

DOI: 10.11779/CJGE20240829

# 装配式地铁车站结构抗震性能多指标评价及限值研究

钟紫蓝, 唐俊超, 陈晋男, 许成顺, 杜修力\*

(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:** 装配式地铁车站由预制构件与后浇混凝土组成, 其各构件之间存在许多拼接节点。这些拼接节点会直接影响车站整体的抗震性能。基于装配式地铁车站结构静力推覆试验, 建立了车站结构三维有限元数值模型, 对结构的力学性能、损伤细节和破坏模式进行分析, 验证了模型的可行性。并基于车站结构层间位移角和预制侧墙拼接节点处裂缝宽度两个指标对结构的抗震性能进行综合评价。研究表明: 有限元建立的数值模型与物理试验的力一位移曲线和损伤细节拟合较好; 拟静力推覆荷载作用下装配整体式地铁车站结构上层比下层的损伤更为严重, 上层层间位移是下层层间位移的1.6倍, 侧墙一中板拼接节点出现明显裂缝。结合装配整体式地铁车站的安全性和正常使用功能性, 综合考虑装配整体式地铁车站结构层间位移角及拼接处裂缝宽度, 给出结构在不同损伤状态下的指标限值, 为其抗震性能的优化设计提供参考。

**关键词:** 装配整体式地铁车站; 层间位移角; 裂缝宽度; 抗震性能

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)11-2295-10

作者简介: 钟紫蓝(1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下结构抗震方面的研究工作。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn。

## Multi-index and thresholds for seismic performance evaluation of prefabricated subway station structure

ZHONG Zilan, TANG Junchao, CHEN Jinnan, XU Chengshun, DU Xiuli

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

100124, China)

**Abstract:** The prefabricated subway station is composed of prefabricated components and cast-in-place concrete, there are many splicing nodes between its components, and these splicing nodes will directly affect the seismic performance of the structure. Based on static pushover tests of the prefabricated subway station, this paper establishes a three-dimensional finite element model, which is consistent with physical tests. The feasibility of the model is verified by analyzing and comparing the mechanical characteristics, damage details and failure modes of the structure, the Interstory Displacement Ratio (IDR) of the middle column and crack width are selected to evaluate the seismic performance of the structure. The results indicate that the numerical model is in good agreement with the force-displacement curve and damage details of physical test. The upper layer of the prefabricated subway station structure is more seriously damaged than the lower layer, the displacement between the upper layers is 1.6 times that of the lower layers and there are obvious cracks in the wall-middle slab joint. Finally, combined with the safety and normal use functionality of the prefabricated subway station, and taking the IDR and crack width at the joints of the prefabricated subway station into consideration, the index limits of the structure under different damage states are quantified, which provides a reference for the optimal design of its performance.

**Key words:** prefabricated subway station; Interstory Displacement Ratio (IDR); crack width; seismic performance

## 0 引言

传统的钢筋混凝土现浇结构施工周期长、工序繁琐、容易受天气影响, 存在容易开裂、污染排放高以

及施工人员密集等显著缺点。为了实现可持续化发展, 采用预制装配建造技术可以提高生产效率、减少施工时间同时将对周围环境的影响降至最低<sup>[1-2]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52378470); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52220105011)This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No.52378470) and National Natural Science Foundation of China (Grant No.52220105011).

收稿日期(Received): 2024-08-15 修回日期(Revised): 2024-12-17 接受日期(Accepted): 2025-01-21 网络出版日期(Online): 2025-01-22

\*通信作者 (E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn)

目前地面装配式建筑得到了蓬勃发展,已基本形成了比较完善的技术和标准体系,工程应用十分广泛<sup>[3]</sup>。与地面建筑相比,除盾构法隧道外,地下工程在预制装配式建造技术方面的研究开展和应用起步较晚。

城市地铁车站是大型地下工程的典型代表,装配式地铁车站结构归纳起来主要有两大类:①全预制装配式结构,其主体结构全部采用预制构件装配而成,预制构件之间干式连接;②主体结构采用以叠合结构+现浇混凝土结构为主的装配整体式结构<sup>[4]</sup>。装配式地铁车站结构在保证质量、节能和效益的同时,抗震性能是影响其工程推广应用的重要考虑因素。

1995 年日本阪神地震中大开地铁车站和区间隧道发生严重破坏。震害显示大开地铁车站塌毁的主要原因是中柱抗震变形能力不足导致的,这引发了大量学者对地下结构抗震性能的广泛研究<sup>[5-7]</sup>。数值模拟方面,He 等<sup>[8]</sup>,Du 等<sup>[9]</sup>通过 Pushover 分析方法研究中柱的变形能力,根据力-层间位移曲线,采用层间位移角限值量化了地下结构各抗震性能等级。董正方等<sup>[10]</sup>考虑场地条件、土层厚度、结构形式、输入地震动及结构埋深 5 个因素探究了地下框架结构的层间位移角抗震性能限值,提出了地下框架结构层间位移角的屈服点和倒塌点限值分别为 1/482 和 1/25。Zhuang 等<sup>[11]</sup>基于 300 个算例,提出了抗震性能划分的统计方法并定义了 4 种极限状态的层间位移角限值。Chen 等<sup>[12]</sup>对两种预制装配式地下结构和相同尺寸的现浇式地下结构建立三维有限元模型,进行了一系列推覆分析,对装配整体式地下结构和现浇式结构的抗震性能进行了评价,并对其抗震性能和破坏机理进行了研究。Liu 等<sup>[13]</sup>根据地铁车站结构的防水性能和变形建议了 4 种极限状态的层间位移角限值。陈之毅等<sup>[14]</sup>建立土-结构相互作用模型开展了 Pushover 分析研究了地铁车站结构不同性能状态下中柱和侧墙剪力分配规律。

