

地下十字立交管廊横向抗震分析(I) ——方法及验证

梁建文, 陈慧芳, 李东桥, 官其钊

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

摘要:地下管廊工程建设发展迅速,形成大量立交管廊,且立交管廊的立交节点多整体现浇。因立交管廊在正交2个方向的抗侧移刚度存在巨大差异,同时土体变形与管廊埋深关系密切,立交管廊地震响应机理复杂。该文提出了地下立交管廊横向抗震分析的反应位移法。以某地下十字立交现浇管廊为例,采用反应位移法建立立交管廊的荷载-结构模型,研究立交节点各层之间最大相对变形及发生时刻,并通过时程分析法进行了验证。研究表明:立交节点各层之间最大相对变形不在同一时刻发生,仅考虑立交节点顶底板之间最大相对变形对结构进行抗震分析,可能并不是最不利工况,有必要计算交叉节点各层之间最大相对变形,以确定整体结构的最不利工况;该文方法能够准确计算地下十字立交管廊在地震作用下的内力和变形响应,对地下立交管廊进行横向抗震设计具有参考价值。

关键词:十字立交管廊;管廊立交节点;现浇管廊;变形缝;最不利工况

中图分类号:TU990.3; P315.9

文献标志码:A

Transverse seismic analysis of underground cross interchange utility tunnel(I): Method and validation

LIANG Jianwen, CHEN Huifang, LI Dongqiao, GUAN Qilv

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The construction of underground utility tunnels has developed rapidly, resulting in a large number of interchange utility tunnels, and the interchange nodes of these tunnels are mostly cast-in-place as a whole. Due to the significant difference in lateral resisting stiffness in two orthogonal directions of the interchange utility tunnel, and the soil deformation is closely related to the buried depth of utility tunnel, the seismic response mechanism of the interchange utility tunnel is complex. In this paper, a response displacement method for the transverse seismic analysis of underground interchange utility tunnel is proposed. Taking a cross interchange cast-in-place utility tunnel as the research project, the load-structure model of the cross interchange utility tunnel is established via the response displacement method. The maximum relative deformation and its occurrence time between the layers of the interchange utility tunnel are studied, and the method in this paper is verified by the time history analysis method. Results indicate that for the underground interchange utility tunnel, the maximum relative deformation between the layers of interchange node does not occur simultaneously. Considering only the maximum relative deformation of the top slab and bottom slab of the interchange node may not be the most unfavorable condition for seismic analysis of the structure. It is necessary to calculate the maximum relative deformation between the layers of the interchange node to determine the most unfavorable condition of the overall structure. The method in this paper can accurately calculate the internal force and deformation response of underground cross interchange utility tunnel under seismic

收稿日期:2024-05-30; 修回日期:2024-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51978462)

作者简介:梁建文(1965—),男,教授,博士,主要从事地下结构抗震研究。E-mail:liang@tju.edu.cn

action, which is of reference value for the transverse seismic design of the underground interchange utility tunnel.

Key words: cross interchange utility tunnel; interchange node of utility tunnel; cast-in-place utility tunnel; deformation joint; the most unfavorable working condition

0 引言

地下综合管廊是将给排水、燃气、电力和通讯等城市工程管线分门别类地置于一体的地下空间体,是城市发展不可或缺的生命线工程^[1]。然而,地下管廊作为地下浅埋线长形结构,其在地震作用下容易发生损坏^[2-3],研究地下管廊在地震作用下的响应机理、薄弱环节和破坏模式具有重要的工程意义。

近年来,国内外学者针对地下管廊抗震进行了不少研究。史晓军等^[4]、陈隽等^[5]通过一系列振动台试验研究了地下管廊在非一致地震激励下的地震响应。岳庆霞等^[6]研究了地下管廊在近似 Rayleigh 波作用下的动力响应特征。杨剑等^[7]通过 FLAC 研究了场地液化对管廊横断面地震响应的影响,结果表明土体液化产生的侧向剪切变形和上浮位移导致管廊在垂直轴向方向出现较大的变形。施有志等^[8]研究了地下管廊在 Rayleigh 波与底部地震波双动力共同作用下的动力响应。郭恩栋等^[9]通过 ABAQUS 对典型综合管廊体系的地震响应进行了研究,并讨论了廊体的破坏模式。蒋录珍等^[10]研究了不同地震波时程、入射角度和孔隙率等因素对饱和土体-管廊动力相互作用体系地震响应的影响。李金奎等^[11]利用 ABAQUS 研究了双舱地下管廊在不同地震动强度下的地震响应,指出中隔墙上下端部为薄弱位置。阮滨等^[12]研究了液化场地下管廊纵向地震反应,发现管廊接头张开量在液化区显著增大。汤鹏等^[13]考虑盾构管廊与内部混凝土支架相互作用,对管廊横向地震响应进行了模拟分析,发现管廊穿越较软土层时的损伤较大。黄德龙等^[14]对管廊-非均匀土体体系在地震作用下的动力变形响应及其相互作用进行了抗震试验研究。JIN 等^[15]研究了双向、三向地震激励输入机制下,地下管廊在近断层、远场地震动下的动力响应。

以上文献均是针对直线形管廊的抗震性能研究。然而,地下管廊分布复杂,管廊在城市地下交叉相连,形成大量十字和丁字等交叉管廊。由于交叉管廊在不同主轴方向上存在刚度差异,因而可能造成交叉节点处出现较大的地震变形和应力集中,交叉节点受力状态较为复杂,是管廊系统的薄弱环节。在针对交叉管廊抗震研究方面,梁建文等^[16-17]分别利用时程分析法和反应位移法进行了 T 型交叉管廊的横向抗震分析,并对计算结果进行了对比验证,结果表明反应位移法可以替代时程分析法进行交叉管廊的抗震分析。梁建文等^[18]提出了交叉管廊纵向抗震设计的反应位移法,该方法引入周期性地层变形输入,通过分析一个地层变形周期内交叉管廊的变形历程,寻找交叉节点处变形和内力的最不利模式,并利用梁-弹簧模型对 T 型^[18]、井字型^[19]交叉管廊进行了纵向抗震分析。随后,考虑到梁-弹簧模型难以反映交叉管廊节点局部变形细节及预制管廊接头预应力作用,李东桥等^[20]提出了适用于非对称断面预制交叉管廊抗震设计的壳-弹簧模型,并对 T 型^[20]和十字型^[21]交叉管廊进行了纵向抗震分析,结果表明壳-弹簧模型能够反映预制管廊接头的力学行为和交叉节点的局部变形。进一步地,LI 等^[22]结合梁-弹簧模型和壳-弹簧模型,提出了预制交叉管廊纵向抗震分析的多尺度模型,该模型能够反映预制管廊接头的局部变形细节,同时具有较高的计算效率。此外,LIANG 等^[23]首次通过大型振动台试验研究了 T 型预制交叉管廊在水平正交 2 个方向地震激励下的抗震性能,揭示了 T 型交叉节点的变形机理。考虑到软硬交互地层条件对地下结构存在不利影响,LI 等^[24]基于地层周期变形思想,提出了一个简化的地下线长形结构穿越软硬交互地层的纵向抗震设计方法。

