

文章编号:1006-2106(2015)10-0126-05

# 天津地铁 10 号线典型车站结构抗震分析<sup>\*</sup>

吕娇娇<sup>1</sup> 赵子乾<sup>2\*\*</sup>

(1. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251; 2. 天津华夏建筑设计有限公司, 天津 300384)

**摘要:**研究目的:本文以水平地震作用对天津地区地下车站结构的影响、结构抗震分析的科学方法以及如何采取构造措施为研究目的,通过以天津地铁 10 号线梅林路站为例,针对天津地区明挖地铁车站常见车站形式,考虑结构使用过程中可能出现的各种荷载组合,采用反应位移法和时程分析法进行专项抗震设计研究。

**研究结论:**分析结果表明:(1)天津软土地区地震作用明显,软土较厚区域地震作用远大于基岩面较浅区域;(2)天津地铁地下车站结构在地震作用下,可以认为结构处于弹性工作阶段;(3)分析得出在水平地震力作用下标准两层车站和局部三层换乘车站结构形式变化处为最不利受力位置,抗震工况可能在此处起控制作用,从而采用针对性措施,如加强薄弱的构件强度和构件节点的构造措施,切实提高地铁车站结构的整体抗震性能;(4)本研究成果可应用于天津地区地下车站结构的抗震设计。

**关键词:**地铁车站;荷载组合;抗震设计;构造措施

中图分类号:TU93+2 文献标识码:A

## Seismic Analysis of Typical Subway Station Structure of Tianjin Metro Line 10

LV Jiao-jiao<sup>1</sup>, ZHAO Zi-qian<sup>2</sup>

(1. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China; 2. Tianjin Huaxia Architectural Design Co. Ltd, Tianjin 300384, China)

**Abstract: Research purposes:** Taking the effect of horizontal seismic action on the structure of underground station in Tianjin, the scientific method of structural seismic analysis, and how to take structural measures as the research purposes, the paper takes the Tianjin Metro Line 10 station for example, considers various load combinations of the structural use, uses the method of response displacement and time history analysis method for special seismic design.

**Research conclusions:** The results show that: (1) The earthquake in Tianjin soft soil area is obvious, and the seismic action of soft soil is much larger than that of bedrock surface. (2) The structure of the underground station of Tianjin subway is considered as a flexible working stage. (3) Under the effect of the horizontal seismic force the structure form change of the standard two layer station and local three transfer station is in the most unfavorable position, the seismic condition may play a control role, so as to strengthen the weak component strength and improve the structural measures, and effectively improve the overall seismic performance of subway station structure. (4) The research results can be applied to the seismic design of subway station structure in Tianjin area.

**Key words:** subway station; load combination; seismic design; structural measures

\* 收稿日期:2015-07-21

\*\* 作者简介:吕娇娇,1980 年出生,女,工程师;赵子乾,男,1980 年出生,工程师,现任天津华夏建筑设计有限公司副总建筑师。

地下铁道的运营对城市的社会经济发展起到巨大的推动作用,给居民提供了良好的出行条件。我国是一个地震灾害频发的国家,城市轨道交通结构是城市极为重要的交通基础设施,通过抗震设计,使其具有合理的抵抗地震破坏作用的能力,对城市交通秩序、城市经济和社会活动、生命和财产安全都是非常重要的。

本文以天津地铁 10 号线梅林路为例,针对天津地区明挖地铁车站常见车站形式,考虑结构使用过程中可能出现的各种荷载,按照承载能力极限状态和正常使用极限状态进行计算,同时又采用反应位移法和时程分析法两种方法进行专项抗震设计研究,综合分析得出一些适用于地铁结构的有益结论。

## 1 工程概况

天津地铁 10 号线一期工程正线全长 21.403 km,共设车站 21 座,均为地下站。

结构断面形式为地下两层或三层框架结构。其中梅林站为 10 号线与远期 12 号线的 T 型换乘车站,车站全长 207.300 m,标准段为地下两层三跨框架结构,局部换乘节点为地下三层四跨框架结构。车站的横断面具体尺寸如图 1 所示。

本站分布的主要地层有:①1 杂填土层、④2 粉质黏土层、⑥2 粉质黏土层、⑥3 粉土层、⑥4 粉砂层、⑥2 粉质黏土层、⑥9 淤泥质粉质黏土层、⑥1 粉土层、⑧2 粉质黏土层、⑧1 黏土层、⑨2 粉质黏土层、⑩2 粉质黏土层、⑪2 粉质黏土层、⑪5 细砂层等。

