

DOI: 10.11779/CJGE201911007

近距离地下穿越结构地震响应研究综述

王国波^{1,2}, 彭祥军¹, 郝鹏飞¹, 韦浩浩¹

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 温州大学建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 鉴于设计和使用要求, 近距离地下穿越工程大量涌现, 形成了土体-相互穿越结构群复杂相互作用体系。多个地下结构出现近距离穿越情况时, 在地震作用下结构与临近土体以及结构之间均存在动力相互作用, 地下穿越结构体系的地震响应规律更加复杂。基于对大量实际近距离穿越工程案例的归纳整理, 将地下穿越结构大体分为隧道相互穿越体系、隧道穿越地铁车站体系、地铁车站相互穿越体系。在总结地下穿越工程特点的基础上, 分别阐述各穿越体系地震响应研究现状和进展, 指出现有研究中存在的不足和问题, 并对今后进一步研究的方向给出了一些建议。

关键词: 地下结构; 地铁车站; 盾构隧道; 穿越工程; 地震响应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)11-2026-11

作者简介: 王国波(1979—), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail:wgb16790604@126.com。

Review of researches on seismic response of close underground crossing structures

WANG Guo-bo^{1,2}, PENG Xiang-jun¹, HAO Peng-fei¹, WEI Hao-hao¹

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway, Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: In view of the design and use requirements, a large number of close underground crossing projects have emerged, forming a complex interaction system between soil-crossing structural groups. When a number of underground structures are close to each other, there is a dynamic interaction between the structure and the adjacent soil, and between the structures themselves under the action of earthquake, and the seismic response laws of the underground through-structure system are more complicated. Based on the inductive sorting of a large number of actual close-range engineering cases, the underground crossing structures are roughly divided into tunnel-tunnel crossing system, tunnel-subway station crossing system, and subway station-subway station crossing system. Then, on the basis of summarizing the characteristics of underground crossing engineering cases, the current status and progress of seismic response researches on each crossing system are expounded, respectively. The shortcomings and problems in the existing researches are pointed out, and some suggestions for further researches are given.

Key words: underground structure; subway station; shield tunnel; crossing project; earthquake response

0 引言

伴随城市地下空间的进一步开发利用及既有地下结构的扩展改造, 地下工程不可避免地出现近距离相互穿越的情况, 十字型、X型等穿越形式不断涌现, 这些结构在城市日常功能中发挥着重要的作用, 因此研究近距离地下穿越结构的抗震性能十分迫切。地下结构埋藏于土体之中, 受到周围土体的约束作用, 其抗震问题必然与地表结构不同: 地表结构的地震响应主要受惯性力控制, 而地下结构的地震响应则受周围土体束缚, 以土体变形控制为主。早期普遍认为地下结构的抗震性能优于地表结构, 从而忽略了地下结构的抗震问题。然而近几年世界范围内发生的一系列大地震中, 大量地下结构遭受严重破坏, 如阪神地震和汶

川地震造成地铁车站和隧道的破坏, 表明地下结构并非绝对安全, 其抗震性能也需要引起足够的重视^[1-3]。

在一定条件下, 单一地下结构的抗震性能可以满足其自身的抗震要求, 然而随着新建地下结构的加入, 原有体系所处环境发生了一定程度的改变, 间距越小这种改变程度越大, 最终形成了一个更加复杂的近距离地下穿越结构相互作用体系, 其中存在着原有结构与新建结构、结构与土体之间的相互作用。显然地下穿越结构相互作用体系对抗震问题提出了新的要求, 该体系的抗震性能有待进一步研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878529, 51678465); 武汉理工大学研究生优秀学位论文培育项目(2018-YS-044)

收稿日期: 2019-01-10

1 现状调查及特点分析

1.1 地下穿越工程实例总结

考虑到近距离地下穿越结构最近几年才在我国大量出现, 而国外相关大规模地下空间建设已基本结束, 因此本小节主要基于国内目前已有的大量近距离

穿越工程案例, 按照穿越结构形式的不同, 大体将其划分为三大类: 隧道相互穿越工程、隧道穿越地铁车站工程(包括隧道下穿地铁车站和隧道上穿地铁车站)和地铁车站相互穿越工程, 各类典型工程案例及特点总结于表 1~4 中。

表 1 隧道相互穿越工程

Table 1 Tunnel-crossing projects					
序号	项目名称	下部隧道结构形式	上部隧道结构形式	穿越角度/(°)	上下结构间距/m
1	上海地铁 2 号线盾构穿越地铁 1 号线	双线并行隧道 (内径 5.5 m)	双线并行隧道	90	1.0
2	北京地铁 6 号线下穿南水北调暗涵	双线并行隧道 (内径 5.4 m, 中心间距 10.0 m)	双线并行隧道 (内径 4.0 m, 中心间距 12.2 m)	90	4.0
3	北京地铁 6 号线下穿既有 4 号线	双线并行隧道 (内径 5.4 m, 中心间距 10.0 m)	双洞矩形隧道 (宽 9.8 m, 高 9.0 m, 中心间距 13.9 m)	90	2.6
4	北京地铁 14 号线盾构隧道下穿地铁 15 号线区间	双线并行隧道 (内径 5.4 m, 中心间距 17.0 m)	双线并行隧道 (内径 5.4 m, 中心 间距 17.0 m)	53	1.9
5	西藏南路越江隧道近距离穿越地铁 8 号线	双线并行隧道 (外径 11.4 m)	双线并行隧道 (内径 5.5 m)	56	2.8
6	深圳市 3 号隧道下穿 4 号线车档隧道	双线并行隧道 (内径 5.2 m)	双线大跨度隧道 (净跨 9.9 m)	90	1.8
7	走马岗公路隧道上穿东深供水隧洞	供水隧洞	双线并行隧洞 (净距 28.5 m)	30	21.5
8	深圳地铁 2 号线盾构下穿地铁 1 号线	双线并行隧道	单洞双层圆拱衬砌结构 (宽 6.8 m, 高 13.6 m)	55	1.8~2.8
9	深圳地铁 9 号线下穿地铁 4 号线盾构区间	双线并行隧道	双线并行隧道 (外径 6.0 m)	90	2.5~3.1
10	杭州地铁 4 号线近距离斜向下穿 1 号线	双线并行隧道 (外径 6.2 m)	双线并行隧道	23.6, 17.5	2.1
11	武汉地铁 3 号线王范区间下穿 2 号线范湖段隧道	双线并行隧道 (外径 6.0 m)	双线并行隧道 (外径 6.0 m)	90	2.4

