

DOI: 10.11779/CJGE2022S2001

基于振动台试验的粉质黏土隧道抗震计算方法修正

马险峰^{1, 2, 3}, 刘正好², 吴迪⁴, 董一今⁴

(1. 喀什大学土木工程学院, 新疆 喀什 844006; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092; 4. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 200092)

摘要: 地下结构的地震响应特性对地层特性具有较强敏感性。基于振动台模型试验, 提出了一种粉质黏土隧道的结构动力时程计算方法, 并计算确定了适合粉质黏土中隧道结构抗震计算的反应位移法。研究表明: 采用经验公式计算的弯矩更接近动力时程的计算结果, 而有限元计算的隧道结构的轴力更接近动力时程计算结果。同时, 建议在粉质黏土隧道结构抗震计算过程中, 将隧道埋深范围内土层相对位移简化为线性变化, 并乘以系数 0.7; 地基弹簧刚度乘以系数 1.1。研究结论可为粉质黏土隧道抗震设计提供参考。

关键词: 粉质黏土隧道; 地震响应; 数值模拟; 抗震计算

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S2-0001-05

作者简介: 马险峰(1972—), 男, 河南沈丘人, 博士, 教授, 主要从事岩土物理模型试验、地下结构抗震等方面的教学和科研工作。E-mail: xf.ma@tongji.edu.cn。

Correction of seismic calculation method for silty clay tunnels based on shaking table test

MA Xian-feng^{1, 2, 3}, LIU Zheng-hao^{2, 1}, WU Di⁴, DONG Yi-jin⁴

(1. College of Civil Engineering, Kashi University, Kashi, 844006 China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Shentong Metro Group Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: The seismic response characteristics of underground structures have a strong sensitivity to stratum characteristics. A structural dynamic time history analysis method for silty clay tunnels is proposed based on the shaking the table model tests. The response displacement method suitable for seismic calculation of tunnel structures in silty clay is determined. The results show that the bending moment calculated by the empirical formula is closer that by the dynamic time history method, while the axial force of tunnel structures calculated by the finite element method is closer to that by the dynamic time history method. It is suggested that in the seismic calculation of silty clay tunnel structures, the relative displacement of the soil layer within the buried depth of the tunnel should be simplified to linear change and multiplied by a coefficient of 0.7, and the foundation spring stiffness should be multiplied by a coefficient of 1.1. The conclusions may provide a reference for the seismic design of silty clay tunnels.

Key words: silty clay tunnel; seismic response; numerical simulation; seismic calculation

0 引言

地下结构的地震响应有明显的地域特征, 受场地地质条件和地震区划条件的影响较大。《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909—2014)^[1]中对城市轨道交通中地铁结构抗震设计的关键问题进行了研究, 而针对于粉质黏土隧道抗震特性的研究还比较欠缺。随着地下空间开发和地下结构建设规模的不断加大, 以济南为代表的粉质黏土地区隧道建设逐步展开。有必要对粉质黏土隧道的地震响应规律进行进一步的研究, 把握隧道主要结构形式在地震荷载下的响应特征

和响应机理, 确保地下结构在地震时的安全性。

一般来说, 研究隧道地震动力响应的方法包括理论分析、现场观测、振动台模型试验和数值计算等。许多专家学者围绕地下结构数值计算开展了一系列研究。Zhong 等^[2]采用非线性增量动力分析方法, 建立了两层三跨地铁车站在 3 个典型工程场地中的地震易损性曲线。李海波等^[3]采用 FLAC3D 分析了地震荷载

基金项目: 山东省重点研发计划项目(重大科技创新工程)(2021CXGC011203)

收稿日期: 2022-12-02

作用下埋深洞室形状以及地应力特征对岩体洞室位移特征的影响规律。Ma 等^[4]分析了挡泥墙的存在对矩形地铁站地震反应的影响。除此之外,国内外众多学者围绕地下结构地震动力响应开展了大量的土-结构振动台模型试验研究^[5-7]。为了更准确地了解地震波作用下隧道和地层的地震动力响应特征,为粉质黏土地区隧道抗震提供建议。本文在前期开展的粉质黏土隧道地震响应数值模拟及其抗震计算方法修正研究,研究结论可为粉质黏土隧道抗减震设计提供参考。