试验方面,杨秀仁等<sup>[15-16]</sup>开展了地铁车站预制装配式结构注浆式单榫接头抗弯承载性能试验,对注浆式单榫短接头进行了破坏形态和承载能力分析。Liu 等<sup>[17]</sup>对装配式地铁车站结构的部分拼接节点开展了足尺低周循环往复加载试验并与相同类型的现浇整体节点进行对比分析,研究了预制拼接节点的破坏形态、滞回特性、刚度退化、变形能力等特性。Tao 等<sup>[18]</sup>对元家店单拱全预制地铁车站开展了模型结构相似比为 1:30 的振动台试验,揭示了围护结构对装配式地铁车站抗震性能增强的作用机理,阐述了带围护结构的装配式地铁车站的震害演化机理。陈之毅等<sup>[19]</sup>以上海市某多层地铁车站工程为背景,开展了 1:10 大型静力推覆试验,分析了多层地铁车站结构的裂缝开展过

程、结构及构件破坏形态、塑性铰开展顺序,并总结了结构整体和中柱的破坏模式,给出车站结构重要性能点数值。Han 等<sup>[20]</sup>开展了弹簧-地下结构体系静力推覆试验,得到模型剪力-层间位移曲线、模型结构裂缝发展部位及结构破坏形态。

综上所述,相关学者的研究中,多关注现浇地下结构抗震性能,并以层间位移角这一单指标来对各抗震性能水准进行划分,不同性能水准所对应的层间位移角限值也存在较大差别。然而,装配式地铁车站结构存在许多拼接节点,是地震作用下结构的薄弱部位。这些拼接节点的损伤破坏不仅会影响结构的正常使用功能还会直接影响结构整体的抗震性能,所以在对装配式地铁车站结构进行抗震性能评价时,节点处的变形是不可忽视的。

本文基于 Chen<sup>[21]</sup>开展的模型结构相似比为 1:10 的两层三跨装配式地铁车站结构静力推覆试验,建立了与物理试验一致的三维精细化有限元模型,通过对比结构的抗力曲线和最终损伤状态验证有限元模型的合理性,在此基础上研究了中柱层间位移角和侧墙拼缝处裂缝宽度受力全过程的发展情况,同时考虑结构变形的安全性和正常使用功能需求,给出了相应的性能指标限值,并引入了新的抗震性能综合评价指标  $D_e$ ,为装配式地铁车站结构的设计和应用提供参考。

## 1 试验简介

该地铁车站的原型为两层三跨装配整体式结构,高度 14.3 m,宽度 22.9 m,纵向跨度为 8 m。试验采用的是许成顺等<sup>[22]</sup>提出的适用于结构体系的弹簧—地下结构体系静力推覆试验装置,通过在模型结构周围设置弹簧来近似考虑土—结构相互作用,如图 1 所示。静力推覆试验中,车站结构物理模型试验的几何相似比设为 1:10,即模型结构高 1.43 m,宽 2.29 m,纵向跨度 0.8 m,具体模型结构采用混凝土和钢筋制作,制作过程、材料力学性能及传感器布置参照文献[21]。



图 1 试验加载装置及边界约束

Fig. 1 Experimental loading device and boundary constraints

## 2 数值模型

### 2.1 模型及单元

采用大型通用有限元软件 ABAQUS 进行建模, 有限元模型的具体尺寸如图 2 所示。底板整体浇筑, 顶、中板和顶、中梁采用部分预制部分现浇的结构, 中心柱和侧墙均为预制构件, 它们的钢筋通过预埋灌浆套筒进行连接。装配整体式地铁车站结构的构件形式复杂, 横断面存在大量的构件拼接面, 这些拼接面包括叠合梁与叠合板的新旧混凝土界面, 预制墙体端部和预制柱端部与其他构件的拼接界面, 此外, 在纵截面上预制构件存在拼接面。这些部件之间的连接主要依赖于钢筋的销栓作用以及混凝土的黏结摩擦作用。为了合理的模拟装配整体式地铁车站结构并与推覆试验过程保持一致, 将车站结构和试验装置的各构件分别建模后再装配。

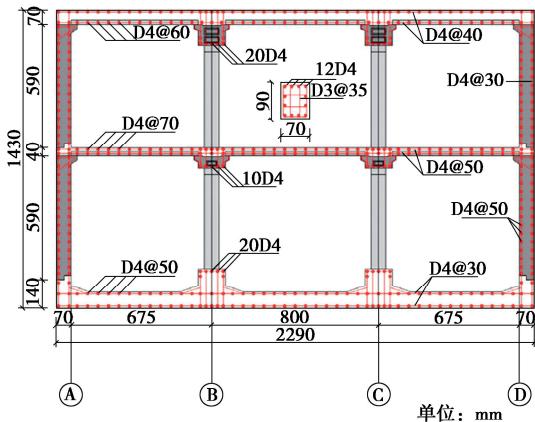


图 2 装配整体式地铁车站横断面示意图

Fig. 2 Schematic of cross-section of prefabricated subway station

针对装配整体式地铁车站结构的关键节点, 本研究采用“surface-to-surface”接触来表征混凝土界面之间的接触关系。接触面之间的切向行为采用基于罚刚度算法的库伦摩擦来模拟, 允许弹性滑移变形, 根据以往的研究将罚摩擦系数设为 0.8<sup>[23]</sup>。法向行为采用硬接触, 接触面两侧的构件没有间隙时才能传递法向压力, 当构件之间有间隙时不传递法向压力。在建模过程中, 对纵断面搭接连接的钢筋简化为连续钢筋, 套筒处的钢筋截断处理, 不考虑钢筋与混凝土之间的滑移, 将钢筋和套筒采用“embedded region”内置于混凝土中。静力推覆试验中弹簧沿结构侧墙从上到下分布有 6 组弹簧, 两侧共有 12 组弹簧。假定试验过程中结构的被动侧墙体变形为倒三角形<sup>[19]</sup>, 可得到推覆过程中各高度处弹簧位移的比例关系, 根据求得的被动侧墙体总压力增量和对应的结构顶部水平位移, 以及设计的弹簧数量和排布, 可确定模型试验中各高度

