

DOI: 10.11779/CJGE20220025

地下结构地震破坏的大比尺循环推覆加载模型试验方法及其验证

杨靖¹, 庄海洋^{1,2}, 王伟¹, 张广宇¹, 陈苏³

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;

3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

摘要: 目前振动台模型试验很难真实模拟地下结构的地震破坏特征及其发展过程, 以大开地铁车站结构为原型, 考虑周围土压力等效, 基于单层地下结构抗震性能的层间位移角划分体系, 确定了以位移控制的循环加载曲线, 设计并开展了1:7的大比尺模型结构推覆试验, 并与数值模拟结果进行了对比。结果表明: 车站结构中柱端部会先于结构的其他构件出现裂缝, 发生先拉后压破坏, 随着中柱承载能力的下降, 结构内力开始重新分配, 上覆土压逐渐向侧墙转移, 进而导致顶板端部和侧墙顶底端裂缝开始发展, 最终结构整体失去承载能力。与数值模拟结果相比, 设计的大比尺地下结构地震破坏推覆加载试验能够准确模拟单层地下车站结构的地震破坏过程。同时, 与已有的单层地下车站抗震性能水平研究结果对比, 进一步验证了新模型试验方法能够合理再现单层地下结构抗震性能水平。

关键词: 地铁地下车站结构; 循环加载推覆试验; 数值模拟; 抗震性能水平; 地震破坏

中图分类号: TU354

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)04-0796-09

作者简介: 杨靖(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事工程振动与地下结构抗震研究。E-mail: yangjing9607@126.com。

Large-scale cyclic-loading pushover test method and its verification for seismic damage of underground structures

YANG Jing¹, ZHUANG Haiyang^{1,2}, WANG Wei¹, ZHANG Guangyu¹, CHEN Su³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. School of Civil Engineering and

Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China, 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing

University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: It is difficult to effectively simulate the seismic damage characteristics of underground structures and their failure process in the current shaking table model tests. A large-scale 1:7 pushover test on an underground subway station structure is designed and carried out. Taking Daikai subway station structure as the prototype, considering the equivalent soil pressure and the interlayer displacement ratio division system, the cyclic-loading curve based on displacement is finally determined. At the same time, it is compared with the results of the numerical simulation. The results show that the tensile cracks appear at the ends of the column earlier than at the other components of the structure, and then the compression damage occurs. As the bearing capacity of the column decreases, the internal forces of the structure begin to redistribute, and the overlying soil pressure gradually transfers to the walls, which causes the cracks at the ends of the roof to start to develop. At the same time, the concrete at the ends of the walls is damaged, and finally, the structure eventually loses its bearing capacity. Compared with the numerical simulation results, the designed large-scale pushover tests on the seismic response of the underground structures can accurately simulate the seismic failure process of the single-story underground station structures. At the same time, compared with the existing researches on the seismic performance levels of the single-story underground subway station structures, it is further verified that the proposed new large-scale pushover test method can reasonably reproduce the seismic performance levels of the single-story underground structures.

Key words: underground subway station; cyclic-loading pushover test; numerical simulation; seismic performance level; seismic damage

0 引言

近些年, 建设轨道交通已成为解决城市交通拥堵

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978333); 南京工业大学优秀博士学位论文培育计划项目

收稿日期: 2022-01-06

*通信作者(E-mail: zhuang7802@163.com)

泥：石灰：砂：石子：水=1：1：5.2：6.4：1.8的微粒混凝土配合比，将与模型车站制作过程进行同养的标准试块进行了抗压强度试验，最终测得标准抗压强度为 8.62 MPa，由此确定混凝土材料弹性模量的相似比为 1：1.54。表 1 给出了本次模型试验体系的设计相似比，图 1（c）给出了模型车站结构的制备过程。

表 1 试验设计相似比

Table 1 Design similarity ratios of tests

| 类型 | 物理量 | 相似关系 | 相似比 |
|------|-------------|--------------------------------|------------------|
| 几何特性 | 长度 l | S_l | 1/7 |
| | 惯性矩 I | $S_I = S_l^4$ | 1/7 ⁴ |
| | 线位移 | $S_u = S_l$ | 1/7 |
| 材料特性 | 质量密度 ρ | S_ρ | 1/1 |
| | 弹性模量 | S_E | 1/1.54 |
| | 应变 | S_ε | 1/1 |
| | 应力 | $S_\sigma = S_\varepsilon S_E$ | 1/1.54 |

1.2 循环推覆加载试验装置设计

本次试验在南京工业大学江苏省土木工程与防灾减灾重点实验室开展，设备采用美国 MTS 公司生产的 50 t 液压作动器。图 2（a）给出了本文推覆试验方法的示意图，图 2（c）给出了试验现场推覆装置实际安装后的照片。区别于已有研究中推覆试验的设计，本试验为了避免在结构上开孔，以及实现循环位移荷载的施加，定制了如图 2（b）所示的型钢，且在型钢与结构接触面上粘贴 1 cm 厚的橡胶板，以缓冲钢材与混凝土之间的硬接触，同时尽可能模拟结构与土体之间的摩擦。

