

DOI: 10.11779/CJGE201802002

1995年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展

杜修力, 李 洋, 许成顺, 路德春, 许紫刚, 金 浏

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 1995年日本阪神地震中, 大开、长田、三宫、上泽和新长田等地铁车站以及区间隧道发生了程度不同的震害, 特别是大开地铁车站震害极为严重, 是迄今为止人类历史上首次记录到的几乎完全塌毁的大型地下结构震害事例, 引起了人们对地下结构抗震问题的关注和重视。围绕大开地铁震害事例, 国内外已开展了大量的理论、数值和试验研究工作, 对震害机理和破坏模式等进行了深入、系统的解析, 深化了对地下结构抗震性能的理解, 但由于研究者们各自侧重的角度不同, 资料的掌握和分析模型与方法上的差异, 仍存在一些认识上的歧义, 迄今并未形成一种系统性的共识。本文较为系统地从研究者们所采用的分析方法、分析模型及获得的相应结论等角度, 回顾了围绕大开车站震害事例开展的研究工作, 总结了地震动、场地特性及结构构造因素等对大开车站震害影响的分析成果, 并对进一步深入分析大开车站震害现象以及地下结构抗震应解决的关键问题提出了建议。

关键词: 阪神地震; 大开地铁车站; 震害机理; 破坏模式

中图分类号: TU311 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)02-0223-14

作者简介: 杜修力(1962-), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事地震工程领域的研究。Email: duxili@bjut.edu.cn。

Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake

DU Xiu-li, LI Yang, XU Cheng-shun, LU De-chun, XU Zi-gang, JIN Liu

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: During the 1995 Osaka-Kobe Earthquake, different degrees of damages were observed in Daikai, Nagata, Sannomiya, Kamisawa and Shin-nagata subway station and running tunnels. Among them, the earthquake damages at Daikai subway station were the most serious. It is the first large-scale underground structure that almost collapsed in the earthquake, which has aroused people's concern and attention to the seismic issues of underground structures. A large number of theoretical, numerical and experimental studies about the earthquake damages on Daikai subway station have been carried out. These have enhanced the comprehension of the earthquake damage mechanism and the failure mode of underground structures. However, most researches have not reached a consensus so far regarding the damages of Daikai subway station owing to that their conclusions are based on different analysis aspects, diverse collections of the relevant information and dissimilar analysis methods and models. The researches on earthquake damages at Daikai subway station are reviewed. The effect of seismic motion, site conditions and structural characteristics on the earthquake damages of Daikai subway station are summarized. Furthermore, further studies on the in-depth analysis of earthquake damages at Daikai subway station and the key seismic issues of the underground structures are proposed.

Key words: Osaka-Kobe Earthquake; Daikai subway station; earthquake damage mechanism; failure mode

0 引言

地下结构抗震问题在很长一段时间里并没有引起人们的足够重视, 这源于地下结构建设规模相对较少, 且发展时间较短, 地下结构经历强地震的考验也并不

多见^[1]。一般认为, 地下结构位于地震加速度相对较

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301)

收稿日期: 2016-04-06

小的地表下面，且受到周围土体的约束，由于场地运动产生的地下结构的自身惯性力影响并不大，它们的抗震安全性能应远高于地上结构。因此，相当一段时期内，针对地下结构的抗震分析理论与设计方法研究工作受到的重视不够，导致其研究进展较为缓慢^[2]。近些年来，发生在世界范围内的多次强地震对地下结构造成了严重破坏，其中包括 1995 年日本神户大地震，1999 年台湾集集地震，1999 年土耳其科贾埃里地震以及 2008 年中国汶川地震等。与其它地震中震害主要以管线、岩体隧道结构（主要是断层和节理裂隙错动以及洞口边坡局部失稳所致）遭到破坏不同的是，在日本神户大地震中，土体中的地铁区间隧道及地铁车站遭受了严重的破坏，甚至出现大开地铁车站完全塌毁的情况，这是世界上首次观察到的由于地震作用完全塌毁的大型地下结构，从而引起了世界范围内地震工程专家和工程师们对地下结构抗震问题的关注。对大开地铁车站震害机理、失效破坏模式的深入系统解析，既可以为完善地下结构抗震分析方法和设计理论提供指导，也是对现有地下结构地震损伤破坏过程分析理论与方法的最有说服力的验证手段，对揭示地下结构地震破坏机理和失效破坏模式以及发展地下结构抗震设计理论与方法意义重大。由于震害发生于日本，研究工作也自然以日本学者居多，且研究工作更为系统、全面、深入。由于中国正处于城市地铁发展的高峰期，且多数城市位于强震区，故地下结构的抗震安全也成为了国家近期面临的重大工程建设关键科技需求之一。

本文对阪神地震中大开地铁车站震害原因及破坏机理相关研究成果进行了系统的总结分析，以便为今后的研究工作提供参考。

1 阪神地震中地铁车站及区间隧道震害

1995 年 1 月 17 日，日本西南部神户—大阪地区发生里氏 7.2 级地震，震中位于神户市南部的淡路岛（六甲断层带）上，震源深度约为 14 km。本次地震为日本近五十年来发生的最为强烈的地震之一，造成当地 6000 多人死亡，35000 多人受伤，约 30 万人无家可归以及 15 万多建筑发生严重损坏或倒塌，造成的直接经济损失约 1400 亿美元^[3-4]。阪神地震造成当地大量的房屋、桥梁、铁路隧道及高速公路发生严重破坏，地下结构也同样遭到了严重破坏。特别是，大开地铁车站发生了几乎完全的塌毁破坏，成为世界地震史上大型地下结构在地震中遭受塌毁破坏的首例。

在神户市内 5 条地铁线路的 21 座车站中，神户高速铁道大开站、长田站及它们之间的隧道部分，神户

市营铁道的三宫站、上泽站、新长田站、上泽站西侧的隧道部分及新长田站东侧的隧道部分均发生不同程度的破坏，其中破坏最为严重的是大开车站^[5]。神户市地铁车站及隧道震害情况如图 1 所示。

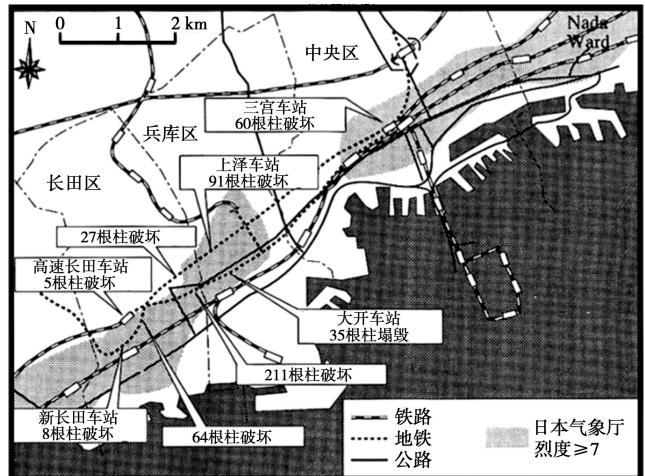
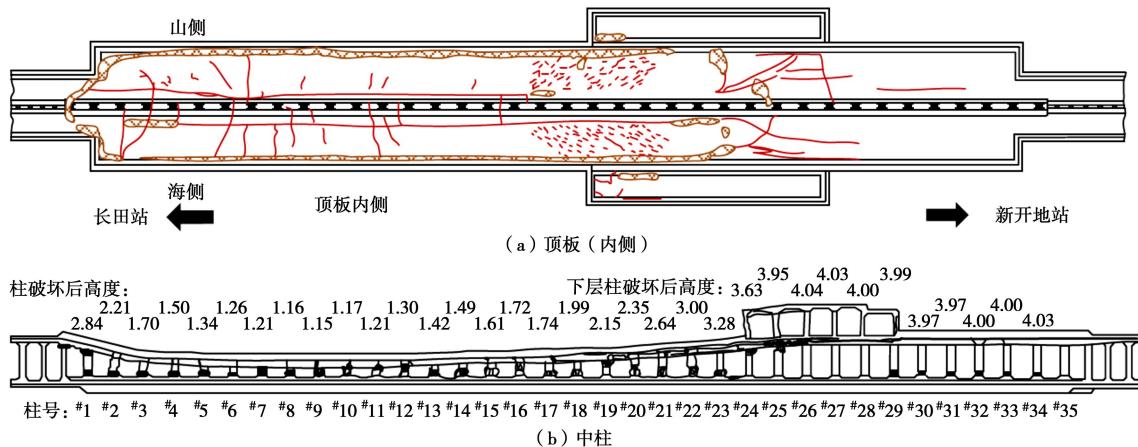


图 1 神户地区车站及隧道破坏情况^[5]

Fig. 1 Damages of stations and running tunnels in Kobe area^[5]

