

地铁隧道非线性地震响应动力分析*

刘艳军, 顾俊, 丁向东

(河海大学 土木工程学院 江苏 南京 210098)

摘 要 地铁隧道抗震研究是当今地震工程界重要的研究方向。对广州地铁四号线地铁隧道进行了地震响应非线性有限元分析。采用动力有限元数值分析方法, 提出估算地铁隧道地震响应永久变形的有限元计算模型。通过动力有限元方法确定地铁隧道的残余变形量, 将各个时刻重复通过计算所确定的残余位移累加得到地震作用后地铁隧道的永久变形量。通过分析地铁隧道的永久变形量确定地铁隧道地震响应稳定性, 为地铁隧道地震稳定性分析提供了参考依据。

关键词 地铁隧道 地震反应分析 动力分析 数值模拟

中图分类号: U231.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-5322(2007)01-0068-04

随着城市化的发展, 国内许多城市都在修建或筹建地铁, 然而我国是一个多地震的国家, 许多大城市的基本地震烈度都在 6 级以上。地铁作为大运力公共交通, 一旦因为地震作用, 出现地铁隧道的倒塌, 后果不堪设想, 不仅国民经济受到重大损失, 而且危及广大人民的生命财产安全。因此, 地铁隧道的抗震安全性分析具有重要的经济和政治意义。本文结合广州地铁四号线地铁隧道的工程实例, 对地铁隧道进行地震响应数值计算, 分析地震作用下, 隧道结构的应力与应变情况, 提出一些合理具体的抗震方法。

1 隧道结构地震动力分析的基本理论

1.1 动力有限元方程

地震动作用下, 地铁隧道动力平衡方程的有限元列式为^[1]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M][J]\{\ddot{u}_g(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为隧道结构的整体质量矩阵、整体阻尼矩阵和整体刚度矩阵, $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为加速度、速度、和位移向量列阵, $\{\ddot{u}_g(t)\}$ 为地震地面运动加速度向量, $[J]$ 为转换矩

阵。采用 Rayleigh 比例阻尼假定, 由单元阻尼阵组装整体阻尼矩阵, 单元的阻尼阵为

$$[C]_i = \alpha[m]_i + \beta[k]_i \quad (2)$$

式中 $[m]_i$ 、 $[k]_i$ 是单元 i 的质量阵和刚度阵。

依据比例阻尼假定, 当仅考虑基本振型的影响时, 式(2)中系数 α_i 、 β_i 可近似地取为

$$\alpha_i = \xi_i \omega_i \quad \beta_i = \frac{\xi_i}{\omega_i} \quad (3)$$

式中 ξ_i 、 ω_i 分别为单元 i 的阻尼比和隧道结构的自振频率。

采用 Wilson- θ 对方程式(1)在时域内进行逐步积分求解^[2], 即可得到每一时刻所有点的地震反应值。这种计算方法假设在时间间隔 $\theta \Delta t$ 内加速度随时间呈线性变化, θ 值大于 1, 通常取 $\theta = 1.4$ 。

1.2 地震波的输入方法

根据弹性理论^[3], 沿 r 方向传播的 P 波在人工边界上产生的正应力 σ 和 S 波产生的剪应力 τ 可分别表示为

$$\sigma(r, t) = E\varepsilon = \rho c_p^2 \frac{\partial u^p}{\partial r} =$$

* 收稿日期: 2006-11-17

作者简介: 刘艳军(1981-)男, 吉林省柳河县人, 硕士研究生, 主要研究方向为地质体安全监控。

$$\rho c_p^2 \left[\frac{f'}{\sqrt{r}} - \frac{f}{2r\sqrt{r}} + \frac{g'}{\sqrt{r}} - \frac{g}{2r\sqrt{r}} \right] = \rho c_p u^p - \frac{\rho c_p^2}{2r} + 2\rho c_p u_i^p \quad (4)$$

$$\tau(r, t) = G\gamma = \rho c_s^2 \frac{\partial u^s}{\partial r} = \rho c_s^2 \left[\frac{f'}{\sqrt{r}} - \frac{f}{2r\sqrt{r}} + \frac{g'}{\sqrt{r}} - \frac{g}{2r\sqrt{r}} \right] = -\rho c_s u^s - \frac{\rho c_s^2}{2r} + 2\rho c_s u_i^s \quad (5)$$