自由场分析表明土体的剪切变形随着深度的增加逐渐减小，呈现倒三角变形模式，按照 Wang^[16]建立的浅埋矩形地下结构的简化计算方法，地下结构顶部变形为柔度比与自由场土体剪切变形的乘积，同样呈现倒三角的变形模式，因此本文试验采用倒三角位移加载模式，将最大位移作用在结构顶部，通过螺纹钢连接两块型钢，安装到结构顶部，其中一端与作动器相连接，形成推覆加载抱杆体系，模拟土与地下结构相互作用中土体始终推着地下结构产生变形的地震响应机理，纠正了已有部分地下结构推覆试验中单边作动器加载所带来的地下结构楼板受拉的错误加载方式。

对于地下结构，模拟侧向土压力是十分有必要的。本试验中地下结构侧向土压力是按照正常使用阶段的静止土压力计算的，原型车站埋深为 4.8 m，根据几何相似比埋深等效为 0.686 m。根据式（1）计算其侧向土压力，再由式（3）计算出土压力合力，

$$p_0 = K_0 \gamma z \quad , \quad (1)$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad , \quad (2)$$

$$E_0 = \sum \frac{(p_n + p_{n+1})h_n}{2} \quad . \quad (3)$$

式中： p 表示结构所在位置土的压强； K_0 表示静止土压力系数； ν 表示土的泊松比； z 表示土层深度； γ 表示土的重度； h 表示结构侧土层厚度。最终求得土压力合力约为 6324 N。试验中具体实施方案如图 2（c），采用两根螺纹钢作为拉杆，连接型钢安装到侧墙上，通过在端部安装压力计，将侧向土压力合力等效加载到两根拉杆上，每根拉杆加载压力为 3162 N，实际预应力拉杆安装高度距底板 40 cm。车站结构底面铺设橡胶垫，在增加底面平整度的同时模拟混凝土与土体之间的摩擦，此外可以减小底部约束装置对结构底板与侧墙连接点的约束，从而更好的模拟底板的受力特征。

对于上覆土压力，通过在地下车站结构顶板铺设橡胶垫再堆置铅块的方法进行模拟，橡胶垫可以有效传递离散堆放的铅块的总重量，同时相比在顶部设置固定千斤顶利用型钢传递上覆压力的做法，可以有效避免顶板局部纵向受压对结构在受到水平位移荷载作用下的不利影响，按照原型车站 4.8 m 的埋深及相似比设计原则，本次试验地下结构顶部堆载铅块总质量为 1.75 t。具体试验加载方法已获国家授权发明专利^[17]。

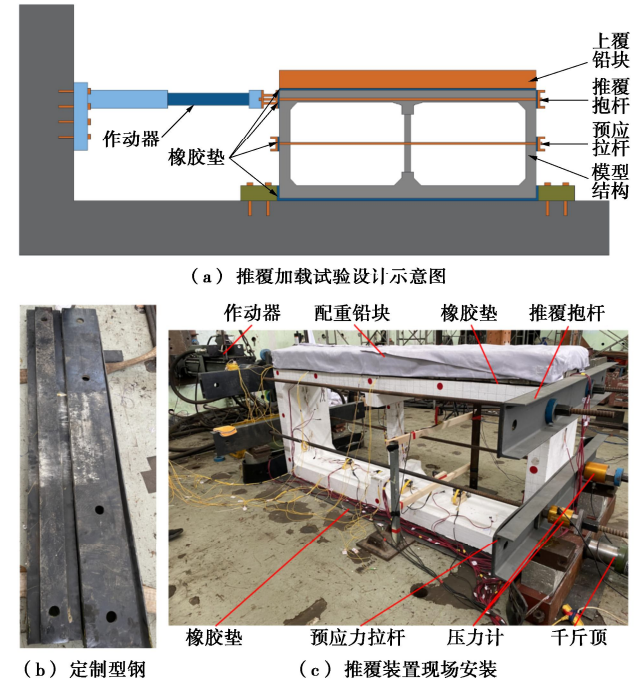


图 2 推覆加载试验设计及具体模型实施

Fig. 2 Design and implementation of pushover test

1.3 模型试验测点布置

图 3 给出了本次试验的传感器测点布置图，包含

24 个应变片测点, 16 个光纤测点, 6 个激光位移计测点以及 7 个动态标靶测点。其中应变片布置在结构易损部位的混凝土表面, 而光纤则在浇筑混凝土之前布置在应变片测点对应的钢筋表面, 埋在混凝土内部。在结构内部布置了 6 个激光位移计测点, 用以监测顶板的纵向位移及中柱的水平向位移。对于结构整体的位移监测, 采用的是非接触式动态位移测试技术^[18]。

