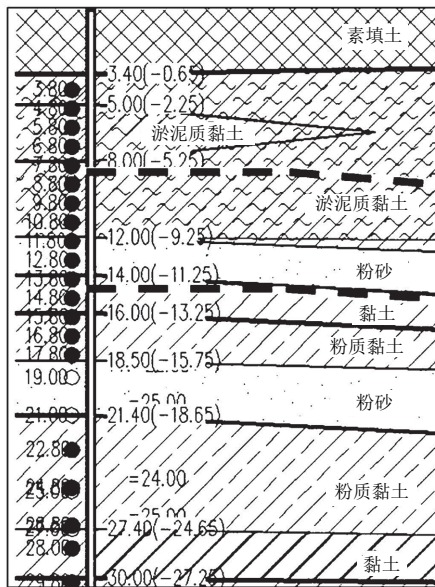


图 9 土层断面情况 (m)

Fig.9 Condition of soil section

1.4.3 邓肯参数确定

在进行静力有限元分析时, 需要确定各单元土

体的震前模量, 鉴于软土的变形表现为明显的非线性, 故震前土层的模量采用邓肯模型来表示, 其所需的邓肯参数根据静三轴剪切试验测得的非线性应力-应变关系曲线 (即邓肯模型) 确定, 割线模量形式下邓肯公式表达式为:

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

式中: E_s 为土体的割线模量; φ 为土体的内摩擦角; C 为土体的黏聚力; σ_1 、 σ_3 为最大和最小静主应力; k_s 、 n 、 R_f 、 φ 、 C 即为邓肯参数。

谢君斐等^[13]通过土的动力性能研究, 对各类土的邓肯参数等进行测定, 给出了各类土的典型参数值, 本文根据文献[13]取值, 其取值如表 4 所示。

1.4.4 震陷参数确定

震陷分析采用石兆吉等^[14]的震陷试验经验公式 (由动三轴试验求得), 其震陷参数采用张久麒等^[15]给出的震陷参数推荐值, 其取值如表 5 所示。

表 2 土层及其力学参数

Table 2 Soil layer and mechanical parameters

序号	土类	厚度 (m)	剪切波速 (m/s)	密度 (kg/m ³)	泊松比
1	素填土	3.4	117	1850	0.441
2	淤泥质黏土	1.6	116	1860	0.439
3	淤泥质黏土	3	120	1860	0.439
4	淤泥质黏土	4	119	1820	0.447
5	粉砂	2	175	2090	0.394
6	黏土	2	232	1890	0.433
7	粉质黏土	2.5	260	2010	0.410
8	粉砂	2.9	212	2060	0.400
9	粉质黏土	6	276	1940	0.423
10	黏土	2.6	261	1860	0.439
11	粉质黏土	2	274	1860	0.439
12	粉质黏土	1.8	278	2160	0.380
13	粉砂	6.2	310	2160	0.380
14	粉砂	11.2	350	2060	0.400
15	粉质黏土	1.6	381	1960	0.419
16	粉砂	4.8	472	1970	0.417
17	细砂	3.4	494	1950	0.421
18	粉质黏土	4	431	2100	0.392
19	粉质黏土	4	455	2100	0.392
20	粉质黏土	1.8	465	2100	0.392
21	细砂	9.8	518	1950	0.421

表 4 土层邓肯参数取值

Table 4 Duncan parameter value of soil layer

序号	土类	k_s	n_s	φ	C	R_f
1	素填土	1500	0.5	23.8	50	0.664
2	淤泥质黏土	1237	0.465	12	20	0.678
3	淤泥质粉质粘土	1237	0.465	12	20	0.678
4	淤泥质黏土	1237	0.465	12	20	0.678
5	粉砂	9600	0.6	40	0	0.85
6	黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
7	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
8	粉砂	9600	0.6	40	0	0.85
9	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
10	黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
11	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
12	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
13	粉砂	9600	0.6	40	0	0.85
14	粉砂	9600	0.6	40	0	0.85
15	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
16	粉砂	9600	0.6	40	0	0.85
17	细砂	9600	0.6	40	0	0.85
18	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
19	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
20	粉质黏土	1500	0.5	23.8	50	0.664
21	细砂	9600	0.6	40	0	0.85

