

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201903056

双线地铁盾构隧道的拟静力弹塑性抗震分析*

宾佳¹, 邹炎², 景立平³

(1. 湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 目前地铁抗震设计规范中常用的地下结构抗震设计方法主要是位移响应法和应变传递法。这两种方法都是基于弹性假设, 不能体现土体和地下结构的非线性。在刘晶波提出的地下结构Pushover分析方法的基础上, 利用自主编制的一维土层地震反应分析软件APALS给出了随着地震动幅值增大而逐渐变化的地震荷载加载模式, 并针对实际的双线地铁盾构隧道进行了拟静力弹塑性抗震分析, 对其抗震性能进行了评价。结果表明: (1) 隧道内力趋于一个极限值; (2) 隧道的内力在 $\theta=45^\circ$ 、 135° 、 225° 和 315° 的位置最大; (3) 在隧道尚未破坏时, 隧道周围的土层已经先达到破坏状态。

关键词: 地铁隧道抗震; 一维土层地震反应分析; Pushover分析; 弹塑性

中图分类号: TU91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0579-07

Pseudo-static Elastoplastic Seismic Analysis of Double-line Shield Tunnel

BIN Jia¹, ZOU Yan², JING Liping³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;
2. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Currently, the major seismic design methods of underground structures in the subway specifications are categorized into the displacement response method and the strain transformation method. The two methods are both established on the elastic assumption, and cannot reflect the nonlinearity of soil and underground structures. Based on the Pushover analysis method of underground structures proposed by LIU Jingbo, this paper gives an evolving seismic load pattern with *PGA* increasing, which is developed using the self-compiled 1-D soil-layer seismic response analysis software APALS. Then the pseudo-static elastoplastic seismic analysis of the double-line shield tunnel is processed, and the seismic performance is evaluated. The results demonstrate that: (1) the internal forces of the tunnel approach extreme values; (2) the internal forces of the tunnel are maximum at the locations where $\theta=45^\circ$, 135° , 225° and 315° ; (3) Before the tunnel get damaged, the surrounding soil has reached the failure state first.

Keywords: seismic resistance of subway tunnel; 1-d seismic response analysis of soil layers; Pushover analysis; elastoplastic

* 收稿日期:2019-03-20;修回日期:2019-04-11

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2017B10;2017B14)、湖南省教育厅科学研究项目(18C0514)资助

作者简介:宾佳(1988—),男,讲师,博士。主要从事隧道及地下结构抗震研究。E-mail:binjia@hut.edu.com

通讯作者:邹炎(1987—),男,博士后。主要从事隧道及地下结构抗震研究。E-mail:latro@qq.com

引言

近年来,随着城市轨道交通系统尤其是地铁的大规模建设,城市轨道交通系统的安全问题已经成为重中之重。在此背景下,地铁系统抗震性能的研究越来越受到重视。

在1995年阪神地震后,国内外学者针对地下结构地震反应的研究^[1-3]表明:与地面结构不同,地下结构地震破坏的主要原因是地下结构周围土体的变形,而非地下结构自身的惯性力。因此,地下结构的抗震设计方法也从早期的基于惯性力^[4]演变为基于土体变形,并形成了位移响应法和应变传递法两大类方法。目前我国的地铁抗震设计规范^[5]采用位移响应法作为建议的抗震设计方法,将周围地层对地下结构的作用简化为弹簧,将地震荷载简化为摩擦力和支座位移。而美国规范^[6]采用的是应变传递法,根据地下结构与周围地层的刚度比求出地下结构与自由场之间的变形比,再根据自由场变形求出地下结构的变形和内力。这两种抗震设计方法都是基于弹性假设,在小震下基本满足抗震设计要求,但在大震下,土体和地下结构都会进入塑性阶段,展现出很强的非线性,此时我们需要引入一种新的基于弹塑性的拟静力抗震分析方法来进行设计。

在地面结构的抗震设计中,基于性能的拟静力弹塑性抗震设计方法(Pushover方法)^[7-8]已经被广泛应用。在此基础上,刘晶波等提出了一种地下结构Pushover分析方法^[9-10],将假设为倒三角分布的惯性加速度作为拟静力荷载施加于地层—地下结构整体模型中进行Pushover分析。杨智勇等也利用该方法对单线盾构隧道进行了抗震分析^[11]。