大开车站采用明挖法建造（1962—1964 年），距震中约 15 km，地震时车站中央部分 120 m 长线路上 30 多根柱子完全毁坏，直接导致了混凝土屋面板破坏，使得地铁上方运行的 28 国道发生坍陷，最大沉降量达 2.5 m。大开地铁车站原有设计未考虑地震因素，但设计非常保守且整体结构安全系数很高。其周围无液化土层，也没处于断层区域，但遭到如此严重的地震破坏，出乎人们的意料。

根据图 2 所示，大开车站沿线方向可分为 A、B、C 三个区域：A 区域（柱号#1~#23）为长田站一侧的一层两跨标准结构，断面尺寸为宽 17 m，高 7.17 m，这一区域震害最为严重。在 A 区域的大部分中柱几乎全被压坏，中柱有两种破坏形式，一种是柱子被单向压弯，如图 3（b）所示，另一种是柱子钢筋左右大致对称状压曲，形状像被压碎的灯笼，如图 3（a）所示。这个区域的顶板发生扭卷并向下塌陷，整体断面形状呈“M”形破坏形态，顶板中线两侧 2 m 内的纵向裂缝宽度达 150~250 mm。顶板出现的横向裂缝大致沿纵向相等距离分布，大多出现在中柱的边缘，裂缝宽度达 70 mm。侧墙上部腋下部的混凝土发生脱落，内侧的主筋发生失稳，外侧产生了最大宽度 200 mm 的裂缝，左右两侧侧墙上部均向内部发生了一定倾斜；B 区域（柱号#24~#29）为二层四跨构造，断面尺寸为宽 26 m，高 10.12 m，在划分的 3 个区域中这一区域破坏程度最轻，如图 3（d）、（e）所示。在地下二层的 6 根中柱中，其中 3 根只受到轻微损伤，而仅靠近 A 区域的 2 根和靠近 C 区域的 1 根被损坏，破坏位置

图2 大开地铁车站破坏情况纵向示意图^[5]Fig. 2 Damage conditions of Daikai subway station in longitudinal direction^[5]图3 不同位置处车站中柱破坏示意图^[5-6]Fig. 3 Sketch of damages to center columns of Daikai subway station at different locations^[5-6]

位于柱顶, 呈压碎鼓涨状, 受A区的破坏的影响, 地下一层的下楼板倾斜并发生了沉降。地下二层的沿线路垂直方向的墙壁上均出现“X”状裂缝, 由沿线路垂直方向较大的水平地震力作用所致, 如图3(e)所示; C区域(柱号#30~#35)的结构形式与A区域相似, 同样为一层两跨结构, 但破坏程度轻于A区域, 如图3(c)所示。在C区域, 中柱下部发生剪切破坏, 混凝土剥落, 轴向钢筋被压曲外露, 使上顶板下沉5 cm左右^[5]。

2 地下结构地震破坏分析方法

目前, 研究地下结构抗震性能的主要途径有原型观测、模型试验和理论分析。原型观测主要包括震害调查和原位试验, 但由于迄今为止地下结构发生的且被记录到的震害事例较少, 目前通过这种途径认识地下结构地震破坏原因、机理和模式的成果绝大多数源于对大开地铁震害事例的研究, 模型试验与理论分析仍然是目前研究地下结构地震反应规律和破坏原因、机理与失效模式的主要途径。对于理论分析这一途径而

言, 可分为解析方法、数值方法和实用分析方法。解析方法适用范围十分有限, 一般限定在线性反应范围内, 多应用于研究其地震反应特征和规律并作为数值分析方法的验证手段, 故在此不作讨论。实用分析方法理论上是基于对地下结构震害特征和地震反应规律的认识, 提出的一类工程设计分析方法, 理论上它们应该能大体回答地下结构的抗震安全性问题, 但限于目前的震害资料积累、分析手段和认识水平, 其合理、可靠性仍受质疑。笔者认为其主要问题所在是目前的地下结构抗震分析理论仍然没有摆脱地上结构抗震分析理论的框架(虽然已认识到了地下结构的地震破坏主要是受制于地层的水平变形影响, 并在一定程度上考虑了土-结相互作用的效应), 结构体系的抗震能力主要体现在其抗侧力体系方面。数值分析方法理论上可完整考虑地下结构、临近岩土介质以及土-结界面接触的损伤破坏非线性力学行为过程和土-结动力相互作用、无限域地基辐射能量效应影响等, 迄今而言仍是用于研究地下结构地震反应规律和破坏原因、机理与失效模式的主要理论分析途径。有关物理模型试验方面的研究, 大型振动台受限于重力相似问题, 离心振动台结构缩尺比太大, 这两种手段目前还仅能做地下结构地震反应规律和破坏原因、机理与失效模式定性规律的研究, 另外一个重要作用就是对相同数值分析模型条件的验证。

2.1 实用分析方法^[7]

地下结构抗震分析方法是随着对地下结构动力响应特性认识的不断发展, 以及近年来历次地震中地下结构震害的调查、分析总结以及相关研究的不断深化而发展的。地下结构实用抗震分析方法可分为两大类: ①不考虑土-结相互作用的分析方法, 早期发展的分析方法多为此类, 如借鉴地面结构的抗震分析方法, 针对地下结构抗震问题提出的地震系数法, 以及基于地下结构在地震动作用主要受周围土层变形影响为主这一认识提出的自由场变形法, 以上两种方法均忽略了地震荷载作用下土与结构之间的相互作用, 因此在计算结果上存在一定误差; ②考虑土-结相互作用的分析方法, 由于此类分析方法能够更合理反映地下结构地震反应特点, 也成为了目前地下结构抗震设计与分析工作主要所采用的方法, 如基于由自由场变形法发展形成的柔度系数法, 基于地下结构在地震作用下跟随周围土层一起运动, 其位移、速度和加速度等结构反应均与周围土层基本一致这一特点所提出的反应位移法以及反应加速度法。

上述实用分析方法只适用于研究土层为线弹性时的地下结构地震反应, 不能够准确模拟临近岩土介质真实变形对地下结构地震反应的影响, 尤其难以评价

地下结构在破坏性强地震作用下的抗震性能。因此, 刘晶波等^[8-9]提出了地下结构 Pushover 分析方法, 这种拟静力分析方法可以考虑强震作用下土体与结构的非线性, 从而实现罕遇地震作用下地下结构的弹塑性分析, 预测地下结构构件弹性—开裂—屈服—弹塑性—承载力下降的全过程, 判断塑性铰出现的顺序和分布以及结构的抗震薄弱环节等, 并最终获得地下结构完整的能力曲线。地下结构 Pushover 分析方法可以考虑土体及结构的非线性特性, 能够揭示强地震作用下地下结构的失效破坏过程, 有益于检验结构中的抗震薄弱环节, 是今后地下结构实用抗震分析方法的重要发展方向之一, 但该方法仍存在没有坚实的对地下结构破坏机理和失效模式合理解释的成果支撑问题, 仿照了地上结构的 Pushover 分析方法思路。

笔者认为目前实用分析方法存在的共同问题是: 坚向地震和上覆土体惯性力对地下结构地震破坏的影响没有得到足够的重视, 特别是浅埋地下结构情况, 它们可能是改变地下结构抗震关键薄弱构件变形能力的主要因素, 这不同于地上结构地震整体倒塌模式对应的破坏机理, 而类似于爆炸作用下结构因局部破坏产生连续倒塌模式的破坏机理。

2.2 考虑土-结相互作用的数值分析方法^[10-11]

对于考虑土-结构相互作用的数值分析方法而言, 目前国内外已提出多种分析方法, 主要可分为子结构法和整体分析法两大类。

子结构法将广义结构(理论上是结构和其邻近的非均匀、非线性以及不规则形状的岩土介质的总称)和地基作为不同的区域分别进行离散和分析, 然后根据二者接触面上的力和位移连续条件加以综合。子结构法包括时域子结构法、频域子结构法、频-时域混合法和时-频域混合法。频域子结构法不仅无限地基部分进行频域分析, 结构子部分也在频域进行, 通常需满足线性系统的假定, 故难以考虑到材料、接触非线性效应等近场域的复杂情况, 并且远场地基阻抗力的求解也较为复杂, 通常采用的是全局耦联的边界条件。时域子结构法能较好地考虑广义结构的非线性反应和无限域地基能量辐射效应以及土-结动力相互作用效应的影响, 相比整体分析法, 时域子结构法具有可充分利用现有研究成果的优势, 如自由场解析解及规则基础的一些阻抗函数解析解无需重复计算。其不足之处在于阻抗力的时域解耦处理通常需要巨大的计算成本, 另外无限域效应的时域卷积分问题也较难处理, 通常仅适用于规则域问题并采用近似的处理方法。

