

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.11.058

隧道结构抗震时程分析

周 浩,倪文龙

[悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司,江苏 苏州 215000]

摘 要:为研究隧道结构在地震作用下的受力和变形特性,结合苏州市春申湖隧道工程,采用 Midas GTS 有限元分析软件建立三维模型进行时程分析。研究表明,E2 地震作用下,结构最大弯矩出现在主线顶板,截面抗弯配筋由静力工况下的裂缝控制,隧道结构侧墙易处于高轴压比工作状态。隧道结构侧墙为抗震关键构件,设计时应注意控制轴压比使侧墙在地震作用不发生脆性破坏。E3 地震作用下,为保证地下结构在震后可修复,弹塑性变形能力极限状态的验算最大层间位移角均满足抗震性能的要求,结构处于弹塑性工作阶段。

关键词:隧道结构;动力时程;抗震性能;层间位移

中图分类号:U452.2*8

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)11-0242-03

0 引言

随着城市地上空间日益紧张,地下结构的建设在城市化进程中的作用日益突出。传统观念认为,地下结构受土体约束、刚度较大且结构高度一般较小,在地震作用下结构不会严重破坏。然而,1995 年日本阪神大地震、1999 年土耳其 Duzce7.8 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震、2012 年台湾集集 7.3 级地震等^[1],这些地区地下结构在地震中的大量破坏带来的安全问题和经济损失使人们重新认识到地下结构抗震设计的重要性。

目前,地下结构常用的抗震方法主要有地震系数法、反应位移法、时程分析法等^[2-3]。其中,时程分析法考虑了地震波的动强度、持续时间和频谱特征,同时纳入地震环境和场地特征的影响,被普遍认为是计算结构动力响应最精确的方法。本文结合苏州春申湖隧道敞开段,通过建立三维数值模型进行结构强度和变形验算,得出敞开段地震工况控制部位和变形特征,为类似工程提供参考。

1 工程概况

苏州春申湖路快速化改造工程是规划苏州中环快速路北段的重要组成部分,元和塘以东段采用隧道沿春申湖路敷设,西起齐门北大街以东、澄帆路与春申湖路交叉口,东至蠡塘河西侧、澄星街与春申湖路交叉口。

收稿日期:2022-10-09

作者简介:周浩(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁隧道设计工作。

隧道暗埋段结构采用两孔+管廊箱涵断面形式,敞开段采用 U 型槽结构,在敞开段和部分标准暗埋段部位,底板设置抗拔桩。

工程场地 100 m 以浅各土层由第四纪中更新世以来的冲湖积~滨海相碎屑沉积土层组成,场地 20 m 以浅土层的平均剪切波速 V_{se} 为 164.0~183.2 m/s,工程场地类别为 III 类,特征周期值为 0.45 s。

2 计算模型

2.1 几何模型

本文采用 Midas GTS 有限元分析软件建立敞开段三维有限元模型,模型尺寸取 55 m(长)×92 m(宽)×80 m(高),各层土体参数采用地质勘察资料中的土体参数,如图 1、图 2 所示。

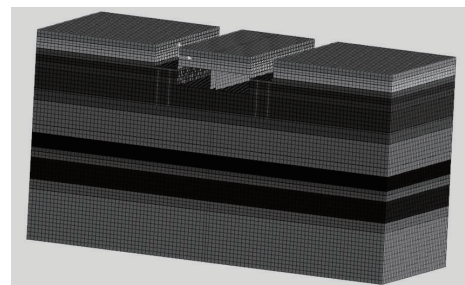


图 1 地层-结构网格

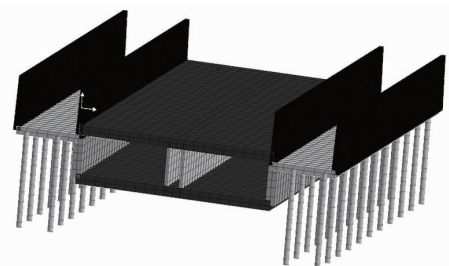


图 2 主体结构网格

隧道敞开段主线顶底板厚 1.5 m,侧墙厚 1.4 m,中间管廊壁厚 0.5 m,宽 31.8 m;匝道底板厚 1.1 m,侧墙厚 1.1~0.6 m,宽 10.8 m,设置桩径 0.8 m、长 15 m 抗拔桩。隧道顶底板采用板单元模拟,土体采用六面体单元模拟,抗拔桩采用梁单元模拟,地层和结构参数见表 1、表 2。