式中： G —剪切模量； γ —剪应变； ρ —密度； E —杨氏模量； ε —法向应变； c_p^2 （或 c_s^2 ）—地基 P 波（或 S 波）的总场位移和总场速度； u^p （或 u^s ）—地基 P 波（或 S 波）的入射波速度。

两式中最后等式中的第 1 项、第 2 项分别等价于由阻尼器产生的阻尼力以及弹簧产生的弹性力，而第 3 项为与入射波速成正比的等效力。所以，在地铁隧道地震动力有限元分析中，可通过对无限地基的人工截断获得有限计算域，被截去的远场地基可用一系列沿人工边界布置的弹簧和阻尼器来代替，在有入射波的边界上可用与入射波速成正比的等效力来实现地震动输入。另外，对于圆形边界 r 为常数；对于其他形状的边界，为散射源中点到相应边界节点的距离。

2 工程实例计算分析

2.1 工程概况

广州市轨道交通四号线黄洲站—黄阁站段北起黄洲，向南延伸穿过珠江，至琶洲塔站北端，再由高架试验段终点向南延伸至黄阁。按四号线黄阁—冲尾段线路纵断面图的初步设计，地下线的施工方法中，YAK52 + 840 ~ YAK54 + 760 段拟采用盾构法施工。

本工程初勘的沿线地貌主要为海陆三角洲冲积平原地貌，尚存有花岗岩或花岗混合岩剥蚀残丘。本勘察线路穿越的地层下伏基岩主要为燕山期侵入花岗混合岩、第四系海陆交互相及陆相河流冲积层、洪积层、坡积层，燕山期侵入花岗混合岩残积层。

2.2 计算模型及计算参数

采用大型有限元软件 ADINA 进行重力坝地震响应的 3D 数值分析。动力分析采用如图 1 所示的有限元计算模型，总共划分 14 524 个 3D 单元，共 4 025 的节点。对整个系统采用四边形单

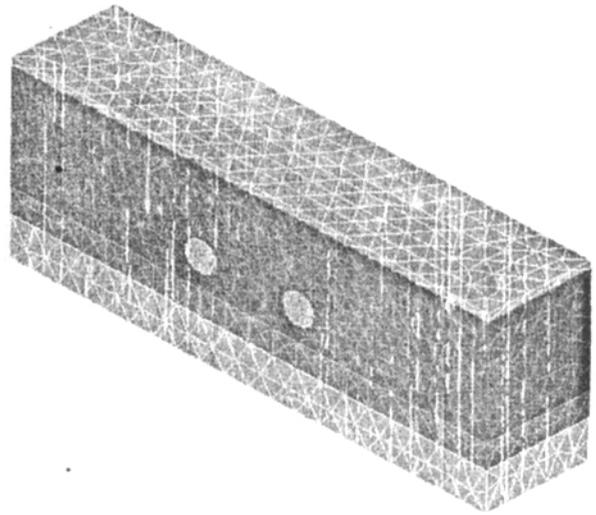


图 1 隧道有限元计算剖分模型

Fig. 1 Part Finite element model of Tunnel

元进行剖分，数值求解中采用 Newmark 时间积分方法^[41]。本文采用改进的可考虑残余强度的薄膜单元来模拟土和结构之间的接触滑移性能。

地铁隧道结构采用线弹性模型，弹性模量取 3.5 GPa，泊松比 0.18，密度 4 800 kg/m³；土体材料见表 1。

表 1 土体 Mohr - Coulomb 本构模型参数

Table 1 Physical parameters of Mohr - Coulomb soil

土层名称	E /MPa	μ	ρ /kg · m ⁻³	φ /(°)	C /kPa
杂填土	10	0.35	1 750	18	11
粉质粘土	30	0.3	2 000	22	24
中粗砂层	80	0.26	2 200	28	100
硬塑状砂质粘性土	150	0.2	2 300	34	250

