

Seismic Response Analysis of One-Layer Subway Station

Juan Xiong¹, Xiaofeng Ren²

¹Wuhan Iron and Steel Group Metal Resource Cooperation, Wuhan Hubei

²Wuhan Institute of Shipbuilding Technology, Wuhan Hubei

Email: liucivil126@126.com

Received: Jan. 2nd, 2017; accepted: Jan. 17th, 2017; published: Jan. 23rd, 2017

Abstract

Three-dimensional numerical simulation calculation model was established based on a practical one-layer subway station. Structure internal forces and deformation were analyzed under static load, middle seismic and large seismic wave excitations. And also, the seismic performance of the structure was evaluated according to code. The analysis results showed that: 1) The column of the subway station is a weak part during earthquake; 2) The internal forces at the combination of side wall and bottom plate were bigger; 3) The existing subway station has good seismic performance and can satisfy the code demands. The research conclusions in the paper can provide references for seismic design and analysis of relevant projections.

Keywords

Subway Station, Seismic Response, Seismic Performance Evaluation, Numerical Simulation

单层地铁车站结构地震响应分析

熊娟¹, 任晓峰²

¹武汉钢铁集团金属资源有限公司, 湖北 武汉

²武汉船舶职业技术学院, 湖北 武汉

Email: liucivil126@126.com

收稿日期: 2017年1月2日; 录用日期: 2017年1月17日; 发布日期: 2017年1月23日

摘要

针对某单层地铁车站结构, 建立了其三维数值计算模型, 分析了其在静力、中震和大震作用下结构受力

与变形, 并基于现有规范对其抗震性能进行了简单评价。结果表明: 1) 车站结构的柱子是其抗震的薄弱部位; 2) 车站边墙与顶板和底板结合处受力较大; 3) 现有的车站结构抗震性能良好, 满足规范要求。论文研究成果可为类似工程的抗震设计与分析提供参考。

关键词

地铁车站, 地震响应, 抗震性能评价, 数值计算模型

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地铁等地下结构在城市交通、抗震救灾等领域的重要性越来越显著, 因此其抗震性能也越来越受到人们的关注。我国新版的《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中首次新增了第 14 章“地下结构”, 明确要求地下结构必须进行抗震设计; 《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909-2014)也已颁布实施, 明确提出了地下结构简化抗震计算方法。与此同时, 住建部印发了《市政公用设施抗震设防专项论证技术要点(地下工程篇)》, 也从法规上规定了面积超过 10,000 平米的地下空间必须进行抗震设防专项论证。

目前针对地铁车站等地下结构地震响应的研究成果较多[1] [2] [3], 但大多进行了平面的简化计算分析, 或者仅进行了单一地震动作用下的计算分析。本文则基于某实际车站, 建立了其三维数值计算分析, 分析了结构在静力、中震和大震等作用下结构内力和变形, 计算地震动荷载引起的结构内力和位移的增量以评价动荷载效应, 然后基于现有规范对其抗震性能进行了评价。

2. 计算模型

该车站为两跨单层地下框架结构, 层高 3 m, 每跨均为 6 m, 采用 C40 混凝土浇筑。

2.1. 计算范围

根据楼梦麟教授的研究表明[4]: 地基平面的尺寸与结构平面的尺寸之比大于 5 时, 动力计算的结果已可趋于稳定, 侧向边界的影响可予忽略。另据陈跃庆[5]的试验结果, 认为自由场平面尺寸与模型结构的宽度之比大于 2 时, 侧向边界的影响也可予以忽略。对于水平横向输入的地震波, 计算表明: 纵向计算长度取结构纵向长加 2 倍、4 倍、6 倍的横向结构宽度(即前后土体各取结构横向跨度的 1 倍、2 倍、3 倍)时, 计算结果的差异均在 10% 内[6]。综合上述研究成果, 初步确定计算范围为: 沿水平激振方向的计算宽度取为结构宽度的 5 倍(即左右两侧土体均为结构横向宽度的 2 倍)、纵向计算长度的选取与横向计算长度的选取一致, 两端土体均取 2 倍的结构横向宽度、深度方向则依据场地条件选取至基岩面, 最终的计算范围: 60 m (水平横向) × 81 m (水平纵向) × 50 m (竖向)。土体和结构计算模型见图 1, 图 2。