1 模拟方案及其过程

本文在前期振动台试验中测得的结果^[8]上,采用 ABAQUS 模拟计算其内力,进一步了解地震过程中隧道结构的受力情况。

1.1 阻尼系数计算

采用 Rayleigh 阻尼方法^[9]确定阻尼系数,计算结果如表 1 所示。

表 1 各工况阻尼系数表

Table 1 Damping coefficients for various working cases

工况	土		砂		
	α	β	α	β	
汶川波	工况 2	2.291667	0.003875	3.951149	0.002248
	工况 6	2.5	0.008889	4.458333	0.004984
	工况 10	2.083333	0.022404	5.22343	0.008936
	工况 14	1.666667	0.017923	4.178744	0.007149
El-Centro 波	工况 3	1.875	0.003945	3.605769	0.002051
	工况 7	2.708333	0.013328	5.522876	0.006536
	工况 11	3.020833	0.020912	7.376453	0.008564
济南波	工况 15	2.291667	0.030524	7.762097	0.009012
	工况 4	1.458333	0.003319	2.916667	0.001659
	工况 8	1.666667	0.006342	2.5	0.004228
	工况 12	3.541667	0.017429	5.138889	0.012012
工况 16	2.953125	0.026367	7.03125	0.014063	

1.2 动力时程计算模型

采用动力时程模型与振动台试验模型进行比较分析。计算模型长 9 m, 高 1.35 m。模型箱宽 3 m, 高 1.35 m。由 A 固定边界, B 土体材料, C 阻尼器, D 土体, 4 部分组成。E 为接触单元, 模拟土层与隧道的接触面。土层分布情况由下到上 0~90 cm 范围内为济南粉质黏土层, 90~135 cm 范围内为砂层, 模型如图 1 所示。

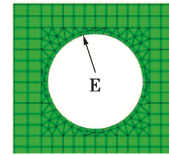
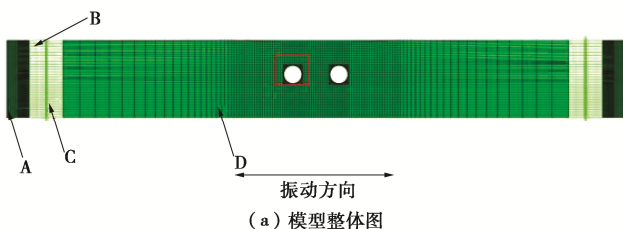


图 1 模型图

Fig. 1 Diagram of model

1.3 模拟工况

模型中隧道由梁单元模拟, 底边模拟振动台模型箱底部, 限制竖向边界, 振动方向输入地震波。土体上表面为自由边界。隧道模型参数、土体参数见表 2。

表 2 模型参数表

Table 2 Model parameters

材料	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)
济南粉质黏土	7.6	3.4	15
砂	16	0.1	38
隧道 (有机玻璃)	3300		

模拟工况与振动台试验相同, 分别输入济南人工波、汶川波和 El-Centro 波。加速度峰值依次为 0.143g, 0.410g, 0.6g 和 0.918g。如表 3 所示。

表 3 工况表

Table 3 Working cases

工况	输入波类型	工况代号	加速度峰值/g
1	白噪声	WN1	0.07
2	汶川波	WC2	
3	El-Centro	EL3	0.143
4	济南人工波	JN4	
5	白噪声	WN5	0.07
6	汶川波	WC6	
7	El-Centro	EL7	0.410
8	济南人工波	JN8	
9	白噪声	WN9	0.07
10	汶川波	WC10	
11	El-Centro	EL11	0.6
12	济南人工波	JN12	
13	白噪声	WN13	0.07
14	汶川波	WC14	
15	El-Centro	EL15	0.918
16	济南人工波	JN16	
17	白噪声	WN17	0.07