表 5 土层震陷参数取值

Table 5 The seismic subsidence parameter of the soil layer

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	淤泥质黏土	-0.159	0.4625	0.406	0.151	0
3	淤泥质粉质黏土	-0.15	0.5	0.442	0.158	0
4	淤泥质黏土	-0.152	0.49	0.433	0.156	0
5	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
6	黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
7	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
8	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
9	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
10	黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
11	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
12	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
13	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
14	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
15	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
16	粉砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
17	细砂	-0.1	1	1	0.18	0.05
18	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
19	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
20	粉质黏土	-0.13	1.13	0.84	0.22	0
21	细砂	-0.1	1	1	0.18	0.05

注: S_1 、 S_6 、 S_7 、 C_6 、 C_7 为试验参数。

表 3 土层非线性参数

Table 3 Nonlinear soil parameters

土类	深度(m)	试验结果	剪切应变							
			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	7.3	G/G0	0.9970	0.9941	0.9710	0.9436	0.7699	0.6259	0.2508	0.1434
		λ_d	0.0378	0.0455	0.0693	0.0826	0.1200	0.1366	0.1642	0.1702
粉质黏土	11.7	G/G0	0.9964	0.9928	0.9649	0.9322	0.7332	0.5788	0.2156	0.1208
		λ_d	0.0301	0.0366	0.0572	0.0690	0.1016	0.1156	0.1379	0.1424
粉砂	13.8	G/G0	0.9959	0.9919	0.9606	0.9241	0.7089	0.5491	0.1958	0.1086
		λ_d	0.0218	0.0280	0.0495	0.0627	0.1018	0.1192	0.1469	0.1525
粉质黏土	28.3	G/G0	0.9970	0.9940	0.9705	0.9426	0.7667	0.6217	0.2474	0.1411
		λ_d	0.0303	0.0371	0.0587	0.0711	0.1067	0.1227	0.1498	0.1556
粉砂	34.8	G/G0	0.9966	0.9932	0.9671	0.9362	0.7459	0.5948	0.2270	0.1280
		λ_d	0.0250	0.0315	0.0537	0.0671	0.1068	0.1250	0.1554	0.1618
黏土	36.3	G/G0	0.9967	0.9934	0.9680	0.9380	0.7516	0.6020	0.2323	0.1314
		λ_d	0.0280	0.0344	0.0553	0.0674	0.1021	0.1176	0.1432	0.1486
粉质黏土	42.3	G/G0	0.9963	0.9926	0.9638	0.9302	0.7271	0.5712	0.2104	0.1176
		λ_d	0.0251	0.0318	0.0546	0.0684	0.1090	0.1272	0.1567	0.1628
粉质黏土	54.3	G/G0	0.9958	0.9917	0.9600	0.9230	0.7058	0.5453	0.1935	0.1071
		λ_d	0.0210	0.0270	0.0480	0.0610	0.0996	0.1168	0.1441	0.1495
粉砂	72.8	G/G0	0.9955	0.9911	0.9572	0.9179	0.6910	0.5279	0.1828	0.1006
		λ_d	0.0188	0.0244	0.0444	0.0568	0.0939	0.1103	0.1359	0.1409

震陷的经验表达式为:

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

$$C_5 = C_6 + S_6(k_c - 1)$$

$$S_5 = C_7 + S_7(k_c - 1)$$

式中: ε_p 为残余应变; σ_d 为动应力; k_0 为固结主应力比; N 为循环次数; S_1 、 S_6 、 S_7 、 C_6 、 C_7 为试验参数。

2 自由场情况下软土震陷分析计算

为了对比分析考虑地铁隧道和自由场情况下,在隧道底面位置处的软土震陷值,本文同时进行了自由场情况下软土震陷的分析计算,计算采用的土层及其参数见表 2 和表 3 所示,计算方法采用等价线性分析和软化模量法相结合的方法,通过采用地震响应程序 EERA^[12],输入各土层及弹性基岩参数,在基岩面处输入地震动,求得各土层最大动主应力,然后将提取出的各土层的最大动主应力代入残余应变经验表达式中,计算出相应的残余应变,进而采用软化模量理论计算出在隧道底面位置处的震陷值。