2.2. 边界条件

静力计算时, 模型四个侧面均取固定边界, 底部为竖向固定、水平自由的边界, 表面为自由变形边界。动力计算时, 需设置动力边界条件, 即在模型的四个侧面上均采用自由场边界条件[7], 底部取为竖向固定、水平自由的边界(输入地震动需要), 顶面仍为自由变形边界。

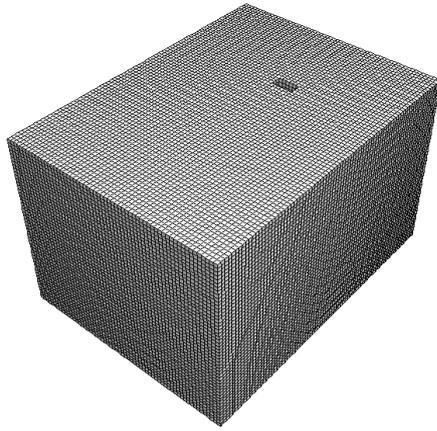
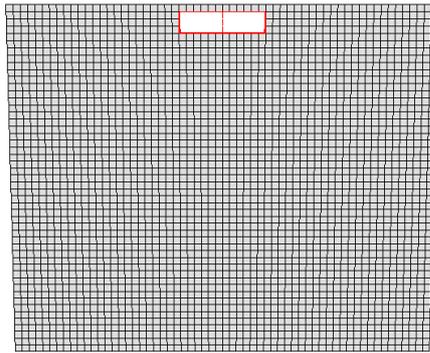
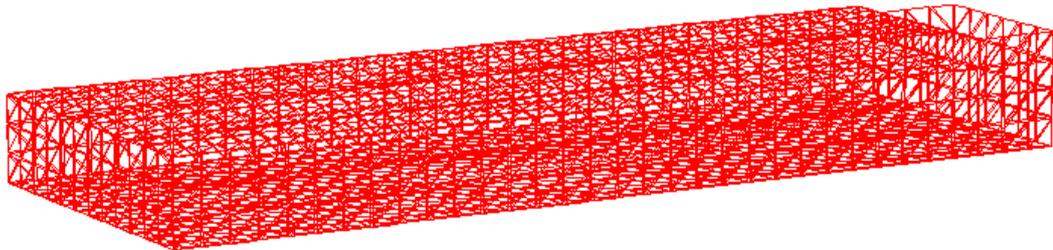


Figure 1. The overall calculation model
图 1. 整体计算模型



(a) 土体横剖面及结构的位置



(b) 结构计算模型

Figure 2. Structure calculation model
图 2. 结构计算模型

2.3. 地震荷载的输入

动力计算时, 在地下 50 m 基岩处输入未来 50 年超越概率为 10% (中震)和 2% (大震)的当地人工地震动加速度进行中震和大震计算, 中震和大震的地震加速度时程曲线如图 3 所示。

2.4. 材料本构模型

文献[8]对重塑土动力试验结果进行拟合的研究表明, 采用三参数 Davidenkov 模型能较好的拟合试验结果。文献[9]对上海原状土的动力特性进行动力试验表明, 软土的动应力应变关系亦可采用 Davidenkov 模型描述, 因此本文建议采用 Davidenkov 模型模拟武汉软土的非线性特性。Davidenkov 模型可描述为:

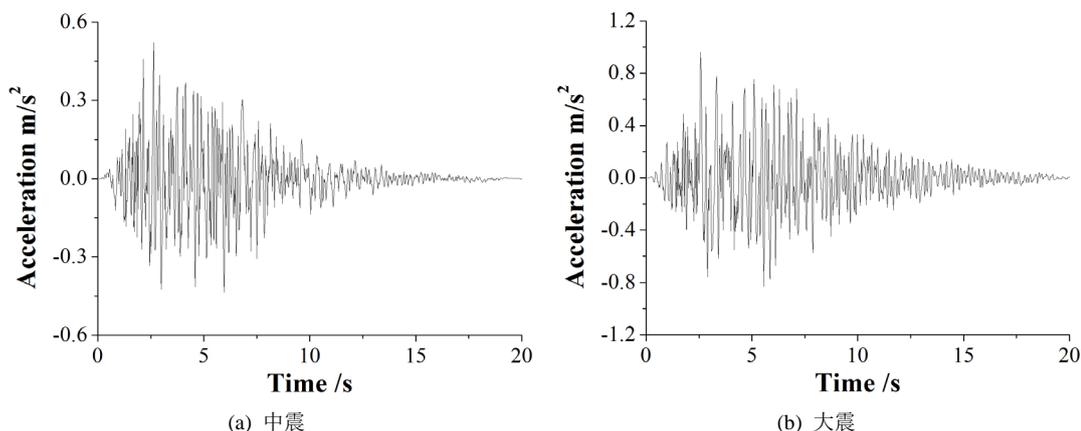


Figure 3. Acceleration time history curves imported at the bedrock surface
图3. 基岩面输入加速度时程曲线

