

基于《城市轨道交通结构抗震设计规范》的 地铁地下结构抗震设计问题探讨*

侯莉娜¹ 文保军²

(1. 西安工业大学建筑工程学院,710021,西安;2. 中铁西安勘察设计研究院有限责任公司,710054,西安//第一作者,讲师)

摘 要 GB 50009—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》的颁布为我国城市轨道交通结构的抗震设计提供了技术标准。如何理解和运用该规范是做好地下结构抗震设计的基础。针对该规范,通过与地上民用建筑抗震设计相关参数的对比分析,重点对地铁地下结构的抗震设防目标及水准、地震动参数及抗震措施等方面进行了探讨。结果表明:对于一般的地铁地下结构可遵循“两水准、两阶段”的设计思路;结构抗震设计地震动参数的选取应与其设计基准期一致;结构抗震等级应通过结构形式、结构高度、地震烈度等综合考虑确定,并根据不同抗震等级来进行结构抗震措施的调整;应明确地震作用效应调整方法,尤其针对地下区间矿山法马蹄形和盾构圆形隧道,应给出更为具体的抗震构造措施,以完善地铁地下结构抗震措施的可操作性。

关键词 城市轨道交通;地下结构;抗震设计;地震动参数;抗震措施

中图分类号 TU352.1⁺1;U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.027

Discussion on Seismic Design of Underground Subway Structure Under the Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structure

HOU Lina, WEN Baojun

Abstract The promulgation of the Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structure provides a technical standard for seismic design of rail transit structure in China, good understanding and implementation of the new code is the foundation for the seismic design of underground structure. Through a comparison with the related parameters in civil building construction, the goal and level of seismic fortification, the ground motion parameters and the seismic measures are mainly analyzed. The results show that the seismic design for ordinary subway underground structure can follow the "Two-level, Two-phase" design principle; while the ground motion parameters in seismic design should be selected according to the

structural design reference period; seismic grades should be comprehensively determined by structural form, structural height and seismic fortification intensity, on this basis the seismic measures should be adjusted; the effects of adjustment method should be clarified especially for the horseshoe-shaped and circular tunnels built with mine tunneling method; and more detailed measures for seismic structures should be adopted to improve the maneuverability of underground structure seismic measures.

Key words urban rail transit; underground structure; seismic design; ground motion parameter; seismic measure

First-author's address School of Civil and Architectural Engineering, Xi'an Technological University, 710021, Xi'an, China

0 引 言

地铁地下结构在地震作用下可能会出现严重的破坏,其抗震安全成为目前工程设计中需要考虑的重要技术问题^[1-6]。然而,一直以来我国没有专用的城市轨道交通结构抗震设计规范。地面和地下车站结构、区间隧道结构一般均采用建筑结构抗震设计理论、方法和规范^[7]。为此,中华人民共和国住房和城乡建设部颁布了 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[8](以下简称“新抗震规范”),为我国城市轨道交通结构的抗震设计提供了技术标准。因此理解和运用好该规范是做好地下结构抗震设计的基础。

将新抗震规范与地上民用建筑抗震设计规范的相关参数进行对比分析,重点对地下结构的设防目标及水准、地震动参数以及抗震措施等方面的问题进行了探讨。通过分析地下结构的抗震设计思路,总结出便于一般设计人员理解的地铁地下结构

* 国家自然科学基金项目(51578446);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5099);陕西省教育厅自然科学专项基金项目(17JK0370)

“两水准、两阶段”的设计方法。同时,针对新抗震规范中地震动参数以及抗震措施等方面存在的一些值得商榷的问题,给出了相关建议。以期对设计人员理解和运用新规范提供一定的参考。

1 地铁地下结构抗震设防目标及水准

1.1 抗震设防分类

《建筑工程抗震设防分类标准》^[9]规定:抗震设防区的所有建筑工程应确定其抗震设防类别。制定建筑工程抗震设防分类的行业标准,应遵守该标准的划分原则。

新抗震规范将城市轨道交通结构划分为标准设防类、重点设防类及特殊设防类 3 个抗震设防类别。设防类别划分原则与《建筑工程抗震设防分类标准》中的规定一致,但取消了适度设防类。