该方法对惯性加速度的倒三角分布假定对均匀土层是适用的,然而对于含软弱或坚硬夹层的非均匀土层,由于夹层对地震波的影响,此假定不太符合实际。因此,Y.Zou等^[12]提出了一种新的基于基岩反应谱的地下结构Pushover加载模式,能够反应随着地震动幅值增加惯性加速度分布的变化。本文在此研究的基础上,针对实际的双线地铁盾构隧道进行了拟静力弹塑性抗震分析,并对其抗震性能进行了评价。

1 抗震分析方法

1.1 土层与隧道的非线性本构

土层采用Hardin提出的双曲线本构^[13]:

$$\tau = G_r \gamma / (1 + \gamma / \gamma_r) \quad (1)$$

式中, τ 和 γ 分别是八面体剪应力和剪应变; G_r 是低应变水平下的初始剪切模量; γ_r 是参考剪应变,并且 $\gamma_r = \tau_{\max} / G_r$,这里 τ_{\max} 是土体的剪切强度。

因为隧道的横截面抗震属于平面应变问题,所以隧道衬砌采用钢筋混凝土纤维梁单元^[14]建模,其中混凝土采用Kent-Scott-Park本构^[15],配筋采用双线性本构。

1.2 一维土层地震反应分析

常用的一维土层地震反应分析软件如SHAKE91、EERA、FDEL等只能求得某一特定地震动作用下土层的地震反应。然而对于地下结构的Pushover分析来说,我们更需要的是针对给定的基岩反应谱,求得随着地震动幅值增大时土层地震反应的连续变化。为了实现这个目的,需要采用Y.Zou等^[12]编制的APALS(Adaptive Pushover Analysis of Layered Soil)一维土层地震反应分析软件,其思路是将地震动幅值的增大划分为若干个连续的增量步,并假设每个增量步足够小以至于前一步的土层刚度和后一步的十分接近,然后在每一步利用等效线性化原理求土层的动剪切模量,进而构建刚度矩阵,再通过振型分解的SRSS(Square Root of Sum Squares,平方和开平方)法结合基岩反应谱求得该步的土层地震反应,用于求后一步的土层动剪切模量,如此循环,直至土层相对位移达到目标位移为止,其流程如图1所示。需要指出的是,选取的

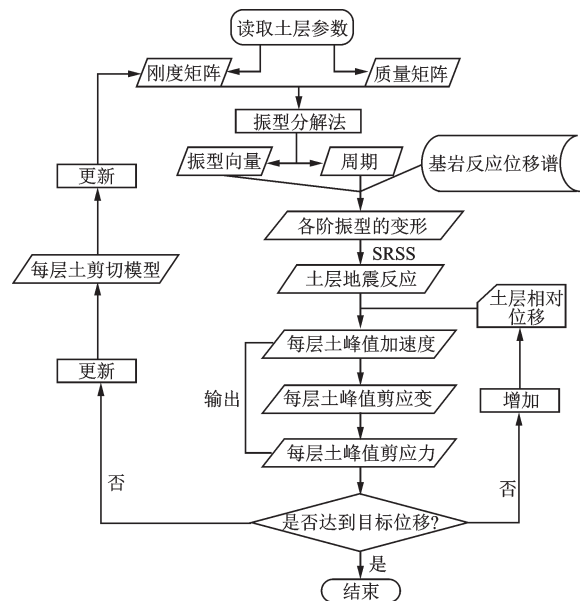


图1 一维土层地震反应分析软件APALS流程

Fig.1 Flowchart of the 1-D soil layer seismic response analysis software APALS

目标位移可以是地面与基岩的相对位移(PGD),也可以是地下结构顶板和底板所在位置在自由场中的相对位移($PRGD$),如图2所示。对于本文双线地铁盾构隧道的拟静力弹塑性抗震分析,选取地面与基岩的相对位移(PGD)作为目标位移。