10 号线车站建筑结构的安全等级为一级,结构重要性系数为 1.1。地连墙、车站主体结构设计使用年限为 100 年。抗震设防烈度为Ⅶ度,设计基本地震加速度为  $0.15g$ ,设计地震分组为第二组,场地类别为Ⅲ类。

## 2 结构静力计算

地铁车站在进行结构设计时的荷载组合主要有准永久组合、基本组合、抗震偶然组合、人防偶然组合、变形验算、抗浮稳定验算 6 种,分别计算后取最不利值进行结构设计。

永久荷载有:结构自重、地层压力、水压力及浮力、混凝土收缩及徐变影响、设备重量、地基下沉影响;基本可变荷载有:地面车辆荷载及其动力作用、地面车辆荷载引起的侧向土压力、地铁车辆荷载及其冲击力、人群荷载;其他可变荷载:温度变化影响、施工荷载;偶然荷载:地震影响、人防荷载。

## 3 静力法抗震计算

目前地铁结构的抗震分析常用两种试验方法:地震系数法(或称惯性力法)以及地层位移法(或称反应位移法)。一般认为,地震系数法用于下面两种情况较为适宜:一是地下结构与地面建、构筑物合建,即作为上部结构的基础时;二是当与围岩的重量相比,结构自身重量较大时。但是对于以民用为主要目的的地铁结构,由于包括净空在内的单位体积的重量一般都比围岩重量轻,地震引起的围岩变形对隧道结构的影响是主要的,因此对于纵向结构形式单一的地铁结构抗震静力分析,采用反应位移法比较合理。天津地铁 10 号线标准断面车站的静力法抗震计算采用反应位移法。

### 3.1 计算模型

采用反应位移法进行地下车站结构横向地震反应计算时,可将周围土体作为支撑结构的地基弹簧,结构可采用梁单元进行建模,考虑由一维土层地震反应分析计算得到的土层相对位移、结构惯性力和结构周围剪力三种地震作用。地基弹簧刚度以地基反力系数为依据,并考虑集中弹簧间距和车站纵向计算长度的影响。车站标准段断面如图 1 所示,计算模型荷载图示如图 2 所示。

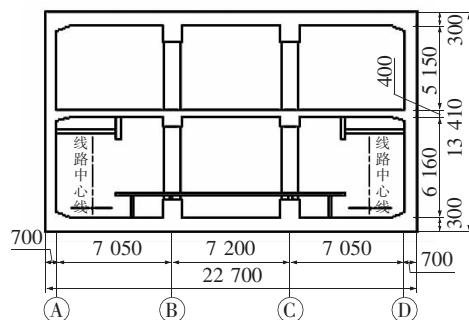


图 1 梅林路站横断面(单位:mm)

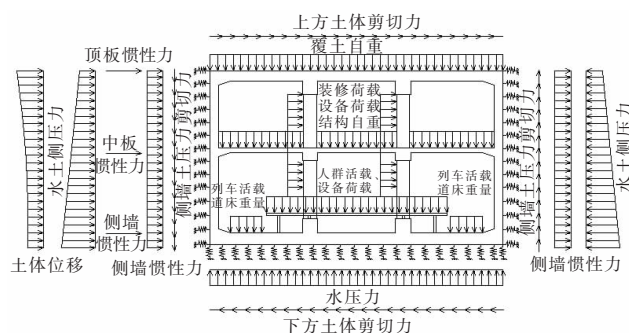


图 2 主体结构使用阶段计算模型及荷载图示

### 3.2 顶板、底板及侧墙处的土层剪力

顶板、底板处土层剪力由一维土层反应分析得到,如式(1):

$$\tau = G_d \gamma \quad (1)$$

式中  $G_d$ ——土层动剪切模量;

$\gamma$ ——剪切应变。

侧墙剪力近似计算方法如式(2)所示:

$$\tau_{\text{侧墙}} = 0.5 \times (\tau_{\text{顶板}} + \tau_{\text{底板}}) \quad (2)$$

### 3.3 惯性力计算

据《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)

8.1.3,结构上的水平地震力按式(3)计算:

$$f_i = m_i \cdot u_i \quad (3)$$

式中  $f_i$ ——结构  $i$  单元上作用的惯性力;

$m_i$ ——结构  $i$  单元的质量;