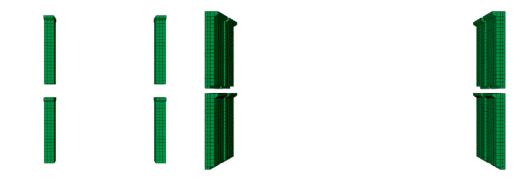
处的弹簧刚度<sup>[21]</sup>。弹簧的水平和垂直间距分别为 200, 180 mm, 在 ABAQUS 中采用两点弹簧单元进行模拟, 每组弹簧参数详见表 1。

有限元模型一共划分了 58675 个单元, 其中, 混凝土和加载装置采用三维实体单元(C3D8)进行模拟, 共 41734 个单元, 钢筋采用桁架单元(T3D2)进行模拟, 共 13581 个单元, 套筒采用壳单元(SR4)进行模拟, 共 3360 个单元, 有限元模型如图 3 所示。

表 1 侧向土弹簧分布及关键参数

Table 1 Distribution and key parameters of lateral soil-springs

弹簧组号	单个刚度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	每组个数	可压缩长度/ cm
1	100		
2	100		
3	200		
4	200		
5	200		
6	200		



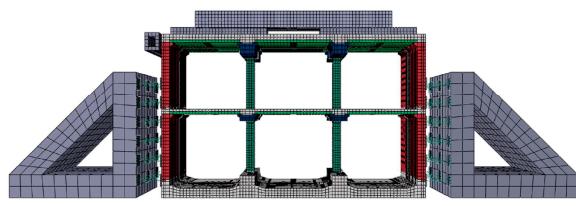
(a) 预制中柱和预制侧墙



(b) 预制梁和预制板



(c) 后浇混凝土和钢筋笼



(d) 推覆试验数值模型

图 3 三维有限元模型

Fig. 3 3D finite element model

### 2.2 材料及本构

模型结构所采用的混凝土强度等级为 C70, 可以通过 ABAQUS 中内置的混凝土塑性损伤模型

(concrete damage plasticity, CDP 模型) 来定义, 模型的本构如图 4 所示。根据《混凝土结构设计规范》GB50010—2010<sup>[24]</sup>, CDP 模型的剪胀角为  $38^\circ$ , 偏心率取 0.1, 双轴压缩与单轴压缩的极限强度比  $f_{b0}/f_{c0}$  取 1.16, 不变应力比  $K_c$  取 0.667, 黏度系数取 0.005。钢筋的强度等级为 HRB400, 套筒采用碳素钢材质, 钢筋和套筒均采用双折线本构模型进行模拟, 屈服后的弹性模量取初始弹性模量的 1/100, 材料的参数详见表 2。

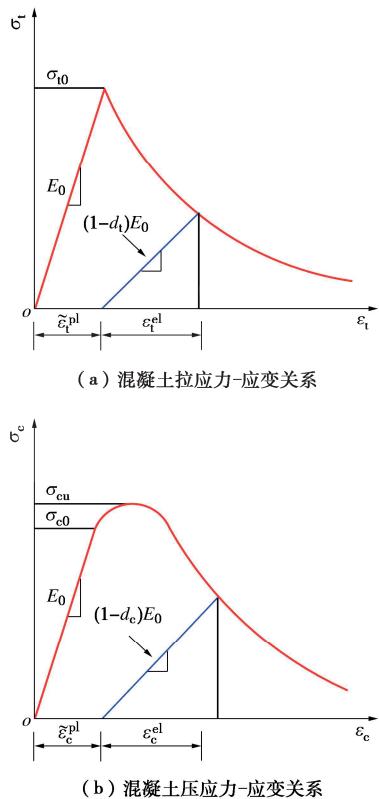


图 4 混凝土塑性损伤模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of plastic damage model for concrete

表 2 关键材料参数

Table 2 Critical material parameters

材料	$P/(kg \cdot m^{-3})$	$E_0/GPa$	$\nu$	$\sigma/F_y/MPa$	$\sigma/F_u/MPa$
C70	2500	38.0	0.2	47.4	3.05
HRB400	7500	210.0	0.3	421.0	609.00
碳素钢	7500	205.0	0.3	387.0	663.00

注:  $\rho$  为密度;  $E_0$  为弹性模量;  $F_y$  和  $F_u$  为屈服强度和抗拉强度;  $\sigma_c$  和  $\sigma_t$  为轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值。

## 2.3 荷载及边界条件

根据 Chen 等<sup>[21]</sup>的试验条件和加载制度, 地铁车站结构静力推覆数值模拟中设置了 3 个静力通用分析步。每一步中所采用的边界条件和荷载具体如下:

(1) 压缩弹簧来模拟结构初始的侧向土压力。弹簧垫板与模型侧墙只接触不连接, 以保证在推覆模拟

过程中, 结构侧墙水平方向主要受压而不受拉。首先将结构底部的水平方向位移固定, 并给结构两侧的弹簧反力墙分别施加 2 cm 的水平位移; 随后将弹簧反力墙完全固定, 约束其在 3 个方向的位移和转角。