2.3 地震动位移响应和应力响应分析

图 2 给出广州 I 类场地地震波 ($a_p = 0.3 g$) 加速度时程图。在地震作用结束时地表产生的最大沉降为 6.127 8 cm，隧道结构上产生的最大永久变形为 6.870 0 cm。对于隧道结构，地震作用引起的弯矩和轴力关于结构竖向对称轴呈反对称分布，其最大值出现在隧道结构内部左右两侧壁截面处，在隧道结构外侧截面处内力也相对较大，隧道衬砌结构两侧的应力较大，是竖向抗震的薄弱环节。图 3 反应的是地表和隧道结构在地震作用下的响应情况，明显隧道结构的地震响应比地表地震响应要大。

从图 4 可以看出地表最大沉降处在震动过程中的累积变形趋势和隧道结构上的累积变形趋势基本一致，但地震作用下隧道结构产生的永久变

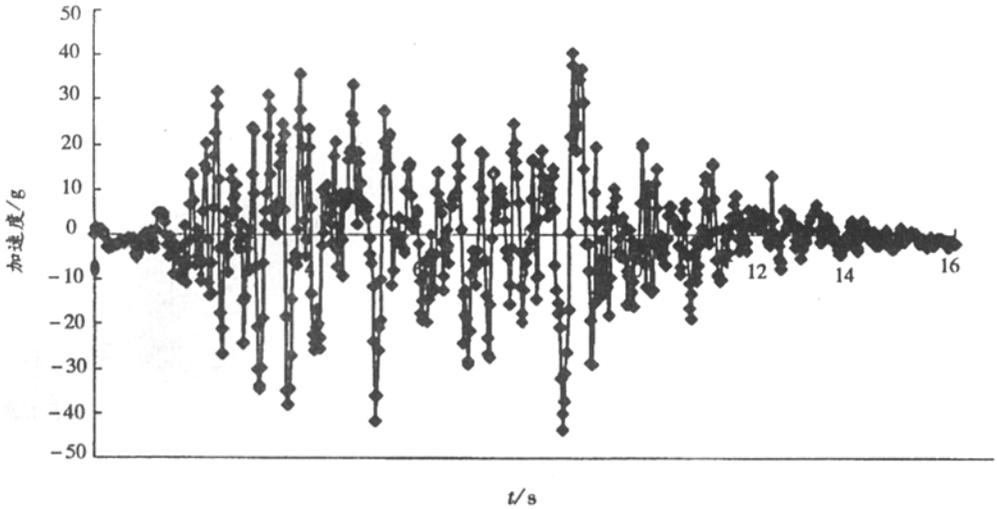


图 2 广州 I 类场地地震波加速度时程

Fig. 2 Seismic wave acceleration time interval of GUANGZHOU I type filed

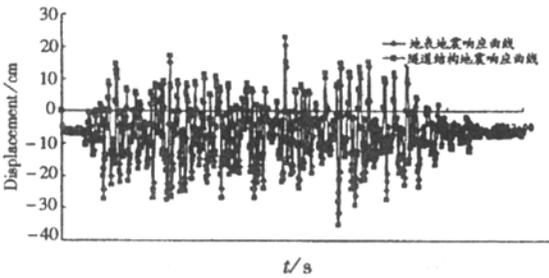


图 3 地震响应曲线

Fig. 3 The seismic responds curve

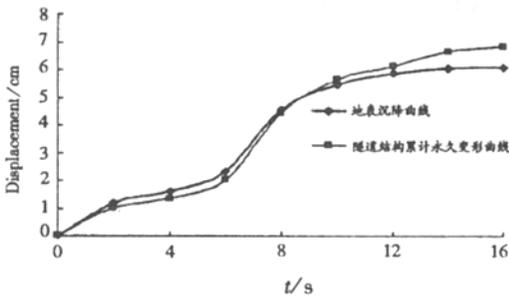


图 4 地震过程中累计变形曲线

Fig. 4 Accumulates distortion curve in the seismic process

形更大。这是因为在地震时作用于隧道结构的动土压力为动压力部分和周围土层的残余应变引起的静土土压力两部分组成,所以隧道结构的位移相对于土层的位移稍大。地下隧道结构与土层