3 计算结果分析

3.1 地铁隧道有限元分析及自由场分析提取结果

根据考虑地铁隧道情况下的有限元计算结果,提取出在隧道中心轴线位置处、以及隧道中心轴线左右各偏移一个隧道直径位置处的各单元动主应力值,同时提取出自由场情况下,通过地震响应程序计算求得的各土层最大动主应力,绘制出隧道三个轴线位置及自由场情况下的最大动主应力随深度变化曲线图,其结果如图 10~12 所示。

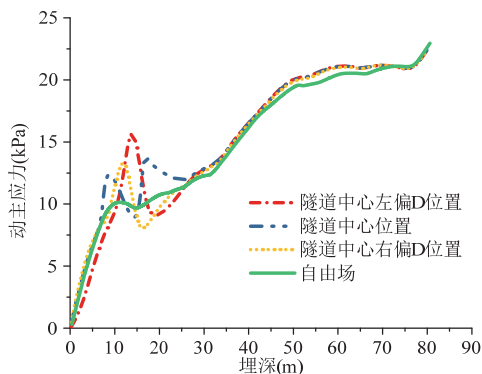


图 10 小震-最大动主应力随深度变化曲线

Fig.10 Small earthquake-maximum dynamic stress with depth curve

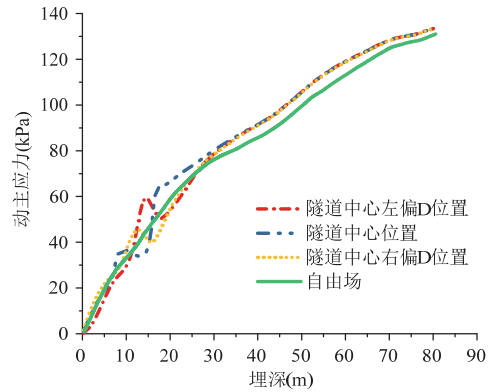


图 11 中震-最大动主应力随深度变化曲线

Fig.11 Moderate earthquake-maximum dynamic stress with depth curve

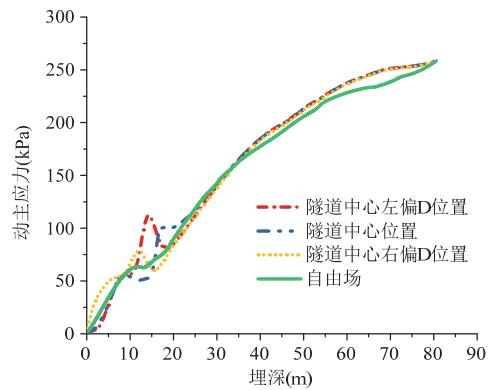


图 12 大震-最大动主应力随深度变化曲线

Fig.12 Major earthquake-maximum dynamic stress with depth curve

从图可以看出,在大震、中震、小震作用下,各单元土体的最大动主应力值随深度变化规律基本一致。在隧道底部位置(隧道底面埋深为 15.25m)附近,隧道中心轴线位置处的最大动主应力值以及左右各偏移一个隧道直径轴线位置处的最大动主应力值均比自由场的最大主应力大。随着深度增加,考虑地铁隧道情况下各土体单元的最大动主应力值与自由场情况下各土体单元的最大动主应力值趋势一致,数值相差不大。

3.2 地铁隧道震陷计算结果

将有限元分析提取出的土体各单元的最大动主应力代入残余应变经验表达式中,计算出相应的残余应变,进而计算出隧道中心轴线位置处、隧道中心轴线位置左右各偏移一个隧道直径的轴线处在隧道底部的震陷值,根据计算结果绘制相应的图形,同时计算出自由场情况下,在隧道底面位置处的震陷值,以及 3 个轴线位置在隧道底面位置处的 σ_d / σ_3 值,根据其数值绘制相应的图形(自由场震陷值为