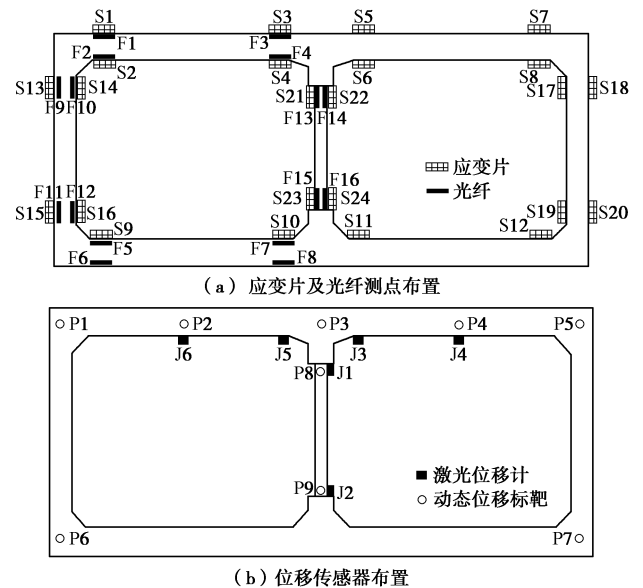


图 3 模型车站结构测点布置

Fig. 3 Sensors of model station

1.4 推覆试验的数值模型建立

为了验证本文提出的循环推覆加载模型试验的可行性, 基于 Abaqus 软件建立了该模型试验的数值模型, 图 4 (a) 给出了数值模型示意图。地铁车站结构置于底部承台之上, 顶部设置了推覆抱杆, 抱杆的一端为位移荷载的施加面。侧向土压施加在结构侧墙, 其施加位置及压力大小均与实际试验相同; 上覆土压施加在结构顶面, 其大小亦参照实际模型试验。数值模型中地铁车站结构与承台及抱杆的接触面间均设置了橡胶垫层, 法向接触采用“硬”接触, 即受拉下接触面间产生分离, 切向接触采用罚函数法, 参照橡胶与混凝土之间的动摩擦系数及土-结构动力相互作用中土与结构之间的摩擦系数, 橡胶与结构之间的接触摩擦系数设置为定值 0.4^[19]。地铁车站结构混凝土采用塑性损伤本构模型, 表 2 给出了模型结构混凝土的具体参数。图 4 (b) 给出了模型车站的钢筋网格, 钢筋弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。数值模型中, 地铁车站结构混凝土采用 C3D8R 实体单元 (八节点六面体缩减积分单元) 进行模拟, 网格尺寸为 0.025 m, 钢筋采用 T3D2 单元 (三维二节点杆单元) 进行模拟, 网格长度为 0.045 m。此外, 下部安装承台采用 C30 混凝土模拟, 推覆抱杆采用与钢筋相同的材料参数,

远大于地铁车站结构刚度, 不会在位移荷载施加过程中产生过大变形而影响加载效果。

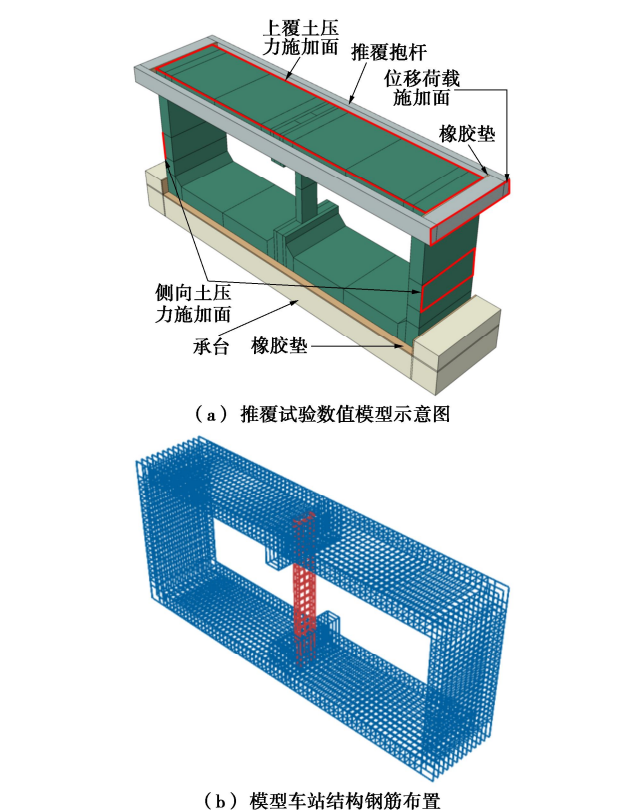


图 4 推覆试验数值模型建立

Fig.4 Establishment of numerical model for pushover tests

表 2 模型车站结构混凝土本构参数

Table 2 Constitutive parameters of concrete for model station structures

| 参数名称 | 数值 | 参数名称 | 数值 |
|----------|-------------------------------------|----------|----------------------------------|
| 密度 | $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ | 初始压缩屈服应力 | $\sigma_{c0} = 3.46 \text{ MPa}$ |
| 膨胀角 | $\psi = 36.31^\circ$ | 极限压应力 | $\sigma_{cu} = 4.94 \text{ MPa}$ |
| 弹性模量 | $E_0 = 1.9 \times 10^4 \text{ MPa}$ | 拉伸刚度恢复系数 | $w_t = 0$ |
| 泊松比 | $\nu = 0.2$ | 压缩刚度恢复系数 | $w_c = 1$ |
| 初始拉伸屈服应力 | $\sigma_{t0} = 1.06 \text{ MPa}$ | 损伤变量 | d_t, d_c 见表 3 及表 4 |