地铁地下结构属于交通运输类,设防分类为重点设防类。特殊设防类适用于特殊情况,标准设防类不包含车站和隧道主体结构,故本文对此不再讨论。

《建筑工程抗震设防分类标准》规定:重点设防类应按高于本地区设防烈度一度的要求加强其抗震措施;但抗震设防烈度为 9 度时应按比 9 度更高的要求采取抗震措施。同时,应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用。

新抗震规范规定:重点设防类抗震措施应按照本地区抗震设防烈度提高一度的要求确定;地震作用应按现行国家标准 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》规定的本地区抗震设防要求确定;对进行过工程场地地震安全性评价的工程,应采取经国务院地震工作主管部门批准建设工程的抗震设防要求确定地震作用,同时不应低于本地区的抗震设防要求。

相比《建筑工程抗震设防分类标准》中重点设防类结构的设计要求,当抗震设防烈度为 9 度时,重点设防类的地铁地下结构应按照本地区抗震设防烈度提高 1 度的要求进行确定,但对采取的抗震措施,规范则未具体说明。

1.2 抗震设防目标及设计方法

1.2.1 民用建筑抗震设防目标及设计方法

根据《建筑抗震设计规范》^[10],民用建筑的抗震设计一般遵循“三水准、两阶段”的设计思路。

其抗震设防目标为:

(1)第一水准:在遭受低于本地区规定设防烈

度的地震影响时,建筑物一般不受损坏或不需要修理仍可继续使用。

(2)第二水准:在遭受本地区规定设防烈度的地震影响时,建筑物经一般修理或不需要修理仍可继续使用。

(3)第三水准:在遭受高于本地区设防烈度的预估罕遇地震影响时,建筑物不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。即“小震不坏,中震可修,大震不倒”。

两阶段设计总结如下:

(1)第一阶段:对绝大多数结构进行多遇地震作用下的结构和构件承载力验算和结构弹性变形验算,同时对各类结构按规范规定采取抗震措施。

(2)第二阶段:对一些规范规定的结构进行罕遇地震下的弹性变形验算。

同时在设计中通过良好的抗震构造措施使第二水准要求得以实现,从而达到“中震可修”的要求。即建筑结构在多遇地震作用下应进行抗震承载力验算,以及在罕遇地震作用下应进行薄弱部位弹塑性变形验算的抗震设计要求,而在设防烈度地震下,可进行弹性或弹塑性变形验算。

1.2.2 地铁地下结构抗震设防目标及设计方法

地铁地下结构抗震设计时,应根据不同的抗震性能要求来确定抗震设防目标。其中,一般车站地下结构抗震设防目标如表 1 所示。

表 1 一般车站地下结构抗震设防目标			
地震动水准	设防类别	抗震性能要求	备注
E 1 地震	重点设防类	I	I 为地震后不破坏或轻微破坏,结构处于弹性阶段;
E 2 地震	重点设防类	I	
E 3 地震	重点设防类	II	II 为地震后可能破坏,不出现局部倒塌,结构局部进入弹塑性阶段

若将 E 1、E 2 和 E 3 地震动水准理解为分别对应民用建筑中的多遇地震、设防烈度地震及罕遇地震,则一般地下结构设防目标可理解为:①第一水准:在遭受低于和等于本地区规定的设防烈度的地震影响时(E 1、E 2 地震),地下结构不破坏、轻微破坏或不需要修理仍可继续使用。②第二水准:在遭受高于本地区设防烈度的预估罕遇地震影响时(E 3 地震),结构不出现局部倒塌。即:“小、中震不坏,大震可修”。

抗震设计在 E 1 和 E 2 地震阶段(第一阶段)进行多遇地震和设防烈度地震作用下的结构和构件

承载力验算和结构弹性变形验算,对各类结构按新抗震规范规定采取抗震措施,从而达到“小震、中震不坏”的要求,即“小、中震不坏”均按弹性阶段设计;在E3地震阶段(第二阶段)进行罕遇地震下的结构局部弹塑性变形验算,即“大震可修”按弹塑性阶段设计,并由变形限值进行控制。