(2) 均载钢梁与模型顶板之间采用“General contact”接触, 并定义接触面完全光滑。以一级均载钢梁的中点为加载点, 施加 250 kN 的竖向集中力传递给二级均载钢梁使结构顶板的竖向荷载能均匀分布来模拟上覆土压力。

(3) 将水平钢梁与一个预先添加的参考点 RP1 耦合, 控制 RP1 的水平位移直至施加到 80 mm 来模拟水平地震荷载。

## 3 有限元模型验证

### 3.1 最终损伤状态验证

图 5 为在竖向荷载是 250 kN 下试件的最终损伤状态与数值模拟结果的对比。当加载位移为 80 mm 时, 侧墙的拼接缝处和柱侧壁受拉出现裂缝发生严重损伤, 顶板的右侧受拉损伤严重出现贯通裂缝, 梁一柱中节点受拉出现  $45^\circ$  斜裂缝。柱端受压区出现纵向裂缝, 混凝土达到极限压应变发生压碎破坏。

### 3.2 力-位移曲线验证

图 6 是由有限元数值模型模拟得到的结构自身抗力曲线与试验结果之间的对比, 可以看出有限元模拟与试验结果变化趋势是保持一致的, 峰值承载能力相差较小。由于未考虑钢筋与混凝土之间的滑移以及试验过程中存在的缺陷, 数值模型的初始刚度略高且峰值承载力对应的水平位移与物理试验相比略小。

总体而言, 有限元模拟的结构力学特性与物理试验相差不大, 峰值承载力误差在 10% 以内, 且破坏模式与损伤细节高度吻合。因此, 所建立的有限元模型能较好的反应出试件的力学性能及损伤状态, 并能在试验结果不准确的地方提供准确的预测, 可进行后续损伤区间划分。

## 4 装配整体式地铁车站损伤状态划分

在安全性能方面, 中心柱作为地铁车站结构的重要承重构件, 可以采用层间位移角反应结构的变形并判断损伤状态。在使用功能性方面, 裂缝宽度是一个直观的指标可以反映结构的渗漏水情况。为了能多方面的对装配整体式地铁车站结构抗震性能进行评价, 采用中柱层间位移角和侧墙拼接节点处的裂缝宽度两个指标对结构损伤区间进行界限划分, 并结合试验现象与数值模拟的结果得到结构各损伤等级下的限值。

