

桥隧共建结构中隧道结构的地震响应分析

高 阳

(苏州城投基础设施发展有限公司, 江苏 苏州 215001)

摘 要: 以苏州市东太湖隧道一期工程项目顺堤河桥隧共建节点为例, 采用动力时程分析法, 对桥隧共建节点进行整体有限元模拟, 并在考虑桥梁上部结构刚度、附加荷载因素的基础上进行隧道结构抗震分析。根据有限元分析结果, 针对中震(设防地震)、大震(罕遇地震)情况所进行的抗震专项设计, 可确保隧道结构达到E1、E2地震作用下结构处于弹性阶段、E3地震作用下结构局部进入弹塑性阶段的抗震设防目标。

关键词: 桥隧共建; 抗震分析; 隧道结构; 设防目标; 有限元

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0137-04

Seismic Response Analysis of Tunnel Structures in Bridge-Tunnel Co-construction System

GAO Yang

(Suzhou Urban Investment Infrastructure Development Co., Ltd., Suzhou 215001, China)

Abstract: Taking the co-construction node of the bridge and tunnel along the causeway of Suzhou East Taihu Lake Tunnel Phase I Project as an example, the dynamic time-history analysis method is employed to conduct an overall finite element simulation of the bridge-tunnel co-construction nodes. On the basis of considering the bridge superstructure stiffness and the additional load factors, the seismic analysis of the tunnel structure is performed. According to the finite element analysis results, the special seismic design carried out for moderate earthquakes (fortification earthquakes) and major earthquakes (rare earthquakes) can ensure that the tunnel structure achieves the seismic fortification goal of being in the elastic stage under the action of E1 and E2 earthquakes and locally entering the elastic-plastic stage under the action of E3 earthquakes.

Keywords: co-construction of bridge and tunnel; seismic analysis; tunnel structure; fortified target; finite element

0 引 言

近年来, 国家对基础建设不断投入, 隧道建设迎来了建设高峰期。伴随着隧道地下空间的不断开发, 隧道与地面交通综合设计的情况越来越多。在城市立体化道路建设中, 地面与地下道路常位于同线位, 在穿越大型河流水系时, 上部为桥梁形式, 桥下部与隧道结构冲突, 从而产生了设计和施工难题。

以苏州市东太湖隧道一期工程为背景, 介绍了跨顺堤河节点桥隧共建结构的抗震分析。具有类似结构形式特征的地下隧道和地面桥梁合建工程在国内的应用基本以介绍结构整体布置为主^[1-3], 尚缺少城市隧道与桥梁抗震分析方面的研究。地

下结构抗震计算也基本以反应位移法计算为主^[4-7]。在考虑上部桥梁结构刚度、附加荷载的基础上, 采用时程分析法进行有限元模拟, 确保隧道结构达到抗震设防要求, 能够为将来类似工程建设提供参考和借鉴。

1 工程概况

1.1 项目概况

苏州东太湖隧道工程项目范围西起吴中区规划旺山路与五湖路以北, 止于东太湖大道与夏蓉街交叉口, 起点桩号为K2+620, 终点桩号为K11+132。工程全长8.512 km, 其中隧道总长8.142 km。一期工程西起吴中区规划旺山路与景州街交叉口, 止于东太湖大道与映山街交叉口东侧, 起点桩号为K3+443, 终点桩号为K9+104, 一期工程长度5.661 km, 一期范围内主线为暗埋段隧道。

顺堤河隧道在桩号K3+862.53~K3+909.47范围内

收稿日期: 2025-03-17

作者简介: 高阳(1991—), 男, 学士, 工程师, 从事交通基础设施建设管理工作。

下穿现状顺堤河,隧道结构与上方跨顺堤河地面桥合建。根据顺堤河洪评要求,隧道结构顶需保证 1 m 覆土厚度。利用隧道整体箱型结构作为桥梁基础,采用此方案可节约桥梁基础占地面积和造价,整体方案经济性好。

新建简支空心板梁桥,规划河道宽度 40 m,桥梁与河道中心线斜交角约 79°,桥梁跨径为 13 m+20 m+13 m;桥宽 $B=52$ m,分 4 幅布置。隧道平面范围内桥梁与隧道合建,桥隧平面位置关系图见图 1。