综上所述,对于城市轨道交通中一般的地下结构的抗震设计可遵循“两水准、两阶段”的设计思路。

2 地铁地下结构抗震设计地震动参数

2.1 设计基准期

设计基准期是为确定可变作用及与时间有关的材料性能取值而选用的时间参数。目前,民用建筑相关规范中,对于不同设计使用年限结构在设计中的差异,设计基准期主要通过可变荷载和材料性能参数的不同取值来体现。

2.1.1 可变荷载

对于可变荷载,文献[11-12]通过设计使用年限调整系数对不同设计使用年限结构进行调整。

2.1.2 材料性能

文献[13]对不同设计使用年限结构,通过混凝土耐久性做出相应要求来满足材料的要求。

对于如何考虑设计使用年限为100 a建筑(如一般的地铁地下结构)的地震作用,规范并未做出说明,因此无论在民用建筑还是地下结构设计中,目前均广泛采用50 a设计基准期对应的参数,这一做法是否合适,还需进一步研究。

2.2 地震重现周期

地震发生的概率近似为泊松分布或二项分布,按照泊松分布计算时:

$$P = 1 - e^{-\frac{t}{n}} \quad (1)$$

式中:

P ——地震发生的超越概率;

t ——结构设计使用年限;

n ——地震重现期, $n = -\frac{t}{\ln(1-P)}$ 。

民用建筑 t 为50 a时,多遇地震、烈度地震、罕遇地震的50 a设计基准期的超越概率分别为63%、10%和2%。根据式(1)计算可得,相应 n 分别为50 a、475 a和2 475 a。

新抗震规范规定:E1地震作用 n 为100 a,E2地震作用 n 为475 a,E3地震作用 n 为2 475 a。根

据式(1)可知,E1地震对应的地震为50 a超越概率为40%,E2地震对应的地震为50 a超越概率为10%,E3地震对应的地震为50 a超越概率为2%。

由上述分析可知,E2地震可看作对应于民用建筑的基本烈度地震,E3地震对应罕遇地震,E1地震则强于多遇地震。

例如,西安地铁6号线一期地震安评报告的编制工作是在新抗震规范实施之前完成的。其中,地震动参数是根据中国地震局专家意见并结合国内外经验进行确定:50 a设计基准期的超越概率分别为63%、10%和2%,100 a设计基准期的超越概率分别为10%和2%。而西安地铁6号线二期地震安评报告的编制工作是在新抗震规范实施之后完成的,其地震动参数根据新抗震规范选取为:50 a设计基准期的超越概率分别为40%、10%和2%。由此可知,新抗震规范颁布前后地震动参数的选用变化情况。

实际上,设计使用年限为100 a的结构工程,若 P 仍为10%(具体概率应根据研究确定),其相应的 n 应为950 a,对应的基本烈度应为8.49度。根据基本烈度计算出相应的峰值加速度,从而确定相应的地震力。

但是由于地震作用计算的复杂性和不确定性,目前国内包括文献[14-15]在内的相关规范规定,当结构设计基准期为100 a,在地震作用计算中超越概率均采用50 a,此时仅通过对地震加速度进行放大便可解决该问题。

2.3 地震动参数

2.3.1 民用建筑

地震设防烈度根据设计的基本地震加速度进行确定,并按设计的基本地震加速度为50 a、设计基准期超越概率为10%的地震加速度进行取值。8度区地震加速度设计值为0.2 g和0.3 g。

2.3.2 地铁地下结构

新抗震规范中对于抗震设防地震动峰值加速度与抗震设防地震动分档的对应关系,直接引用了GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》的规定。该做法与民用建筑相一致。

但由于地铁地下结构设计使用年限一般为100 a,新抗震规范在计算地震作用时,通过设计地震加速度反应谱曲线(对应地上建筑的地震影响系数曲线)中反应谱动力放大系数 β_m (取2.5)对地震力进行放大。该做法即是规范对50 a设计基准期超越

概率的一种地震力放大。

2.4 地震作用计算

由于在弹性条件下, E 1 地震下地震作用必然小于 E 2 地震下地震作用值, 故在抗震性能 I 下, 采用 50 a 设计基准期、超越概率为 10% 的地震动参数进行地震作用计算即可。在 E 3 地震作用下, 抗震性能 II 采用 50 a 设计基准期、超越概率为 2% 的地震动参数应进行结构局部弹塑性变形验算。

