

DOI: 10.11779/CJGE201407021

# 地下结构地震反应计算的改进的反应位移法

李亮<sup>1</sup>, 杨晓慧<sup>2</sup>, 杜修力<sup>1</sup>

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124; 2. 中国建材检验认证集团厦门宏业有限公司, 福建 厦门 361012)

**摘要:** 反应位移法中地基弹簧刚度系数难以准确确定, 且不同地基弹簧之间互不相关, 难以准确地反映土体与结构之间的相互作用, 造成土体与结构四周接触面的荷载分布存在误差。通过改进地基弹簧刚度系数的求解方法, 提出了改进的反应位移法, 即在有限元分析过程中摒弃传统的加载方式, 采用在结构四周同时加载单位力的方式求解地基弹簧刚度系数。与现有的反应位移法的对比表明, 改进的反应位移法计算结果合理, 且具有更高的计算效率。

**关键词:** 地下结构; 地震反应; 反应位移法; 地基弹簧; 刚度系数

中图分类号: TU375.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)07-1360-05

作者简介: 李亮(1975-), 男, 副教授、硕士生导师, 主要从事地下结构抗震等方面的研究工作。E-mail: liliang@bjut.edu.cn。

## Improved response displacement method for evaluating seismic responses of underground structures

LI Liang<sup>1</sup>, YANG Xiao-hui<sup>2</sup>, DU Xiu-li<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Building Material Test & Certification Group Xiamen Hongye Co., Ltd., Xiamen 361012, China)

**Abstract:** It is difficult to accurately determine the stiffness coefficient of foundation spring in the response displacement method. Furthermore, different foundation springs are not relevant, and the interaction between the structure and the soil cannot be actually reflected, causing error in the load distribution on the soil-structure contact. Taking the foundation spring as the research object, an improved response displacement method is proposed, abandoning the traditional loading method in the finite element analysis process and loading the force all around the structure to solve the stiffness coefficient of foundation spring. Compared with the existing response displacement methods, the calculated results of the improved method is reasonable, and the proposed method has higher computational efficiency.

**Key words:** underground structure; seismic response; response displacement method; foundation spring; stiffness coefficient

## 0 引言

随着社会经济的快速发展, 城市化程度不断提高, 城市人口急剧增加, 城市地上空间的开发与利用已接近极限, 由此促进了城市地下空间的开发与利用, 促进了以地铁车站和地铁隧道为代表的地下结构工程的大规模兴建。北京、天津、上海、广州、南京等大城市都已有相当规模的地铁投入运营。同时, 在城市中其他各类地下结构也大量兴建和投入使用。

中国地处环太平洋地震带上, 地震活动非常频繁, 是世界最大的大陆浅源强震活动区。全国300多个城市中, 有一半位于地震基本烈度为7度或7度以上的地震区, 而北京、天津、西安等大城市都位于8度的高烈度地震区。历史上多次地震, 尤其是1995年日本“阪神地震”的震害表明, 地铁车站和隧道等地下结构在地震作用下可能发生严重的破坏, 对城市的交通

和市政设施造成严重的影响。因此, 地下结构的抗震安全性是一个值得深入研究的重要问题。

地下结构抗震安全性问题研究的首要工作是对地下结构及其周围土体组成的系统的地震反应进行较为准确的计算分析。针对地下结构抗震问题的设计和计算方法, 从力学特性上可以分为动力分析方法和拟静力计算方法两大类。地震是动力作用, 显然动力分析方法是理想的抗震设计和计算方法, 该方法能够计算地震输入过程中各时刻地下结构的内力和变形状态, 能够较为准确地反映地下结构的地震响应特性。然而,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178011); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB013602); 2011年度北京市属高校人才强教深化计划中青年骨干人才项目(PHR20110808)

收稿日期: 2013-09-24

动力分析特别是非线性动力分析, 将不可避免地需要在计算区域中设置人工边界, 并需要引入较多的土体动力参数, 使得所分析问题的复杂性和不确定性大大增加。另一方面, 动力分析的计算工作量大, 计算时间长, 计算结果的评价缺少统一标准, 针对实际工程问题的应用存在一定的困难, 很难在工程实践中大规模推广。因此, 在实际工程中, 针对地下结构抗震问题的设计和计算通常采用相对简单, 计算工作量较小的拟静力计算方法。地下结构地震反应计算的拟静力方法主要有地震系数法<sup>[1]</sup>、福季耶娃法<sup>[2]</sup>、自由场变形法<sup>[3]</sup>、BART 法<sup>[4]</sup>、Shukla 法<sup>[5]</sup>、地基抗力系数法<sup>[6]</sup>、反应位移法<sup>[7]</sup>、反应加速度法<sup>[8-9]</sup>、Pushover 分析方法<sup>[10]</sup>、广义反应位移法<sup>[11]</sup>以及整体式反应位移法<sup>[12]</sup>等。其中反应位移法物理概念明确、理论背景严密, 能够在一定程度上反映地下结构地震反应的特点, 并且实现过程较为简单方便, 所以在众多的设计规范中得到了应用, 不仅日本的多部设计规范基于反应位移法进行编制, 而且该方法也已编入中国的国家设计规范《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)、《城市轨道交通结构抗震设计规范(草案)》等。

