城市地下结构抗震韧性研究进展

路德春¹, 马超^{2*}, 杜修力¹, 王作虎²

1. 北京工业大学岩土与地下工程研究所, 北京 100124;

2. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 102616

* E-mail: machao@bucea.edu.cn

收稿日期: 2021-01-12; 接受日期: 2021-03-01; 网络版发表日期: 2021-09-27

国家自然科学基金(批准号: 51808028, 52025084, 51778026)、北京市自然科学基金(编号: 8212007)和北京建筑大学金字塔人才培养工程(编号: JDYC20200311)资助项目

摘要 地下结构抗震韧性要求在保护生命与财产安全的前提下, 不仅要减小地下结构在地震中的损伤破坏, 而且震后无需修复或者稍加修复就能快速恢复结构的使用功能. 随着韧性城市建设的提出, 提升城市地下结构抗震韧性已经成为地下结构地震工程研究的热点问题之一. 本文对地下结构抗震韧性研究现状进行了较为系统的梳理, 介绍了韧性抗震地下结构的防震理念, 从提升地下结构地震中抗力韧性和震后地下结构的功能恢复韧性两个方面, 总结了国内外关于提升地下结构抗震韧性的研究成果, 最后探讨了韧性抗震地下结构的发展趋势. 现有研究表明, 提升地下结构抗震韧性的技术, 还主要集中在提高结构抗力韧性、减小地震引起的地下结构损伤破坏方面, 而对结构震后功能恢复韧性的研究还非常不充分. 因此, 对地下结构抗震韧性的提升, 应在震后结构功能恢复韧性方面开展大量研究工作, 要重视震后结构功能恢复的程度与快速性, 从地下结构地震反应的特点着手, 在新结构体系的研发和大尺寸模型试验等方面开展深入研究, 形成地下结构抗震韧性设计标准与规范, 推广相关研究成果的工程应用.

关键词 地下结构, 抗震韧性, 防震理念, 抗震性能, 功能恢复

1 引言

目前我国正在进行大规模的城市空间开发与建设, 以地铁为代表的城市地下结构建设取得了突飞猛进的发展. 截止到2020年底, 我国大陆已建成运营地铁线路约7108.49 km^[1]. 由于地下结构赋存于围岩土体中, 其抗震性能被长时间认为优于地上结构, 因而地下结构的地震安全问题长期未得到足够重视. 1995

年日本阪神地震造成大开地铁车站结构产生了严重的塌毁破坏^[2,3], 集集地震^[4]和汶川地震^[5]等也都造成了地下结构发生严重的损伤, 城市地下结构的抗震安全问题才逐渐得到了广泛的关注. 我国在建地下结构的城市大都处于强震区, 且直到2014年才颁布实施第一部针对地下结构的抗震设计规范^[6], 之前设计和建造的地下结构缺少规范化指导, 因此, 我国城市地下结构面临着严峻的地震安全问题.

引用格式: 路德春, 马超, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震韧性研究进展. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1469–1483

Lu D C, Ma C, Du X L, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: State of the art (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1469–1483, doi: 10.1360/SST-2021-0013

城市地下结构往往是抗震救灾的基础设施, 其在地震中一旦发生严重破坏, 将造成大量的人员伤亡, 同时也影响震后的救灾工作和城市的功能恢复。阪神地震后, 大开车站进行了重建, 六个月后才恢复通车, 震后一年才恢复正常运行, 整个修复过程耗费超过100亿日元。因此, 城市地下结构的抗震安全问题影响着城市的正常运营和国民经济的恢复。2003年美国学者Bruneau等人^[7]首次提出了抗震韧性的概念, 即降低地震风险、减轻地震破坏和缩短震后功能恢复时间^[8]。之后, 发展具有良好抗震性能和震后快速恢复使用功能的韧性抗震建筑结构, 很快得到了国际地震工程界的认可, 并成为研究热点^[9,10]。

2017年我国将“韧性城乡”列为“国家地震科技创新工程”四大计划之一^[8]。城市地下结构作为韧性城乡建设的重要组成部分, 其抵抗地震的能力与震后使用功能, 对保障人民生命安全、震后救援救灾、保持城市功能意义重大。2018年7月27~28日在哈尔滨举行的第204期双清论坛, 围绕“抗震韧性城市建设的关键前沿基础科学问题”进行了充分讨论, 梳理了未来在抗震韧性城市方面需要解决的重大科学问题, 并指出地下结构抗震韧性的研究相对滞后^[11]。尤其重点指出的是, 城市地下结构地震安全问题的研究, 还主要集中在提升地下结构的抗力韧性方面, 即提高结构在地震中的抗震性能、减小地震引起的结构损伤。虽然研究者开始关注提升地下结构震后的恢复韧性^[12,13], 即提高震后结构使用功能的快速恢复性, 但相关研究还非常不充分。因此, 城市地下结构的地震安全问题, 亟需实现向韧性防震设计理念的转变。

本文首先阐述了城市地下结构抗震韧性的防震理念, 从提升地下结构抗力韧性和恢复韧性两个方面, 系统地总结了地下结构抗震韧性的最新研究成果, 并凝练了地下结构抗震韧性设计存在的问题, 展望了未来的研究方向, 以期在城市地下结构防震救灾方面的研究提供参考。

2 韧性抗震地下结构的防震理念

韧性抗震结构(earthquake resilient structure), 也称功能可恢复性结构, 其防震理念不仅要求地震作用时结构在保证生命安全的前提下, 表现出较好的抗震性能, 还重点关注震后结构功能的快速恢复。韧性抗震