然而,以上研究均针对平交管廊,而实际工程中,为满足管廊中各类管线的敷设,干线管廊交叉节点通常设计为整体立交形式,立交节点形式不一,构造更加复杂,地震作用下,其抗震性能可能比平交管廊更为不利。目前关于立交管廊的抗震问题还鲜有研究。

鉴于此,本文以某地下十字立交现浇管廊为例,基于反应位移法基本思想,提出一个适用于立交管廊的抗震设计方法。通过 ABAQUS 有限元软件建立立交管廊荷载-结构模型,以壳单元模拟管廊结构,土弹簧单元模拟土-管廊之间的相互作用,非线性弹簧单元模拟现浇管廊变形缝的力学行为,研究立交节点各层之间最大相对变形及其发生时刻,并通过时程分析法对本文方法进行验证。相关建模方法可为地下立交管廊的抗震设计提供一定的参考。

1 分析方法与模型

1.1 分析方法

横断面反应位移法(response displacement method, RDM)^[25]认为地下结构地震响应主要受场地变形控制,考虑到地下结构与场地土之间的刚度差异,采用地基弹簧描述土-结构相互作用,将土层相对变形施加到地基弹簧远端,同时考虑周围土层剪力和结构水平惯性力作用,对地下结构进行内力分析和变形分析。

考虑到地下双层或多层管廊工程的发展和运用,梁建文等^[26]基于横断面反应位移法思想,提出了地下结构纵断面抗震分析的反应位移法,发现双层管廊相对单层管廊更易损。

鉴于此,针对地下十字立交管廊,结合横断面反应位移法^[25]和纵断面反应位移法^[26],建立地震荷载-结构分析模型,见图1。

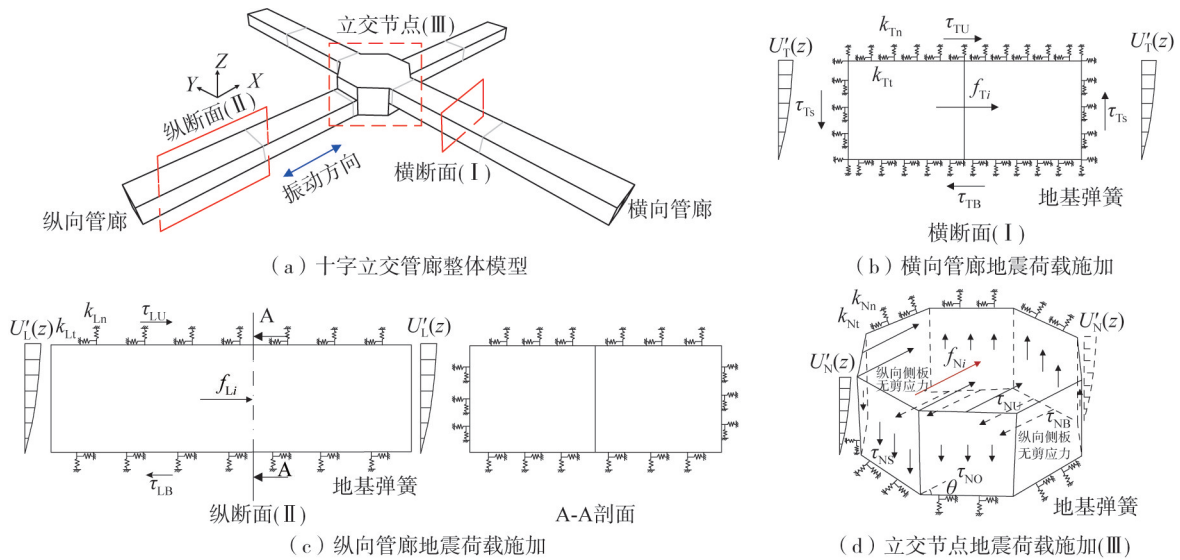


图1 十字立交管廊荷载-结构分析模型

Fig.1 Analysis model of load-structure of cross interchange utility tunnel

为方便起见,以图1地震激励方向(X)为参照,定义与地震激励方向一致的管廊为纵向管廊(longitudinal utility tunnel),与地震激励方向垂直的管廊为横向管廊(transverse utility tunnel),纵向管廊和横向管廊交叉部分为立交节点(interchange node)。下面分别介绍立交管廊所受到的地震荷载。

1) 横向管廊地震荷载施加过程见图1(b),此处荷载-结构模型与传统横断面反应位移法一致。首先通过一维土层等效线性地震响应计算软件EERA^[27]得到自由场地震响应,土体相对变形对结构的作用以相对变形的形式施加在地基弹簧远端;横向管廊沿深度的相对变形 $U'_T(z)$ 为自由场在深度 z 处相对于结构底部的最大相对变形,由式(1)得到:

$$U'_T(z) = u_T(z) - u_T(z_B) \quad (1)$$

式中: $u_T(z)$ 为地震时深度 z 处地层位移(m); $u_T(z_B)$ 为结构底部深度 z_B 处自由场地震响应位移(m);下标T代表横向管廊。

横向管廊沿深度 z 的惯性力可由式(2)得到:

$$f_{Ti} = m_{Ti} \cdot \ddot{u}_{Ti} \quad (2)$$

式中: m_{Ti} 为结构 i 单元的质量(kg); \ddot{u}_{Ti} 为结构 i 单元在最大相对变形时刻对应的场地加速度(m/s^2)。

地基弹簧刚度由式(3)、式(4)得到:

$$k_{Tn} = KA \quad (3)$$

$$k_{Tt} = 1/3k_{Tn} \quad (4)$$

式中: k_{Tn} 为法向地基弹簧刚度(N/m); K 为基床系数(N/m^3),根据GB 50267—2019《核电厂抗震设计标准》^[28]可取为 $K=3G$, G 为土体最大应变幅值对应的地基土剪切模量(Pa),可由EERA计算得到; k_{Tt} 为切向地基弹簧刚度(N/m); A 为单个地基弹簧作用面积。