整体分析法是指将广义结构和地基组成的系统直接进行分析的方法, 也称直接法。整体分析法可以较为完整、准确地考虑广义结构内的非均匀、非线性材

料特性、不规则地形特点以及界面间的接触非线性等因素。整体分析法通常采用数值法或半解析数值法求解, 常用的数值法或半解析数值法有有限元法、边界元法、无限元法及混合法等, 其中有限元法以其灵活方便地分析不规则场地模型、复杂边界条件以及材料、接触非线性等问题的特点得到了广泛的应用。整体有限元方法须在模型截断边界处引入人工边界条件, 常用的人工边界有透射边界、黏性边界、一致边界、旁轴边界及黏弹性边界等。整体分析法的优点十分突出, 但其也存在计算成本高的不足, 然而对于求解大型复杂的近场非线性波动问题, 尤其针对场地、结构等在地震作用下发生失效破坏的强非线性问题, 整体有限元分析法是有效的分析手段。

2.3 物理模型试验^[12]

迄今地下结构抗震性能的破坏性试验数据极为有限, 借助于物理模型试验研究, 可以弥补这方面经验数据缺失的不足。模型试验是认识地下结构震害机理的重要手段之一, 其不仅可以揭示人们现场不易观察到的地下结构破坏形态, 且可为数值模拟方法及其可靠性提供验证。物理模型试验可分为普通振动台试验和离心机振动台试验。

普通振动台模型试验是在 $1g$ 的重力加速度环境下进行的, 在普通振动台试验中如果进行缩尺模型试验, 土工结构缩小 N 倍的条件下土体自重产生的应力水平也缩小 N 倍。因此, 在正常重力条件下, 模型的应力水平尤其是自重应力水平与原型有极大的差距。由于土体剪切模量、强度等参数与围压关系显著, 普通振动台试验中地应力的不足将使模型土体的动力反应与真实结果存在较大差异, 土与结构难以同时满足模型与原型间的相似性条件。虽如此, 但通过对试验方案进行合理设计, 借助普通振动台模型试验仍可实现定性分析, 能够得到一些规律性认识。另外, 国内外普通振动台设备数量相对较多, 这为普通振动台试验的开展创造了有利的条件, 国内外学者也已开展了大量的普通振动台试验并积累了较为丰富的经验。

离心机振动台模型试验可以弥补普通振动台模型试验在重力相似比上的不足, 离心机振动台试验中模型加速度场为 Ng , 这样在 Ng 加速度场中模型任意一点的应力状态与原型中对应点的应力状态相同, 可以认为在岩土工程中原型与模型中的位移反应、破坏机制等应为一致。已有研究工作表明, 离心机振动台试验对于再现地下结构动力反应、检验抗震设计方法、研究地震破坏机理以及验证数值模型等方面能够取得良好效果。因此, 对于今后深入探讨地下结构地震破坏机理问题, 离心机振动台试验也是有力的分析手段之一。但它仍存在几何缩尺过大和科里奥利效应, 难

以实现复杂构造及还原结构自身的非线性力学行为特性、边界效应突出等问题。

3 大开地铁车站震害分析

作为目前世界上仅有的一例遭受严重震害的大型地下结构, 大开地铁车站震害现象受到学术界以及工程界的高度关注。自 1995 年阪神地震发生后, 日本方面针对大开地铁车站遭受破坏这一灾害教训进行了深刻的反思与总结, 灾后积极开展震害调查工作, 并进行了大量理论及试验分析研究, 深入探讨其破坏原因, 得到了许多新认识并指导了大开车站灾后的修复工作^[6]。由于中国地处环太平洋和欧亚地震带之间, 多数城市和重大工程建设区地震活动性非常频繁, 地下结构同样存在遭受地震破坏的风险及可能性, 故中国许多学者在阪神地震发生后也对大开地铁车站受灾事件进行了积极的思考与研究^[13-16]。

3.1 大开车站结构、临近场地及输入地震动基本情况介绍^[5-6]

(1) 大开车站结构断面构造

大开地铁车站震害相关研究工作大多取车站破坏最为严重的 A 区域结构断面进行分析, 且常取震害轻微的相邻区间隧道断面进行比较。A 区域断面为矩形框架形式, 宽为 17 m, 高为 7.17 m, 上覆土厚为 4.8 m。顶板厚度为 0.8 m, 底板厚度为 0.85 m, 顶板及底板配筋率均为 1.0%, 左右两侧墙厚均为 0.7 m, 配筋率为 0.8%。中柱高为 3.82 m, 截面尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 配筋率为 6.0%, 中柱在隧道沿线方向的间距为 3.5 m。柱上部梁深为 1.6 m, 底部梁深为 1.75 m。与 A 区域相邻的区间隧道断面同样为矩形框架形式, 宽为 9 m, 高为 6.36 m, 上覆土厚为 5.2 m。顶板及侧墙厚度均为 0.4 m, 底板厚度为 0.44 m, 配筋率均为 1.1%。中柱高为 4.12 m, 截面尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 配筋率为 5.6%, 中柱在隧道沿线方向的间距为 2.5 m。车站 A 区域及相邻区间隧道断面尺寸与中柱配筋如图 4, 5 所示。

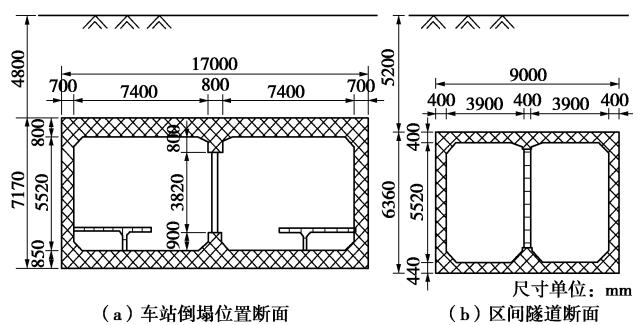


图 4 车站及隧道横断面示意图

Fig. 4 Cross section of station and running tunnel

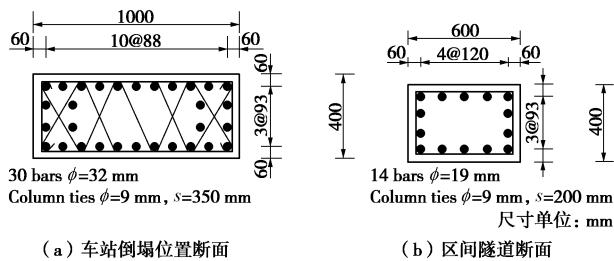


图 5 中柱配筋图

Fig. 5 Reinforcement of central columns

据日本方面资料, 中柱所用混凝土设计强度为 23520 kN/m^2 , 结构其他部分混凝土设计强度为 20580 kN/m^2 , 钢筋的设计屈服强度为 31.20 kN/cm^2 。震后在中柱位置处开展了混凝土现场材料试验以检验混凝土的强度, 锤击试验测得混凝土强度为 37240 kN/m^2 , 圆柱体压缩试验测得混凝土强度为 39690 kN/m^2 。

(2) 周边土层特性

阪神地震后, 日本铁道综合技术研究所于大开站的高速长田站侧 (No.B-1), 新开地车站侧 (No.B-2), 以及两者之间 (No.B-3) 的 3 个位置进行了土层纵断面构造的勘察测量, 再加上 No.D-1 处实施的弹性波探查, 观测点位置如图 6 所示, 基于这些勘察结果, 得到了图 7 所示的土层纵断面构造。关于大开车站的地下水位情况, 地震后的勘察结果为水位 GL-6~8 m, 较地震前周边水位的勘察结果 GL-3~4 m 降低了很多。

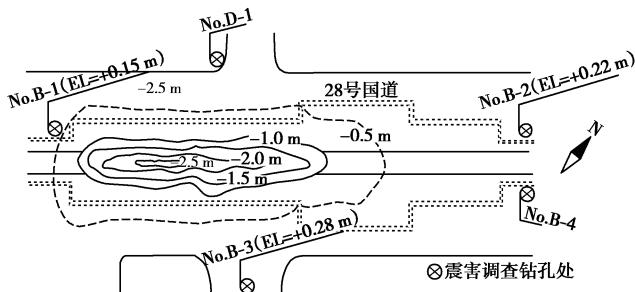


图 6 场地勘察钻孔位置示意图

Fig. 6 Sketch of positions of drilling holes

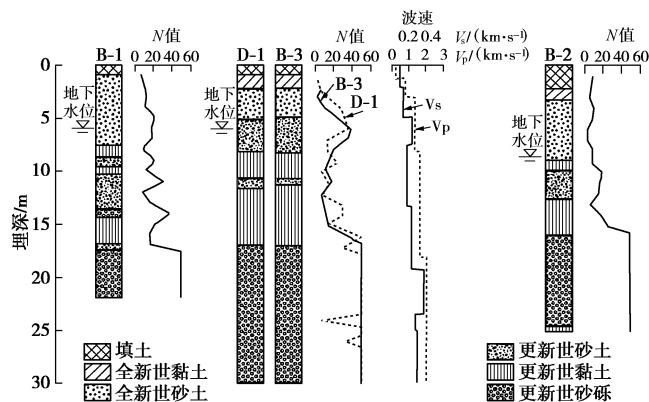


图 7 大开车站沿线土层纵断面构造

Fig. 7 Site conditions of Daikai subway station

目前, 大开车站地震反应分析工作主要采用以下两组场地参数进行数值计算, 如表 1, 2 所示。两组场地参数土层分布基本一致, 仅基岩深度选取存在差异, 可根据所采用的地震动输入模型选取合适的计算基岩面位置。两组场地参数的泊松比取值差别较大: 表 1 中土层 2~7 泊松比值大多接近 0.5, 采取了动力计算中土体不考虑孔隙水排出的取值方式; 表 2 泊松比值更符合通常土体力学特性试验结果。日本学者多采用表 1 土层参数, 而中国学者大多采用表 2 土层参数。