1.5 模型试验加载方案

已有的研究已经充分表明地下结构在地震作用下, 其破坏机理明显区别于地上结构, 主要受制于结构周围土层的位移^[20], 因此本次试验采用位移控制的加载模式, 并且进一步实现了循环位移的加载。根据 Zhuang 等^[19]建立的大开地铁车站基于层间位移角划分的抗震性能等级限值体系, 如图 5 所示, 本次试验确定了 5 个加载循环。对于加载速率, 由于是拟静力

表 3 模型车站结构混凝土受压损伤参数

| | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Table 3 Parameters of compression damage for model station structures | | | | | | | |
| 压应力/MPa | 3.46 | 4.94 | 3.90 | 3.21 | 2.74 | 2.40 | 2.14 |
| 塑性应变/% | 0 | 0.063 | 1.730 | 3.367 | 4.977 | 6.561 | 8.120 |
| 损伤因子 d_c | 0 | 0.465 | 0.893 | 0.930 | 0.947 | 0.957 | 0.963 |

表 4 模型车站结构混凝土受拉损伤参数

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Table 4 Parameters of tensile damage for model station structures | | | | | | | | | | | |
| 拉应力/MPa | 1.060 | 1.009 | 0.837 | 0.484 | 0.324 | 0.210 | 0.084 | 0.053 | 0.033 | 0.013 | 0.007 |
| 开裂应变/% | 0 | 0.002 | 0.006 | 0.018 | 0.032 | 0.060 | 0.223 | 0.439 | 0.869 | 3.412 | 9.531 |
| 损伤因子 d_t | 0 | 0.125 | 0.349 | 0.650 | 0.778 | 0.867 | 0.956 | 0.975 | 0.986 | 0.996 | 0.998 |

试验,加载速率并不是本次试验主要考虑的影响因素,但在试验开展前期的数值模拟验证中发现,加载速率过大会导致计算不收敛,因此最终将加载速率确定在 0.7 mm/s。第一级加载的最大位移为 2.8 mm,其后每级加载的增量为 2.8 mm,即结构层间位移角从 0.27%依次加载至 0.55%,0.82%,1.1%及最终的 1.4%。按照 Zhuang 等^[19]建立的地下结构抗震性能评价体系对于性能等级的描述,在设定的层间位移角发展过程中,地铁车站结构将会由轻微破坏逐级发展至倒塌破坏,即可以在试验过程中观察到地下结构由弹性工作状态发展至塑性工作状态的全过程。

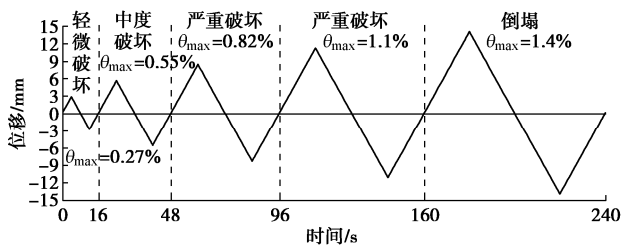


图 5 推覆加载试验位移加载曲线

Fig. 5 Loading curves of displacement of pushover tests

2 模型试验方法的验证

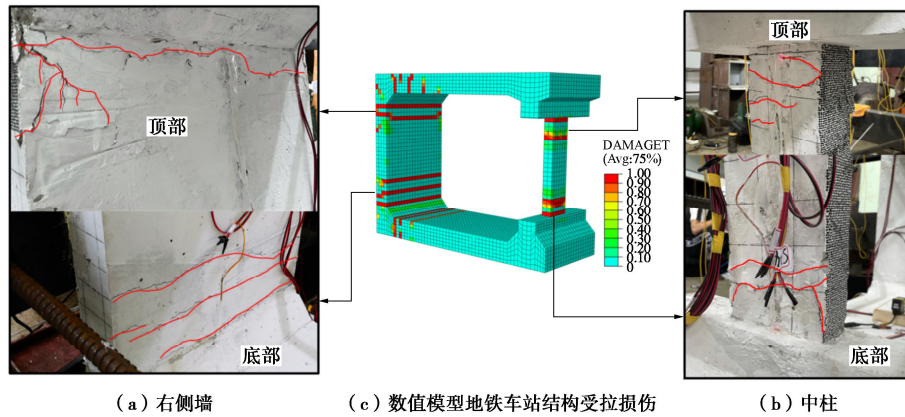
需要说明的是,在加载试验过程中对于地铁车站结构侧墙外侧及顶板上侧的裂缝的观察受到了试验装置的限制,但可通过该些部位内侧混凝土的破坏特征来体现。