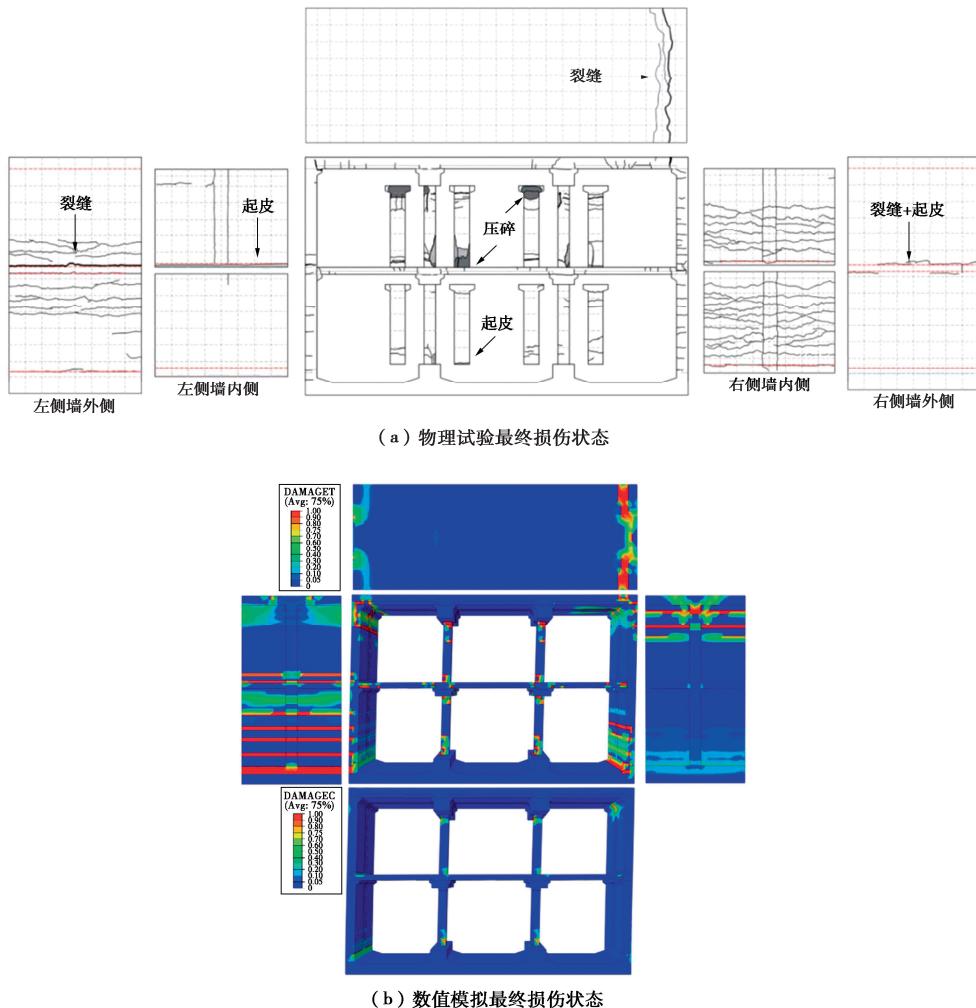


图 5 最终损伤状态对比

Fig. 5 Comparison of final damage states

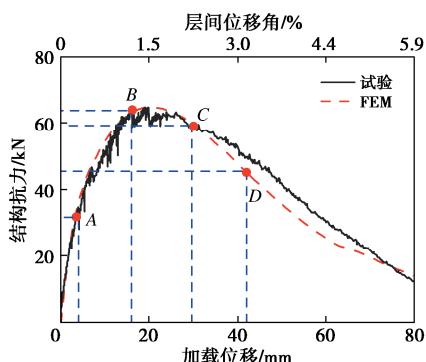


图 6 结构抗力曲线对比

Fig. 6 Comparison of structural resistance curves

#### 4.1 中柱层间位移角

水平荷载作用下, 装配整体式地铁车站结构上层与下层的层间位移比值在加载初期接近于 1, 随着加载位移的增大比值也在增大, 如图 7 所示。这是因为在加载过程中, 侧墙—中板拼接缝逐渐开裂, 使得结构上层的位移发展速度要大于下层。而中心柱作为装配整体式地铁车站的重要承重构件, 所以采用上层中

心柱的层间位移角作为车站结构的安全性指标。中心柱的层间位移角 IDR 可以由下式计算得出:

$$IDR = \frac{u_1 - u_2}{h} \quad . \quad (1)$$

式中:  $u_1$  为柱顶位移;  $u_2$  为柱底位移;  $h$  为中心柱的高度。

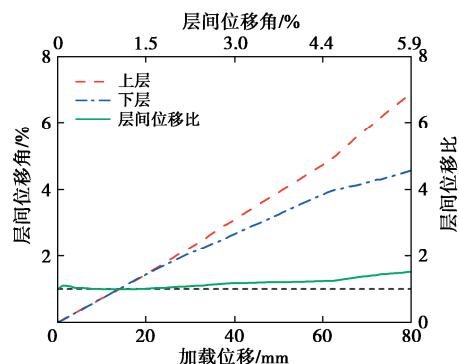


图 7 上下两层的层间位移角及比值

Fig. 7 IDR of upper layer and lower layer and their ratio comparison of internal forces at the upper central column and side wall joints

## 4.2 裂缝宽度

考虑到钢筋混凝土结构裂纹发展是结构损伤的重要表征之一。本文提取了左侧墙—中板拼接缝处的混凝土 CDP 模型拉损伤因子，利用 Chen 等<sup>[25]</sup>提出的下式建立了拉损伤因子  $D_t$  与裂缝宽度  $w_t$  之间的关系：

$$D_t = \frac{w_t}{[w_t + (h_c \sigma_t) / E_0]} \quad (2)$$

式中： $h_c$  为单元的特征裂缝长度； $\sigma_t$  为混凝土中的拉应力； $E_0$  为混凝土的初始（未损伤）弹性模量本文取 38 GPa。

特征裂缝长度与单元的几何形状和种类有关，采用 Rots<sup>[26]</sup>建议的特征裂缝长度估算方法，本文中采用四节点线性四面体单元（C3D8 单元）的对角线长度来作为特征裂缝长度对侧墙拼缝处的裂缝宽度进行预测，得到的  $D_t$ - $w_t$  曲线如图 8 所示。

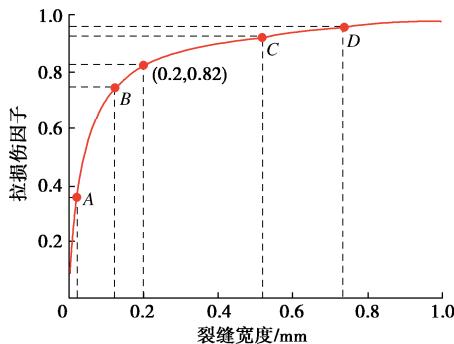


图 8 拉损伤因子与裂缝宽度之间的关系

Fig. 8 Relationship between tensile damage and crack width

根据《地铁设计规范》GB50157—2013<sup>[27]</sup>中的相关规定，对于处在干湿交替环境中的地铁车站结构最大裂缝宽度允许值为 0.2 mm。从图 8 中可以看出，当拉损伤因子  $D_t=0.82$  时，装配整体式地铁车站结构左侧墙—中板拼接缝处的裂缝宽度达到规范所允许的最大限值。

## 4.3 损伤区间划分

以往研究中<sup>[9, 12, 28-30]</sup>多以几何作图法来确定结构的屈服点、峰值点和极限点从而划分损伤区间。该方法虽然逻辑上具有一定的可信性，但作图法所确定的曲线拐点作为性能区间缺乏对应试验观测现象作为必要佐证。

混凝土材料进入塑性损伤阶段后，ABAQUS 中采用损伤因子  $D$  来描述损伤程度，受拉和受压损伤因子分别记为  $D_t$  和  $D_c$ ，当损伤因子  $D$  为 0 时，此时材料处于弹性阶段，损伤因子  $D$  趋于 1 时代表材料完全破坏，损伤发展阶段损伤因子  $D$  在 0~1。在拉损伤因子  $D_t$  和压损伤因子  $D_c$  增长的过程中，对应于物理试验中结构会逐渐出现受拉裂缝和混凝土压溃的现象。因

此，本文结合试验现象和数值模型分析得到的拉损伤因子  $D_t$  与压损伤因子  $D_c$  将装配整体式地铁车站结构的损伤区间划分如下：

### (1) 轻微损伤

当结构顶底板相对位移达到 4 mm 时，左墙外侧底部和右墙内侧底部开始出现裂缝，顶板右侧出现垂直细裂缝。如图 9 (a) 所示，左墙外侧底部、右墙内侧底部和柱端的  $D_t$  处在 0~0.32，此时  $D_c$  均为 0，混凝土还未达到受压峰值应力。因此，当拉损伤因子  $D_t$  首次达到 0.32 时，认为装配整体式地铁车站结构达到轻微损伤状态：结构顶板右侧和下墙拼接处相继出现细裂缝，结构进入屈服阶段。