横向管廊顶板剪力、底板剪力分别由 EERA 分析所得的自由场对应结构顶底板之间最大相对变形时刻的剪应力与作用面积的乘积得到,侧板剪力 τ_{TS} 由式(5)得到:

$$\tau_{TS} = (\tau_{TU} + \tau_{TB})/2 \tag{5}$$

式中: τ_{TU} 为横向管廊顶板剪力(N); τ_{TB} 为横向管廊底板剪力(N)。

2)纵向管廊地震荷载施加过程见图 1(c)^[26]。本文地震波自基岩垂直入射,地震激励方向沿纵向管廊,基于一维土层响应规律,同一深度土层变形一致,水平面内无剪切变形和剪应力作用,纵向管廊侧板有土体位移 $U'_L(z)$ 作用,不存在土体剪力作用。纵向管廊顶底板处既有土体位移 $U'_L(z)$ 作用,也有土体剪力 τ_{LU} 、 τ_{LB} 作用,与图 1(b)的地震荷载施加方式一致,且纵向管廊惯性力、地基弹簧刚度、土体相对位移计算方法和施加与图 1(b)的一致。

3)立交节点地震荷载施加过程见图 1(d)。以图 1(a)中地震激励方向为参照,立交节点惯性力、地基弹簧刚度、相对位移计算方法和施加与图 1(b)、(c)一致;立交节点平行于地震激励方向的左、右侧板无剪力作用,与图 1(c)一致;立交节点垂直于地震激励方向的正前、后侧板的剪力可由式(6)得到:

$$\tau_{NS} = (\tau_{NU} + \tau_{NB})/2 \tag{6}$$

式中: τ_{NS} 为立交节点正前、后侧板剪力(N); τ_{NU} 为立交节点顶板剪力(N); τ_{NB} 为立交节点底板剪力(N)。

立交节点与地震激励方向成 θ 角度倾斜侧板,利用局部坐标系建立地基弹簧并在地基弹簧远端施加地层相对位移,基于有限单元方法,斜侧板剪力 τ_{NO} 可按式(7)计算得到:

$$\tau_{NO} = \tau_{NS} \sin \theta \tag{7}$$

式中: τ_{NS} 为立交节点正前、后侧板剪力(N),由式(6)得到; θ 为立交节点斜侧板与地震激励方向所成角度,且 $\theta \in (0, \pi/2)$,其中本文 θ 为 45° 。

结合应力平衡原理,斜侧板剪力的施加方向可见图 1(d)。

1.2 模型概况

本文选取某十字立交现浇管廊为研究对象,其结构形式见图 2(a)。管廊在立交节点处为上下层十字正交形式,立交节点外形为八棱柱,为了研究立交节点与标准段之间,及标准段与标准段之间的地震响应差异,在立交节点两侧均取为 2 个现浇标准段长度,每个标准段长度为 30 m,变形缝宽度为 0.03 m,正交 2 个管廊的长度均为 145.452 m。正交两轴向现浇标准段为相同的双舱形式,标准段横断面总宽度为 9 250 mm,净高为 4 000 mm,左右舱净宽均为 4 000 mm,顶板、底板、左右侧板厚度均为 500 mm,中隔板厚度为 250 mm,标准段横断面尺寸见图 2(b)。管廊结构混凝土强度等级为 C60,密度为 2 600 kg/m³,弹性模量为 35.5 GPa,泊松比为 0.2;钢筋强度等级为 HRB400,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3。

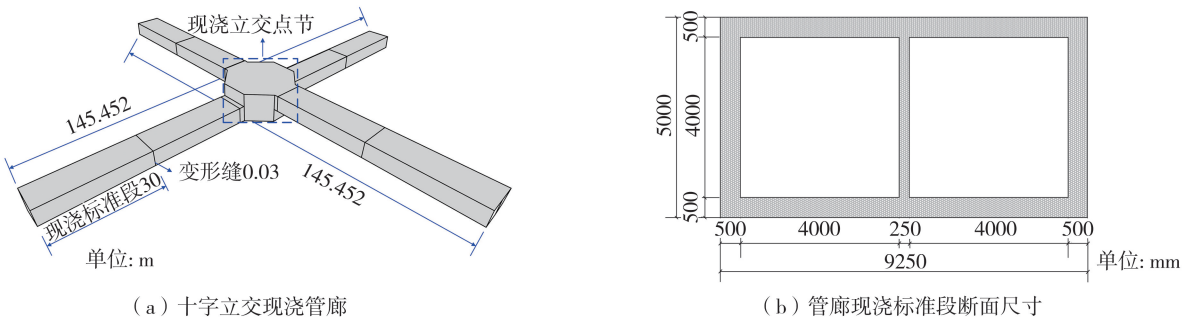


图 2 十字立交现浇管廊分析模型

Fig. 2 Analysis model of cross interchange cast-in-place utility tunnel

管廊处于总厚度为 80 m 的水平成层场地中,管廊顶面埋深为 3 m,场地土层力学参数见表 1。土体动剪切模量和阻尼比、剪应变之间的关系见图 3。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layer

编号	场地类别	厚度/m	剪切波速/(m/s)	密度/(kg/m ³)	阻尼比	泊松比
1(地表)	I	10	125	1900	0.05	0.42
2	I	10	175	1925	0.05	0.42

续表

编号	场地类别	厚度/m	剪切波速/(m/s)	密度/(kg/m ³)	阻尼比	泊松比
3	II	10	225	1950	0.05	0.42
4	II	10	275	1975	0.05	0.42
5	III	10	325	2000	0.05	0.42
6	III	10	375	2025	0.05	0.42
7	IV	10	425	2050	0.05	0.42
8	IV	10	475	2075	0.05	0.42
9(基岩)	—	∞	500	2100	0.02	0.25