$$G_d/G_{\max} = 1 - \left[\frac{(\gamma_d/\gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma_d/\gamma_r)^{2B}} \right]^A \quad (1)$$

$$\lambda/\lambda_{\max} = [1 - G_d/G_{\max}] \quad (2)$$

式中 A 、 B 和 γ_r 为拟合常数, γ_r 亦为参考剪应变, γ_d 为瞬时动剪应变, G_d 和 λ 为瞬时的动剪切模量和阻尼比, G_{\max} 和 λ_{\max} 为最大动剪切模量和最大阻尼比。

文献[10]在试验研究的基础上, 给出了武汉软土地层中四种常见土类: 粉质粘土、粘土、粉土和砂土的模型参数取值(表1)。

计算时采用 Davidenkov 模型描述软土的非线性特性, 土层的计算参数见表2。

钢筋混凝土采用 M-C 模型, 考虑混凝土的塑性变形。

3. 静力计算结果及分析

静力计算时考虑的荷载有土体与结构的自重及地面超载, 地面超载按规范取 20 kPa。

3.1. 柱端弯矩

结构板柱排列情况及静力下人防结构柱子平面内的弯矩见图4、图5。

由图可见:

- 1) 在第五根柱子上由于其右端楼板开洞的影响, 其柱端弯矩发生了突变。
- 2) 若不考虑楼板开洞的影响, 沿纵向柱子的弯矩大都在 5 kN*m 与 -5 kN*m 之间, 变化不大。

3.2. 板弯矩

考虑到结构对称性, 这里仅给出结构底板, 顶板的左跨左端(与左边墙结合)、左跨右端(与中柱结合)等几个部位的弯矩沿结构纵向的变化曲线。图6、图7分别为静力作用下结构底板跨端及顶板跨端沿结构纵向的变化曲线, 由图可见:

- 1) 结构左跨右边弯矩的变化曲线均为锯齿形, 其最大峰值对应板与柱端结合处, 因而设计中需注意板、柱结合处由于剪力和弯矩过大而产生剪切破坏;
- 2) 板跨中弯矩为正, 下表面受拉, 板跨边弯矩为负, 上表面受拉。

Table 1. Parameters in Davidenkov model for four types soil
表 1. 四种土类的 Davidenkov 模型参数

土类型	G_d				λ	
	A	B	$\gamma_r (10^{-4})$	相关系数R	β	相关系数R
粉质粘土	1.2046	0.4527	7.1	0.9987	1.3185	0.9815
粘土	0.5773	0.6487	20.4	0.9954	1.3690	0.9814
粉土	0.6909	0.5530	15.5	0.9994	1.2468	0.9796
砂土	0.8094	0.5421	13.5	0.9994	1.0735	0.9952

Table 2. Soil computation parameters
表 2. 土层的计算参数

土层	密度(kg/m ³)	剪切波速(m/s)	最小阻尼比	泊松比
杂填土	1700	252	0.015	0.42
粘土	1900	275	0.02	0.4
泥岩	2000	582	0.01	0.38