2 数值计算结果和模型试验结果对比

2.1 加速度放大系数的对比

将上述各工况下加速度放大系数的试验结果和数值模拟结果相对比, 研究发现试验结果和数值模拟加速度放大系数随埋深的变化规律基本一致。部分工况对比结果如图 2 所示。

2.2 加速度时程对比

由图 3 可知各埋深观测点试验结果和数值计算结果加速度时程大致保持一致。

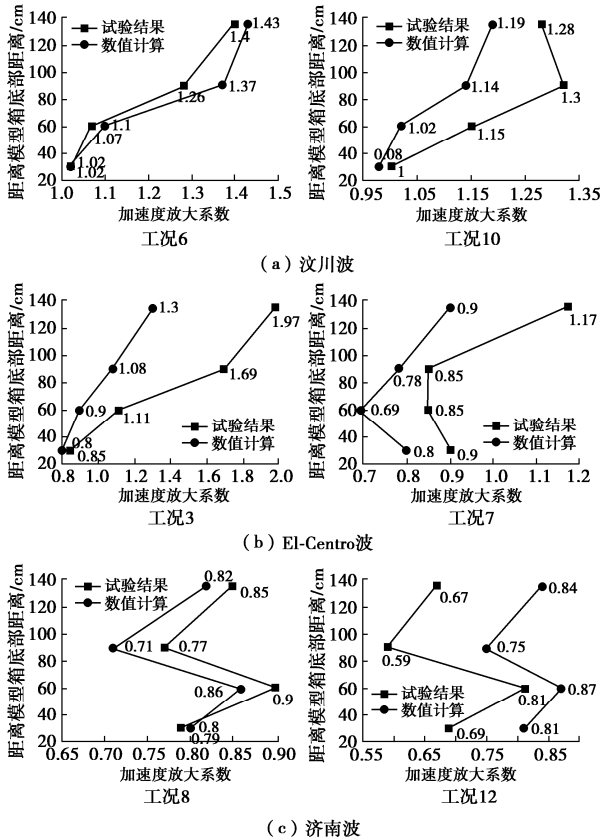


图 2 加速度放大系数试验结果和数值计算对比

Fig. 2 Comparison of acceleration amplification factors between test results and numerical calculations

2.3 位移峰值对比

图 4 对比了各工况地层位移的峰值结果, 数值计算结果和试验结果基本保持一致。

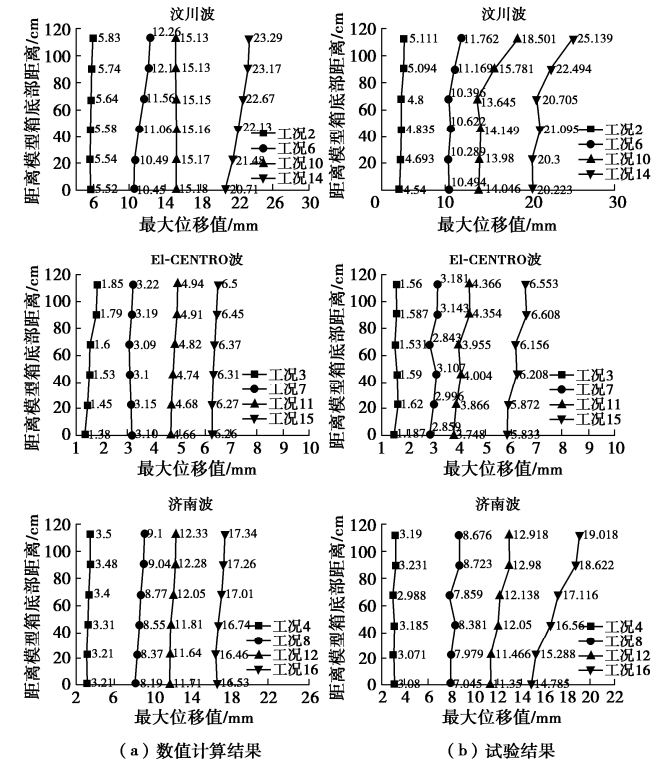


图 4 土层位移数值计算和试验结果对比

Fig. 4 Comparison between numerical calculations and test results of displacement of soil layer