表 2 隧道上穿地铁车站工程

Table 2 Subway station projects with top crossing tunnels					
序号	项目名称	下部车站结构形式	上部隧道结构形式	穿越角度/(°)	上下结构间距/m
1	北京地铁 15 号线奥林匹克公园站	两层三跨(宽 25.4 m, 高 14.9 m)	混凝土框架 (宽 34.4 m, 高 9.4 m)	0	0.0
2	北京地铁 5 号线崇文门站双柱三跨岛式暗挖车站下穿地铁 2 号线	(宽 24.2 m, 高 11.5 m)	混凝土框架结构	90	2.0

表 3 隧道下穿地铁车站工程

Table 3 Subway station projects with bottom crossing tunnels					
序号	项目名称	下部隧道结构形式	上部车站结构形式	穿越角度/度	上下结构间距/m
1	北京地铁 6 号线(朝一东区间)	双洞隧道(宽 6.8 m, 高 7.8 m, 中心间距 16 m)	三跨框架结构 (宽 22.7 m, 高 11 m)	90	0.0
2	南水北调北京段西四环暗涵下穿五棵松地铁车站工程	两孔连体暗涵(内径 4.1 m, 中心间距 8.2 m)	三跨框架结构 (宽 19.5 m, 高 7.9 m)	90	3.7
3	北京地铁 4 号线宣武门站下穿 2 号线宣武门站	双洞矩形隧道(中心间距 13.9 m, 宽 9.8 m, 高 9.0 m)	钢筋混凝土框架结构 (宽 19.7 m, 高 7.8 m)	90	1.9
4	北京地铁 14 号线某区间下穿既有 5 号线某车站	曲强拱顶结构 (中心间距 10.8 m, 宽 6.2 m, 高 6.7 m)	两层双跨单柱结构 (宽 22.6 m, 16.3 m)	90	0.4
5	重庆地铁 1 号线大坪车站上穿交通 2 号线隧道	双洞矩形隧道(中心间距 15.0 m, 宽 6.6 m, 高 8.5 m)	曲强拱顶结构 (宽 23.0 m, 高 18.0 m)	69	1.0
6	深圳地铁 7 号线皇岗—福民区间隧道下穿 4 号线福民车站工程	双洞矩形隧道 (中心间距 16.7 m, 宽 6.6 m, 高 7.8 m)	两层两跨箱型框架结构 (宽 20.4 m, 高 12.6 m)	75	0.0

表 4 地铁车站相互穿越工程
Table 4 Crossing projects of subway stations

序号	项目名称	下部车站结构形式	上部车站结构形式	穿越角度/(°)	上下结构间距/m
1	北京某新建地铁车站下穿既有车站	两层三跨车站 (宽 23.5 m, 高 14.9 m)	单层五跨结构 (宽 29.6 m, 高 6.4m)	70	0.4
2	北京地铁 10 号线公主坟站	钢筋混凝土框架 结构(宽 20.3 m, 高 7.9 m)	单层双跨矩形结构 (宽 14.0 m, 高 9.3 m)	90	0.0
3	广州地铁 3 号线体育西站	三连拱隧道	两层三跨混凝土 框架结构	90	0.8

1.2 地下穿越工程特点分析与总结

基于上述国内大量近距离穿越工程实际案例，可初步总结如下特点：

(1) 就穿越工程的数量而言，隧道相互穿越工程最多，其次是隧道穿越地铁车站工程，地铁车站相互穿越工程最少；隧道相互穿越工程所涉及的结构数量最多，涉及 2 条、4 条甚至更多数量的隧道。

(2) 就穿越角度而言，穿越结构的穿越角度变化范围较大，在 0° ~90° 变化。

(3) 就穿越净间距而言，穿越结构的净间距一般较小，属于超近距离穿越工程。

(4) 就地下结构形式而言，以圆形盾构隧道和矩形框架式地铁车站为典型代表，另外还涉及到较复杂的结构形式，如双洞矩形隧道（表 3 第 3，5，6 个工程）、双连拱或三连拱隧道（表 4 第 3 个工程）等。

(5) 就穿越结构尺寸而言，穿越结构并不局限在常规的小直径盾构隧道（6 m 直径）和典型的两层三跨框架式地铁车站，还涉及到尺寸较大的单层五跨车站结构（表 4 第 1 个工程）、双线大跨隧道（表 1 第 6 个工程）等尺寸较大的地下结构。

(6) 就结构穿越土层而言，相互穿越地下结构的下层结构埋深一般较大且纵向长度较长，结构所穿越土层的参数变化较大，因而地下结构一般位于复杂地层之中，导致地震动空间效应显著。

(7) 就地下结构的走向而言，许多隧道在水平面和竖直面内都不是平直走向，存在水平面弯曲和高程上变化，属于空间曲线隧道，曲线隧道在急弯曲线可能存在应力集中现象，中国规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》（GB50909—2014）也对此提出了相关规定，因此曲线段隧道的抗震要求更高。

由此可见：

(1) 近距离地下穿越结构工程已大量涌现，其抗震问题必须得到重视。

(2) 近距离地下穿越结构工程的抗震问题必须考虑穿越角度、穿越间距、结构形式与尺寸、复杂地层、结构空间走向、地震动特性等关键因素的影响。

2 土-单一地下结构体系地震响应研究

近距离穿越工程大量涌现，有必要对其抗震性能进行全面分析，但对地下穿越结构的研究必然建立在单一结构的基础之上。近年来诸多学者^[4-6]对单一地下结构抗震分析方法提出了各自的见解，现有地下结构抗震设计方法一般有：地震系数法、自由场变形法、柔度系数法、反应位移法、数值分析法等。目前地下结构抗震分析的主要研究方法有：原型观测、模型实验、理论分析。地下结构抗震分析的基本理论分析方法包括解析法和数值模拟方法，解析法包括以求解波动方程为基础的波动法和以求解运动方程为基础的相互作用法，解析法又具体分为：ST. John 法、Shukla 法、反应位移法、BART 法、福季耶娃法、递推衍射法等；由于计算机普及，理论分析法正由解析法向数值模拟法转变，可用于数值模拟的软件颇多，数值模拟方法多种多样，得到广泛应用的有：动力有限元法、动力边界单元法及将这二者结合使用的混合法。

