

多层地铁车站结构性能试验研究

陈之毅^{1,2}, 刘文博¹, 陈 炜³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 为掌握地震作用下多层地铁车站结构从材料、局部构件到整体结构的非线性破坏状态, 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(Pushover)试验。结合地下结构地震响应特征, 采用倒三角分布的侧向位移推覆加载模式, 并由多个作动器实现多点协调加载。分析研究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、Pushover 曲线, 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, 综合评价了多层地铁车站结构的抗震性能及特点, 可为基于性能的抗震设计提供依据。

关键词: 多层地铁车站; 推覆试验; 塑性铰; 中柱; 抗震性能
中图分类号: TU93+2 **文献标志码:** A

Performance Experiment of a Multi-story Subway Station

CHEN Zhiyi^{1,2}, LIU Wenbo¹, CHEN Wei³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the non-linear failure state of materials, local components and integral structure of multi-story subway station under earthquake action, a 1:10 large-scale pushover test was carried out in the background of a multi-story subway station project in Shanghai. According to the seismic response characteristics of underground structures, loading mode was in the form of inverted triangular displacement carried out by means of multi-point coordinated loading by three actuators. Development process of cracks, plastic hinges formation sequence and pushover curve were studied. Failure patterns and modes of the whole structure and central columns were contrasted. Critical performance data points of the structure

was given. On account of the pushover test results, the seismic performance of deep metro station structure was also comprehensively analyzed, which can provide reference for designs of similar structure based on seismic performance.

Key words: multi-storey subway station; pushover test; plastic hinges; central columns; seismic performance

近年来,我国已进入地铁工程的大规模建设和快速发展时期,城市地下公共交通设施正朝着地下多层化、多层次方向发展。以上海 13 号线淮海中路车站为例,其地下连续墙深度达 71m,为地下六层岛式地铁车站,主体结构高度近 30m^[1]。多层地铁车站结构沿深度加长,使得作用在侧墙上的水土压力增大、中柱的轴压比增大、侧墙抗侧刚度下降。此外,由于地下空间功能需求的多样化(如设置换乘大厅、设备转换层等),使得结构型式复杂、抗震薄弱环节不易察觉。因此,有必要对多层地铁车站的抗震性能开展研究。

工程结构抗震试验是研究结构抗震的重要手段,主要分为静力试验和动力试验^[2]。目前,地下结构抗震领域开展较多的是振动台模型实验,研究了不同水平地震动下的地下结构动力响应问题,并取得了一定的成果^[3-7]。通过对模型相似比的正确处理,振动台实验可以较好地模拟地下结构的受震过程,因此适合于研究结构的震中动力响应,以建立其相关的分析理论和计算方法^[3]。但是,为了考虑周围土层介质,车站模型结构的设计比尺非常小,不利于对结构损伤观察和数据采集,动力相似比条件也总是很难完全满足。因此,一种基于结构静力弹塑性方法的试验——Pushover 试验,受到了人们的重视。这种方法本质上是一种与反应谱相结合的静力

收稿日期: 2020-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(51778464)

第一作者: 陈之毅(1977—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为地下结构抗震。

E-mail: zhiyichen@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

弹塑性分析方法,在地面结构中得到了广泛的研究和应用^[8-9]。它按一定的水平加载方式,对结构施加单调递增的水平荷载,逐步将结构推覆至预定的目标位移或某一极限状态,以便分析结构的非线性性能,判别结构及构件的受力及变形是否满足设计要求。可以看到,振动台试验成果侧重于关注对某一地震水平下的结构最大响应,而Pushover试验则与地震激励无关,侧重于了解结构自身的能力,例如力学性能、变形发展规律以及破坏特征等等^[10-14]。

一些日本与国内学者也开展了研究地下结构抗震性能的Pushover试验。曾良冈宏等^[15]探讨了1:1箱形暗渠试件主受力钢筋量与不同结构体系对推覆中水平抗力和变形能力的影响。松尾丰史等^[16]研究了箱型暗渠结构在剪切钢筋锈蚀后承载力下降的程度。孔令俊^[17]分析了大型箱涵结构在推覆荷载作用下的破坏形态、节点开裂现象及滞回曲线等。然而,目前针对地下结构的性能试验研究主要集中在箱涵、沉管等单框结构形式的结构上,或车站结构的某

些局部构件上^[18-19]。且随着地下结构抗震理论与设计方法的不断发展,一些试验的研究对象对现代地下工程的设计参考作用越来越有限。例如,曾良冈宏等的试验模型模拟上世纪60年代的三联体箱形暗渠,与现代地下结构设计相比,抗剪钢筋较少。对于现代地下工程更常见的多层地铁车站,由于结构形式更复杂、薄弱环节更多,其在地震作用下的性能表现尚不清楚。可以看到,针对多层车站结构的抗震性能研究尚需要大量的试验数据积累。

1 模型设计与试验设备方案

1.1 模型结构设计与材料参数

模型试验原型为高度30m的四层地铁车站,采用几何比尺为1:10的缩尺模型,原型地铁车站中,沿纵向中柱间距为8m,选取此间距按平面应变问题进行模型结构设计,即模型结构厚度为0.8m。图1所示,模型尺寸为2.36m宽,2.68m高,0.8m厚。