3 规范反应位移法的修正

地下结构的地震响应特性对地层较为敏感, 已有经验公式不能准确地涵盖各种地域特性, 需要针对不同地层特性开展进一步研究。反应位移法将地震作用分解为地层的相对位移和地层剪力, 地层与地下结构之间的相互作用通过地基弹簧体现。该方法计算简单, 计算过程荷载施加明确合理, 符合地下结构受力特性。

3.1 参数选取

在反应位移法抗震计算中, 地基弹簧、地层剪力和隧道结构范围内地层相对位移的取值对计算结果影响较大。一般来说, 这些参数的选取有经验公式法和有限元计算两种方法。经验公式法针对圆形隧道结构, 日本土木研究所资料《大型地下结构抗震设计方法指南》中推荐了地基弹簧刚度采用下式计算, 式(1)为切向刚度计算公式, 式(2)为径向刚度计算公式。

$$k_n = \frac{2G}{R}Ld \quad (1)$$

$$k_s = 3\frac{2G}{2R}Ld \quad (2)$$

式中 G 为地基剪切模量, 可取等效剪切模量; R 为

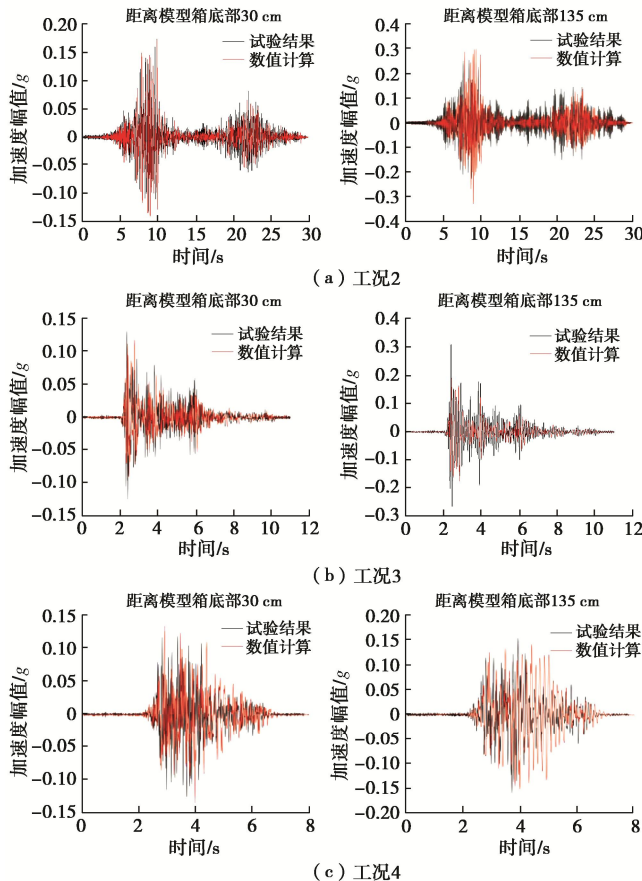


图 3 加速度试验结果和数值计算对比

Fig. 3 Comparison of acceleration between test results and numerical calculations

圆形结构半径。

对于地层位移计算,《城市轨道交通结构抗震设计规范》中推荐的经验公式如下:

$$U_a(z) = \frac{1}{2} u_{\max} \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right), \quad (3)$$

$$U_a(z) = \frac{\pi}{2H} \frac{1}{2} G_d u_{\max} \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right)。 \quad (4)$$

有限元算法取一定宽度和深度的地层,在地下结构所在的位置施加相应均布荷载 q , 通过计算得到其相应的形变 δ 和弹簧刚度系数。对于剪力和位移,通过对地层施加相应的地震波,计算场地位移。

在上节建立的动力时程计算模型基础上,采用 ABAQUS 建立拱顶埋深 18 m 的隧道断面,开展动力时程计算,计算模型如图 5 所示。同时,对 3 种计算方法计算结果进行比较。