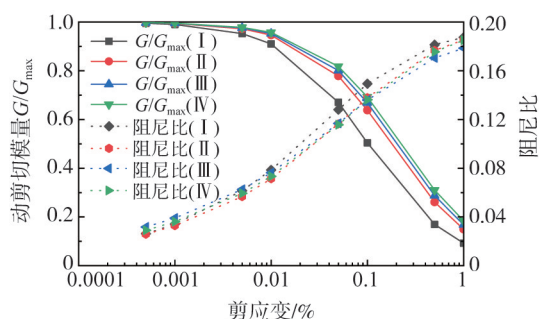


图3 土体动剪切模量和阻尼比与剪应变之间的关系

Fig. 3 Relationship between soil dynamic shear modulus and damping ratio and shear strain

入射地震波选择该管廊工程的安评波、El Centro波和Taft波,其中,根据管廊工程场地的地震安全评估报告,中震和大震安评波的峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)分别为0.20、0.38 g, El Centro波和Taft波的峰值地面加速度参照 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[25]均分别为0.20、0.40 g,入射地震波时程见图4。

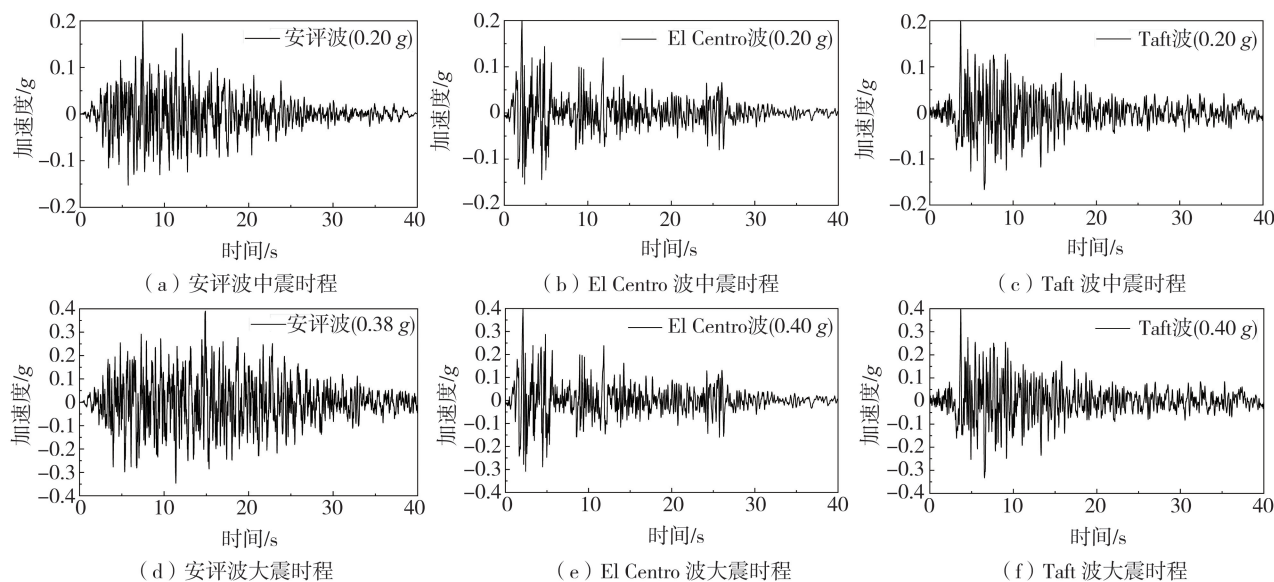


图4 地震波加速度时程

Fig. 4 Acceleration time-history of earthquake waves

1.3 最不利工况

GB/T 51336—2018《地下结构抗震设计标准》^[29]中,横断面反应位移法将地层最大相对变形、该时刻的地层剪力和结构惯性力作为等效地震荷载施加在结构上,对地下结构进行地震响应分析。然而,针对地下立交管廊,正交2个管廊埋深不同,立交节点各层之间最大相对变形不在同一时刻发生。此时,若仅以交叉节点顶底板之间最大相对变形进行分析,其结果可能无法涵盖整个结构的最不利工况。

近年来,多层多跨地铁车站结构抗震研究受到关注^[30],然而,利用反应位移法对地下多层结构进行抗震分析时,相关研究^[31-35]均是以结构顶底板之间最大相对变形作为结构最不利工况,均未考虑地下多层结构中间各层之间最大相对变形等工况。因此,地下多层结构中间各层最大相对变形与最不利工况的关系还不明确。

鉴于此,本文针对地下十字立交现浇管廊,通过 EERA 计算了不同地震波分别在中震和大震水准下的自由场对应立交节点顶中板之间最大相对变形发生时刻 t_1 、中底板之间最大相对变形发生时刻 t_2 、顶底板之间最大相对变形发生时刻 t_3 ,各层之间最大相对变形发生时刻见表 2。

由表 2 可知,在 Taft 波中震和大震水准下,自由场对应管廊不同层间最大相对变形发生时刻一致,根据 GB/T 51336—2018《地下结构抗震设计标准》^[29]可以直接用自由场对应顶底板之间最大相对变形作为最不利工况。然而,在安评波、El Centro 波作用下,各层之间最大相对变形发生时刻明显不同,整体结构最不利工况难以确定。因此,有必要对各层之间最大相对变形进行比较分析,以确定整体结构的最不利工况。

1.4 有限元模型

为了反映立交节点处的局部变形细节,利用 ABAQUS 有限元软件建立十字立交现浇管廊壳-弹簧计算模型,采用 S4 壳单元模拟管廊结构,地基弹簧单元模拟管廊与场地土之间的相互作用。非线性地基弹簧的力-位移关系见图 5(a)、(b)^[16]。在法向上,土体对结构不存在拉力,故只考虑法向地基弹簧的压缩刚度;切向上管廊与土体之间的切向力超过峰值摩擦力后会产生相对滑移,因此切向地基弹簧需设置屈服位移,由管廊所在土层的属性可得到屈服位移值为 0.01 m。 k_n 、 k_t 分别为法向和切向地基弹簧刚度,结构不同埋深处的地基弹簧刚度可由 1.1 节的式(3)、式(4)得到。此外,利用非线性压缩弹簧模拟变形缝处复合防水橡胶和混凝土的共同作用,结合现浇管廊变形缝防水构造形式^[36]和复合橡胶力学性能试验参数^[37],变形缝处非线性压缩弹簧力学行为见图 5(c)。图 5(c)中 k_1 为复合橡胶的压缩刚度, k_2 为混凝土的压缩刚度, x_1 为复合防水橡胶有效受力时变形缝两侧管段相对变形量, x_2 为现浇管廊标准段之间的变形缝宽度,本文中 k_1 、 k_2 、 x_1 、 x_2 的取值分别为 6.38×10^6 N/m、 1.78×10^{10} N/m、0.01 m、0.03 m。

