

DOI: 10.11779/CJGE201804001

浅埋地下结构地震反应分析的惯性力-位移法

杜修力, 许紫刚, 许成顺, 李 洋

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 现有的地下结构地震反应简化分析方法, 如: 地震系数法、自由场变形法、柔度系数法、反应位移法、反应加速度法和 Pushover 分析方法等, 均没有考虑上覆回填堆积土体或地震中因剪切破坏失效后的上覆堆积土体在竖向地震作用下产生的惯性力效应。已有研究表明, 这种上覆土体竖向惯性力效应对浅埋地下结构支撑构件的抗震性能(抗剪强度和极限变形)有重要影响, 是评价浅埋地下结构抗震安全性的关键因素之一, 不能忽视。为此, 针对浅埋地下结构地震反应分析问题, 提出了一种考虑上覆土体竖向惯性力影响的反应位移法, 简称惯性力-位移法。给出了惯性力-位移法分析模型的两个关键参数确定方法, 包括地基弹簧刚度及上覆土体最大竖向惯性力。工程实例分析结果表明, 建议的惯性力-位移法与传统的反应位移法相比, 不仅克服了传统的反应位移法不能给出中柱轴力的缺陷外, 其它反应量的计算精度与之基本相当。

关键词: 地下结构; 抗震分析; 惯性力-位移法

中图分类号: TU435; TU92 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0583-09

作者简介: 杜修力(1962-), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事地震工程领域研究。E-mail: duxili@bjut.edu.cn。

Inertia force-displacement method for seismic analysis of shallow buried underground structures

DU Xiu-li, XU Zi-gang, XU Cheng-shun, LI Yang

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As for the existing practical methods for seismic analysis of underground structures, including seismic coefficient method, free-field racking deformation method, flexible coefficient method, response displacement method, response acceleration method and Pushover analysis method, the inertia force of overburden backfilled soil or overburden soil which has shear failure under the vertical ground motion is not considered. The recent researches show that the vertical inertia force of overburden soil has important influence on the seismic performances (shear strength and ultimate deformation) of support components for shallow buried underground structures. And it is also one of the critical factors in the seismic safety evaluation of shallow buried underground structures, which cannot be ignored. A response displacement method is proposed for seismic analysis of shallow buried underground structures considering the vertical inertia force of overburden soil, called inertia force-displacement method for short. The determination methods for two critical parameters are given, including the foundation spring coefficient and the maximum vertical inertia force of overburden soil layer. The analysis results of engineering projects show that the inertia force-displacement method overcomes the defect of the classical response displacement methods which cannot calculate the axial force of the center column, and the other results have a similar calculation accuracy compared with those of the classical response displacement methods.

Key words: underground structure; seismic analysis; inertia force-displacement method

0 引言

1995年1月17日凌晨5时46分在日本阪神地区兵库县发生里氏7.2级地震, 神户市内大量的地铁车站、区间隧道等地下结构遭到破坏, 其中破坏最为严重的是大开(Daikai)车站。大开车站作为世界地震

工程历史上首例在地震中发生塌毁破坏的大型地下结构受到世界各国学者的广泛关注, 此后的地下结构抗

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005); 教育部“创新团队发展计划”项目(IRT13044)

收稿日期: 2016-12-07

震研究工作也取得较大的进展^[1], 特别是针对大开地铁车站震害事例开展的地下结构地震破坏机理和模式以及提高其抗震性能的工程措施等方面的研究^[2-4]。

关于地下结构抗震分析, 目前国内外学者已经提出了多种理论和方法, 其中包括解析方法和数值方法两大类。为进一步适应地下工程的快速发展, 国内外学者对地下结构抗震分析方法进行一定的假设和简化, 提出了一系列较为实用的分析方法^[5]。实用分析方法是通过采用静力学理论近似地解决动力学问题的简化方法, 该类方法能在一定程度上反映地下结构在地震作用下的动力效应。早期国内外学者借鉴地面结构的抗震分析方法, 用等效的静力荷载代替随时间变化的地震作用, 提出地震系数法^[6]。20世纪60年代, 随着地下结构抗震研究工作的不断深入, Newmark^[7]认为地下结构在地震动作用下的反应主要受周围土层变形影响为主, 并非地震系数法所述的惯性力。根据这一特点, Wang^[8]和 Hashash 等^[9]提出了自由场变形法, 通过弹性波动理论或数值方法计算自由场的变形后便能确定地下结构的地震反应。自由场变形法忽略了结构与周围土体之间因刚度不同产生的变形差异, Penzien 等^[10]在此基础上根据地震波动分析的基本思想以及地下结构地震时变形与周围岩土介质地震变形相互协调的地震观测结果建立了柔度系数法, 该方法通过引入土-结构相互作用系数来反应土与结构之间的相互作用。随后, 各国学者通过大量的现场观测、试验研究和理论分析, 发现地下结构在地震作用下跟随周围土层一起运动, 其位移、速度和加速度等结构反应均与周围土层基本一致^[11-12], 根据地下结构的这一动力响应特征日本学者提出反应位移法^[13]。之后, 国内外学者也从地基弹簧刚度和地震荷载的确定等方面对反应位移法开展了大量的工作并取得较大的发展和改进^[14-16], 该方法现已作为地下结构抗震设计的基本方法编入中国国家规范^[17-18]。为了更准确反映地下结构与周围土体之间的相互作用效应, 国内外学者提出并发展了建立土-结构整体分析模型的反应加速度法^[19]和 Pushover 分析方法^[20], 其中 Pushover 分析方法可以较好地考虑强震作用下土体与结构的非线性, 从而实现罕遇地震作用下地下结构的弹塑性分析并获得地下结构完整的能力曲线。