结构包含两方面内容, 一是结构的抗力韧性, 二是恢复韧性。

韧性抗震地下结构的概念性示意图如图1所示。理想的韧性抗震地下结构, 在震前与震后的功能相同, 如图1中线①和②所示, 也就是地震不影响地下结构的使用功能。实际上, 地震不可避免地会造成地下结构的结构构件和非结构构件发生损伤破坏, 使结构的使用功能降低, 震后结构使用功能的剩余量, 体现了其抗力韧性。图1中B点为震后地下结构使用功能可恢复与不可恢复的分界点。如图中线③所示, 地震造成了地下结构功能由震前水平降低至A点。当A点低于B点时, 结构的抗力韧性较低, 即便是震后对结构进行修复, 也无法恢复结构的使用功能, 这时需要对结构进行拆除重建, 而地下结构拆除重建所需的时间和经济成本较高, 如阪神地震后大开车站的重建。当A点高于B点时, 震后结构受到的各种荷载, 或震后对地下结构进行修复, 即可使结构的使用功能得以恢复。传统的地下结构, 虽然能够保证生命安全, 但其震后功能恢复难度大, 费用较高, 且一般无法使结构恢复到原有功能水平, 如图1中线④-3所示, 且功能恢复需要的时间较长。基于韧性抗震设计的地下结构, 由于考虑了结构的恢复韧性, 震后适当的修复或结构自身受力的调整, 就能够快速将结构的使用功能恢复至震前水平, 如图1中线④-2所示。如果在震后结构的修复中, 克服原有地下结构的设计缺陷等, 则能够使修复后的结构功能高于地震前水平, 如图1中线④-1所示。综合考虑地下结构全寿命周期内的安全与成本, 包括结构的建造、运营、维护, 以及非结构构件、设备、其他子系统等等对

图1 (网络版彩图)韧性抗震地下结构示意图

Figure 1 (Color online) Sketch of earthquake resilience underground structure.

城市系统功能的影响, 发展韧性抗震地下结构对加强城市综合防灾、减灾、抗灾等体系建设的意义重大。

从以上分析可知, 提升地下结构的抗震韧性包括两方面内容: 一是提升地下结构的抗力韧性, 通过提高结构抵抗地震荷载的能力, 减小地震造成的人员与财产损失, 以及减小地震导致的地下结构损伤破坏和功能损失; 二是提升地下结构的恢复韧性, 使结构的功能恢复至(或高于)震前水平, 同时减小恢复地下结构正常使用功能的时间和造价。

3 提升地下结构的抗力韧性

与地上结构的地震反应不同, 地下结构的地震反应主要受围岩土体变形的控制^[14], 因此, 地下结构抗力韧性的提升不能简单地参考地上结构。例如, 将隔震支座设置于地下结构底部与土体之间(图2), 来减小地下结构在地震中的损伤破坏, 效果并不理想^[15]。

地下结构地震反应的剧烈程度, 取决于围岩土体与地下结构的水平向相对刚度比^[16], 当地下结构的刚度小于土体刚度时, 结构在地震中需要通过的自身变形来适应土体变形; 而当结构刚度大于土体刚度时, 土体的变形要大于结构变形。地下结构在地震中发生塌毁破坏, 主要是由于结构中柱水平向变形能力不足^[17-26]。因而目前提出的提升地下结构抗力韧性的技术措施, 大多是围绕中柱展开的。按照技术措施针对的对象可以分为两类: 一类是提升新建地下结构的抗力韧性; 另一类则主要针对既有地下结构的抗震加固。

3.1 新建地下结构抗力韧性提升

新建地下结构抗力韧性的提升技术, 是基于结构失效模式的减震控制措施, 主要是通过两种途径实现: 一是切断地震荷载传力路径, 主要通过在中柱端部设置传统的防震控制装置, 切断水平向地震荷载传递至中柱的路径, 使结构顶底板传递至中柱的水平向变形, 集中在防震控制装置处, 以塑性变形、滑移等方式体现, 减弱或消除结构中柱在地震作用时的损伤破坏; 二是采用新型结构体系, 如分体柱、叠层夹芯柱、新型柱梁和墙板节点等, 通过提高结构整体层间变形能力, 尤其是提高中柱的水平向变形能力, 使结构能够适应地震作用时围岩土体的变形, 避免结构竖向承载构件因水平向变形能力不协调, 而造成部分构件首先

丧失使用功能。

3.1.1 切断地震荷载传力路径

在地下结构中柱端部设置传统防震支座, 其根本目的在于, 通过减小地下结构抗震关键构件——中柱的损伤, 来提升结构的整体抗力韧性, 即提高图1中A点的位置。竹内幹雄等人^[27]最早提出了采用设置隔震支座的方式来改善地下结构的抗力韧性, 其原理是: 将由结构顶底板传递至中柱的水平向变形, 集中在支座上, 如图3所示。通过支座的变形减小结构中柱的水平向变形, 从而避免结构发生整体塌毁。

在地下结构中柱端部设置支座, 对整体结构在地震中的变形模式和承担的土压力大小影响不大, 但中柱的变形模式发生了较大改变。竹内幹雄等人^[27]给出了设置支座前后, 单层双跨地下结构和三层双跨地下结构在地震中的变形模式和土压力分布规律, 分别如图4和5所示。地震中, 作用于两类结构的土压力几乎相等, 分别如图4(a)和5(a)所示, 两类结构侧墙和顶底板的变形也几乎一致。这主要是由于, 中柱水平向刚度对结构整体侧向刚度的贡献较小。设置支座前后, 地下

图2 (网络版彩图) 结构底部设置隔震支座^[15]

Figure 2 (Color online) Isolation bearing set at the bottom of underground structure [15].

图3 (网络版彩图) 地下结构地震变形模式。(a) 未设置支座结构; (b) 设置支座结构

Figure 3 (Color online) Earthquake-induced deformation mode of underground structure. (a) Structure without bearings; (b) structure with bearings.

图4 (网络版彩图)设置支座单层结构地震反应^[27]. (a) 土压力分布; (b) 结构水平变形

Figure 4 (Color online) Seismic response of the singular-storey structure with isolation bearings^[27]. (a) Distribution of soil pressure; (b) horizontal deformation of structure.

结构的整体侧向刚度变化不大, 即围岩土体-地下结构水平相对刚度比变化不大. 而设置支座后, 结构中柱的变形模式发生了显著变化, 变形主要集中于支座处, 中柱变形明显减小, 进而地震引起的结构中柱损伤程度减小, 结构不会因中柱变形能力不足而发生塌毁破坏. 对于三层结构, 设置支座还改变了中间两层板的变形模式, 地震中两板旋转变形的减小, 也减小了柱端弯矩导致的中柱损伤.

