

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202107006

## 地下结构抗震拟静力试验研究现状及展望\*

杜修力<sup>1</sup>, 韩润波<sup>1</sup>, 许成顺<sup>1</sup>, 许紫刚<sup>2</sup>

(1.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; 2.华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室,江西 南昌 330013)

**摘要:**拟静力试验由于几何缩尺比较大、可采用真实材料及可实现破坏性试验等优点而被广泛应用于地下结构抗震问题研究中。由于试验对象的不同,地下结构抗震拟静力试验可分为构件层面、结构层面及土-结构体系层面。列举了一些近年来开展的各层面下典型地下结构抗震拟静力试验,分析了各类拟静力试验的优缺点,探讨了地下结构抗震拟静力试验的发展趋势,介绍了弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验方案,基于此方案开展了试验,并采用数值模拟手段初步验证了试验方法的有效性,总结了弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验设计中的重、难点,为地下结构抗震拟静力试验的发展提供参考与借鉴。

**关键词:**地下结构;拟静力试验;抗震性能;弹簧-地下结构体系;土-结构相互作用

**中图分类号:** TU92    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0850-10

## Research Status and Prospects of Quasi-static Test for Seismic Research of Underground Structures

DU Xiuli<sup>1</sup>, HAN Runbo<sup>1</sup>, XU Chengshun<sup>1</sup>, XU Zigang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Quasi-static test is widely used in seismic research of underground structures due to its large scale, real materials and failure simulation capacity. According to the test objects, quasi-static test of underground structure can be divided into the quasi-static test at component level, the quasi-static test at structural level and the quasi-static test at soil-structure system level. This paper listed some typical quasi-static tests on underground structures, analyzed the advantages and disadvantages of different types of quasi-static tests, discussed development trend of the quasi-static test for seismic research of underground structures, introduced a quasi-static pushover test scheme of spring-underground structure system, and carried out a test based on this test scheme. Numerical simulation method was used to verify the effectiveness of the new test method, and difficulties in designing quasi-static pushover test of spring-underground structure were summarized to provide references for development of quasi-

\* 收稿日期:2021-07-06;修回日期:2021-08-21

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1504305)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)、教育部“创新团队发展计划”(IRT13044)资助

作者简介:杜修力(1962—),男,教授,博导,博士。主要从事地震工程学研究。E-mail:duxiuli@bjut.edu.cn

static test of underground structures.

**Keywords:** underground structures; quasi-static test; seismic performance; spring-underground structure system; soil-structure interaction

## 引言

近年来多次震害调查记录显示地下结构也可能在强震作用下发生破坏<sup>[1-3]</sup>,地下结构震坏后修复难度大、修复费用高,因此需要对其进行充分的抗震分析与研究。地下结构广泛存在于很多地震活跃区域,但由于地震发生的不确定性和随机性,很难记录到有关地下结构的地震破坏过程,只能在震后观察地震影响范围内地下结构的震害现象,积累人们对地下结构地震响应的认知及经验。通过震害记录进行地下结构抗震研究受到较大限制,因此开展模型试验研究十分必要<sup>[4-6]</sup>。模型试验通常是将试验对象缩尺后开展的,有较好的经济性和较强的实用性,且试验条件可控,补充了震害记录数据的不足,为研究地下结构地震作用下反应特性及灾变机理提供了有力支撑。常用的试验方法分为动力试验<sup>[7-12]</sup>及拟静力试验<sup>[13-20]</sup>,其中,动力试验又分为普通振动台试验及离心机振动台试验。动力试验中,在1g重力环境下开展的普通振动台试验存在重力失真的问题,较难实现破坏性试验;对于在Ng重力环境下开展的离心机振动台试验,受限于振动台承载能力和尺寸,模型结构通常较小,难以反映其细部构造,且数据测试困难。由于受到周边土体约束作用,地下结构几乎不表现结构自振特性,其地震反应主要取决于周边土体变形<sup>[21]</sup>,因此拟静力试验也常用于地下结构抗震研究中。拟静力试验中模型尺寸相对较大,可以较好地反映地下结构的细部特征,试验现象易于观察,可采用真实材料,因而试验结果较为可靠,且可通过调整竖向加载控制结构轴压比,适合研究地下结构抗震性能问题。

## 1 典型地下结构抗震拟静力试验及其优缺点分析

拟静力试验包括试验体在水平往复荷载作用下的拟静力试验及在水平单向荷载作用下的拟静

力推覆试验<sup>[20]</sup>。拟静力试验是目前抗震试验中应用十分广泛的试验方法。根据研究对象的不同,拟静力试验可分为三个层面:构件层面<sup>[13-15]</sup>、结构层面<sup>[16-18]</sup>及土-结构体系层面<sup>[19-20]</sup>。

### 1.1 构件层面的拟静力试验

当拟静力试验的研究对象为梁、柱或梁柱节点时,此类试验称为构件层面的拟静力试验。杜修力等<sup>[13-15]</sup>开展了一系列地下结构构件及梁柱节点拟静力试验,对地下结构装配整体式车站预制拼装柱及梁柱节点的抗震性能进行了研究,分析了预制拼装柱、梁柱节点灌浆套筒连接抗震性能及轴压比等因素对构件抗震性能的影响,试验方案如图1所示。