$u_i$ ——结构发生最大位移时的加速度,天津为  $0.15g$ 。

### 3.4 土层位移计算

土层位移计算中转化为施加于侧墙节点处的等效集中力  $F$  按式(4)、式(5)计算:

$$F = ks \quad (4)$$

$$k = ALd \quad (5)$$

式中  $F$ ——相对位移等效集中力;

$k$ ——弹簧刚度系数;

$s$ ——土层相对位移,由一维土层反应分析得到;

$A$ ——地基水平向反力系数;

$L$ ——弹簧间距;

$d$ ——计算断面沿车站纵向的计算长度。

根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014),对于工程场地地震安全性评价中没有提供位移随深度变化关系的可按式(6)确定:

$$U(z) = \frac{1}{2} u_{\max} \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (6)$$

式中  $U(z)$ ——地震时深度  $z$  处土层的水平位移(m);

$z$ ——深度(m);

$u_{\max}$ ——场地地表最大位移(m);

$H$ ——地面至地震作用基准面的距离(m)。

### 3.5 内力计算结果

分别对标准断面的各种组合工况进行计算分析,因断面和计算工况较多,仅列出明挖两层两柱三跨标准断面的反应位移法抗震计算的內力图,如图3~图5所示。

经过计算分析得出以下结论:

一是,与其他五种组合的计算结果相比较,在天津

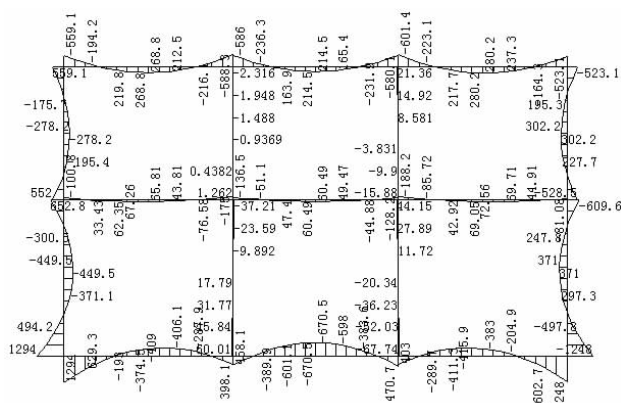


图3 标准断面设防地震工况下基本组合弯矩图(单位: kN·m)

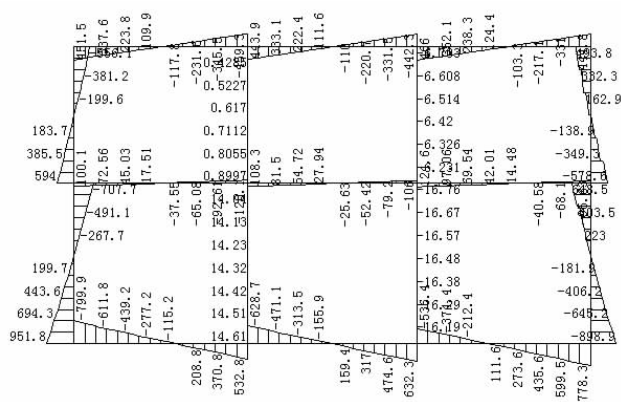


图4 标准断面设防地震工况下基本组合剪力图(单位: kN)

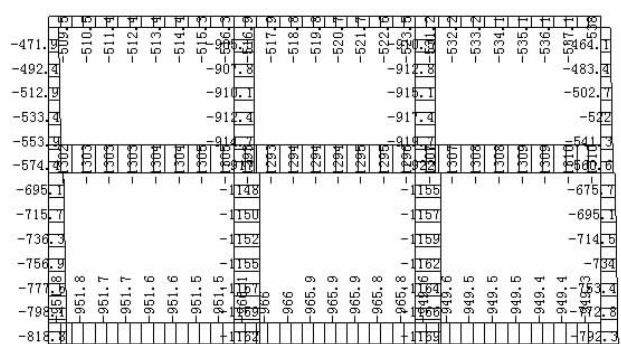


图5 标准断面设防地震工况下基本组合轴力图(单位: kN)