单一地下结构在一致地震激励下的研究在目前最为丰富和成熟。在理论分析方面，李亮等^[7]通过改进地基弹簧刚度系数的求解方法，提出了一种地下结构地震反应计算的改进的反应位移法，该法计算结果合理，并且具有较高的计算效率。刘晶波等^[8]推导出土-结构体系与自由场的地震加速度响应之间的定量关系，提出了一种修正的 Pushover 分析方法，由于修正了地震惯性力，该方法可以显著提高大型地下结构的地震分析的效率。Katol 等^[9]总结出目前常用的解析解方法，以及土-结构刚度比的计算方法，强调研究地下结构地震响应时应考虑土-结构相互作用效应。在数值模拟方面，赵伯明等^[10]分析了典型的两层三跨地铁车站在三维地震动作用下的动力响应，分析表明：下层中柱是车站最薄弱构件，它的破坏是由水平方向和竖直方向加速度共同作用的结果。在试验研究方面，杨林德等^[11]开展了国内首次对地铁车站结构的振动台模型试验，结果表明：模型中柱的应变相对较大，应适当加强中柱的刚度，试验成果为软土地铁抗震设计

提供了依据。随后庄海洋^[12]、陈国兴等^[13]、景立平等^[14]、王国波等^[15]、陶连金等^[16]、凌道盛等^[17]、黄茂松等^[18]、周健等^[19]、Iwatate 等^[20]、Rabeti 等^[21]研究人员进行了大量的地下结构振动台和离心机试验以考虑更多复杂的情况, 这些试验基本上取得了较为一致的成果, 也奠定了目前对地下结构抗震问题的一般认识: 车站结构中柱是其抗震最薄弱的部位; 车站侧墙与底板交界处应变较大, 容易出现裂缝; 软弱地基会放大场地效应, 特别是对低频率成分的放大; 地下结构的存在对周边土体地震动特性存在一定的影响。

单一地下结构在非一致地震激励下的研究方面, 由于问题的复杂性导致理论分析难度较大, 所以主要是数值模拟和试验研究。在数值模拟方面, Anastasopoulos 等^[22]用非线性超弹性单元对沉管隧道管片接头进行模拟, 研究了非一致地震激励下多段长跨度隧道地震响应规律, 分析认为隧道接头可以有效“吸收”一部分变形量, 增加接头垫圈的厚度或减小管节长度更有利于抗震。Pitilakis 等^[23]分析了非一致地震作用下矩形地下结构的变形行为, 指出地下结构的特殊性使得其抗震性能与地上结构不同。目前对结构横向响应研究成果颇多, 结构的纵向响应也逐渐受到关注, Park 等^[24]进行了空间地震动作用下隧道结构的伪静态三维有限元分析, 分析指出空间地震动会引起隧道纵向弯曲, 使隧道纵向轴力增大。此外, 袁勇等^[25-26]研究了软土中长大隧道在非一致地震动激励下的地震响应, 结果表明非一致地震激励会显著增加隧道结构的内力和变形, 从而对隧道抗震产生不利影响。在振动台模型试验方面, Chen 等^[27]开展了隧道结构振动台模型试验, 认为隧道结构在非一致地震激励下的动力响应要大于一致地震激励输入情况, 在隧道设计中应该考虑地震激励的空间效应。Cilingir 等^[28]的相关试验则发现隧道结构地震动响应取决于地震激励峰值加速度。谷音等^[29-30]进行了地铁车站结构振动台试验, 研究了非一致地震作用下地铁车站的响应特性, 结果表明长跨度地铁车站有必要考虑非一致地震动的影响。

目前有关单一地下结构的研究成果十分丰富, 涉及一致地震动激励和非一致地震动激励, 达成共识性的成果主要包括:

(1) 地下结构由于完全处于土体介质中, 其地震响应完全不同于地表结构, 其自振特性不明显且惯性力效应不显著。

(2) 地下结构的破坏主要是周围土体变形强加在结构上, 因此周围土体特性决定了地下结构地震响应。

(3) 影响地下结构地震响应规律的因素颇多, 主

要有: 结构方面(埋深、尺寸等), 地基土方面和地震波方面(幅值、入射方向、频谱特性)。

但在取得丰硕成果的同时, 目前的研究中也存在一些不足, 主要表现在:

(1) 在试验研究方面, 不考虑地震动空间效应的一致地震动激励研究较多, 而针对复杂场地的非一致地震动激励研究相对较少, 相关的非一致激励输入、多节段组合模型箱的研制技术尚需进一步完善。

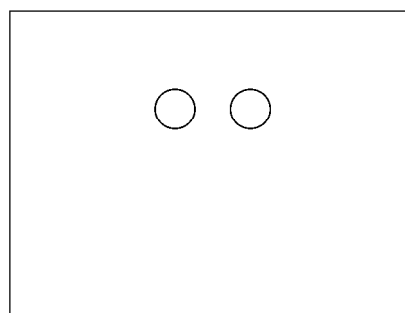
(2) 在破坏机理分析方面, 由于研究中针对实际条件均有简化, 对于地震作用下土与结构之间的荷载传递规律和结构灾变机理的研究还不够深入和充分。

(3) 在计算模型方面, 对于隧道大多采用的是匀质圆环模型, 与实际的管片拼接的方式不符, 应该考虑盾构隧道管片之间具体连接的精细化隧道计算模型。

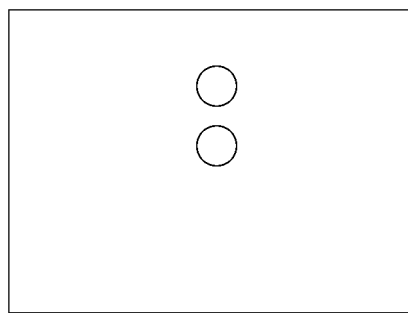
3 隧道相互穿越体系地震响应研究

影响隧道相互穿越结构体系地震响应的因素除前面提到的影响因素外, 还涉及到隧道之间夹土层的特性(土体参数、夹土层厚度)及穿越角度等因素。

对于水平平行结构体系, 为了减小工作量往往采用二维模型进行分析(图 1(a))。Parvanova 等^[31]研究了地表地形对双孔隧道地震响应的影响, 分析了隧道埋深、隧道间距、隧道衬砌特性等因素对土-隧道体系的地震响应的影响。而在竖向平行隧道(图 1(b))地震响应研究方面, 陈磊等^[32]建立了二维双层竖向重叠地铁隧道模型, 分析其在近场和远场水平向地震动作用下的动力响应, 分析表明: 双层竖向重叠地铁隧道上层相对水平位移差比下层大得多; 近场地震动和远场地震动对双层竖向重叠地铁隧道的相对水平位移差及地震应力幅值方面的影响规律不一致。王国波等^[33]建立土-隧道群相互作用体系模型, 分析该体系的地震响应规律, 结果表明隧道直径、埋深、空间间距对土体和隧道地震响应影响显著, 且在水平地震作用下结构的竖向加速度不容忽视。