竹内幹雄等人^[27]将传统的滑动摩擦支座(如图6(a)所示)、Ma等人^[28]将滚动摩擦支座(如图7(a)所示)应用于大开车站中柱顶梁与中柱之间. 拟静力推覆模拟表明, 当中柱承担的水平剪力达到支座滑动所需的摩擦力时, 支座开始滑动, 直至结构变形达到最大值, 如图6(b)和7(b)所示. 在支座变形的过程中, 中柱的水平向变形和内力不再增加. 动力时程分析表明, 采用两种支座均能有效避免大开车站结构发生塌毁破坏. 需要指出的是, 中柱的变形和支座的滑动位移, 受支座摩擦系数的影响, 即结构的抗力韧性受支座摩擦系数的控制.

为了研究柱端设置支座的地下结构地震反应规律, Zheng等人^[29]与Liu等人^[30]分别将叠层橡胶支座应用于双层三跨地下结构, 开展了振动台模型试验, 研究橡胶支座对地下结构抗力韧性的提升程度. 试验结果

图5 (网络版彩图)设置支座三层结构地震反应^[27]. (a) 土压力分布; (b) 结构水平变形

Figure 5 (Color online) Seismic response of the three-storey structure with isolation bearings^[27]. (a) Distribution of soil pressure; (b) horizontal deformation of structure.

表明, 支座对各构件高频加速度反应的减小效果明显; 设置支座后, 结构在地震中的水平向变形沿侧墙高度分布更加均匀, 避免了应力集中导致的结构损伤. 尤其需要指出的是, Liu等人^[30]开展的振动台试验结果表明, 未设置支座的结构中柱, 震后出现了混凝土剥落、钢筋外露的现象, 而设置支座的结构中柱未见明显的损伤破坏. 试验结果还表明, 结构层间位移和侧墙内力略微增加, 这主要是由于原本需要中柱承担的剪力转由侧墙承担. 而庄海洋等人^[31]认为, 支座的存在降低了结构-围岩土体的侧向刚度比, 进而增大了结构的层间位移反应, 这与竹内幹雄等人^[27]的结论存在矛盾. 设置支座的地下结构会导致强震作用下侧墙反应明显增大, 表现为板墙节点处混凝土损伤, 这一点

图 6 (网络版彩图)滑动摩擦支座^[27]. (a) 支座概念图; (b) 荷载-位移曲线

Figure 6 (Color online) Sliding friction bearing [27]. (a) Sketch; (b) load-displacement curve.

在众多研究中得到了印证。

振动台模型试验中, Zheng等人^[29]与Liu等人^[30]设置支座的位置存在差异, Zheng等人^[29]将支座设置于上下层柱底, 而Liu等人^[30]将支座设置于上层柱顶和下层柱底. 为了探究支座位置对结构抗力韧性的影响, Liu等人^[32]采用概率密度法, 以四层地下结构(如图8所示, 红点为支座位置处)为例开展结构地震反应分析. 结果表明, 设置支座的中柱, 在地震中的内力减小明显; 当仅对某一层结构设置支座时, 结构抗力韧性的改善有限, 设置支座的层数越多, 结构抗力韧性的改善程度也越高; 支座的位置对地震引起的构件损伤变形的影响不大. 这主要是由于只有设置支座的中柱变形得到了减小, 而未设置支座的中柱变形模式没有发生改变, 这与图5(b)获得的结果是吻合的. 因此, Liu等人^[32]建议, 对于多层地下结构, 应在结构各层均设置

图 7 (网络版彩图)滚动摩擦支座^[28]. (a) 支座概念图; (b) 荷载-位移曲线

Figure 7 (Color online) Rolling friction bearing [28]. (a) Sketch; (b) load-displacement curve.

图 8 (网络版彩图)橡胶支座位置^[32]

Figure 8 (Color online) Position of rubber bearings [32].

隔震支座。

此外, 研究者还将摩擦摆隔震支座^[15,33]、加劲肋剪切板阻尼器^[34,35]、铅芯橡胶隔震支座^[36,37]、双向辊轴摩擦摆隔震支座^[38]等应用于地下结构, 设置在中柱与顶梁之间来提高结构的抗力韧性. 研究均表明, 设置支座后, 结构整体地震反应明显减弱, 尤其是中柱的变形和内力明显减小.

3.1.2 新型结构体系

阪神地震后, 研发了各种新型地下结构体系. 采用具有较强变形能力的新型功能柱, 增强结构适应围岩土体变形的能力; 采用新型功能节点, 减小作用于结构中柱的地震荷载. 两类体系改善地下结构抗力韧性的方法都是避免因地震引起的中柱破坏导致地下结构发生整体塌毁.

(1) 新型功能柱

地下结构在地震中的塌毁破坏是由结构中柱与侧墙水平向变形能力显著不协调导致的^[20]. 根本原因在于, 地震引起的地下结构上覆土体的竖向惯性力主要由结构中柱承担, 这导致了中柱轴压比显著增大, 水平向变形能力下降. 为了保证中柱的竖向承载能力、提高柱子在高轴压比下的水平向变形能力, 研究者提出了诸如叠层夹芯柱^[39,40]、分体柱^[41~43]等新型功能柱.

路德春等人^[39,40]研发了一种新型叠层夹芯柱, 如图9所示, 该柱主要由芯柱、柱段和摩擦层组成, 同时芯柱与柱段之间预留变形空间. 柱段主要承担竖向荷载, 芯柱主要协调各柱段之间的层间位移. 叠层夹芯柱与截面积相等的普通钢筋混凝土柱的竖向承载能力相当, 但水平向变形能力得到了显著增强, 尤其是当轴压比低于0.8时, 叠层夹芯柱的水平向变形能力几乎不受轴压比的影响, 如图10所示. 采用叠层夹芯柱的地下结构, 整体层间变形能力得到显著提升, 且几乎不受竖

图9 (网络版彩图)叠层夹芯柱^[39]. (a) 构造措施; (b) 变形模式

Figure 9 (Color online) Segmental cored column [39]. (a) Structural measures; (b) deformation mode.

向地震荷载的影响, 地震中, 结构不会因中柱水平向变形能力不足或与侧墙变形能力不协调而发生塌毁破坏.