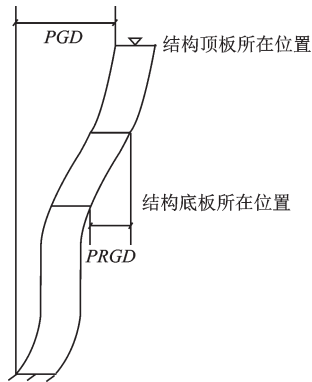


图2 目标位移的选取

Fig.2 Selection of the target displacement

1.3 地震荷载的施加

在一维土层地震反应分析中求得随着地震动幅值增大时土层剪应力的分布为 $\tau(PGD, z)$,该分布是随土层相对位移(PGD)的增大不断变化的。在某一土层相对位移时,根据刘如山等提出的反应应力法原理^[16],在任意深度单位体积的土所受的惯性力 ρ 为剪应力 τ 对深度的偏导数:

$$\rho(PGD, z) = \frac{\partial \tau(PGD, z)}{\partial z} \quad (2)$$

则得到等效惯性加速度 a 沿深度的分布为:

$$a(PGD, z) = \frac{\rho(PGD, z)}{\rho(z)} \quad (3)$$

式中, $\rho(z)$ 为土体密度沿深度的分布。

因此,对土层-隧道整体模型按刘晶波等提出的方法^[9]施加随 PGD 逐步变化的地震惯性力,如图3所示。其中底边界作为基岩完全固定,侧边界固定竖向自由度。

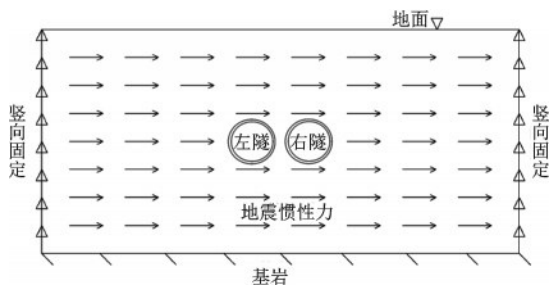


图3 地震荷载的施加

Fig.3 Application of seismic loads

2 应用实例

2.1 工程概况

我国东部某城市一处双线盾构隧道岩土勘察得到的地层分布如图4所示,依据工程场地地震安全性评价规范^[17]对该工程场地进行了现场剪切波速测试和钻探取样,并对土样进行了室内动三轴试验,最终得到各层土体的力学参数见表1。而双线盾构隧道的中心埋深为16 m,左隧和右隧的中心距离为12 m。隧道细部如图5所示,隧道直径为6 m,衬砌厚度为0.3 m,配筋为直径10 mm的圆钢,间隔为0.1 m。衬砌混凝土和配筋的参数见表2。

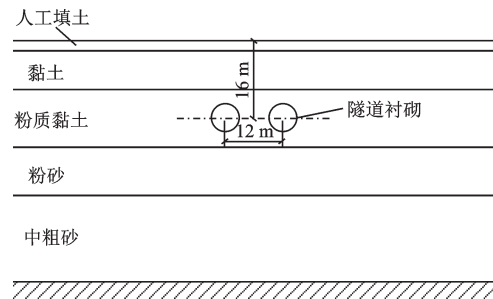


图4 双线盾构隧道的岩土勘察

Fig.4 Geotechnical investigation of the double-line shield tunnel

表1 各层土体参数

Table 1 Soil parameters of each layer

| 土类 | 厚度/ m | 密度/ (kg· m ⁻³) | 剪切 波速/ (m·s ⁻¹) | 剪切模 量/kPa | 泊松 比 | 参考剪 应变/ 10 ⁻³ |
|----------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------|---------|--------------------------------|
| 人工 填土 | 2 | 1 810 | 127 | 29 193 | 0.36 | 5.2 |
| 黏土 | 8 | 1 880 | 155 | 45 167 | 0.32 | 4.0 |
| 粉质 黏土 | 12 | 1 960 | 183 | 65 638 | 0.30 | 3.4 |
| 粉砂 | 10 | 2 020 | 197 | 78 394 | 0.28 | 2.8 |
| 中粗砂 | 18 | 1 980 | 216 | 92 378 | 0.28 | 2.8 |