表 1 大开车站所在位置土层物理性质^[6, 17]Table 1 Material properties of soil layers around Daikai subway station^[6, 17]

土层	深度/m	密度/(g·cm ⁻³)	剪切波速/(m·s ⁻¹)	泊松比
1	0~1.0	1.9	140	0.333
2	1.0~5.1	1.9	140	0.488
3	5.1~8.3	1.9	170	0.493
4	8.3~11.4	1.9	190	0.494
5	11.4~17.2	1.9	240	0.490
6	17.2~39.2	2.0	330	0.487
7	>39.2	2.1	500	0.470

表 2 大开车站所在位置土层物理性质^[18]Table 2 Material properties of soil layers around Daikai subway station^[18]

土质	深度 /m	密度 /(g·cm ⁻³)	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	泊松比
人工填土	0~1.0	1.9	140	0.33
全新世砂土	1.0~5.1	1.9	140	0.32
全新世砂土	5.1~8.3	1.9	170	0.32
更新世黏土	8.3~11.4	1.9	190	0.40
更新世黏土	11.4~17.2	1.9	240	0.30
更新世砂土	17.2~22.2	2.0	330	0.26
基岩	>22.2	—	—	—

(3) 地震动记录

阪神地震中, 观测得到多达 200 条地震动记录, 但在大开车站所在处并没有得到观测记录, 故进行震害分析时通常选取其附近观测站点的地震动记录作为地震动输入。研究工作大多选取神户大学、神户海洋气象台以及神户人工岛 3 处地震动观测记录作为地震动输入记录, 其中神户大学观测点位于大开车站东北东约 10 km 的花岗岩上, 神户海洋气象台观测点位于北东约 3.5 km 的台地上, 神户人工岛观测点位于东侧约 4 km, 于土层深部达 83 m 位置的洪积沙砾层处, 观测点位置及地震动时程如图 8 所示, 地震动加速度峰值见表 3。

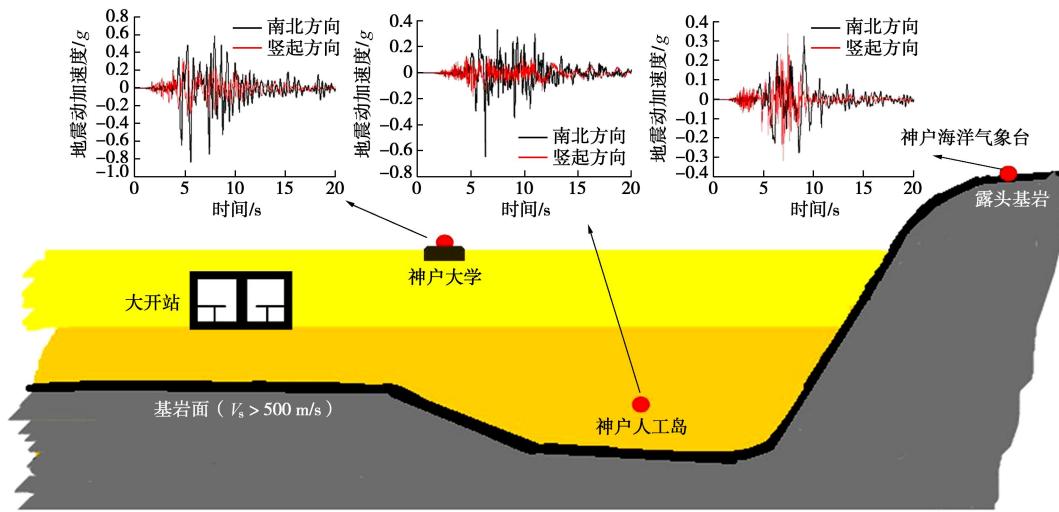


图8 大开站附近获取的阪神地震动记录

Fig. 8 Seismic ground motion records around Daikai subway station

表3 地震动峰值加速度

Table 3 Peak accelerations

变量	神户海洋气象台	神户人工岛 -83 m	神户大学
南北向加速度峰值/g	0.834	0.643	0.328
竖向加速度峰值/g	0.339	0.183	0.346

由于神户大学地震动记录于地表硬基岩处 ($V_{s30}=1043 \text{ m/s}$) 获得, 受到局部土层特性影响较小, 更客观地反映了基岩的地震运动, 相比而言较适合作为输入地震动。而神户海洋气象台记录于土层的地表处 ($V_{s30}=312 \text{ m/s}$), 神户人工岛虽然记录在土层深处, 但其仍然位于较软的土层 ($V_s=320 \text{ m/s}$), 两者均受到所在位置处土层的影响, 若选取其作为输入地震动, 应按照所在位置处土层情况进行地震动反演分析, 获取基岩处的反演记录才能够作为合理的输入地震动记录, 这一工作应该是今后的一个研究目标。

3.2 大开地铁车站震害研究工作分析方法汇总

针对大开地铁车站震害问题, 国内外学者开展了众多震害调查、模型试验以及数值分析研究工作。本文尽可能全面统计了已开展研究工作, 如表4所示, 数值分析为目前进行成灾机理及破坏原因分析的主要研究手段, 列表介绍了数值分析研究工作各自所采用的地震动记录及分析模型。

进行大开地铁车站地震反应分析时, 必须重视对地震动记录及输入方式、人工边界条件、材料及接触面本构模型等的正确使用, 这对于能否得到真实合理的震害过程与成灾机理具有关键影响作用。目前研究工作有待完善方面有: ①应用能够反映土体及钢筋混凝土结构材料软化及破坏的非线性本构模型; ②实

测地震动记录调整或反演得到合理的基岩地震动输入记录; ③场地分析模型基岩面深度、弹性/刚性的合理确定; ④土体截断边界处设置能正确描述自由场地震应力-变形和能量逸散效应的边界条件, 以及考虑近场土体非线性后近场域-远场域力-位移协调一致的边界条件。如表4所示, 大开地铁车站数值分析研究工作采用的分析手段主要有整体动力分析并结合拟静力二次推覆分析。上面的分析模型与方法中, 除杜修力等^[36-37]外, 其它工作中的岩土体材料都是采用的线性或没有考虑强度软化特性的非线性本构模型, 不能反映土体的局部破坏特征。An等^[24]、Huo等^[4, 25-26]、曹炳政等^[18]、刘如山等^[29-30]、庄海洋等^[27-28]的计算模型也存在侧边界没有考虑土层自由场应力、变形影响的问题, 这可能带来大的误差。Iwatate等^[19]、车爱兰等^[20]、王刚等^[35]等虽然未考虑侧边界土层自由场应力、变形影响, 但所施加的侧向滚轴边界可以在计算模型尺寸取得合适时较好反映土层自由场剪切变形特征。上述工作中还毅等^[34]、杜修力等^[36-37]采用了三维分析模型, 但实际上还毅等^[34]的三维模型在出平面方向仅取了3.5 m进行计算, 出平面方向不正确的边界处理将对中柱段反应带来很大的误差。

3.3 破坏机理分析

基于不同的分析方法、分析模型及分析条件, 国内外研究工作从各自角度分析了大开地铁车站的成灾机理。

Iida等^[5]通过现场震害调查推测, 大开车站受强烈的水平地震动作用, 中柱端部附近由于弯剪作用达到了极限强度, 中柱受损后致使框架结构侧向承载能力降低, 进而产生过大的水平相对位移, 此时附加弯矩作用 ($P-\Delta$ 效应) 使中柱的水平、竖向承载能力急剧降低最终完全破坏, 这一破坏模式实际上是一种