(a) 水平平行隧道



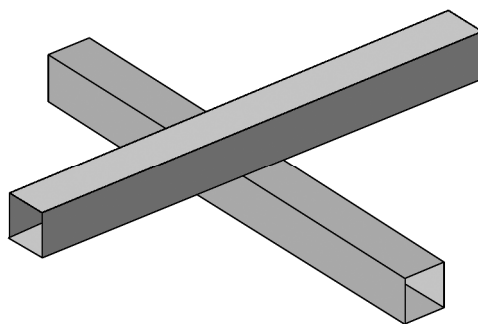
(b) 竖向平行隧道

图1 两平行隧道示意图

Fig. 1 Diagram of two parallel tunnels

结合现实情况来看,水平平行隧道较多,限于实际地形条件,上下完全平行穿越工程并不多见,而是具有一定穿越角度的穿越工程大量涌现,为了更深入地研究隧道相互穿越结构体系的地震响应规律,更多学者采用了三维计算模型。夏进平等^[34]研究了不同夹土层厚度对垂直穿越隧道地震响应的影响,结果表明上层隧道的相对水平位移、地震应力响应均大于下层隧道,发现0.5~2倍的隧道直径的厚度为较理想的夹土层厚度。王国波等^[35]对比分析了四孔水平平行重叠隧道与四孔垂直交叠隧道的抗震性能,发现垂直穿越隧道的抗震性能优于平行重叠隧道。胡建平等^[36-37]研究了立体穿越隧道模型的响应规律,研究表明:隧道穿越部位、上部隧道顶板与边墙连接处、隧道出口部位的动力响应比其他部位更大,设计立体穿越隧道时应着重加强这些部位的刚度和强度。高相青^[38]运用反应位移法相关理论对多线路穿越隧道纵向地震响应进行了分析,指出将隧道分段增加了结构的柔性变形能力,更有利于抗震,这与文献[22]的结论一致。唐金良^[39]研究了穿越结构穿越部位的地震响应特性,发现空间穿越角度对结构地震响应影响不大,但垂直穿越更有利于抗震,这与文献[35]结论一致。李积栋等^[40]分析了密贴交叉隧道(图2)在强震作用下的动力响应,发现上层隧道水平位移大于下层。刘桂朋^[41]研究了垂直穿越隧道的地震动力响应,分析了穿越隧道的净间距、隧道埋深等因素对隧道抗震性能的影响,认为隧道净间距和埋深的增大对穿越隧道的抗震有利。此外,在试验研究方面,韩俊艳等^[42]进行了双孔平行管道非一致震动台试验,分析了管道的地震响应及受力变形特征,试验表明:在纵向非一致激励下,管道产生拉压应变,而在横向非一致激励下,管道产生了弯曲应变。

上述诸多学者结合典型实际工程进行了大量的研究,指导了工程实践的同时,也积累了一些关于穿越隧道体系在抗震时需注意的问题,如结构埋深、穿越

图2 交叉隧道空间位置^[40]Fig. 2 Spatial location of crossing tunnels^[40]

净间距、穿越角度以及地震动特性等是影响土体和穿越结构地震响应的关键性因素。但也应看到,近距离穿越隧道工程是近几年随着我国城市轨道交通建设深入发展的大背景下才逐渐出现的,针对近距离穿越隧道工程抗震问题的研究还有待进一步深入:

(1) 现有研究大多是基于特定场地条件下具体工程实践进行的计算和分析,所得到结论的一般性尚需进一步检验,尚需进行不同场地条件下地下结构的响应规律研究,寻找一般性的规律。

(2) 近距离地下穿越结构的相互影响程度、评价指标等不够明确,且由于影响该近距离穿越体系地震响应的因素较多,需要针对各个影响因素进行参数分析并总结评价标准,评价临近结构相互影响程度。

(3) 目前的研究成果大多基于一致地震动激励,而地下穿越结构一般纵向长度较长且穿越复杂地层,各节段受到地震作用可能存在较大差异,因此尚需考虑非一致地震作用下的该近距离穿越体系的地震响应。

(4) 试验研究方面,地震动的非一致输入的实现,高性能模型箱的设计研制,模型土的配制及结构的精细化模拟等方面,基于一致和非一致地震动激励下的相关试验研究还需进一步完善。

4 隧道穿越地铁车站体系地震响应研究

隧道穿越地铁车站结构体系包括隧道下穿车站结构和车站结构下穿隧道两种情形。

在地铁车站结构下穿隧道方面,陈建民等^[43]建立了地铁车站结构密贴下穿既有公路隧道计算模型,对密贴的两个地下结构的地震响应进行计算分析,研究表明地铁车站结构放大了上部公路隧道结构的相对水平位移和水平加速度,结构接触面的切向刚度是影响上部隧道结构动力响应的主要因素。陶连金等^[44]建立了地铁车站结构长距离密贴下穿既有隧道结构三维模型(图3),计算结果表明下穿地铁车站对上部隧道结构的动力加速度响应有不同程度的减弱效应,且减弱

幅度随着二者间距的减小而增加。

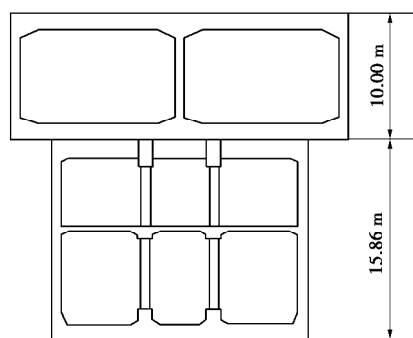
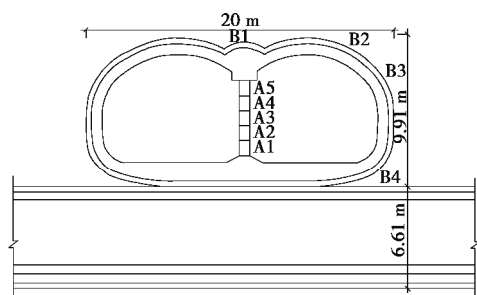


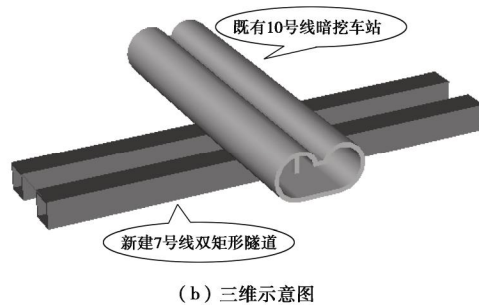
图 3 车站下穿隧道示意图^[44]

Fig. 3 Schematic diagram of stations under crossing tunnels^[44]