总体来说, 随着国内外学者对地下结构抗震性能和震害特点认识的不断加深, 关于地下结构抗震分析方法也在不断完善。但是, 上述各实用分析方法仅注意到了场地土层地震水平变形对地下结构地震反应影响的剪切效应, 忽略了另一个关键问题——竖向地震作用引起的土层惯性力对地下结构地震反应的影响, 即上覆土层的惯性力效应。相关研究表明竖向地震动

有可能是引起地下结构破坏的关键因素^[21-23], 特别是, 对于浅埋地下结构情况, 上覆土体可能在地震作用初始阶段发生剪切破坏^[3], 此时, 它与地下结构周围的其它土体已不是一个连续的整体, 在后续的地震反应中, 它的作用仅是堆积到地下结构顶板上与周围土体发生弱连接的堆积土(类似于回填土体情况)效应, 对地下结构的约束作用和地震反应影响也完全不同于连续土体对应的情况。与传统的反应位移法对应的力学分析模型相比主要存在两个方面的差异: 一是地基弹簧系数计算模型不同; 二是传统的反应位移法模型忽略了上覆土体在竖向地震作用下施加到地下结构顶板上的惯性力效应。后面的分析表明, 前者的差异对地下结构地震反应的影响并不明显, 但后者却对地下结构的关键支撑构件的竖向受力评价会产生极大影响, 实际上是改变了支撑柱的轴压比, 从而改变了支撑柱的抗剪强度和变形性能^[23]。对地下结构地震反应受力而言, 支撑柱的抗剪强度提高而极限变形能力降低是不利的, 这意味着支撑柱将分担更多的由于土层变形而作用在地下结构上的水平向剪力, 同时, 其极限变形能力的降低使得它可能先于侧墙遭到破坏, 进而导致顶板以及地下结构体系的整体毁坏。因此, 简化的实用分析方法能否准确地反映地下结构在地震作用时的支撑构件轴向受力是评价该方法合理性的非常关键的因素之一。

本文基于传统反应位移法的计算模型, 提出了考虑上覆土体竖向惯性力效应的浅埋地下结构地震反应分析的惯性力-位移法。通过与动力分析方法和传统反应位移法计算结果的比较, 验证了本文方法的计算精度和合理性。

1 惯性力-位移法

1.1 力学模型

阪神地震中大开车站的典型破坏断面如图 1 所示, 在水平地震动和竖向地震动共同作用下, 大开车站上覆土体出现剪切破坏(实际上它本身就是回填堆积土体), 因此可以认为在地震荷载作用下上覆土体对车站结构的约束作用减弱。

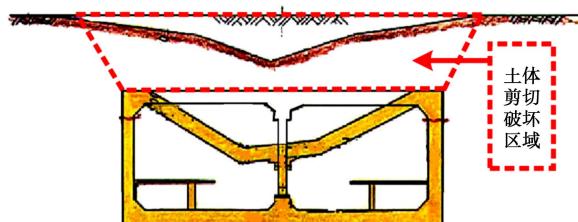


图 1 大开车站破坏示意图^[3]

Fig. 1 Damage of Daikai subway station^[3]

然而, 在中国最新颁布的《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909—2014)^[18]中, 当采用反应位移法进行地下结构地震反应计算时, 在结构周边均设置地基弹簧并施加土层相对位移、土层剪力和结构水平惯性力, 其力学模型如图2所示。从该力学模型可以看出, 传统反应位移法同目前大多数地下结构抗震简化分析方法一样, 仅注意到了场地土层地震水平变形对地下结构地震反应影响的剪切效应。也就是说, 传统反应位移法对于类似大开车站等浅埋结构形式, 上覆土体在剪切破坏后失去约束作用而产生较大的竖向惯性力效应的地下结构抗震分析问题并不适用。