但是反应位移法归根结底还是一种近似的计算方法, 采用该方法进行计算时结构自身特性及其与土的耦合作用无法精确体现, 方法中采用的计算分析模型存在一定的缺陷, 这些都将导致计算结果存在误差。因此, 进一步改进和完善反应位移法, 在保持其合理内容的基础上, 改进其计算模型与计算方法, 提高计算精度与操作的简便性, 是地下结构抗震问题中需要重点研究的课题之一。本文将通过改进反应位移法的计算模型, 提出一种地下结构地震反应计算的改进的反应位移法。

## 1 现有的反应位移法概述

反应位移法的基本原理是基于对地下结构地震反应特性的如下认识: 天然地层在地震时, 其振动特性、位移、应变等会随着位置和深度的不同而有所不同, 从而会对处于其中的地下结构产生影响。一般来说, 不同部位的位移差会以强制位移的形式作用在地下结构上, 从而使得地下结构中产生应力和位移。反应位移法的主要思想是把地震荷载作用下地层周围剪力、结构自身惯性力等施加于结构, 同时把地层在地震时产生的位移差(相对位移)通过地基弹簧以静载的形式作用于结构上, 从而求得结构的应力和变形等<sup>[13]</sup>。

反应位移法的重要计算步骤是地基弹簧的引入。地基弹簧是为了定量表示地下结构与其周围土体的相互作用, 考虑两者刚度的不同而引进的单元。地基弹

簧刚度系数的取值对结构内力的计算结果有较大的影响。由于地基弹簧刚度系数难以准确确定, 且现有的反应位移法认为不同地基弹簧之间互不相干, 致使实际地震时土体自身的相互作用无法体现, 从而造成土体与地下结构四周接触面的荷载分布与实际情况有一定偏差。

另外, 在实际计算中, 为了提高计算精度, 经常采用静力有限元方法计算地基弹簧刚度系数, 具体步聚是: 先将去除地下结构的地层划分单元, 形成有限元模型; 然后在需要计算地基弹簧刚度系数的方向上施加单位荷载进行计算, 根据计算得到的荷载-变形关系确定地基弹簧的刚度系数。上述计算过程需要进行6次或8次计算才能准确确定全部地基弹簧的刚度系数, 计算成本较高。对于大型地下结构的地震反应计算, 上述计算方法将消耗大量的计算机时。

## 2 改进的反应位移法

为了克服现有反应位移法计算模型中地基弹簧之间互不相干的不足, 避免由此造成的土体与地下结构四周接触面上荷载分布的误差, 并减少计算次数以提高求解效率, 对地基弹簧刚度系数的求解方法进行改进。改进方法的假设条件是地下结构各侧面处于同一方向上的弹簧性质相同, 即地基弹簧刚度系数的值相同。同时由于地基弹簧刚度系数随土体变形模式的不同而不同, 所以在计算中应尽可能使计算模型的变形形态与地震时地下结构的实际变形形态相近。

改进的反应位移法的具体计算步骤如下: ①对去除地下结构的地层划分单元, 形成有限元计算模型。②在地层孔洞四周同时施加均布荷载  $F$ , 求出土层各结点的变形, 由荷载与变形的关系求得地基弹簧刚度系数  $K$  值。因为假定结构各侧面处于同一方向上的弹簧性质相同, 即地基弹簧刚度系数相同, 故均布荷载  $F$  作用下结构某一面的变形  $\Delta$  应取该面各个结点变形的平均值。上述计算过程如图 1 所示。③将地基反力(地层相对位移或相对力)、地层摩擦力和地震惯性力依次施加作用在结构上, 计算出结构的应力和变形等。计算模型如图 2 所示。