许紫刚^[41]、许成顺等人^[42]与邵文等人^[43]分别研发了一种新型分体柱, 将地下结构中柱分割成若干个小柱, 即中柱横截面分隔、竖直方向保持不变, 如图11所示. 由于小柱子的总截面面积与原柱相等, 因此其竖向承载能力变化不大, 但各小柱的长细比更大, 水平向变形能力更强. 研究表明, 当将中柱分成四个小柱时, 其侧向变形能力提高约30%. 在较大水平向荷载作用下, 整体柱柱端受压区破坏严重, 而分体柱的损伤区域均匀分布在柱端, 且损伤程度较轻, 如图12

图10 (网络版彩图)叠层夹芯柱侧向变形能力^[39]

Figure 10 (Color online) Lateral deformation capacity of the segmental cored column [39].

图11 (网络版彩图)分体柱概念图^[41]

Figure 11 (Color online) Sketch of split columns [41].

图 12 (网络版彩图)位移角为1/100时柱子损伤云图^[41]. (a) 整体柱; (b) 分体柱

Figure 12 (Color online) Damage nephogram of columns with drift ratio of 1/100 [41]. (a) Monolithic column; (b) split column.

所示.

(2) 新型功能节点

改变地下结构中柱与顶板或顶梁之间的连接方式,可以减小地震引起的地下结构中柱变形与内力^[44],其核心思想是通过释放中柱柱端的部分约束,使得柱端可以产生旋转或者水平滑动,进而减小地震导致的中柱弯矩和损伤破坏.

杜修力等人^[45]与阴孟莎^[46]提出了一种截断柱,即将地下结构中柱与顶底梁截断,将地下结构传统的柱梁刚性连接,改为采用剪力销栓连接,如图13所示.采用这种连接方式后,中柱与结构顶底梁之间可以发生旋转,这种截断柱与梁之间的开合减小了柱子本身的变形,如图14所示,能够起到提高地下结构抗力韧性的效果.

通过释放地下结构板墙节点的部分约束,也可以提高结构的抗震性能^[47].本文作者等人提出了一种新的墙板连接方式,在地下结构侧墙与顶板之间设置减震缝,如图15所示,即通过释放结构侧墙与顶板之间的水平连接,切断水平地震荷载通过顶板传递至中柱的传力路径.地震作用中,顶板与侧墙之间可以滑动,这种滑动减小了中柱的水平向变形,起到提高结构整体抗力韧性的作用.减震缝的宽度取决于中柱与侧墙的水平向变形能力之差,避免因顶板与侧墙之间滑动距离过大发生落板.图16给出了不同减震缝宽度与未设置减震缝结构中柱在地震中的最大变形,由图可知,采用新型节点的结构地震反应明显减弱.为了进一步减小地下结构的地震反应,付继赛^[48]在双层地下结构底层中柱的顶部设置滑动隔震支座、中板与侧墙之间采用类似减震缝的连接方式,如图17所示,开展了地下

图 13 (网络版彩图)可更换柱脚组合柱^[46]

Figure 13 (Color online) Composite column with replaceable foot [46].

图 14 (网络版彩图)现浇柱与截断柱侧向变形能力对比^[45]

Figure 14 (Color online) Comparison between lateral deformation capacities of cast-in-place column and truncated column [45].

图 15 (网络版彩图)减震缝结构体系

Figure 15 (Color online) Underground structure with shock absorbing gaps.

结构的地震反应分析.综合采用两种减震措施,导致了地下结构的水平刚度明显降低,进而结构在地震中的

图 16 (网络版彩图)减震缝结构地震反应

Figure 16 (Color online) Seismic response of underground structures with shock absorbing gaps.

图 17 (网络版彩图)中柱设置支座与中板设置减震缝结构体系^[48]

Figure 17 (Color online) Underground structure with isolation bearings and shock absorbing gaps ^[48].

层间位移增大, 但结构中柱和中板的地震损伤明显减小. 设置减震缝后, 强震中结构板与侧墙之间容易因碰撞导致结构损伤破坏.

此外, Kiryu等人^[49]与Wang等人^[50]提出了在地下结构周围设置聚合物隔震层的隔震方法, 如图18所示. 由于地下结构的地震反应取决于围岩土体的变形, 因此, 在结构侧墙与土体之间设置剪切模量较小的隔震材料, 可以吸收地震能量, 并减小地震引起的地下结构层间变形, 进而减小了结构的损伤破坏. 这种地下结构的隔震思想在隧道结构中应用较为广泛^[51~56].

3.2 既有地下结构抗震加固

利用新型功能材料, 如FRP(fiber reinforced plastics)、聚合物改性水泥砂浆等加固钢筋混凝土结构构件, 使混凝土处于约束状态(三维应力), 可以提高构件的竖向承载能力和水平向延性, 进而提升结构的

图 18 (网络版彩图)结构两侧设置隔震层^[49]

Figure 18 (Color online) Underground structure with isolation layers ^[49].

抗力韧性, 目前在地上结构抗震加固中得到了广泛的应用. 采用新型功能材料加固既有地下结构中柱可以提高中柱的变形能力, 进而减小地震导致的地下结构损伤破坏.

在开展了碳纤维布(CFRP)加固混凝土柱抗震试验的基础上^[57], 马超等人^[58]探讨了CFRP对地下结构中柱水平变形能力的影响规律. 结果表明, CFRP对地下结构中柱在高轴压比下的水平向变形能力的提高程度在20%以上. 同时将该加固技术应用于地下结构, 通过数值计算可知, 由于CFRP加固地下结构, 提高了震前结构的功能, 使得地震造成的结构损伤破坏程度明显降低, 其震后可修复性得到了有效提高^[58], 如图19所示. 安林轩^[59]开展了玄武岩纤维布(basalt fiber reinforced plastics, BFRP)加固地铁车站结构的研究, 重点探讨了BFRP层数对结构抗力韧性的提升程度. 当采用三层加固时, 地震作用下结构抵抗地震荷载的能力明显提升, 但随着加固层数的增加, 这种提升效果没有明显变化.

提升地下结构的抗力韧性的技术措施, 无论是新建结构中采用传统防震支座、新型结构体系, 还是既有地下结构的抗震加固, 其根本目的是减小地震导致的结构损伤, 提高震后结构的剩余功能. 但均未关注震后结构的恢复韧性, 包括恢复方式、结构功能恢复程度等. 因此, 采用提升抗力韧性技术措施的地下结构还不能称作是完善的韧性抗震地下结构体系.