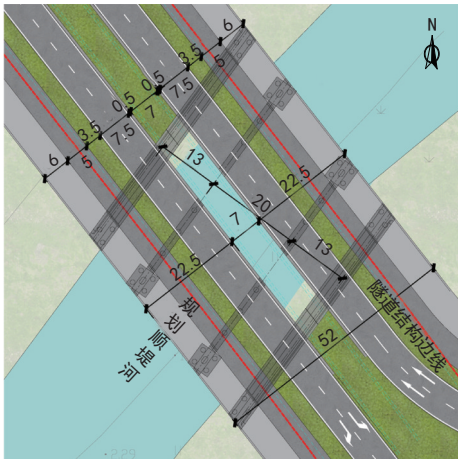


图 1 桥梁与隧道平面位置关系图(单位:m)

隧道为双向 6 车道,中间设置管廊仓,为单箱 3 室断面形式,隧道两侧箱室结构净宽 13.05 m,中间管廊仓结构净宽 4.5 m。隧道结构总体宽度 34 m,高度 8.2 m,顶板及侧墙厚 1 200 mm,底板厚 1 300 mm,中隔墙厚 500 mm。

隧道结构横断面见图 2。

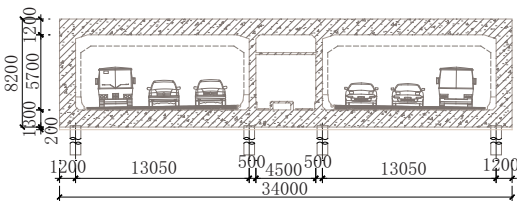


图 2 隧道结构横断面图(单位:mm)

隧道下方桩基为 0.8 m 钻孔灌注桩,桩基中心距 3.0 m,隧道上方桥梁立柱为直径 1 m 的圆柱墩。桥隧竖向位置关系图见图 3。

1.2 工程地质

根据本工程勘察钻孔资料,此区域上部分布有厚 4 m 左右填土,隧道基坑开挖较深处开挖范围有 3-1 黏土、3-2 粉质黏土、4-1 粉质黏土、4-2 粉质黏土夹粉土、4-3 粉土,坑底为 5 粉质黏土,局部有 5-1 粉土夹粉质黏土。

隧道地质剖面图见图 4。

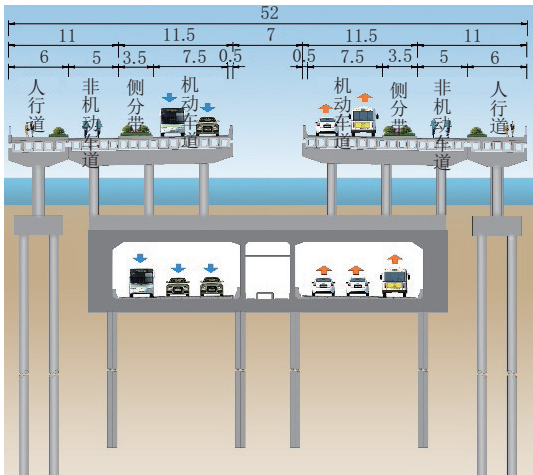


图 3 桥隧竖向位置关系图(单位:m)

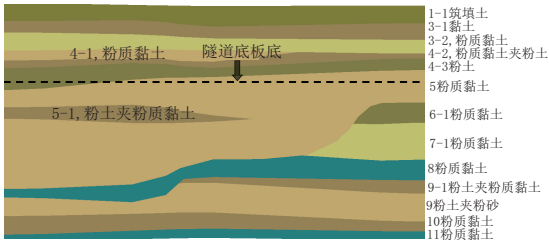


图 4 隧道地质剖面图

2 桥隧共建节点隧道抗震分析

2.1 抗震计算原则

该项目桥隧合建节点位于苏州吴中,场区抗震设防烈度为 7 度,设计地震分组为第二组。工程抗震设防分类为乙类(重点设防),抗震等级为三级。

参照《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014),E1 地震下,重现周期为 100 a,地震作用取 $0.05g \times 1.25 = 0.0625g$;E2 地震下,重现周期为 475 a,地震作用取 $0.1g \times 1.25 = 0.125g$;E3 地震下,重现周期为 2 475 a,地震作用取 $0.22g \times 1.25 = 0.275g$ 。

参照上述规范,抗震设防目标有二。

目标一:结构在 E1、E2 地震作用下不破坏或轻微破坏,能够保持其正常使用功能,结构处于弹性工作阶段,不会因结构的变形而影响行车安全。在进行目标一验算时,应进行结构内力验算,验算在 E2 地震作用下结构内力是否满足要求。

目标二:结构在 E3 地震作用下可能破坏,经过修补后,在短期内能恢复其正常功能,结构局部进入弹塑性工作阶段。在进行目标二验算时,仅对结构变形进行验算,验算在 E3 地震作用下结构变形是否满足要求。