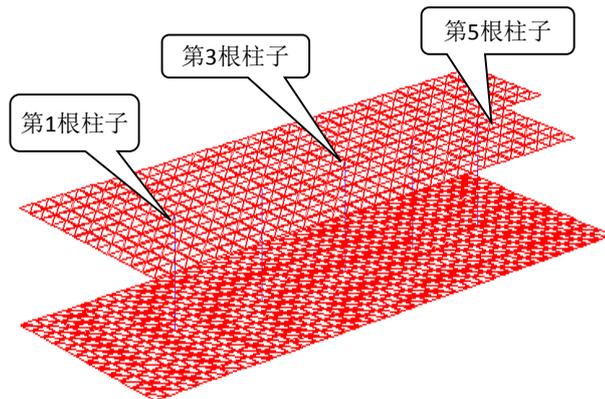


Figure 4. Structure plate and column arrangement
图 4. 结构板柱排列示意图

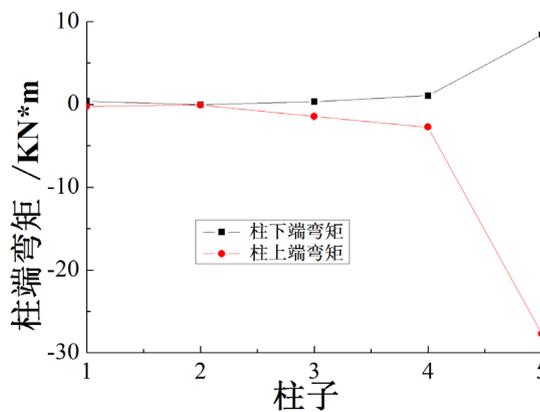


Figure 5. Static column ends moment
图 5. 静力作用下柱端弯矩

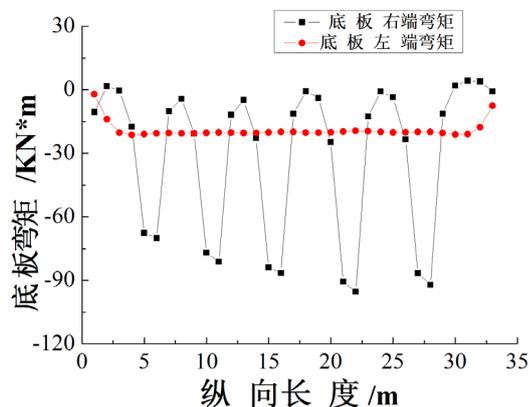


Figure 6. Static moments at side part of bottom plate

图 6. 静力作用下底板跨边弯矩

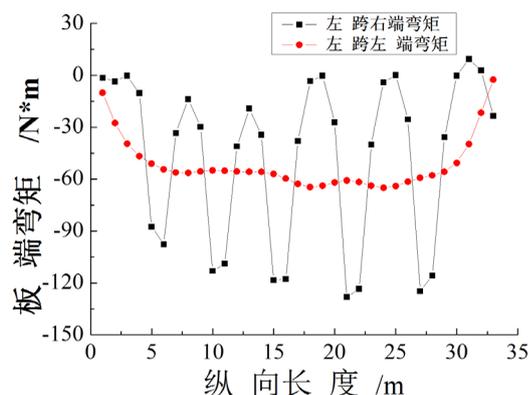


Figure 7. Static moments at side part of top plate

图 7. 静力作用下顶板跨边弯矩

3.3. 边墙弯矩

图 8 为边墙与顶板与底板交接处弯矩沿纵向的变化曲线。由图可见：

- 1) 边墙与板结合处的弯矩为负。
- 2) 边墙与顶板结合处的弯矩较大。

4. 动力计算结果及分析

本节研究结构在静力及超越概率为 10% 和 2% 人工波作用下的合内力, 分析的目的在于找出结构的受力最不利部位, 并将结构受力最不利部位的合内力与对应部位的静内力进行比较, 得到地震荷载引起结构受力最不利部位的内力增幅, 以便工程实践参考应用。地震荷载引起内力增幅的计算式为:

$$\text{地震荷载引起的增幅} = \frac{\text{合内力的绝对值} - \text{静内力的绝对值}}{\text{静内力的绝对值}} \times 100\% \quad (3)$$

限于篇幅, 本文仅给出中震时的时程曲线, 大震的计算结果则通过表格形式给出最大值。

4.1. 柱端合弯矩

沿结构纵向第 5 根柱子上端在静力作用下的弯矩最大(27.7 KN*m), 在中震时合力作用下该柱上端合弯矩时程曲线见图 9, 最大值为 99.4 KN*m, 图 10 为柱端的合弯矩幅值变化曲线。上考虑结构的对称性,