### (2) 中等损伤

当结构顶底板相对位移达到 16 mm 时，左上柱顶部、右上柱顶部、侧墙—中板拼接缝和梁—板—柱—柱结点相继出现裂缝，原裂缝宽度增大，钢筋屈服并形成塑性铰。如图 9 (b) 所示，左墙外侧底部、右墙内侧底部和柱端拼接处的损伤进一步发展， $D_t$  大部分处在 0.32~0.60，柱端  $D_t$  最大值达到 0.74，混凝土受压区发展到柱端和左侧墙底部， $D_c$  处在 0~0.4。因此，当拉损伤因子  $D_t$  首次达到 0.74 时，认为装配整体式地铁车站结构达到中等损伤状态：构件端部和节点处出现新裂缝，原裂缝继续发展，钢筋屈服。

### (3) 严重损伤

当结构顶底板相对位移达到 28 mm 时，侧墙—中板拼接缝处的裂缝宽度继续增大，右墙内侧裂缝发展成为贯通裂缝，柱端受压区混凝土被压溃而发生剥落，塑性铰的数量增多。如图 9 (c) 所示，结构拉损伤范围没有明显扩大，柱端部、侧墙—中板拼接缝等结构薄弱部位的  $D_t$  最大值达到 0.92，结构的压损伤范围继续扩大且在上柱顶部和下柱底部  $D_c$  的最大值达到 0.90。因此，当拉损伤因子  $D_t$  和压损伤因子  $D_c$  大于 0.90 时，认为装配整体式地铁车站结构达到严重损伤状态：各构件裂缝进一步发展，结构塑性铰增多，上柱端部的混凝土发生压碎破坏。

### (4) 倒塌破坏

当结构顶底板相对位移达到 42 mm 时，各构件和节点的裂缝宽度快速增加，损伤加深，顶板右侧沿轻微损伤阶段出现的垂直细裂缝发生断裂，上柱端部混凝土受压发生大块剥落露出钢筋。如图 9 (d) 所示，柱墙端部、侧墙—中板拼接缝和顶板右侧的  $D_t$  趋近于 1，上柱顶部和下柱底部的  $D_c$  接近 1，与物理试验中发生压碎破坏的区域吻合。因此，当拉损伤因子  $D_t$  和压损伤因子  $D_c$  趋于 1 时，认为装配整体式地铁车站结构达到倒塌破坏状态：混凝土强度丧失区域快速扩大，结构整体的承载能力迅速下降。

可以看出, 当左侧墙—拼接缝处的裂缝宽度达到规范给出的最大允许值时, 装配整体式地铁车站结构处于中等损伤状态。此时, 从安全性考虑结构还具有一定的承载能力, 轻微修补后方能维持正常使用, 但从使用功能性考虑结构的防水能力显著降低, 需要对侧墙进行大量维护后才能投入正常使用。

根据结构在不同损伤状态下的中柱层间位移角和左侧墙—中板拼缝处的裂缝宽度限值, 给出了装配整体式地铁车站结构在不同损伤区间的临界值, 如表 3 所示, 并以  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  4 个临界点将结构的损伤划分为 5 个区间对装配整体式地铁车站的抗震性能进行综合评价。

综合考虑以上两个指标对装配整体式地铁车站抗震性能的影响, 如式(3)所示, 引入  $\alpha$  和  $\beta$  两个权重系数, 采用新的的损伤指标  $D_e$  对车站损伤区间进行划分, 划分后的综合性能区间如表 4 所示。采用此指

标不仅可以将中柱层间位移角和拼缝处裂缝宽度两个损伤指标进行综合考虑, 还可以根据工程的实际情况调整两个权重系数的大小来衡量两个指标的重要程度, 使结构损伤区间在量化判定时能更准确的反应出结构的真实损伤情况。

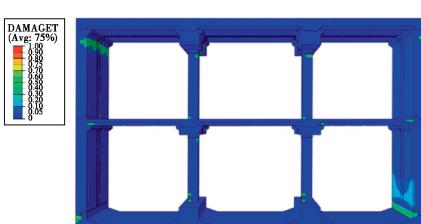
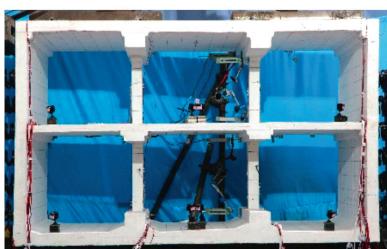
$$D_e = \alpha \frac{\theta}{\theta_{\max}} + \beta \frac{d}{d_{\max}} \quad . \quad (3)$$

式中:  $\theta_{\max}$ ,  $d_{\max}$  对应的是临界点  $D$  的值 4.64% 和 0.75 mm, 假设车站结构的安全性能和使用功能性同等重要, 权重系数  $\alpha$  和  $\beta$  均取 0.5。

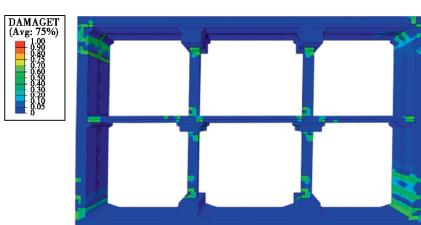
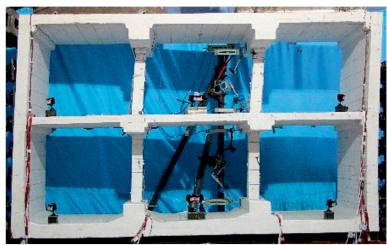
表 3 装配整体式地铁车站结构损伤临界值