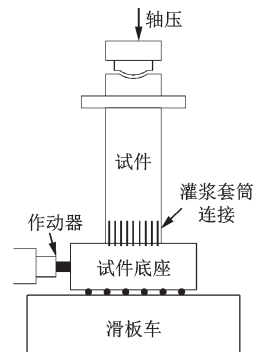


图1 地铁车站预制拼装柱拟静力试验示意

Fig.1 Diagram of quasi-static test of precast assembled column of subway station

构件层面的拟静力试验通常是将结构关键构件作为试验研究对象,采用试验装置将构件一端约束,对构件施加竖向荷载调整其轴压比,对构件另一端施加水平低周往复荷载以研究构件的破坏形态、滞回特性及耗能性能等,单构件拟静力试验简化如图2所示。

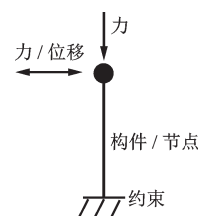


图2 构件层面的典型拟静力试验示意

Fig.2 Diagram of typical quasi-static test at component level

## 1.2 结构层面的拟静力试验

当拟静力试验的研究对象为整个结构体时,此类拟静力试验称为结构层面的拟静力试验。川西智浩等<sup>[16]</sup>开展了结构体拟静力推覆试验研究,模型结构为两跨中墙涵洞结构,底部固定,顶部施加单调递增的强制水平位移,试验示意如图3所示,分析试验结果得到了结构在不同层间位移下的损伤情况及结构整体的抗侧力性能曲线。孔令俊<sup>[17]</sup>在验证了地下结构拟静力试验的可行性基础上,通过系列拟静力试验及数值模拟分析了箱涵结构的薄弱位置、承载力等情况,并对节点区域提出合理加腋坡度的建议。

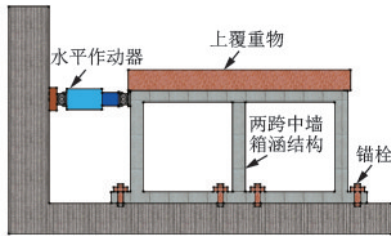


图3 川西智浩开展的结构体拟静力推覆试验示意

Fig.3 Diagram of quasi-static pushover test of underground structure carried out by Kawanishi T

陈之毅等<sup>[18]</sup>开展了多层地铁车站大型推覆试验,试验中采用倒三角分布的侧向位移推覆加载模式,并通过施加预应力锚索措施较好地模拟了地下结构初始应力状态,分析试验结果得到了该多层地铁车站破坏过程、破坏形态、薄弱环节及结构抗震性能,试验示意如图4所示。

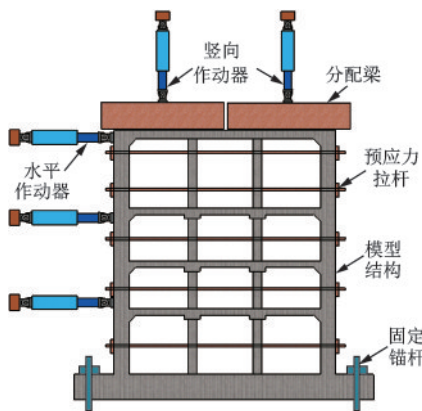


图4 考虑初始地应力的结构体推覆试验

Fig.4 Diagram of pushover test of underground structure considering initial ground stress

结构层面的拟静力试验是将结构整体作为试验研究对象,试验中通常采用装置将结构体底部约束,对结构体顶部施加低周往复或单向推覆荷载,以研究结构体在地震作用下的破坏形态、抗震性能及薄弱构件等,试验简化示意如图5所示。

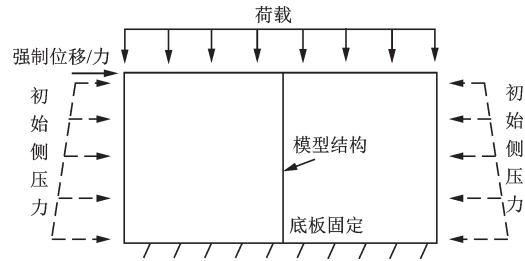


图5 结构层面的拟静力推覆试验示意

Fig.5 Diagram of typical quasi-static pushover test at structural level

## 1.3 土-结构体系层面的相关拟静力试验

当拟静力试验的研究对象为土体或土-结构体系时,此类试验称为土-结构体系层面的拟静力试验。A. A. Shawky<sup>[19]</sup>分析了由JSCE committee开展的土-地下结构体系的拟静力试验,该试验将单层双跨矩形钢砼结构缩尺模型埋置于干砂中,将土-结构整体置于刚性墙模型箱中,上覆重物提高土体应力水平,推动刚性墙顶部对土-结构体系进行静力往复剪切试验,试验示意如图6所示,试验结果分析表明,结构与周围土体的相对刚度是影响土-结构相互作用的重要因素,结构配筋率影响结构水平承载能力及延性特性。徐琨鹏<sup>[20]</sup>开展了土体自由场拟静力推覆试验,研究了土体侧边界强制水平位移为倒三角形分布时,土体中部变形模式及不同深度土体应变衰减特性,试验结果表明,土体中部变形模式沿深度基本呈现倒三角型分布,土体水平基床系数