4 提升地下结构恢复韧性

震后功能可恢复结构最早是由Tang等人^[60]在设计旧金山-奥克兰海湾大桥时提出的. 其核心思想

图 19 (网络版彩图) CFRP加固地下结构地震损伤程度^[58]. (a) 非加固结构柱; (b) CFRP加固结构柱

Figure 19 (Color online) Damage of underground structure strengthened with CFRP [58]. (a) Column without strengthening; (b) column strengthened with CFRP.

是, 在结构易发生地震损伤破坏的位置设置可更换构件, 使结构在地震中的破坏集中在可更换构件处, 主体结构不发生损伤, 或仅发生微小损伤. 通过震后更换损伤构件, 实现结构功能的快速恢复, 目前在地上结构中得到了广泛的应用^[9,10]. 关于震后功能恢复地下结构的研究起步较晚, 但也取得了一些进展. 目前地上结构功能恢复的实现途径可以分为摇摆、自复位和可更换三种类型^[61], 然而地下结构地震反应是一个变形问题, 很难实现结构或构件在地震中产生摇摆; 此外, 地下结构地震的自复位效果主要取决于围岩土体的变形. 因此, 按照结构功能恢复的途径, 可将具有恢复韧性的地下结构分为两类: 一类是功能可修复结构, 即震后通过人工干预实现结构功能的恢复; 另一类是功能自恢复结构, 即震后不需人工干预, 结构通过自身调整即可实现功能的恢复.

4.1 功能可修复结构

基于地下结构的地震破坏机理和功能可恢复的思想, 研究者尝试在地下结构中柱端部设置可更换部件, 通过可更换部件的损伤破坏保护主体结构. 将图13所示的截断柱柱脚处的局部混凝土采用易损部件^[45,46], 可以使中柱在地震中的损伤破坏集中于易损部件, 实现震后损伤部位的快速修复. 当截断柱柱端采用钢板作为可更换材料时, 柱子的竖向承载能力略有提高; 采用橡胶作为可更换材料时, 竖向承载能力略有降低, 但各柱的水平向变形能力相当. 地下结构地震反应分析可知^[46], 当采用钢板复合截断柱时, 不仅能够减小结构中柱的变形(图20), 减轻地震引起的中柱和侧墙损伤, 而且能够通过钢板的快速更换, 实现结构使用功能的快速恢复.

4.2 功能自恢复结构

自复位装置的提出是为了解决震后结构存在较大残余变形的问题, 通过具有自恢复功能的材料或装置提供自复位力, 使结构或构件恢复到初始位置, 恢复结构的使用功能. 阪神地震后, 三神厚等人^[44]提出改变地下结构板柱连接方式实现自复位功能. 如图21(a)所示, 地震作用前, 结构顶板与上覆土体重力的通过中柱轴力传递给结构底板, 地震作用后, 若结构产生永久变形, 则中柱与顶、底板接触点不在同一竖直线, 如图21(b)所示. 由于结构受围岩土体的约束作用, 中柱在顶板与上覆土体重力的作用下, 绕板柱接触点

图 20 (网络版彩图)中柱侧向变形时程^[46]

Figure 20 (Color online) Lateral deformation of central column in time of history [46].

图 21 (网络版彩图)新型柱端连接方式^[44]. (a) 变形前; (b) 变形后

Figure 21 (Color online) Column with new connection ^[44]. (a) Before deformation; (b) after deformation.

旋转,直至两接触点逐渐恢复到同一竖直线上,即实现了地下结构在震后的自复位效果.这种实现结构自复位的思想,要尽可能保证中柱柱端不存在弯矩,否则弯矩的存在能够抵抗部分恢复力,减小结构的自复位效果.

Chen等人^[62]研发了一种地下结构自复位耗能柱基,如图22所示,其基本原理为:一是在柱底与底梁之间设置耗能装置,耗散传递中柱的地震能量;二是在中柱竖直截面中部设置非黏结预应力筋,通过预应力筋的拉力将震后中柱拉回至初始位置.将该种装置应用于大开车站结构时,结构在地震作用下的损伤破坏,特别是中柱柱底的损伤破坏明显减小;同时中柱的最大剪力和弯矩分别减小超过30%,但结构的最大和残余侧向变形仅减小了4.2%和5.3%.这种柱基自复位效果较差的主要原因是,能量耗散装置能够承担弯曲荷载,抵消了部分自复位力.

与Chen等人^[62]的思路类似,杜修力等人^[63]与王子里^[64]提出了一种基于韧性设计的自复位新型截断柱,如图23所示.与自复位耗能柱基的差别在于,柱端设置钢棒,起到剪力键的作用,主要防止地震中,中柱与顶底梁之间发生相对滑移.自复位力主要由结构顶板与上覆土体的重力提供.拟静力推覆模拟表明,当在中柱中间设置预应力钢筋时,中柱的自复位效果有所提高,如图24所示.但当该新型柱应用于地下结构,进行地震反应分析时,虽然结构侧墙与中柱的损伤程度有了一定程度的减小,但中柱残余位移的减小量也并不

图 22 (网络版彩图)自复位耗能柱基^[62]

Figure 22 (Color online) Self-centering energy-dissipation column base ^[62].

图 23 (网络版彩图)新型自复位柱^[64]

Figure 23 (Color online) Self-centering column ^[64].

显著.杜修力等人^[65]研发了一种端部铰接黏弹性自复位摇摆柱,该型柱的自复位力也是通过上覆土体的重力与内置的预应力钢筋提供,由于在柱脚设置了软钢阻尼器,因而能够减小柱端在地震中的损伤破坏程度.

值得注意的是,研究表明,地下结构的自复位效果并不明显,同时三神厚等人^[44]也基于理论分析的方法得出,中柱所受轴力对其自复位效果的影响并不显著.这主要是由于地下结构的地震反应受围岩土体的约束,要使结构恢复到震前的位置,必须提供足够的恢复力,以使围岩土体的变形量减小至零.而结构

图 24 (网络版彩图)截断柱与预应力截断柱残余变形^[64]
Figure 24 (Color online) Residual deformation of truncated column and prestress truncated column [64].