在隧道下穿地铁车站结构方面, 林辉^[45]以南水北调双输水隧道穿越北京地铁五棵松车站为背景, 分析了既有地铁车站受输水隧洞穿越前后的抗震性能, 指出车站结构最大位移和最大内力的大小与输入的地震波加速度峰值有关。张波等^[46-47], 建立了地铁车站与隧道超近距离穿越结构模型, 分析其在北京人工波作用下的动力响应, 结果表明: 下部隧道的存在减弱了上部车站结构的位移和加速度响应, 下部隧道对上部车站水平方向应力减弱程度比竖向大, 以及后来进行的地铁车站-隧道密贴组合结构振动台试验表明土-结构相互作用力受到结构埋深和结构尺寸的影响。陶连金等^[48]以北京地铁 7 号线国贸双井站区间暗挖隧道密贴下穿既有地铁 10 号线双井站为研究对象 (图 4), 对密贴地下结构进行了研究, 分析了隧道密贴下穿地铁车站结构在竖向强震作用下的地震响应特性, 发现由于车站-隧道间的相互作用, 密贴地铁车站交叉主体结构的竖向位移和受力与单一地铁车站明显不同, 且与输入的地震波特性有关。黄俊等^[49]以双隧道下穿单层车站结构为背景进行了地震响应振动台试验, 分析水平地震作用下穿越结构体系的应变、加速度响应和侧墙土压力, 研究结果表明: 底部隧道的存在具有吸收地震波的作用, 从而使上部车站地震响应减弱, 且减幅随夹土层厚度的增加而减小。



(a) 平面示意图



(b) 三维示意图

图 4 隧道下穿地铁车站示意图^[48]

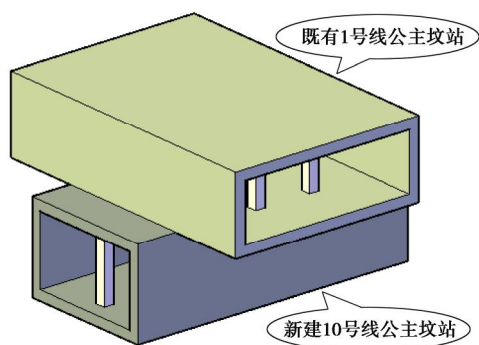
Fig. 4 Schematic diagram of tunnels under crossing station^[48]

现有研究多结合已有实际工程, 从结构之间的相互作用来探索该复杂体系的地震响应规律, 重点关注结构的应变和加速度响应, 指出结构的抗震薄弱环节, 为隧道穿越地铁车站结构体系抗震设计提供初步的依据。但目前研究较少考虑更加复杂的因素, 如更复杂的地层条件、多层换乘车站、非一致激励的影响等, 以及针对隧道穿越地铁车站结构相互作用体系非一致地震激励下的试验研究还未见相关报道。

5 地铁车站相互穿越体系地震响应研究

对于地铁车站相互穿越体系, 考虑到实际情况, 一般将这种穿越体系设计为换乘车站, 真正意义上的穿越地铁车站体系并不多见, 其出现主要是由于前期规划不足, 因此对该穿越结构体系的相关研究并不多见, 这一小节将少量针对换乘站的研究也囊括进来。袁蕾等^[50]研究了地铁换乘站不规则结构的地震响应, 研究表明土体的约束作用有利于减弱不规则结构的扭转效应。张宇^[51]建立了 T 型交叉换乘车站结构分析模型, 分析成果表明: 地震波特性对车站结构的损伤状况影响较大, 且结构不同部位损伤状况不同。潘靖军^[52]分析了交叉地铁车站三维地震动力响应作用下的抗震性能, 研究发现车站交叉处容易发生应力集中现象并发生沿波传播方向和竖向的剪切破坏。

李积栋等^[53-56]在地铁车站相互穿越结构体系地震响应研究方面进行了大量研究, 他们以北京地铁新建 10 号线公主坟站密贴下穿既有 1 号线公主坟站为研究对象 (图 5), 采用数值模拟和振动台试验相结合的方法, 探究了密贴交叉上下两车站结构的相互作用关系, 研究表明: 上层车站结构顶部地震响应最为显著, 在强震作用下, 密贴交叉组合地铁车站的上下层结构会产生相互作用, 引起一定距离的错位运动, 甚至会出现上下层结构滑移或脱离现象, 造成上下层相对运动的原因可能是地震动引起的地层运动不一致、上下层车站结构惯性差异及上下层结构之间摩擦力等。

图5 车站相互穿越示意图^[53]Fig. 5 Schematic diagram of stations crossing each other^[53]

基于上述研究成果，目前对地铁车站相互穿越结构体系的研究表明：车站交叉处容易出现应力集中现象，发生剪切破坏，这与目前人们直观的认识相一致，应引起足够的重视。一般将这种穿越结构体系设计为换乘车站，地铁换乘站是一个典型的空问结构，同时为了满足与周边地下商场的衔接，在侧墙上一般有开洞，这些开洞会削弱地下结构的抗侧力体系，从而影响换乘站的抗震性能。因此，尚需加强针对大型复杂换乘车站以及地下综合体抗震性能的研究。

6 结论与展望

地下穿越结构体系地震响应的相关研究随着科技的发展不断拓展完善，目前在近距离地下穿越结构相互作用体系抗震问题方面取得的主要成果包括：

(1) 影响因素方面：土体特性、结构埋深、空间关系（间距及角度）、地震波特性等因素是影响近距离地下穿越结构相互作用体系地震响应的关键因素。

(2) 薄弱部位方面：对于单一车站结构，中柱一般是其薄弱环节；对于穿越工程中的车站结构，车站结构穿越部位容易出现应力集中现象，发生剪切破坏，应引起足够的重视。

(3) 相互作用方面：由于结构-结构相互作用、土-结构相互作用，近距离穿越结构体系地震响应与单一结构明显不同，下部结构能够吸收一部分地震波能量，使得上部结构地震响应减弱，且减弱幅度随夹土层厚度增加而减小。

由于近距离穿越地下结构的出现时间较短，对其开展的研究也有限，相关研究仍有待进一步完善。基于上述已有研究成果，结合笔者正在开展的相关研究工作，认为如下几方面的工作亟需开展：

(1) 地震激励方面：地下结构尺寸往往较大，空间位置复杂，不可避免会穿越不同地层，不同空间位置的结构受到的地震作用存在差异，地震作用对一个结构是横向作用，对另一个结构可能是纵向或斜向

激励，且地震动空间效应显著^[21,27]，因此需要考虑非一致激励作用以及近距离穿越地下结构的多维抗震。

(2) 复杂结构研究方面：随着城市交通系统的发展，出现了一系列新型的复杂结构，如小半径曲线隧道、水下穿越隧道、地下立体交通节点等，但针对这些结构抗震性能的研究并不多见。这些结构受力形式与普通地下结构有所不同，对小半径曲线隧道而言，其弯曲段的存在使得曲线隧道结构的地震响应与直线隧道不同；水下穿越隧道所处地层环境特殊，隧道受到水流冲刷等的影响较大；地下立体交通节点由于与多个结构连接，其受力形式十分复杂。