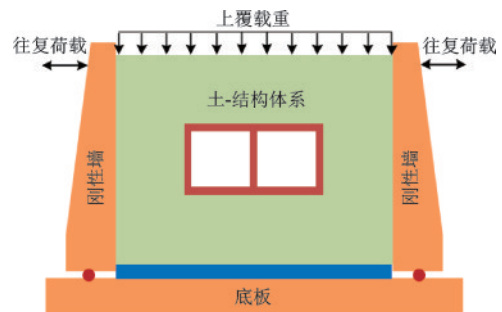


图6 JSCE committee开展的土-结构体系拟静力试验

Fig.6 Quasi-static test of soil-structure system carried out by JSCE committee

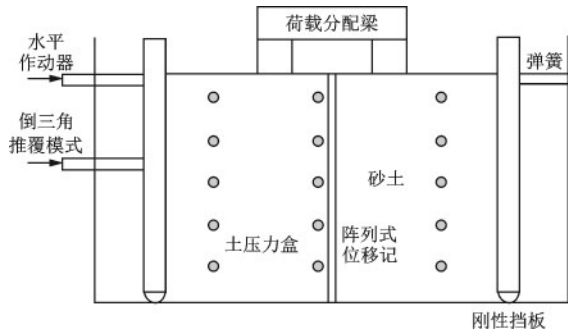


图7 自由场土体拟静力推覆试验

Fig.7 Quasi-static pushover test of free-field soil

与深度呈正相关,试验示意如图7所示。

土-结构体系层面的拟静力推覆试验是对土-结构体系进行横截面平面内的静力剪切变形试验,研究考虑土-结构相互作用的地下结构震害机理、结构破坏形态、结构薄弱构件及结构整体抗震性能,拟静力推覆试验可以通过在土体顶面施加竖向荷载来提高土体的应力水平以模拟真实的结构受力状态,对土体侧面施加特定分布的水平位移以模拟水平地震作用,试验中可以考虑结构初始应力状态、约束条件及土-结构相互作用。试验简化示意如图8所示。

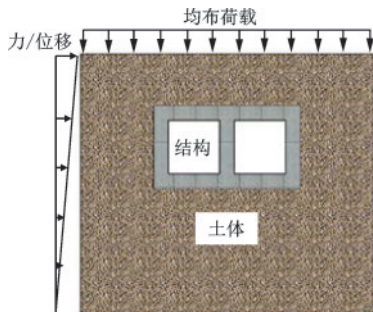


图8 土-结构体系层面的拟静力推覆试验示意

Fig.8 Diagram of quasi-static pushover test at soil-structure system level

#### 1.4 现有拟静力试验优缺点分析

构件层面的拟静力试验由于其试验对象为构件或节点,因此试验中几何缩尺比较大甚至可进行足尺试验,但试验中无法得到结构整体的破坏过程及薄弱环节,通常是根据数值模拟结果结合实际工程经验等预先判断出结构的薄弱构件作为试验对象,再根据试验结果得到结构薄弱构件的抗震能力以判断结构整体的抗震性能,试验中通常无法考虑土-结构相互作用。

结构层面的拟静力试验可以观察结构整体的破坏过程,得到结构体薄弱构件,分析结构整体抗震性能,试验中结构几何缩尺比通常较土-地下结构体系拟静力试验的结构几何缩尺比更大,且可通过一定的试验措施(如施加预应力)考虑结构的初始应力状态,但试验中对地下结构所受约束条件及推覆过程中的土-结构相互作用考虑不够充分,试验成本较构件层面的拟静力试验高。

土-结构体系层面的拟静力试验在结构体层面拟静力试验优点的基础上,可以更好地还原结构在周围土体作用下的初始应力状态及约束条件,并在推覆过程中考虑较为真实土-结构相互作用,但试验工序复杂,工期较长,费用昂贵。

## 2 考虑土-结构相互作用的地下结构抗震拟静力试验装置研发现状及展望

构件与结构的拟静力试验中研究了结构/构件在恒定竖向荷载作用下抵抗水平变形的能力,未充分考虑土体对结构变形的约束作用。刘晶波等<sup>[22]</sup>采用数值模拟手段对比了相同轴压比条件下地下与地上结构的抗震性能,分析了弹性层间位移角限值、结构变形能力及抗倒塌能力,结果表明地下结构由于周边土体约束,其弹性层间位移角限值、变形能力、抗倒塌能力均与地上结构有明显区别,在研究地下结构抗震性能时,考虑结构周围土体的影响十分必要。因此开展地下结构抗震拟静力试验时需考虑土-结构相互作用因素,而土-结构相互作用宏观上主要体现在两方面,一是结构变形过程中土体的约束作用,二是土体的位移分布影响结构所受的荷载分布。这就对土-结构体系拟静力试验中模型箱装置的研发提出了要求。