上覆土体的重力与预应力筋的合力,无法提供使围岩土体恢复至初始位置所需的恢复力。

以上分析可知,虽然研究者关注了地下结构的恢复韧性,但没有重点关注震后地下结构功能的恢复程度。对地下结构震后的修复费用、修复时间和功能完全恢复的动态变化过程等的研究仍然是空白。

5 结论与展望

地下结构抗震韧性研究取得了一定的成果,但由于地下结构地震损伤破坏案例较少,相关研究起步也较晚。地下结构抗震韧性的研究,还主要集中在提升结构的抗力韧性方面。关于提升新建地下结构抗力韧性的研究相对较多,其目的主要是提通过保证地下结构抗震关键支撑柱的安全,来增强整体结构抵抗地震荷载的能力。无论是通过切断荷载传力路径减小传递至中柱的地震荷载,还是采用新型结构体系提高结构整体的侧向变形能力,都能够有效地减小结构中柱在地震中的损伤破坏。关于既有地下结构的抗震加固,

也是通过提高中柱的水平向变形能力,实现对结构整体抗力韧性的提升。相关的技术措施,都是基于地下结构地震破坏机理和失效模式的防震控制措施。

目前关于地下结构恢复韧性的研究相对较少,且仍然不深入。地下结构震后功能恢复的核心思想,或是在柱端设置易损性部件,实现震后损伤部件的快速更换;或是通过中柱的变形产生自恢复力,以期减小或消除震后结构的残余变形。这些思想和方法,大部分都是从地上建筑结构移植而来,关注的重点是结构中柱,具有针对性的地下结构恢复韧性的技术措施研究相对较少。因此,地下结构韧性抗震的研究还处于初级阶段。

地下结构韧性抗震的研究滞后的主要原因,在于鲜有韧性抗震地下结构的应用实例,更没有韧性抗震地下结构遭受地震检验的案例。对地下结构韧性抗震的研究,大多还采用数值模拟和解析分析等手段,提出的一些技术措施缺少大量的试验数据进行验证,同时缺少大型地下结构振动台模型试验数据的支撑。

为了经济高效地发展抗震韧性地下结构、结构震后功能可恢复性的研究,不能拘泥于某一构件或节点。地下结构赋存于围岩土体中,其抗力韧性的提升和恢复韧性的实现,不能忽视围岩土体的影响。所以恢复韧性的研究,不能沿用地地上结构韧性抗震的方法,应该从地下结构自身的受力特性出发,结合原有的基于性能的抗震理念;综合考虑地下结构-围岩土体动力相互作用、构件重要性与易损性、震后修复经济与时间成本等多个因素开展研究;同时关注地震对地下结构中非结构构件和设备性能的影响,尤其是地震导致的设备和其他子系统无法正常运行造成的经济成本与对城市系统功能恢复造成的影响,提出针对地下结构韧性抗震的评价方法与防震技术措施。还需要进行示范性的工程应用,可将目前相对成熟的技术措施应用到重点设防的地下结构中,以保障震后地下结构使用功能的不中断。

参考文献

- 1 Han B M, Yang Z X, Yu Y R, et al. Statistical analysis of urban rail transit operation in the world in 2020: A review (in Chinese). *Urban Rapid Rail Transit*, 2021, 34: 5–11 [韩宝明, 杨智轩, 余怡然, 等. 2020年世界城市轨道交通运营统计与分析综述. *都市快轨交通*, 2021, 34: 5–11]
- 2 An X, Shawky A A, Maekawa K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin Earthquake. *Cement Concrete Compos*, 1997, 19: 241–257
- 3 Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station. *SOILS Found*, 1996, 36: 283–300

- 4 Wang W L, Wang T T, Su J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake. *Tunn Undergr Space Tech*, 2000, 16: 133–150
- 5 Wang Z Z, Gao B, Jiang Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 546–558
- 6 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of urban rail transit structures in china (in Chinese). GB 50909-2014. 2014 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构抗震设计规范. GB 50909-2014. 2014]
- 7 Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthq Spectra*, 2003, 19: 733–752
- 8 Zhai C H, Liu W, Xie L L. Progress of research on city seismic resilience evaluation (in Chinese). *J Build Struct*, 2018, 39: 1–9 [翟长海, 刘文, 谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展. 建筑结构学报, 2018, 39: 1–9]
- 9 Lv X L, Chen C. Research progress in structural systems with replaceable members (in Chinese). *Earthq Eng Eng Dyn*, 2014, 34: 27–36 [吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展. 地震工程与工程振动, 2014, 34: 27–36]
- 10 Zhou Y, Wu H, Gu A Q. Earthquake engineering: From earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience (in Chinese). *Eng Mech*, 2019, 36: 1–12 [周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性. 工程力学, 2019, 36: 1–12]
- 11 Yang J, Li D P, Zhai C H, et al. The research status and key scientific problems of urban seismic resilience (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2019, 5: 525–532 [杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题. 中国科学基金, 2019, 5: 525–532]
- 12 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of underground structures (in Chinese). GB/T 51336-2018. 2019 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下结构抗震设计标准. GB/T 51336-2018. 2019]
- 13 Du X L, Jiang J W, Xu Z G, et al. Study on quantification of seismic performance index for rectangular frame subway station structure (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2019, 52: 111–119 [杜修力, 蒋家卫, 许紫刚, 等. 浅埋矩形框架地铁车站结构抗震性能指标标定研究. 土木工程学报, 2019, 52: 111–119]
- 14 Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunn Undergr Space Tech*, 2001, 16: 247–293
- 15 Xu Z, Du X, Xu C, et al. Numerical analyses of seismic performance of underground and aboveground structures with friction pendulum bearings. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2020, 130: 105967
- 16 Penzien J. Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2000, 29: 683–691
- 17 Huo H, Bobet A, Fernández G, et al. Analytical solution for deep rectangular structures subjected to far-field shear stresses. *Tunn Undergr Space Tech*, 2006, 21: 613–625
- 18 Huo H, Bobet A, Fernández G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: Evaluation of the failure of the Daikai station. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2005, 131: 1522–1533
- 19 Zhuang H Y, Cheng S G, Chen G X. Numerical simulation and analysis of earthquake damages of Daikai metro station caused by Kobe earthquake (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2008, 29: 245–250 [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. 岩土力学, 2008, 29: 245–250]
- 20 Du X L, Ma C, Lu D C, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai station under seismic loads (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2017, 50: 53–62 [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. 土木工程学报, 2017, 50: 53–62]
- 21 Du X L, Li Y, Xu C S, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2018, 40: 223–236 [杜修力, 李洋, 许成顺, 等. 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. 岩土工程学报, 2018, 40: 223–236]
- 22 Ma C, Lu D C, Du X L, et al. Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2019, 119: 265–280
- 23 Zhao H, Yuan Y, Ye Z, et al. Response characteristics of an atrium subway station subjected to bidirectional ground shaking. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2019, 125: 105737
- 24 Zhao H, Yu H, Yuan Y, et al. Cyclic loading behavior of a repaired subway station after fire exposure. *Tunn Undergr Space Tech*, 2019, 84: 210–217
- 25 Lu L, Qiu J, Yuan Y, et al. Large-scale test as the basis of investigating the fire-resistance of underground RC substructures. *Eng Struct*, 2019, 178: 12–23