表 4 震害研究方法汇总表

Table 4 Analysis methods of seismic damages at Daikai subway station

研究者	研究方法	数值分析			
		输入地震动记录	场地土材料本构/ 动力分析模型边界	钢筋混凝土结构	维度
Iida 等 ^[5]	震害调查	—	—	—	—
Iwatate 等 ^[19]	振动台模型试验 模型试验动力计算	神户海洋气象台 (仅水平向)	线性土体/ 底部刚性、侧向滚轴边界	线弹性/梁单元	二维
车爱兰等 ^[20]	振动台模型试验 整体动力分析	神户海洋气象台 (仅水平向)	线性、Davidenkov 模型/ 底部刚性、侧向滚轴边界	线弹性/梁单元	二维
川西智浩等 ^[21]	推覆模型试验	—	—	—	—
矢的照夫等 ^[17]	整体动力分析 拟静力二次推覆分析	神户大学 (水平+竖向)	等效线性化方法 /底部黏性边界、侧向能量传递边界	刚性梁单元+弹性梁单元 (整体分析) 刚性梁单元+弹性梁单元 +刚塑性弹簧 (推覆分析) 刚性梁单元+弹性梁单元 (整体分析)	二维
中村晋 ^[22]	整体动力分析 拟静力二次推覆分析	神户人工岛-83 m (水平+竖向)	等效线性化方法 /底部黏性边界、侧向能量传递边界	刚性梁单元+弹性梁单元 +刚塑性弹簧 (推覆分析)	二维
Uenishi 等 ^[23]	频率分析	—	线弹性	线弹性	一维
An 等 ^[24]	整体动力分析 拟静力二次推覆分析	神户海洋气象台(水 平+竖向) 神户 Higashi 桥(水平+竖向) 尼崎市(水平+ 竖向)	弹塑性本构模型/ 底部刚性、侧向组合人工边界	混凝土弥散、分离模型/ 实体单元	二维
Huo 等 ^[4, 25-26]	整体动力分析 拟静力二次推覆分析	神户人工岛-83 m (水平+竖向)	修正曼辛曲线本构模型/ 底部刚性、侧向自由边界	线弹性 (整体分析) 弹塑性 (推覆分析) / 实体单元	二维
曹炳政等 ^[18]	整体动力分析	神户海洋气象台 (水平+竖向)	等效线性化方法/ 底部刚性、侧向透射边界	线弹性/梁单元	二维
庄海洋等 ^[27-28]	整体动力分析	神户海洋气象台 (水平+竖向)	基于 Davidenkov 骨架曲线 的黏弹性本构模型/ 底部刚性、侧向自由边界	混凝土动力损伤塑性模型/ 梁单元	二维
刘如山等 ^[29-30]	整体动力分析	神户人工岛-83 m (水平+竖向)	等效线性化方法/ 底部刚性、侧向自由边界	钢筋混凝土纤维模型/ 梁单元	二维
刘祥庆 ^[31]	拟静力推覆分析	—	弹塑性模型/底部刚性、侧向 附加自由场模型	钢筋混凝土纤维模型/ 梁单元	二维
孙超 ^[32]	整体动力分析	神户海洋气象台 (水平+竖向)	莫尔-库仑模型/ 边界未介绍	混凝土结构损伤模型/实体 单元	二维
卢志杰等 ^[33]	整体动力分析	神户地区记录 (仅水平向)	考虑剪切模量退化的莫尔- 库仑模型/底部刚性、侧向自 由场边界	分段非线性模型/ 梁单元	二维
还毅等 ^[34]	整体动力分析	神户海洋气象台 (水平+竖向)	扩展 Drucker-Prager 模型/ 底部、侧向均黏弹性边界	混凝土损伤塑性模型/ 实体单元	三维
王刚等 ^[35]	整体动力分析	神户人工岛-83 m (仅水平向)	饱和砂土循环本构模型/底 部刚性、侧向滚轴边界	线弹性/实体单元	二维
杜修力等 ^[36]	整体动力分析	神户海洋气象台 (水平+竖向)	统一硬化本构模型/ 底部、侧向均黏弹性边界	混凝土损伤塑性模型/ 实体单元	三维
杜修力等 ^[37]	整体动力分析	神户海洋气象台 (水平+竖向)	三维弹塑性本构模型/ 底部、侧向均黏弹性边界	混凝土损伤塑性模型/ 实体单元	三维

地下结构水平抗剪能力不足的解释。Iwatate 等^[19]基于振动台模型试验和考虑土体和结构材料为线弹性的整体动力数值计算认为, 强大的水平地震动由周围土层作用于车站结构上使其发生剪切变形, 中柱产生的应变是侧墙的 5 倍 (笔者认为其原因是将中柱等效化为墙体后刚度显著弱化所致, 这可能极大地高估了中柱的实际变形), 中柱由于抗剪承载能力不足而发生破

坏, 并导致上顶板的坍塌。矢的照夫等^[17]通过二次拟静力推覆分析认为, 首先强大的水平荷载使中柱的抗剪能力达到屈服并逐渐产生破坏, 中柱的竖向承载能力也随之消失并在持续加荷下发生整体的压弯破坏, 侧墙的上端及上顶板在中柱发生压弯破坏后发生了受弯屈服, 大开地铁车站最终倒塌是由于中柱的弯曲剪切破坏所致。上述研究者的工作成果都强调了地层水

平变形对地下结构产生的剪切破坏影响, 认为中柱的抗剪能力不足是大开地铁结构破坏的主因。An 等^[24]通过数值计算分析认为, 坚向地震动对大开车站的破坏起到了不可忽视的作用, 大开车站结构地震破坏是由于中柱抗剪能力和变形能力不足导致, 坚向地震动产生的中柱坚向承载变化改变了中柱抗剪能力和变形能力, 但他们仍然强调地层水平变形对地下结构产生的剪切破坏是主要的, 坚向地震作用加大了其破坏程度, 因此, 中柱的破坏仍然是剪切破坏, 并建议了提高中柱抗剪和变形能力的方法。Huo 等^[4, 26]比较分析了破坏区间及未破坏的邻近区间, 结果表明: 大开车站破坏区间较未破坏邻近区间土-结构相对刚度比偏小, 前者计算得到的中柱由地震引起的侧向位移为 4 cm, 而后者仅为 3 cm。前者由于箍筋的缺乏及跨度大而导致较高的轴向荷载, 在剪切作用下发生了脆性破坏; 而后者由于横断面宽度较窄, 且中柱配有较适度的箍筋, 故中柱有足够的延性抵抗地震引起的侧向位移并且承担的轴力也较小而免于破坏。庄海洋等^[27]认为, 在地震动作用下, 车站结构顶板与侧墙的交叉部位和中柱的顶底端首先发生弯曲破坏而形成塑性铰, 使得顶板上覆土的大部分重量传递到中柱进行承担, 在由顶板破坏后传来的上覆土重力和地震动在中柱中引起的压应力的共同作用下, 中柱最终发生压曲和弯曲的双重破坏, 最终导致中柱倒塌, 进而导致车站顶板的坍塌。刘如山等^[29]、邬玉斌^[30]认为, 在地震过程中, 结构经历了多个周期的动力荷载作用, 中柱因其承受过大的轴应力最先发生受压破坏, 同时在受到重复弯矩和剪力的作用过程中受弯矩和剪力较大的上下端最先出现混凝土脱落的现象, 由坚向地震动引起的高频变轴力加速了中柱外围混凝土的破裂并降低了中柱承受压力的能力, 坚向地震动产生的轴力和上覆土层的重力作用使中柱上下端彻底被压碎, 进而导致顶板及上覆土体的塌落, 整个截面断裂并呈“M”形破坏。刘祥庆^[31]认为, 由于采用明挖法施工, 大开车站顶板上覆土层为人工回填土, 在强烈地震动作用下回填土易丧失自身结构性松散堆载于结构之上, 使结构中柱以及顶板的荷载增大。在坚向地震动作用下中柱所承受的轴压力进一步增大, 致使其在过大的轴压力情况下弯矩承载力急剧降低。在同时发生的水平强烈地震作用下, 中柱上下端承受了很大弯矩而形成塑性铰, 在高轴压与大弯矩作用下, 中柱上下端的塑性铰会进一步发展最终导致在这些部位发生压弯破坏而折断。此时顶板中部承受了较大挠度, 使得上覆路面发生较大的沉陷, 进而使结构更接近倒塌。杜修力等^[36]认为, 在强震作用下, 浅埋地下结构的上覆土体首先产生剪切破坏, 进而丧失抗剪能力。此外, 上覆土体

丧失抗剪能力后, 在坚向地震作用下, 其惯性力作用于车站结构上。该惯性力与侧壁土体引起的剪切荷载耦合作用使车站结构的中柱发生压剪破坏, 继而顶板折断, 最后结构发生整体倒塌。