已有相关学者研发了多种土-地下结构体系拟静力试验模型箱。A. A. Shawky<sup>[19]</sup>开展的土-地下结构体系的拟静力试验中采用刚性墙作为模型箱,此种加载模型箱在推覆过程中两侧刚性墙以相同幅值推覆,在实际试验中被动侧土体可能与模型箱脱开,无法准确地反映土体在地震作用下的剪切变形模式,试验中模型箱装置示意如图9所示。

徐琨鹏<sup>[20]</sup>开展的自由场土体拟静力推覆试验中采用了实际操作性较强的封闭箱+转动墙,此种

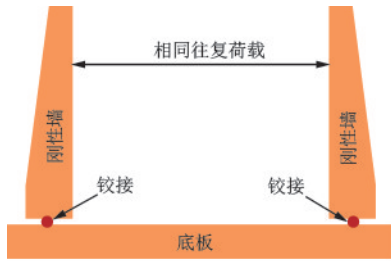


图9 JSCE committee开展的拟静力试验模型箱示意  
Fig.9 Diagram of model box designed by JSCE committee for the quasi-static test

箱体近似于刚性墙模型箱,其在被动侧墙体后方加入钢弹簧模拟远端土体作用,此种箱体可实现倒三角形推覆形式,模型箱装置示意如图10所示。

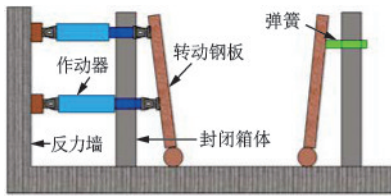


图10 徐琨鹏开展的拟静力推覆试验模型箱示意  
Fig.10 Diagram of model box designed by Xu Kun-peng for the quasi-static pushover test

丁祖德等<sup>[23]</sup>对土-地下结构体系拟静力试验中的刚性墙模型箱进行了改进,在刚性墙模型箱两侧设置了橡胶垫层,可通过变换橡胶垫层类型、局部拆卸等措施以模拟结构周边土体的多种约束情况,模型箱装置示意如图11所示。

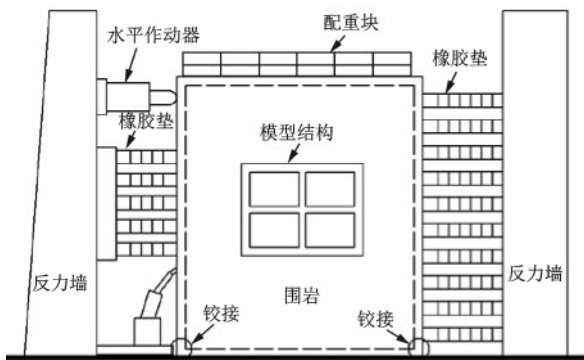


图11 丁祖德等研制的拟静力试验模型箱示意  
Fig.11 Diagram of model box designed by Ding Zude for quasi-static test

杜修力等<sup>[24]</sup>研发了新型土-地下结构拟静力推覆试验装置,该试验装置采用层状剪切箱作为模型箱,如图12所示。

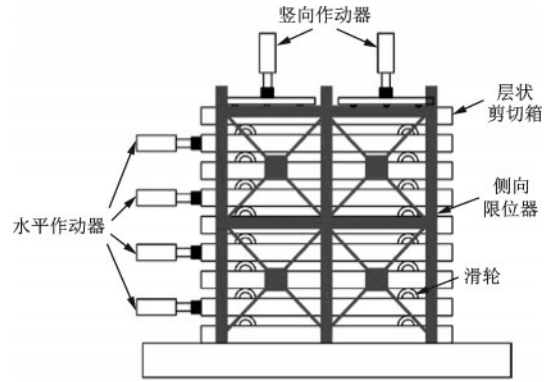


图12 杜修力研制的拟静力推覆试验模型箱示意  
Fig.12 Diagram of model box developed by Du Xiuli for quasi-static pushover test

图12所示试验装置可以通过层状剪切箱结合水平作动器组成的加载系统对土-结构体系施加水平位移来模拟水平地震作用,并通过数值模拟手段验证了在土-地下结构体系拟静力推覆试验中采用层状剪切模型箱的有效性,经数值模拟分析可知,侧边界位移分布形式影响试验中模型结构所受等效地震荷载,进而影响结构内力,侧边界位移分布形式对多层模型结构试验结果影响相对明显<sup>[25]</sup>。因此,开展土-地下结构体系拟静力推覆试验前,除应解决模型土体参数及模型结构周围土体尺寸等问题外,如采用层状剪切箱作为模型箱,试验中侧边界位移分布形式的选取也是试验前需解决的重点问题之一。

然而土-地下结构体系拟静力试验费用较高,试验过程较为复杂,为简化试验过程并同时考虑结构所受约束条件及土-结构相互作用,韩润波等<sup>[26]</sup>提出了考虑土-结构相互作用的弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验装置及方法,可作为一种新的试验技术手段用于地下结构抗震问题的研究中,此装置通过引入弹簧等弹性构件代替土体以近似考虑土-结构相互作用。本文参照上述弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验装置,详细介绍了一个弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验方案,该试验体系由水平作动器1、水平作动器2、竖向作动器、主动墙、被动墙、弹簧、滚轴及橡胶垫组成,如图13所示,其中主动墙及结构底部设置滚轴,被动墙处于固定状态。试验中首先通过水平作动器1推动主动墙,主动墙向结构方向移动并压缩主动侧弹簧,弹簧对结构产生推力,由于结构底部设有滚轴,结构向被动