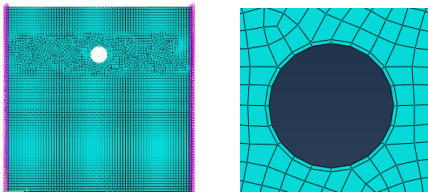


图 5 模型图

Fig. 5 Diagram of model

3.2 反应位移法模型

隧道采用梁单元,模型如图 6 所示。地基弹簧施加在径向和切向两个方向,通过在外圆弹簧对应节点施加相对位移。各种方法计算结果对比见表 4。

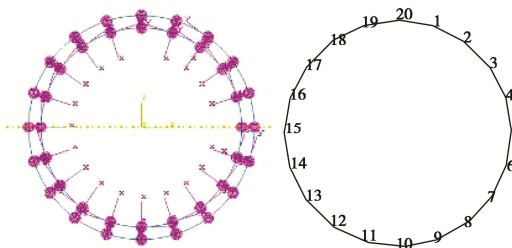


图 6 ABAQUS 模型图

Fig. 6 Diagram of ABAQUS model

表 4 计算结果对比

Table 4 Comparison of calculated results

梁单元模量	内力	完全规范计算	有限元计算	动力时程计算
$E=35$ GPa	轴力/N	90860	128000	101000
	弯矩/(N·m)	41200	60300	45700
$E=17.5$ GPa	轴力/N	81080	114600	103300
	弯矩/(N·m)	21900	32720	24780
$E=7$ GPa	轴力/N	73020	103200	96190
	弯矩/(N·m)	9300	14100	10380
$E=3.5$ GPa	轴力/N	67640	94900	90000
	弯矩/(N·m)	4890	7460	5214

从上述计算结果可以看出,完全规范计算的弯矩和有限元算法计算的轴力计算结果与动力时程计算结果更接近。为了使计算获得更精确的结果,对反应位移法的几个关键参数进行敏感性分析。

3.3 参数敏感性分析

令参数 ($a_1^* \dots a_n^*$) 取基准值且固定不变,分析参数 α_k 对特性 P 的影响。定义系统特性 P 表现为

$$P = f(a_1, \dots, a_k, \dots, a_n) = \Phi(a_k)。 \quad (5)$$

定义敏感度函数为系统特性 P 的相对误差 $\delta_u = \frac{|\Delta P|}{P}$ 与参数 a_k 的相对误差 $\delta_{a_k} = \frac{|\Delta a_k|}{a_k}$ 的比值,则

参数敏感度函数 S 可表达为

$$S_k^* = \left| \frac{d\Phi(a_k)}{da_k} \right| \frac{a_k}{P}。 \quad (6)$$

由以上公式,可以得出参数 a_k 在一定范围内的敏感函数曲线 $S_k^* \sim a_k$, 当 a_k 为基准值时,即可以得到参数的敏感度因子 S_k^* 。 S_k^* 值越大,系统特性 P 对 a_k 越敏感。由参数敏感性公式计算得出各参数取值相对于隧道结构轴力和弯矩敏感度函数 S , 并把基准参数代入参数敏感性函数可得参数敏感性因子,总结如表 5。

表 5 参数敏感性因子表

Table 5 Sensitivity factors of parameters

内力	相对位移	地层剪力	弹簧刚度
轴力	0.379	0.621	0.235
弯矩	0.432	0.572	2.71

由以上关系函数关系可知,隧道结构轴力和弯矩都随着施加的强制位移和地层剪力的增大而增大。轴力随地基弹簧刚度的增大而减小,弯矩随地基弹簧刚度的增大而增大。根据参数敏感性因子可知地基弹簧刚度的变化对隧道结构弯矩的变化影响很大。规范中计算方法,在模型上施加地层剪力时是集中荷载,施加过程复杂。本文在规范方法的基础上修改弹簧刚度和相对位移。规范中相对位移的经验公式为随埋深变化的正弦函数,将隧道结构所在埋深地层相对位移简化为直线变化,且整体乘以 0.7 的系数。通过上文静力有限元计算可知地基弹簧刚度系数是随其埋深而变化的。同时考虑到在满足工程精度要求的条件下,尽可能减少设计和施工人员的计算工作量,修改后的地基弹簧刚度系数依然按规范中推荐的日本土木研究所资料《大型地下结构抗震设计方法指南》中规定的地基弹簧刚度推荐的公式,在此基础上乘以 1.1 的系数,计算结果对比见表 6。