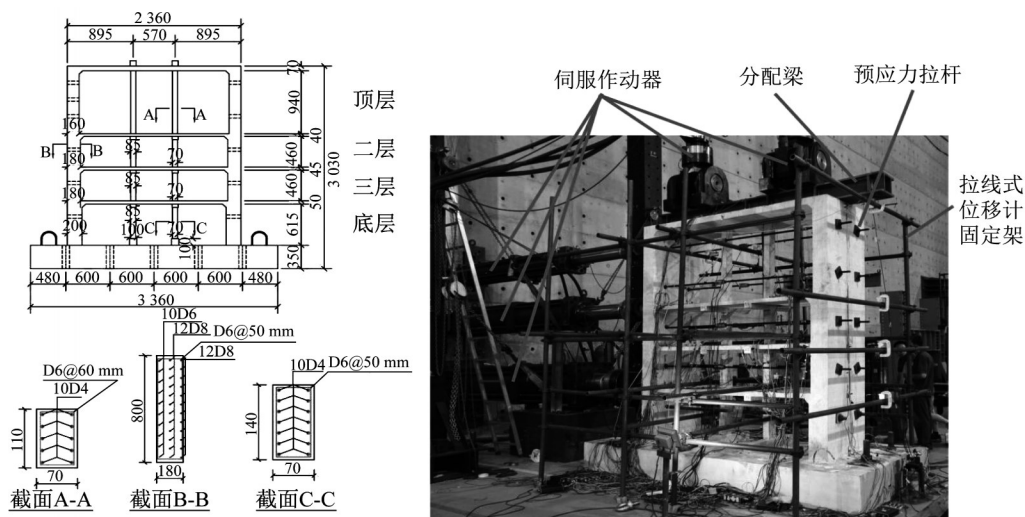


图1 模型全貌及尺寸细节图(单位:mm)

Fig.1 Full view and size details of model (Unit:mm)

模型结构中,中柱采用C45混凝土,其余构件采用C35混凝土;受力钢筋、箍筋和构造配筋均为HRB400钢。材料强度如表1所示。

经前期研究发现,实际工程中地下连续墙深达

表1 材料强度参数(单位:MPa)

Tab.1 Material strength parameters (Unit:MPa)

材料名称	抗压强度标准值	抗拉强度标准值
C35混凝土	23.4	2.20
C45混凝土	29.6	2.51
HRB400	400	540

71m,且车站结构底板下部设有众多抗拔桩,在地震作用下车站结构的刚体转动可忽略不计。因此,在设计模型时,假定模型底部边界固定。具体的模型结构细节及主要构件配筋如图1所示。

1.2 模型相似关系设计

试验方案采用Buckingham- π 定理,以几何尺寸、弹性模量和密度相似比为基本量,推导求得其他未知相似比,列在表2中。为正确反映原型结构的弹塑性性质,依据量纲分析结果,模型结构采用与原结

构相同的混凝土和钢筋。根据相似关系,需要增加配重以模拟结构缩尺后增大的结构密度。由于模型中仪器布置密集,且配重安放空间有限,采用直接在结构顶部施加竖向荷载的方法代替配重。通过前期数值模拟验证,该加载方法可以确保底部中柱轴压比保持恒定。

表2 模型结构相似比

Tab.2 Similarity ratio of model structure

类型	物理量	相似比
几何特性	长度	0.10
	线位移	0.10
	角位移	1.00
	面积	0.01
	材料特性	弹性模量
材料特性	等效密度	10.0
	应力	1.00
	应变	1.00
	泊松比	1.00
	荷载	力
荷载	线荷载	0.10
	面荷载	1.00
	弯矩	0.001

1.3 加载装置

试验在同济大学嘉定校区地震工程馆进行,借助于大型反力墙和箱型地锚组成的静力实验平台开展试验工作。其他主要试验设备包括垂直与水平向的伺服作动器、分配梁、反力架、预应力拉杆与测量装置等。实际制成并安装后的模型如图1所示,通过锚杆将模型基座固定在箱型地锚上。侧向通过3台伺服作动器模拟地震动土压,量程分别为500kN,1 000kN和2 000kN。

1.4 仪表布置方案

图2为观测面上模型结构的测量装置布置,包括134片应变片、13个拉线式位移计、10个力传感器,图中S、D和L分别代表应变片、拉线式位移计和力传感器,括号表示垂直截面方向上前后布置。

其中,力传感器用于测量施加侧向预应力的力大小,布置在对应的预应力拉杆上。拉线式位移计用来测量测点的绝对位移。采用钢管搭设拉线式位移计固定架并固定于箱型地锚上,将拉线式位移计安装于固定架上。根据前期研究,将应变片布置在易破坏部位,包括结构构件交界处及中柱端部。由于在顶部存在分配梁,在左侧墙存在作动器的安装,这两处应变片无法布置在中部,选择沿纵深方向前后各布置一片,计算其平均应变,以表示中部的对应应变。