- 26 Li Y, Xu C S, Du X L. Causal analyses of different degree of earthquake damage occurred on Daikai subway station and its running tunnels during Kobe earthquake (in Chinese). *J Disaster Prev Mitig Eng*, 2020, 3: 326–336 [李洋, 许成顺, 杜修力. 阪神地震中大开地铁车站和区间隧道破坏差异成因研究. *防灾减灾工程学报*, 2020, 3: 326–336]
- 27 Takeuchi M, Nakamura T, Kurimoto M, et al. The research on the optimum earthquake performance of rectangular tunnel (in Japanese). *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2003, 6: 1–8 [竹内幹雄, 中村敏晴, 栗本雅裕, 等. 箱型断面最適耐震性能関研究. *土木学会地震工学論文集*, 2003, 6: 1–8]
- 28 Ma C, Lu D C, Du X L. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings. *Tunn Undergr Space Tech*, 2018, 74: 1–9
- 29 Zheng Y, Yue C. Shaking table test study on the functionality of rubber isolation bearing used in underground structure subjected to earthquakes. *Tunn Undergr Space Tech*, 2020, 98: 103153
- 30 Liu Z, Chen Z, Liang S, et al. Isolation mechanism of a subway station structure with flexible devices at column ends obtained in shaking-table tests. *Tunn Undergr Space Tech*, 2020, 98: 103328
- 31 Zhuang H Y, Fu J S, Zhu M X, et al. Seismic performance of underground subway station with elastic slipping bearing fixed on the top of columns (in Chinese). *Hazard Control Tunn Undergr Eng*, 2019, 1: 57–67 [庄海洋, 付继赛, 朱明轩, 等. 柱顶设置滑移支座时地铁地下车站结构抗震性能分析. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1: 57–67]
- 32 Liu Z Q, Chen Z Y. Seismic control strategy of a multi-story subway station based on probability density evolution method. *Int J Comput Method*, 2020, 17: 1940014
- 33 Dong Z F, Zhai P F, Yin J H, et al. A self-centering seismic mitigation system and its construction method for improving the seismic performance of central columns of subway stations (in Chinese). *China Patent*, CN 110512646 A, 2019-11-29 [董正方, 翟鹏飞, 尹俊红, 等. 一种提高地下车站中柱抗震性能的自复位减震系统及施工方法. *中国专利*, CN 110512646 A, 2019-11-29]
- 34 Chen Z Y, Ge H B, Usami T, et al. Parametric study on the hysteretic behavior of shear panel dampers (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2008, 41: 13–17 [陈之毅, 葛汉彬, 宇佐美勉, 等. 剪切板阻尼器的滞回性能参数研究. *土木工程学报*, 2008, 41: 13–17]
- 35 Chen Z Y, Chen W, Bian G Q. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing shear panel dampers. *Adv Struct Eng*, 2014, 17: 1343–1357
- 36 Huan Y, Fang Q, Chen L, et al. 3D nonlinear damage analysis of metro station structures under strong seismic loading (in Chinese). *J Beijing Univ Technol*, 2011, 37: 852–862 [还毅, 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. *北京工业大学学报*, 2011, 37: 852–862]
- 37 Chen Z Y, Zhao H, Lou M L. Seismic performance and optimal design of framed underground structures with lead-rubber bearings. *Struct Eng Mech*, 2016, 58: 259–276
- 38 Tao L J, An J H, Ge N. Isolation effect analysis on bidirectional RFPS bearing applied in the metro stations engineering (in Chinese). *Earthq Eng Eng Dyn*, 2016, 36: 52–58 [陶连金, 安军海, 葛楠. 地铁车站工程应用双向RFPS支座隔震效果研究. *地震工程与工程振动*, 2016, 36: 52–58]
- 39 Lu D, Wu C, Ma C, et al. A novel segmental cored column for upgrading the seismic performance of underground frame structures. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2020, 131: 106011
- 40 Lu D C, Li Q, Du X L, et al. Seismic performance of subway station based on failure model control (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 8: 1400–1407 [路德春, 李强, 杜修力, 等. 基于失效模式控制的地铁车站结构抗震性能研究. *岩土工程学报*, 2019, 8: 1400–1407]
- 41 Xu Z G. Research on seismic analysis methods and preliminary study in seismic control technologies of subway underground structures in transverse cross section (in Chinese). *Dissertation for Doctoral Degree*. Beijing: Beijing University of Technology, 2019 [许紫刚. 地铁地下结构横断面抗震分析方法研究及减震技术初探. 博士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2019]
- 42 Xu C S, Wang Y X S, Du X L, et al. Seismic mitigation effects of split columns in underground station structures (in Chinese). *Chin J Geot Eng*, 2021, 43: 624–633 [许成顺, 汪洋筱珊, 杜修力, 等. 分体柱在地下车站结构中的减震效果研究. *岩土工程学报*, 2021, 43: 624–633]
- 43 Shao W, Mao N H, An B Z, et al. A kind of seismic ductility central columns for subway station. *PRC Patent*, CN 208396141 U, 2019-01-18 [邵文, 毛念华, 安秉忠, 等. 一种地铁车站抗震延性中柱. *中国专利*, CN 208396141 U, 2019-01-18]
- 44 Mikami A, Konagai K, Sawada T. Stiffness design of isolation rubber for center columns of tunnel (in Japanese). *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2001, 7: 415–420 [三神厚, 小長井一男, 澤田勉. 中柱免震装置形状各自由度剛性関係. *土木学会論文集*, 2001, 7: 415–420]
- 45 Du X L, Yin M S, Liu H T, et al. Analysis of technical performance of underground structure seismic truncated columns with replaceable column foot (in Chinese). *Technol Earthq Disaster Prev*, 2019, 14: 524–534 [杜修力, 阴孟莎, 刘洪涛, 等. 柱脚可更换的地下结构抗震截断柱技术性