试验加载的第一阶段,地铁车站结构的最大层间位移角为 0.27%。经历第一阶段循环位移加载后,在车站结构侧墙及中柱表面可以观察到明显的混凝土表层开裂。以右侧墙内侧为例,见图 6 (a),侧墙下部相比于上部破坏更为严重,裂缝以沿结构纵向发展为主,出现了 3 条贯穿横截面表层的细裂缝。而在墙体上部除发展了一条贯穿横截面的细裂缝以外,自墙体与顶板加腋处发展出一定数量的斜向细裂缝。图 6(b)给出了车站结构中柱的裂缝发展情况,中柱裂缝主要集中在端部,柱底混凝土形成了两条贯穿截面的表层

裂缝,柱顶形成了一条贯穿细裂缝,及自截面边界向内发展的细裂缝。上述破坏状态表明,车站结构整体处于受拉损伤破坏,整体上仍处于弹性工作状态,但局部区域已经开始进入塑性状态。与图 6 (c) 数值模拟结果相比,推覆试验实测的侧墙和中柱的裂缝与数值模拟计算得到的裂缝分布基本一致,主要区别在于模型试验中由于受到加载装置的预加轴向压力,模型结构顶板和底板未发现明显的受拉裂缝。

在加载的第二阶段,地铁车站结构层间位移角最大为 0.55%。此时左侧墙上部破坏较为严重,如图 7 (a),其中 1—1'裂缝已贯穿整个墙体,混凝土表层细裂缝广泛分布,在内侧出现了一定数量的斜裂缝。由图 7 (b) 可看出中柱顶端已有竖向裂缝发育,其中 2 号裂缝自端部向下延伸达 15 cm,且表层混凝土呈现出脱落趋势,这表明中柱顶部混凝土已经发生轻微程度的受压破坏;而中柱底端混凝土仍以贯穿横截面的受拉裂缝为主。较上一个加载阶段显著不同的是底板与侧墙连接的加腋处出现了两条显著的贯穿纵向的裂缝,如图 7 (c) 所示,分别分布在加腋处与侧墙及底板交接的边界处。与数值模拟结果相比,总体破坏区域分布一致,主要区别在于图 7 (d) 中纵梁与中柱的连接处发生了明显的受拉破坏,而在实际试验过程中此处并未观察到混凝土开裂。

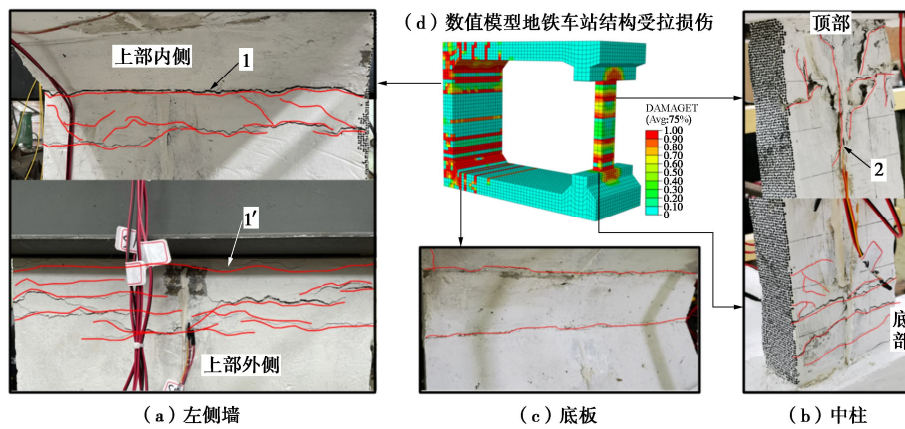
当试验加载至第三阶段结束,如图 8 (a), (b),在前两个阶段中发生破坏的区域出现了大面积的表层混凝土脱落,且可以观察到侧墙已经形成了多条贯穿整个墙体的裂缝。脱落区域集中表现在中柱端部及侧墙端部,且中柱顶部钢筋已裸露,其受压破坏程度相当严重。相比于上一阶段,在侧墙与顶板加腋处首次发现向顶板延伸的横向裂缝(图 8(a)中的 3 号裂缝),此外,顶板与侧墙连接处自上而下发育出多条细裂缝,且出现小区域的混凝土剥离,见图 8 (c);同样在顶板内侧观察到纵向裂缝(图 8 (a) 中的 4 号裂缝)。限于试验装置的设计,对顶板外侧不能直接观察,但可推断出此时顶板端部上侧已经形成了贯穿结构纵向



(a) 右侧墙 (c) 数值模型地铁车站结构受拉损伤 (b) 中柱

图6 地铁车站结构裂缝发展 (第一阶段, $IDR = 0.27\%$)