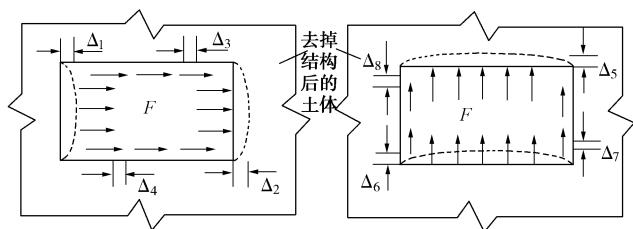


图 1 地基弹簧刚度系数计算方法的改进

Fig. 1 Improvement to evaluation of stiffness coefficient of foundation spring

本文提出的改进的反应位移法中地基弹簧刚度系数的计算次数减少至 2 次, 与现有方法相比, 计算效率得到了较大的提高。

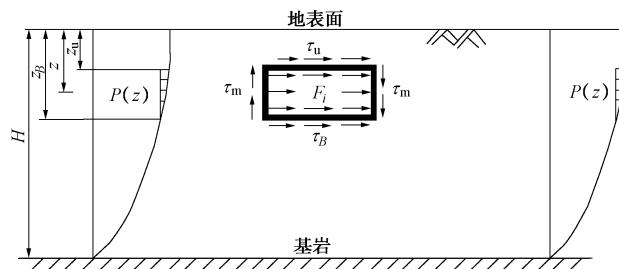


图 2 改进的反应位移法整体计算模型

Fig. 2 Diagram for improved response displacement method

### 3 算例

#### 3.1 工程概况

算例的研究对象为某隧道结构, 位于第四系全新地层中。隧道主体部分采用暗挖法施工, 但两端覆盖层较浅处采用明挖框架结构。地震基本烈度为 8 度。隧道断面尺寸及计算断面处的土层分布情况如图 3 所示, 基岩以上各层土的物理力学参数列于表 1 中。采用本文提出的改进的反应位移法计算上述隧道结构的地震反应, 计算基于 ABAQUS 有限元分析软件平台进行, 分别采用天津波和阪神波作为输入的地震记录, 其加速度时程分别如图 4 和图 5 所示。

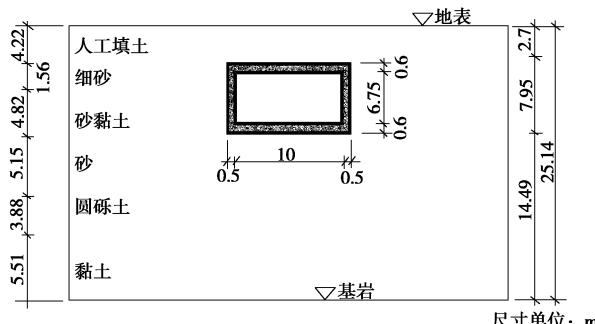


图 3 隧道断面尺寸及计算断面处地层分布

Fig. 3 Size of tunnel section and stratigraphic distribution of calculated section

表 1 场地土层分布及土性参数

Table 1 Distribution and parameters of soils

层号	土类	层厚 $h_i/m$	重度 $\gamma_i/(kN\cdot m^{-3})$	剪切波速 $V_{si}/(m\cdot s^{-1})$
1	填土	4.22	16	120
2	细砂	1.56	18	130
3	砂黏土	4.82	18	220
4	砂	5.15	19	200
5	圆砾土	3.88	19.5	300
6	黏土	5.51	19	220