凡是已经进行地震安全评价的工程, 设计地震动参数应根据地震安全评价的结果确定。在进行设计计算时, 主要应根据人工合成地震波的数据来完成。

3 抗震措施

抗震设计包括地震作用计算和抗震措施。抗震措施是除了地震作用计算和构件抗力计算以外的抗震设计内容, 主要包括建筑总体布置、结构选型和地基抗液化等措施, 同时需考虑概念设计对地震作用效应的调整, 以及各种抗震构造措施。本文主要讨论地铁地下结构的抗震构造措施, 以及概念设计对地震作用效应的调整等问题。

依据文献[8-9], 重点设防类结构均应按高于本地区设防烈度 1 度的要求加强其抗震措施。

3.1 抗震构造措施

民用建筑抗震构造采用梁柱箍筋加密及非结构构件抗震构造等措施, 且不同的抗震等级对应不同的抗震构造措施。针对重点设防类结构, 采取的抗震构造措施为: 通过将本地区设防烈度提高 1 度来确定抗震等级, 同时调整对应民用建筑结构的最小配筋率, 以及采取锚固措施等。

文献[10]规定, 结构的抗震等级与结构的高度、结构形式、跨度、设防烈度等相关。文献[14]规定, 桥梁的抗震等级与桥梁分类和设防烈度等相关。

新抗震规范第 10.5.2 条规定: 特殊设防类、重点设防类结构的抗震等级宜取二级, 标准设防类结构的抗震等级宜取三级, 其与结构形式、跨度和地震烈度无关。

地铁地下结构的抗震构造措施由结构措施和地基加固措施组成。其中, 地基的加固措施取决于场地地质条件, 同民用建筑地基部分基本一致。

新抗震规范中结构的抗震构造措施主要体现在轴压比限值中。该值主要用来控制柱箍筋的配置。重点设防类结构在箍筋配置上强于标准设防

类结构, 其余构造措施基本无具体区别; 对于马蹄形或圆形隧道结构, 上述抗震构造措施针对重点设防类结构和标准设防类结构并无区别。事实上, 根据新抗震规范, 地铁地下结构抗震等级已经确定, 无法参照民用建筑通过调整结构的抗震等级, 进而对结构通过抗震构造措施来进行调整。

3.2 地震作用效应调整

民用建筑对地震作用效应的调整, 是通过结构抗震等级对地震作用采用不同等级的放大系数, 如采取强柱弱梁、强剪弱弯、强节点等措施来实现的。提高抗震措施, 主要体现在增加结构薄弱部位的抗震能力上, 它是一种经济有效的方法。对重点设防类结构采取的抗震措施为: 通过对本地区设防烈度提高 1 度来确定抗震等级, 进而实现对对应梁柱结构的内力调整。

对于地铁地下结构, 虽然新抗震规范规定对重点设防类结构所在地区提高 1 度进行抗震设计, 但并未说明地下结构是否也要通过内力调整来满足地下结构的强柱弱梁、强剪弱弯和强节点设计等要求。同时, 对于如何提高 1 度设防烈度来进行抗震措施设计, 规范中并无明确规定。其次, 同结构抗震构造措施, 由于地铁地下结构抗震等级已经确定, 与设防烈度无关, 无法参照文献[10]通过调整结构的抗震等级对结构内力进行调整; 对于区间矿山法马蹄形和盾构圆形隧道, 由于断面中没有明显的梁柱节点, 亦无法通过上述措施对结构内力进行调整。

由此可见, 对于地铁地下结构, 新抗震规范并未明确规定符合抗震设防标准要求的抗震措施是按照本地区抗震设防烈度提高 1 度的要求来制定的。因此, 地铁地下结构的抗震等级应该综合结构形式、结构高度、地震烈度等因素来确定。在此基础上, 根据不同的抗震等级进行结构构造措施和地震作用效应的调整, 以满足抗震设防要求。同时, 应明确地震作用效应的调整方法, 尤其是增加地下区间矿山法马蹄形和盾构圆形隧道的具体调整措施, 给出更为具体的结构构造措施, 以完善地铁地下结构抗震措施的可操作性。