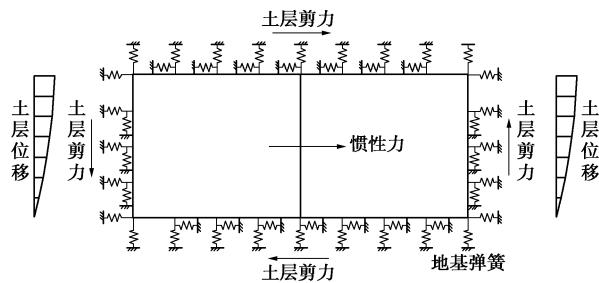


图2 传统反应位移法力学模型

Fig. 2 Mechanial model for response displacement method

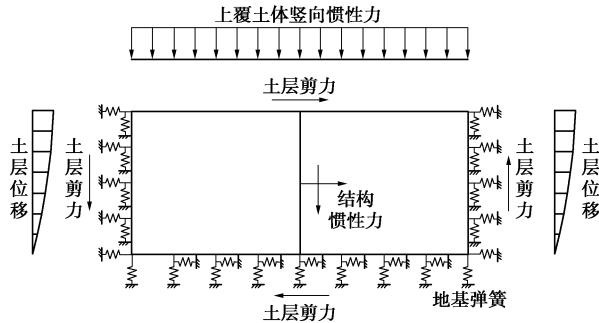


图3 惯性力-位移法力学模型

Fig. 3 Mechanial model for inertia force-displacement method

因此, 在传统反应位移法计算模型基础上, 舍弃结构顶部的压缩和剪切弹簧, 同时考虑剪切破坏后的上覆土体以及地下结构本身在竖向地震作用下产生的竖向惯性力, 提出一种惯性力-位移分析法, 其力学模型如图3所示。在实际地震过程中, 结构上覆土体最大竖向惯性力发生时刻和结构顶底板处土层最大水平相对变形发生的时刻可能不一致, 该模型考虑对地下结构最不利的地震荷载工况进行简化处理。从该力学模型可以看出, 与传统反应位移法相比, 该模型更能体现类似大开地铁车站等浅埋地下结构在强震作用下的动力反应特征。

1.2 关键参数确定

对于计算参数而言, 本文提出的惯性力-位移分析法模型不需要确定结构顶部的压缩弹簧与剪切弹簧的

刚度系数, 而需要确定结构及其上覆土体在竖向地震荷载作用下所能产生的最大竖向惯性力。除此之外, 其余各荷载可按传统反应位移法的方式施加在结构上。因此, 本节主要阐述本文方法与传统反应位移法所不同的两个关键参数的确定方法。

(1) 地基弹簧刚度系数

在确定地基弹簧刚度系数时, 惯性力-位移法忽略结构上覆土体与周围其他土体之间的相互作用, 即认为上覆土体不作为连续介质考虑, 如图4所示。尽管该计算模型与传统反应位移法有所差异, 但仍可借鉴传统反应位移法求解地基弹簧刚度的思路, 即采用静力有限元方法^[18]。

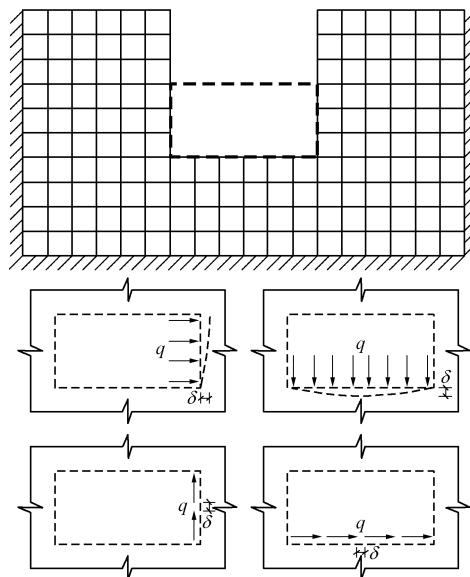


图4 惯性力-位移分析法基床系数计算模型

Fig. 4 Model for foundation spring coefficient of inertia force-displacement method

对于本文模型, 需要确定结构侧墙位置和底板位置水平和竖直两个方向的弹簧刚度。在结构侧墙位置、底板位置对应土体处分别施加水平和竖直方向的均匀荷载 q , 然后分别计算各种荷载作用下的变形 δ , 得到基床系数 $K=q/\delta$ 。出于简化考虑, 假设结构同一个面上的弹簧性质相同, 即弹簧刚度一致, 因此结构在均匀荷载 q 的作用下某一面的变形 δ 应为该面各个结点变形的平均值。确定基床系数后, 地基弹簧的刚度可按下式计算:

$$k = KLd \quad (1)$$

式中 k 为压缩或剪切地基弹簧刚度 (N/m); K 为基床系数 (N/m^3); L 为地基的集中弹簧的间距 (m); d 为地层沿地下结构纵向的计算长度 (m)。

(2) 地下结构及其上覆土体竖向惯性力

惯性力-位移法的另一个关键参数是确定结构及上覆土体的竖向惯性力, 这也是本文方法与传统反应

位移法及其它地下结构抗震简化分析方法最大的区别。竖向地震动作用下, 结构及其上覆土体的竖向加速度反应很大程度上取决于结构的竖向抗压刚度, 尤其中柱的抗压刚度影响更为明显^[22]。因此, 可将中柱等效成一定宽度范围($B/2 \times D \times H$, B 为结构宽度, D 为柱间距, H 为结构高度)的土层, 如图5所示, 对等效后的一维场地进行竖向地震反应分析。为方便起见, 假设结构竖向加速度等于等效后土层中心位置加速度, 上覆土体竖向加速度也等于其中心位置加速度, 并以此作为两者竖向惯性力的计算依据。

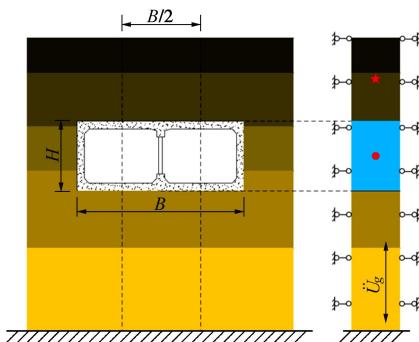


图5 结构及其上覆土体竖向加速度计算模型

Fig. 5 Model for vertical peak acceleration of overburden soil layer

1.3 实施步骤

从惯性力-位移法的力学模型可知, 该方法的实施步骤与传统反应位移法比较类似, 但也有所差异, 其具体实施步骤如下:

(1) 求解自由场水平地震反应。采用等效线性化程序SHAKE91, EERA等方法对自由场模型进行水平地震作用下的一维土层地震反应分析, 求解结构位置处对应土层的相对变形、土层剪应力和土层水平加速度。

(2) 求解结构周围地基弹簧刚度系数。采用步骤I中一维土层地震反应分析所得的土体有效弹性模量作为输入参数, 建立图4所示的有限元模型, 求解结构周围地基弹簧的刚度系数。

(3) 求解地下结构及其上覆土体竖向惯性力。对自由场模型进行竖向地震作用下的一维土层地震反应分析, 求解结构及其上覆土体中心位置处最大加速度反应值, 并以此计算各自竖向惯性力。

(4) 建立惯性力-位移法力学分析模型。按图3所示的惯性力-位移分析法模型施加步骤I, II, III确定的结构周围地基弹簧以及地震荷载, 进行静力计算。

2 实例分析

2.1 计算模型与参数

为验证惯性力-位移法对强震作用下浅埋地下结

构地震反应分析的合理性和计算精度, 并揭示阪神地震中大开车站的破坏机理, 选取1995年阪神地震中遭到严重破坏的大开车站进行实例分析, 其结构横断面如图6所示。

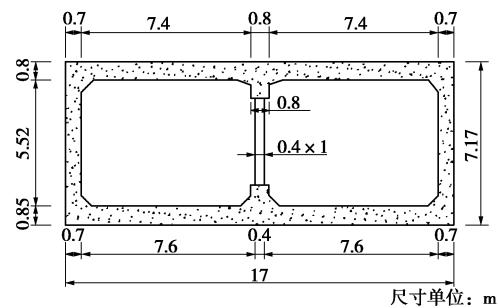


图6 大开车站标准断面图

Fig. 6 Standard cross-section of Daikai subway station

大开车站顶面位于地下4.8 m, 所处场地主要由全新世砂土和更新世黏土组成, 根据参考文献[24], 该场地的土层情况及其物理参数如表1所示, 由于缺少当地土体的动力参数, 采用典型的砂土和黏土的剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的试验曲线^[25], 如图7所示。

表1 土层物理性质表

Table 1 Physical properties of soils

分层	土质	深度 /m	密度 /(t·m ⁻³)	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	泊松比
1	填土	0~1.0	1.9	140	0.333
2	砂土	1.0~5.1	1.9	140	0.488
3	砂土	5.1~8.3	1.9	170	0.493
4	黏土	8.3~11.4	1.9	190	0.494
5	黏土	11.4~17.2	1.9	240	0.490
6	砂土	17.2~39.2	2.0	330	0.487
7	基岩	>39.2	2.1	500	0.470

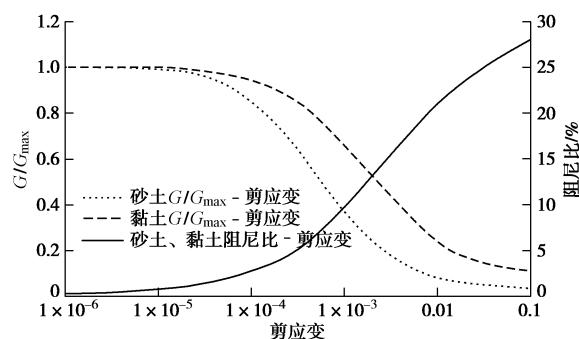


图7 砂土、黏土本构关系曲线

Fig. 7 Constitutive curves of sand and clay

采用通用有限元软件ABAQUS对大开车站横断面进行地震反应分析, 建模时结构采用梁单元, 周围土体采用实体单元。与顶板、底板和侧墙不同, 中柱

在车站纵向是等间距(3.5 m)分布的, 需按一定原则等效成一个柱间距长度的一面纵墙, 并和顶板、底板及侧墙一样, 取单位长度作为研究对象。顶板、底板和侧墙弹性模量取为 3×10^4 MPa, 密度取为 2.5×10^3 kg/m³。为保证等效前后截面的抗弯刚度、抗剪刚度、抗压刚度及截面质量均不改变, 等效后的中柱弹性模量取为 8.57×10^3 MPa, 密度取为 7.14×10^2 kg/m³。

阪神地震中, 共观测记录到多达200条地震动记录, 但在大开车站所在位置并没有相关的地震动记录, 因而进行震害分析时通常选取其附近观测站点的地震动记录作为动荷载输入。目前的研究工作大多选取神户大学及神户Port岛等几处地震动观测记录作为地震动力输入荷载。由于Port岛上台站距离大开地铁站最近, 并且Port岛上的地质条件与大开车站附近场地土的地质条件十分相似, 另外, 由于神户大学地震记录在地表露头硬基岩处($V_s=1043$ m/s)获得, 受局部土层特性影响较小, 因此本文同时采用阪神地震中Port岛上获得的地下83 m处以及神户大学获得的南北向水平地震动和竖向地震动记录数据作为输入地震动, 其加速度时程曲线分别如图8, 9所示。