2.2 计算模型

对隧道进行动力时程抗震计算分析。根据钻孔

资料和断面设计资料,采用通用有限元分析软件 MIDAS GTS 对断面进行数值分析建模,模型尺寸为宽 300 m,高 60 m;计算模型的侧面边界距地下结构的距离大于 3 倍结构宽度,采用自由场边界。地层结构采用平面应变单元模拟,隧道结构通过梁单元进行模拟(见图 5、图 6)。模型中将上部桥梁结构与隧道结构一同建立,以模拟上部桥梁结构在地震作用下惯性力对隧道结构的影响。

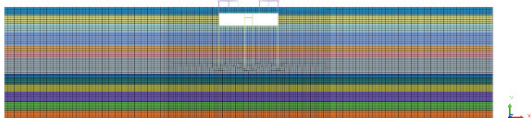


图 5 断面计算整体模型

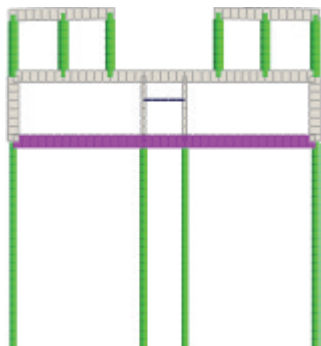


图 6 断面隧道结构计算模型

2.3 计算参数

抗震分析范围的土层从上到下依次为杂填土、黏土、粉质黏土层,土剪切波速为 107~234 m/s。

2.4 抗震计算地震波

根据场地条件,采用的地震动加速度时程曲线见图 7 至图 9。进行计算时再根据相应的地震设防标准进行滤波调幅等处理。

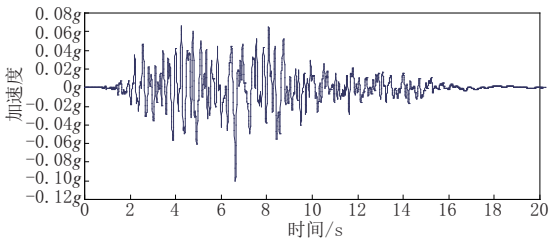


图 7 人工地震动加速度时程曲线

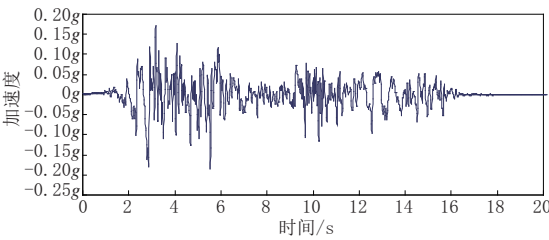


图 8 EL 地震动加速度时程曲线

选取 3 组地震波进行动力时程分析,最终选取最不利情况进行设计。根据桥址处地震动的目标反应

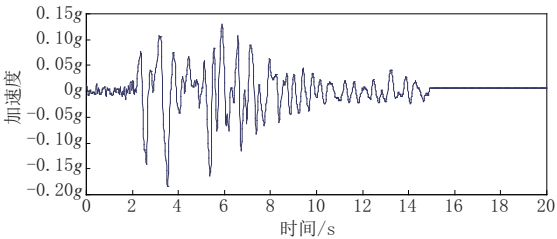


图 9 Kobe 地震动加速度时程曲线

谱,所选取的反应谱在结构主要周期点处与目标反应谱相差均不大于 20% 的实际记录地震动。另外, E1 地震作用小于 E2 地震作用,且二者的抗震目标要求一致,故计算中不需要对 E1 地震作用单独计算。

2.5 抗震分析计算结果

采用动力时程分析法计算结构地震作用响应,得到结构内力包络图,验算截面位置示意图见图 10。

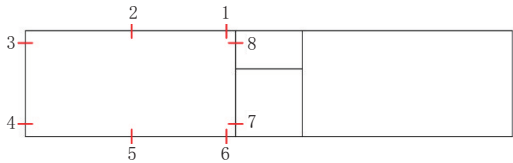


图 10 验算截面位置示意图

2.5.1 E2 地震作用下计算结果

根据上述设防地震 E2 作用下结构动力时程分析计算结果,可对结构进行控制截面抗震验算。通过比较地震工况组合设计值和基本组合设计值,选取 E2 地震作用下的最大内力,对控制截面进行了验算。

E2 地震作用下,控制截面验算结果见表 1。

根据上述设防地震 E2 作用下结构动力时程分析计算结果,可对结构变形进行抗震验算,结果见表 2。按照《地下结构抗震设计标准》(GB/T 51336—2018)第 6.9.1 条规定,地下结构在进行弹性变形验算时,弹性层间位移角限值为 1/550。