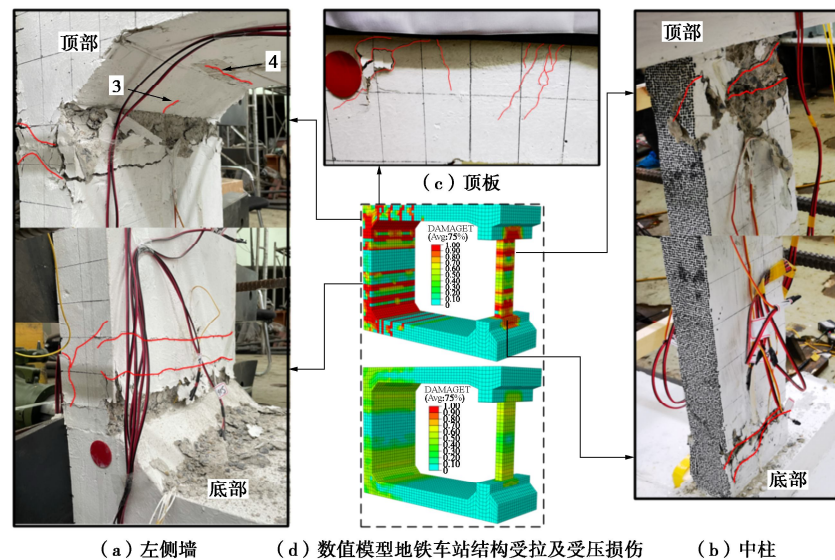
Fig. 6 Development of damage of subway station structures (first stage, $IDR = 0.27\%$)



(a) 左侧墙 (c) 底板 (b) 中柱

图7 地铁车站结构裂缝发展 (第二阶段, $IDR = 0.55\%$)

Fig. 7 Development of damage of subway station structures (second stage, $IDR = 0.55\%$)



(a) 左侧墙 (d) 数值模型地铁车站结构受拉及受压损伤 (b) 中柱

图8 地铁车站结构裂缝发展 (第三阶段, $IDR = 0.82\%$)

Fig. 8 Development of damage of subway station structures (third stage, $IDR = 0.82\%$)

的裂缝。与数值模拟结果相比,在地铁车站结构混凝土破坏的分布规律上基本一致,模型试验中顶板的破坏发展在这一阶段显现出来,滞后于数值模拟的结果,主要原因仍然是试验装置在安装过程中对顶板及底板

产生了预紧力,减弱了其受拉应力状态。这一阶段的结果表明车站结构已经进入了塑性工作状态,中柱承载能力在一定程度上有所降低,中柱顶端已形成了塑性铰机构。

试验加载到第四阶段,此时地铁站结构最大层间位移角为 1.1%。在该加载阶段后,如图 9(a)和图 9(b)所示,侧墙顶部和中柱端部混凝土发生明显的压碎破坏,完全变成塑性铰,基本失去了抵抗弯矩变形的能力,其中 5 号裂缝宽度较第三阶段时期显著增加,完全截断了墙体顶端的混凝土。侧墙底部两条贯穿墙体的裂缝之间发展出新的竖向裂缝,同样在墙体上部有竖向裂缝产生。图 9(c)显示第三阶段中已有的裂缝继续发展,且自顶板发展出多条新增的斜裂缝,可以推断出顶板端部已经发展出多条贯穿截面纵向的裂缝,也进入了塑性工作状态。该阶段的试验现象表明中柱端部已经发展成塑性铰机构,失去了基本的抗弯承载能力。地铁站结构内力开始重新分配,原本由中柱承担的上覆土压逐渐向侧墙转移,进一步

造成顶板端部裂缝及侧墙顶底部受压破坏的发展,使得侧墙顶部也发展成塑性铰机构。对比上一阶段,此加载阶段地下结构的破坏集中表现在塑性铰区域混凝土的进一步脱落。与数值模拟结果相比,试验方法的不足之处仍然表现在底板以及纵梁的破坏程度仍达不到数值模拟的效果。

试验加载的最后一个阶段,地铁站结构层间位移角为 1.4%。从图 10(a)可看出侧墙端部混凝土严重脱落,钢筋网成片外露,同时整个墙面遍布裂缝,墙体上部有大量新增的竖向裂缝,而下部的新增裂缝仍然以纵向裂缝为主,同时墙体裸露出的钢筋可以观察到明显的屈服变形。图 10(b)显示,相比于上一阶段,中柱仅端部的混凝土进一步脱落,柱体并未产生新的破坏痕迹,主要原因是上一阶段中柱端部已经

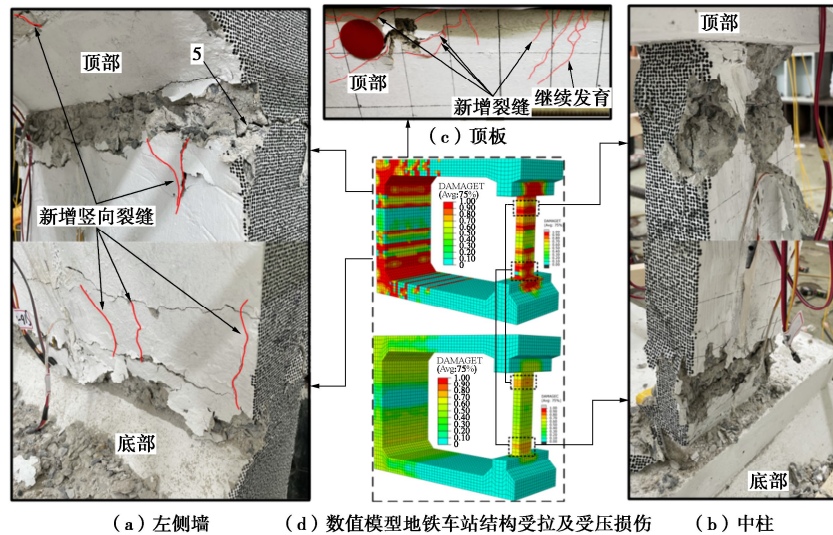


图 9 地铁站结构裂缝发展(第四阶段, IDR = 1.1%)