墙方向移动并压缩被动侧弹簧,当主动墙被推至预设位置时,通过螺栓将其固定于底部钢架上,在结构底部与两侧墙体之间设置手动千斤顶,通过手动千斤顶调整结构位置,使结构两侧弹簧压缩长度一致,此时结构两侧弹簧对结构侧墙产生压力以模拟结构所受初始侧压力,取出结构下方的滚轴,使结构底板落于橡胶垫上,启动竖向作动器对模型结构加压,模拟结构上方所受荷载,随后通过结构底部两侧手动千斤顶限制结构底部水平位移,通过直接作用在结构顶部的水平作动器2对结构进行单向推覆,直至结构破坏,观察结构反应。试验方案中弹簧均仅考虑受压,通过弹簧与结构的相互作用模拟结构所受初始围压、约束条件及土-结构相互作用。

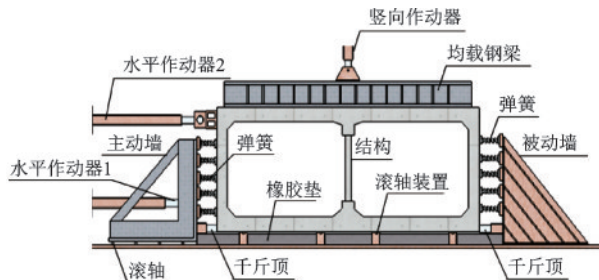


图13 弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验方案示意  
Fig.13 Diagram of the quasi-static test scheme of spring-underground structure system

基于上述试验方案,开展了弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验,如图14所示。模型试验原型为1995年日本阪神地震中破坏的大开车站,几何缩尺比1:5,纵向为一跨,模型结构采用C30混凝土,钢筋采用HRB400钢。

试验在北京工业大学工程力学试验中心开展,模型结构传感器布置方案如图15所示。模型结构薄弱位置受损情况如图16所示。

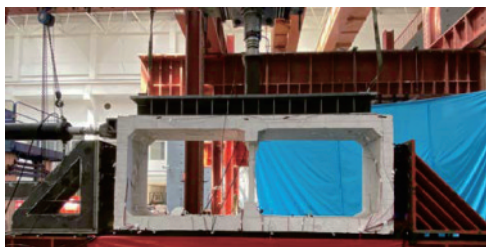


图14 弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验  
Fig.14 Quasi-static test of spring-underground structure system

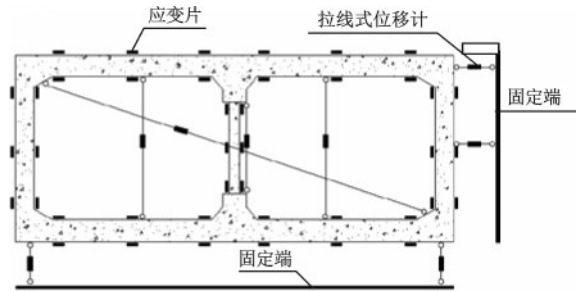


图15 模型结构传感器布置  
Fig.15 Sensor layout of model structure

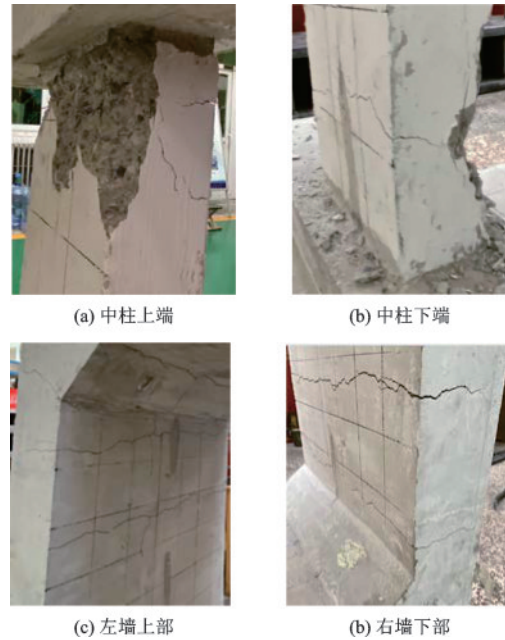


图16 模型结构薄弱位置受损  
Fig.16 Damage at weak positions of model structure

### 3 弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验有效性数值分析

#### 3.1 各试验工况下数值模型及参数

##### 3.1.1 理想试验工况下数值模型及参数

根据地下结构Pushover分析方法,进行地下结构抗震性能试验研究时,理想试验工况是对土-地下结构模型体系进行加速度推覆分析<sup>[27]</sup>。假定试验中模型结构采用单层双跨中柱结构,结构横断面如图17所示,模型结构配筋率为:顶、底板主筋配筋率为1.6%,侧墙主筋配筋率为1.4%,中柱主筋配筋率为3%。模型土体高度为10m,结构埋深为1m。在土体顶部施加50kPa均布荷载以提高整体应力水平,采用倒三角型分布的加速度对整体进行推覆分析,数值模型如图18所示,此工况以下称为试验