标记的点, σ_d/σ_3 值绘制成柱状图), 将各情况下的震陷值与根据 σ_d/σ_3 值绘制的柱状图绘制在同一个图形中, 其绘图结果如图 13~15 所示。

根据绘制出的震陷曲线图可以看出, 小震、中震和大震 3 种情况下, 地铁隧道底面位置处震陷规律基本一致, 这里以大震为例进行说明。

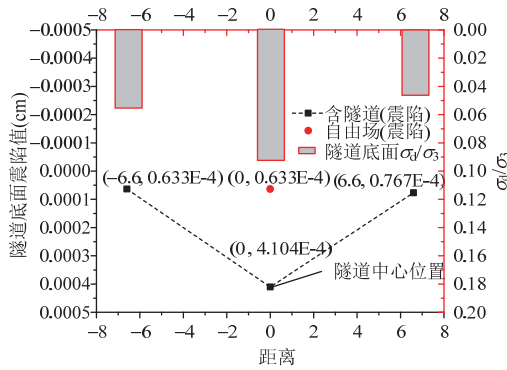


图 13 小震-隧道底面位置处震陷曲线

Fig.13 Small earthquake-Earthquake curve at the bottom of the tunnel

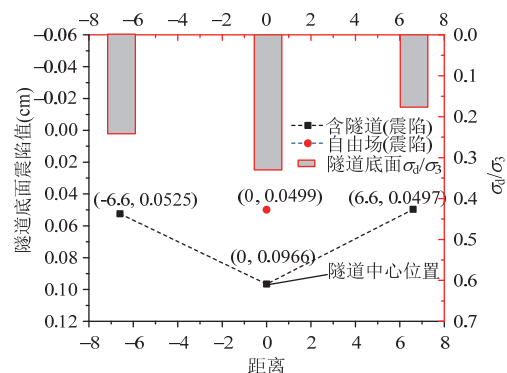


图 14 中震-隧道底面位置处震陷曲线

Fig.14 Moderate earthquake-Earthquake curve at the bottom of the tunnel

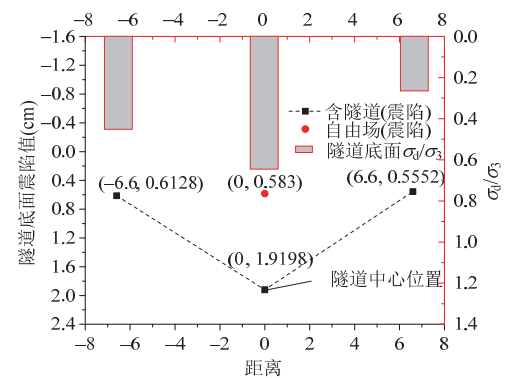


图 15 大震-隧道底面位置处震陷曲线

Fig.15 Major earthquake - Earthquake curve at the bottom of the tunnel

在大震情况下, 隧道中心轴线位置处的震陷值比隧道左右各偏移一个隧道直径的两个位置处的震陷值大, 并且通过计算绘制出的柱状图在 3 个位置处的 σ_d/σ_3 值与在隧道底面位置处的震陷值表现出相同的趋势, 即在隧道中心位置处的 σ_d/σ_3 值比隧道中心左右各偏移一个隧道直径的两个位置处的 σ_d/σ_3 值大, 故隧道中心位置处的震陷值比隧道中心左右各偏移一个隧道直径的两个位置处的震陷值大的主要原因是在隧道底面位置附近的 σ_d/σ_3 值较大。

在 3 种工况下, 通过与自由场的对比发现, 隧道中心位置处的震陷值比自由场情况下的震陷值大, 但二者相差不大, 故可以采用自由场的震陷值估算隧道的震陷值; 另外, 隧道左右各偏移一个隧道直径的两个位置处的震陷值与自由场情况下的震陷值十分接近, 故在实际的工程应用中考虑地铁隧道震陷控制范围时, 采取控制措施的范围可以局限在距离隧道中心左右各一个直径的范围内。