在地震作用下发生剪切变形,土层和隧道结构周围土的加速度响应存在一定的振动响应差,这种响应差导致隧道结构与土层之间存在位移差。

计算结果显示地震作用下,隧道结构的不同埋深处应力、累积位移不同,除隧道结构左右两侧较大外,隧道结构上部应力和累积位移比下部的,说明地铁隧道结构的埋深对其地震动力响应影响较大,隧道结构埋深越大,其抗震性能越好。

3 结论

(1)在地震作用下土层间的相对累积位移对隧道结构的剪切作用不容忽视,隧道结构的最终累积变形值比地表的沉降值大,所以地铁隧道结构应该具有足够的延性来承受土层的累积位移产生的剪切位移,以避免剪切破坏的发生。

(2)在地铁隧道的地震响应分析过程中,隧道结构的左右两侧壁的上下部容易在振动过程中产生应力集中,变形也较大,因此在设计和施工过程中,应该对该部位采取一定的防震措施。

(3)地铁隧道结构的埋深对其动力响应的影响也是很大的,在一定范围内,地铁隧道结构的埋深越大,其抗震安全性能越好,所以在条件允许的情况下,在设计阶段可以加大地铁隧道的埋深。

参考文献:

[1] 邓爽.长江隧道衬砌结构地震响应的三维数值分析[D].武汉:武汉理工大学,2006.

[2] 车爱兰,吕楷敏,高修润.关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J].岩土力学,2006,25(8):1293-1298.

- [3] 杨林德, 杨超, 季倩倩, 等. 地铁车站的振动台试验与地震响应的计算方法 [J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 1136 - 1140.
- [4] 史良. 黄土隧道抗震设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [5] 祝彦知, 仲政. 考虑各向异性的层土 - 盾构隧道地震反应数值模拟 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(4): 90 - 98.

Nonlinear Seismic Response Analysis of Subway Tunnels

LIU Yan - jun , GU Jun , DING Xiang - dong

(Department of Construction Engineering of Hohai University , Jiangsu Nanjing 210091 , China)

Abstract : The antiseismic research of subway tunnel is very important in earthquake engineering. In this paper , dynamic finite element method was used to analyze the seismic response in No. 4 line of Guangzhou subway tunnel. Dynamic finite element method was presented for evaluating seismically - induced permanent deformation of subway tunnel. By using dynamic finite element the residual deformation of subway tunnel was estimated. The computed residual displacements of the tunnel for each time increments were accumulated and the accumulative displacements were the permanent deformation of the subway tunnel. By analyzing the permanent deformation of the subway tunnel the stability of the seismic response in the subway tunnel was confirmed. It presents a reference for seismic stability analysis of the subway tunnel.

Keywords : subway tunnel ; seismic response analysis ; dynamic analytical method ; numerical simulation

(上接第 56 页)

等特点 ,但和其它预测方法相比 ,也存在一定的局限性 ,数据离散程度越大 ,预测精度越差 ;不太适合进行长期预测 ;平时的日负荷预测应采用灰色

预测法 ,对于重大节日的负荷预测还应采取其他的预测方法。

参考文献 :

- [1] 滕福生. 电力系统调度自动化和能量管理系统 [M]. 成都 : 四川大学出版社, 2004.
- [2] 鞠平, 陈谦. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 6 - 9.
- [3] 李伟, 韩力. 组合灰色预测模型在电力负荷预测中的应用 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27(1): 36 - 39.

Application of Gray Model in Power Load Forecasting

GUO Ru - xin , LV Lin

(School of Electrical Engineering and Information , Sichuan University , Chengdu , Sichuan Province 610065)

Abstract : Power load forecasting is the most important task in the power control and running. This article introduces the relative concepts and principles and the process of power load forecasting . By the example it discusses about the application of gray model in power load short - term forecasting , analyses and forecasts the day load , and the results turns up trumps , which proves that the gray model is one of the effective methods of power load forecasting. The gray model is widely applied in the day power load forecasting.

Keywords : gray model ; accumulated generating ; inverse accumulated generating ; power load forecasting

万方数据