Table 3 Critical value of damage of prefabricated subway station structure

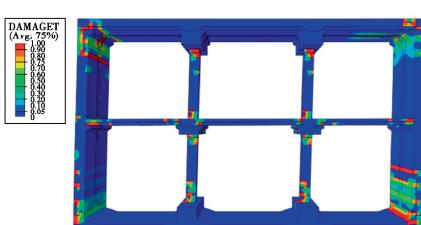
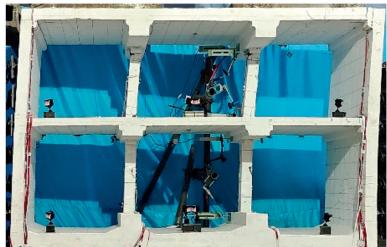
指标建议值	$A$	$B$	$C$	$D$
中柱层间位移角 $\theta/\%$	0.37	1.58	2.93	4.64
拼缝处裂缝宽度 $d/mm$	0.04	0.12	0.51	0.75



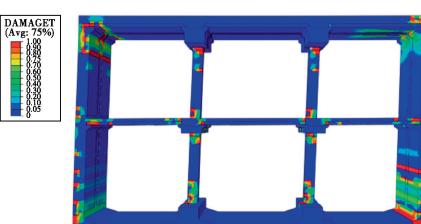
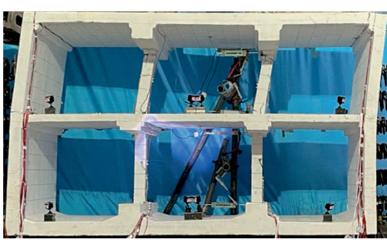
(a) 轻微损伤区间对比



(b) 中等损伤区间对比



(c) 严重损伤区间对比



(d) 倒塌破坏区间对比

图 9 结构损伤区间对比

Fig. 9 Comparison of structural damage states

表 4 装配整体式地铁车站结构损伤状态划分及评价

Table 4 Classification and evaluation of damage state of prefabricated subway station structure

结构损伤区间	损伤指标	损伤状态描述	评价
基本完好	$D_e < 0.07$	地铁车站未发生破坏, 无裂缝, 无渗漏水。	结构可以正常使用, 不需要修复。
轻微损伤	$0.07 \leq D_e < 0.25$	地铁车站的薄弱部位处受拉出现细裂缝, 无渗漏水。	简单修补后不影响结构的正常使用。
中等损伤	$0.25 \leq D_e < 0.66$	地铁车站的薄弱部位处裂缝进一步发展, 侧墙—中板拼接缝和顶板右侧裂缝发展显著, 造成渗漏水。	结构正常使用功能性显著降低, 承载能力轻微下降, 需对拼接缝处进行加固、防水等处理, 中柱进行维护。
严重损伤	$0.66 \leq D_e < 1$	地铁车站的薄弱部位处出现贯通裂缝, 顶板右侧受拉断裂, 渗漏水严重。	结构正常使用功能性丧失, 承载能力急剧下降, 要对各构件进行完全修复。
倒塌破坏	$D_e \geq 1$	地铁车站损伤严重, 上柱端部混凝土发生压碎破坏, 整体结构发生倒塌破坏。	结构的抗震能力完全丧失, 不能进行修复。

## 5 结 论

本文基于装配式地铁车站结构静力推覆试验, 建立了三维有限元数值模型模拟物理试验的过程, 从力学和损伤两方面验证了模型的合理性, 并结合试验现象和数值模拟的结果综合考虑了地铁车站的安全性和使用功能性, 得到 3 点结论。

(1) 基于静力推覆试验建立的三维精细化有限元数值模型的力—位移曲线与物理试验拟合较好, 结构抗力误差在 10% 以内, 破坏细节与物理试验高度吻合, 有限元数值模型可以用来研究结构损伤区间的评价指标和限值。

(2) 侧墙—中板拼接节点严重开裂, 该节点在中等损伤区间的裂缝宽度临界值为 0.51 mm, 已超过规范规定的 0.2 mm 的要求。在中等损伤状态下, 结构还具有一定的安全性, 但此时结构的正常使用功能性已无法保证。

(3) 综合考虑层间位移角和侧墙拼接节点处的裂缝宽度这两个指标, 提出了新的损伤指标  $D_e$ , 确定了车站结构的 5 个性能等级并给出了相应损伤状态的描述, 为全面评价装配整体式地铁车站结构的抗震性能提供科学依据。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 钟紫蓝提出研究设想与核心问题, 设计整体研究框架; 唐俊超完成数据预处理及分析, 撰写文章; 陈晋男负责数据采集工作的设计与执行; 许成顺协助文献调研与理论框架构建; 杜修力提供研究经费, 指导数据分析方法的选择与实施。ZHONG Zilan formulated the research

conception and core issues, and designed the overall research framework. TANG Junchao completed data preprocessing and analysis, and wrote the manuscript. CHEN Jinnan was responsible for the design and execution of data collection. XU Chengshun assisted with literature review and the construction of the theoretical framework. DU Xiuli provided research funding and guided the selection and implementation of data analysis methods.