以上研究工作均对大开地铁车站的成灾过程及破坏机理进行了较为深入细致的探讨, 虽然给出的解释并不完全一致, 但总的来说, 大开地铁车站发生倒塌破坏显然是由于中柱的受损破坏所致。笔者近期研究中认识到^[37], 由于大开地铁车站为浅埋地下结构, 土体不是具有自承载能力的连续的整体性介质, 上覆土体实际是堆压在结构的上顶板上的。因此, 在地震作用下, 地下结构除受到水平地震作用引起的土层变形的剪切作用效应外, 同时, 上覆土体的自重和坚向地震作用的惯性力也会施加在地下结构的顶板上, 从而改变结构中的柱子的轴力, 进而改变柱子的轴压比。轴压比的变化会对柱子的变形能力、抗剪强度产生重要影响。相比较而言, 这种轴压比的变化, 中柱会显著大于侧墙, 导致两者间变形能力不协调性的增加。由于高轴压比的柱的变形能力差, 易首先发生突然的脆性破坏失去其承载能力, 进而导致顶板的破坏。事实上, 当轴压比增大时, 其柱的抗剪能力增强和变形能力下降, 中柱抗剪能力的增强将分担侧墙的水平承载, 但由于柱的变形能力下降并低于侧墙时, 这样易发生中柱脆性破坏。当轴压比减小时, 其柱的抗剪能力降低, 但变形能力增强, 中柱抗剪能力的降低将转移其承担的水平荷载给侧墙分担, 通常侧墙的抗剪能力受土体约束和顶、底板支撑作用会有较大的安全裕度, 这样柱就不易产生破坏。因此, 合理的地下结构抗震体系应该是采用后者, 也即在保持柱的足够坚向承载能力基础上提升其水平变形能力或是减小其变形反应是提高地下结构抗震能力的关键。

3.4 影响因素分析

阪神地震中记录到的震害现象表明, 大开地铁车站遭受地震破坏有其特殊性。其破坏原因很可能是由于特定的地震动、场地条件、埋深以及结构形式等多方面因素共同作用所致。其中某个或某一些因素可能并不会致使地下结构受到如此严重破坏, 这也是阪神地震中仅大开地铁车站中的一处区域发生完全倒塌的事实可以证明的。接下来, 对直接或间接导致大开车站发生倒塌影响因素的相关研究成果, 从地震动、局部场地特性以及结构构造三方面作详细归纳。

(1) 地震动

首先, 阪神地震中地面水平运动非常强烈。观测到的 200 多条强震记录中, 位于神户市内的地震动加速度峰值均在 $0.4g \sim 0.84g$ 之间, 尤其以神户市海洋气象台记录得到的水平分量为最大, 高达 $0.84g$ 。此外,

竖向振动分量大也是本次城市直下型地震^[13]的一个重要特征。位于神户人工岛地表处记录到的竖向加速度分量达到 $0.57g$, 为水平分量 $0.34g$ 的 1.6 倍, 远远超过了规范^[38]中所规定简单地取竖向地震动峰值为取水平向地震加速度峰值的 0.65 倍或相等。

关于水平地震动还是竖向地震动对结构破坏起关键作用这一问题, 学者们提出了各自看法。Iida 等^[5]对大开车站震害情况进行了详细调查, 通过分析观测到的破坏现象得出: 结构周围土体对结构作用的强烈的水平力致使顶板与底板之间发生了过大的相对位移, 同时在顶板上部上覆土体的惯性力作用下最终导致破坏, 而并没有证据表明竖向作用力导致结构破坏。Huo^[4]基于非线性有限元分析, 比较了仅水平地震动作用及水平与竖向地震动共同作用下中柱的地震反应, 计算结果显示竖向地震动相比水平地震动对结构的地震反应影响较小。庄海洋^[28]同样基于非线性有限元分析方法, 通过分别施加水平向地震动、竖向地震动以及两者共同施加进行大开车站的地震反应分析, 计算结果表明水平向地震作用引起的结构内力反应远比竖向地震作用下的结构内力反应大得多, 水平向地震作用是造成大开地铁车站破坏的主要因素。An 等^[24]采用非线性动力分析方法得出, 与考虑竖向地震动时的分析结果相比, 在忽略竖向地震动后的分析结果中结构前期的损伤较小, 并未改变后期破坏这一状况, 因此水平地震动是主要原因, 但通过随后对大开地铁车站中柱进行极限承载能力分析, 认为抗剪能力以及抗压能力均影响中柱的动力响应, 由于强烈的竖向地震动将产生较大轴力, 柱子的变形能力将被削减, 故不能被忽视。而中国不少学者认为, 竖向地震动在大开车站倒塌破坏中起关键作用, 如: 陈念英^[39]针对中国自贡地震与日本阪神地震具有的共同特征——震源浅、震中位于市区或附近, 认为造成震中区建筑物破坏的主要因素是竖向地震作用而不是水平地震作用。于翔等^[16]、曹炳政等^[18]也均基于理论分析方法对大开车站进行了分析, 结论是竖向地震力对结构破坏具有显著影响并需要重点考虑。邬玉斌^[30]认为中柱的轴力变化主要是由竖向地震动引起, 弯矩、剪力更多由水平地震动产生。杜修力等^[36-37]通过分别施加水平向地震动、竖向地震动以及两者共同作用的方式分析了对大开车站地震反应的影响, 计算结果表明水平向和竖向地震的单独作用均不能导致大开地铁车站结构出现严重破坏, 大开地铁车站结构的塌毁是由于水平向和竖向地震的共同作用所致。水平向地震作用效应体现为土体水平剪切变形, 竖向地震作用效应体现为结构上覆土体竖向惯性力, 前者对地下结构产生水平推力, 后者将改变地下结构承重构件的轴压比。还有如刘祥

庆^[31]、王瑞民等^[14]也均基于数值计算认为车站倒塌是由于强大的水平及竖向作用力共同作用所致。

另外, 地震动频率也对场地及结构的地震反应有重要作用。Uenishi 等^[23]基于波动分析模型分析了大开车站中柱—上覆土简化模型, 认为破坏原因可能是由于地震动的频率特性使结构上覆土体发生了共振所致。酒井久和等^[40]采用有限元方法分析了卓越频率成分对结构破坏的影响, 认为地下结构的顶板及底板间的相对位移决定了其地震反应, 而地震动的低频成分对相对位移又具有重要影响。

(2) 局部场地特性

国内外震害经验几乎一致表明, 场地条件是引起地震动在地表及其附近局部变化的主要因素。又由于地下结构的地震反应与周围土体的变形有直接关系, 因此场地特性也成为大开车站发生倒塌破坏的因素之一。

值得注意的是, 阪神地震中, 神户市各铁道线路地下车站中, 大开站和上泽站受灾最为严重, 而神户高速铁路的其余车站如新长田站、高速长田站及三宫站受灾较轻。另外阪神电气铁路及神户电气铁道的地铁车站则基本未遭受破坏。中村晋^[22]基于拟静力非线性分析比较了大开车站及高速长田车站的地震反应, 得出两者破坏程度不同的原因是高速长田车站周围土层较大开车站周围土层的硬度更大, 因而发生的水平剪切变形更小, 故未遭受严重破坏, 大开车站周围土层则发生了过大的剪切变形而造成结构破坏。Konagai 等^[41]观测了阪神地震发生后神户市营地下铁路沿线地表震后产生的永久位移, 研究地下结构破坏程度与地表永久位移间的相关性, 观测数据显示结构受灾严重的地区如新长田站及附近、上泽站及附近以及三宫站所在位置处的地表土在震后位移值均达到所测值的峰值, 一定程度证明地下结构的变形是由其周围土的变形所决定。由此可见, 较坚硬场地而言, 软弱场地在地震作用下将产生更大的水平剪切变形并致使地下结构产生大的层间变形, 更易导致结构发生破坏。

在总长约 120 m 的大开地铁车站所分成的 3 个区域中, A 区域破坏最为严重, 结构发生塌毁破坏, 而 B、C 区域及相邻区间隧道则受灾相对较轻。学者们注意到了这些不同所在位置处破坏程度的差异, 从结构上覆土体对结构的影响方面展开分析研究。Iida 等^[5]观测到发生震害严重的区域上覆土体厚度 (4.8 m) 要大于震害较轻区域的厚度 (1.9 m), 震害严重区域顶板所受的惯性力要大于震害较轻区域。Uenishi 等^[23]分析了大开车站及隧道五组不同位置的断面, 研究表明受地震动卓越频率影响, 发生严重破坏的断面上覆土体对其中柱的作用力远大于轻微破坏的断面。Parra 等^[26]分析了两组不同破坏程度的断面, 有限元分析结

果表明, 由于厚度较大的上覆土体在竖向地震动的作用下, 对车站中柱施加过大的轴向压力, 进而导致车站的破坏。孙超^[32]分析了大开车站不同覆盖土层厚度的情况下结构的地震响应, 计算结果表明, 随着覆盖土层厚度的增加, 地下结构侧墙顶底端水平位移差逐渐增加, 当覆盖土层厚度超过地下结构高度后, 上述位移差呈线性增长规律。杜修力等^[36]分析了大开车站不同埋深时结构的破坏情况, 结果表明结构深埋较浅埋破坏程度较轻, 结构存在最不利埋深位置。由以上研究工作可以得出, 造成大开地铁车站相邻区域发生不同程度震害的原因很有可能是由于上覆土体对结构的影响不同所致, 较大的上覆土体竖向惯性力及重力作用于结构顶部, 将使结构产生更为严重的地震破坏。