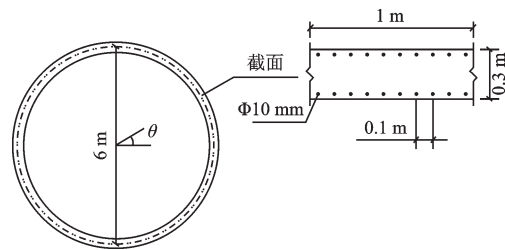


图5 隧道细部示意

Fig.5 Details of the tunnel

表2 混凝土和配筋参数

Table 2 Concrete and reinforcement parameters

| 混凝土 | | 钢筋 | |
|---------------------|-------|-------------------|------|
| 峰值强度 f_c /MPa | 30 | 初始弹性模量 E_0 /GPa | 200 |
| 峰值强度应变 ϵ_c | 0.002 | 屈服强度 f_y /MPa | 335 |
| 破坏强度 f_u /MPa | 10 | 硬化系数 b | 0.02 |
| 破坏应变 ϵ_u | 0.005 | | |

2.2 基岩反应谱

按照地震安全性评价的要求,根据俞言祥提出的中国东部地区水平向基岩加速度峰值和反应谱衰减关系系数^[18]求得该工程场地的基岩加速度反应谱,如图6所示。人工合成地震动时程如图7所示,人工合成地震动的位移反应谱如图8所示,将此位移反应谱作为双线盾构隧道拟静力弹塑性抗震分析中的基岩反应谱输入。

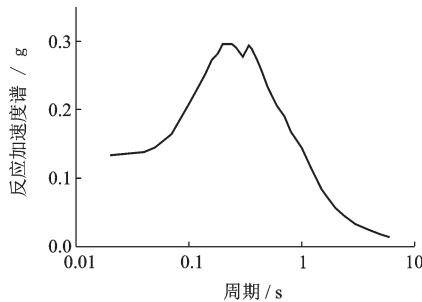


图6 基岩加速度反应谱

Fig.6 Acceleration response spectrum of the bedrock

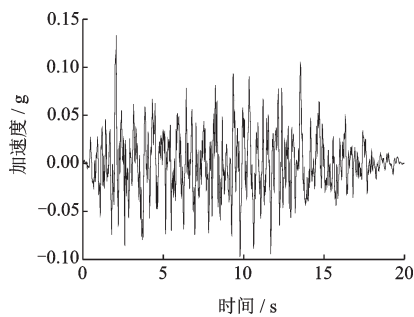


图7 人工合成地震动时程

Fig.7 Time history of the synthetic ground motion

2.3 结果与分析

按图5中标示的角度对左隧和右隧分别选取 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 和 315° 4个观测点,通过前述的弹塑性拟静力抗震分析方法得到双线盾构隧道的弯矩性能曲线和轴力性能曲线分别如图9和图10所示。可以看到,由于隧道和土体的非线性,隧道的内力并非随地层相对位移线性增长,而是逐渐趋近

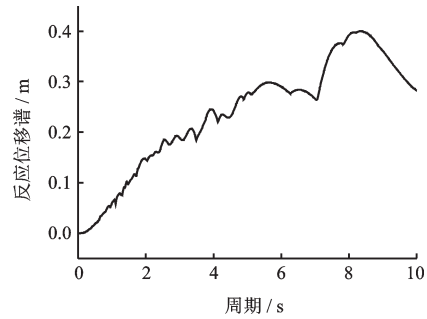
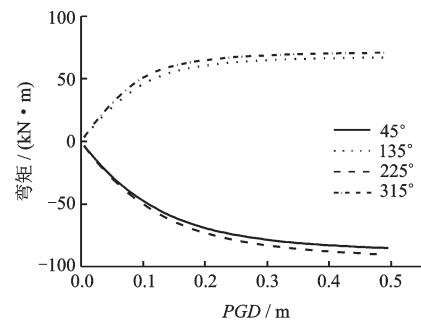
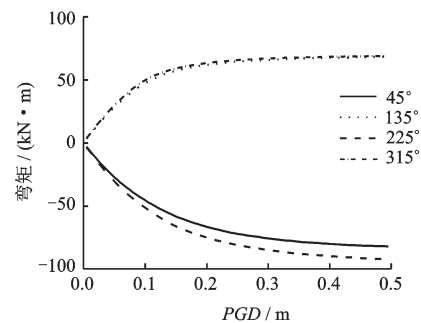