表 1 土层物理力学参数

土层编号及名称	重度 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚 力 / kPa	摩擦 角 / ($^{\circ}$)	弹性模 量 /MPa	泊松 比
1-2 杂填土	19.0	5	12	9.0	0.45
1-3 素填土	19.3	12	10	10.5	0.42
3-1 黏土	20.1	59.5	15.2	7.15	0.33
3-2 粉质黏土	19.3	28.0	14.5	5.03	0.34
4-2a 粉土夹粉质黏土	19.3	8.5	27.4	9.91	0.33
4-2 粉土	19.5	7.9	30.6	11.55	0.31
5 粉质黏土	19.1	24.2	13.9	4.49	0.38
6-1 黏土	20.4	60.4	15.4	7.35	0.31
6-2 粉质黏土	19.5	34.2	14.4	5.48	0.32
7-1 粉质黏土	19.2	26.4	14.3	4.66	0.35
7-2 粉土	19.8	5.6	31.42	11.63	0.31
8-1 黏土夹粉质黏土	2.02	51.3	14.9	6.78	0.30
8-2 粉质黏土夹粉土	1.94	23.2	17.6	6.32	0.32

表 2 结构物理力学参数

结构	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比
顶底板、侧墙、抗拔桩	25	3.15×10^4	0.2

2.2 边界条件

本模型动力分析阶段对边界条件做以下规定:

(1)底部边界:由于在目前的工程抗震设计中,地震动输入大多为水平振动的剪切波,垂直方向约束,水平方向施加地震波。

(2)侧向边界:侧向土体均采用黏弹性边界以吸收地震波能量。

(3)顶部边界:水平和垂直方向均为自由。

(4)土体与结构接触面未考虑界面接触特性,二者节点耦合。

2.3 地震波的选取

由于地震具有较强的随机性和独特性,地震波的动强度、持续时间和频谱特征对地下结构的响应影响很大。

本文采用动力时程分析的目标峰值取 $0.125g$,持续时间根据工程实践中的选择原则^[4]取 30 s,地震

波选用 El-Centro 波、San Fernando 波和苏州地区人工波,以尽可能贴合当时实际情况。计算采用的地震动加速时程曲线如图 3 所示。

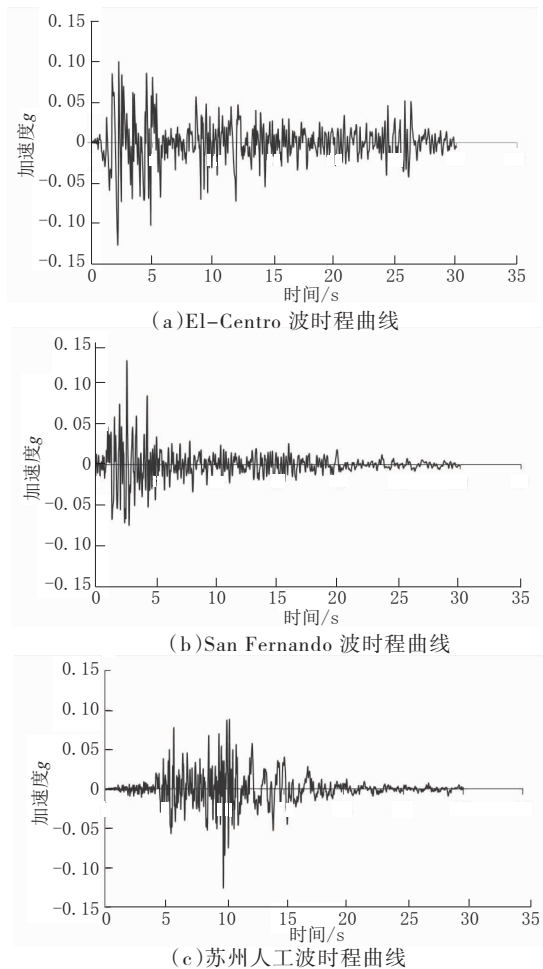


图 3 地震波波形

3 结果分析

3.1 结构内力分析

本工程抗震设防类别为重点设防类,在 E2 地震作用下,隧道结构应保持正常使用功能,结构处于弹性工作阶段,需进行结构强度验算。静力工况和不同地震波作用下隧道结构的内力包络值见表 3。从中可以看出,E2 地震作用下,结构最大弯矩出现在主线顶板,为 $4\,222\text{ kN} \cdot \text{m}$,地震工况下主线顶板最大弯矩降低 31.4%,结构部位抗震工况对设计不起控制作用,截面抗弯配筋由静力工况下的裂缝控制。

表 3 隧道内力计算结果汇总 单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$

工况	主线弯矩			匝道弯矩	
	顶板	底板	侧墙	底板	侧墙
静力工况	4 222	3 784	3 105	1 943	1 672
El-Centro 波	2 897	2 224	2 210	1 417	1 284
San Fernando 波	2 896	3 309	2 197	1 611	1 245
苏州人工波	2 897	2 195	2 181	1 325	1 247