地区Ⅶ度地震作用下,车站结构各构件的控制组合为验算强度的基本组合和验算裂缝的准永久组合,反应位移法进行抗震工况计算在地铁结构设计中不起控制作用。

二是,在水平地震作用下,框架结构各构件的最大弯矩、剪力、轴力均出现在顶、中、底板与侧墙连接处;中柱的最大轴力发生在柱与底板连接处。

### 3.6 标准段罕遇地震变形计算结果

根据建筑抗震设计规范中的要求,对于地下空间

综合体,在罕遇地震工况下需要对其进行弹塑性变形验算。本结构中最大层间相对位移发生在结构底层,同时本结构楼层屈服强度系数沿高度分布均匀,按照规范中规定,选取底层进行验算。计算得出结构底层层间位移为 12.032 mm,满足抗震规范中规定的弹塑性层间位移限值要求。梅林站标准断面在地震工况下采用反应位移法计算的变形满足要求。

## 4 三维时程分析法

通常沿纵向结构形式连续、规则、横向断面构造不变的地下车站结构,可只沿横向计算水平地震作用并进行抗震验算,抗震分析时可近似按平面应变问题处理。但本站为换乘站,换乘节点为局部地下三层结构,车站沿纵向结构形式变化较大,在进行抗震计算时需要采用三维时程分析法进行抗震分析。

时程分析法是将地震波按时段进行数值化后,输入结构体系的震动微分方程,采用逐步积分法进行结构弹塑性动力反应分析,计算出结构在整个强震时域中的震动状态全过程,给出各个时刻各杆件的内力和变形,以及各杆件出现塑性铰的顺序。动力反应分析法作为一种可靠的分析手段适用于深入研究地铁等地下结构抗震理论,结果也较为准确。但其计算工作量大,计算结果受地震波选取的影响。

### 4.1 模型计算参数

#### 4.1.1 土层参数

梅林路站场地土层主要以粉土、粉质黏土为主,在计算中根据土层性质对土层进行适当归并,归并后的从上到下各土层参数如表 1 所示。

表 1 梅林路站场地模型资料

土 层	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E_s/\text{MPa}$
第一层	20.0	0.30	50
第二层	20	0.33	60
第三层	19.5	0.35	80
第四层	21.5	0.33	100
第五层	20	0.30	80

#### 4.1.2 边界条件与地震波

计算中模型各边界取至距离结构 3 倍结构尺寸的位置,并且用黏性边界模拟边界条件。为定义黏性边界,需要计算土体  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的阻尼比,其计算见式(7)、式(8):

$$C_p = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{W \cdot 9.81}} = c_p \cdot A \quad (7)$$

$$C_s = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9.81}} = c_s \cdot A \quad (8)$$

$$\text{其中, } \lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}。$$

计算采用天津波沿  $x$ 、 $y$  两个方向加载地面加速度,地震波峰值加速度为 0.148  $5g$ 。

#### 4.1.3 计算模型

梅林路站整体计算模型相当庞大,其中结构梁、柱构件采用板单元和梁单元进行计算分析,土体采用实体单元进行模拟。

### 4.2 模型计算结果分析

根据三维计算结果得出抗震工况下,结构虽然随土层共同移动的绝对位移值较大,但结构自身  $x$ 、 $y$  方向相对位移值较小, $x$  方向最大相对位移位于车站左端部,位移值为 7.9 mm,此处结构高度为 15 210 mm; $y$  方向最大相对位移位于车站换乘节点处,相对位移值为 5.8 mm,此处结构高度为 22 130 mm; $x$ 、 $y$  方向层间位移角均小于 1/250。梅林站在地震工况下变形满足要求。

经过计算分析,与其他五种组合的内力计算结果相比较,得出以下结论:

一是,在水平地震作用下,框架结构各构件的最大弯矩、剪力、轴力均出现在顶、中、底板与侧墙连接处;中柱的最大轴力发生在柱与底板连接处。

二是,换乘节点处行车中板的侧墙支座内力由抗震工况控制。

三是,在天津地区土层Ⅶ度地震作用下,车站结构各构件的控制组合大部分为验算强度的基本组合和验算裂缝的准永久组合。

## 5 结论

本文以天津地铁 10 号线梅林路站为例进行抗震计算分析,其中标准两层两柱三跨断面采用反应位移法进行抗震分析,同时车站整体结构采用三维时程分析方法进行抗震分析,得出以下结论:

(1)天津地区整体地层情况一般,地震作用差异较为明显,软土较厚区域地震作用远大于基岩面较浅区域。

(2)在地震作用下,本站结构最大层间位移角均小于 1/250,可以认为结构处于弹性工作阶段,不会出现局部或整体倒塌的情况。

(3)在天津地区土层Ⅶ度地震作用下,车站结构各构件的控制组合大部分为验算强度的基本组合和验算裂缝的准永久组合。对于沿纵向结构形式连续、规则、横向断面构造不变的地下车站结构,可采用反应位移法进行抗震验算,其结果在地铁结构设计中不起控制作用。对于局部带有换乘节点的沿纵向结构形式变