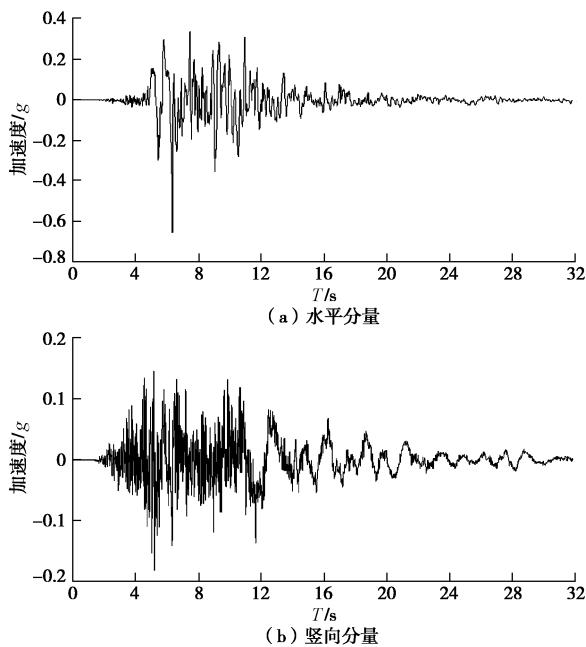


图8 Port岛地下83 m处获得的阪神地震加速度时程

Fig. 8 Time histories of acceleration at -83 m in Port Island

2.2 一维土层地震反应分析

无论是传统反应位移法还是惯性力-位移法, 均需要对一维场地进行地震反应分析。采用等效线性化程序EERA对大开车站场地进行地震反应分析, 结果如图10所示, 分别对应不同水平地震作用下结构顶底板位置处对应土体发生最大水平相对位移时刻, 一维场地的水平位移分布。

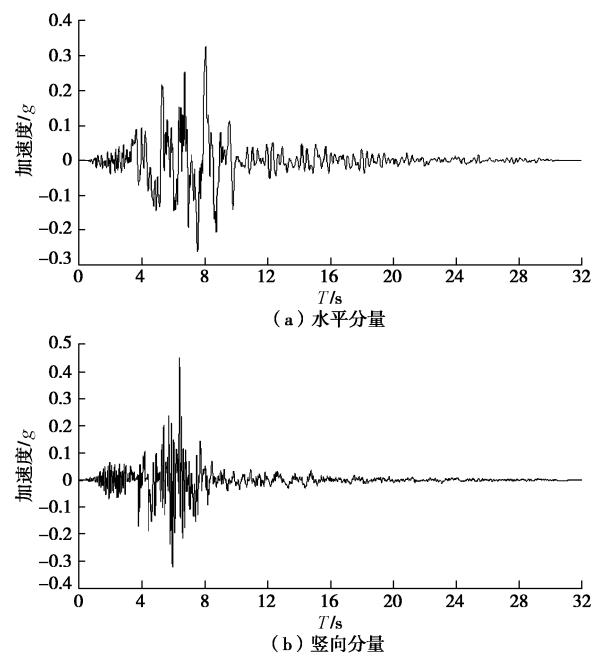


图9 神户大学获得的阪神地震加速度时程

Fig. 9 Time histories of acceleration at Kobe University

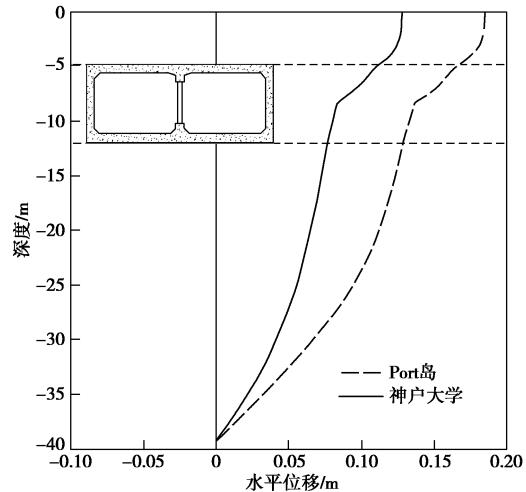


图10 一维场地水平位移分布

Fig. 10 Distribution of displacement of 1D free-field

由图10可知, 由于输入的水平加速度存在一定的差异, 两者对应的地表处的水平位移也存在差异。而大开车站正好处于砂土与黏土交界处, 是一维场地变形较为集中的位置, 两种水平地震作用下结构顶底板位置处对应土体的最大水平相对位移分别为38.789 mm和35.577 mm。此外, 一维场地的水平位移分布与土层参数有较大关系, 且水平位移分布与规范^[18]推荐的余弦形式有较大的差别。

等效线性化程序EERA仅可以分析一维场地的水平地震反应, 因此对场地进行竖向地震反应分析时可采用通用有限元软件ABAQUS。采用一维土层反应分析获得的土体有效弹性模量作为输入参数, 中柱等效后的土体的弹性模量取为 4.03×10^2 MPa。建立对应不

同地震动的一维土层竖向地震反应分析模型, 求得上覆土体中心位置处竖向加速度反应如图 11 所示, Port 岛和神户大学获得的地震动对应上覆土体中心位置处的峰值加速度分别为 -3.13 m/s^2 和 -6.14 m/s^2 , 加速度放大系数分别为 1.74 和 1.39。究其原因是由于 Port 岛地震动的水平加速度峰值 ($0.656g$) 远大于神户大学地震动的水平加速度峰值 ($0.328g$), 采用等效线性化程序 EERA 对自由场进行地震反应分析后, 前者对应的等效剪切模量要小于后者, 因此前者对应的自由场模型对竖向地震动放大效应更为明显。此外, 两者在结构中心位置处对应的加速度分别为 -2.01 m/s^2 和 -4.26 m/s^2 。