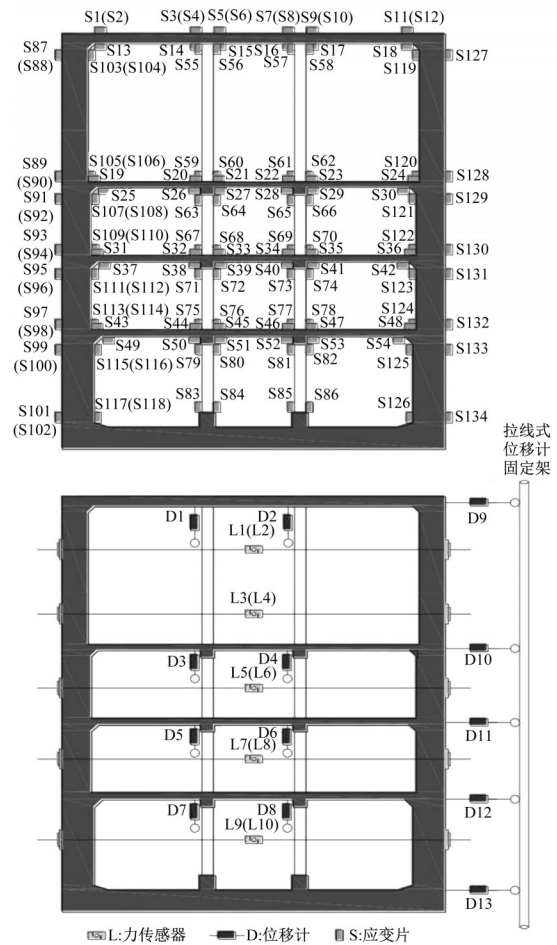


图2 模型结构观测面传感器布置

Fig.2 Sensor layout of model structure viewing plane

2 试验加载方法

2.1 初始静荷载模拟

多层地铁车站结构所受的静力荷载主要包括地面超载、上覆土自重、侧向静止水土压力。其应在地震动作用模拟前加载完成。如图3所示,模拟方式分为两类:

(1)上覆土荷载、地面超载及配重通过竖向作动器模拟,并通过两根分配梁均匀传递到主体结构上,以实现竖向荷载的均匀分布。竖向作动器作用力大小均为198kN。

(2)侧向静止水土压力通过在模型结构预留孔洞并布置预应力拉索来模拟。按计算得到由上到下五根预应力拉索预设拉力分别为12kN、26kN、31kN、34kN、67kN。为避开作动器,并使得静力荷载的施加更均匀,采用10根预应力拉杆分为5组,每组两根布置在侧墙上。拉杆上安装垫片,经前期验算以确保不发生混凝土局部压坏。

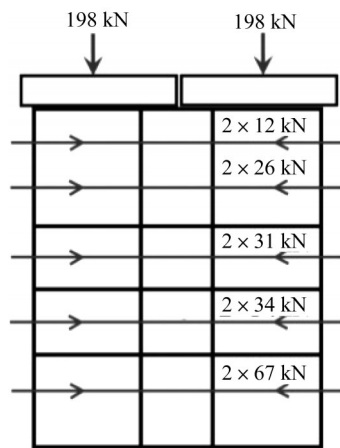


图3 静荷载

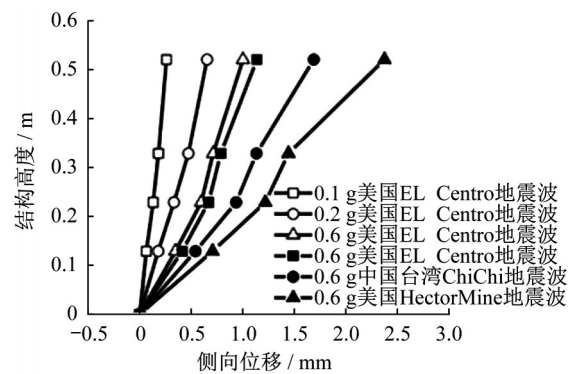
Fig.3 Static load

2.2 侧向位移加载模式

在Pushover试验中所施加的侧向荷载分布必须能够准确反应地震时结构所受到的动力作用。在传统的地上结构Pushover试验中,由于地上结构主要受惯性力作用,因此可以假定结构主要受一阶振型控制,并由此设计基于力的侧向加载模式。一般情况下使用单一作动器模拟水平力,有时通过增加竖向分配梁的方式,调整作动器的位置以实现对各楼层的剪力分配^[20]。而地下结构埋于土中,受到周围土层的约束。以往研究表明^[21-22],地面与基岩间的峰值相对位移即地下结构剪切变形是地下结构抗震设计的重要参数。早期日本学者Tatsumi^[23]等在新型构造形式的地下框架结构往复静力加载试验中引入了顶部最大加载位移的概念,一定程度上体现了水平地震作用下地下结构以剪切变形为主这一思想。刘晶波^[24]通过对地上结构承载力设计方法进行改进,考虑岩土中结构受周围地基约束的特点,提出了地下结构适应于位移的抗震分析及设计方法,并以大开车站^[24]和北京地铁5号线崇文门车站^[25]为算例,通过数值模拟验证在三种水平荷载分布形式下推覆方法在地下结构中的适用性。

Chen等^[26]针对多层地铁车站结构进行了非线性动力时程分析,发现多层地铁车站在地震动作用下,由于结构整体刚度较大,其侧墙在地震中各时刻及最大位移时,均呈现较为规律的倒三角变形模式。Chen等^[1]进一步针对该车站进行大型振动台试验,试验结果表明,不论地震动幅值大小以及是否为脉冲型地震波作用,车站侧墙均保持较为规律的倒三角变形模式,如图4所示。

综合上述研究成果,试验拟采用倒三角位移加

图4 结构侧墙变形模式^[1]Fig.4 Deformation model of structure side wall^[1]

载模式。在试验过程中,全程控制施加在结构上的侧向推覆荷载并维持倒三角分布。控制过程由多点多作动器协调加载实现。

2.3 加载制度

试验中,先对模型结构施加竖向荷载及横向拉索预应力,以模拟竖向及侧向静止水土压力。然后,对模型结构施加侧向位移以模拟附加地震作用。

试验预加载分两级进行,用于检测仪表保证构件接触等。试验时,底部作动器先以每级约200kN进行加载,上、中作动器根据位移传感器反馈位移进行实时调整,以保证结构侧向呈倒三角变形。当加载到达预估结构峰值承载力80%时,按照顶部每级增加5mm位移进行加载,同样协调调整3台作动器保证位移分布。