- 能分析. 震害防御技术, 2019, 14: 524–534]
- 46 Yin M S. Seismic performance analysis of subway station with replaceable column feet (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing University of Technology, 2019 [阴孟莎. 柱脚可更换式地铁站抗震性能分析. 硕士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2019]
- 47 Qiu D P. Seismic responses and control measures of underground large scale frame structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2019 [邱大鹏. 大跨度地下框架结构地震响应与减震控制措施. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2019]
- 48 Fu J S. Study on seismic isolation method and efficiency of subway underground station structure (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing Tech University, 2019 [付继赛. 地铁下车站结构减隔震方法与效能研究. 硕士学位论文. 南京: 南京工业大学, 2019]
- 49 Kiryu S, Murono Y, Morikawa H. Seismic response of a cut-and-cover tunnel isolated by polymer material. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2012, 41: 2043–2057
- 50 Wang G B, Ba F, Ma X F, et al. Research on seismic reduction and isolation measures for urban underground station structure. *J Earthq Tsunami*, 2021, doi: 10.1142/S1793431121500123
- 51 Suzuki T. The axisymmetric finite element model developed as a measure to evaluate earthquake responses of seismically isolated tunnels. In: *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, 2000
- 52 Kim D S, Konagai K. Key parameters governing the performance of soft tunnel coating for seismic isolation. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2001, 30: 1333–1343
- 53 Konagai K, Kim D S. Simple evaluation of the effect of seismic isolation by covering a tunnel with a thin flexible material. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2001, 21: 287–295
- 54 Hasheminejad S M, Miri A K. Seismic isolation effect of lined circular tunnels with damping treatments. *Earthq Eng Eng Vib*, 2008, 7: 305–319
- 55 Chen Z Y, Shen H. Dynamic centrifuge tests on isolation mechanism of tunnels subjected to seismic shaking. *Tunn Undergr Space Tech*, 2014, 42: 67–77
- 56 Wang Z Z, Jiang Y J, Zhu C A. Seismic energy response and damage evolution of tunnel lining structures. *Eur J Environ Civil Eng*, 2019, 23: 758–770
- 57 Wang Z H, Shen S Y, Cui Y Q, et al. Experimental analysis on size effect of axial compressive behavior for reinforced concrete columns strengthened with CFRP (in Chinese). *J Harbin Inst Technol*, 2020, 52: 112–120 [王作虎, 申书洋, 崔宇强, 等. CFRP加固混凝土柱轴压性能尺寸效应试验分析. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52: 112–120]
- 58 Ma C, Wang Z H, Lu D C, et al. Seismic damage evaluation of CFRP strengthen columns in subway station (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42: 2249–2256 [马超, 王作虎, 路德春, 等. CFRP加固地铁车站结构中柱地震损伤评价研究. 岩土工程学报, 2020, 42: 2249–2256]
- 59 An L X. Research on seismic performance of columns in metro station structure (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing University of Technology, 2016 [安林轩. 地铁车站结构中柱减震性能研究. 硕士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2016]
- 60 Tang M C, Manzanarez R. San Francisco-Oakland bay bridge design concepts and alternatives. In: *Proceedings of the Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey*. Washington, 2001. 1–7
- 61 Lv X L. *Earthquake Resilient Structures—Basic Concept and Design Methodology* (in Chinese). Beijing: China Architecture and Building Press, 2020 [吕西林. 可恢复功能防震结构——基本概念与设计方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020]
- 62 Chen Z, Zhou Y. Seismic performance of framed underground structures with self-centering energy-dissipation column base. *Adv Struct Eng*, 2019, 22: 2809–2822
- 63 Du X L, Wang Z L, Liu H T. Study of a seismic new system of underground frame structure based on toughness design (in Chinese). *Technol Earthq Disaster Prev*, 2018, 13: 493–501 [杜修力, 王子里, 刘洪涛. 基于韧性设计的一种地下框架结构抗震新体系研究. 震害防御技术, 2018, 13: 493–501]
- 64 Wang Z L. Study of a seismic new system of underground frame structure based on toughness design (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing University of Technology, 2018 [王子里. 基于韧性设计的一种地下框架结构抗震新体系研究. 硕士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2018]
- 65 Du X L, Han R B, Xu C S, et al. A type of self-centering rocking column with hinge ends for underground structures (in Chinese). China Patent, CN 110952721 A, 2020-04-03 [杜修力, 韩润波, 许成顺, 等. 一种用于地下结构的端部铰接粘弹性自复位摇摆柱. 中国专利, CN 110952721 A, 2020-04-03]

Earthquake resilience of urban underground structures: State of the art

LU DeChun¹, MA Chao², DU XiuLi¹ & WANG ZuoHu²

¹ *Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

² *School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China*

Earthquake-resilient underground structures can reduce earthquake-induced damage, protect life and property, and maintain their functions with minor or no repair after an earthquake. As earthquake-resilient cities are increasingly developed, improving the seismic resilience of underground structures has become a popular topic in research on underground structure earthquake engineering. This paper systematically summarizes research progress on the improved seismic resilience of urban underground structures. The principle of earthquake-resilient underground structures is first introduced. Then, the latest achievements in these structures are summarized from two aspects, namely, improvements in the seismic performance of underground structures during earthquakes and restoration of the function of underground structures after earthquakes. Finally, the research trend of earthquake-resilient underground structures is discussed. Most of the technologies proposed to improve the seismic resilience of underground structures focus on reducing earthquake-induced damage. Research on restoring the function of underground structures after earthquakes is generally insufficient. Future work should focus on restoring the function of underground structures after earthquakes, especially the restoration degree and speed. Moreover, new structural systems and larger-scale model tests, which form the basis of assessments of the seismic behavior of underground structures, should be further developed. The seismic design standards and codes of earthquake-resilient underground structures should be put forward, and the popularization and further applications of earthquake-resilient underground structures should be conducted.

rectangular underground structure, earthquake resilience, earthquake philosophy, seismic performance, function restoring

doi: [10.1360/SST-2021-0013](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0013)