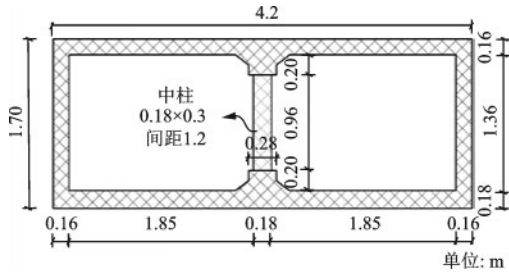


图 17 模型结构横断面

Fig.17 Cross-sectional diagram of model structure

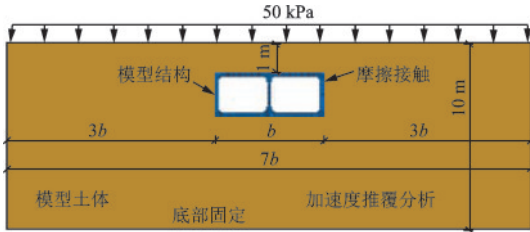


图 18 试验工况 1 数值模型示意

Fig.18 Diagram of numerical model for test condition 1

工况 1。本文采用通用有限元软件 ABAQUS 对文中各试验工况进行二维建模分析,结构及土体均采用平面应变实体单元进行离散,钢筋采用桁架单元进行离散。对土-地下结构整体施加倒三角形分布的水平加速度进行推覆分析,直至结构发生破坏,最终分析得到结构薄弱构件、破坏过程及承载力等。

模型土体采用文献[28]中所述基于 Davidenkov 骨架曲线的非线性粘弹性模型,土体弹性模量为 150 MPa,泊松比为 0.3,密度为 1 800 kg/m<sup>3</sup>,土体性质为砂土,相关参数采用文献[28]中推荐值。钢筋采用理想弹塑性本构模型,弹性模量为 200 GPa,材料屈服强度为 400 MPa。混凝土材料采用塑性损伤本构模型<sup>[29]</sup>,中柱、墙、板混凝土强度为 C30,混凝土弹性模量为 30 GPa,密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>。模型结构中柱在车站纵向为 1.2 m 等间距分布,将其按一定原则等效为墙体后<sup>[30]</sup>,中柱弹性模量取为 7.5 GPa,密度取为 625 kg/m<sup>3</sup>,并相应地调整其塑性损伤模型参数。

### 3.1.2 考虑初始应力状态的结构拟静力推覆试验工况下数值模型及参数

考虑初始应力状态的结构拟静力推覆试验工况数值模型如图 19 所示,模型结构底部固定,结构顶部施加根据 3.1.1 节中模型自重及土体上覆荷载作用下分析确定的初始轴压力,结构两侧施加根据 3.1.1 节中模型自重及土体上覆荷载作用下分析确

定的初始侧压力,在模型结构侧墙顶部施加单向水平位移推覆直至结构破坏。材料参数及结构尺寸等均同 3.1.1 节所述,以下称为试验工况 2。

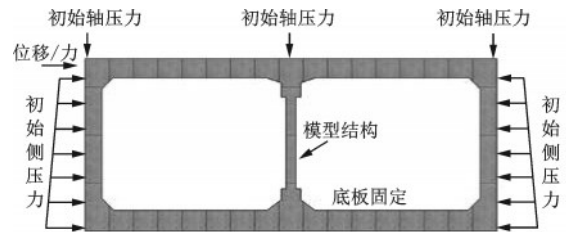


图 19 试验工况 2 数值模型示意

Fig.19 Diagram of numerical model for test condition 2

### 3.1.3 弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验工况下数值模型及参数

弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验数值模型如图 20 所示,模型结构底部及两侧设置弹簧,结构顶部施加根据 3.1.1 节中模型自重及土体上覆荷载作用下分析确定的初始轴压力,结构两侧通过压缩侧弹簧施加根据 3.1.1 节中模型自重及土体上覆荷载作用下分析确定的初始侧压力,限制结构底板水平位移,在模型结构侧墙顶部施加单向水平位移推覆直至结构破坏。弹簧仅能对结构施加轴向压力,底部土体法向基床系数 K1 取  $1.2 \times 10^7$  N/m<sup>3</sup>,侧边土体法向基床系数 K2 取  $9.6 \times 10^6$  N/m<sup>3</sup>,弹簧刚度可根据相应的基床系数及弹簧分布进行计算,材料参数及模型尺寸等均同 3.1.1 节所述,此工况以下称为试验工况 3。