(3) 精细化建模技术方面：对于盾构隧道而言，目前大多采用的是匀质圆环模型，这与实际盾构隧道的结构特点不符。目前已有考虑隧道管片之间具体连接的精细化盾构隧道静力计算模型，而缺乏用于动力分析的精细化模型。因此，可开展基于管片-接头弹簧-土体的三维盾构隧道精细化建模研究，更加准确地描述隧道的地震响应规律，如管片受力、接头张开量等。

(4) 试验研究方面：目前已有部分针对近距离地下穿越结构的一致激励振动台试验研究以及单一地下结构的非一致振动台试验研究，但针对近距离穿越地下结构群的非一致地震激励试验研究还未见相关报道。

(5) 破坏机理研究方面：多维地震动激励下周围土体与多个结构之间的荷载传递规律十分复杂，导致简化分析模型难以确定，结构灾变机理的研究还不够深入和充分。因此，可从结构变形及受力两方面确定结构抗震薄弱部位，分析其灾变机理。

(6) 相互影响评价指标方面：目前已有的研究大多针对具体实际工程，缺乏一般性研究，对近距离地下穿越结构的相互影响程度、评价指标等的研究不够深入，导致缺乏合理有效的评价体系，难以指导工程实际。可在结构的受力、变形等物理量中选择合理的相互影响评价指标，并评价其影响程度。

(7) 与地表结构（群）相互影响研究方面，由于地下结构一般位于城市中心，地表结构密集，目前针对地表结构群影响的城市场地效应（SCI: Site City Interaction）已引起人们的关注，近距离地下穿越结构与地表结构必然相互影响，王国波等^[57]对地下结构与邻近地表结构在地震时的相互影响也进行了总结和归纳，指出地下结构与邻近地表结构（群）的相互影响不容忽视。因此，可开展近距离地下穿越结构-土体-地表结构（群）的一致和非一致地震响应规律研究。

(8) 计算效率方面：由于近距离地下穿越结构相互作用体系的复杂性，目前主要依赖于三维动力时程分析，实际工程设计人员难以把握和操作，有必要建

立基于各影响因子修正的简化计算方法用于工程实践。近距离地下穿越结构目前一般采用三维动力时程分析方法, 其计算规模相当可观, 特别是对于上述提到的精细化计算模型, 同时考虑宏观和微观的响应, 目前禹海涛等已有相关研究^[58], 但仍需进一步地简化和完善, 同时还需开发更加高效地计算技术。

参考文献:

- [1] CHEN G X, ZHUANG H Y, SHI G L. Analysis on the earthquake response of subway station based on the substructure subtraction method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, **24**(4): 396 - 401.
- [2] 孙海涛, 徐迎伍. 软土地层中盾构隧道地震反应分析[J]. 勘察科学技术, 2000(1): 10 - 14. (SUN Hai-tao, XU Ying-wu. Seismic response analysis for a shield tunnel in soft soil foundation[J]. Site Investigation Science and Technology, 2000(1): 10 - 14. (in Chinese))
- [3] 胡建平, 刘亚莲. 浅埋交叉隧道地震动力响应及减震措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(3): 759 - 765. (HU Jian-ping, LIU Ya-lian. Analysis on the seismic dynamic response and shock-absorption measures of shallow-burial cross tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(3): 759 - 765. (in Chinese))
- [4] 林 皋. 地下结构抗震分析综述(上)[J]. 世界地震工程, 1990(2): 1 - 10. (LIN Gao. State of the art of antiseismic analysis of underground structures(I)[J]. World Earthquake Engineering, 1990(2): 1 - 10. (in Chinese))
- [5] 林 皋. 地下结构抗震分析综述(下)[J]. 世界地震工程, 1990(3): 1 - 10. (LIN Gao. State of the art of antiseismic analysis of underground structures(II)[J]. World Earthquake Engineering, 1990(3): 1 - 10. (in Chinese))
- [6] 白广斌, 赵 杰, 汪 宇. 地下结构工程抗震分析方法综述[J]. 防灾减灾学报, 2012, **28**(1): 20 - 26. (BAI Guang-bin, ZHAO Jie, WANG Yu. Review of methods for antiseismic research of underground engineering[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2012, **28**(1): 20 - 26. (in Chinese))
- [7] 李 亮, 杨晓慧, 杜修力. 地下结构地震反应计算的改进的反应位移法[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1360 - 1364. (LI Liang, YANG Xiao-hui, DU Xiu-li. Improved response displacement method for evaluating seismic responses of underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1360 - 1364. (in Chinese))
- [8] LIU J B, ZHANG X B. Practical seismic analysis of large underground structures: Theory and application[J]. Science China Technological Sciences, 2018, **61**(9): 1417 - 1425.
- [9] KATO B, WANG G. Ground motion simulation in an urban environment considering site-city interaction: a case study of Kowloon Station, Hong Kong[C]// 3rd Huixian International Forum on Earthquake Engineering for Young Researchers. Urbana-Champaign: University of Illinois, August 11-12, 2017.
- [10] 赵伯明, 蒋英礼, 陈 靖. 软土地铁车站结构在三维强地震动作用下的响应分析[J]. 中国铁道科学, 2009, **30**(3): 45 - 50. (ZHAO Bo-ming, JIANG Ying-li, CHEN Jing. The response analysis of underground railway station structure in soft soil under strong earthquake[J]. China Railway Science, 2009, **30**(3): 45 - 50. (in Chinese))
- [11] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 软土地铁车站结构的振动台模型试验[J]. 现代隧道技术, 2003, **40**(1): 7 - 11. (YANG Lin-de, JI Qian-qian, ZHENG Yong-lai, et al. Shaking table test on metro station structures in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, **40**(1): 7 - 11. (in Chinese))
- [12] 庄海洋, 陈国兴, 杜修力, 等. 液化大变形条件下地铁车站结构动力反应大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, **27**(4): 94 - 97. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, DU Xiu-li, et al. Analysis of earthquake response of subway station built on liquefied soil by large-scale shaking table testing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, **27**(4): 94 - 97. (in Chinese))
- [13] 陈国兴, 陈 苏, 左 熹, 等. 软土场地地铁车站结构地震反应特性振动台模型试验[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 331 - 342. (CHEN Guo-xin, CHEN Su, ZUO Xi, et al. Shaking table test on seismic response of subway station structure in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 331 - 342. (in Chinese))
- [14] 景立平, 孟宪春, 孙海峰, 等. 三层地铁车站振动台试验分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, **31**(6): 159 - 166. (JING Li-ping, MENG Xian-chun, SUN Hai-feng, et al. Shaking table test analysis of three-story subway station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, **31**(6): 159 - 166. (in Chinese))
- [15] WANG G B, YUAN M Z, MIAO Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **76**: 145 - 159.
- [16] 陶连金, 吴秉林, 李积栋, 等. Y形柱双层地铁车站振动台试验研究[J]. 铁道建筑, 2014(9): 36 - 40. (TAO Lian-jin,