表 2 各层最大相对变形发生时刻
Table 2 Moment of the maximum relative deformation between layers

地震波类型	PGA/g	各层最大相对变形发生时刻
安评波	0.20	$t_2=t_3=7.82$ s; $t_1=7.84$ s
	0.38	$t_2=15.46$ s; $t_1=t_3=15.88$ s
El Centro 波	0.20	$t_2=t_3=2.56$ s; $t_1=2.58$ s
	0.40	$t_2=2.26$ s; $t_1=t_3=2.58$ s
Taft 波	0.20	$t_1=t_2=t_3=7.00$ s
	0.40	$t_1=t_2=t_3=7.10$ s

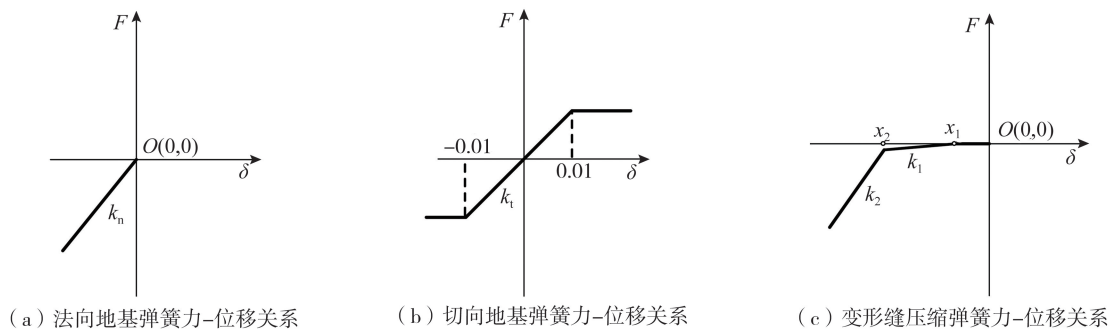
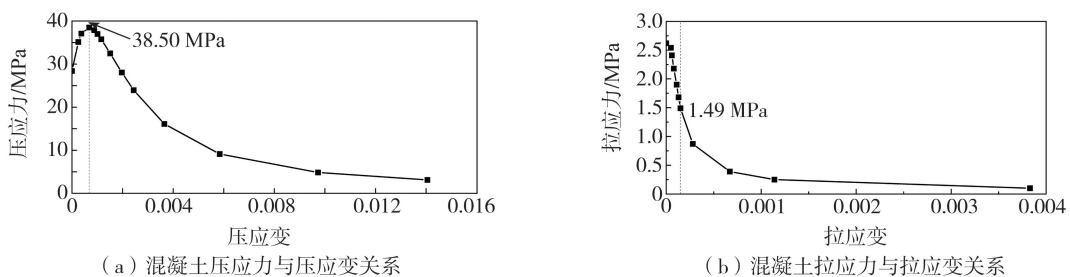


图 5 地基弹簧及变形缝处弹簧的力-位移关系

Fig. 5 Force-displacement relationship for foundation springs and deformation joint springs

采用 ABAQUS 内嵌的塑性损伤模型模拟混凝土在弹塑性工作状态下的力学行为,采用混凝土塑性损伤模型中定义的损伤因子作为定量表征结构损伤程度的指标。且损伤因子的范围为 0~1,其中 0 代表结构无损伤,1 代表结构完全损坏失去承载能力。模型中混凝土弹塑性力学行为关系见图 6,可以看到混凝土压应力峰值对应的受压损伤因子为 0.20,当受压损伤因子在 0.20 以下时,认为混凝土未被压碎;而当受拉损伤因子为 0.15 时,对应的混凝土拉应力为峰值的一半,认为混凝土受拉破坏^[38-39]。本文最终有限元模型及弹簧布置见图 7。