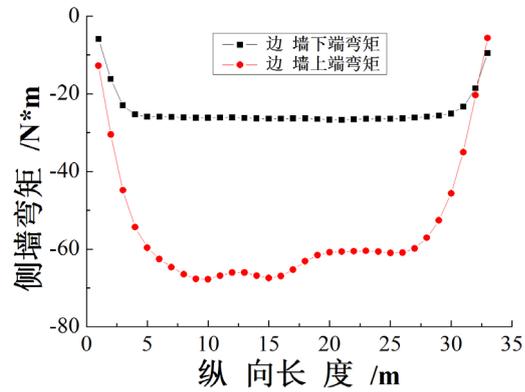


Figure 8. Static moments at the combination of side wall and plates

图 8. 静力作用下侧墙与板交接处弯矩

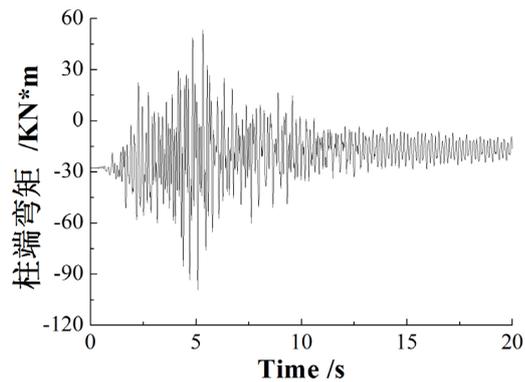


Figure 9. Moment time history curve at column end

图 9. 柱端弯矩时程曲线

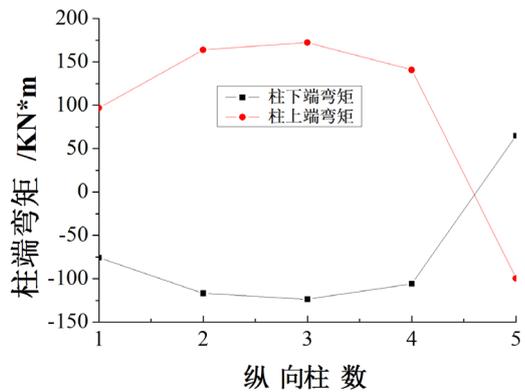


Figure 10. Changing curves of column moment peak values under resultant loads

图 10. 柱端合弯矩幅值变化曲线

以柱端弯矩为例，表 3 给出了其在静力与合力下的弯矩。由表 3 及图 9 可见：

柱子为轴向受力构件，静力时柱端弯矩较小，而地震作用下，由于结构的剪切变形，柱子两端相对位移增加导致柱端弯矩有较大的增幅。考虑到静荷载时柱端弯矩太小，计算得到的增幅太大，故此处为给出柱端弯矩的增幅值。

Table 3. Absolute moment values at column up ends under static and resultant loads**表 3.** 柱子上端在静力与合力下的弯矩绝对值(单位 KN*m)

柱子数	静力弯矩	合力弯矩	
		中震	大震
1	0.26	96.93	109.51
2	0.05	163.85	204.84
3	1.46	172.27	219.59
4	2.74	140.87	161.90
5	27.73	99.43	121.80

4.2. 边墙的合弯矩

图 11 为结构边墙与板结合处沿纵向各单元弯矩时程的变化曲线, 对比图 8, 图 11 并将静力与合力时的幅值提取出来可得:

- 1) 曲线形状基本一致, 表明静力与合力下弯矩最大值的位置一致, 均位于边墙与顶板结合处;
- 2) 边墙弯矩平均增幅为: 中震时上端为 43.9%, 下端为 85.3%; 大震时上端为 48.7%, 下端为 92.1%。

4.3. 板的合弯矩

静力及动力计算结果表明: 结构顶板的弯矩最大, 因此这里给出合力下顶板的计算结果。考虑结构的对称性, 图 12 为结构顶板两个跨边(左跨左边、左跨右边)在地震过程中的弯矩最大值沿车站纵向的变化曲线, 由图 6~8 及图 12 可见:

- 1) 曲线形状基本一致, 表明静力与合力下弯矩最大值的位置一致, 跨边的最大值位于底板与左边墙结合处;
- 2) 跨边弯矩平均增幅为: 中震时左端为 59.0%, 右端为 207.2%; 大震时左端为 60.5%, 右端为 157.2%。

4.4. 结构变形分析

计算结果表明第 3 根柱顶端与底端横向相对位移最大, 其时程曲线如图 13 所示, 可见最大相对位移为 1.58 mm, 大震时则为 2.34 mm。另外, 柱顶端的位移大于柱底端的, 也间接说明了在横向剪切地震波作用下, 柱上端横向变形较大, 因此结构浅埋对抗震是不利的。