3 裂缝与塑性铰发展

3.1 裂缝发展现象

按照前述加载制度,安装在结构左侧的3台伺服作动器,逐渐单调加载,向右推进,直至结构破坏,无法继续承担外力。下面就试验过程中观察到的3种典型状态进行描述。

首先,从开始加载至总推力为214kN的加载过程中,结构表面未观察到可见裂缝,结构处于弹性阶段。当总侧向推力达到234kN、层间位移角为1/460时,观察左侧墙外侧、右侧墙内侧出现细裂缝,见图5a和图5b,以大量横向裂缝为主;同时顶层、二层右侧中柱中部出现竖向裂缝,见图5c;底部中柱端部出现横向裂缝,见图5d。此外,侧墙与顶板交界处有两条竖向裂缝,侧墙与二层底板交界处亦有细裂缝。此时标志着结构初步进入塑性,部分混凝土受拉开裂,右墙内侧产生首个塑性铰,见图5b。

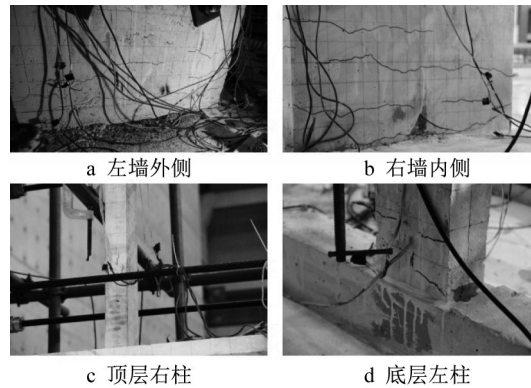


图5 模型结构裂缝分布图(层间位移角=1/460)

Fig.5 Cracks distribution of model structure (story drift angle=1/460)

当进一步加载至428kN、即层间位移角为1/85时,试件裂缝明显增多。裂缝发展主要集中在结构下部。二层底板与侧墙交界处出现贯通裂缝,如图6a。侧墙根部水平裂缝增多,原裂缝变宽,见图6b。顶层右侧中柱裂缝宽度增大。三层中柱根部出现横

向裂缝,见图6c。底层中柱裂缝数量增加,原裂缝宽度增大,见图6d。这一阶段,结构塑性进一步发展,墙、板、柱多处钢筋屈服而丧失进一步承载能力,形成塑性铰。相应位置的变形激增,使得既有裂缝宽度增大乃至形成贯通缝。

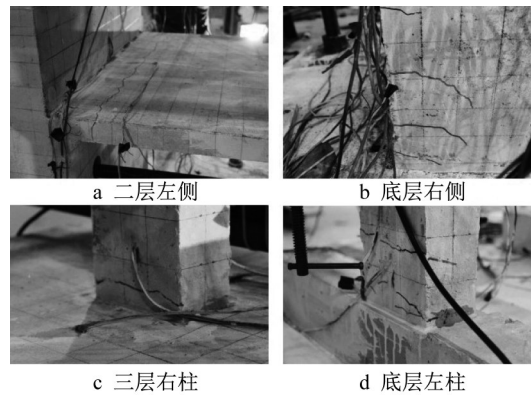


图6 模型结构裂缝分布图(层间位移角=1/85)

Fig.6 Cracks distribution of model structure (story drift angle=1/85)

试验进行至层间位移角等于1/52时,模型结构承载力迅速下降,层间位移角最大达到1/49。除墙体上与每层楼板交界处出现大量裂缝外,二层底板

右侧与侧墙交界加腋处出现贯通裂缝,见图7a。底层左柱明显破坏,产生大量斜裂缝,混凝土剥落,见图7b。三层右柱同样出现宽斜裂缝,见图7c。图7d

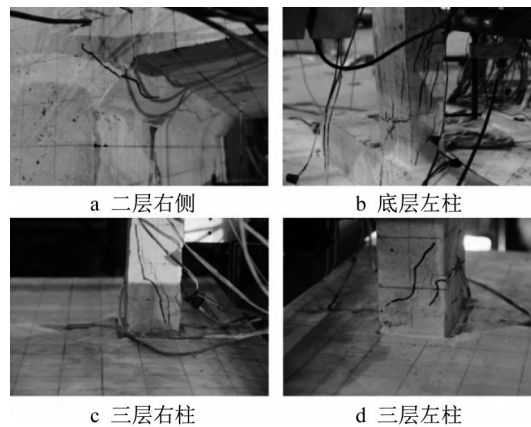


图7 模型结构裂缝分布图(层间位移角=1/49)

Fig.7 Cracks distribution of model structure (story drift angle=1/49)

为三层左柱斜裂缝及水平裂缝。该阶段随各处钢筋屈服,形成大量塑性铰而成为机构,结构整体丧失进一步承载能力,各处混凝土随变形增大出现破坏。至此认为结构发生破坏。

结合试验的裂缝发展现象,模型结构的破坏有以下特征:

(1)从整体结构上看,下层破坏要比上层严重;破坏主要出现在构件节点处,墙与柱的破坏程度大于板。

(2)从局部构件上看,底层中柱破坏最严重,其破坏严重程度大于顶层及二层中柱;在水平推覆过程中,中柱端部首先出现水平裂缝,其后出现斜裂缝。侧墙裂缝基本为水平,且墙体根部破坏严重。楼板破坏主要发生在与侧墙交界处,即节点倒角处附近,主要为沿结构厚度方向的贯通裂缝。

3.2 塑性铰发展与分布

图8展示了模型结构前25个塑性铰的形成顺序。塑性出铰现象,是指结构变形发展过程中,构件局部进入塑性,随着变形增加,构件不再承担附加外力,因而在弯矩基本维持不变的情况下,截面曲率出现激增。该现象发生的局部位置称为塑性铰。试验中,根据某一级加载中各处曲率(根据相应应变片数据换算)激增判定塑性铰的产生。需要注意的是,试验中有部分应变片贴合处恰好有裂缝通过。裂缝扩张时数据异常突变,故无法采集该处材料的有效应变数据,用以评估塑性铰的产生与发展。这些异常点都标识在图8中。