图8 基岩位移反应谱

Fig.8 Displacement response spectrum of the bedrock



(a) 左隧



(b) 右隧

图9 双线盾构隧道的弯矩性能曲线

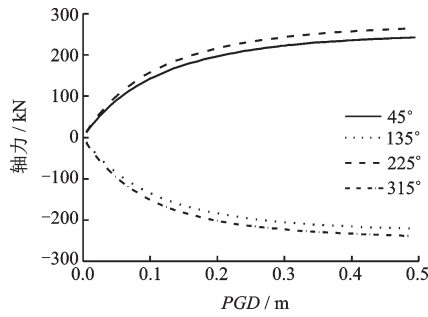
Fig.9 Bending moment curves of the double-line shield tunnel

于一个极限值。

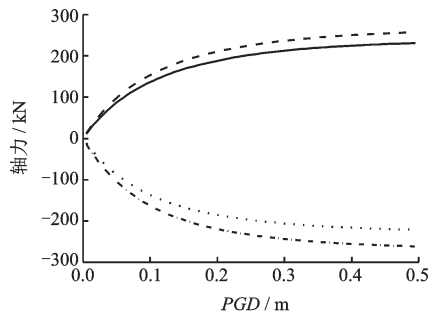
地层相对位移达到不同阶段时双线盾构隧道的弯矩包络图和轴力包络图,分别如图11和图12所示。可以看到,无论是左隧还是右隧,都是在 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 和 315° 的位置弯矩和轴力的值最大,这与弹性情况下盾构隧道抗震设计计算的解析解^[19]是一致的。另一方面,这也说明了在这个中心距离下,地震荷载作用时左隧与右隧相互之间的影响较小。

按文献[12]中的抗震性能评价方法,定义隧道衬砌的损伤因子为:

$$\xi = 1 - \frac{K_N}{K_{N0}} \quad (4)$$



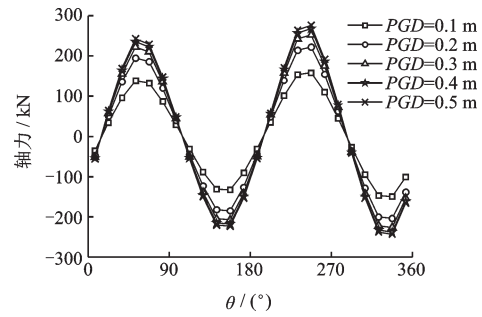
(a) 左隧



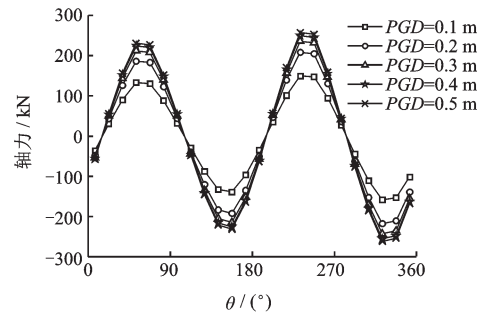
(b) 右隧

图10 双线盾构隧道的轴力性能曲线

Fig.10 Axial-force curves of the double-line shield tunnel



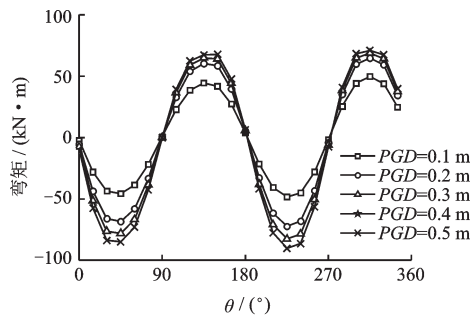
(a) 左隧



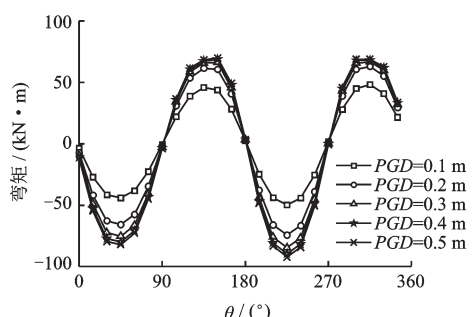
(b) 右隧

图12 双线盾构隧道的轴力包络图

Fig.12 Axial-force envelopes of the double-line shield tunnel



(a) 左隧



(b) 右隧

图11 双线盾构隧道的弯矩包络图

Fig.11 Bending moment envelopes of the double-line shield tunnel

式中, K_N 为隧道衬砌的轴向刚度; K_{N0} 为隧道衬砌处于弹性状态时 K_N 的初始值。

最终得到地层相对位移达到 0.5 m 时沿隧道一

周衬砌损伤因子的分布如图 13 所示。参考文献 [12] 中对结构损伤程度的划分标准, 可以看到除了在 $\theta = 135^\circ$ 和 315° 附近隧道衬砌达到中度损伤, 在其他位置隧道衬砌只是轻微损伤。但图 9 和图 10 表明此时隧道的内力已基本达到极限值。这说明在隧道尚未破坏时, 隧道周围的土层已经先达到破坏状态。

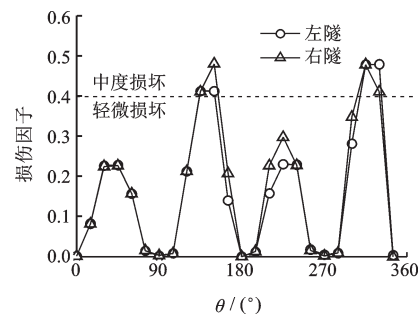


图13 双线盾构隧道的损伤

Fig.13 Damage of the double-line shield tunnel

3 结论

(1) 由于土体和隧道的非线性, 隧道的内力并非随地层相对位移线性增长, 而是逐渐趋近于一个极限值。

(2) 在 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 和 315° 的位置隧道弯

矩和轴力的值最大,这与弹性情况下盾构隧道抗震设计计算的解析解一致。

(3)隧道除了在 $\theta = 135^\circ$ 和 315° 附近达到中度损坏,在其他位置只是轻微损坏;在隧道尚未破坏时,隧道周围的土层已经先达到破坏状态。

参考文献:

- [1] Parra-Montesinos G J, Bobet A, Ramirez J A. Evaluation of soil-structure interaction and structural collapse in Daikai subway station during Kobe earthquake [J]. ACI Structural Journal-American Concrete Institute, 2006, 103(1): 113-122.
- [2] 陈国兴,左熹,庄海洋,等.地铁车站结构大型振动台试验与数值模拟的比较研究[J].地震工程与工程振动, 2008,28(1):157-164.
Chen G X, Zuo X, Zhuang H Y, et al. A comparison between large-size shaking table test results and numerical simulation of a subway station structure [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 157-164. (in Chinese)
- [3] 黄茂松,曹杰.隧道地震响应简化分析与动力离心试验验证[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):271-280.
Huang M S, Cao J. Simplified analysis of tunnel earthquake response and centrifuge modelling calibration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 271-280. (in Chinese)
- [4] Davison C. Fusakichi Omori and his work on earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1924, 14(4): 240-255.
- [5] 城市轨道交通结构抗震设计规范:GB50909—2014 [S].北京:中国标准出版社,2014.
Code for seismic design of urban rail transit:GB50909—2014[S]. Beijing:China Standard Press, 2014. (in Chinese)
- [6] Anderson D G, Martin G R, Lam I P, et al. Seismic design and analysis of retaining walls, buried structures, slopes and embankments [S]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, 2008.
- [7] 钱稼茹,罗文斌.静力弹塑性分析:基于性能/位移抗震设计的分析工具[J].建筑结构,2000,30(6):23-26.
Qian J R, Luo W B. Static pushover analysis: An analytical tool for performance/displacement based seismic design [J]. Building Structure, 2000, 30(6): 23-26. (in Chinese)
- [8] 汪大绥,贺军利,张凤新.静力弹塑性分析(Pushover Analysis)的基本原理和计算实例[J].世界地震工程, 2004,20(1):45-53.
Wang D S, He J L, Zhang F X. The basic principle and a case study of the static elastoplastic analysis (Pushover analysis) [J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(1): 45-53. (in Chinese)
- [9] 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 J B, Liu X Q, Li B. A Pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 73-80. (in Chinese)
- [10] Liu J B, Wang W H, Dasgupta G. Pushover analysis of underground structures: method and application [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(2): 423-437.
- [11] 杨智勇,黄宏伟,张冬梅,等.盾构隧道抗震分析的静力推覆方法[J].岩土力学,2012,33(5):1381-1388.
Yang Zh Y, Huang H W, Zhang D M, et al. Pushover method for seismic analysis of shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1381-1388. (in Chinese)
- [12] Zou Y, Liu H B, Jing L P, et al. A pseudo-static method for seismic responses of underground frame structures subjected to increasing excitations [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 65(5): 106-120.
- [13] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972, 98:603-624.
- [14] Taucer F, Spacone E, Filippou F C. A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures [M]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, 1991.
- [15] Bunni N G, Scott B D, Park R, et al. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high-strain rates-discussion [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1982, 79(6): 496-498.
- [16] 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 R Sh, Hu Sh Q, Shi H B. 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)