化较大的车站结构,需要采用三维时程分析法进行抗震计算分析,抗震工况可能在结构形式变化处起控制作用。

(4)加强板墙连接处等薄弱部位的抗震设计,从截面尺寸、构件配筋率、加密区长度、钢筋锚固长度等方面加强车站的整体抗震性能。

## 参考文献:

- [1] 刘晶波,李彬. 地铁地下结构抗震分析及设计中的几个关键问题[J]. 土木工程学报,2006(6):106-110.  
**Liu Jingbo, Li Bin. Several Key Problems of Analysis and Design of Seismic Analysis and Design of Underground Structures [J]. Journal of Civil Engineering, 2006(6):106-110.**
- [2] GB 50157—2013,地铁设计规范[S].  
**GB 50157—2013, Code for Design of Metro[S].**
- [3] GB 50909—2014,城市轨道交通结构抗震设计规范[S].  
**GB 50909—2014, Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures[S].**
- [4] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.  
**Shi Zhongheng. Underground Railway Design and Construction [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.**
- [5] 林皋. 地下结构抗震问题[C]//第四届全国地震工程会议. 哈尔滨,1994.  
**Lin Gao. Problems in the Seismic Design of Underground Structure [C]//The Fourth National Conference on Earthquake Engineering. Harbin, 1994.**
- [6] 周键,苏燕,童鹏. 软土地层地铁及地下构筑物抗震动力分析研究现状[J]. 地下空间,2003(2):173-178.  
**Zhou Jian, Su Yan, Tong Peng. Research Status of Seismic Dynamic Analysis of Soft Ground and Underground Structures[J]. Underground Space, 2003(2):173-178.**
- [7] 戚洪伟. 反应位移法在地铁抗震计算中的应用[J]. 铁道建筑技术,2012(S2):100-103.  
**Qi Hongwei. The Application of the Response Displacement Method in Seismic Calculation of Metro [J]. Railway Construction Technology, 2012(S2):100-103.**
- [8] 田雪娟. 地铁车站抗震分析[J]. 铁道建筑技术,2012(6):67-63.  
**Tian Xuejuan. Seismic Analysis of Metro Station [J]. Railway Construction Technology, 2012(6):67-63.**
- [9] 宋林,孟昭博,吴敏哲,等. 双层岛式地铁车站结构地震反应分析[J]. 世界地震工程,2010(2):187-192.  
**Song Lin, Meng Zhaobo, Wu Minzhe, etc. Structural Seismic Response Analysis of the Double Layer Island Metro Station [J]. World Earthquake Engineering, 2010(2):187-192.**
- [10] 鲍鹏,姜忻良,盛桂琳. 天津地铁土城车站地震反应分析[J]. 建筑结构,2007(1):99-101.  
**Bao Peng, Jiang Xinliang, Sheng Guilin. Seismic Response Analysis of Tucheng Station in Tianjin Metro [J]. Building Structure, 2007(1):99-101.**

(编辑 曹淑荣)

(上接第 125 页 From P. 125)

- Zhao Qiang. Study on Three Line-transfer Programs in Hong Kong Road Station of Wuhan Rail Transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(2):99-103.**
- [4] 冯扬,龚文平,刘飞灵. 深圳轨道交通 4 号线车站典型换乘形式分析[J]. 山西建筑,2010(22):34-35.  
**Feng Yang, Gong Wenping, Liu Feiling. An Analysis on Typical Transfer Mode of Shenzhen Rail Traffic Line 4 [J]. Shanxi Architecture, 2010(22):34-35.**
- [5] 范宏宇. 武汉轨道交通 4 号线二期工程换乘站方案研究[J]. 铁道工程学报,2012(2):86-89,96.
- Fan Hongyu. Analysis of Transfer Station of the Second Phase Project of Line 4 of Wuhan Rail Transit [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(2):86-89,96.**
- [6] 伍建国. 西安地铁换乘设施一体化规划方法和实施建议[J]. 都市轨道交通,2012(4):11-13,27.  
**Wu Jianguo. Planning and Implementation of Integrated Transfer Infrastructure of Xi'an Metro [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012(4):11-13,27.**

(编辑 梅志山)