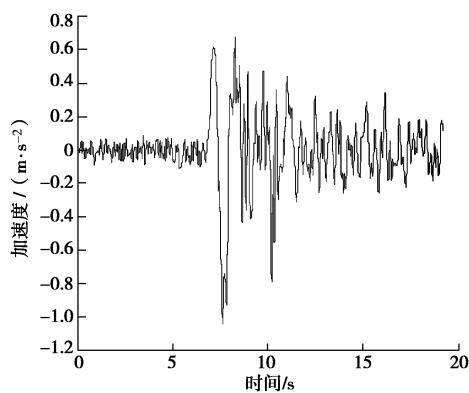


图 4 天津波加速度时程

Fig. 4 Acceleration time history of Tianjin wave

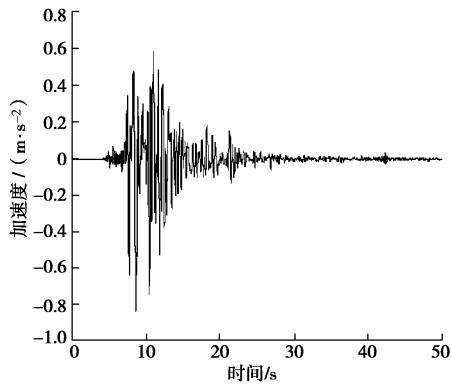


图 5 阪神波加速度时程

Fig. 5 Acceleration time history of Kobe wave

#### 3.2 数值结果及分析

应用本文提出的改进的反应位移法计算得到的隧道各侧墙体的应力分布如图 6, 7 所示, 图中横坐标原点对应各侧墙体中点。水平墙体位置以向左为正, 垂直墙体位置以向上为正。各图中同时给出了现有的经验反应位移法和传统反应位移法的计算结果以供对比。经验反应位移法<sup>[13]</sup>表示采用经验公式求解地震荷载的反应位移法; 传统反应位移法<sup>[14]</sup>表示采用静力有限元法求解地基弹簧刚度系数的反应位移法。

由图 6, 7 中计算结果的对比可知, 本文提出的改进的反应位移法与已有的经验反应位移法及传统反应位移法的计算结果比较接近, 其误差基本在 2% 之内, 这验证了本文方法的正确性。改进的反应位移法的计算结果稍大于另外两种反应位移法的计算结果, 从结构设计的角度而言, 偏于安全。本文提出的改进的反应位移法的优势主要体现在计算效率方面。通过对地基弹簧刚度系数的求解方法进行改进, 本文方法的计算次数显著减少(由 6 次或 8 次减少至 2 次), 与已有的反应位移法相比较, 减少了计算工作量, 使计算效率得到了较为显著的提高。对于大型地下结构, 其计算模型的结点数目巨大, 本文方法的优势将体现得更加明显。

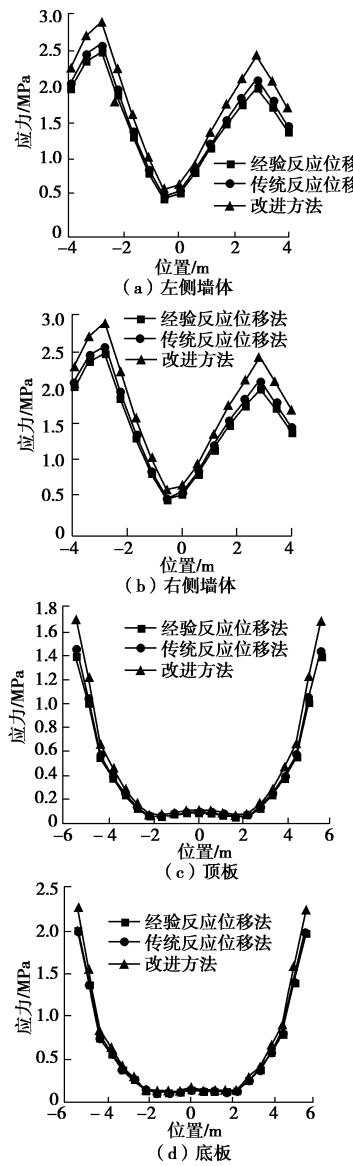


图6 天津波作用下隧道各侧墙体应力分布

Fig. 6 Stress distribution on tunnel wall under action of Tianjin wave

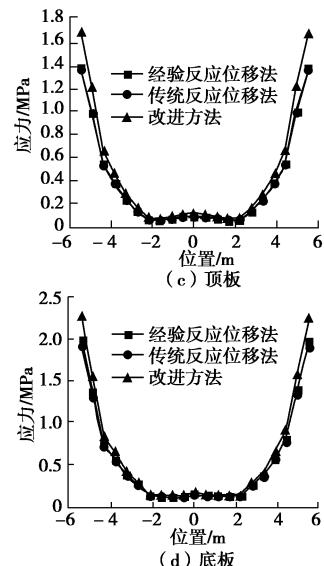
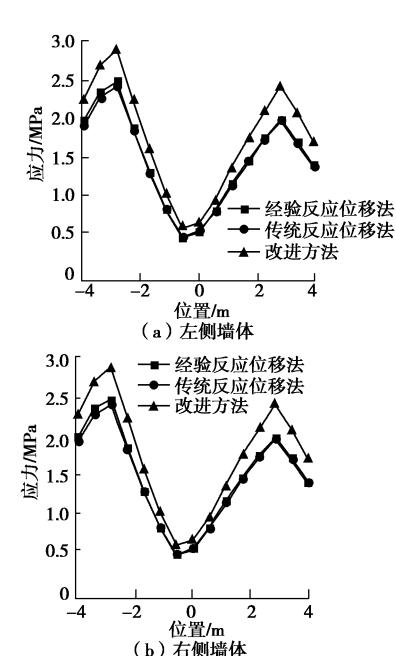