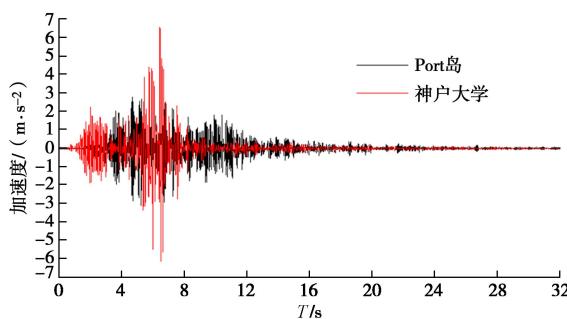


图 11 上覆土体中心位置处加速度反应

Fig. 11 Response of acceleration at middle of overburden soil

2.3 地基弹簧刚度系数影响分析

采用一维土层地震反应分析所得的土体有效弹性模量作为输入参数, 分别建立传统反应位移法和惯性力-位移分析法中求解地基弹簧的静力有限元模型。由于计算模型的不同, 惯性力-位移分析法与传统反应位移法的基床系数也有所差异。从表 2 可知, 惯性力-位移分析法模型在计算基床系数时不考虑传统反应位移法中结构上覆土体的作用, 其基床系数略低于传统模型。而对于同一种分析模型而言, 与神户大学地震动

对应的各个方向的地基弹簧刚度系数都要略大于 Port 岛地震动对应的地基弹簧, 这也与 2.2 节分析结果吻合。

为反应不同地基弹簧计算模型对地下结构地震反应的影响, 分别采用上述两种基床系数对传统反应位移法进行计算。传统位移法中采用本文模型计算的地基弹簧刚度系数进行求解时, 可认为是惯性力-位移法的特例, 即结构及其上覆土体的竖向惯性力为零。分析表明, 侧墙和中柱底部截面内力较大, 也是地下结构抗震设计中的关键控制截面, 同时考虑到地下结构受位移影响相对较大的地震反应特点, 选取大开车站顶底板相对水平位移, 侧墙底部轴力、弯矩和剪力, 以及中柱底部轴力、弯矩和剪力作为评价指标, 其中截面弯矩以每延米的弯矩值表示, 单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$; 截面轴力和剪力同样也以每延米的受力值表示, 单位为 kN/m ; 位移单位为 mm 。计算结果如表 3 所示, 对于不同的地基弹簧模型而言, 各内力值与变形值相差并不大, 也就是说, 在确定浅埋结构地基弹簧刚度系数时忽略上覆土体的影响对结构的地震响应并不大。

2.4 模型验证

为验证本文提出的惯性力-位移分析法计算精度, 采用同时考虑水平和竖向地震动同时作用的振动输入方法获得的动力时程计算结果作为精确解进行对比。其中, 振动输入法计算模型如图 12 所示, 该方法较适合分析存在下卧刚性基岩场地条件的土-结构动力相互作用问题, 通过设置考虑能量辐射效应的人工边界条件, 同时也将自由场反应的影响作为一种力边界条件作用在截断边界上, 是目前为止精度较高的土-结相互作用分析方法^[26]。表 4 列出了惯性力-位移法和严格的动力时程分析方法的计算结果, 选取的结构变形和各截面内力指标同表 3 一致。

表 2 传统模型与本文模型基床系数对比

Table 2 Comparison of foundation moduli by different models (10^6 N/m^3)

地震动	弹簧模型	顶板剪切	顶板压缩	侧墙剪切	侧墙压缩	底板剪切	底板压缩
Port 岛地震动	传统模型	1.093	0.593	7.149	8.122	8.795	17.201
	本文模型	—	—	6.783	7.469	8.793	17.188
神户大学地震动	传统模型	1.250	0.665	8.110	9.093	10.583	22.622
	本文模型	—	—	7.682	8.328	10.581	22.613

表 3 不同基床系数计算结果对比

Table 3 Comparison of calculated results by different methods

地震动	弹簧模型	顶底板相 对位移 /mm	侧墙底部 轴力 /(kN·m ⁻¹)	侧墙底部 弯矩 /(kN·m·m ⁻¹)	侧墙底部 剪力 /(kN·m ⁻¹)	中柱底部 轴力 /(kN·m ⁻¹)	中柱底部 弯矩 /(kN·m·m ⁻¹)	中柱底部 剪力 /(kN·m ⁻¹)
Port 岛地震动	传统模型	41.91	394.65	1823.17	522.81	0	253.76	78.67
	本文模型	41.11	399.68	1809.20	521.99	0	250.15	77.66
神户大学地震 动	传统模型	38.18	396.13	1685.02	478.27	0	228.32	70.59
	本文模型	37.21	401.84	1666.59	477.33	0	223.67	69.28