(a) 混凝土压应力与压应变关系

(b) 混凝土拉应力与拉应变关系

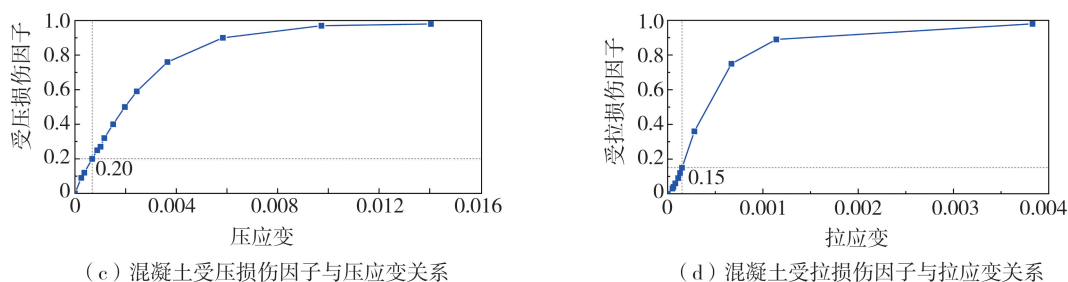


图6 混凝土弹塑性力学行为

Fig. 6 Elastoplastic mechanical behavior of concrete

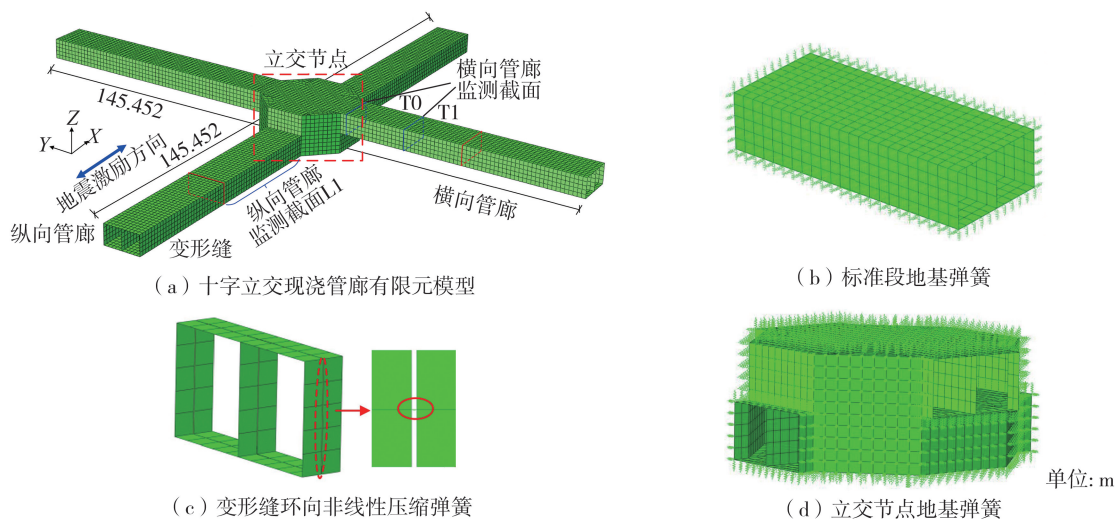


图7 十字立交现浇管廊有限元模型及弹簧布置

Fig. 7 Finite element model and springs arrangement of cross interchange cast-in-place utility tunnel

2 方法验证

将一维地震反应计算得到的地层相对变形时程、地层剪力时程和结构惯性力时程施加到立交管廊上,可以得到立交管廊的地震响应时程结果,本文称之为时程分析法(time history method, THM)。由此得到管廊在中震作用下轴力、剪力、弯矩峰值,以及大震作用下管廊不同监测位置层间位移角结果。以时程分析法计算结果为基准,引入内力峰值相对误差、最大层间位移角相对误差来判断本文计算方法的精度。

本文计算方法和时程分析法在不同地震波中震作用下的内力峰值结果对比,见表3。需要说明的是,结合图7中的地震激励方向(X 方向),地震作用下沿纵向管廊会产生 X 方向的轴力、 YZ 平面内的剪力,以及绕 Y 轴的弯矩,因此沿纵向管廊截面内力为截面合力,取纵向管廊整体长度范围内截面内力峰值进行对比;横向管廊产生环向内力,取图7中 $T0$ 截面的内力峰值进行对比。由表3可知,本文方法针对横向管廊和纵向管廊截面计算得到的内力峰值结果与时程分析法结果吻合良好,在安评波、El Centro波和Taft波作用下的平均误差分别约为0.52%、1.46%、0.92%,最大误差约为6%。

表3 本文计算方法和时程分析法内力峰值结果对比

Table 3 Comparison of internal force peak results between the proposed method in this paper and THM

地震波	计算方法	纵向管廊截面 轴力峰值/kN	纵向管廊截面 剪力峰值/kN	纵向管廊截面 弯矩峰值/ (kN·m)	横向管廊截面 轴力峰值/kN	横向管廊截面 剪力峰值/kN	横向管廊截面 弯矩峰值/ (kN·m)
安评波(0.20 g)	本文方法 ($t_2=t_3=7.82$ s)	32760 (1.36%)	51160 (0.04%)	37960 (0.50%)	1892.82 (0.42%)	536.32 (0.46%)	459.14 (0.19%)
	本文方法 ($t_1=7.84$ s)	32870 (1.70%)	50820 (0.70%)	37900 (0.34%)	1888.76 (0.20%)	532.04 (0.35%)	458.33 (0.01%)
	THM	32320	51180	37770	1884.93	533.89	458.27
El Centro波 (0.20 g)	本文方法 ($t_2=t_3=2.56$ s)	29970 (5.98%)	54330 (0.42%)	39770 (0.73%)	1791.36 (0.70%)	455.70 (0.78%)	473.02 (0.06%)

续表

地震波	计算方法	纵向管廊截面 轴力峰值/kN	纵向管廊截面 剪力峰值/kN	纵向管廊截面 弯矩峰值/ (kN·m)	横向管廊截面 轴力峰值/kN	横向管廊截面 剪力峰值/kN	横向管廊截面 弯矩峰值/ (kN·m)
Taft波(0.20g)	本文方法 ($t_1=2.58$ s)	29200 (3.25%)	53560 (1.83%)	39290 (0.48%)	1767.11 (0.66%)	444.90 (1.61%)	468.57 (1.00%)
	THM	28280	54560	39480	1778.84	452.19	473.31
	本文方法 ($t_1=t_2=t_3=7.00$ s)	47080 (3.09%)	66580 (0.12%)	51060 (0.89%)	2461.61 (0.56%)	661.30 (0.56%)	606.25 (0.32%)
	THM	45670	66500	50610	2448.02	657.65	604.34

注:表中的百分号数值表示利用本文方法与时程分析方法(THM)得到的内力峰值结果的相对误差。

立交节点(顶中板、中底板、顶底板)、横向管廊标准段(图7中的T1)和纵向管廊标准段(图7中的L1)在大震作用下的层间位移角结果对比,见表4。由表可知,各监测截面在2种方法下的层间位移角结果具有较好的一致性,在安评波、El Centro波和Taft波作用下的平均误差分别约为5.32%、4.48%、4.29%,最大误差为16.61%。

表4 本文计算方法和时程分析法层间位移角结果对比

Table 4 Comparison of inter-story displacement angle results between the proposed method in this paper and THM method

监测位置	安评波 0.38g			El Centro波 0.40g			Taft波 0.40g		
	本文方法 ($t_2=15.46$ s)	本文方法 ($t_1=t_3=15.88$ s)	THM	本文方法 ($t_2=2.26$ s)	本文方法 ($t_1=t_3=2.58$ s)	THM	本文方法 $t_1=t_2=t_3=7.10$ s	THM	
立交节点	顶中板	0.008 050 (6.08%)	0.008 410 (1.88%)	0.008 571	0.008 299 (1.11%)	0.008 829 (5.21%)	0.008 392	0.010 701 (9.31%)	0.009 790
	中底板	0.005 582 (1.81%)	0.004 741 (16.61%)	0.005 685	0.003 063 (4.93%)	0.003 165 (1.77%)	0.003 222	0.004 122 (4.80%)	0.004 330
	顶底板	0.006 818 (3.04%)	0.006 576 (6.48%)	0.007 032	0.005 681 (4.98%)	0.005 997 (0.30%)	0.005 979	0.007 412 (0.63%)	0.007 459
横向管廊	T1	0.005 737 (1.79%)	0.005 912 (4.90%)	0.005 636	0.005 557 (8.22%)	0.006 326 (4.48%)	0.006 055	0.007 454 (2.21%)	0.007 293
纵向管廊	L1	0.001 767 (4.59%)	0.001 741 (5.99%)	0.001 852	0.000 399 (8.28%)	0.000 411 (5.52%)	0.000 435	0.000 614 (4.51%)	0.000 643