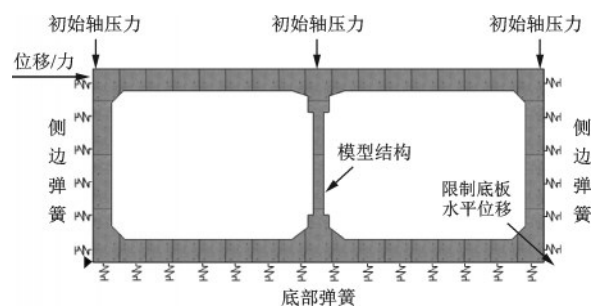


图 20 试验工况 3 数值模型示意

Fig.20 Diagram of numerical model for test condition 3

## 3.2 数值结果分析

根据以往数值模拟结果及工程实践,对于两跨中柱地下框架结构而言,中柱底部及侧墙底部为结构的薄弱部位<sup>[30]</sup>,图 21 中给出了 3.1 节中所述三种试验工况下结构中柱及边墙底部抗震能力曲线数值结果。由图 21(a)可知,由于中柱构件不直接与

土接触,因此上述各试验工况下中柱构件抗震能力曲线差异较小。由图 21(b)、(c)可知,对于侧墙底部截面的抗震能力曲线,本算例中弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验工况下数值计算结果与理想试验工况下数值计算结果吻合相对较好,这是由于在弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验中不仅考虑了结构所受初始荷载条件,同时结构周围约束条件也与理想试验工况较为相似。因此,在地下结构抗震性能试验研究中,弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验方法是有效的。

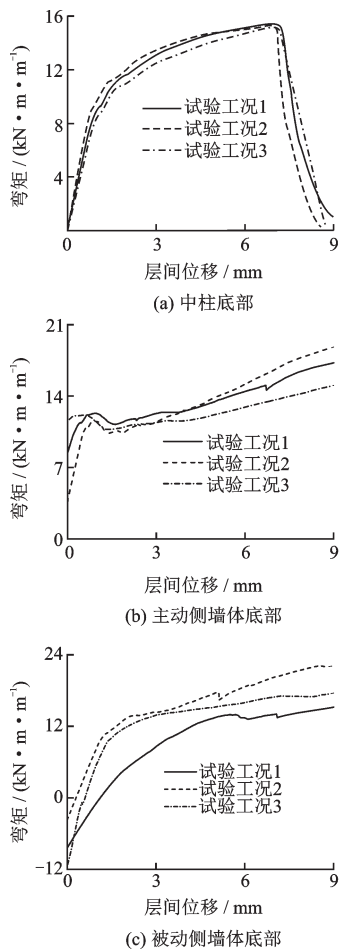


图 21 不同试验工况下模型结构关键构件抗震能力曲线对比

Fig.21 Comparison of seismic capacity curves of the key components under different test conditions

#### 4 弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验设计的重点及难点

(1) 试验中弹簧刚度取值、弹簧位置分布及弹簧与模型结构的接触设置等方面。地震作用下土

体剪切模量随土体剪应变增大而减小,而试验中弹簧刚度通常是常数,因此需要对弹簧刚度取值及弹簧位置分布进行研究,以尽可能反映实际土体变形中的非线性特性。试验前还需要确定弹簧与结构的接触方式,使弹簧尽可能反映地震过程中土体对结构的约束作用。

(2) 水平作动器竖向分布及位移输入模式。地下结构在地震作用下,除土体对结构变形的约束作用外,土-结构相互作用也体现在土体对结构施加的荷载分布,因此需要研究试验中水平作动器竖向位置分布及位移输入模式,尽量真实体现结构所受水平地震作用。

#### 5 结 语

(1) 根据试验对象类别,将地下结构抗震拟静力试验分为构件层面的拟静力试验、结构层面的拟静力试验及土-结构体系层面的拟静力试验,总结了各层面地下结构抗震拟静力试验的优缺点,并探讨了地下结构抗震拟静力试验的发展趋势。

(2) 梳理了可考虑土-结构相互作用的地下结构抗震拟静力试验装置研发现状,介绍了可初步考虑结构所受初始围压、约束条件及推覆过程中的土-结构相互作用的弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验方案,分析了弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验设计中的重、难点,以期为地下结构抗震拟静力试验装置的发展提供参考与借鉴。

(3) 基于提出的试验方案开展了弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验,验证了该试验方案的可行性。

#### 参考文献:

[1] Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. Soils and Foundations, 1996, 36: 283-300.

[2] Jing M W, Litehiser J J. The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake [J]. Earthquake Spectra, 1985, 1(4): 741-757.