Fig. 9 Development of damage of subway station structures (fourth stage, IDR = 1.1%)

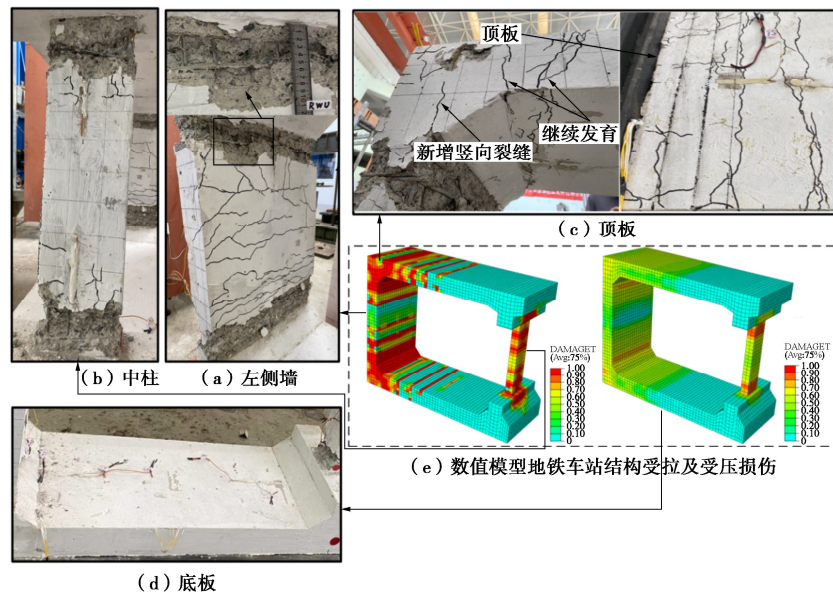


图 10 地铁站结构裂缝发展(第五阶段, IDR = 1.4%)

Fig. 10 Development of damage of subway station structures (fifth stage, IDR = 1.4%)

形成了完全的塑性铰机构,中柱在位移荷载的牵制下随端部转动,而不能有效传递别的构件传来的内力。

从图 10 (e) 的数值模拟结果也可发现,该阶段侧墙端部出现了明显的受压损伤。撤去上覆配重,进一步对顶板进行观察,从图 10 (c) 可看出,顶板与侧墙连接处的裂缝进一步发展,将顶板上侧与下侧的裂缝贯通,形成了多条贯穿顶板端部的裂缝。该阶段加载结束,可以判断该地铁车站结构已经失去承载能力,极易发生倒塌破坏。就试验现象与数值模拟结果相比而言,存在的问题仍然表现在底板及纵梁的破坏程度不达预期,在图 10 (d) 中也可发现底板基本处于较为完好的状态,但在整体的地震破坏分布上基本一致。

3 主要结论与探讨

对比分析 5 个阶段的试验现象,可以看出单层地下车站结构在受到水平向循环位移加载后:①侧墙及中柱端部是显著的易损部位,会先于结构其他部位发生混凝土开裂破坏,最终形成完全塑性铰;②在循环位移荷载作用下,中柱端部混凝土在产生受拉开裂后发生受压破坏,造成中柱承载能力下降,抗侧移能力同步降低,进而结构内力会进行重新分配,原先由中柱承载的上覆土压力会逐渐转移至侧墙,进一步加剧顶板端部及侧墙的破坏。上述地下车站结构的地震破坏特征符合已有对该类地下车站结构地震破坏特征及其过程的分析结论^[21-23],说明本文提出的地下结构的大比尺循环推覆加载模型试验方法能够体现地下结构的主要地震破坏特征及其发展过程。同时,本文所提出的地下结构大比尺循环推覆加载模型试验方法,能够准确反应地下结构抗震性能水平与层间位移角幅值的对应关系,验证了已提出的单层双跨地铁地下车站结构抗震性能水平划分方法及其标准^[19],可用于对地下结构抗震性能水平的评价。

但是,本文所提出的模型试验方法对地铁地下车站结构顶板和底板的地震破坏模拟达不到预期,主要原因在于地下结构底板固定依靠两侧的固定装置,由于安装的原因施加了一定程度的轴向压力,使得底板产生较大的预紧力,同时底板两侧端部的弯曲变形受到下部试验平台的约束,进而导致底板的地震破坏程度达不到预期。其次,由于循环荷载施加的需要,结构顶板被约束在推覆抱杆之中,为了防止抱杆一端下沉,抱杆与结构之间施加了一定程度的预紧力,进而产生了与底板相同的预加受压问题,预紧力的施加使得顶板破坏滞后于数值模拟结果,然而该问题可以通过在推覆抱杆下设置水平位移导轨以提供竖向支撑来解决。