相关研究^[5]表明,地下结构侧墙在高轴压比条件下具有较强的脆性特点。根据《建筑抗震设计规范》(2016年版)^[6]要求,对本工程按照二级采取抗震措施,侧墙轴压比不大于0.6。各种工况下侧墙轴力及轴压比见表4。从中可以看出,E2地震作用下主线侧墙最大轴力大于静力工况下侧墙轴力,最大轴力增加约36.7%;隧道中隔墙最大轴力小于静力工况下中隔墙轴力,最大轴力减少约51.9%。这表明地震工况下主线结构侧墙易处于高轴压比工作状态,此时结构侧墙为抗震关键构件,本次设计主线侧墙壁厚取1.4 m,最大轴压比为0.147,使侧墙在地震作用下处于低轴压比工作状态,不发生脆性破坏。此外,由于主线侧墙刚度大于主线中隔墙,地震荷载作用下侧墙承担较大轴力,中隔墙轴力相对静力工况有所降低。

表4 侧墙轴力及轴压比

工况	主线侧墙		主线中隔墙	
	最大轴力/kN	轴压比	最大轴力/kN	轴压比
静力工况	2 405	0.107	2 760	0.343
El-Centro波	3 314	0.147	1 326	0.164
San Fernando波	3 274	0.145	1 325	0.164
苏州人工波	3 276	0.145	1 325	0.164

3.2 结构变形分析

罕遇地震(E3地震)作用时,为保证地下结构在震后可修复,进行承受弹塑性变形能力极限状态的验算。E3地震作用下节点顶板和底板的层间位移时程如图4所示。

从结构层间位移值和变形图来看,在水平横向地震动的作用下,上下层的层间位移相差并不大,最大层间位移分别为6.125 mm、8.28 mm、6.325 mm,最大层间位移角为1/1340,小于1/250,各层间位移角均小于《建筑抗震设计规范》(2016年版)规定的弹性层间位移角1/250的限值。

4 结 语

本文通过建立三维时程分析模型,对苏州市春申湖隧道敞开段进行计算,得到如下结论:

(1)E2地震作用下,结构最大弯矩出现在主线顶板,地震工况下主线顶板最大弯矩比静力工况降低31.4%,截面抗弯配筋由静力工况下的裂缝控制。

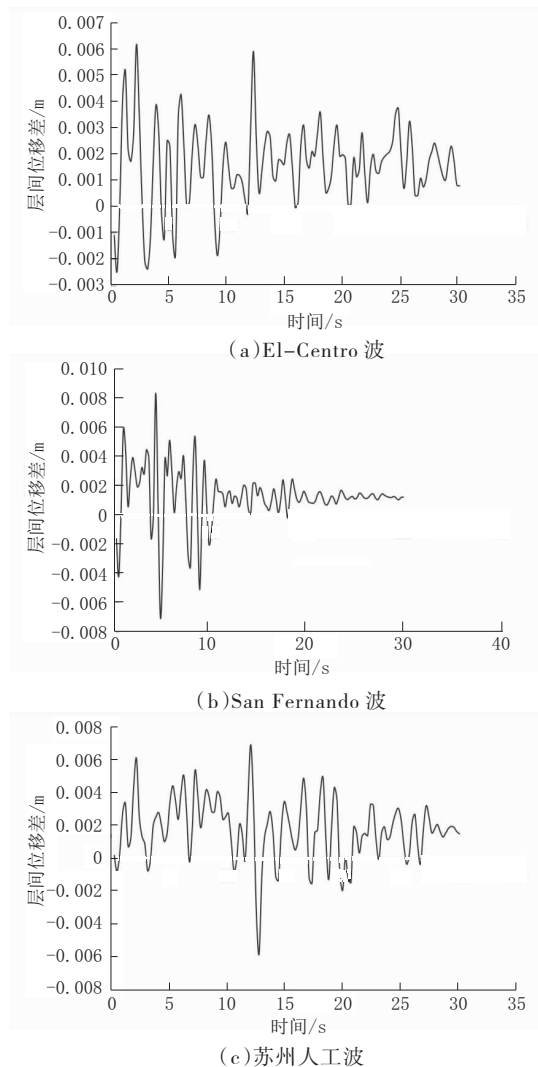


图4 不同地震波作用下隧道结构顶底板相对水平位移时程曲线

(2)E2地震作用下,主线结构侧墙易处于高轴压比工作状态,此时结构侧墙为抗震关键构件,本次设计主线侧墙壁厚取1.4 m,最大轴压比为0.147,侧墙在地震作用下不发生脆性破坏。

(2)E3地震作用下,结构最大层间位移角均小于1/250,结构处于弹塑性工作阶段,满足抗震性能的要求。

参考文献:

[1] 陈卫忠,宋万鹏,赵武胜.地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):310-325.
 [2] 孙钧,侯学渊.地下结构(上、下册)[M].北京:科学出版社,1987.
 [3] GB 50909—2014,城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
 [4] 田雪娟.地铁车站抗震分析[D].北京:北京交通大学,2010.
 [5] 王欣.浅埋框架地下结构极限抗震能力[D].北京:北京工业大学,2017.
 [6] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范(2016年版)[S].