[3] 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 X L, Li Y, Xu Ch Sh, 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)
- [4] Yue C Z, Zheng Y L, Deng S X. Shaking table test study on seismic performance improvement for underground structures with center column enhancement[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2019, 13(2): 1950009.
- [5] Wang S W, Zhou Y M, Mi S Y. Shaking table test of multi-story subway station considering soil-structure interaction[J]. Advanced Materials Research, 2013, 694-697:321-324.
- [6] Zhu T, Wang R, Zhang J M. Effect of nearby ground structures on the seismic response of underground structures in saturated sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 146:106756.
- [7] Chen Z Y, Huang P F, Chen W. Seismic response characteristics of multi-story subway station through shaking table test[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(10):136943322199329.
- [8] 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.
- [9] 李立云,王成波,韩俊艳,等.埋地管道-场地地震反应振动台试验研究的场地响应[J].地震工程与工程振动,2015,35(3):166-176.
- Li L Y, Wang Ch B, Han J Y, et al. Analysis of site responses during shaking table test for the interaction between pipeline and soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(3):166-176. (in Chinese)
- [10] Han J Y, Naggar M, Zhao M, et al. Longitudinal response of buried pipeline under non-uniform seismic excitation from multi-point shaking table tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 140(2): 106440.
- [11] Xu Ch Sh, Zhang Z H, Li Y, et al. Seismic response and failure mechanism of underground frame structures based on dynamic centrifuge tests[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(7): 2031-2048.
- [12] Wang J, Liu H Q, Liu H B, et al. Centrifuge model study on the seismic responses of shield tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103036.
- [13] 杜修力,刘洪涛,许成顺,等.不同轴压比下装配整体式地铁站拼装柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(11):11-19.
- Du X L, Liu H T, Xu Ch Sh, et al. Experimental study on seismic performance of precast column in assembled monolithic subway station under different axial compression ratio[J]. Journal of Building Structures, 2018,39(11):11-19. (in Chinese)
- [14] 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):95-103.
- Du X L, Liu H T, Xu Ch Sh, et al. Study on seismic performance of beam-column-slab interior joints in longitudinal section of assembled monolithic subway station[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9): 95-103. (in Chinese)
- [15] 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):38-47.
- Du X L, Liu H T, Lu D Ch, et al. Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station[J]. China Civil Engineering Journal, 2017,50(4):38-47. (in Chinese)
- [16] 川西智浩,清野 純史,井澤淳.開削トンネルの破壊箇所と耐力の関係把握のための静的載荷実験[J].第33回地震工学研究発表会講演論文集,2014,70(4): 1734-1741.
- Kawanishi T, Kiyono J, Izawa J. Static loading tests of cut and cover tunnel to grasp a relationship between a progress of failure and strength[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering Earthquake Engineering (SE/EE)), 2014, 70(4): 1734-1741. (in Japanese)
- [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 L J. Pseudo-static test and numerical analysis of large reinforced concrete box culvert[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [18] 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 Zh Y, Liu W B, Chen W. Performance experiment of a multi-story subway station[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020,48(6):811-820.(in Chinese)
- [19] Shawky A A. A Nonlinear static and dynamic analysis for underground reinforced concrete[D]. Tokyo: University of Tokyo, 1994.
- [20] 徐琨鹏.地下结构拟静力抗震分析方法及推覆试验研

- 究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2019.
- Xu K P. Study on pseudo-static seismic analysis method of underground structures and pushover test [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)
- [21] 王文晖. 地下结构实用抗震分析方法及性能指标研究 [D].北京:清华大学,2013.
- Wang W H. Research on practical seismic analysis methods and performance index of underground structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [22] 刘晶波,兰兴欢,谭辉. 地下与地上钢筋混凝土矩形结构抗震性能对比研究[J].地震工程学报,2019,41(2):271-277.
- Liu J B, Lan X H, Tan H. Comparative study on the seismic performances of underground vs. above-ground reinforced concrete structures with rectangular cross sections [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2):271-277. (in Chinese)
- [23] 丁祖德,张博,李晓琴,等. 一种地下结构拟静力试验装置及方法:中国,CN107132034A [P].2017-09-05.
- Ding Z D, Zhang B, Li X Q, et al. A device and method of quasi-static test of underground structure: China, CN107132034A [P]. 2017-09-05. (in Chinese)
- [24] 杜修力,许紫刚,许成顺. 一种土-地下结构大型拟静力试验装置及方法:中国,CN107202707B [P].2020-01-10.
- Du X L, Xu Z G, Xu Ch Sh. A large quasi-static testing device and method for underground structures: China, CN107202707B [P]. 2020-01-10. (in Chinese)
- [25] 韩润波,许成顺,杜修力,等. 土-地下结构体系拟静力推覆试验模型箱类型的优选[J].岩土力学,2021,42(2):462-470.
- Han R B, Xu Ch Sh, Du X L, et al. Optimization of model box type in quasi-static pushover test of soil-underground structure system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(2):462-470. (in Chinese)
- [26] 韩润波,杜修力,许成顺,等. 一种考虑土-结构相互作用的弹簧-地下结构体系拟静力推覆试验装置及方法:中国,CN111999025A [P].2020-11-27.
- Han R B, Du X L, Xu Ch Sh, et al. A quasi-static pushover testing device and method for spring-underground structure system considering soil-structure interactions: China, CN111999025A [P]. 2020-11-27. (in Chinese)
- [27] 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 J B, Liu X Q, Li B. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4):73-80. (in Chinese)
- [28] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D].南京:南京工业大学,2006.
- Zhuang H Y. Study on nonlinear dynamic soil-underground structure interaction and its large-size shaking table test [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [29] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998,124(8):892-900.
- [30] 杜修力,许紫刚,许成顺,等. 摩擦摆支座在地下地铁站结构中的减震效果研究[J].工程力学,2019,36(9):60-67,88.
- Du X L, Xu Z G, Xu Ch Sh, et al. Seismic mitigation effect analysis on friction pendulum bearing applied in the underground subway station [J]. Engineering Mechanics, 2019,36(9):60-67,88. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)