## 参考文献:

- [1] NEJAT P, JOMEHZADEH F, TAHERI M M, et al. A global review of energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO<sub>2</sub> emitting countries)[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 843-862.
- [2] 曹 轼, 万雨晨, 周小涵. 预制装配式技术在地下工程的应用与研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 2055-2071. (CAO Ke, WAN Yuchen, ZHOU Xiaohan. Application and research progress of prefabricated assembly technology in underground engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6): 2055-2071. (in Chinese))
- [3] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1849-1870. (YANG Xiuren. Development status of and outlook for construction technology for prefabricated metro stations in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1849-1870. (in Chinese))
- [4] 杨秀仁. 地铁车站装配式结构建造技术研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 345-354. (YANG Xiuren. Research and application of prefabricated structure construction technology for metro station[J]. Tunnel

- Construction, 2022, **42**(3): 345-354. (in Chinese))
- [5] 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[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(2): 223-236.(DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2018, **40**(2): 223-236. (in Chinese))
- [6] NGUYEN V Q, NIZAMANI Z A, PARK D, et al. Numerical simulation of damage evolution of Daikai station during the 1995 Kobe earthquake[J]. Engineering Structures, 2020, **206**: 110180.
- [7] ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHAO M, et al. Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **132**: 106044.
- [8] HE Z M, CHEN Q J. Vertical seismic effect on the seismic fragility of large-space underground structures[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, **2019**(1): 9650294.
- [9] DU X L, JIANG J W, EL NAGGAR M H, et al. Interstory drift ratio associated with performance objectives for shallow-buried multistory and span subway stations in inhomogeneous soil profiles[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, **50**(2): 655-672.
- [10] 董正方, 曾繁凯, 李凤丽, 等. 基于 IDA 法的矩形地下车站层间位移角抗震性能限值研究[J]. 现代隧道技术, 2018, **55**(增刊 2): 441-449. (DONG Zhengfang, ZENG Fankai, LI Fengli, et al. Study on seismic performance limit value of interlayer displacement angle of rectangular underground station based on IDA method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, **55**(S2): 441-449. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] CHEN J N, XU C S, EL NAGGAR H M, et al. Study on seismic performance and index limits quantification for prefabricated subway station structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, **162**: 107460.
- [13] LIU T, CHEN Z Y, YUAN Y, et al. Fragility analysis of a subway station structure by incremental dynamic analysis[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, **20**(7): 1111-1124.
- [14] 陈之毅, 樊一凡, 黄鹏飞, 等. 基于 pushover 法的地铁车站柱墙剪力比研究[J]. 土木工程学报, 2020,**53**(增刊 1): 233-237.(CHEN Zhiyi, FAN Yifan, HUANG Pengfei, et al. Column-wall shear ratio of subway station based on pushover method[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(S1):233-237. (in Chinese))
- [15] 杨秀仁, 黄美群, 林放, 等. 地铁车站预制装配式结构注浆式榫槽接头试验方案研究[J]. 都市快轨交通, 2019, **32**(5): 83-90. (YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang, et al. Experimental method of grouted mortise-tenon joint for prefabricated metro station structure[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, **32**(5): 83-90. (in Chinese))
- [16] 杨秀仁, 林放, 黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫长接头抗弯承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(4): 111-118, 128. (YANG Xiuren, LIN Fang, HUANG Meiqun. Research on flexural bearing capability of long grouted single mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(4):111-118,128. (in Chinese))
- [17] LIU H T, YAN Q S, DU X L. Seismic performance comparison between precast beam joints and cast-in-place beam joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, **20**(9): 1299-1314.
- [18] TAO L J, SHI C, DING P, et al. Shaking table test of the effect of an enclosure structure on the seismic performance of a prefabricated subway station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **125**: 104533.
- [19] 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))
- [20] HAN R B, XU C S, LIU D, et al. Static pushover test of spring-underground structure system for seismic performance analysis of underground structure[J]. Engineering Structures, 2022, **271**: 114936.
- [21] CHEN J N, XU C S, DU X L, et al. Physical and numerical modeling of seismic soil-structure interaction of prefabricated subway station structure[J]. Engineering Structures, 2023, **290**: 116364.
- [22] 许成顺, 韩润波, 杜修力, 等. 考虑土—结构相互作用的弹簧—地下结构体系静力推覆试验技术及其试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023,**44**(1): 248-258. (XU Chengshun, HAN Runbo, DU Xiuli, et al. Static pushover test technology and experimental study of spring-underground structure system

- considering soil-structure interaction[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(1): 248-258. (in Chinese))
- [23] 陈晋男, 杜修力, 许成顺, 等. 基于 IDA 方法的矩形装配式地铁车站结构地震易损性评价[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 37-46. (CHEN Jinnan, DU Xiuli, XU Chengshun, et al. Seismic vulnerability evaluation of rectangular prefabricated subway station structure based on IDA method[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(7): 37-46. (in Chinese))
- [24] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Code for Design of Concrete Structures: GB50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [25] CHEN G M, TENG J G, CHEN J F. Finite-element modeling of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(3): 339-353.
- [26] ROTS J G. Computational Modeling of Concrete Fracture[D]. Delft: Delft University of Technology, 1988.
- [27] 地铁设计规范: GB50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Code for Design of Metro: GB50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [28] 冯 鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46. (FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. (in Chinese))
- [29] 钟紫蓝, 申轶尧, 郝亚茹, 等. 基于 IDA 方法的两层三跨地铁地下结构地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 916-924. (ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, HAO Yaru, et al. Seismic fragility analysis of two-story and three-span metro station structures based on IDA method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 916-924. (in Chinese))
- [30] 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[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 111-119. (DU Xiuli, JIANG Jiawei, XU Zigang, et al. Study on quantification of seismic performance index for rectangular frame subway station structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 111-119. (in Chinese))