注:表中的百分号数值表示利用本文方法与时程分析方法(THM)得到的层间位移角结果的相对误差。

综上,可以看出,本文反应位移法得到的峰值内力和层间变形响应与时程分析法吻合较好,这充分验证了本文反应位移法的计算精度,说明本文方法能够准确计算地下立交管廊在地震作用下的内力和变形响应,实际工程中可以利用本文方法对地下立交管廊进行横向抗震设计。

3 结论

本文结合横断面反应位移法和纵断面反应位移法,提出了地下立交管廊横向抗震分析的一个反应位移法,并以某地下十字立交现浇管廊为研究对象,通过ABAQUS有限元软件建立了地下立交管廊荷载-结构分析模型,以壳单元模拟管廊结构,土弹簧单元模拟土-管廊之间的相互作用,非线性弹簧单元模拟现浇管廊变形缝的力学行为,讨论了立交管廊各层之间最大相对变形及其发生时刻,并通过时程分析法对本文方法进行了验证。主要得出以下结论:

1) 本文反应位移法具有良好的计算精度,能够准确的计算立交管廊在地震作用下的内力和变形响应,工程中可以利用本文方法对均匀场地或水平成层场地的立交管廊进行横向抗震设计。

2) 地下管廊立交节点各层之间最大相对变形不在同一时刻发生,有必要计算各层之间最大相对变形,以确定整体结构最不利工况。若仅考虑结构顶底板之间最大相对变形对立交管廊进行抗震设计,可能无法涵盖整体结构的最不利工况。

需要指出的是,本文方法不局限于十字立交现浇管廊结构的横向抗震分析,也可应用于不同尺寸的T型、L型等交叉形式,尤其是立交形式的地下现浇或预制管廊横向抗震分析。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下综合管廊建设规划技术导则(修订版)[EB/OL]. (2023-05-26). https://www.mohurd.gov.cn/qongkai/zc/wjk/art/2023/art_17339_772517.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical guidelines for urban underground utility tunnel construction planning (revised edition) [EB/OL]. (2023-05-26). https://www.mohurd.gov.cn/qongkai/zc/wjk/art/2023/art_17339_772517.html. (in Chinese)
- [2] 袁勇, 朱力, 禹海涛, 等. 综合管廊抗震分析研究进展综述[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(11): 1821-1831.
YUAN Yong, ZHU Li, YU Haitao, et al. Review on seismic analysis of utility tunnels[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(11): 1821-1831. (in Chinese)
- [3] 梁建文, 陈慧芳, 李东桥, 等. 地下管廊抗震研究现状综述[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(2): 209-222.
LIANG Jianwen, CHEN Huifang, LI Dongqiao, et al. Review of seismic analysis of underground utility tunnels[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57(2): 209-222. (in Chinese)
- [4] 史晓军, 陈隽, 李杰. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(I)——试验方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 147-154.
SHI Xiaojun, CHEN Jun, LI Jie. Shaking table test on utility tunnel under non-uniform seismic excitations (I): Experimental setup[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(1): 147-154. (in Chinese)
- [5] 陈隽, 史晓军, 李杰. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(II)——试验结果[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 123-130.
CHEN Jun, SHI Xiaojun, LI Jie. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations(II): Experimental results[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(2): 123-130. (in Chinese)
- [6] 岳庆霞, 李杰. 近似 Rayleigh 地震波作用下地下综合管廊响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 409-416.
YUE Qingxia, LI Jie. Response analysis of utility tunnel in earthquake of approximate Rayleigh waves[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 409-416. (in Chinese)
- [7] 杨剑, 王恒栋. 液化土中地下综合管廊的地震响应分析初探[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊1): 1762-1769.
YANG Jian, WANG Hengdong. Preliminary study on seismic response of utility tunnel in liquefiable soils[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Sup. 1): 1762-1769. (in Chinese)
- [8] 施有志, 孙爱琴, 林树枝, 等. Rayleigh 波作用下地下综合管廊动力响应三维数值分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(4): 196-210.
SHI Youzhi, SUN Aiqin, LIN Shuzhi, et al. Three dimensional(3D) numerical analysis of dynamic response of underground utility tunnels to Rayleigh wave effects[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(4): 196-210. (in Chinese)
- [9] 郭恩栋, 王鹏宇, 刘述虹, 等. 典型综合管廊体系的地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1): 124-134.
GUO Endong, WANG Pengyu, LIU Shuhong, et al. Seismic response analysis of typical utility tunnel system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1): 124-134. (in Chinese)
- [10] 蒋录珍, 李双飞, 石文倩, 等. 饱和土体-地下综合管廊结构地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1224-1230.
JIANG Luzhen, LI Shuangfei, SHI Wenqian, et al. Seismic response of underground utility tunnel structures in saturated soils[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1224-1230. (in Chinese)
- [11] 李金奎, 汪洋, 杨承源, 等. 基于土体等效线性黏弹性模型的地下综合管廊地震响应[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 64-70, 76.
LI Jinkui, WANG Yang, YANG Chengyuan, et al. Seismic response of underground utility tunnel based on equivalent linear viscoelastic model of soil[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 64-70, 76. (in Chinese)
- [12] 阮滨, 吉瀚文, 刘华北, 等. 大尺度可液化场地综合管廊纵向抗震分析方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 99-104.
RUAN Bin, JI Hanwen, LIU Huabei, et al. Longitudinal seismic analysis method of utility tunnel in large-scale liquefiable site[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 99-104. (in Chinese)
- [13] 汤鹏, 杨明, 庄海洋, 等. 越江电力地下综合管廊结构横向抗震性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 507-515.
TANG Peng, YANG Ming, ZHUANG Haiyang, et al. Lateral seismic performance of the utility tunnel crossing the Yangzi river [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 507-515. (in Chinese)
- [14] 黄德龙, 宗钟凌, 汤爱平, 等. 穿越非均匀土体综合管廊振动台试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(9): 52-68.
HUANG Delong, ZONG Zhongling, TANG Aiping, et al. Shaking table experimental study of utility tunnel in non-homogeneous soil [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(9): 52-68. (in Chinese)
- [15] JIN Y H, GUO E D, WU H L, et al. Dynamic-response analysis of the branch system of a utility tunnel subjected to near-fault and far-field ground motions in different input mechanisms[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2022, 130(1): 167-186.
- [16] 梁建文, 闫启超, 王长祥, 等. 基于反应位移法的地下 T 型交叉管廊抗震分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(5): 36-47.
LIANG Jianwen, YAN Qichao, WANG Changxiang, et al. Seismic analysis of underground T-type utility tunnels by response deformation method[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(5): 36-47. (in Chinese)
- [17] 梁建文, 闫启超, 王长祥, 等. 地下 T 型交叉管廊的抗震时程分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 1-12.
LIANG Jianwen, YAN Qichao, WANG Changxiang, et al. Seismic time-history analysis of T-type underground utility tunnels[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 1-12. (in Chinese)
- [18] 梁建文, 李东桥. 地下 T 型交叉管廊纵向抗震设计方法[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1635-1643.
LIANG Jianwen, LI Dongqiao. Longitudinal seismic design of T-type underground precast utility tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1635-1643. (in Chinese)