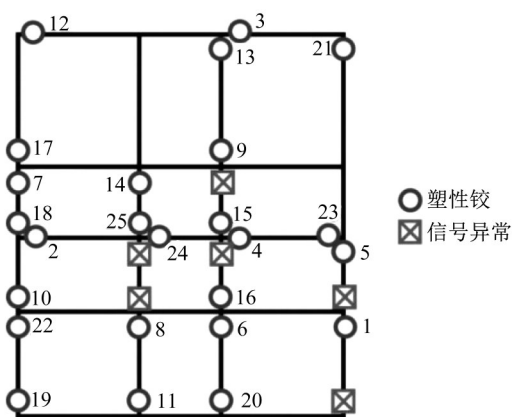


图8 塑性铰发展顺序图

Fig.8 Development sequence diagram of plastic hinges

从图8可以看出,塑性铰首先出现在底层右侧墙,随后楼板与侧墙及中柱交界处分别形成3个塑性铰,其后大量集中形成于中柱及侧墙。前25个塑

性铰中,板上塑性铰共6个,边墙上塑性铰共9个,柱上塑性铰共10个。由于应变片数据异常点均发生在边墙或中柱上,可以推断墙柱中可能存在更多的塑性铰。根据试验数据记录,层间位移角为1/422时,在右侧墙处出现第一个塑性铰。层间位移角为1/103,第20个塑性铰出现时,结构底层左右中柱端部全部出现塑性铰。

4 Pushover 曲线

图9为推覆地铁车站结构得到的Pushover曲线,即底部剪力-顶部位移曲线。其中,顶部位移通过顶部位移计测得,底部剪力为3个伺服作动器上传感器所测得的力的总和。从Pushover曲线可以看到,地下结构在推覆力作用下的状态可以归结为4个阶段。

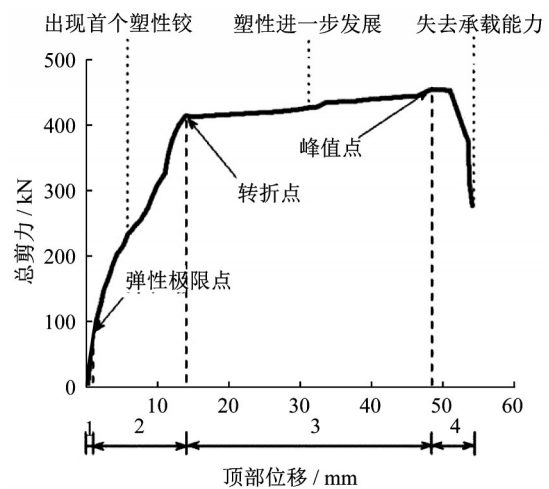


图9 Pushover 曲线

Fig.9 Pushover curve

(1)完全线弹性阶段。加载初始,结构处于完全线弹性状态。当顶部位移为0.59mm时,右侧墙底部混凝土受拉开裂,结构达到弹性极限点;

(2)非线性阶段。由于混凝土开裂,结构刚度略有降低,Pushover曲线在此阶段斜率略有减小。随后,结构右侧墙底部出现大量裂缝,逐渐形成第一个塑性铰。此时,结构刚度有明显的变化,Pushover曲线斜率发生显著的第2次下降。在侧向推覆力持续作用下,结构各构件(侧墙、楼板端)依次发生钢筋屈服,形成塑性铰,直至底层右侧中柱上端产生第6个塑性铰,此时,Pushover曲线达到转折点,对应顶部位移14.01mm,底部剪力417.96kN。可以看到,一旦中柱端部塑性铰形成,那么结构基本上失去了进

一步承受附加侧向水平推覆力的可能;

(3)结构进入第3阶段后,塑性铰数量和发生区域不断拓展。由于钢筋强度硬化,结构承受侧向推覆力仍略有提升,顶部侧向位移持续增大,显示了所设计结构具有较好的延性。可以观察到结构构件上出现数量众多的横向裂缝,且裂缝较宽。在这一阶段中,可以发现底层左柱、三层右柱已发生严重弯曲变形,丧失承载能力。随位移的继续增大,主要抗侧向力构件均发生混凝土压碎现象,此时曲线到达峰值点,结构达到承载力最大值;

(4)越过峰值点(顶部位移47.71mm,底部剪力461.76kN)后,车站结构承载能力骤降,三层及底层中柱出现大量斜裂缝,发生受剪破坏,至此结构破坏。

在Pushover曲线基础上,根据通用屈服弯矩法(G. Y. M. M)^[27],可以几何做图得到有关本试验结构抗震性能的关键点,如图10所示。其中结构等效屈服位移 Δ_y 为9.85mm(层间位移角1/267),对应屈服荷载 P_y 为309.41kN。承载力峰值对应的位移 Δ_{max} 为48.32mm(层间位移角为1/54),承载力峰值 P_{max} 为456.53kN。定义极限荷载为最大荷载值下降85%时对应的结构承载力,此时的结构性能点为极限点。相应的极限位移 Δ_u 为53.09mm(层间位移角1/50)。位移延性系数为结构极限位移与屈服位移之比,常用来评价结构在动力作用下的变形能力^[28]。对于该模型结构,延性系数为5.39,属于延性较好的结构。