4 结论

通过采用有限元分析和软化模量法结合的方式, 开展了天津 Z2 线地铁隧道震陷的有限元分析。研究表明, 地铁隧道的震陷值比相同位置处自由场情况下的震陷值大, 但是二者相差不大, 故在进行地铁隧道的震陷计算时, 在一定程度上可以采用自由场情况下的震陷值进行估算。针对实际工程中地铁隧道震陷控制范围问题, 本文建议采取地铁隧道震陷控制措施的范围可以局限在距离隧道中心轴线左右各一个隧道直径范围内。

参 考 文 献

- [1] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京:地震出版社, 1986
- [2] 罗伯特 L. 威格尔. 地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1978
- [3] Seed H B, Chan C K. Clay strength under earthquake loading condition [J]. American Society of Civil Engineering, 1996, 92(2): 53-78
- [4] Lee L K. Seismic permanent deformations in earth dams [M]. California: University of California Los Angeles, 1974
- [5] 郁寿松, 石兆吉, 谢君斐, 等. 上海地铁隧道振陷的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(1): 51-60 (Yu Shousong, Shi Zhaoji, Xie Junwfei, et al. Analysis of permanent deformation for tunnel of Shanghai underground [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, 6(1): 51-60 (in Chinese))
- [6] 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): 24-33
- [7] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学

- 报, 1989, 11(4): 35-44 (Yu Shousong, Shi Zhaoji. Experimental investigation of soil settlement due to earthquake [J]. Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 35-44 (in Chinese))
- [8] 孟上九, 刘汉龙, 袁晓铭, 等. 建筑物地基不均匀震陷有限元时程分析方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 33-36 (Meng Shangjiu, Liu Hanlong, Yuan Xiaoming, et al. Time-travel analytical method for earthquake-induced differential settlement of building foundation using FEM [J]. Geotechnical, 2005, 26(1): 33-36(in Chinese))
- [9] 袁晓铭, 孙锐, 孟上九. 软弱地基土上建筑物不均匀震陷机理研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 67-72 (Yuan Xiaoming, Sun Rui, Meng Shangjiu. Research on mechanism for earthquake-induced differential settlement of buildings on soft subsoil [J]. Journal of Civil Engineering, 2004, 37(2): 67-72(in Chinese))
- [10] 袁晓铭, 孟上九, 孙锐. 随机地震荷载下黏性土残余应变的半经验计算公式[J]. 水利学报, 2004, 11: 62-67 (Yuan Xiaoming, Meng Shangjiu, Sun Rui. Semi-empirical formula for evaluating the residual strain of cohesive soils under irregular earthquake loading [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 11: 62-67 (in Chinese))
- [11] JGJ 83—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 (JGJ 83—2011 Geotechnical investigation procedure in soft soil area [S]. Beijing: China Architecture and Building Press 2011 (in Chinese))
- [12] Bardet J P, Ichii K, Lin C H. EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits [R]. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000
- [13] 谢君斐, 石兆吉, 郁寿松, 等. 液化危害性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1): 63-79 (Xie Junwfei, Shi Zhaoji, Yu Shousong. Hazard analysis of liquefaction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(1): 63-79 (in Chinese))
- [14] 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(3): 37-43
- [15] 张久麒, 孙锐, 袁晓铭, 等. 软土残余应变势简化计算公式及参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 1(5): 103-108 (Zhang Jiuqi, Sun Rui, Yuan Xiaoming, et al. The simplified formula for calculating the permanent strain potential of soft soil and parameter analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 1(5): 103-108 (in Chinese))

李 蔓 (1990—), 女, 硕士。主要城市轨道交通方面研究。

梁建文 (1963—), 男, 博士, 教授。主要从事地震工程研究。

巴振宁 (1980—), 男, 博士, 教授。主要从事地震工程研究。

朱昱瞳 (1996—), 男, 硕士研究生。主要从事地震工程研究。

张久麒 (1991—), 男, 博士研究生。主要从事地震工程研究。

张 萍 (1995—), 女, 博士研究生。主要从事地震工程研究。