经分析,隧道在设防地震 E2 作用下,各控制截面受力和变形均可满足抗震验算的要求。

2.5.2 E3 地震作用下计算结果

根据上述罕遇地震 E3 作用下结构动力时程分析计算结果,可对结构变形进行抗震验算,结果见表 3。按照《地下结构抗震设计标准》第 6.9.2 条规定,地下结构在进行弹塑性变形验算时,弹塑性层间位移角限值为 1/250。

经分析,隧道在罕遇地震 E3 作用下,最大层间位移角小于层间位移角限值,满足抗震变形验算的要求。

表 1 E2 地震作用下的控制截面验算结果

截面编号	截面位置	内力项目	重力荷载 代表值	E2 地震作用 标准值	地震工况组合 设计值 $\gamma_{RE}S$	基本组合 设计值 S	按基本组合设计 是否满足
S-1	顶板	弯矩/(kN·m)	3 681	298	3 604	5 387	是
S-1	中支座	剪力/kN	1 730	99	1 654	2 534	是
S-2	顶板	弯矩/(kN·m)	3 276	311	3 251	4 803	是
S-2	跨中	剪力/kN	0	100	98	0	是
S-3	顶板	弯矩/(kN·m)	3 266	1 036	3 950	4 792	是
S-3	边支座	剪力/kN	811	101	828	1 186	是
S-4	底板	弯矩/(kN·m)	3 139	1 623	4 408	4 562	是
S-4	边支点	剪力/kN	972	179	1 049	1 045	是
S-5	底板	弯矩/(kN·m)	2 952	224	2 875	4 310	是
S-5	跨中	剪力/kN	0	244	218	0	是
S-6	底板	弯矩/(kN·m)	3 076	78	2 845	4 504	是
S-6	中支座	剪力/kN	1 772	335	1 921	2 594	是
S-7	中隔	弯矩/(kN·m)	29	291	309	58	是
S-7	墙底	剪力/kN	16	269	277	24	是
S-8	中隔	弯矩/(kN·m)	139	204	324	203	是
S-8	墙顶	剪力/kN	26	49	63	24	是

表 2 E2 地震作用下的截面变形验算结果

最大层间相对位移/mm			最大层间 位移角	层间位移 角限值	是否满足 要求
人工波	EL 波	Kobe 波			
5.1	5.6	5.0	1/1 408	1/550	是

表 3 E3 地震作用下的截面变形验算结果

最大层间相对位移/mm			最大层间 位移角	层间位移 角限值	是否满足 要求
人工波	EL 波	Kobe 波			
10.8	10.9	10.9	1/719	1/250	是

2.6 抗震构造措施

桥隧共建结构抗震薄弱点为桥隧连接处,且需对竖向受力构件进行加强,需在设计阶段进行构造性加强。

(1)隧道顶部与桥台及桥墩连接处设置上翻梁,提高结构整体刚度。

(2)隧道侧墙、中墙的纵向钢筋最小总配筋率增加 0.5%,侧墙、中墙与顶底板连接处满足柱箍筋加密区的构造要求,箍筋加密区范围与抗震等级相同的地表结构柱构件相同。

3 结 语

(1)桥隧共建结构抗震需进行整体模型考虑,通过考虑上部桥梁结构刚度、荷载来模拟桥梁对隧道结构影响。

(2)采用桥梁与隧道结构合建的形式,通过有限元模拟计算可满足隧道结构 E2、E3 抗震要求。

参考文献:

[1] 汪乐,王涛,宋磊.地铁明挖车站-市政桥梁合建结构的关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(12):2006-2012.

[2] 林东.市政下穿隧道与高架桥合建工程施工工序对合建结构的影响分析[J].山西交通科技,2023(2):86-89.

[3] 熊正元,杨春山.隧道与桥梁共建桩基布置及方案优化[J].公路,2019,64(2):137-142.

[4] 陈韧韧,张建民.地铁地下结构横断面简化抗震设计方法对比[J].岩土工程学报,2015,7(增刊1):134-141.

[5] 夏海平.道路明挖隧道结构抗震设计及应用研究[J].工程技术研究,2022(7):197-199.

[6] 樊长刚,谢泽龙.下穿地道结构抗震设计分析[J].建筑与结构设计,2019(4):9-11.

[7] 汪国良.基于反应位移法的多柱型地下车站结构抗震分析[J].铁道勘测与设计,2016(2):54-59.