表 4 各分析方法计算结果对比

Table 4 Comparison of calculated results by different methods

地震动	分析方法	顶底板相	侧墙底部	侧墙底部	侧墙底部	中柱底部	中柱底部	中柱底部
		对位移 /mm	轴力 /(kN·m ⁻¹)	弯矩 /(kN·m·m ⁻¹)	剪力 /(kN·m ⁻¹)	轴力 /(kN·m ⁻¹)	弯矩 /(kN·m·m ⁻¹)	剪力 /(kN·m ⁻¹)
Port 岛地震动	本文方法	41.11	471.80	1811.94	533.82	289.30	250.15	77.66
	动力时程	39.72	456.54	1851.30	615.36	316.52	237.92	73.78
神户大学 地震动	本文方法	37.21	736.90	1858.89	594.97	585.50	219.42	70.09
	动力时程	35.87	703.10	1628.12	518.15	678.87	211.44	65.53

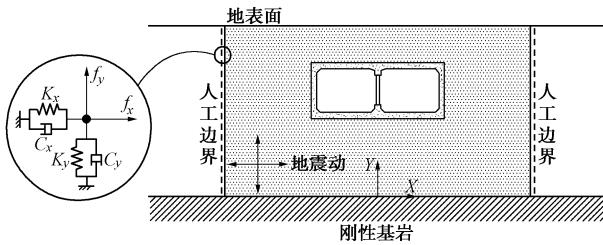


图 12 振动输入计算模型

Fig. 12 Model for vibration method

对比表 3 和表 4 计算结果可以看出, 传统反应位移法较惯性力-位移法和动力时程分析方法的最大区别在于中柱所受轴力大小。从传统反应位移法计算模型可知, 对于单层双跨的大开车站而言, 其所受荷载可视为反对称结构, 因此中柱轴力为 0。惯性力-位移分析法由于考虑了上覆土体竖向惯性力作用, 中柱轴力实际上并不可忽视。按当时日本地下结构设计规范(不考虑地震荷载作用), 大开车站静力荷载作用下中柱轴力的设计值为 4410 kN^[27]。采用 Port 岛获得的地震动, 惯性力-位移法计算出的中柱轴力为 289.30 kN/m×3.5 m=1012.55 kN, 约占静力工况的 23%; 采用神户大学获得的地震动, 惯性力-位移法计算出的中柱轴力为 585.50 kN/m×3.5 m=2049.25 kN, 约占静力工况的 46%。也就是说, 考虑上覆土体在竖向地震荷载作用下产生的惯性效应将较大程度改变中柱的轴向压力, 而该部分增加的轴向力与静力工况相比并不小, 它可能将中柱的轴压比提高 20%~50%, 从而导致中柱抗震性能的变化, 特别是中柱变形能力的降低。因此, 上覆土体竖向惯性力是浅埋地下结构抗震设计中不容忽视的地震荷载, 这一点是目前绝大多数地下结构抗震简化分析方法没有考虑到的因素之一。而对于处在高轴压作用下的中柱而言, 其变形能力较两侧侧墙明显不足。在实际地震中, 中柱与侧墙的变形不协调可能是引起大开车站倒塌破坏的关键因素。此外, 与动力时程分析方法计算结果相比, 惯性力-位移法的计算误差均在 20% 以内, 表明惯性力-位移法具有可靠的计算精度。

3 结论

结合大开车站实际震害特点, 在借鉴传统反应位移法基本原理与计算模型的基础上, 本文提出了考虑上覆土体竖向惯性力效应的惯性力-位移法。通过前述理论与算例分析, 可以得到如下结论:

(1) 惯性力-位移法舍去传统反应位移法中结构顶部地基弹簧而考虑上覆土体竖向惯性力的作用, 能较真实地反应浅埋地下结构在强震作用下上覆土体堆积或剪切破坏后的荷载效应特点。

(2) 惯性力-位移法与动力时程分析方法计算结果吻合较好, 最大误差不超过 20%, 是一种实用性较强精度较高的拟静力方法。

(3) 与传统反应位移法相比, 动力时程分析方法和惯性力-位移法计算结果表明中柱承受较大的轴向压力, 而处于高轴压作用下的中柱的抗剪强度增强但变形能力较差, 这可能是引起大开车站破坏的结构抗震性能方面的主要原因。

通过理论分析和数值模拟可以发现, 惯性力-位移法在进行地下结构地震反应分析时具有良好的模拟精度与可靠性, 是一种实用性很强的拟静力计算方法, 可用于浅埋地下结构的抗震分析与设计中。

参考文献:

- [1] 陈国兴, 陈 苏, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震研究进展 [J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 1~23. (CHEN Guo-xing, CHEN Su, DU Xiu-li, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 1~23. (in Chinese))
- [2] AN X, SHAWKY A A, MAEKAWA K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin Earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 241~257.