- [19] 董博文, 李东桥, 梁建文, 等. 井字型交叉地下管廊纵向抗震分析[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(5): 90-99.
DONG Bowen, LI Dongqiao, LIANG Jianwen, et al. Longitudinal seismic analysis of underground utility tunnels with multiple intersections[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(5): 90-99. (in Chinese)
- [20] 李东桥, 梁建文, 甘梦云, 等. 地下交叉管廊纵向抗震设计的壳-弹簧模型[J/OL]. 工程力学, 1-12[2025-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20230828.1652.046.html>.
LI Dongqiao, LIANG Jianwen, GAN Mengyun, et al. A shell-spring model for longitudinal seismic design of underground cross utility tunnels[J]. Engineering Mechanics, 1-12[2025-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20230828.1652.046.html>. (in Chinese)
- [21] 梁建文, 周莹莹, 李东桥, 等. 地下十字交叉预制管廊的纵向抗震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(4): 182-189.
LIANG Jianwen, ZHOU Yingying, LI Dongqiao, et al. Longitudinal seismic analysis of underground cross precast utility tunnels[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(4): 182-189. (in Chinese)
- [22] LI D Q, LIANG J W, DONG B W, et al. A multi-scale model for longitudinal seismic design of prefabricated utility tunnel based on multi-point constraints[J]. Structures, 2024, 62: 106176.
- [23] LIANG J W, ZHANG J Q, DONG B W, et al. Shaking table tests on the seismic performance of prefabricated T-shaped cross utility tunnel[J]. Structures, 2023, 58: 105516.
- [24] LI D Q, LIANG J W, BA Z N. Longitudinal seismic analysis for underground structures passing through soft-hard strata based on periodic stratum deformation[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 169: 106256.
- [25] GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
GB 50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [26] 梁建文, 官其铝, 李东桥, 等. 地下预制管廊纵断面抗震分析的反应位移法[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(6): 159-166.
LIANG Jianwen, GUAN Qilv, LI Dongqiao, et al. Response deformation method of longitudinal-section seismic analysis of underground precast utility tunnel[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(6): 159-166. (in Chinese)
- [27] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA—a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soils deposits[R]. South California: University of Southern California, 2000.
- [28] GB 50267—2019 核电厂抗震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
GB 50267—2019 Standard for seismic design of nuclear power plants[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [29] GB/T 51336—2018 地下结构抗震设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
GB/T 51336—2018 Standard for seismic design of underground structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [30] 陈之毅, 刘文博, 陈炜. 多层地铁站结构性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 811-820.
CHEN Zhiyi, LIU Wenbo, CHEN Wei. Performance experiment of a multi-story subway station[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(6): 811-820. (in Chinese)
- [31] 李新星, 陈鸿, 陈正杰. 地铁站结构抗震设计方法的适用性研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊2): 322-327.
LI Xinxing, CHEN Hong, CHEN Zhengjie. Study on applicability of design method for seismic analysis of subway station[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup. 2): 322-327. (in Chinese)
- [32] 刘钧, 沈晓伟. 围护墙参与作用下3层地铁站的结构抗震分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(7): 629-636.
LIU Jun, SHEN Xiaowei. Structural seismic analysis on a 3-storey metro station with retaining walls[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(7): 629-636. (in Chinese)
- [33] 鲁嘉星, 禹海涛, 贾坚. 软土地区地铁站横断面抗震设计方法适用性研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(23): 80-84.
LU Jiaxing, YU Haitao, JIA Jian. Feasibility research on seismic design methods for cross section of subway station in soft soil area[J]. Building Structure, 2014, 44(23): 80-84. (in Chinese)
- [34] 杨靖, 云龙, 庄海洋, 等. 三层三跨框架式地铁地下车站结构抗震性能水平研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2240-2248.
YANG Jing, YUN Long, ZHUANG Haiyang, et al. Seismic performance levels of frame-type subway underground station with three layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2240-2248. (in Chinese)
- [35] 张椿民. 地下多层地铁站结构抗震设计对比分析[J]. 市政技术, 2022, 40(12): 50-58.
ZHANG Chunmin. Comparative analysis of structural seismic design of multi-storey underground subway station[J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(12): 50-58. (in Chinese)
- [36] 周健民. 综合管廊变形缝接头的设计形式及适用性分析[J]. 特种结构, 2016, 33(2): 60-65.
ZHOU Jianmin. Design form and applicability analysis for deformation seam and joint of municipal tunnel[J]. Special Structures, 2016, 33(2): 60-65. (in Chinese)
- [37] 张铨婧, 莫海鸿, 黄臣瑞, 等. 预制综合管廊橡胶密封垫受压性能研究及断面设计[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(3): 399-405.
ZHANG Quanjing, MO Haihong, HUANG Chenrui, et al. Study of compression performance and cross-section design of rubber gasket for prefabricated utility tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(3): 399-405. (in Chinese)
- [38] 郭明. 混凝土塑性损伤模型损伤因子研究及其应用[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 128-132, 163.
GUO Ming. Research and application of damage factor in concrete plastic-damage model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 128-132, 163. (in Chinese)
- [39] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊1): 167-171, 213.
LIU Wei, XU Ming, CHEN Zhongfan. Parameters calibration and verification of concrete damage plasticity model of ABAQUS[J]. Industrial Construction, 2014, 44(Sup. 1): 167-171, 213. (in Chinese)