参考文献:

- [1] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(S): 283-300.
- [2] 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]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [3] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 742-750. (LI Tianbin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742-750. (in Chinese))
- [4] 林刚, 罗世培, 倪娟. 地铁结构地震破坏及处理措施[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4): 36-41, 47. (LIN Gang, LUO Shipai, NI Juan. Damages of metro structures due to earthquake and corresponding treatment measures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(4): 36-41, 47. (in Chinese))
- [5] YU H T, CHEN J T, YUAN Y, et al. Seismic damage of mountain tunnels during the 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(11): 1958-1972.
- [6] ULGEN D, SAGLAM S, . Dynamic response of a flexible rectangular underground structure in sand: centrifuge modeling[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(9): 2547-2566.
- [7] ZHUANG H Y, WANG X, MIAO Y, et al. Seismic responses of a subway station and tunnel in a slightly inclined liquefiable ground through shaking table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 116: 371-385.
- [8] 王建宁, 杨靖, 庄海洋, 等. 带地连墙异跨地铁车站结构周围地基液化振动台试验[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1858-1866. (WANG Jianning, YANG Jing, ZHUANG Haiyang, et al. Shaking table test on liquefaction characteristics of foundation around a complicated subway station with diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1858-1866. (in Chinese))
- [9] ZHANG Z H, LI Y, XU C S, et al. Study on seismic failure mechanism of shallow buried underground frame structures based on dynamic centrifuge tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150: 106938.

- [10] 陈国, 单波, 肖岩. 轻型竹结构房屋抗震性能的试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, **30**(10): 136-142. (CHEN Guo, SHAN Bo, XIAO Yan. Aseismic performance tests for a light glubam house[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, **30**(10): 136-142. (in Chinese))
- [11] 倪韦斌, 王少杰, 乔德浩, 等. 足尺装配式混凝土异形柱框架结构抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, **52**(10): 3689-3702. (NI Weibin, WANG Shaojie, QIAO Dehao, et al. Experimental study on seismic performance of full-scale fabricated concrete frame with special-shaped columns[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, **52**(10): 3689-3702. (in Chinese))
- [12] 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 Jingbo, LIU Xiangqing, 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))
- [13] 刘晶波, 刘祥庆, 薛颖亮. 地下结构抗震分析与设计的Pushover方法适用性研究[J]. 工程力学, 2009, **26**(1): 49-57. (LIU Jingbo, LIU Xiangqing, XUE Yingliang. Study on applicability of a pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. Engineering Mechanics, 2009, **26**(1): 49-57. (in Chinese))
- [14] 杜修力, 韩润波, 许成顺, 等. 地下结构抗震拟静力试验研究现状及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, **41**(4): 850-859. (DU Xiuli, HAN Runbo, XU Chengshun, et al. Research status and prospects of quasi-static test for seismic research of underground structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, **41**(4): 850-859. (in Chinese))
- [15] 陈之毅, 刘文博, 陈炜. 多层地铁车站结构性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, **48**(6): 811-820. (CHEN Zhiyi, LIU Wenbo, CHEN Wei. Performance experiment of a multi-story subway station[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, **48**(6): 811-820. (in Chinese))
- [16] WANG J N. Seismic Design of Tunnels: A Simple State-of-the-Art Design Approach[M]. New York: Parsons Brinckerhoff Inc, 1993.
- [17] 庄海洋, 王伟, 杨靖, 等. 一种多层地下结构抗震推覆试验装备与拟动力加载方法: CN112254912B[P]. 2021-07-13. (ZHUANG Haiyang, WANG Wei, YANG Jing, et al Multi-layer underground structure anti-seismic pushing and covering test equipment and pseudo-dynamic loading method: CN112254912B[P]. 2021-07-13. (in Chinese))
- [18] 陈苏, 陈国兴, 韩晓健, 等. 基于计算机视觉的位移测试方法研究与实现[J]. 振动与冲击, 2015, **34**(18): 73-78, 99. (CHEN Su, CHEN Guoxing, HAN Xiaojian, et al. Development of vision-based displacement test method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, **34**(18): 73-78, 99. (in Chinese))
- [19] ZHUANG H Y, YANG J, CHEN S, et al. Statistical numerical method for determining seismic performance and fragility of shallow-buried underground structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, **116**: 104090.
- [20] HAMADA M. Dynamic behaviors of underground structures during earthquakes and earthquake-resistant design[M]// Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Tokyo: Springer Japan, 2014: 229-273.
- [21] 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. Damage 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))
- [22] 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 Haiyang, CHENG Shaoge, CHEN Guoxing. 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))
- [23] 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, 69. (DU Xiuli, MA Chao, LU Dechun, 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, 69. (in Chinese))