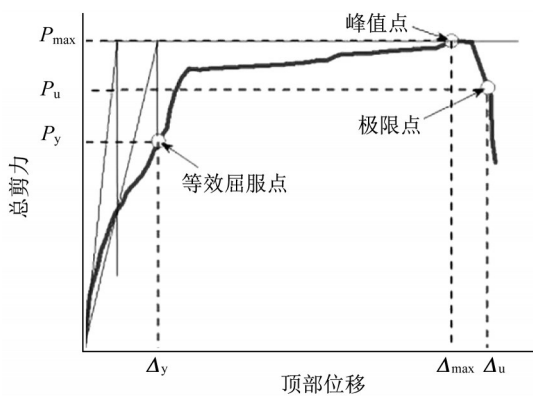


图10 Pushover曲线关键点

Fig.10 Key points of pushover curve

5 破坏模式分析

5.1 结构变形模式

结构每层楼板的侧向位移由左侧作动器测量得

到(由于受作动器尺寸限制,第2层楼板处没有测量)。中柱端部8个位移值由竖向布置位移计测得绝对位移,右侧4个位移值由水平布置的位移计测得绝对位移。图11是模型结构的最终变形图,作为示意,将实际测量得到的变形放大了10倍。

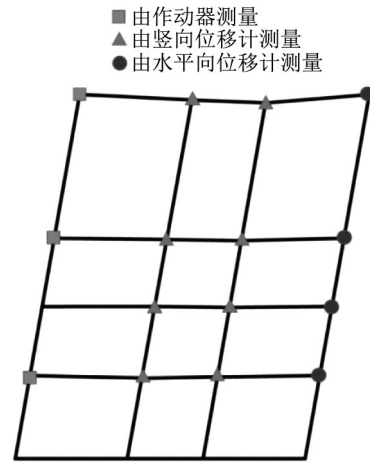


图11 模型结构变形图

Fig.11 Deformation diagram of model structure

从图11可以看出,由于侧墙刚度很大,结构两侧边墙变形均保持倒三角形。此外,在竖向轴压和侧向推力的联合作用下,右侧中柱受压明显,并且,由于顶层层高,中柱长度也大,首先发生破坏,顶板在该中柱处发生了凹陷。这与试验现象中,上层中柱裂缝首先出现在右侧中柱,并在右侧中柱大量分布的现象相符合,结构的变形模式可以由此推断。不难看出,在具有较大竖向地震动作用时,高层高以及高轴压的联合作用将加剧多层车站结构中柱的 $P-\Delta$ 效应,使得具有类似结构特征的地铁车站更易于破坏。

5.2 结构破坏模式

通过上述分析,此类地下结构的破坏模式可以归纳为以下3点特征:

(1)模型地下结构破坏呈混合铰破坏模式,偏向于柱铰模式。

地震作用下,地上框架结构的典型破坏模式按塑性铰出现的位置分为3种:梁铰模型、柱铰模式、混合铰模式^[29]。从图8塑性铰的发展趋势中也可以看到,塑性铰主要集中在侧墙和中柱上,楼板端部仅有少许。即属于混合铰破坏机制,但偏向于柱铰机制(框架柱端出现塑性铰而梁端仍处于弹性状态)。

梁铰模式指梁端先出现塑性铰,柱端仅在破坏阶段可能形成柱脚的塑性铰。这种模式在地震过程中通过梁铰的充分转动来耗散地震能量,使结构具

有较好的延性和耗能能力。一般情况下,地上结构遵循“强柱弱梁”的设计理念,其破坏为梁铰模式^[30]。而对于地下结构,梁沿结构纵向分布。当进行结构横向抗震设计时,板的尺寸、刚度要远大于中柱,且为抵御水土压力,地下连续墙及侧墙的几何尺寸和配筋量也相对于地上结构偏大。模型结构因此表现出不同于地上结构的破坏模式。

(2)中柱是地下结构抗震的薄弱环节。

由于受到周围土体的约束,地下结构并不会发生侧向倒塌,从神户大开车站的历史震害资料与研究^[31-33]来看,往往是中柱破坏从而造成车站结构内塌。从图8、图11可以看到,顶层右柱两端出现塑性铰后,随着进一步侧推,结构顶板中部下陷。在实际地震时,结构还可能承受一定的竖向地震作用,增大中柱轴向压力。中柱在侧向剪力和轴向压力的复合作用下,承载能力急剧下降,发生破坏,车站结构也更易出现内塌。因此,无论是单层地下结构(大开车站)还是本次试验的多层地铁车站,中柱始终是地下结构的薄弱环节,也是影响整体结构破坏的关键构件。

从塑性发展顺序上看,最早出现两端塑性铰的构件为底层左侧中柱,其次是顶层右侧中柱;从数量上看,8根中柱有4根两端出现塑性铰(另有3根由于应变片数据异常不能判断是否出现),8面侧墙有2面发生两端塑性铰,单跨楼板则没有两端塑性铰。从抗震角度,塑性铰最理想的出现顺序应为:冗余构件、次要构件、普通构件、重要构件、关键结构构件^[27]。典型地上结构的推覆试验结果^[30]可以看到,框架梁等构件作为第一道防线率先产生塑性铰,消耗地震能量并改变整体结构的动力特性,保护了框架柱等重要构件,避免结构倒塌。而以本研究模型为代表的地下结构,则是由于中柱的优先破坏导致结构整体破坏。

(3)结构下部比上部破坏严重。

试验现象与1995年阪神地震中大开车站双车站厅结构的震害现象一致^[34]。在该结构中,下层中柱严重破坏而上层未发生破坏。试验结构原型位于上海,是典型的软土地质条件,地下连续墙深入地表以下71m,且底板下有较多抗拔桩,因而结构底板约束很强,不易发生位移。因此,在试验倒三角侧向力的推覆下,多层地下车站结构呈现与地上结构^[30]相类似的破坏特征:底层剪力最大,从而导致结构下部破坏比上部严重。