[17] 工程场地地震安全性评价:GB17741—2005 [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
Evaluation of seismic safety for engineering sites: GB17741—2005 [S]. Beijing: China Standard Press, 2005. (in Chinese)

[18] 俞言祥,汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. 震灾防御技术,2006,1(3): 206-216.
Yu Y X, Wang S Y. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in eastern and western China [J]. Technology for Earth-

quake Disaster Prevention, 2006, 1 (3) : 206-216. (in Chinese)

[19] 张栋梁,杨林德,谢永利,等. 盾构隧道抗震设计计算的解析解[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(3): 543-549.
Zhang D L, Yang L D, Xie Y L, et al. Analytical solution for aseismic design calculation of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(3):543-549. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)



(上接第 572 页)

[4] Sathiparan Navaratnarajah, Sakurai Kotaro, Numada-Muneyoshi, et al. Seismic evaluation of earthquake resistance and retrofitting measures for two story masonry houses [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(4):1805-1826.

[5] 曾银枝,李保华,徐福泉,等. 角钢和打包带加固低强度砖墙的抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011,33(6):58-62.
Zeng Y Zh, Li B H, Xu F Q, et al. Experimental study on seismic performance of low-intensity brick walls with steel angles and packing belts [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33 (6) : 58-62. (in Chinese)

[6] 姚新强. 规则平面西藏单层砌体打包带加固抗震试验研究与有限元模拟分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011.

Yao X Q. Polypropylene band strengthening seismic test on tibet single masonry of regular plane and finite element simulation analysis [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)

[7] 建筑抗震试验规程:JGJ/T101—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[8] 苏启旺,许浒,吴昊,等. 砖砌体结构层间位移角的探讨 [J]. 土木工程学报,2013,46(增1):111-115.
Su Q W, Xu H, Wu H, et al. Research on inter-story displacement angle of brick masonry structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (Sup1) : 111-115. (in Chinese)



(上接第 578 页)

[11] 龙复兴,张旭,顾平,等. 调谐质量阻尼器系统控制地震反应的若干问题[J]. 地震工程与工程振动,1996,16(2):87-94.
Long F X, Zhang X, Gu P, et al. Problems in seismic responses of structures under the control of tuned-mass dampers [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2):87-94. (in Chinese)

[12] 白国良,朱丽华. 基于现行抗震规范的 Kanai-Tajimi 模型参数研究[J]. 世界地震工程,2004,20(3):114-118.
Bai G L, Zhu L H. Study on the parameters of Kanai-Tajimi model based on the code GB50011—2001 [J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20 (3) : 114-118. (in Chinese)

[13] Den Hartog J P. Mechanical vibrations [M]. 4th ed. New York: Dover Publications, 1956.

[14] Tsai H C, Lin G C. Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22(11):957-973.

[15] 田启强,丰彪,王自法,等. 地震总输入能自抵耗效应研究[J]. 地震工程与工程振动,2010,30(6):65-70.
Tian Q Q, Feng B, Wang Z F, et al. Study on self-dissipation effect of earthquake total input energy [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(6):65-70. (in Chinese)