饱和砂土地基液化会导致建筑物发生失稳破坏, 虽然并未有记录证明大开车站附近存在液化土层, 并且附近地层在地震中没有表现出明显的宏观液化现象, 但也有部分专家认为并不能完全排除其可能性。王刚等^[35]通过建立能够模拟饱和砂土液化后大应变响应的弹塑性循环本构模型, 对大开车站进行了地震反应数值分析, 结果表明车站的破坏很有可能是由于饱和砂土层液化过程导致的集中相对位移所造成的。

(3) 结构构造

震害调查发现, 大开车站倒塌区域邻近的B区域以及区间隧道截面及中柱仅受到轻微损伤, 与大开车站的严重破坏形成鲜明对比, 结构尺寸以及构造的不同, 极有可能是造成这一巨大差异的重要因素。如图4所示, 区间隧道断面的宽度较车站断面小很多, 具有更大的刚度, 刚度越大, 对其周围土的约束能力越强, 反之则越弱, 较软的结构在土中将产生更大的变形。中柱的抗剪构造钢筋配筋的差异也可能造成结构破坏程度的不同, 如图5所示, 破坏区域中柱箍筋间距350 mm, 均不满足中国、日本、美国规范^[42-44]柱端加密区箍筋间距要求, 而区间隧道中柱箍筋间距为200 mm, 满足规范要求且具有更好的抗剪性能。此外, 位于车站尽头以及车站宽度改变位置处布置有横墙, 其在地震中承担了一部分水平作用力, 使B区域位置处的中柱破坏较轻, 进而保持了整体结构的完整性^[1]。

大开地铁车站设计非常保守, 中柱的安全系数达到3。然而在阪神地震中, 大开车站一半以上的中柱完全坍塌, 引发上顶板的坍塌及上覆土体的沉降, 导致结构最终发生倒塌破坏。由于中柱遭受地震破坏将直接导致地下结构整体破坏, 学者对车站中柱进行了抗震构造设计及优化, 以减轻中柱在地震中受到的破坏。An等^[24]通过单独增加中柱的箍筋配筋率和减少主筋配筋率同时增加箍筋配筋率两种方式, 对大开

站中柱进行了极限承载能力分析, 结果表明增加箍筋配筋率(甚至同时适当降低主筋配筋率)能够有效提高中柱的变形能力, 更有利于抗震。三神厚等^[45]研究了在中柱的顶部或底部增加柔性接头, 可有效使中柱承受更大的上覆土体压力及地震动作用的弯距和剪力而不会发生塌毁破坏。竹内幹雄等^[46]在中柱顶端采用了一种滑动支撑的构造措施, 分析表明其可以有效降低中柱在地震动受到的应力。还毅等^[47]将由弹簧阻尼器组成的隔振支座设置在中柱端部, 有限元分析表明其可以大幅减小中柱的变形及损伤破坏程度。Chen等^[48]将一种剪切板阻尼器(SPD)施加在大开车站中柱顶端与顶板的连接处, 通过有限元分析, 施加SPD后的中柱较原设计侧向位移及剪力均被降低在安全的弹性变形范围内而不会发生破坏。由此可知, 中柱对于地下结构在抵抗地震破坏过程中起关键作用, 提高其承载能力及降低损伤破坏的构造措施能够有效增强地下结构抗震性能。

4 总结与展望

大开地铁车站的破坏为研究者们提供了宝贵的实际震害案例, 可视作一次物理原型试验, 对检验地下结构地震损伤破坏过程模拟方法、揭示地下结构地震破坏原因、机理和失效模式意义重大, 也是建立科学、合理的地下结构抗震设计理论与方法不可多得的基础资料。综合国内外的研究成果, 可以看到, 大开地铁车站地震塌毁的内在主要原因是中柱抗震性能差导致的。但地震作用的外在因素影响, 各方的认识并不完全相同, 多数解释是认为地震产生的土层水平变形施加到地下结构上的剪切作用是主因, 也有部分研究者认为竖向地震作用是主因。还有专家认为虽然地震产生的土层水平变形施加到地下结构上的剪切作用是主因, 但竖向地震作用使得其中柱抗剪能力和变形能力综合变差, 竖向地震作用增大了地下结构的破坏程度。但笔者等人认为, 由于大开地铁车站为浅埋地下结构, 土体不是具有自承载能力的连续的整体性介质, 地下结构除受到水平地震作用引起的土层变形的剪切作用效应外, 同时, 上覆土体的自重和竖向地震作用的惯性力也会施加在地下结构的顶板上, 从而改变结构中的柱子的轴力, 进而改变柱子的轴压比。轴压比的变化会对柱子的变形能力、抗剪强度等抗震性能产生重要影响。相比较而言, 这种轴压比的变化, 中柱会显著大于侧墙, 导致两者间变形能力不协调性增加。高轴压比柱虽分担了侧墙的水平荷载, 但较差的变形能力使得其首先发生突然的脆性破坏失去其承载能力, 进而导致顶板的破坏。也就是说, 与地上结构抗震主要是抵抗水平惯性力不同, 土层水平剪力和上覆土体

惯性力的共同作用是导致浅埋地下结构竖向承力构件因变形能力不足而破坏的主要原因。

笔者认为今后应在如下 6 个方面开展更深入的研究工作:①完善地下结构-岩土体地震损伤破坏过程模拟的三维数值分析模型和方法,重点在能合理反映土体损伤破坏过程的弹塑性动力本构模型和地下结构关键构件损伤破坏过程模拟模型方面;②合理确定大开地铁车站震害分析的地震动输入,并基于地下结构-岩土体地震损伤破坏过程模拟的三维数值分析模型和方法,分析各种影响因素对大开地铁车站震害的影响,重点揭示竖向地震动对浅埋地下结构地震破坏的作用效应;③分析地下结构组成构件的强度和变形能力与体系抗震能力的关系,从岩土-结构体系的角度来揭示浅埋地下结构的地震破坏机理和失效模式,分析抗震薄弱环节;④有针对性的物理模型试验验证研究;⑤地下结构抗震性能指标体系和提高地下结构抗震能力的工程措施;⑥与地下结构破坏机理和失效模式对应的抗震设计理论与实用分析方法。

参考文献:

- [1] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2001, **16**(4): 247 - 293.
- [2] 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, **39**(6): 106 - 110. (LIU Jing-bo, LI Bin. Issues on the seismic analysis and design of subway structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(6): 106 - 110. (in Chinese))
- [3] OKIMURA T, TAKADA S, KOID T H. Outline of the great Hanshin earthquake, Japan 1995[J]. *Natural Hazards*, 1996, **14**(1): 39 - 71.
- [4] HUO H B. Seismic design and analysis of rectangular underground structures[D]. West Lafayette: Purdue University, 2005.
- [5] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Special Issue of Soils and Foundations, 1996, **1**: 283 - 300.
- [6] 土木本部技術部. 神戸高速鉄道東西線大開駅災害復旧の記録[M]. 东京: 佐藤工業株式会社, 1997. (Civil engineering department. Damage and restoration records to Daikai subway station of Kobe rapid transit railway east and west line[M]. Tokyo: SATO KOGYO Co Ltd, 1997. (in Japanese))
- [7] 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等. 地下结构抗震简化分析方法比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, **37**(2): 65 - 80. (XU Cheng-shun, XU Zi-gang, DU Xiu-li, et al. Comparative study of simplified methods for seismic analysis of underground structure[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, **37**(2): 65 - 80. (in Chinese))
- [8] 刘晶波, 李彬, 刘祥庆. 地下结构抗震设计中的静力弹性分析方法[J]. *土木工程学报*, 2007, **40**(7): 68-76. (LIU Jing-bo, LI Bin, LIU Xiang-qing. A static elasto-plastic analysis method in seismic design of underground structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, **40**(7): 68 - 76. (in Chinese))
- [9] 刘晶波, 刘祥庆, 李彬. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J]. *土木工程学报*, 2008, **41**(4): 73 - 80. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, LI Bin. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, **41**(4): 73 - 80. (in Chinese))
- [10] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (DU Xiu-li. Theories and methods of wave motion for engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 杜修力, 李洋, 赵密, 等. 下卧刚性基岩条件下场地土-结构体系地震反应分析方法研究[J]. *工程力学*, 2017, **34**(5): 52 - 59. (DU Xiu-li, LI Yang, ZHAO Mi, et al. Seismic response analysis method for soil-structure interaction system of underlying rigid rockbase soil condition[J]. *Engineering mechanics*, 2017, **34**(5): 52 - 59. (in Chinese))
- [12] 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 - 23. (CHEN Guo-xing, CHEN Su, DU Xiu-li, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect[J]. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2016, **36**(1): 1 - 23. (in Chinese))
- [13] 蔡之瑞. 1995年1月17日日本阪神地震—直下型冲击[J]. *世界地震工程*, 1995, **2**(1): 1 - 4. (CAI Zhi-rui. January 17, 1995 Kobe-Osaka, Japan, earthquake—direct underground shock[J]. *World Earthquake Engineering*, 1995, **2**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [14] 王瑞民, 罗奇峰. 阪神地震中地下结构和隧道的破坏现象浅析[J]. *灾害学*, 1998, **13**(2): 63 - 66. (WANG Rui-min, LUO Qi-feng. Analysis on the damage to underground structure and tunnel in Kobe are caused by Hanshin earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, 1998, **13**(2): 63 - 66. (in Chinese))
- [15] 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): 32 - 35. (YU