另一个值得注意的现象是,由于结构功能要求,

原型结构顶层层高,中柱长度明显大于其他层中柱,导致该层抗侧刚度明显低于其他层。在上覆土重(以及竖向惯性力)及侧向剪力的联合作用下,中柱极易发生弯剪轴复合破坏。如图8所示,顶层右柱上下端较早出现了塑性铰,其中顶层右柱上端塑性铰与之前出现的顶部塑性铰形成区域性破坏,极易导致结构局部塌陷,形成类似于大开车站M型向内塌陷的破坏模式。从这一角度看,地上结构抗震设计所强调的保证均匀的结构层间刚度也同样适用于地下结构。

5.3 中柱破坏模式

以往历史震害表明,中柱作为地铁车站结构的薄弱环节,其破坏可能导致结构整体的垮塌。例如,阪神大震灾调查委员会在《阪神·淡路大震灾调查报告》中指出^[33],由于中柱变形性能不足或抗剪承载力不足,较之于边墙,先发生中柱的破坏;不管中柱是剪坏还是弯坏,总之由于中柱的破坏,从而使得其支撑的顶板塌陷,造成整体结构的崩坏。

试验中可以观察到,底层中柱首先出现横向裂缝,表明其受弯,根部受拉出现混凝土开裂;加载到层间位移角为1/85时候,横向裂缝扩展;试验最终出现斜裂缝以及混凝土剥落,是典型的受剪破坏。

图12为底层左侧中柱轴力-弯矩加载曲线以及弯矩-轴力承载能力曲线,图中加载历程曲线展示了从开始到结构破坏后一段时间内的数据。

图12中,中柱加载历程曲线与承载能力曲线的

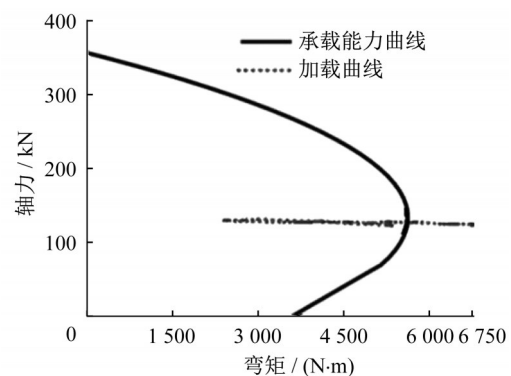


图12 底层左侧中柱承载能力曲线及加载曲线

Fig.12 Loading capacity curve and loading curve of left column of the bottom floor

交点表示构件发生受弯破坏。计算得到,此时剪力约为23.88kN,小于底层中柱抗剪承载力36.85kN。因而可以判断该地铁车站底层中柱先发生受弯破坏,与上文所述的试验现象一致。此外,值得注意的是,由于底层中柱轴压比较大,中柱处于介于大偏心

受拉破坏和小偏心受压破坏的界限破坏状态。所以该地铁车站结构面对竖向地震动时,轴压比的增大导致中柱延性减小脆性增大,对抗震不利。

6 结论

以上海市某多层地铁车站为背景,提出了一种多层地铁车站结构推覆试验的合理试验方案,开展了1:10地铁车站结构Pushover性能试验。对试验过程、现象进行了详细的描述,并对试验结果进行了详细地分析,归纳和总结该类地铁车站结构抗震性能主要特点如下:

(1)模型结构呈现混合铰破坏模式,偏向于柱铰模式。

(2)地下结构Pushover性能曲线呈现较明显的4个阶段,即:线弹性阶段、非线性阶段、屈服及强化阶段和破坏阶段。在本次试验中,地下结构模型达到屈服、最大承载力、极限位移时,其层间位移角分别为1/267,1/54,1/50。结构延性系数为5.39,延性较好。

(3)中柱是地铁车站结构的抗震薄弱环节,在侧向推覆力和顶部竖向轴力的联合作用下,底层中柱首先出现横向细裂缝,裂缝不断加宽并横向贯通,最终出现斜裂缝,混凝土剥落,中柱弯剪轴复合作用下破坏。底层中柱破坏最严重,远大于顶层及二层中柱。

参考文献:

- [1] CHEN Z Y, CHEN W, LI Y Y, *et al.* Shaking table test of a multi-story subway station under pulse-like ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 82(1): 111.
- [2] 周颖, 卢文胜, 吕西林. 模拟地震振动台模型实用设计方法[J]. *结构工程师*, 2003, 35(3): 30.
ZHOU Ying, LU Wensheng, LÜ Xilin. Practical model design method of shaking table tests[J]. *Structural Engineers*, 2003, 35(3): 30.
- [3] 杨林德, 杨超, 季倩倩, 等. 地铁车站的振动台试验与地震响应的计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(10): 1135.
YANG Linde, YANG Chao, JI Qianqian, *et al.* Shaking table test and numerical calculation on subway station structures in soft soil[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003, 31(10): 1135.
- [4] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 软土地铁车站结构的振动台模型试验[J]. *现代隧道技术*, 2003, 40(1): 7.
YANG Linde, JI Qianqian, ZHENG Yonglai, *et al.* Shaking table test on metro station structures in soft soil[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2003, 40(1): 7.
- [5] 陶连金, 王沛霖, 边金. 典型地铁车站结构振动台模型试验[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(9): 798.
TAO Lianjin, WANG Peilin, BIAN Jin. A shaking table test method on the representative subway station structure[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(9): 798.
- [6] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 等. 土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(2): 171.
CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang, DU Xiuli, *et al.* Analysis of large-scale shaking table test of dynamic soil-subway station interaction[J]. *Earthquake Engineering and Engineering*, 2007, 27(2): 171.
- [7] 袁勇, 禹海涛, 燕晓, 等. 超长沉管隧道多点振动台试验模拟与分析[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(12): 157.
YUAN Yong, YU Haitao, YAN Xiao, *et al.* Multi-point shaking table test simulation and analysis of a super-long immersed tunnel[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(12): 157.
- [8] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation[J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(4): 452.
- [9] 梁兴文. 结构抗震性能设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
LIANG Xingwen. Theory and method of structural seismic performance design[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [10] 程玲, 贡金鑫, 李颖. 基于Pushover方法分析的受腐蚀钢筋混凝土柱抗震性能评价[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(10): 19.
CHENG Ling, GONG Jinxin, LI Ying. Seismic evaluation of corroded reinforced concrete columns based on Pushover analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(10): 19.
- [11] 刘磊, 赵宝成. 连柱支撑与K形偏心支撑钢结构的Pushover对比分析[J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2016, 29(2): 19.
LIU Lei, ZHAO Baocheng. Pushover contrastive analysis of linked columns braced with K-eccentrically braced steel structures[J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology(Engineering and Technology)*, 2016, 29(2): 19.
- [12] 张猛, 李瑶亮, 赵桂峰, 等. 锈蚀钢筋混凝土框架结构抗震性能Pushover分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2016, 38(3): 35.
ZHANG Meng, LI Yaoliang, CHENG Ling, *et al.* Seismic performance analysis of corroded reinforced concrete frame structures using pushover[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2016, 38(3): 35.
- [13] 潘文. Pushover方法的理论与应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
PAN Wen. Theory and application of push-over method[D]. Xian: Xian University of Architecture and Technology, 2004.
- [14] 徐琨鹏. 地下结构拟静力抗震分析方法及推覆试验研究[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2019.

- XU Kunpeng. Study on pseudo-static seismic analysis method of underground structures and pushover test [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019.
- [15] 曾良岡宏, 足立正信, 本田国保, 等. 地中ボックスカルバートの变形性能に関する実験的研究(耐震一般)[J]. コンクリート工学年次論文集, 2001, 23(3): 1123.
- [16] 松尾豊史, 松村卓郎, 岩森暁如, 等. 鉄筋腐食したRCボックスカルバートのせん断耐荷力に関する実験的検討(耐震性能評価)[J]. コンクリート工学年次論文集, 2008, 30(3): 1075.
- [17] 孔令俊. 大型钢筋混凝土箱涵结构拟静力试验与数值分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- KONG Lingjun. Pseudo-static test and numerical analysis of large reinforced concrete box culvert [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [18] 杜修力, 刘洪涛, 许成顺, 等. 装配整体式地铁站纵断面方向梁板柱中节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 95.
- DU Xiuli, LIU Hongtao, XU Chengshun, *et al.* Study on seismic performance of beam-column-slab interior joints in cross section of assembled monolithic subway station [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9): 95.
- [19] 杜修力, 刘洪涛, 路德春, 等. 装配整体式地铁站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 38.
- DU Xiuli, LIU Hongtao, LU Dechun, *et al.* Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 38.
- [20] 马军卫. 新型全装配式混凝土框架一剪力墙结构抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- MA Junwei. Study on seismic behavior of the new full precast concrete shear-wall frame structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [21] 李彬, 刘晶波, 尹骁. 双层地铁站的强地震反应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 779.
- LI Bin, LIU Jingbo, YIN Xiao. Seismic response analysis of double-deck subway station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 779.
- [22] 李彬, 刘晶波, 刘祥庆. 地铁站的强地震反应分析及设计地震动参数研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 17.
- LI Bin, LIU Jingbo, LIU Xiangqing. Study on seismic responses of a subway station and design parameters of ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 17.
- [23] 遠藤達巳, 竹内幹雄, 坂上明. 地中に埋設されるボックスカルバートの耐震性向上構造形式の提案[R]. 東京: 電力土木技術協会, 1998.
- [24] 刘晶波, 李彬, 刘祥庆. 地下结构抗震设计中的静力弹塑性分析方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 68.
- LIU Jingbo, LI Bin, LIU Xiangqing. A static elasto-plastic analysis method in seismic design of underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 68.
- [25] 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.
- 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.
- [26] CHEN Z Y, CHEN W, ZHANG W. Seismic performance evaluation of multi-story subway structure based on pushover analysis [C]//Proceedings of the Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering. [S.l.]: ASCE, 2014: 444-454.
- [27] YANG L, WANG Y, SHI Y. Full-scale test of two-storey composite slim floor under pseudo-dynamic and pseudo-static loadings [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(2): 173.
- [28] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1989, 22(3): 155.
- [29] CHOI S W, KIM Y, LEE J, *et al.* Minimum column-to-beam strength ratios for beam-hinge mechanisms based on multi-objective seismic design [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88: 53.
- [30] 朱树根, 倪雪, 胡克旭. 钢筋混凝土框架结构震损定量评定方法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(S2): 32.
- ZHU Shugen, NI Xue, HU Kexu. Researches on the method of damage assessment for RC frame structures in earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S2): 32.
- [31] NAKAMURA S. Evaluation of damage mechanism of subway station based on the difference damage between two damaged subway stations due to the earthquake [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2000 (654): 335.
- [32] PARRA-MONTESIONS 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.
- [33] 阪神大震災調査委員会. 阪神・淡路大震災調査報告[M]. 東京: 昭和堂印刷所, 1996.
- [34] NAKAMURA S, YOSHIDA N, IWATATEL T. Damage to Daikai subway station during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake and its investigation [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 1996(537): 287.