- [3] 杜修力, 王 刚, 路德春. 日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, **36**(2): 165 – 171. (DU Xiu-li, WANG Gang, LU De-chun. Earthquake damage mechanism analysis of Dakai metro station by Kobe earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, **36**(2): 165 – 171. (in Chinese))
- [4] 还 毅, 方 秦, 陈 力, 等. 强震作用下地铁车站结构损伤破坏的三维非线性动力分析[J]. 北京工业大学学报, 2011, **37**(6): 852 – 862. (HUAN Yi, FANG Qin, CHEN Li, et al. 3D nonlinear damage analysis of metro-station structures under strong seismic loading[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, **37**(6): 852 – 862. (in Chinese))
- [5] 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等. 地下结构实用抗震分析方法比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, **37**(2): 65 – 80. (XU Cheng-shun, XU Zi-gang, DU Xiu-li, et al. Comparative study of simplified methods for seismic analysis of underground structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, **37**(2): 65 – 80. (in Chinese))
- [6] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (SHI Zhong-heng. Design and construction of underground railway[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technique Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [7] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock[C]// Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials. New Mexico, 1968.
- [8] WANG J N. Seismic design of tunnels: A simple state-of-the-art design approach[M]. New York: Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc, 1993.
- [9] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2001, **16**(4): 247 – 293.
- [10] PENZIEN J. Seismically induced racking of tunnel linings[J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 2000, **29**(5): 683 – 691.
- [11] RAMAZI H, JIGHEH H S. The Bam (Iran) Earthquake of December 26, 2003: from an engineering and seismological point of view[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, **27**(5): 576 – 584.
- [12] BHALLA S, YANG Y W, ZHAO J, et al. Structural health monitoring of underground facilities-technological issues and challenges[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**(5): 487 – 500.
- [13] 川島一彦. 地下构筑物の耐震设计[M]. 日本: 鹿島出版会, 1994. (KAWAJIMA K. Aseismic design of underground structure[M]. Japan: Kajima Institute Publishing Co Ltd, 1994. (in Japanese))
- [14] NISHIDA M, MATSUI T. Applicability of seismic deformation method to aseismic analysis of underground linear structure[C]// The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon, 2004: 600 – 606.
- [15] 李 亮, 杨晓慧, 杜修力. 地下结构地震反应计算的改进的反应位移法[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1360 – 1364. (LI Liang, YANG Xiao-hui, DU Xiu-li. Improved response displacement method for evaluating seismic responses of underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1360 – 1364. (in Chinese))
- [16] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 地下结构抗震分析的整体式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1618 – 1624. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral response deformation method for seismic analysis of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1618 – 1624. (in Chinese))
- [17] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [18] GB50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 2014. (GB50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. 2014. (in Chinese))
- [19] TATEISHI A. A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2005, **22**(1): 41 – 54.
- [20] 刘晶波, 刘祥庆, 李 彬. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(4): 73 – 80. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, LI Bin. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(4): 73 – 80. (in Chinese))
- [21] 曹炳政, 罗奇峰, 马 硕, 等. 神户大开地铁车站的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(4): 102 – 107. (CAO Bing-zheng, LUO Qi-feng, MA Shuo, et al. Seismic response analysis of Dakai subway station in Hyogoken-nanbu earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, **22**(4): 102 – 107. (in Chinese))
- [22] UENISHI K, SAKURAI S. Characteristic of the vertical

- seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai Underground Station[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, **29**(6): 813 - 821.
- [23] 杜修力, 马 超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(1): 53 - 62. (DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai station under seismic loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(1): 53 - 62. (in Chinese))
- [24] 中村晋. 層間変形に基づく地中構造物の横断方向の耐震設計法に関する提案[J]. 土木学会論文集, 1998(605): 217 - 230. (NAKAMURA S. Proposal of seismic design method for underground structure based on the relative displacement between ceiling and base slab[J]. Journal of JSCE, 1998(605): 217 - 230. (in Japanese))
- [25] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analysis of layered soil deposits User's Manual[M]. Los Angeles: University of Southern California, 2000.
- [26] 杜修力, 李 洋, 赵 密, 等. 下卧刚性基岩条件下场地土-结构体系地震反应分析方法研究[J]. 工程力学, 2017, **34**(5): 52 - 59. (DU Xiu-li, LI Yang, ZHAO Mi, et al. Seismic response analysis method for soil-structure interaction system of underlying rigid rock base soil condition[J]. Engineering Mechanics, 2017, **34**(5): 52 - 59. (in Chinese))
- [27] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Special Issue of Soils and Foundations, 1996, **1**: 283 - 300.

2018年度第21讲黄文熙讲座学术报告会

第1号通知

2018年度第21讲黄文熙讲座学术报告会将于2018年4月22日（星期日）在北京中国科技会堂举行。2018年度黄文熙讲座主讲人为东南大学刘松玉教授和中国水利水电科学研究院汪小刚教高。刘松玉教授讲座题目为“污染场地测试评价与处理技术”，汪小刚教高讲座题目为“高土石坝几个问题探讨”。讲座文稿已分别刊登在《岩土工程学报》2018年第1期和第2期的黄文熙讲座栏目。

第21讲黄文熙讲座学术报告会由中国水利水电科学研究院和流域水循环模拟与调控国家重点实验室承办。黄文熙讲座学术报告会期间，还将邀请有关学者专家做学术报告。热烈欢

迎全国岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。有关本次学术报告会的更多信息请关注www.iwhr.com（中国水利水电科学研究院）和www.cgejournal.com（岩土工程学报）后续发布的第2号通知。

4月21日（星期六）晚8时召开《岩土工程学报》编委会全体会议。请第十二届《岩土工程学报》编委出席会议，并于2018年4月21日下午14:00~20:00在北京中国科技会堂报到。

联系人：田继雪女士：15910917077，tianjx@iwhr.com，王玉杰博士：13651192199，wangyj@iwhr.com，会务联系邮箱：geo_2018@163.com。

（本刊编辑部）