- Xiang. Earthquake-resistant behavior should be stressed in subway construction: Inspiration from Osaka-Kobe earthquake[J]. Railway Construction Technology, 2000(6): 32 - 35. (in Chinese))
- [16] 于翔, 钱七虎, 赵跃堂, 等. 地铁工程结构破坏的竖向地震力影响分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001, 2(3): 75 - 77. (YU Xiang, QIAN Qi-hu, ZHAO Yue-tang, et al. Analysis of vertical earthquake influence on damage to subway structures[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(3): 75 - 77. (in Chinese))
- [17] 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 等. 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析[C]//土木学会論文集, 1996(537): 303 - 320. (YAMATO T, UMEHARA T, AOKI H, et al. Damge to Daikai subway station of Kobe rapid transit system and estimation of its reason during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake[C]// Journal of JSCE, 1996(537): 303 - 320.(in Japanese))
- [18] 曹炳政, 罗奇峰, 马硕, 等. 神户大开地铁车站的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 102 - 107. (CAO Bing-zheng, LUO Qi-feng, MA Shuo, et al. Seismic response analysis of Dakai subway station in Hygoken-nanbu earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 102 - 107. (in Chinese))
- [19] 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 12WCEE, 2000: 1 - 6.
- [20] 车爱兰, 岩檐敞广, 葛修润. 关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1293 - 1298. (CHE Ai-lan, IWATATE T, GE Xiu-run. Dynamic behaviors of subway structure subjected to strong earthquake motions using shaking table tests and dynamic analyses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1293 - 1298. (in Chinese))
- [21] 川西智浩, 清野純史, 井澤淳. 側壁の損傷に着目した開削トンネルの地震時耐力把握のための実験的研究[C]// 土木学会論文集 A1, 2013, 69(4): 509 - 516. (KAWANISHI T, KIYONO J, IZAWA J. An experimental study on the failure behavior and the strength of a cut and cover tunnel[C]// Journal of JSCE A1, 2013, 69(4): 509 - 516. (in Japanese))
- [22] 中村晋. 地震被害程度の差異に着目した地下鉄の震害要因分析[C]// 土木学会論文集 I 卷, 2000, 654(I-52): 335 - 354. (NAKAMURA S. Evaluation of damage mechanism of subway station based on the difference damage between two damaged subway stations due to the earthquake[C]// Journal of JSCE, 2000, 654(I-52): 335 - 354. (In Japanese))
- [23] UENISHI K, SAKURAI S. Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai Underground Station[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(6): 813 - 822.
- [24] AN X, SHAWKY A A, MAEKAWA K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin Earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 241 - 257.
- [25] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surround ground: Evaluation of the failure of the Daikai station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1522 - 1533.
- [26] PARRA M G J, BOBET A, RAMIREZ J A. Evaluation of soil-structure interaction and structural collapse in Daikai subway station during Kobe earthquake[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1): 113 - 122.
- [27] 庄海洋, 程绍革, 陈国兴. 阪神地震中大开地铁车站震害机制数值仿真分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 245 - 250. (ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, CHEN Guo-xing. Numerical simulation and analysis of earthquake damages of Dakai metro station caused by Kobe earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 245 - 250. (in Chinese))
- [28] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006. (ZHUANG Hai-yang. Study on nonlinear dynamic soil-underground structure interaction and its large-size shaking table test[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [29] 刘如山, 邬玉斌, 杜修力. 用纤维模型对地下结构地震破坏的数值模拟分析[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(11):1488 - 1495. (LIU Ru-shan, WU Yu-bin, DU Xiu-li. Numerical simulation analysis on earthquake damage of underground structure with fiber model[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(11): 1488 - 1495. (in Chinese))
- [30] 邬玉斌. 地铁车站地震反应和破坏机理分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008. (WU Yu-bin. Analysis of seismic response and failure mechanisms of subway station[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese))
- [31] 刘祥庆. 地铁地下结构地震反应分析方法与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (LIU Xiang-qing. Research on analysis method and experimental study of seismic response of underground subway structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))

- [32] 孙 超. 地铁地下结构抗震性能及分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009. (SUN Chao. Study on seismic capability and analysis method of underground subway structures[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009. (in Chinese))
- [33] 卢志杰, 黄俊鸿. 浅埋隧道非线性动态时程分析——以日本大开隧道为例[C]// 第八届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会. 台北, 2009, B4: 1 - 12. (LU Zhi-jie, HUANG Jun-hong. Nonlinear dynamic time-history analysis of shallow buried tunnel——a case study of Daikai tunnel in Japan[C]// The Symposium on Technology and the Engineering Cross Strait Tunnel and Underground Engineering. Taipei, 2009, B4: 1 - 12. (in Chinese))
- [34] 还 耀, 方 秦, 陈 力, 等. 强震作用下地铁车站结构损伤破坏的三维非线性动力分析[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(6): 852 - 862. (HUAN Yi, FANG Qin, CHEN Li, et al. 3D nonlinear damage analysis of metro-station structures under strong seismic loading[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(6): 852 - 862. (in Chinese))
- [35] 王 刚, 张建民, 魏 星. 可液化土层中地下车站的地震反应分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1623 - 1627. (WANG Gang, ZHANG Jian-min, WEI Xing. Seismic response analysis of a subway station in liquefiable soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1623 - 1627. (in Chinese))
- [36] 杜修力, 王 刚, 路德春. 日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 165 - 171. (DU Xiu-li, WANG Gang, LU De-chun. Earthquake damage mechanism analysis of Dakai metro station by Kobe earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 165 - 171. (in Chinese))
- [37] 杜修力, 马 超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 53 - 62. (DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 53 - 62. (in Chinese))
- [38] GB50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 2014. (GB GB50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. 2014. (in Chinese))
- [39] 陈念英. 从日本阪神地震再谈竖向地震作用的重要性[J]. 成都大学学报 (自然科学版), 1996, 15(1): 56 - 59. (CHEN Nian-ying. Significance of vertical earthquake effect by the thought of Hanshin earthquake of Japan[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 1996, 15(1): 56 - 59. (in Chinese))
- [40] 酒井久和, 野津厚. 地中構造物の損傷に影響する地震動の周波数成分[C]// 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 2002: 1033 - 1038. (HISAKAZU S, ATSUSHI N. Dominant frequency component of seismic wave for the damage of underground structure[C]// The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium, 2002: 1033 - 1038. (in Japanese))
- [41] KONAGAI K, KAMIYA H, NISHIYAMA S. Deformation buildup in soils during the Kobe earthquake of 1995[C]// Proc of Workshop on Seismic Fault Induced Failures. Tokyo, 2001: 81 - 90.
- [42] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [43] 日本道路協会. 駐車場設計・施工指針同解説[M]. 东京: 丸善株式会社, 1992. (Japan Road Association. Road engineering & management review[M]. Tokyo: Wan Shan Co Ltd, 1992. (in Japanese))
- [44] 318 A C. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary[S]. American Concrete Institute, 2011.
- [45] 三神厚, 小長井一男, 澤田勉. トンネル中柱の免震装置形状と各自由度における剛性の関係[C]// 土木学会論文集 2001, 682(I-56): 415 - 420. (MIKAMI A, KONAGAI K, SAWADA T. Stiffness design of isolation rubber for center columns of tunnel[C]// Journal of JSCE, 2001, 682(I-56): 415 - 420. (in Japanese))
- [46] 竹内幹雄, 中村敏晴, 栗本雅裕, 等. 箱型断面トンネルの最適耐震性能に関する研究[C]// 土木学会地震工学論文集, 2003, 27: 1 - 8. (TAKEUCHI M, NAKAMURA T, KURIMOTO M, et al. The research on the optimum earthquake performance of rectangular tunnel[C]// Journal of JSCE, 2003, 27: 1 - 8. (in Japanese))
- [47] 还 耀, 方 秦, 柳锦春, 等. 提高地铁车站结构抗震能力的理论及数值分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 252 - 257. (HUAN Yi, FANG Qin, LIU Jin-chun, et al. Theoretical and numerical investigations on enhancement of aseismic capability of metro stations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 252 - 257. (in Chinese))
- [48] CHEN Z, GE H, AKIRA K, et al. Simplified seismic design approach for steel portal frame piers with hysteretic dampers[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(4): 541 - 562.