- WU Bing-lin, LI Ji-dong, et al. Research on shaking table test of double-layer subway station[J]. Railway Engineering, 2014(9): 36 - 40. (in Chinese))
- [17] 凌道盛, 郭恒, 蔡武军, 等. 地铁车站地震破坏离心机振动台模型试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, **46**(12): 2201 - 2209. (LING Dao-sheng, GUO Heng, CAI Wu-jun, et al. Research on seismic damage of metro station with centrifuge shaking table model test[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, **46**(12): 2201 - 2209. (in Chinese))
- [18] 黄茂松, 刘鸿哲, 曹杰, 等. 盾构隧道横向抗震设计分析方法与验证[J]. 世界地震工程, 2011, **27**(1): 60 - 65. (HUANG Mao-song, LIU Hong-zhe, CAO Jie, et al. Transverse seismic design analysis methods and test of shield tunnels[J]. World Earthquake Engineering, 2011, **27**(1): 60 - 65. (in Chinese))
- [19] 周健, 陈小亮, 贾敏才, 等. 有地下结构的饱和砂土液化宏观离心机试验[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 392 - 399. (ZHOU Jian, CHEN Xiao-liang, JIA Min-cai, et al. Dynamic centrifuge tests on macro-micro mechanism of liquefaction of saturated sandy foundation with buried structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 392 - 399. (in Chinese))
- [20] IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu earthquake[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000: 1129 - 1135.
- [21] RABETI M M, BAZIAR M H. Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: shaking table testing and numerical simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **83**: 81 - 97.
- [22] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS N, DROSOS V, et al. Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(9): 1067 - 1090.
- [23] PITILAKIS K, TSINIDIS G. Performance and seismic design of underground structures[M]. Cham: Springer International Publishing, 2014: 279 - 340.
- [24] PARK D, SAGONG M, KWAK D Y, et al. Simulation of tunnel response under spatially varying ground motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, **29**(11): 1417 - 1424.
- [25] 禹海涛, 袁勇, 顾玉亮, 等. 非一致激励下长距离输水隧道地震响应分析[J]. 水利学报, 2013, **44**(6): 718 - 725. (YU Hai-tao, YUAN Yong, GU Yu-liang, et al. Effect of non-uniform excitation on seismic response of long-distance water-conveyance tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(6): 718 - 725. (in Chinese))
- [26] 袁勇, 申中原, 禹海涛. 沉管隧道纵向地震响应分析的多体动力学方法[J]. 工程力学, 2015, **32**(5): 76 - 83. (YUAN Yong, SHEN Zhong-yuan, YU Hai-tao. Multibody dynamics method for longitudinal seismic response analysis of immersed tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2015, **32**(5): 76 - 83. (in Chinese))
- [27] CHEN J, SHI X J, LI J. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform earthquake wave excitation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **30**(11): 1400 - 1416.
- [28] CILINGIR U, MADABHUSHI S P G. A model study on the effects of input motion on the seismic behavior of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **31**(3): 452 - 462.
- [29] 谷音, 谌凯, 吴怀强, 等. 考虑地震动空间非一致性的地铁车站结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, **36**(17): 255 - 261, 266. (GU Yin, CHEN Kai, WU Huai-qiang, et al. Shaking table tests for a subway station structure under spatially non-uniform ground motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, **36**(17): 255 - 261, 266. (in Chinese))
- [30] 谷音, 庄舒曼, 卓卫东, 等. 考虑地震动空间非一致性的地铁车站结构三维数值模拟[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, **47**(6): 819 - 824. (GU Yin, ZHUANG Shu-man, ZHUO Wei-dong, et al. Research on numerical simulation of subway structure under spatially non-uniform seismic ground motion[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2015, **47**(6): 819 - 824. (in Chinese))
- [31] PARVANOV S L, DINEVA P S, MANOLIS G D, et al. Seismic response of lined tunnels in the half-plane with surface topography[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, **12**(2): 981 - 1005.
- [32] 陈磊, 陈国兴, 李丽梅. 近场和远场地震动作用下双层竖向重叠地铁隧道地震反应特性[J]. 中国铁道科学, 2010, **31**(1): 79 - 86. (CHEN Lei, CHEN Guo-xing, LI Li-mei. Seismic response characteristics of the double-layer vertical overlapping metro tunnels under near-field and far-field