5. 结构抗震性能评价

地下结构与地表结构地震响应特点的本质区别在于地表结构的地震响应受惯性力支配, 而地表结构在地震时的惯性力效应很小, 地下结构的破坏主要是周围地层的变形强加在结构上。因此, 评价地下结构的抗震性能应以结构变形为主。目前我国的相关规范均是借用了地表结构的变形限值, 即《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中规定地下钢筋混凝土框架结构在罕遇地震作用下弹塑性层间位移角的限值为 1/250。基于上述 3.4 小节得到的结构在中震和大震时的变形值, 得到结构在中震和大震时的层间位移角分别为 1/1899 和 1/1282, 均远小于规范限值。另外, 上述内力计算结果也远小于 C40 混凝土的相关强度值。因此, 从结构受力和变形两角度来看, 结构在中震和大震时均有良好的抗震性能, 满足规范要求。

6. 结语

论文结合某实际地铁车站结构, 建立其三维数值计算模型, 计算分析了其在不同幅值的当地人工波

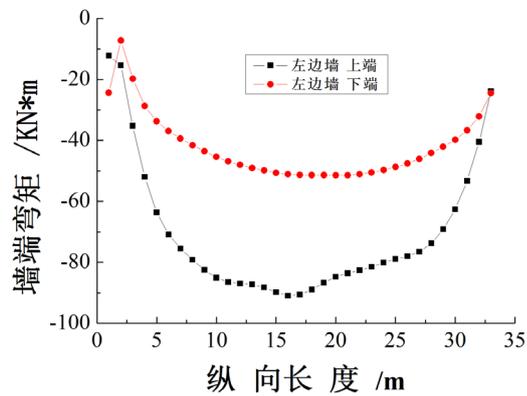


Figure 11. Moment peak values changing curves at the combination of side wall and plates
图 11. 边墙与板结合处弯矩幅值变化曲线

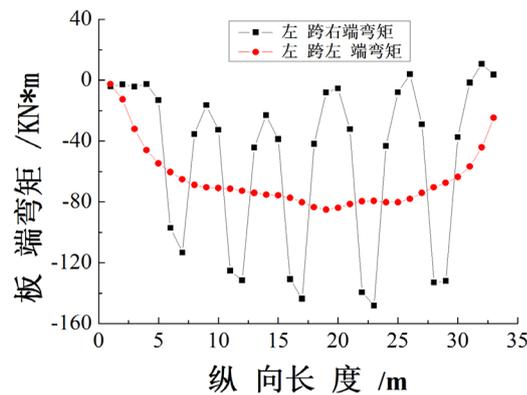


Figure 12. Moment peak values changing curves at side part of the top plate
图 12. 顶板跨边弯矩幅值变化曲线

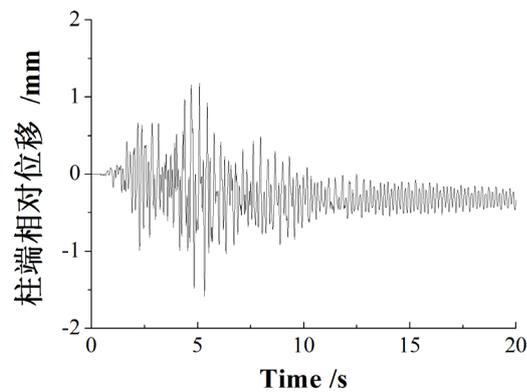


Figure 13. Relative displacement time history curve at the 3rd column ends under middle wave
图 13. 中震时第 3 根柱端横向相对位移时程曲线

作用下的地震响应规律, 给出了地震荷载引起的结构内力的增量以及结构变形, 并从结构受力和变形两个角度初步评价了结构的抗震性能。结果表明该车站结构具有良好的抗震性能, 能满足规范相关要求。论文研究方法和成果对相关工程的抗震设计和分析均有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] Masoud, R.M. and Mohammad, H.B. (2016) Seismic Ground Motion Amplification Pattern Induced by a Subway Tunnel: Shaking Table Testing and Numerical Simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **83**, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.002>
- [2] Moss R, E.S. and Crosariol, V.A. (2013) Scale Model Shake Table Testing of an Underground Tunnel Cross Section in Soft Clay. *Earthquake Spectra*, **29**, 1413-1440. <https://doi.org/10.1193/070611EQS162M>
- [3] 孙海峰, 景立平, 王树伟, 等. 地下结构地震破坏机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3267-3275.
- [4] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报, 2003, 31(7): 757-781.
- [5] 陈跃庆. 结构-地基动力相互作用体系振动台实验研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2001.
- [6] 王国波. 软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [7] Itasca Consulting Group (2002) Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- [8] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2002.
- [9] 刘齐建. 软土地铁建筑结构抗震设计计算理论的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2005.
- [10] 孔戈. 盾构隧道地震响应分析及抗减震措施研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org