图7 阪神波作用下隧道各侧墙体应力分布

Fig. 7 Stress distribution on tunnel wall under action of Kobe wave

## 4 结语

本文通过改进地基弹簧刚度系数的求解方法，提出了一种地下结构地震反应计算的改进的反应位移法。该方法采用土层各侧同时施加荷载的方法求解土层变形，克服了传统的反应位移法存在的由于地基弹簧之间互不相关而造成的土体与地下结构四周接触面上荷载分布与实际情况不符的不足。

采用本文提出的改进的反应位移法对某实际工程中隧道结构的地震反应进行计算，并将计算结果与已有的两种反应位移法的计算结果进行比较。研究结果表明：本文方法的计算结果与已有的反应位移法的计算结果较为接近，能够满足实际工程的精度要求。本文方法的计算结果稍大于已有方法的计算结果，从结构设计的角度而言偏于安全。同时，本文方法中求解地基弹簧刚度系数的计算次数由6次或8次减少至2次，与已有的反应位移法相比，减少了计算工作量，使计算效率得到了较为显著的提高。因此，本文提出的改进的反应位移法计算结果合理，并且具有较高的计算效率，是进行地下结构地震反应计算分析的一种较为实用的方法。

## 参考文献：

- [1] 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 subway[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 福季耶娃. 地震区地下结构支护的计算[M]. 徐显毅, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1986. (Fotieva. Calculation to the

- support of underground structures in seismic region[M]. XU Xian-yi, trans. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1986. (in Chinese))
- [3] HASHASHA Y M A, HOOKA J J, SCHMIDTB B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, **16**(4): 247 - 293.
- [4] THOMAS R K. Earthquake design criteria for subways[J]. *Journal of the Structural Division*, 1969, **95**(6): 1213 - 1231
- [5] SHAKE D K, RIZZO P C, STEPHENSON D E. Earthquake load analysis of tunnels and shafts[C]// Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering. Michigan: University of Michigan Press, 1980: 20 - 28.
- [6] 林 崇. 地下结构抗震问题[C]// 第四届全国地震工程会议. 哈尔滨, 1994. (LIN Gao. Seismic safety of underground structures[C]// Proceedings of The Fourth Chinese Symposium on Earthquake Engineering. Haerbin, 1994. (in Chinese))
- [7] 川岛一彦. 地下构筑物的耐震设计[M]. 日本: 鹿島出版会, 1994. (KAZUHIKO Kawashima. Seismic design of underground buildings[M]. Japan: Kajima Institute Publishing Co. Ltd., 1994. (in Japanese))
- [8] 刘晶波, 李 彬, 刘祥庆. 地下结构抗震设计中的静力弹性分析方法[J]. *土木工程学报*, 2007, **40**(7): 68 - 76. (LIU Jing-bo, LI Bin, LIU Xiang-qing. A static elasto-plastic analysis method in seismic design of underground structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, **40**(7): 68 - 76. (in Chinese))
- [9] 刘如山, 胡少卿, 石宏彬. 地下结构抗震计算中拟静力法的地震荷载施加方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(2): 237 - 242. (LIU Ru-shan, HU Shao-qing, SHI Hong-bin. Study on seismic loading of pseudo-static approach used in the seismic design of underground structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(2): 237 - 242. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 耿 萍, 丰月华, 何 川, 等. 盾构隧道横断面地震响应的广义反应位移法分析[J]. *铁道建筑*, 2009(6): 55 - 58. (GENG Ping, FENG Yue-hua, HE Chuan, et al. Generalized response displacement method analysis to the seismic response of transect of shield tunnels[J]. *Railway Engineering*, 2009(6): 55 - 58. (in Chinese))
- [12] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构地震反应计算反应位移法的改进[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, **32**(增刊 2): 211 - 213. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong. Improvement to the response displacement method for the calculation of seismic response of underground structures[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, **32**(S2): 211 - 213. (in Chinese))
- [13] 潘昌实. 隧道及地下结构物抗震问题的研究概况[J]. *世界隧道*, 1996(5): 7 - 16. (PAN Chang-shi. Summary to the research on the aseismatic analysis and design of tunnels and underground structures[J]. *World Tunnel*, 1996(5): 7 - 16. (in Chinese))
- [14] 郑永来, 杨林德, 李文艺, 等. 地下结构抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005. (ZHENG Yong-lai, YANG Lin-de, LI Wen-ji, et al. Aseismatic analysis and design of underground structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2005. (in Chinese))