- ground motions[J]. China Railway Science, 2010, **31**(1): 79 - 86. (in Chinese))
- [33] 王国波, 王亚西, 于艳丽, 等. 土体-隧道群相互作用体系地震响应研究[J]. 中国公路学报, 2015, **28**(7): 66 - 76. (WANG Guo-bo, WANG Ya-xi, YU Yan-li, et al. Study on seismic responses of soil-tunnel group interaction system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, **28**(7): 66 - 76. (in Chinese))
- [34] 夏进平, 陶连金, 王文沛, 等. 交叉隧道在不同夹层土体厚度下的地震响应分析[J]. 防灾科技学院学报, 2012, **14**(4): 8 - 12. (XIA Jin-ping, TAO Lian-jin, WANG Wen-pei, et al. Dynamic response analysis of intersecting tunnel structure under different interlayer soil thickness[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2012, **14**(4): 8 - 12. (in Chinese))
- [35] 王国波, 陈 梁, 徐海清, 等. 紧邻多孔交叠隧道抗震性能研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2483 - 2490. (WANG Guo-bo, CHEN Liang, XU Hai-qing, et al. Study of seismic capability of adjacent overlapping multi-tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2483 - 2490. (in Chinese))
- [36] 胡建平, 刘亚莲. 软土地基中立体交叉隧道地震动力响应分析[J]. 四川建筑科学研究, 2013, **39**(2): 240 - 243. (HU Jian-ping, LIU Ya-lian. Seismic dynamic response analysis of three-dimensional crossing tunnel on soft foundation[J]. Sichuan Building Science, 2013, **39**(2): 240 - 243. (in Chinese))
- [37] 胡建平, 刘亚莲. 复杂环境条件下交叉隧道地震动力响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, **35**(3): 37 - 41. (HU Jian-ping, LIU Ya-lian. Seismic dynamic response analysis of crossing tunnel in complex environment[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, **35**(3): 37 - 41. (in Chinese))
- [38] 高相青. 多线路地下交叉隧道纵向地震反应分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014. (GAO Xiang-qing. Longitudinal direction seismic response analysis of multi line intersecting underground tunnel[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2014. (in Chinese))
- [39] 唐金良. 地铁交叉隧道地震响应特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (TANG Jin-liang. Study on seismic response of subway intersecting tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [40] 李积栋, 陶连金, 吴秉林, 等. 密贴交叉隧道在强震作用下的三维动力响应分析[J]. 现代隧道技术, 2014, **51**(1): 26 - 31. (LI Ji-dong, TAO Lian-jin, WU Bing-lin, et al. Analysis of 3D dynamic response of closely overlapping tunnels during a strong earthquake[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, **51**(1): 26 - 31. (in Chinese))
- [41] 刘桂朋. 地震荷载作用下交叉隧道的动力响应及抗震方案研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017. (LIU Gui-peng. Study on dynamic response and aseismic measures of intersecting tunnels under seismic load[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017. (in Chinese))
- [42] 韩俊艳, 万宁潭, 李立云, 等. 长输埋地管道振动台试验传感器布置方案研究[J]. 震灾防御技术, 2018, **13**(1): 13 - 22. (HAN Jun-yan, WAN Ning-tan, LI Li-yun, et al. Study on the scheme of sensor position in shaking table test for long distance buried pipeline[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, **13**(1): 13 - 22. (in Chinese))
- [43] 陈建民, 项彦勇. 两个水平密贴地下结构的地震响应分析[J]. 隧道建设, 2012, **32**(4): 506 - 513. (CHEN Jian-min, XIANG Yan-yong. Analysis on seismic response of adjacent underground structures[J]. Tunnel Construction, 2012, **32**(4): 506 - 513. (in Chinese))
- [44] 陶连金, 闫冬梅, 李积栋, 等. 地铁车站长距离密贴下穿既有隧道结构的地震响应[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, **24**(3): 301 - 305. (TAO Lian-jin, YAN Dong-mei, LI Ji-dong, et al. Analysis on seismic response of long-distance and closely-attached subway station to existing tunnel structure[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2014, **24**(3): 301 - 305. (in Chinese))
- [45] 林 辉. 既有地铁车站结构受隧洞穿越影响的抗震性能分析[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011. (LIN Hui. Analysis of the seismic behavior of subway station affected by the down-through tunnel[D]. Beijing: Beijing Institute of Architectural Engineering, 2011. (in Chinese))
- [46] 张 波, 陶连金, 姜 峰, 等. 地铁超近距交叉结构在水平地震荷载下的响应影响分析[J]. 铁道建筑, 2011, **51**(11): 47 - 50. (ZHANG Bo, TAO Lian-jin, JIANG Feng, et al. Analysis of response to horizontal earthquake loading for metro crossing tunnels with super closed distance apart[J]. Railway Engineering, 2011, **51**(11): 47 - 50. (in Chinese))
- [47] 张 波. 地铁车站地震破坏机理及密贴组合结构的地震响应研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012. (ZHANG Bo. Study on seismic failure mechanism of subway station and the seismic response of closely-attached subway structures[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [48] 陶连金, 王文沛, 张 波, 等. 竖向强震作用下密贴地铁

- 地下交叉结构动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 433 - 438. (TAO Lian-jin, WANG Wen-pei, ZHANG Bo, et al. Dynamic response of closely-attached intersecting underground subway structures under vertical strong ground motion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 433 - 438. (in Chinese))
- [49] 黄俊, 张波. 地铁交叉结构近场地震反应振动台试验研究[J]. 水电能源科学, 2013, **31**(2): 120 - 122. (HUANG Jun, ZHANG Bo. Shaking table model test of subway cross-structure under near field ground motion[J]. Water Resources and Power, 2013, **31**(2): 120 - 122. (in Chinese))
- [50] 袁蕾, 姜忻良. 地铁换乘站不规则结构对其地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2011, **31**(1): 74 - 79. (YUAN Lei, JIANG Xin-liang. Influence of irregular structure of subway transferstation on its seismic responses[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, **31**(1): 74 - 79. (in Chinese))
- [51] 张宇. T型交叉换乘车站地震反应和损伤分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (ZHANG Yu. The analysis of seismic response and damage of T-shaped transfer station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [52] 潘靖军. 交叉地铁车站结构抗震设计方法对比研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (PAN Jing-jun. Comparative study on seismic design method of crossing subway stationstructure[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [53] 李积栋, 陶连金, 安军海, 等. 大型密贴交叉组合地铁车站地震响应分析[J]. 北京工业大学学报, 2014, **40**(3): 361 - 367. (LI Ji-dong, TAO Lian-jin, AN Jun-hai, et al. Seismic response analysis of large closely-attached intersecting combination of subway station[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, **40**(3): 361 - 367. (in Chinese))
- [54] 李积栋, 陶连金, 安军海, 等. 近远场地震动作用密贴交叉组合地铁车站振动台试验[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(10): 30 - 37. (LI Ji-dong, TAO Lian-jin, AN Jun-hai, et al. Shaking table test of the closely-attached intersecting subway station under far-field and near-field ground motion[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(10): 30 - 37. (in Chinese))
- [55] 李积栋, 陶连金, 安军海, 等. 强震作用下密贴交叉组合地铁车站三维地震动响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, **10**(6): 64 - 68. (LI Ji-dong, TAO Lian-jin, AN Jun-hai, et al. 3D dynamic response analysis of the closely-attached intersecting underground subway under strong earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, **10**(6): 64 - 68. (in Chinese))
- [56] 李积栋, 陶连金, 油新华, 等. 不同净距垂直交叉组合地铁车站结构地震响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 2): 3890 - 389. (LI Ji-dong, TAO Lian-jin, YOU Xin-hua, et al. Study of seismic response of different clear-distance vertical intersecting combination subway station structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S2): 3890 - 3897. (in Chinese))
- [57] 王国波, 袁明智, 苗雨. 结构-土-结构相互作用体系地震响应研究综述[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(5): 837 - 847. (WANG Guo-bo, YUAN Ming-zhi, MIAO Yu. Review of seismic response of structure-soil-structure interaction system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(5): 837 - 847. (in Chinese))
- [58] 禹海涛, 袁勇. 长大隧道地震响应分析与试验方法新进展[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(10): 19 - 35. (YU Hai-tao, YUAN Yong. Review on seismic response analysis and test methods for long and large tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(10): 19 - 35. (in Chinese))