4 结论

针对新抗震规范, 通过与地上民用建筑抗震设计相关参数进行对比分析, 同时对地铁地下结构抗震设计若干问题进行探讨, 得到如下结论:

(1)目前,对于一般的地铁地下结构,可遵循“两水准、两阶段”的思路来进行抗震设计。

(2)现有民用建筑、公路桥涵以及城市轨道交通的抗震设计,无论设计基准期为 50 a 还是 100 a,无论结构设计使用年限为 50 a 还是 100 a,地下结构抗震设计地震动参数的选取都是基于 50 a 设计基准期、超越概率为 10% 的地震烈度而确定的。因此,地铁地下结构抗震设计的地震动参数选取应与其设计基准期一致。

(3)地下结构的抗震等级应该综合结构形式、结构高度和地震烈度等因素进行确定。

(4)应完善地下车站结构抗震措施的可操作性,针对不同抗震等级的地铁地下结构,应明确地震作用效应调整方法,并给出更为具体的结构构造措施。

(5)应增加地下区间矿山法马蹄形和盾构圆形隧道具体的抗震措施。

参考文献

- [1] 王君杰,朱敢平,亓路宽,等.城市轨道交通结构抗震设计规范技术要点[J].地震工程与工程振动,2014,34(4):235.
- [2] SHIMIZU M, SUZUKI T, KATO S, et al. Historical damages of tunnels in Japan and case studies of damaged railway tunnels in the mid Niigata Prefecture earthquakes[C]// Proceedings of the World Tunnel Congress. London: Taylor & Francis, 2007: 1937-1943.
- [3] SUZUKI Y. Analysis of railway vehicle behavior in earthquake[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2006, 17(2):

4.

- [4] MOSS R E S, CROSARIOL V A. Scale model shake testing of an underground tunnel cross section in soft clay[J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(4):1413.
- [5] 于翔. 地铁建设中应充分考虑抗地震作用:阪神地震破坏的启示[J]. 铁道建筑技术, 2000(6):37.
- [6] 杨林德. 隧道与地下空间抗震防灾的若干思考[J]. 隧道建设, 2013, 33(9):707.
- [7] 陈国兴, 陈苏, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1):1.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通结构抗震设计规范:GB 50909—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗震设防分类标准:GB 50223—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构可靠性设计统一标准:GB 50153—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计细则:JTJ/TB 02-01—2008[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.

(收稿日期:2017-05-10)

(上接第 11 页)

参考文献

- [1] 国建华. 铁路分类建设与经营相关问题的研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(1):17.
- [2] 魏庆朝, 潘姿华, 臧传臻. 城市轨道交通制式分类及适用性[J]. 都市快轨交通, 2017(1):34.
- [3] 李宏. 美国城市中的轨道运输[J]. 铁道工程学报, 2001(3):24.
- [4] 王仲林. 城市轨道交通系统制式选择研究[D]. 广州:华南理工大学, 2009.
- [5] 何宗华. 日本城市轨道交通的类型与技术发展[J]. 城市轨道交通研究, 2004(5):5.
- [6] 中华人民共和国建设部. 城市公共交通分类标准:CJJ/T 114—2007[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.

- [7] 中华人民共和国建设部. 城市轨道交通工程项目建设标准:建标 104—2008[S]. 北京:中国计划出版社, 2008.
- [8] 陆梁. 城市轨道交通的发展、分类与系统选择[J]. 城市轨道交通研究, 1999(1):7.
- [9] 苗彦英. 城市轨道交通的分类及定义研究[J]. 铁道车辆, 1999(9):11.
- [10] 陈炎, 王波, 吴爽, 等. 城市轨道交通系统分类方法研究[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(6):128.
- [11] 魏运, 许双牛, 任静, 等. 基于功能分类的城市轨道交通系统需求[J]. 都市快轨交通, 2013(1):4.
- [12] 时力湘. 全球首列“智轨”列车在湖南株洲面世[J]. 广东交通, 2017(3):41.

(收稿日期:2018-07-04)