由表中计算结果可知,新方法计算的结果更接近动力有限元计算的结果,更适合粉质黏土中隧道结构受力分析,在设计中可以考虑。

表 6 各种方法计算结果与动力时程计算结果相对误差表

Table 6 Relative errors between calculated results by various methods and dynamic time history method

隧道弹模 /GPa	内力	完全规范	有限元计算	新方法
E=35	轴力	10.00%	26.73%	8.12%
	弯矩	9.85%	31.95%	1.75%
E=17.5	轴力	21.26%	11.65%	4.48%
	弯矩	11.69%	31.85%	3.83%
E=7	轴力	24.12%	7.07%	7.37%
	弯矩	10.58%	35.58%	2.21%
E=3.5	轴力	24.89%	5.44%	8.33%
	弯矩	6.14%	43.19%	3.38%

4 结 论

本文通过模拟前期振动台试验工况, 提出针对埋置于粉质黏土层中隧道结构动力时程计算的方法, 并将该方法应用到实际工程中隧道结构抗震计算。基于此结合《城市轨道交通结构抗震设计规范》给出的反应位移法, 经过计算确定了一种适合济南粉质黏土中隧道结构抗震计算的反应位移法。主要得到以下 3 点结论。

(1) 《城市轨道交通结构抗震设计规范》针对反应位移法中各个参数规范中给出经验公式和采用有限元计算, 采用经验公式计算的弯矩更接近动力时程的计算结果, 而有限元计算的隧道结构的轴力更接近动力时程计算结果。

(2) 根据计算结果, 建议在进行济南粉质黏土中隧道结构抗震计算过程中, 在经验公式的基础上, 将隧道埋深范围内土层相对位移简化为线性变化, 并乘以系数 0.7。

(3) 地基弹簧刚度推荐按日本土木研究所资料《大型地下结构抗震设计方法指南》中规定的地基弹簧刚度的公式计算, 并乘以系数 1.1。

参考文献:

[1] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. (Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures: GB 50909—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese))

- [2] ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHAO M, et al. Seismic performance evaluation of two-story and three-span subway station in different engineering sites[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, **26**(14): 7505 - 7535.
- [3] 李海波, 马行东, 李俊如, 等. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 358 - 362. (LI Hai-bo, MA Xing-dong, LI Jun-ru, et al. Study on influence factors of rock cavern displacement under earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 358 - 362. (in Chinese))
- [4] MA C, LU D C, DU X L, et al. Seismic performance of a rectangular subway station with earth retaining system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, **21**(1): 221-236.
- [5] XU H, LI T B, XIA L, et al. Shaking table tests on seismic measures of a model mountain tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **60**: 197 - 209.
- [6] KAWAMATA Y, NAKAYAMA M, TOWHATA I, et al. Dynamic behaviors of underground structures in E-Defense shaking experiments[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **82**: 24 - 39.
- [7] RABETI MOGHADAM M, et al. Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: shaking table testing and numerical simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **83**: 81 - 97.
- [8] 冯宁宁. 济南粉质黏土中地铁隧道振动台试验及地震响应计算研究[D]. 上海: 同济大学, 2018. (FENG Ning-ning. Shaking Table Test and Seismic Response Calculation of Subway Tunnel in Jinan Silty Clay[D]. Shanghai: Tongji University, 2018. (in Chinese))
- [9] 潘旦光, 高莉莉. Rayleigh 阻尼系数解法比较及对结构地震反应影响[J]. 工程力学, 2015, **32**(6): 192 - 199. (PAN Dan-guang, GAO Li-li. Comparison of determination methods for Rayleigh damping coefficients and effects on seismic responses of structures[J]. Engineering Mechanics, 2015, **32**(6): 192 - 199. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)